

不飽和土の粒子間力制御

1999年1月

博士(工学)

新 納 格

豊橋技術科学大学

①

不飽和土の粒子間力制御

1999年1月

博士（工学）

新納 格

豊橋技術科学大学

不飽和土の粒子間力制御

要 旨

不飽和土の力学特性の評価には、土質力学の基礎原理の一つであるTerzaghiの有効応力が適用できず、Bishopの有効応力式等で飽和土に換算して行われる。このような方法で不飽和土を取り扱う理由は、表面物理学的に「土中水の化学ポテンシャルと土の物理化学的性質の間の相互作用によって生じる粒子間力で生成される」と説明される「土の骨格構造を支える機構」の力学的な評価が成されていないためである。この不飽和土の「土の骨格構造を支える機構」を生成する粒子間力は、飽和度が低下するほど力学特性等への影響が増し、土粒子や粒団の移動を拘束するとされ、特に非塑性～低塑性の粘性土を多く含む不飽和土を土質材料として用いた場合に、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られない原因と考えられている。そのような状態の地盤は、地震による液状化や長期にわたる地盤沈下現象、さらに降雨等による飽和度の変化で、大きな地盤沈下や崩壊を起こすことがよく知られている。

このような現状をふまえて、本研究は第1に不飽和土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力の力学的な特性を明らかにすること、第2にその制御法を提案し、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土であっても、工学的に安定した地盤を作製できる締固め方法を提案することを目的とした。なお、本研究での粒子間力は、物理学の慣例に従い反発方向の力を正值とし、不飽和土の粒子間力は大気圧下で負となる。さらに粒子間力を代表する物理量は、間隙空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差のサクシオン $u_a - u_w$ で与えられると考えている。

第1の目的に対して、粒子間力を表面物理学的な視点から理論的に考察し、重力相互作用とそれ以外の電磁的相互作用による粒子間力の2つに間接的に分離して実験的に検証した。その結果、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土の最適含水比、サクシオンおよび圧縮強さは土中水の液体-気体間の液体表面張力の値に比例的に変化し、液体表面張力の値が小さいほど締固め密度が増加することを明らかにした。これらの成果は、不飽和土の力学特性に対する粒子間力の影響を実験的に明らかにした初めてのものである。

第2の目的に対して、第1の目的から得られた成果から、液体-気体間の液体表面張力を非イオン性界面活性剤によって減少させる粒子間力制御法を提案した。この粒子間力制御法による締固め密度の増加効果を室内実験で吟味し、さらに屋外試験および実施工試験でその効果を検証し、実用化の足がかりとなる検討を行った。その結果、室内試験で得られた締固め密度の増加効果を屋外試験および実施工試験において確認し、前述の低い締固め密度が原因で生じる地盤沈下現象等の軽減や防止が期待される。粒子間力制御法による締固め方法を新たに提案した。

Study on regulating mechanisms of the interparticle forces for unsaturated soils

Abstract

The mechanical behaviors of unsaturated soils, which cannot be explained by Terzaghi's effective stress theory and Bishop's theory in most of theoretical studies and engineering practices, are greatly affected by so-called interparticle forces caused by interaction between the physicochemical properties of soil and the free potential energy of water as a part of soil. In accordance with the definition in physics of that the force is positive in the direction of repulsion, the interparticle forces in unsaturated soils generally take a negative value (attraction force) with referring to the atmospheric pressure. The soil suction $u_a - u_w$, the difference between pore gas pressure u_a and pore water pressure u_w , is considered as a proper quantity to represent such interparticle force with negative sign removed for simplification.

As the movement of soil particles and aggregates in compacting practice is hindered by the interparticle forces of the unsaturated soils, the non-plastic or low-plastic sandy and fine-grained soils may not obtain sufficient compacting density and lead to the soil disasters such as liquefaction during earthquakes, over consolidation settlement in a relatively long time period, great settlement and slope failure due to remarkable change of the degree of saturation during rainfall, and so on. So this study aim at to propose a solution to deal with these problems mentioned above by interparticle force regulation in unsaturated soils. On the other hand, about the mechanism for the interparticle forces of unsaturated soils how to support the skeletal structure of soils and to hinder the density increasing in compacting practice, this study try to give a theoretical interpretation in the gravity-electromagnetic field from a surface physics viewpoint.

Laboratory tests have been carried out approximately to separate interfacial forces

from the electromagnetic interparticle forces by using differences in properties between soils and soil water, associated with a variety of fine-grained soils and compacting effort. The results of experiments clarified the interaction between physicochemical properties of soils and interparticle forces, and indicated that the optimum moisture content, soil suction and unconfined compressive strength of non-plastic or low-plastic sandy and fine-grained soils decrease in proportion to gas-liquid interfacial forces of soil water, with the compacting density increased relatively.

The in-situ tests have also been investigated with regulating the interparticle forces for unsaturated soils. As a result, the compacting density increased obviously with the reduce of the gas-liquid interfacial forces, and less consolidation settlement as well as shorter settlement time of compacting site were observed. Consequently, An improved compacting method including quality management was proposed, which is expected to be more effective in the compacting work practices.

January 1999 Tadashi NIRO

新納 格

目次

	頁
第1章 序論	1
1. 1 研究の目的と意義	1
1. 2 本論文の構成	6
参考文献	7
第2章 研究の背景	10
2. 1 地盤被害軽減の重要性と問題の提示	10
2. 1. 1 地震災害の連関・波及構造からみた地盤被害軽減の重要性	10
2. 1. 2 地盤改良による地震被害軽減効果と問題の提示	11
2. 2 問題に対する解決法(案)の提案	14
2. 3 有効応力理論の限界	16
2. 3. 1 強度特性に関する限界	16
2. 3. 2 変形挙動に関する限界	19
2. 3. 2. 1 サクシオン増加による変形挙動(Shrinking)	19
2. 3. 2. 2 サクシオン減少による変形挙動(CollapseおよびSwelling)	21
2. 3. 3 まとめ	22
2. 4 電磁的相互作用による粒子間力の影響	24
2. 4. 1 サクシオンと粒子間力の関係	24
2. 4. 2 マトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの相互作用	25
2. 4. 3 まとめ	28
2. 5 土の骨格構造と粒子間力の関係	29
2. 5. 1 土の骨格構造の定義	29
2. 5. 2 土の物理化学的性質が粒子間力へ与える影響	30
2. 5. 3 不飽和土の骨格構造を支える機構	33
2. 6 本章のまとめ	34
参考文献	35
第3章 粒子間力に関する理論的考察	44
3. 1 マトリックスポテンシャルによる粒子間力	44
3. 1. 1 粒子接触が存在しない場合	44
3. 1. 2 粒子接触の影響	47

3. 1. 3	まとめ	51
3. 2	浸透ポテンシャルによる粒子間力	52
3. 2. 1	接触値定理による定義	52
3. 2. 2	約100nm～電気二重層の距離で生じる粒子間力 (DLVO理論)	52
3. 2. 3	電気二重層以下の距離で生じる粒子間力 (非DLVO力)	55
3. 2. 3. 1	溶媒和力	55
3. 2. 3. 2	イオン相関引力	56
3. 2. 4	まとめ	57
3. 3	化学ポテンシャルによる粒子間力式の提案	58
3. 3. 1	粒子間力式の提案	58
3. 3. 2	二粒子モデルによる提案式の解説	59
3. 4	本章のまとめ	60
	参考文献	61
第4章	粒子間力特性の検証	64
4. 1	検証方法	64
4. 1. 1	検証方法の解説	64
4. 1. 2	検証方法の成立条件と期待される結果	65
4. 2	実験方法	67
4. 2. 1	土質材料組成と検証方法の関係	67
4. 2. 2	活性剤および電解質水溶液の組成	70
4. 2. 3	供試体作製と実験の方法	71
4. 3	検証方法の成立条件の検定	74
4. 4	実験結果の考察	76
4. 4. 1	液性限界, 塑性指数への影響	76
4. 4. 2	サクションへの影響	78
4. 4. 3	一軸圧縮強さへの影響	80
4. 4. 4	変形係数への影響	83
4. 4. 5	破壊応力点への影響	86
4. 5	本章のまとめ	87
	参考文献	88
第5章	粒子間力制御法の提案	90
5. 1	制御法の提案	90
5. 1. 1	最適な粒子間力の制御法	90
5. 1. 2	界面活性剤の化学構造と土への吸着現象	91
5. 2	設計・施工の上で重要な土質特性に対する活性剤の影響	93
5. 2. 1	土質材料および活性剤の性質	93
5. 2. 2	実験結果の考察	94
5. 2. 2. 1	液性限界, 塑性指数への影響	94
5. 2. 2. 2	締固め性への影響	95
5. 2. 2. 3	CBR値による強度特性への影響	98
5. 2. 2. 4	吸水膨張特性への影響	100
5. 2. 2. 5	土の保水性への影響	101

5. 3 締固め現象の検証	103
5. 3. 1 実験方法	103
5. 3. 2 実験結果の考察	105
5. 4 本章のまとめ	107
参考文献	108
第6章 一般的な表層土に対する制御効果の検証	110
6. 1 検証の目的と実験方法	110
6. 1. 1 目的	110
6. 1. 2 実験方法	112
6. 1. 2. 1 土質材料および活性剤の性質	112
6. 1. 2. 2 供試体作製と実験の方法	113
6. 2 非塑性の砂質土～粘性土に対する制御効果	115
6. 2. 1 細粒分含有率の影響	115
6. 2. 2 液体表面張力および締固め仕事量の影響	120
6. 3 低塑性の砂質土～粘土に対する制御効果	122
6. 3. 1 細粒分含有率の影響	122
6. 3. 2 液体表面張力および締固め仕事量の影響	125
6. 4 本章のまとめ	127
参考文献	128
第7章 実用化に関する基礎的検討	129
7. 1 土に添加する上で最適な活性剤の選定	129
7. 2 浸水に対する安定性の検証	132
7. 2. 1 実験方法	132
7. 2. 2 実験結果の考察	134
7. 3 屋外混合方法の検討	137
7. 3. 1 土質材料および活性剤の性質	137
7. 3. 2 実験方法	138
7. 3. 3 実験結果の考察	139
7. 4 実施工試験での効果の検証	143
7. 4. 1 実験方法	143
7. 4. 2 実験結果の考察	146
7. 5 本章のまとめ	148
参考文献	149
第8章 結論	150
関連する論文等の一覧	156
謝辞	158
記号の一覧	159
付録A 土鉱物の表面電荷の起源	163
付録B イオン交換と吸着現象	166

図・表・写真の一覧

1. 図の一覧 (全108葉)

	頁
図-1.1 締固め曲線の形状	3
図-2.1 震災の連関・波及構造の一例 (地盤破壊から広域火災へ)	11
図-2.2 地震被害軽減にかかわる地盤改良工法の一例	12
図-2.3 土の不飽和状態の分類	14
図-2.4 収縮定数試験の典型的な結果	19
図-2.5 飽和土および不飽和土の粒子骨格構造モデル	20
図-2.6 土粒子接触点の粒子間応力とせん断力の関係	21
図-2.7 不飽和土の飽和による体積変化後の応力点移動	21
図-2.8 化学ポテンシャル低下量と土の状態およびコンシステンシー限界の関係	25
図-2.9 不飽和のガラス表面の水膜モデル	26
図-2.10 土の構造模式図	26
図-2.11 土の骨格構造模式図 (粗粒団内部)	29
図-2.12 土の骨格構造模式図 (全体概要)	29
図-2.13 粒子直径と比表面積の関係	30
図-2.14 全比表面積と陽イオン交換容量の関係	31
図-2.15 全比表面積と粘土含有量の関係	31
図-2.16 土の骨格構造を支える機構モデル	32
図-3.1 熱力学的な水膜変形モデル	45
図-3.2 土粒子間の液体架橋モデル	46
図-3.3 JKR理論の模式図 (平面上の球において)	48
図-3.4 固体上の液体の付着仕事モデル	49
図-3.5 イオン濃度分布の模式図	54
図-3.6 DLVO理論の解説模式図	54
図-3.7 シリカ表面の水和力の測定例 (NaCl水溶液)	55
図-3.8 間隙水が付着した土粒子モデル	59
図-4.1 検証方法の概要	65
図-4.2 粘土鉱物の構造	68
図-4.3 作製した中間土の粒径加積曲線	68
図-4.4 活性剤水溶液濃度と液体表面張力の関係	70
図-4.5 不飽和三軸圧縮試験用の圧力室概要	72

図-4.6	セラミックディスクの通気試験結果	72
図-4.7	成立条件の検定 (非塑性細粒分)	74
図-4.8	成立条件の検定 (カオリナイト細粒分中間土)	75
図-4.9	成立条件の検定 (スメクタイト細粒分中間土)	75
図-4.10	塑性図	76
図-4.11	液性限界, 塑性指数への活性剤水溶液の影響	77
図-4.12	サクションへの活性剤水溶液の影響	78
図-4.13	サクションへの電解質水溶液の影響 (非塑性細粒分)	79
図-4.14	サクションへの電解質水溶液の影響 (カオリナイトおよび スメクタイト細粒分中間土)	80
図-4.15	一軸圧縮強さへの活性剤水溶液の影響	81
図-4.16	一軸圧縮強さへの電解質水溶液の影響 (非塑性細粒分)	82
図-4.17	一軸圧縮強さへの電解質水溶液の影響 (カオリナイトおよび スメクタイト細粒分中間土)	82
図-4.18	変形係数への活性剤水溶液の影響	83
図-4.19	変形係数への電解質水溶液の影響 (非塑性細粒分)	84
図-4.20	変形係数への電解質水溶液の影響 (カオリナイトおよび スメクタイト細粒分中間土)	84
図-4.21	破壊応力点への活性剤水溶液の影響	85
図-4.22	破壊応力点への電解質水溶液の影響 (非塑性細粒分)	85
図-4.23	破壊応力点への電解質水溶液の影響 (カオリナイトおよび スメクタイト細粒分中間土)	86
図-5.1	代表的な活性剤の構造モデル	91
図-5.2	負電荷に帯電した土粒子表面への活性剤水溶液の吸着モデル	91
図-5.3	カチオン性活性剤の吸着形態	92
図-5.4	粒径加積曲線	93
図-5.5	活性剤水溶液の濃度と液体表面張力の関係	94
図-5.6	塑性図	95
図-5.7	締固め試験結果 その1	96
図-5.8	締固め試験結果 その2	97
図-5.9	締固め試験結果 その3	97
図-5.10	締固め試験結果 その4	97
図-5.11	荷重強さ一貫入量曲線 (粘性土まじり礫質砂)	98
図-5.12	荷重強さ一貫入量曲線 (シルト (低液性限界))	99
図-5.13	吸水膨張試験結果	100
図-5.14	土の保水性試験結果	102
図-5.15	初期サクションの測定に要する時間	103
図-5.16	締固め密度と含水比および初期サクションの関係	104
図-5.17	初期および破壊時サクションと含水比の関係	104
図-5.18	一軸圧縮強さと含水比, 初期および破壊時サクションの関係	105
図-5.19	破壊応力点の分布	106
図-6.1	締固め現象の検証結果	111
図-6.2	粒径加積曲線	113
図-6.3	活性剤水溶液濃度と液体表面張力の関係	113

図-6.4	体積率表示の締固め特性 その1 (非塑性細粒分中間土)	115
図-6.5	体積率表示の締固め特性 その2 (非塑性細粒分中間土)	115
図-6.6	初期サクシヨンと含水比の関係 (非塑性細粒分中間土)	116
図-6.7	初期サクシヨンと細粒分含有率の関係 (非塑性細粒分中間土)	116
図-6.8	土粒子の体積率と細粒分含有率の関係 (非塑性細粒分中間土)	117
図-6.9	一軸圧縮強さと細粒分含有率の関係 (非塑性細粒分中間土)	117
図-6.10	変形係数と細粒分含有率の関係 (非塑性細粒分中間土)	118
図-6.11	一定空気間隙率における液体表面張力の影響 (非塑性細粒分中間土)	119
図-6.12	一軸圧縮強さへの締固め仕事量の影響 (非塑性細粒分中間土)	119
図-6.13	土粒子の体積率への締固め仕事量の影響 (非塑性細粒分中間土)	120
図-6.14	液体表面張力の減少効果 (非塑性細粒分中間土)	120
図-6.15	体積率表示の締固め特性 その1 (カオリナイト細粒分中間土)	122
図-6.16	体積率表示の締固め特性 その2 (カオリナイト細粒分中間土)	122
図-6.17	初期サクシヨンと含水比の関係 (カオリナイト細粒分中間土)	123
図-6.18	土粒子の体積率と細粒分含有率の関係 (カオリナイト細粒分中間土)	124
図-6.19	一軸圧縮強さと細粒分含有率の関係 (カオリナイト細粒分中間土)	124
図-6.20	一軸圧縮強さへの締固め仕事量の影響 (カオリナイト細粒分中間土)	125
図-6.21	土粒子の体積率への締固め仕事量の影響 (カオリナイト細粒分中間土)	125
図-7.1	本章の構成と研究の流れ	130
図-7.2	活性剤水溶液濃度と液体表面張力の関係	132
図-7.3	浸水前後の乾燥密度と含水比および初期サクシヨンの関係	133
図-7.4	浸水前後の応力-ひずみ曲線の比較	134
図-7.5	浸水前後の比較 (浸水前の含水比 約5%)	135
図-7.6	浸水前後の比較 (浸水前の含水比 約10%付近)	135
図-7.7	浸水前後の比較 (浸水前の含水比 18%と19.2%)	136
図-7.8	粒径加積曲線	137
図-7.9	モデル地盤の概要と試験手順	138
図-7.10	屋外混合法の締固め密度への影響	139
図-7.11	屋外混合法の打撃回数への影響	139
図-7.12	屋外混合法と打撃回数の変化の関係 (建設発生土)	140
図-7.13	屋外混合法と打撃回数の変化の関係 (山砂)	140
図-7.14	活性剤の有無と打撃回数の変化の関係 (建設発生土)	141
図-7.15	活性剤の有無と打撃回数の変化の関係 (山砂)	141
図-7.16	埋戻し断面	143
図-7.17	現場周辺と埋戻し場所の概要	143
図-7.18	地盤沈下量と経過時間の関係 (施工日A)	145
図-7.19	地盤沈下量と経過時間の関係 (施工日B)	145
図-7.20	実施工から得られた粒子間力制御法の効果	146

2. 表の一覧 (全10葉)

	頁
表-4.1 基本土質材料の物理化学的性質	67
表-4.2 カオリナイト細粒分中間土の工学的性質 その1	69
表-4.3 スメクタイト細粒分中間土の工学的性質	69
表-4.4 作製した中間土等の性質	69
表-4.5 電解質水溶液の性質	71
表-5.1 土質材料の工学的性質 その1	93
表-6.1 非塑性細粒分中間土の工学的性質	114
表-6.2 カオリナイト細粒分中間土の工学的性質 その2	114
表-7.1 OECDガイドライン (易分解性試験) の一例	130
表-7.2 土質材料の工学的性質 その2	137

3. 写真の一覧 (全10葉)

	頁
写真-4.1 セラミックディスク付きペDESTALの脱気の様子	73
写真-4.2 三軸圧力室内の供試体の設置状況	73
写真-5.1 三軸圧力室を用いた土の保水性試験の様子	101
写真-5.2 土の保水性試験の供試体設置状況	101
写真-7.1 浸水作業中の様子	133
写真-7.2 浸水完了後に脱型した供試体の様子	133
写真-7.3 活性剤水溶液の散布の様子	144
写真-7.4 衝撃型ランマーによる締固め作業の様子	144
写真-A.1 非イオン性界面活性剤を添加した有明粘土 (倍率: 500倍)	164
写真-A.2 水道水を添加した有明粘土 (倍率: 500倍)	165

第1章 序論

1. 1 研究の目的と意義

土は固相、液相および気相の3相からなる。わが国においては湿潤な気候のために自然地盤の含水比は比較的高いが、地下水位付近より浅いところの表層地盤などは不飽和状態にあり、地下水位以下の深度においても飽和度が100%に達していないことも珍しくない。また、土質材料は不飽和状態にあり、これを用いて作製した人工地盤は、少なくともその作製中および完成直後において不飽和状態にある^{1) .2)}。このような不飽和状態の土の力学特性の評価は、飽和土の基礎原理等を拡張して近似的に捉えられているのが現状である。

例えば、飽和土の「土粒子の非圧縮性を前提とした、土の骨格の体積変化を妨げる拘束力の反力は非圧縮性の水が受け持つ」というTerzaghiの有効応力原理³⁾は、Bishopの有効応力式等^{4) .5)}によって不飽和土に拡張されている。また、表面物理学的に「土中水の化学ポテンシャルと土の物理化学的性質の間の相互作用によって生じる粒子間力で生成される」と説明される土の骨格構造を支える機構は^{6) .7) .8) .9) .10)}、飽和土に用いられる「土の骨格は塑性体積ひずみを硬化・軟化の履歴パラメーターにとる弾塑性材料である」という限界状態理論を拡張して評価されている。

このように飽和土の基本原理等を拡張して取り扱われる不飽和土の「土の骨格構造を支える機構」を生成する粒子間力は、低い飽和度の不飽和土ほど、その力学特性等に与える影響が大きく、土粒子や粒団の移動を拘束するとされているが、その性質は十分に解明されていない。特に非塑性～低塑性の粘性土を多く含む不飽和土を土質材料として用いた場合に、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られない原因の一つと考えられているが、その作用原理は完全に明らかではなく、そのような状態にある地盤は、地震による液状化現象や長期にわたる緩速の地盤沈下現象^{11) .12)}、降雨等で飽和度が変化した場合の大きな地盤沈下現象や斜面崩壊等を起こすことがよく知られている^{13) .14) .15) .16)}。

このような現状をふまえて、本研究は第1に不飽和土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力の力学的な特性を明らかにすること、第2にその制御法を提案し、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土であっても、工学的に安定した地盤を作製できる締固め方法を提案

することを目的とした。なお、本研究での粒子間力は、物理学の慣例に従い反発方向の力を正值とし、不飽和土の粒子間力は大気圧下で負となる。さらに粒子間力を代表する物理量は、間隙空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差のサクション $u_a - u_w$ と考えている^{17), 18), 19), 20), 21)}。

第1の目的に対して、粒子間力を表面物理学的な視点から理論的に考察し、重力相互作用とそれ以外の電磁的相互作用による粒子間力の2つに間接的に分離して実験的に検証した。その結果、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土の最適含水比、サクションおよび圧縮強さは土中水の液体-気体間の液体表面張力の値に比例的に変化し、液体表面張力の値が小さいほど締固め密度は増加することを明らかにした。これらの成果は、不飽和土の力学特性に対する粒子間力の影響を実験的に明らかにした初めてのものである。

第2の目的に対して、第1の目的から得られた成果から、液体-気体間の液体表面張力を非イオン性界面活性剤によって減少させる粒子間力制御法を提案した。この粒子間力制御法による締固め密度の増加効果を室内実験で吟味し、さらに屋外試験および実施工試験でその効果を検証し、実用化の足がかりとなる検討を行った。その結果、室内試験で得られた締固め密度の増加効果を屋外試験および実施工試験において確認し、前述の低い締固め密度が原因で生じる地盤沈下現象等の軽減や防止が期待される。粒子間力制御法による締固め方法を新たに提案した。

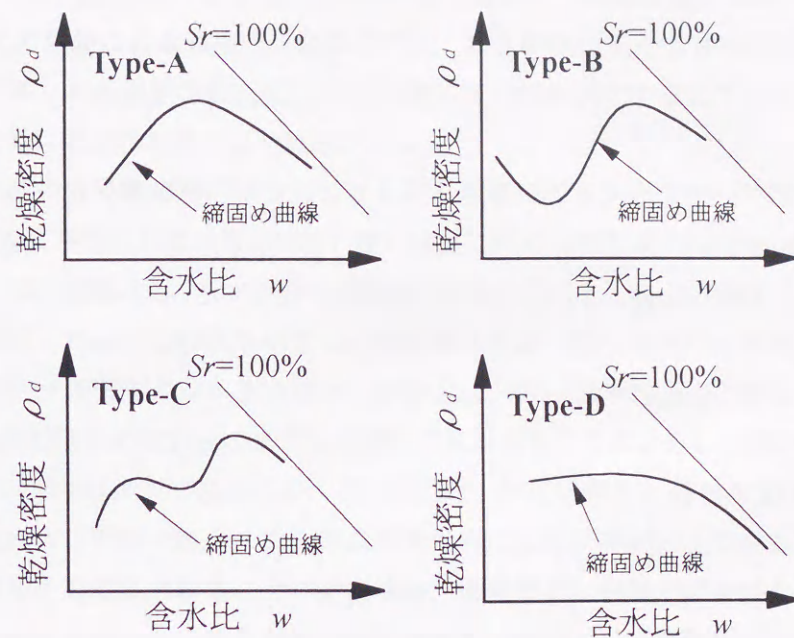
なお、後の第2章の2.5.1項で考察するが、付録以外の本論文中での土粒子とは、力学的な乱れによって分離可能な1次粒子と2次粒子以上の粒団の塊を指し、土と記す場合はこれらの1次粒子と粒団から構成される巨視的な粒子集合体を指している。

次に研究目的を詳細に述べる。

土の締固め現象とは、ローラーやタンパー等の機械的な締固め力を土塊に作用させ、その結果、土塊の密度が高まり、その強度が増加する現象である。この土の締固め現象の説明を試みた理論は、図-1.1に示すような締固め時の含水比と得られる乾燥密度の間に特徴的にみられる関係、すなわち、ピークをもった締固め曲線をなぜ描くのかを理論的に説明することに集中してきた。以下に主要な理論および学説を列記する¹⁾。

1933年のProctorの締固め理論^{2,2)}は、土粒子間の水の毛管作用ならびに潤滑作用に注目したもので、Proctorは締固め現象について次のように説明している。土が乾燥すると間隙水の毛細管効果によって土粒子間に高い摩擦力が生じ、締固め力に抵抗するために密度増加は進展しない。しかし、同じ締固め方法であっても土に加水してやると土粒子間を潤滑(Lubrication)することができ、土粒子は再配列して高密度になる。このときの強度は低下することもある。締固めにおける加水効果は、飽和度が高くなって再配列が止まるまで続く。これ以上の再配列が起こらなくなったときの含水比を最適含水比と呼び、この含水比で締固めれば最大乾燥密度が得られる。さらに加水すると間隙は増大し、密度が低下して土は軟弱になり塑性を示すようになる」と説明している。

1936年のHogentoglerの理論^{2,3)}は、粒子表面の極近くで吸着されている水の粘性は非常に高く、土粒子表面からの距離が遠くなるほどその粘着性は低下するという説にもとづいて、

図-1.1 締固め曲線の形状^{30), 31)}

定性的な説明を行った理論である。1956年のHilf²⁴⁾は、非排水・非排気条件と土の骨格に作用する負圧の大きさは負圧そのものの大きさに等しいという2つの仮定から、毛細管圧と間隙空気圧の概念を用いて、締固め曲線を定量的に説明している。1960年のLambe²⁵⁾は、界面化学的作用に注目し、低含水比では電解質濃度が高く、土粒子が凝集して低密度となり、間隙水が増加すると電解質濃度が低下して拡散2重層が発達し、土粒子が分散して密度が増加すると説明している。1963年の久野²⁶⁾は、それまでの締固め理論を総括して締固め過程における土の状態を半固体状、弾性的、塑性的、半粘性流体的の4つの領域にわけて説明している。1963年のOlson²⁷⁾は、当時の物理学理論では締固め現象を包括的に説明することは困難であると考察し、1960年にBishopらが提案した不飽和土の有効応力理論^{4), 5)}の概念を用いて、締固め挙動を説明している。1970年のBardenとSides²⁸⁾は、電子顕微鏡で粘土の微細構造を調べ、低塑性不飽和粘土の締固め挙動と粘土の微細構造とを関連づけて考察している。1971年の伊勢田と水野²⁹⁾は、締固め土の粗密の状態を先行圧密力の大小から捉えている。

以上の理論および学説において、古典的締固め理論に分類されるHogentoglerの理論は、粘性を有する吸着水の厚さは、2~3分子程度で、締固めの対象となる含水量はこれよりもはるかに大きいことから、現在では否定され、体積率表示による締固め曲線を初めて用いたHilfの学説は、毛細管圧力のその全てが土の骨格に作用するのではなく、Bishopの有効応

力式のパラメーター χ を掛けた分だけが作用することから、同様に否定されている。また、Olsonの有効応力理論による締固め現象の説明は、第2章の2.3節で考察するように、不飽和土の有効応力は、ある限定された応力状態や飽和度でのみ成立する力であることが明らかとなり、現在では否定的な見方が一般的である。

このように締固め現象の解明は、古くから取り組まれてきた研究テーマであるが、現在においても完全に解明されているとは言い難い状況にある。例えば、LeeとSuedkamp³¹⁾は、締固め曲線の形状を図-1.1に示すように4種類に分類している。盛土や埋戻しに用いる一般的な土質材料は、Type-Aの形状を示すのが通常であるが、砂分の多い土や本研究が主な対象とする非塑性～低塑性のシルト分を多く含む土は、Type-BやType-Cの形状を示すことが多く、高塑性の粘性土ではType-Dの形状を示すこともある。このように土質の種類等によって締固め曲線の形状は大きく異なるが、その原因については未だに明らかではない。

以上の理論および学説や数多くの研究成果を参考にして、不飽和土の締固め過程を考察すると、不飽和土の締固め現象の力学的機構は、密度が低い段階では締固め力による等方圧力の増加が密度を増加し、ある程度密度が増加した段階では、締固め力の軸差応力の方が主要な働きをし、局部的なせん断変形破壊を生じ密度が高まると考察することができる。

せん断変形破壊によって密度が高まるとするこの考察に従えば、式(1.1)のCoulombの摩擦法則³²⁾から、せん断応力 τ_f とその抵抗力である摩擦力 $\sigma_f \tan \phi$ および見掛けの粘着力 C との力関係によって土粒子が再配列され、平衡状態で締固め密度が決定することになる。

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi = c + \mu_f \sigma_f \quad (1.1)$$

ここに、 τ_f : 破壊面上の破壊時のせん断応力、 c : 見掛けの粘着力

ϕ : 内部摩擦角、 $\tan \phi = \mu_f$: 摩擦係数、

σ_f : 破壊面上の破壊時全直応力、 $\sigma_f \tan \phi$: 摩擦力

非塑性～低塑性の不飽和土では、式(1.1)の見掛けの粘着力 C は極小さいと仮定すれば、破壊面状の破壊時のせん断応力 τ_f を決定する摩擦力 $\sigma_f \tan \phi$ は、粒子の形状等が影響を与える摩擦係数 $\tan \phi (= \mu_f)$ ³³⁾と粒子間力である破壊面上の破壊時全直応力 σ_f を掛けたものとなる。よって、粒子間力の性質が明らかにされたならば、その粒子間力を制御することで、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む不飽和土は、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られないという問題を解決することができる可能性が高い。さらに、このような粒子間力の制御によって、締固め密度の増加や締固め曲線の形状変化が実験的に確認され、そのことを理論的に説明することができれば、締固め現象の解明にもつながる。

次にこの不飽和土の粒子間力について考察する。この粒子間力とは、第2章の図-2.6等に表示するような土粒子間に作用する垂直力であり、粒子接触の有無にかかわらず存在する。

自然界に存在する4つの力の内の2つは、中性子、陽子、電子、その他の素粒子間に働いている強い相互作用と弱い相互作用である。これらの作用範囲は 10^{-5} nm以下の短距離であり、本研究が対象とする粒子間力に關与するものではない。他の2つは原子間または分子間に働く電磁的相互作用 (electromagnetic interaction) と重力相互作用 (gravitational interaction) であり、これらの作用範囲は比較的長距離で、粒子間力を決定している力である²⁾¹⁾。

後の第2章および第3章で詳細に述べるように、間隙が水で飽和した土に作用する粒子間力は、土質力学の分野ではTerzaghiの有効応力で定義され、表面物理学の分野では重力相互作用による粒子間力は無視され²⁾¹⁾、電磁的相互作用であるvan der Waals引力と静電的な反発力の2つの同時作用を考えたDerjaguinおよびLandauならびにVerweyおよびOverbeekの定義したDLVO理論^{2)1), 34), 35), 36)} および約1nm~4nmの電気二重層以下の粒子表面間距離では非DLVO力、さらに粒子接触による負の粒子間力 (付着力) は、Derjaguin^{2)1), 37)} やJohnson, KendalおよびRobertsらの理論^{2)1), 38)} によって説明されてきた。

不飽和土ではこのような理論で説明される粒子間力に加えて、浸透ポテンシャルによる電磁的相互作用であるBrunauer, S., Emmett, P.H. および Teller, E. のBET理論³⁾⁹⁾ やBET理論を改良した岩田の表面吸着モデル⁴⁾⁰⁾ 等の表面保水にかかわる多分子吸着現象モデルで説明される作用が存在し、さらにLaplace圧による粒子間力である間隙保水によるマトリックスポテンシャルの重力相互作用が存在する^{4)1), 42), 43), 44)}。

このように不飽和土においては多くの作用が存在するが、前述したようにそれらは電磁的相互作用と重力相互作用の2つに分けることができる。そのなかで電磁的相互作用にかかわるものについては、1960年にAitchison, G.D.⁵⁾ がColeman, J.D.⁴⁾⁵⁾ による土質実験データから、土質力学的な観点からは間隙保水にかかわるマトリックスポテンシャルだけを考慮すればよいと結論した論文を發表し、さらに自然界の土の組成は堆積環境で大きく異なるので、電磁的相互作用の工学的な取り扱いは困難である等の意見も加わって、土質力学分野ではこの電磁的相互作用の力学的な影響は無視されてきた⁴⁾⁶⁾。このように重力相互作用のみで不飽和土の力学的挙動を取り扱えば、説明が困難な問題が起きることは当然である。その一例が前述の締固め現象であり、本研究の提示した「非塑性~低塑性の粘性土を多く含む土は、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られない」という問題でもあると考える。

以上から本研究は、電磁的相互作用に関する数多くの研究成果を有する表面物理学分野からの考察によって、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルによる重力相互作用およびそれ以外の浸透ポテンシャル等による電磁的相互作用が同時に作用する不飽和土の粒子間力を定義し、その特性を実験的に検証し、土の骨格構造を支える機構を生成して密度増加を妨げる粒子間力の性質を明らかにすることを検討した。

1. 2 本論文の構成

本論文の内容を各章ごとに述べると次のようである。

第1章 序論

研究の目的および意義、全般的な構成について記述する。

第2章 研究の背景

災害規模の大きな地震被害を例に、地盤被害軽減の重要性および地盤改良の有効性を示し、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土は、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られない問題の重要性を示す。さらに、この問題に対する解決法の案を示し、この案の基本となる土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力の性質について、過去の研究を振り返りながら考察し、研究の目的と意義を明確にする。

第3章 粒子間力に関する理論的考察

粒子間力を粒子間の液体架橋および粒子接触によるマトリックスポテンシャルの粒子間力と、粒子間とバルク相のイオン濃度差による浸透ポテンシャルの粒子間力の2つに分けて理論的に考察し、それぞれの制御法を示し、両方のポテンシャルを合わせた粒子間力式を提案する。

第4章 粒子間力特性の検証

土および間隙水の組成の違いを応用して、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの粒子間力へ与える影響を実験的に検討し、第3章で提案した粒子間力式の概念的な妥当性を検証する。

第5章 粒子間力制御法の提案

界面活性剤による粒子間力の制御法を提案し、最も安定した制御効果が期待できる界面活性剤の種類を土粒子表面への吸着モデルから考察し、土構造物の設計・施工において重要な土質特性に対する界面活性剤添加の影響から、その考察を検証する。さらに、第1章の1.1節および第2章の2.2節等で示したCoulombの摩擦法則から導いた土の締固め現象に関する考察を実験的に検証する。

第6章 一般的な表層土に対する制御効果の検証

有機物を含まない一般的な表層土の粒度を網羅する土を、2種類の細粒分と中砂を混合して作製し、細粒分含有率や液体表面張力および締固め仕事量の影響について考察し、提案した粒子間力制御法による締固め効果を検証する。

第7章 実用化に関する基礎的検討

提案した粒子間力制御法の実用化の基礎的検討を行い、実用化の足がかりを示す。

第8章 結論

本研究で得られた成果について、各章ごとに結論を総括する。

参考文献

- 1) 土の締固めと管理編集委員会編：土の締固めと管理，地盤工学会，1991.
- 2) 社団法人 日本道路協会編：道路土工－施工指針－，丸善，1997.
- 3) Terzaghi, K.:The shearing resistance of saturated soils, Proc. of 1st ICSMFE, Vol.1, pp.54-56, 1936.
- 4) Bishop, A.W.:The measurement of pore pressure in the triaxial test, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.38-46, 1960.
- 5) Aitchison, G.D.:Relationship of moisture stress and effective stress function in unsaturated soils, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.47-52, 1960.
- 6) 土壌物理研究会編：土の物理学 土質工学の基礎，森北出版，pp.36-71, 1979.
- 7) Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B.P.:Soil-Water Interactions Mechanisms and Applications, Marcel Dekker, pp.195-203, 1988.
- 8) Adamson, A.W.:Physical Chemistry of Surfaces, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, pp.61-63 and pp.339-363, 1976.
- 9) Sridharan, A., Altschaeffl, A.G. and Diamond, S.:Pore size distribution studies, Proc. of ASCE, Vol.97, No.SM5, pp.771-787, 1971.
- 10) Aitchison, G.D. and Woodburn, J.A.:Soil suction in foundation design, Proc. of 7th Int. Conf. SMFE, Vol.1, pp.1-8, 1969.
- 11) 地盤工学会編：降雨と地震から危険斜面を守る地盤工学に関するシンポジウム発表論文集，1997.
- 12) Kuribayashi, E., Jiang, T., Niuro, T., Nagasaka, H., Kuroiwa, S. and Nishioka, S.:Engineering tactics on lifelines safety against earthquake, Proc.of the Third U.S.Conference on Lifeline Earthquake Engg., CA, ASCE, pp.927-936, 1991.
- 13) 西田義親，八木則男，二木幹夫：雨水浸透による地盤内発生間隙圧と斜面安定，土木学会論文報告集，No.262，pp.91-100，1977.
- 14) 八木則男，矢田部龍一，山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊，土木学会論文報告集，No.330，pp.107-114，1983.
- 15) 新納 格：土の急速締固め・圧密工法の開発：低平地研究，佐賀大学 低平地防災研究センター，No.5，pp.107-112，1996.
- 16) 建設発生土利用マニュアル検討委員会編：建設発生土利用技術マニュアル，財団法人 土木研究センター，1995.
- 17) Pietsch, W. and Rumpf, H.:Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln, Chemie Ingenieur Technik, NO.39, pp.885-893, 1967.
- 18) Rumpf, H.:Zur Theorie der Zugfestigkeit von Agglomeraten bei Kraftübertragung an Kontaktpunkten, Chemie Ingenieur Technik, No.42, pp.538-540, 1970.

- 19) 久保輝一郎, 神保元二, 水渡英二, 高橋 浩, 早川宗八郎: 粉体 理論と応用, 改訂二版, 丸善, pp.324-332, 1979.
- 20) 渡辺信淳, 渡辺 昌, 玉井康勝: 表面および界面, 共立出版, pp.1-3, 1973.
- 21) J.N.イスラエルアチヴィリ (近藤 保, 大島広行訳): 分子間力と表面力, 第二版, 朝倉書店, pp.205-325, 1997.
- 22) Proctor, R.R.:The design and construction of rolled earth dams, Engineering News-Record III, August 31, September 7, 21 and 28, 1933.
- 23) Hogentogler, C.A.:Essentials of soil compaction, Proc. of Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp.309-316,1936.
- 24) Hilf, J.W.:An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils, Technical Memorandum, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, No.654, 1956.
- 25) Lambe, T.W.:Structure of compacted clay, Transactions, ASCE, No.125, pp.682-705, 1960.
- 26) 久野悟郎: 土の締固め—主として道路土工に関連して—, 技報堂全書No.57, pp.47-50, 1963.
- 27) Olson, R.E.:Effective stress theory of soil compaction, Jour.Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 89, No.SM2, pp.27-45, 1963.
- 28) Barden, L. and Sides, G.R.:Engineering behavior and structure of compacted clay, Jour. Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 96, No.SM4, p.1171, 1970.
- 29) 伊勢田哲也, 水野正憲: 締固めた土の圧縮性状に関する研究, 土木学会論文報告集, Vol.188, pp.45-52, 1971.
- 30) 大北康治, 中沢重一: 不飽和土の締固め機構について, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.141-148, 1987.
- 31) Lee, P.V. and Suedkamp, R.J.:Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils, Highway Research Record, No.381, pp.1-9, 1972.
- 32) 例えば, 山口柏樹: 土質力学 (全改訂), 技報堂出版, pp.33-52, pp.141-196, 1996.
- 33) 吉村優治, 小川正二: 粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.99-108, 1994.
- 34) Matsuo, S. and Kamon, M.:Microscopic study on deformation and strength characteristics of clay soil, Proc. of 9th Int. Conf. SMFE, Vol.1, pp.201-204, 1977.
- 35) Lambe,T.W.:A Mechanistic picture of shear strength in clay, Conf.of shear strength soils, Colorado, pp.503-532, 1960.
- 36) van Olphen, H.:An introduction to clay colloid chemistry, Second Edition, John Wiley and Sons, New York, pp.150-161, 1977.
- 37) Derjaguin, B.V.:Untersuchungen über die reibung und adhesion, IV. Theoric des Anhaftens kleiner teichen, Kolloid Zeitschrift, No.69, pp155-164, 1934.

- 38) Johnson, K.L., Kendall, K. and Roberts, A.D.: Surface energy and the contact of elastic solids, Proc. R.Soc. London, Ser.A, No.324, pp.301-313, 1971.
- 39) Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E.: Adsorption of gases in multimolecular layers, Journal of Am.Chem.Soc., Vol.60, pp.309-319, 1938.
- 40) Iwata, S.: Thermodynamics of soil water III, Journal of Soil Science, Vol.117, pp.87-93, 1974.
- 41) Thompson, D.W.: On Growth and Form, 2nd ed., Cambridge University Press, Vol.1, Ch.2, 1968.
- 42) van Olphen, H.: An introduction to clay colloid chemistry, John Wiley and Sons, p.94, 1963.
- 43) 例えば, 阿部廣史: 不飽和土の力学特性の評価手法に関する実験的研究, 東京大学博士学位論文, 1994.
- 44) 三野 徹, 西垣 誠, 赤江剛夫: pFの原理と応用 10 不飽和土および軟らかい土の力学的性質とpF, 土と基礎, Vol.35, No.7, pp.67-73, 1987.
- 45) Coleman, J.D.: An investigation of the pressure membrane method for measuring the suction properties of soils, Road Research Laboratory Note, No.RN/3464/JDC, 1959.
- 46) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.: Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils, Soils and Foundations, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.

第2章 研究の背景

概要：被害規模の大きな地震被害を例に、地盤被害軽減の重要性および地盤改良の有効性を示し、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土は、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られない問題の解決の重要性を示す。さらに、この問題に対する解決法の案を示し、この案の基本となる土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力の性質について、過去の研究を振り返りながら考察し、研究の目的と意義を明確にする。

2. 1 地盤被害軽減の重要性と問題の提示

2. 1. 1 地震災害の連関・波及構造からみた地盤被害軽減の重要性

現代の都市は人口および社会資本の集積に伴う高密度化が著しく、さらに、廃棄物等の埋立地や軟弱地盤の臨海地域への拡大によって地盤条件も多種多様になっている。このような都市を大規模な地震が襲った場合、工学的に安定した地盤とみなせる密度に達していない地盤および軟弱地盤上の地域、さらには那須¹⁾や栗林ら^{2), 3)}が指摘した旧河川や谷を埋立造成した基盤が傾斜した地域では大きな被害が生じ、連関・波及して被害拡大する。

この連関・波及構造について鏡味⁴⁾は、片山⁵⁾の提案したシステム分析手法であるFQSM法を用いて連関・波及構造分析を行い、新納ら^{6), 7)}はニューラルネットワークモデルを用いて、住宅破壊確率に対する宅地化率および低平地率等の関連の強さを吟味している。図-2.1に地盤破壊から広域火災に至る連関・波及構造の一例を示す。

新納、栗林ら^{8), 9), 10), 11), 12)}は、道路被害予測および火災延焼による道路遮断の影響を考慮した広域避難等について、定量的に評価する方法を示している。この方法を用いた軟弱粘土層および旧河川の埋立地盤上に立地する上海市の被害予測結果では、立地地盤条件や人口密度、道路幅員および公園等の空地率等で地区ごとに被害規模が異なり、交通容量は常時の79.2%～99.6%、道路連結は92.3%～98.3%、住宅地域の火災消失率は0%～42.3%、約13万人の避難不能者が発生すると予測した。この結果はその後発生した1995年兵庫県南部地震での神戸市および周辺地域の被害様相¹³⁾からみて、的を外れたものではない。

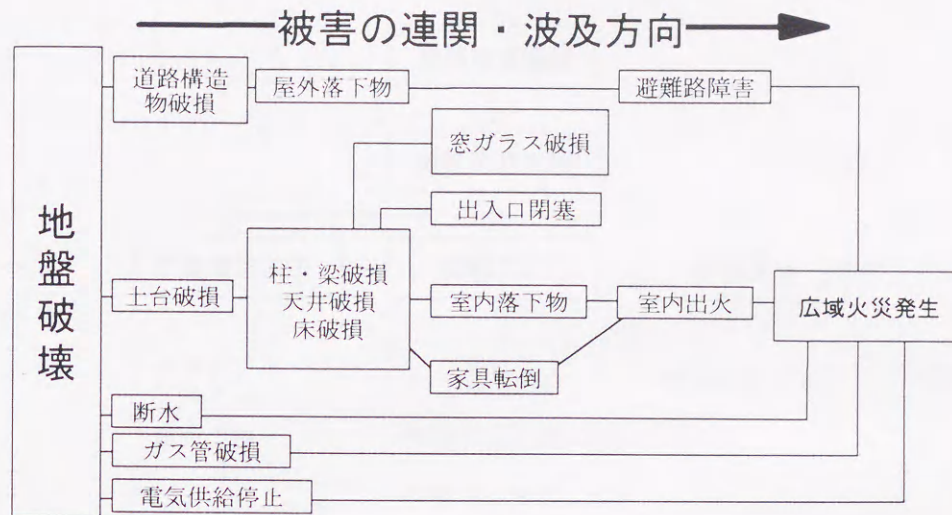


図-2.1 震災の連関・波及構造の一例（地盤破壊から広域火災へ）

このような道路および公園等の配置と大きさ等を検討して、都市計画的に耐震性を高める方法は単独でも大きな効果を期待できるが、構造物および地盤の耐震性の向上と連携することが肝要である。例えば、道路施設構造物の破損および転倒が交通障害となって、被害の拡大を増長した例が兵庫県南部地震の際に認められている。新納ら^{14)・15)・16)}は道路上の信号機、道路交通標識および電柱等の基礎の小口径短杭の横抵抗は、小径の杭を群杭として用いる方が水平抵抗が増すことを示しており、このような基礎構造であれば被害の拡大を軽減できた可能性も指摘できる。よって、被害の波及を遮断し、非常時の交通を確保するように道路を最適配置し、隣接する構造物および地盤は十分に耐震性を吟味したものとす等の両者の連携が、都市全体の耐震性を高めるために重要であることがわかる。

このように地震被害は個々の被害が連関・波及して拡大するものであるが、地盤被害が波及する被害の源であることは明らかで、地盤の耐震性を高めることが直接的で有効な地震災害の軽減方法であると考察できる。

2. 1. 2 地盤改良による地震被害軽減効果と問題の提示

図-2.2に地震被害軽減にかかわる地盤改良工法の一例を示す^{17)・18)・19)}。密度増加を主目的とする密度増加工法、化学的処理による強度増加を主目的とする固結工法および良質な土砂等と入れ替える置換工法等がある。

本研究にかかわる特殊な置換工法として、建物への入力地震動を低減する新納ら^{20)・21)}の地盤免震工法をあげることができる。新納らは地盤の剛性および減衰性を制御し、建物へ入力される地震動を低減する方法を初めて提案している。土の動的性質を粒子間の媒質

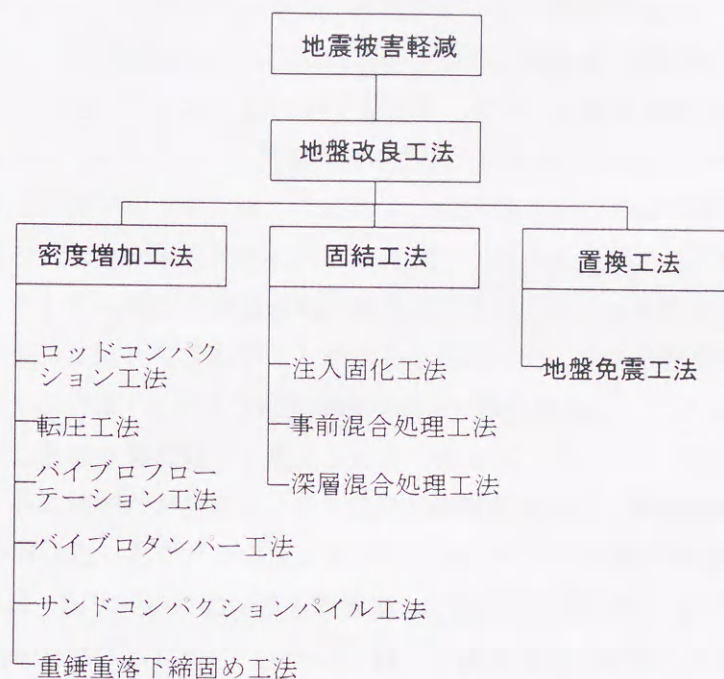


図-2.2 地震被害軽減にかかわる地盤改良工法の一例

の力学特性で制御するというこの考えは、不飽和土の粒子間力制御に関する本研究と共通するもので、本研究の基礎となった方法でもある。この地盤免震工法の力学的原理は、構造物の免震理論²²⁾の一種と捉えることができる。構造物底面下の地盤における剛性および減衰を制御し、その内部減衰によって震動エネルギーを吸収することに特徴がある。この方法を廣田ら²³⁾、鈴木ら²⁴⁾は原子炉建屋の地震応答低減を目的として検討してきたが、1998年になって、地下構造物の免震設計法マニュアル²⁵⁾として、実用化の指針を建設省が中心となって作成している。

地震時の地盤の安定性は、液状化発生の有無、さらにそれに伴って生じる水平流動の有無に依存している。液状化現象はせん断時の体積収縮による間隙水圧の上昇が原因であるので、体積収縮が生じない程度以上に地盤が密な状態では起こり得ず、よって、図-2.2の密度増加工法が最も理論に適合した改良工法である。この密度増加工法の液状化現象防止に対する有効性は、次に示すように兵庫県南部地震において実証され、さらに問題点も明らかとなった。また、図-2.2の固結工法は、セメントや生石灰等による化学反応によって、せん断強度を増加させることを主目的としたもので、地盤の密度増加を伴うものではない。

神戸市のポートアイランドではロッドコンパクション工法、六甲アイランドではサンドコンパクションパイル工法等の密度増加工法が、摩擦杭または直接基礎の低層建築物を対象に施工されていた。兵庫県南部地震の際に無改良地域では平均40cm～50cm、地盤改良地

域では平均0cm～18cmの地盤沈下が生じ、被害程度の差が観測されている。さらに、兵庫県北部、淡路島、大阪湾湾岸部および関西国際空港等で重錘落下締固め工法を行った地域では、噴砂現象や地盤沈下は生じていない^{26), 27)}。このことから密度増加およびそれに伴う地盤の強度増加は、地震に対する地盤安定性の向上に有効であることが実証されている。

一方、特にポートアイランドでは、上述のように地盤改良の有無で程度の差はあるが、ほぼ全域にわたり液状化が原因と思われる地盤沈下が発生し、まさ土等の非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土の噴出が確認され、密度増加工法による地盤改良が、土質によっては液状化現象を完全に防止できないことが明らかとなった。粘土分を含む土で埋め立てられた六甲アイランドでは、このような大規模な液状化現象は発生していない。

同じ様な事例は他の地震被害でも認められる。例えば、1987年の千葉県東方沖地震では海岸埋立地を中心に液状化が発生し、その噴砂の粒度特性から、細粒分を多く含む砂質土やシルト質土が液状化したことが確認され²⁸⁾、1993年1月の釧路沖地震や同年7月の北海道南西沖地震では、河川堤防においても同種の土の液状化が生じている^{29), 30)}。

これらの事例を解明するために、森ら³¹⁾は、千葉県東方沖地震で液状化したシルト質砂の液状化試験を行い、シルト質土の液状化強度は砂と同等以上に小さいことを明らかにしている。佐藤ら³²⁾は、ポートアイランドから採取したまさ土を粒度調整した試料で、相対密度65%程度の良い埋立地盤を想定した液状化強度試験を行っている。その結果、細粒分含有率および乾燥密度の増加にもかかわらず、液状化強度は砂よりも減少する結果を得ている。また、足立ら³³⁾は、海上埋立を想定した水中落下法で作製した非塑性シルト質土の供試体を用いて液状化強度試験を行い、水中落下法の方が締固め法よりも間隙水圧発生量が大きく、液状化強度は小さいことを明らかにした。

以上の事例と研究成果から、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土は、砂と同等以上に液状化し易いことが明らかとなり、液状化現象が生じない程度以上に工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度を得ることが、従来の密度増加工法では容易ではないという問題を提示することができる³⁴⁾。

その他にこの低い締固め密度が原因で生じる災害として、長期にわたる緩速な地盤沈下現象、降雨等で飽和度が変化した場合に起こる大規模な地盤沈下現象や斜面崩壊現象等をあげることができる^{35), 36), 37)}。

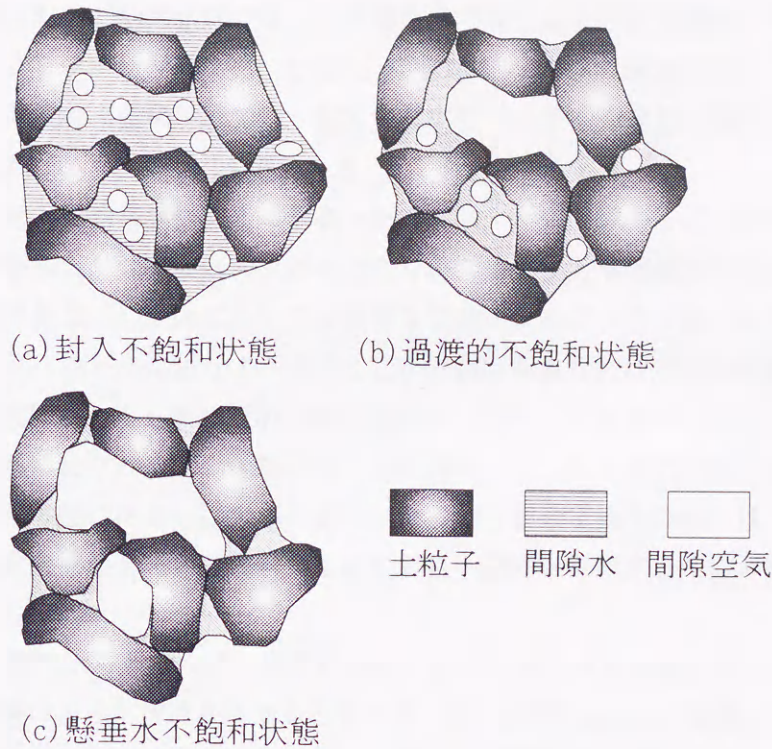


図-2.3 土の不飽和状態の分類³⁸⁾

2. 2 問題に対する解決法（案）の提案

Kohgoら³⁸⁾は土の不飽和状態を図-2.3に示す3つに分類している。この図は重力相互作用によるマトリックスポテンシャルのサクションのみが作用する状態を想定している。

図-2.3の(a)は、封入不飽和状態（Insular air saturation）とし、非常に飽和度が高く、間隙中の空気は水で包まれた気泡としてのみ存在可能な状態、(c)は懸垂水不飽和状態（Pendular saturation）で、サクションが非常に大きくなって間隙内の水が十分に排水され、水はわずかに土粒子と土粒子の接触点の周りにメニスカスを作り、その中に保持されている状態である。この2つの不飽和形態の中間的形態として図の(b)の過渡的不飽和状態（Fuzzy saturation）があり、大きな間隙では、比較的小さなサクションの値で間隙水は排水されて懸垂水不飽和状態となっているが、小さな間隙では、さらに大きなサクションの値まで封入不飽和状態にあるとしている。封入不飽和状態と過渡的不飽和状態の境界は、空気が間隙内に侵入するサクション値である空気侵入値（Air entry value）で定義されているが、その値は土質で異なり、粘性土の場合には飽和度で約90%程度とされている³⁸⁾。

図-2.3の(c)の懸垂水不飽和状態では、サクションは土粒子同士を引きつける直応力の粒子間力を生じ、この粒子間力は飽和度が低下するほど増加し、土粒子同士のスベリを抑制し

ている。一方、封入不飽和状態では、後の第3章で論じるように理論的にマトリックスポテンシャルによるサクシオンはゼロとなり、近似的にTerzaghiの有効応力のみが直応力として作用する。過渡的不飽和状態では、封入および懸垂水不飽和状態の両方が混在し、サクシオンと有効応力による直応力が混在する。

このように封入不飽和状態以上に飽和した土では、土粒子間の直応力は有効応力とみなされるが、不飽和土では有効応力以外の土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力が存在する領域がある。わが国においては湿潤な気候のために自然地盤の含水比は比較的高い場合が多いが、地下水位付近より浅いところの表層地盤などは不飽和状態にあり、地下水位以下の深度においても飽和度が100%に達していないことも珍しくない。また、土質材料は不飽和状態にあり、これで作製した人工地盤は少なくともその作製中および完成直後において不飽和状態にある。このことから、われわれが接する土の多くは、有効応力とそれ以外の土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力が混在する不飽和領域に属していると考察できる。

第1章の1.1節で示したように、締固め過程において密度がある程度増加した段階では、せん断変形破壊によって密度が高まるとすれば、式(2.1)のCoulombの摩擦法則から³⁹⁾、せん断応力 τ_f とその抵抗力である摩擦力 $\sigma_f \tan \phi$ および見掛けの粘着力 c との力関係によって土粒子が再配列され、平衡状態で締固め密度が決定すると考えることができる⁴⁰⁾。

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi = c + \mu_f \sigma_f \quad (2.1)$$

ここに、 τ_f ：破壊面上の破壊時のせん断応力、 c ：見掛けの粘着力

ϕ ：内部摩擦角、 $\tan \phi = \mu_f$ ：摩擦係数、

σ_f ：破壊面上の破壊時全直応力、 $\sigma_f \tan \phi$ ：摩擦力

非塑性～低塑性の不飽和土の見掛けの粘着力 c は極小さいと仮定すれば、粒子の形状等が影響する摩擦係数 $\tan \phi (= \mu_f)$ ⁴¹⁾以外の因子の、粒子間力である破壊面上の破壊時全直応力 σ_f の減少で、摩擦力 $\sigma_f \tan \phi$ を低下させることが可能である。よって、有効応力およびそれ以外の土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力を制御する方法を提案することができれば、先の2.1節で示した「非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土は、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度を得ることが容易ではないという問題」を解決する方法を提案することができる。

2. 3 有効応力理論の限界

有効応力理論とその周辺の粒子間力に関する過去の研究を振り返り、有効応力と土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力の関係について考察し、有効応力理論を適用できる限界を明らかにする。

2. 3. 1 強度特性に関する限界

Terzaghi^{4,2)} は水で飽和された土に対して式(2.2)で有効応力を定義している。Terzaghiは間隙水圧を土の変形に寄与しない中立応力と考え、圧縮、せん断やせん断抵抗の変化のようになすべての応力変化の効果は、全応力から中立応力を引いた有効応力で決定されるとした。

$$\sigma'_i = \sigma_i - u \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.2)$$

ここに、 σ'_i : Terzaghiの有効応力、 σ_i : 全応力、

u : 間隙圧(中立応力) 飽和土の場合は間隙水圧を示す。

Rendulic^{4,3)} は、飽和したシルト質粘土 ($w_L=47.6\%$, $I_p=24.8\%$) の非排水および排水条件のせん断試験を圧縮と伸張の応力条件で行い、非排水時の有効応力経路や排水時の有効応力-間隙比曲線を求め、せん断現象に対するTerzaghiの有効応力を検証した。非排水せん断時の有効応力経路と排水せん断の等間隙比曲線の形状がよく似ていることから、せん断に対して有効応力が基本的な物理量であることを明らかにした。

その後のTerzaghiの有効応力に関する研究は、間隙水圧を基準応力または土骨格の変形を拘束する内部拘束応力として捉える方向と、有効応力を粒子接触による粒子間応力として捉える2つの方向で進展してきた。前者はBiot^{4,4)} に始まる二相混合体理論による検討であり、岡^{4,5), 4,6)} の研究等^{4,7), 4,8), 4,9)} がある。後者の研究ではBishopとEldin^{5,0)} が粒子接触による粒子間応力を有効応力に取り入れ、Skempton^{5,1)} はBishop^{5,2)} の研究をさらに進め、せん断と体積圧縮を規定する有効応力として式(2.3)を示した。

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma - (1 - a_0 \tan x / \tan \phi) u && \text{(せん断強度)} \\ \sigma' &= \sigma - (1 - C_s / C) u && \text{(体積変化)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここに、 σ' : 有効応力、 a_0 : 粒子接触面積、 σ : 全応力、

x : 土粒子自身のせん断抵抗角、 ϕ : 土のせん断抵抗角

C : 土の圧縮率、 C_s : 土粒子の圧縮率

式(2.3)のSkemptonの定義は、せん断強度と体積変化に関する記述が異なり、土の力学変数として意味をもたないとMitchell⁵³⁾は指摘している。また、BishopとEldin⁵⁰⁾によって、土の工学上問題となる応力範囲では、粒子接触面積は極小さいことが示されており、その場合には、式(2.3)のSkemptonの定義はTerzaghiの有効応力原理と等しくなる。

Terzaghiの有効応力に関して三笠⁵⁴⁾は、基準応力としての間隙水圧は認められるが、土の強度は有効応力のみ関数であるとする考えには疑問があるとした。さらに、軽部⁵⁵⁾、Verruijt⁵⁶⁾およびZienkiewicz^{57), 58)}等によって検討され、岩に対してはNurとByerlee⁵⁹⁾、GargとNur⁶⁰⁾およびCarrollとKatsube^{61), 62)}らによって考察されている。

以上の研究成果をまとめると、Terzaghiの示した「土の強度は有効応力のみ関数である」という考えは、山口⁶³⁾や岡⁶⁴⁾が示した通り、「土骨格の圧縮性に対して間隙流体の圧縮性が小さく、非排水状態での体積ひずみが無視できる飽和された土」に対してのみ成立するものであり、飽和土の強度特性は、例えば「土の骨格は塑性体積ひずみを硬化・軟化の履歴パラメーターにとる弾塑性材料である」という限界状態理論のダイレイタンシー特性を表す構成式と運動方程式の枠組みの中で検討されて初めて意味をもつと考えられている。

Terzaghiの有効応力原理を固体-液体-気体の三相系混合体である不飽和土に拡張した理論として、Jenningsら^{65), 66)}、Croneyら^{67), 68)}、Bishop⁶⁹⁾およびAitchison⁷⁰⁾によって有効応力式が示された。それらの有効応力式のなかで、式(2.4)のBishop⁶⁹⁾とAitchison⁷⁰⁾の式が気相に関する応力項を含み最も普遍的であるとされている。この状況は現在でも変わっていない。

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2.4)$$

ここに、 u_a : 間隙空気圧, u_w : 間隙水圧, χ : パラメーター

$u_a - u_w$: サクシオン

式(2.4)は、土粒子間の接触面積が無視できる場合を仮定すれば、力の釣合いから導くことができる。その場合のパラメーター χ は全断面積に対する間隙水断面積の比となるが、BishopとBlight⁷¹⁾はサクシオンによる効果を含めて、関数 $f(u_a - u_w)$ として表現することを提案している。

不飽和土におけるBishopの有効応力式の適用性は、Skempton⁷²⁾、BishopとDonald⁷³⁾およびBlightら⁷⁴⁾によって検討されている。例えばSkempton⁷²⁾は、三軸試験の軸圧縮過程において σ_3 、 u_a 、 u_w を変化させても $(\sigma_3 - u_a)$ および $(u_a - u_w)$ を一定に保持すれば、せん断応力-軸ひずみ曲線に影響を与えないことを示し、不飽和土においても有効応力が適用できると述べている。

しかしながら、例えば足立および岡⁷⁵⁾は、非排気状態などの拘束状態では間隙空気圧

は空気と土の圧縮性で決定され、そのときの変形が工学的に無視できなければ ($\sigma - u_a$) を有効応力とするのは適切でないとしている。さらにJenningsとBurland⁷⁶⁾ およびBurland⁷⁷⁾ は、外力である ($\sigma - u_a$) と内力である ($u_a - u_w$) を有効応力式の中で同列に取り扱うべきではないと指摘している。すなわち、図-2.3の飽和度が低く、間隙水が土粒子と土粒子の接触点の周りにメニスカスを作ってその中に保持されている (懸垂水不飽和状態) 場合、後の図-2.6に示すようにサクシオン ($u_a - u_w$) はこの接触点に垂直な粒子間力だけを生む。一方、外力 ($\sigma - u_a$) はたとえ等方的であっても、接触点では垂直とせん断の両方の応力を生む。このように性質の異なる応力を一つの式とするのは本来正しくないと指摘したのである。

これらの考えから、有効応力式を定義するかわりに、外力としての ($\sigma - u_a$) と内力としての ($u_a - u_w$) を独立の応力変数 (Stress variables) として取り扱うことが一般的となった。この考えはColeman⁷⁸⁾ やFredlundおよびMorgenstem⁷⁹⁾ が用いて以来、現在においても多くの不飽和土の強度特性に関する研究で用いられている。

近年になってKohgoら^{38), 80)} は、有効応力は連続体力学の枠組みの中で、土の挙動を解釈するために定義されたもので、前述のようなマイクロな挙動に対して式(2.4)が正しくないとする考えは、有効応力の本来の定義に反すると指摘している。さらに、新たな有効応力の定義として、「サクシオンの効果が有効拘束圧の増加による効果とみなせるとき、この有効拘束圧を有効応力と定義する」を提案した。

このKohgoらの提案は、サクシオンの増加は有効応力 (有効拘束圧) と毛管力の2つの力の増加をもたらすが、有効応力の値と履歴が同一であっても、サクシオンの履歴が異なれば、変形挙動 (塑性変形) は同一とならない点に着目して再定義したものである。その内容から、サクシオンの効果は有効応力だけを考慮すればよいのではなく、従来は限界状態理論等の構成式で取り扱われてきた土骨格の軟化や硬化への影響をも考慮する必要があることを示唆している。

さらにKohgoらは、正規圧密または軽い過圧密状態 (限界状態 (Critical state) より湿潤側) での破壊時には、スベリが土の内部の至る所で生じ、土の挙動は一様であり、そのせん断強度には有効応力 (有効拘束圧) が支配的であるとして、以下の経験式を提案している。

$$\sigma' = \sigma - u_{eq} \quad (2.5)$$

$$u_{eq} = u_a - S \quad (S \leq S_c) \quad (2.6)$$

$$u_{eq} = u_a - \left(S_c + \frac{S_c - S_e}{S^* + a_e} S^* \right) \quad (S > S_c) \quad (2.7)$$

$$S^* = \langle S - S_e \rangle \quad (S - S_e < 0 \text{ のとき } 0 \text{ とする}) \quad (2.8)$$

ここに、 u_{eq} : 等価間隙圧, a_e : 材料パラメーター, S_e : 空気侵入値

S_c : 限界サクシオン, S^* : 有効サクシオン, S : サクシオン

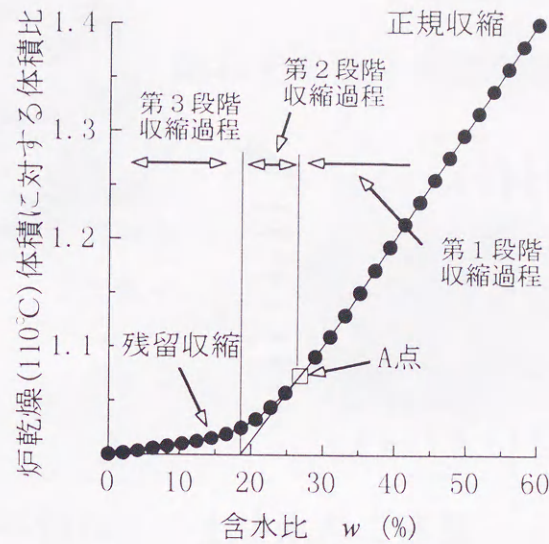


図-2.4 収縮定数試験⁸¹⁾の典型的な結果⁸²⁾

さらに次の式(2.9)、式(2.10)および式(2.11)の応力変数を定義している。飽和土の場合はこれらの式の有効主応力は、式(2.2)のTerzaghiの有効応力式から求められ、不飽和土の場合は、上記の式(2.5)、式(2.6)、式(2.7)および式(2.8)から求められる。

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.9)$$

$$p = \sigma_m - u_a \quad (2.10)$$

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad (2.11)$$

ここに、 σ_m : 平均主応力(= σ_{oct}), $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力

$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$: 有効主応力

2. 3. 2 変形挙動に関する限界

一定外力下でのサクシヨンの増加(乾燥)または減少(湿潤)による体積変化挙動について、有効応力理論の限界を考察する。

2. 3. 2. 1 サクシヨン増加による変形挙動(Shrinking)

一定外力下でのサクシヨン増加による体積変化挙動は、外力が作用しない条件では収縮

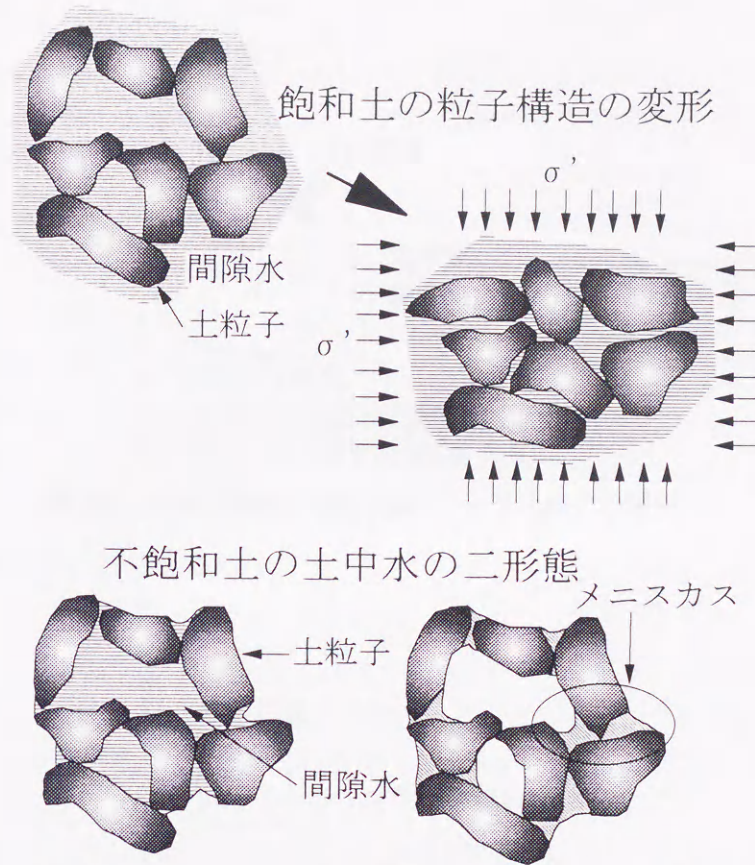


図-2.5 飽和土および不飽和土の粒子骨格構造モデル⁷⁶⁾

定数試験 (Shrinkage test) で求められる⁸¹⁾。図-2.4のYongおよびWarkentin⁸²⁾による典型的な試験結果を例に考察する。

スラリー状態から図中にA点として示した含水比の範囲 (第1段階収縮過程) までは、含水比の減少とともに体積は大きく縮小し、含水比-体積変化関係は線形関係にある。A点までは飽和領域にあり、土中の水の流れはダルシー則に従い、土骨格の体積変化は水の出入りのダルシー則による計量から求まる。よって、図-2.3における封入不飽和状態に相当し、A点のサクシオンは空気侵入値に等しい。この領域でのサクシオン変化は、それと同じ大きさの平均有効応力の変化とみなすことができ、Terzaghiの有効応力が成立する。

A点を越えて含水比を減少させると (第2段階収縮過程)、含水比の変化に比べて体積変化量は小さくなり、過渡的および懸垂水不飽和状態となる。この状態は先の2.2節で述べたように、大きな間隙では水は土粒子接触点に作られたメニスカス内に保持され、サクシオンによる粒子間力が土骨格の変形を拘束するために体積変化量が小さくなった状態である。

さらに第3段階収縮過程では、水分が散出してもほとんど土は収縮を示さない。これらのA点を越えて含水比が減少した2つの領域の体積変化挙動は、有効応力では説明できない。

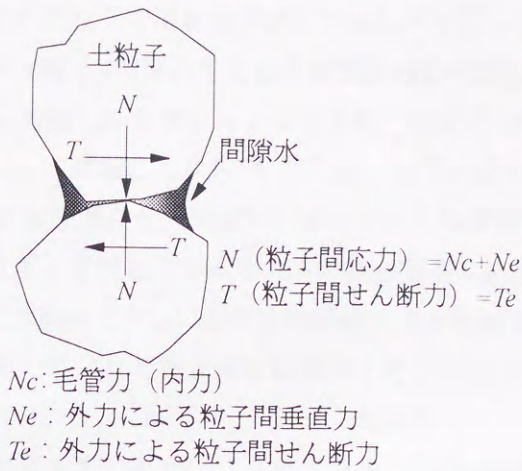


図-2.6 土粒子接触点の粒子間応力とせん断力の関係⁷⁷⁾

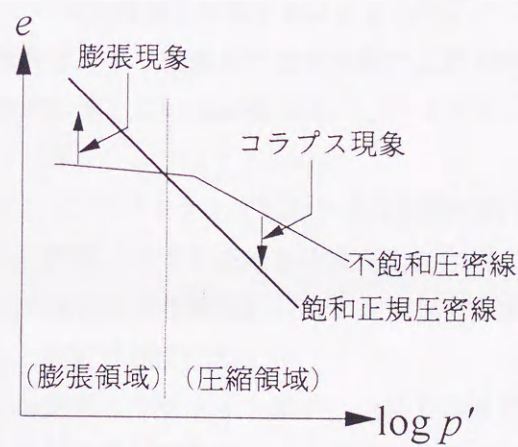


図-2.7 不飽和土の飽和による体積変化後の応力点移動⁸⁹⁾

2. 3. 2. 2 サクシオン減少による変形挙動 (CollapseおよびSwelling)

サクシオンを減少させると、土は圧縮 (Collapse) または膨張 (Swelling) する。載荷状態下の緩い構造の不飽和土に水が浸透してサクシオンが減少し、体積減少するコラプス現象について、JenningsとKnight⁸³⁾ は砂質土の圧密試験で再現し、体積減少量は拘束圧が大きいほど大きいことを示し、二重圧密試験 (Double oedometer test) による体積減少量の推定法を提案している。

また、JenningsとBurland⁷⁶⁾ は、このコラプス現象は有効応力原理に矛盾することを指摘し、図-2.5の飽和土および不飽和土の粒子骨格構造モデルを用いて、飽和土の有効応力による変形に比べ不飽和土では、メニスカスによる粒子間力を生じるために粒子骨格構造が安

定化し、この粒子間力が外力の下で浸水を受けて消滅しコラプス現象が生じると説明した。

その他にBurland⁷⁷⁾は、図-2.6を用いて土粒子接触点の粒子間応力とせん断力および土粒子の摩擦係数の関係から考察し、サクシオンによる粒子間応力が減少し粒子間に滑りが生じるのが原因であるとした。同様に八木ら^{84), 85)}は、粒子間応力を外力と内力のサクシオンに分けて定性的な検討を進展させ、阿部⁸⁶⁾はコラプス現象発生の因子として土粒子の幾何学的な配列のみならず、作用している外力の影響も重要であることを示している。

以上から、有効応力では説明できない土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力が、水の浸入（飽和度の上昇）によって減少または消滅することがコラプス現象を生じる原因と考えられている。

このようなコラプス現象を生じる土は、コラプス土（Collapsible soil）と呼ばれ、Bardenら⁸⁷⁾は、その発生要因として次の3つをあげている。

第1に土が潜在的に不安定な構造をもっていること、第2に水の侵入（飽和度の上昇）によって壊される一時的な剛性をもった構造を保持するに必要な十分なサクシオンが作用していること、第3に潜在的に不安定構造を発現するに必要な高い外力が作用していること等である。このことから最適含水比より乾燥側の含水状態の土質材料で締固められた地盤や工学的に安定した締固め密度に達していない地盤では、このコラプス現象が発生する可能性が高いことが理解できる。

一方、膨張現象は、特にモンモリロナイト鉱物を含む膨張性粘土において問題となるが、Chen⁸⁸⁾が示したように、膨張に対する十分な拘束圧力が作用している場合には発生しない。よって、サクシオンの除荷による膨張は、サクシオンによる拘束圧変化に起因したものと理解でき、有効応力で説明が可能である。

向後⁸⁹⁾は、不飽和土の飽和（サクシオン減少）による体積変化後の応力点は、必ず同じ初期状態をもった飽和正規圧密状態での $e-\log p'$ 線上に移動することから、サクシオン減少時に生じる体積変化挙動について、図-2.7を用いて以下のように説明している。

飽和正規圧密線の内側の不飽和から飽和状態へ移行した土は、弾性挙動による膨張を示し、外側の不飽和から飽和状態へ移行した土は、飽和正規圧密線の外側の応力状態は存在しないために、飽和正規圧密線上に位置することになり、塑性挙動による収縮を示す。このようにサクシオンを減少させた場合に、膨張と収縮のどちらが生じるかは、土の応力状態に依存するとしている。

2.3.3 まとめ

2.3.1項および2.3.2項で示した不飽和土の強度特性と変形挙動について、阿部⁸⁶⁾は粘性土を用いた実験から以下の結果を示している。

標準圧密試験ではサクシオンが196kPa以下において、サクシオンと等価の圧密降伏荷重が得られ、それ以上ではサクシオン増加に伴う圧密降伏荷重増加割合は急速に減少する。

さらに、Bishopの有効応力式のパラメーター χ と飽和度の関係は、飽和度が小さいほどせん断変形と1次元圧密とで異なり、共通する飽和度領域の飽和度90%以上ではサクシオンと有効応力は等価であり、90%未満において有効応力以外の土の骨格構造を支える力が生じる可能性が高いとした。

この阿部が示した飽和度90%は、空気が間隙内に侵入する空気侵入値 (Air entry value) に相当する。これらの結果は、Kohgoら^{38), 80)}の示した有効応力定義に矛盾しない。その他に、赤井ら⁹⁰⁾、藤本^{91), 92)}、向後ら⁹³⁾、軽部ら⁹⁴⁾、川上ら^{95), 96)}、松尾ら⁹⁷⁾、龍岡ら⁹⁸⁾、宇野⁹⁹⁾およびOlson¹⁰⁰⁾の研究が関連して行われている。

以上をまとめると、不飽和土の力学特性には骨格構造を支える機構が影響する領域が存在し、「土の骨格構造を支える機構の影響が生じない程度に不飽和な状態、例えば、空気侵入値以下のサクシオンや正規圧密や完全軟化状態 (Critical state) に限定して、Bishopの有効応力式はせん断強さに関して成立する」といえる。

わが国においては湿潤な気候のために自然地盤の含水比は比較的高い場合が多いが、地下水位付近より浅いところの表層地盤などは不飽和状態にあり、地下水位以下の深度においても飽和度が100%に達していないことも珍しくない。よって、有効応力理論では一般的な表層地盤の土の力学特性は説明できないことになる。

その他に不飽和土を弾塑性体と仮定する理論が、軽部ら^{101), 102), 103), 104), 105)}、Alonsoら^{106), 107)}および向後ら⁹³⁾によって提案されている。例えば軽部らはサクシオン応力 $f(s)$ を定義し、不飽和土の力学特性はこのサクシオン応力 $f(s)$ で簡潔に表されることを示している。このような取組みは、不飽和土の複雑な物理化学的特性を力学的に簡便に表現できる点に価値があり、その反面、軽部ら^{108), 109)}が指摘しているように、例えばAlonsoらの構成式には、土の物理化学的性質との関係が明らかでない実験定数が多く含まれており、土を弾塑性体と仮定したために、土の物理化学的性質と力学特性の関係の考察が十分に成されていない。

以上の2.3節の考察に用いた既存の研究成果等は、1960年にAitchison¹¹⁰⁾がColeman¹¹¹⁾による土質実験データから、土質力学的な観点からは間隙保水にかかわるマトリックスポテンシャルだけを考慮すればよいと結論した論文をもとにして、有効応力と重力相互作用であるマトリックスポテンシャルの粒子間力を取り扱ったもので、次節で述べる電磁的相互作用による粒子間力の考察は含まれていない。

2. 4 電磁的相互作用による粒子間力の影響

2. 4. 1 サクシオンと粒子間力の関係

飽和土に対して電磁的相互作用による有効応力を定義したものとして、Lambe¹¹²⁾ や Sridharan^{113), 114), 115), 116)} の研究がある。Lambeは式(2.12)を提案し、Sridharanは、粒子間引力が増加すれば有効応力が減少するのは物理的矛盾だとしてLambeの式を修正している。

$$\sigma' = \tilde{\sigma} a_m + R - A \quad (2.12)$$

ここに、 $\tilde{\sigma}$: 鉱物間接触応力、 a_m : 鉱物間接触面積

R : 全粒子間反発力/全粒子間面積

A : 全粒子間引力/全粒子間面積

式(2.12)は電磁的相互作用による粒子間力と有効応力の関係を示した式として評価されるが、著者が論文のなかで粒子間力の源としてあげたvan der Waals引力、電気的相互作用および界面張力等と有効応力の関係は明らかとされておらず、物理学的概念を示すもので具体的な力学的関係を示すものとはなっていない。

不飽和土では、Sridharan¹¹⁷⁾ がLambeが導入した電磁的な力を拡張して、化学ポテンシャルを導入した式(2.13)を提案し、Aitchison¹¹⁸⁾ は式(2.14)を提案している。これらの有効応力と化学ポテンシャルの関係式は、有効応力を粒子間力に置き換え、さらに化学的結合等が存在しない巨視的な粒子集合体に限定すれば、物理学理論からも認められている¹¹⁹⁾。

$$\sigma' = \sigma + p'_m + p'_s = \sigma - u_a - u_w - R + A \quad (2.13)$$

ここに、 p'_m : マトリックスポテンシャル

p'_s : 浸透ポテンシャル

$$\sigma' = \sigma + x_m p'_m + x_s p'_s \quad (2.14)$$

ここに、 x_m : マトリックスポテンシャルの係数

x_s : 浸透ポテンシャルの係数

上記の式(2.13)および式(2.14)で導入された土中水のエネルギー状態を表す化学ポテンシャル

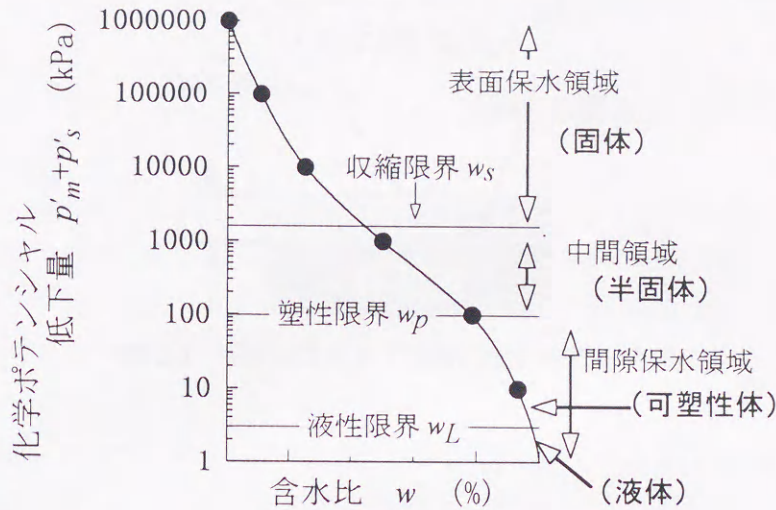


図-2.8 化学ポテンシャル低下量と土の状態およびコンシステンシー限界の関係¹²¹⁾

は、正確には同一温度で大気圧下にある純水の化学ポテンシャルに対する、化学ポテンシャル低下量である¹¹⁹⁾。土中水の化学ポテンシャル低下量は式(2.15)で定義される¹²⁰⁾。

$$\Delta\mu = \mu - \mu_0 = p'_m + p'_s \quad (2.15)$$

ここに、 $\Delta\mu$ ：化学ポテンシャル低下量， $pF = \log|\Delta\mu|$ ， $(u_a - u_w) = -(\Delta\mu)$

μ ：土中水の化学ポテンシャル， μ_0 ：純水の化学ポテンシャル

化学ポテンシャル低下量を圧力水頭 (cmH₂O) で表し、常用対数表示したものが、いわゆるpF値である。Bishopの有効応力式等で導入されたサクシオン ($u_a - u_w$) は、それを発表した論文内容から⁶⁹⁾、マトリックスポテンシャルを指すと考えられるが、サクシオンがマトリックスポテンシャルのみであるのか、浸透ポテンシャルを含むものであるかの相違は、サクシオンの計測方法にのみ起因している。よって、式(2.15)に示すように本来の意味のサクシオンは、負号を取り除いた化学ポテンシャル低下量と等しくなる¹²⁰⁾。

図-2.8に化学ポテンシャル低下量と土の状態およびコンシステンシー限界 (Consistency limitsまたはAtterberg limits) の関係を模式的に示す¹²¹⁾。このように土の状態やコンシステンシー限界等は、化学ポテンシャル低下量またはサクシオンから定義することもできる。

2. 4. 2 マトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの相互作用

マトリックスポテンシャルを構成する固体-液体間の界面自由エネルギーは、固体表面

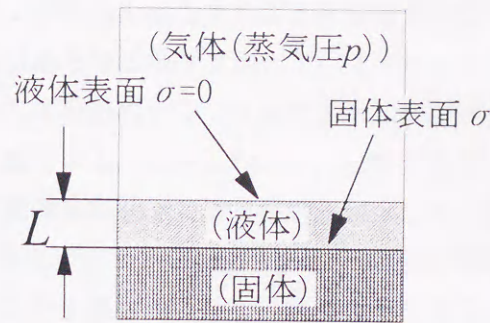
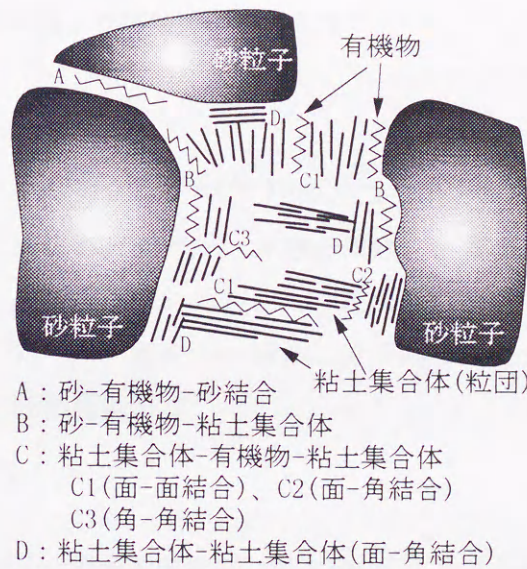


図-2.9 不飽和のガラス表面の水膜モデル¹²⁷⁾



- A : 砂-有機物-砂結合 粘土集合体(粒団)
- B : 砂-有機物-粘土集合体
- C : 粘土集合体-有機物-粘土集合体
- C1(面-面結合)、C2(面-角結合)
- C3(角-角結合)
- D : 粘土集合体-粘土集合体(面-角結合)

図-2.10 土の構造模式図¹²⁹⁾

の水分子の吸着層厚さで変化するために、電磁的相互作用であるBrunauer, S., Emmett, P.H. および Teller, E. の BET 理論¹²²⁾ や BET 理論を改良した岩田の表面吸着モデル¹²³⁾ 等の表面保水にかかわる多分子吸着現象の影響を受ける。さらに液体-気体間の界面自由エネルギーは、間隙の大きさから決定する界面曲率半径で変化する。また、浸透ポテンシャルである浸透圧はイオン濃度差で変化する。

よって、ギブスの自由エネルギーの定義¹²¹⁾ から、土系が平衡状態にあれば、化学ポテンシャルは一定であり含水量で決定されることになるが、土および土中水の組成と土粒子同士の位置関係等でそれぞれのポテンシャル成分の大きさや影響度が異なる点が重要である^{121), 124)}。

すなわち、土中にイオン濃度差を起こす原因となる溶質移動を妨げる要因が存在しない粗砂等の場合、溶質濃度はあらゆる場所で均一で、マトリックスポテンシャルが同じであれば溶質の有無にかかわらず浸透ポテンシャルは含水比に影響せず、化学ポテンシャルは浸透ポテンシャル分だけ低下する。しかしながら、実在する多くの不飽和土では、土粒子の表面電荷や物理的な微細骨格構造等で溶質移動が妨げられ、溶質は土中で局在すると予想できる。この局所的な浸透ポテンシャル低下を補うべく水分移動や骨格構造変化が生じ、マトリックスポテンシャルを上昇させ、あるいは浸透ポテンシャルを低下させ、他の場所と等しい化学ポテンシャルを持つようにエネルギー調整されていると考えられる¹²⁵⁾。

このようなマトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの相互作用例を以下にあげる。

例えば、力学的には重力相互作用のサクションで決定される図-2.9の不飽和のガラス表面の水膜厚さは、純水の対イオンの電気的作用で、液体表面の電荷密度 σ をゼロとするLangmuirの式(2.16)¹²⁶⁾の値より常に大きくなる^{127), 128)}。

$$F(L) = \epsilon\epsilon_0 \left(\frac{\pi k T}{Ze} \right)^2 / 2L^2 = \left(\frac{kT}{v} \right) \log \left(\frac{p}{p_{sat}} \right) \quad (2.16)$$

ここに、 $F(L)$: 液体の分離力、 L : 水膜の厚さ、 e : 電気素量、 ϵ_0 : 誘電率

ϵ : 比誘電率、 k : ボルツマン定数、 T : 熱力学温度 (K)

z : 対イオン価数、 v : 液体の分子体積、 p/p_{sat} : 相対蒸気圧

p_{sat} : 飽和蒸気圧

さらにEmerson¹²⁹⁾がその様子を模式的に図-2.10に示したように、土粒子は配列して2次粒子(粒団: Aggregate)、さらに3次、4次粒子を作る。自然状態で生成された粒団はペッド(Ped)と呼ばれ、Collinsら¹³⁰⁾は砂粒子とこのペッドを、骨格構造の基本単位とすることを示しているが^{131), 132)}、土粒子がこのような集合体を形成する原因の一つは、粘土等の土粒子の大きな表面電荷で生じた局所的な浸透ポテンシャルの影響と捉えることもできる。

この粒団のイオン吸着作用について、HatanoとSakuma¹³³⁾は、粒団の大きさの異なる褐色低地土の表層部に塩化カリウムを添加したカラムを用いて、降雨を仮定した通水試験から、粒団と土中のイオンの関係について検討している。その結果、カリウムは粒団の大きさにかかわらず表層部に多くが残存し、土粒子表面への吸着がみられたが、塩素は粒団が小さいほど下層部に移動していた。この結果について著者らは、通水した水は粒団表面のみを洗浄して粗孔隙に流入してしまい、粒団がその内部の塩素の溶出を抑制したと考察している。

西田ら¹³⁴⁾および八木ら¹³⁵⁾は、砂質土斜面が雨水浸透によって崩壊を起こす現象につ

いて、土塊重量の増加、間隙圧の増加などによる土の強度低下のほかに、吸水によるマトリックスポテンシャルの減少または消滅に起因する強度減少が少なくないことに注目し、飽和-不飽和領域における斜面安定解析を行っている。

これらは、西田らおよび八木らが対象とした砂質土斜面のような、土粒子の表面電荷が小さく、さらに物理的な微細骨格構造等で溶質移動が妨げられないような浸透ポテンシャルによる粒子間力が小さな場合や、前述の発達した粒団によって、イオンの吸着とともにイオンの溶脱が抑制され、さらに浸透ポテンシャルによる粒子間力の変動が少ない場合にのみ成立すると考えられる。この考察については、Matsuo¹³⁶⁾ および松尾と富田^{137), 138)} が、浸透ポテンシャルによる粒子間力を変化させるイオン交換法が、実施工において地滑り安定化に有効であることを確認していることから理解される。

以上から、マトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの相互作用は明らかに存在すると考えられるが、図-2.8に示す液性限界から収縮限界に至る土質力学的に重要なサクションの範囲では、マトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの両方を同じ方法で別々に測定する技術は開発されておらず、両者の相互作用に関する実験的な検証は成されていない。本研究では、この相互作用を第4章の4.3節において実験的に確認している。

2.4.3 まとめ

2.4.1項および2.4.2項から、土の骨格構造を支える機構は、土中水の化学ポテンシャルと土の物理化学的性質の間の相互作用によって生じる粒子間力によって生成され、マトリックスポテンシャル以外に浸透ポテンシャル等の電磁的相互作用による粒子間力の影響が存在することは明らかである。

この土中水の化学ポテンシャルと土の物理化学的性質の間の相互作用について、Matsuiら¹³⁹⁾ がせん断抵抗への影響に関して実験的に検討しているが、実験結果を説明する理論的根拠は示されていない。土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力を明らかにするには、表面物理学的な視点からの固体-液体-気体の三相系の自由エネルギー相互作用を基本とした検討が必要である。

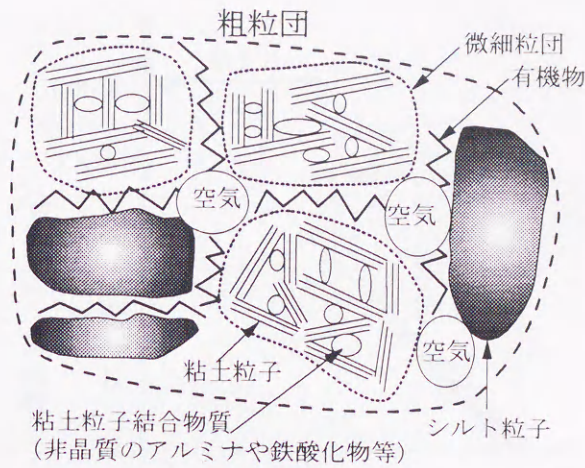


図-2.11 土の骨格構造模式図 (粗粒団内部) (141), (130)

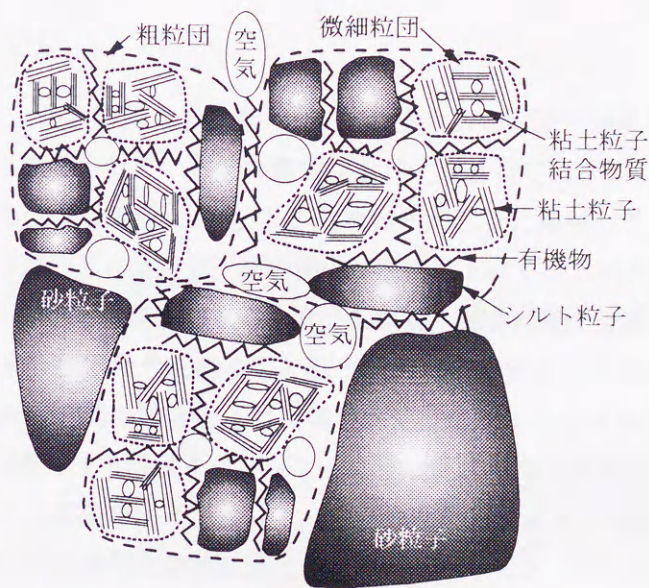


図-2.12 土の骨格構造模式図 (全体概要)

2. 5 土の骨格構造と粒子間力の関係

2. 5. 1 土の骨格構造の定義

土は様々な大きさの粒子から構成される。それぞれの粒子が単体で存在するときは1次粒子とよばれ、自然地盤では砂は1次粒子として、粘土やシルトは2次粒子以上の粒団として存在する。このような1次粒子および粒団を示すものとして土の構造という概念があり、喜

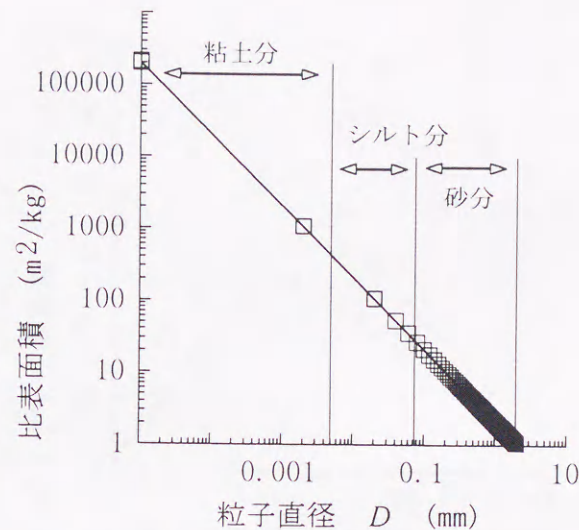


図-2.13 粒子直径と比表面積の関係¹⁴³⁾

田¹⁴⁰⁾は「大きさ、形状の異なる土粒子（1次粒子および粒団）が各種の結合状態と配列状態で立体的に組み立てられている土の構成状態」と定義している。

不飽和状態の砂のような粗粒土の配列は、1次粒子が相互に接触して土の骨格を形成した充填の形態（詰まり方）として捉え、結合因子は主にマトリックスポテンシャルのサクションによる粒子間力および有効応力によると考えられる。鉱物種類、土粒子表面の電荷密度、鉄・アルミニウム等の酸化物や有機物等の粒子間の架橋物質の有無等が関係して形成された粒団同士またはその内部の結合因子は複雑で、完全に明らかにされてはいない。しかしながら、本研究が対象とする締固めに使用するような乱された土質材料の状態を考えれば、粒団内部の結合因子は無視できる。よって、力学的な乱れによって分離可能な、1次粒子と2次粒子以上の粒団の塊の物理化学的性質と土中水の化学ポテンシャルの間の相互作用によって生じる粒子間力が結合因子となる。

以上から、本研究で考える「土の骨格構造」とは、Collinsら¹³⁰⁾の提案した図-2.11¹⁴¹⁾および図-2.12に示すような、1次粒子および粒団が力学的な乱れによって分離可能な粒子間力で結合された巨視的な構造である。

2. 5. 2 土の物理化学的性質が粒子間力へ与える影響

2.5.1項で述べたように、土は様々な粒径の粒子や粒団から構成されるが、三土¹⁴²⁾が整理した、我が国の代表的土壌の有機物含有量と粒径区分の深さ方向の分布によると、無機質および有機質成分の分布は、地形や植生に依存してはいるものの、相対的に表層部では有機物含有量が増加する傾向にあり、粘土含有量は20%~50%の土が多く、河川付近の褐色低地土は砂含有量が高いこと等が示されている。

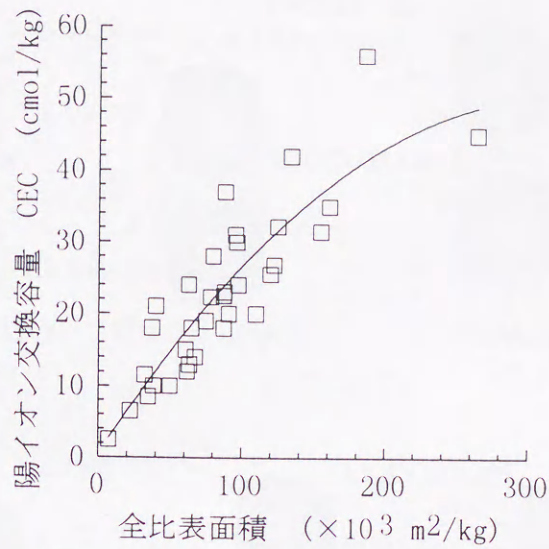


図-2.14 全比表面積と陽イオン交換容量の関係^{1.43), 1.44), 1.45)}

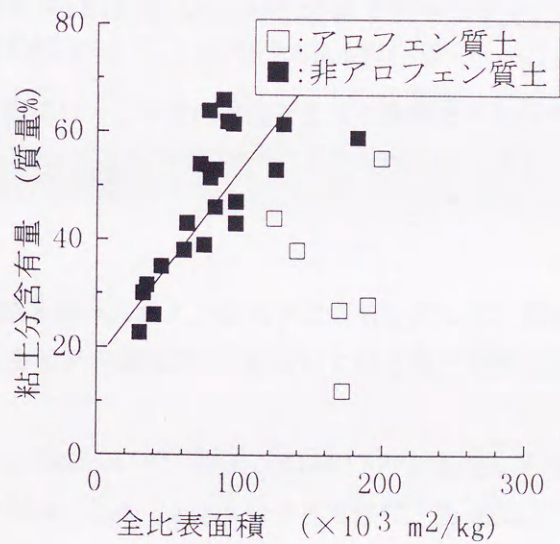


図-2.15 全比表面積と粘土含有量の関係^{1.43), 1.44), 1.46)}

図-2.13^{1.43)} は土粒子を球に仮定した場合の、粒子直径と比表面積の関係である。国際土壌学会では直径0.002mm以下で定義される粘土 (JISでは0.005mm以下) の比表面積は、 $1.07 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ 以上であり、直径2mm以上の砂の比表面積は $1.07 \text{ m}^2/\text{kg}$ 以下にすぎず、粘土分を多く含む土は大きな比表面積を有することになる。実際の土粒子は複雑な形状をしており、例えば粘土鉱物は、第4章の図-4.2で示されるような単位シートを数枚張り合わせた構造で

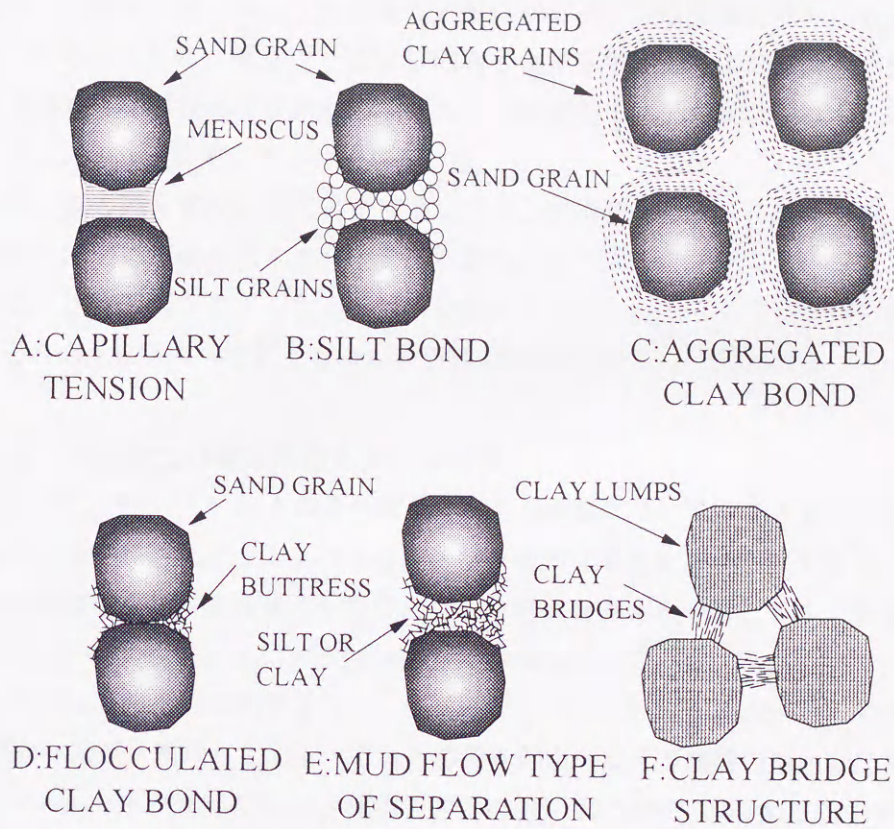


図-2.16 土の骨格構造を支える機構モデル¹⁵³⁾

あり、有機物は付録Aの写真-A.1および写真-A.2に示すように、細胞構造を保持したまま存在するものが多く、外表面と内表面の2つを有している等、実際の比表面積はさらに大きいことが推察される。

図-2.14¹⁴³⁾はFarrarとColeman¹⁴⁴⁾およびSmith¹⁴⁵⁾が測定した全比表面積と陽イオン交換容量の関係である。FarrarとColemanは水分子吸着法で、Smithはグリセロール吸着法によって内表面を含む全比表面積を求めたものである。図-2.14から、全比表面積が小さい土は、陽イオン交換容量が小さいことがわかる。また、図-2.15¹⁴³⁾のFarrarとColeman¹⁴⁴⁾および馬場¹⁴⁶⁾の結果によると、直径0.002mm以下で定義される粘土の含有量が多いほど、全比表面積が大きく、黒ボク土等のアロフェン質土は、少ない粘度含有量でも大きな全比表面積を示す。

このように比表面積が大きいことは多量の物質を表面に吸着できることを意味し、風化溶出したカルシウム、マグネシウム、カリウム、ナトリウム、鉄およびマンガン等の一部が吸着される。これらの吸着現象については、付録Aおよび付録Bを参照されたい。

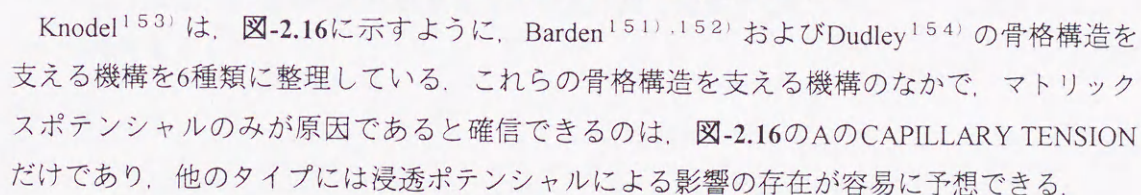
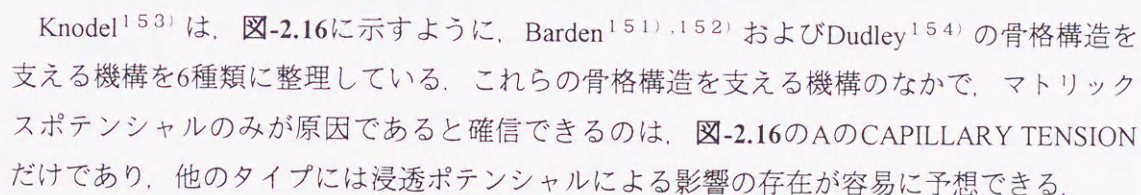
一方、固相と液相のかかわりを土中水に存在するイオンから考察すると、岡島¹⁴⁷⁾は、

土に陽イオン交換基があれば、土に固有な分配係数でイオンは固相と液相に分配されることを示している。さらに、岡島¹⁴⁸⁾ および岡島と今井ら¹⁴⁹⁾ は、このイオンの分配機構には、微生物分解や化学反応等がかかわっており、液相のイオン濃度はそれぞれの土に固有のメカニズムによって決定されると述べている。

以上から、後の第3章の3.2節で考察するように、浸透ポテンシャルによる粒子間力は、粒子表面間に位置する液相のイオン濃度と外側のバルク相のイオン濃度の差によって決定されるため、比表面積が大きくなるほど、浸透ポテンシャルによる粒子間力の影響は増加し、それぞれの土に固有の性質をもった粒子間力が形成されることになる。

2. 5. 3 不飽和土の骨格構造を支える機構

Bardenら^{150), 151), 152)} は土の骨格構造を支える機構について、サクションあるいは土粒子同志の化学的凝結によって土の骨格構造が一時的な剛性を持つことであると述べ、さらに電子顕微鏡を用いて骨格構造を観察し、骨格構造を支える機構として、毛管力による結合、粘土粒子による結合および化学的結合の3種類を示している。

Knodel¹⁵³⁾ は、に示すように、Barden^{151), 152)} およびDudley¹⁵⁴⁾ の骨格構造を支える機構を6種類に整理している。これらの骨格構造を支える機構のなかで、マトリックスポテンシャルのみが原因であると確信できるのは、のAのCAPILLARY TENSIONだけであり、他のタイプには浸透ポテンシャルによる影響の存在が容易に予想できる。

さらにJenningsとBurland⁷⁶⁾ は、Bishopの有効応力式を適用できるのは、粘性土では飽和度90%以上、砂質土では50%以上という限界飽和度の存在を主張したが、2.5.2項で考察した土の物理化学的性質から考え、両者の限界飽和度の相違には、土粒子の比表面積や表面の電荷密度等の違いによる浸透ポテンシャルの影響の相違もかかわることは明らかである。

このような土の骨格構造を支える機構が浸水によって減少あるいは消滅する現象は、概念的には、マトリックスポテンシャルによる粒子間力が解放されるとともに、バルク相のイオン濃度が減少して浸透ポテンシャルが変化し、粒子間力が増す（粒子間力自体は減少する）ためと考えられるが、それらの実験による検証は十分に成されていないのが実状である。

2. 6 本章のまとめ

本章で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 被害規模の大きい地震被害を例にして、地盤被害軽減の重要性を示し、不飽和土の粒子間力によって土粒子の移動が妨げられ、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土は工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られない問題を示した。その他にこの低い締固め密度が原因で生じる災害例として、長期にわたる緩速な地盤沈下現象、降雨等で飽和度が増加した場合の地盤沈下現象や斜面崩壊現象等を示した。
- 2) 破壊面上の破壊時全直応力のなかで、飽和土の摩擦抵抗に有効な直応力は有効応力とされるが、不飽和土では有効応力では説明できない粒子間力が大きな影響を与えることを示し、上述の1)で示した問題の解決法の案として、この粒子間力の制御を提案した。
- 3) 締固めに用いるような乱された不飽和土の骨格構造を支える機構は、土中水の化学ポテンシャルと土の物理化学的性質の間の相互作用で発生する粒子間力で、生成されるという考えを示した。

参考文献

- 1) 那須 誠：地震被害と地盤構造の関係に関する研究，長岡技術科学大学 博士学位論文，平成5年12月。
- 2) Kuribayashi, E., Jiang, T., Niuro, T., Nagasaka, H., Kuroiwa, S. and Nishioka, S.: Study of an assessment for site effect of seismic strong motions, Proc. of 5th International Conf. on Soil dynamics and earthquake Engg., pp.23-33, 1991.
- 3) Kuribayashi, E., Niuro, T., Nishioka, S., Sonoda, K. and Jiang, T.: Site effects of earthquake ground motions, Proc. of the tenth World Conf. on Earthquake Engg., Vol.2, pp.947-952, 1992.
- 4) 鏡味洋史：都市住空間における震災の連関・波及分析，都市住空間の震災予測と耐震化システムに関する研究，文部省科学研究費重点領域研究（代表：柴田明德），pp.15-28, 1990.
- 5) 片山恒雄：都市震災の連関および波及構造の解明とその震災想定調査への利用に関する研究，昭和63年度科学研究費補助金（一般研究B）研究成果報告書，1989.
- 6) 新納 格，堀田 浩，栗林栄一：地震災害危険度及び震災復旧手順決定へのニューラルネットワークモデルの適用，構造物の安全性及び信頼性，Vol.2, 第2回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム，土木学会，pp.563-566, 1991.
- 7) Niuro, T., Miura, N. and Kuribayashi, E.: Parallel processing approach to the assessment of earthquake risks: Proc. of the Second Asian Pacific Conference on Computational Mechanics, pp.1057-1062, 1993.
- 8) Niuro, T., Yamakawa, A., Jiang, T. and Kuribayashi, E.: A comparative study of an assessment of earthquake risks: Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engg, Vol. VII, pp.637-642, 1988.
- 9) Niuro, T., Kuribayashi, E., Kyokuno, W. and Iiyoshi, K.: Malfunction analyses of roads and streets during earthquake in Shanghai: Proc. of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engg., Vol.1, pp.821-830, 1990.
- 10) 飯吉勝巳，安井 精，新納 格，栗林栄一：地震火災の延焼を考慮した道路網の震災危険度評価，第8回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.1, pp.121-126, 1990.
- 11) Yasui, M., Niuro, T., Kuribayashi, E., Jiang, T. and Iiyoshi, K.: Urban earthquake evacuation risk evaluation: -An Example-, Proc. of the tenth World Conference on Earthquake Engg., Vol.10, pp.6025-6030, 1992.
- 12) 新納 格，栗林栄一，飯吉勝巳：上海市における震災時の避難危険度評価，土木構造・材料論文集，第8号，pp.41-49, 1993.
- 13) 例えば，土木学会編：阪神淡路大震災震害調査，土木学会緊急報告会資料，1995.
- 14) 小松広和，金子孝雄，都築富夫，新納 格，栗林栄一：小口径短杭の水平抵抗に関する研究，第8回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.2, pp.1245-1250, 1990.
- 15) 新納 格，小松広和，栗林栄一，都築富夫：小口径短杭の横抵抗に関する研究，土木構造・材料論文集，第7号，pp.27-34, 1992.

- 16) Niiro, T., Kuribayashi, E., Komatsu, H.: Lateral resistance of standing pipes, Proc. of the tenth World Conference on Earthquake Engg., Vol.3, pp.1955-1960, 1992.
- 17) 地盤工学会編：液状化対策の調査・設計から施工まで, 1993.
- 18) 建設省土木研究所：耐震地盤改良工法に関する共同研究報告書（その6）, 共同研究報告書, 第68号, 1992.
- 19) 建設省土木研究所：軟弱地盤耐震対策工法に関する共同研究報告書, 共同研究報告書, 第91号, 1993.
- 20) 新納 格, 宮沢 健, 竹内雄幸：土質用耐震・免震材料に関する研究, 第22回地盤工学研究発表会講演集, 2分冊の2, pp.1923-1924, 1987.
- 21) 新納 格, 宮沢 健, 竹内雄幸：地盤の改良方法, 特許第2508104, 1996年4月16日登録.
- 22) 例えば, 小堀鐸二, 鎌形修一：可変剛性型制震システムの性能評価, アクティブ制震（振）シンポジウム論文集, pp.278-286, 1992.
- 23) 廣田昌憲, 石村紀久雄, 鈴木康嗣, 三浦賢治, 永野正行, 清田芳治：地震応答低減地業の開発 その1 解析的検討と材料試験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第448号, pp.37-46, 1993.
- 24) 鈴木康嗣, 廣田昌憲, 石村紀久雄, 三浦賢治, 清田芳治：地震応答低減地業の開発 その2 高減衰材料の動的変形特性, 日本建築学会構造系論文報告集, 第458号, pp.29-38, 1994.
- 25) 建設省土木研究所, 財) 土木研究センター：地下構造物の免震設計法マニュアル（案）, 1998.
- 26) 地盤工学会：土と基礎 阪神・淡路大震災（その1）, Vol.44, No.2, pp.1-85, 1996.
- 27) 地盤工学会：土と基礎 阪神・淡路大震災（その2）, Vol.44, No.3, pp.1-64, 1996.
- 28) 沼田淳紀, 太田直之, 森伸一郎, 境野典夫, 滝本幸夫：1987年千葉県東方沖地震で生じた噴砂の液状化特性, 第20回地震工学研究発表会概要集, 土木学会, pp.241-244, 1989.
- 29) 1993年地震災害調査報告：1993年釧路沖地震・能登半島沖地震災害調査報告, 地盤工学会, pp.187-214, 1994.
- 30) 金子正之, 田村圭司, 佐々木 康, 勝山明雄, 佐藤謙司：平成5年北海道南西沖地震による河川堤防被害について, 第29回地盤工学研究発表会概要集, pp.971-972, 1994.
- 31) 森伸一郎, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘：埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, Vol.39, No.2, pp.17-22, 1991.
- 32) 佐藤正行, 小田匡寛, 風間秀彦, 小野木克己：細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.561/Ⅲ-38, pp.271-282, 1997.
- 33) 足立雅樹, 安原一哉, 福島正明：非塑性シルト質土の液状化とそれに伴う体積変化特性, 土木学会論文集, No.535/Ⅲ-34, pp.145-154, 1996.

- 34) 黄 大振, 柳沢栄司, 菅原高弘: シルトを含む砂のせん断特性について, 土木学会論文誌, No.463/Ⅲ-22, pp.25-33, 1993.
- 35) 地盤工学会編: 降雨と地震から危険斜面を守る地盤工学に関するシンポジウム発表論文誌, 1997.
- 36) 新納 格: 土の急速締固め・圧密工法の開発: 低平地研究, 佐賀大学 低平地防災研究センター, No.5, pp.107-112, 1996.
- 37) 新納 格: サクション制御による急速締固め工法の開発: 低平地研究, 佐賀大学 低平地防災研究センター, No.6, pp.75-83, 1997.
- 38) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.: Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 39) 例えば, 山口柏樹: 土質力学 (全改訂), 技報堂出版, pp.141-196, 1996.
- 40) 大北康治, 中沢重一: 不飽和土の締固め機構について, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文誌, 地盤工学会, pp.141-148, 1987.
- 41) 吉村優治, 小川正二: 粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響, 土木学会論文誌, No.487/Ⅲ-26, pp.99-108, 1994.
- 42) Terzaghi, K.: The shearing resistance of saturated soils, *Proc. of 1st ICSMFE*, Vol.1, pp.54-56, 1936.
- 43) Rendulic, L.: Ein grundgesetz der tonmechanik und sein experimenteller beweis, *bauing*, Vol.18, pp.459-467, 1937.
- 44) Biot, M.A.: Geneal theory of three-dimensional consolidation, *Jour. of applied physics*, Vol.12, pp.155-164, 1941.
- 45) 岡 二三生: 二相混合体理論からみた有効応力の定義について, 土木学会論文報告集, 第299号, pp.59-64, 1980.
- 46) Oka, F.: The validity of the effective stress concept in soil mechanics, *Proc. of 2nd US - Japan seminar on mechanics of granular materials*, ed. by J.T. Jenkins and M. Satake, 1988.
- 47) Truesdell, C.: *Rational thermodynamics*, McGraw-Hill, 1969.
- 48) Green, A.F. and Naghdi, P.M.: A dynamical theory of interacting continua, *Int. Jour. Engg. Sci.*, Vol.3, pp.231-241, 1965.
- 49) Muller, I.A.: Thermodynamic theory of mixtures of fluids, *Jour. Arch. Rational Mech. Analysis*, Vol.24, pp.370-403, 1967.
- 50) Bishop, A.W. and Eldin, G.: Undrained triaxial tests on saturated sands and their significance in the general theory of shear strength, *Geotechnique*, Vol.2, pp.13-21, 1950.
- 51) Skempton, A.W.: Effective stress in soils, concrete and rocks, *Proc. of pore pressure and suction in soils*, pp.4-16, 1960.
- 52) Bishop, A.W.: The principle of effective stress, *Jour. Norwegian Geotechnical Institute*, No.32, pp.1-5, 1960.

- 53) Mitchell, J.K.: Fundamentals of soil behavior, John Wiley and sons, pp.186-196, 1976.
- 54) Mikasa, M.: Record of main session, Proc. of 9th ICSMFE, Vo.3, pp.346-347, pp.355-356 and 429-430, 1977.
- 55) 軽部大蔵: 全応力法・有効応力法小史, 土質工学展望, 地盤工学会関西支部, pp.3-18, 1978.
- 56) Verruijt, A.: Some remarks on the principle of effective stress, Proc. of IUTAM conference on deformation and failure of granular materials, pp.167-170, 1982.
- 57) Zienkiewicz, O.C.: Basic formulation of static and dynamic behaviour of soil and other porous media, Numerical methods in geomechanics, ed. by J.B.Martins, D.Reidel Pub. Company, pp.39-55, 1982.
- 58) Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T.: Dynamic behaviour of saturated porous media; The generalized Biot Formulation and its numerical solution, Int. Jour. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.8, pp.71-96, 1984.
- 59) Nur, A. and Byerlee, J.D.: An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids, Jour. Geophysical Research, Vol.76, No.26, pp.6414-6419, 1971.
- 60) Gar, S.K. and Nur, A.: Effective stress laws for fluid-saturated porous rocks, Jour. Geophysical Research, Vol.78, No.26, pp.5911-5921, 1973.
- 61) Carroll, M.M.: An effective stress law for anisotropic elastic deformation, Jour. Geophysical Research, Vol.84, No.B13, pp.7510-7512, 1979.
- 62) Carroll, M.M and Katsube, N.: The role of Terzaghi effective stress in linearly elastic deformation, ASME Jour. of Energy Resources Technology, Vol.105, pp.509-511, 1983.
- 63) 山口柏樹: 飽和多孔質材料の有効応力原理の展望, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.36, No.6, pp.5-10, 1988.
- 64) 岡 二三生: 土における有効応力の原理, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.36, No.6, pp.11-17, 1988.
- 65) Jennings, J.E.B. and Knight, K.: The Additional settlement of Foundations due to a collapse of structures of sandy soils on wetting, Proc. of 4th Int. Conf. SMFE, Vol.3a, pp.316-319, 1957.
- 66) Jennings, J.E.B.: A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.26-30, 1960.
- 67) Croney, D. and Coleman, D.J.: Soil structure in relation to soil suction (pF), Jour. of Soil Science, Vol.5, No.1, pp.75-84, 1954.
- 68) Croney, D and Coleman, D.J.: Pore pressure and suction in soil, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.31-37, 1960.
- 69) Bishop, A.W.: The measurement of pore pressure in the triaxial test, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.38-46, 1960.

- 70) Aitchison, G.D.: Relationship of moisture stress and effective stress function in unsaturated soils, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.47-52, 1960.
- 71) Bishop, A.W. and Blight, G.E.: Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils, Geotechnique, Vol.13, No.1, pp.177-179, 1963.
- 72) Skempton, A.W.: Effective stress in soils, concrete and rocks, Proc. of pore pressure and suction in soils, pp.4-16, 1960.
- 73) Bishop, A.W. and Donald, I.B.: The experimental study of partly saturated soils in the triaxial apparatus, Proc. of 5th Int. Conf. Soil Mech., No.1, pp.13-21, 1961.
- 74) Blight, G.E.: Effective stress evaluation for unsaturated soils, Proc. of ASCE, Vol.93, No.SM2, pp.125-148, 1967.
- 75) 足立紀尚, 岡 二三生: 不飽和土の試験法と力学挙動, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.29, No.6, pp.27-33, 1981.
- 76) Jennings, J.E.B. and Burland, J.B.: Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils, Geotechnique, Vol.12, No.2, pp.125-144, 1962.
- 77) Burland, J.B.: Some Aspects of the mechanical behaviour of partly saturated soil, Proc. of Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered area, Butterworths(Australia), pp.270-278, 1965.
- 78) Coleman, J.D.: Stress/strain relations for partly saturated soil, Correspondence, Geotechnique 12, No.4, pp.348-350, 1962.
- 79) Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R.: Stress state variables for unsaturated soils, Journal of Geotechnical Engg. Div. ASCE 103, No. GT5, pp.447-466, 1977.
- 80) 岩田進午, 喜田大三監修: 土の環境圏, 株式会社フジ・テクノシステム, pp.124-127, 1998
- 81) 土質試験法: 地盤工学会, pp.277-303, 1979.
- 82) Yong, R.N. and Warkentin, B.P.: Introduction to soil behavior, Macmillan, New York, pp.153-154, 1966.
- 83) Jennings, J.E. and Knight, K.: The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting, Proc. of 4th Int. Conf. of Soil Mech. Found. Engg., Vol.1, pp.316-319, 1957.
- 84) 八木則男, 矢田部龍一: 不攪乱まさ土のせん断特性と微視的考察, 土木学会論文報告集, No.364, pp.133-141, 1985.
- 85) 八木則男, 矢田部龍一, 榎 明潔: 締固め土の圧縮とせん断に関する2, 3の特性, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.29-34, 1987.
- 86) 阿部廣史: 不飽和土の力学特性の評価手法に関する実験的研究, 東京大学博士学位論文, 1994.

- 87) Barden, L., Madedor, A.O. and Sides, G.R.: Volume change characteristics of unsaturated clay, *Journal of Soil Mech. Found. Div. ASCE* 95, No.SM1, pp.33-51, 1969.
- 88) Chen, F.H.: Foundation on expansive soils, *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier, Vol.54, pp.49-108, 1988.
- 89) 岩田進午, 喜田大三監修: 土の環境圏, 株式会社フジ・テクノシステム, pp.140-152, 1998
- 90) 赤井浩一, 大西有三: 土の中の水の動き, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.27, No.13, pp.17-20, 1979.
- 91) 藤本 廣: 締固めた不飽和土の一軸圧縮条件下の応力緩和に関する実験的考察, 土木学会論文報告集, No.119, pp.19-27, 1965.
- 92) 藤本 廣: 締固めた不飽和粘性土の三軸圧縮条件下における応力緩和とその応用, 土木学会論文報告集, No.200, pp.71-84, 1970.
- 93) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.: Verification of the generalized elastoplastic model for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.64-73, 1993.
- 94) 軽部大蔵, 苗村康造, 森田 登, 岩崎哲雄: 不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.269, pp.105-119, 1978.
- 95) Kawakami, H. and Abe, H.: Volume change characteristic and collapse in unsaturated soils during triaxial test, *Proc. of 5th Asian Regional Conf. SMFE*, Vol.1, pp.111-116, 1975.
- 96) 川上 浩: 不飽和土の取扱いの現状と問題点, 土と基礎, Vol.29, No.6, pp.7-11, 1981.
- 97) 松尾新一郎, 宗 栄焜: 締固め土の構造と工学的性質の相関性に関する微視的研究, 土木学会論文報告集, No.189, pp.63-77, 1971.
- 98) Tatsuoka, F., Goto, S. and Sakamoto, M.: Effect of some factors on strength and deformation characteristics of sand at low pressure, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.105-114, 1986.
- 99) 宇野尚雄: 不飽和地盤の保水・浸透の考察, 不飽和地盤の土質工学的性質, 地盤工学会関西支部テキスト, pp.19-40, 1989.
- 100) Olson, R.E.: Effective stress theory of soil compaction, *Jour. of the soil mechanics and foundations Div. ASCE*, Vol.89, No.SM2, pp.27-45, 1963.
- 101) 軽部大蔵, 加藤正司, 勝山潤一: 不飽和カオリンの有効応力と力学定数, 土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-5, pp.179-188, 1986.
- 102) Karube, D.: Basic stress-strain relations of unsaturated soil, *Proc. of 8th Asian Regional Conf. SMFE*, Vol.13, pp.49-52, 1987.
- 103) Karube, D.: New concept of effective stress in unsaturated soil and its proving test, *ASTM Symp. on advanced triaxial testing of soil and rock, STP977*, pp.539-552, 1988.
- 104) 軽部大蔵: 不飽和土の応力・ひずみ関係概説, 不飽和地盤の土質工学的性質, 地盤工学会関西支部講習会テキスト, pp.1-17, 1989.

- 105) 軽部大蔵, 勝山潤一, 西海健二, 丹羽尚人: 不飽和土の三軸圧縮状態における降伏関数, 土木学会論文報告集, No.406, pp.205-212, 1989.
- 106) Alonso, E.E., Gens, A. and Hight, D.: General report of session 5, Preprint of 9th ERC-SMFE, 1987.
- 107) Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A.: A constitutive model for partially saturated soils, Geotechnique, Vol.40, pp.405-430, 1990.
- 108) 軽部大蔵, 加藤卓彦: サクションと外部載荷応力の繰返し効果について, 繰返し応力をうける地盤の変形に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.35-40, 1990.
- 109) Karube, D. and Kato, S.: An ideal unsaturated soil and the Bishop's soil, Proc. of 13th Int. Conf. SMFE, Vol.1, pp.43-46, 1990.
- 110) Aitchison, G.D.: Relationship of moisture stress and effective stress function in unsaturated soils, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.47-52, 1960.
- 111) Coleman, J.D.: An investigation of the pressure membrane method for measuring the suction properties of soils, Road Research Laboratory Note, No.RN/3464/JDC, 1959.
- 112) Lambe, T.W.: A Mechanistic picture of shear strength in clay, Conf. of shear strength soils, Colorado, pp.503-532, 1960.
- 113) Sridharan, A., Narashima Rao, S. and Venkatappa Rao, G.: Shear strength characteristic of saturated montmorillonite and kaolinite clays, Soils and Foundations, Vol.11, No.3, pp.1-22, 1971.
- 114) Sridharan, A. and Venkatappa Rao, G.: Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept, Geotechnique, Vol.23, No.3, pp.359-382, 1973.
- 115) Sridharan, A., Venkatappa Rao, G. and Samudra Pandian, R.: Volume change behaviour of partly saturated clay during soaking and the role of effective stress concept, Soils and Foundations, Vol.13, No.3, pp.1-15, 1973.
- 116) Sridharan, A., Venkatappa Rao, G.: Shear strength behaviour of saturated clays and the role of the effective stress concept, Geotechnique, Vol.29, No.2, pp.177-193, 1979.
- 117) Sridharan, A., Altschaeffl, A.G. and Diamond, S.: Pore size distribution studies, Proc. of ASCE, Vol.97, No.SM5, pp.771-787, 1971.
- 118) Aitchison, G.D. and Woodburn, J.A.: Soil suction in foundation design, Proc. of 7th Int. Conf. SMFE, Vol.1, pp.1-8, 1969.
- 119) 例えば, Hillel, D. (岩田進午監修): 土壌物理学概論, 養賢堂, pp.28-76, 1984.
- 120) 東山 勇, 石田朋靖: pFの原理と応用 3. pFの基本的意味 (その2) エネルギー指数 pFの意義と内容, 土と基礎, Vol.34, No.12, pp.71-76, 1986.
- 121) 土壌物理研究会編: 土の物理学 土質工学の基礎, 森北出版, pp.36-71, 1979.
- 122) Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E.: Adsorption of gases in multimolecular layers, Journal of Am. Chem. Soc., Vol.60, pp.309-319, 1938.

- 123) Iwata, S.: Thermodynamics of soil water III, *Journal of Soil Science*, Vol.117, pp.87-93, 1974.
- 124) 岩田進午：土の物理化学と土質工学への応用, *土と基礎*, Vol.33, No.6, pp.67-72, 1985.
- 125) 岩田進午：土壌水に関する熱力学的考察, *農業技術研究所報告B*, No.24, pp.101-126, 1973.
- 126) Langmuir, I.: The role of attractive and repulsive forces in the formation of tactoids, thixotropic gels, protein crystals and coacervates, *Journal of Chemical Physics*, Vol.6, pp.873-896, 1938.
- 127) J.N.イスラエルアチヴィリ (近藤保, 大島広行訳) : 分子間力と表面力, 第二版, 朝倉書店, pp.205-325, 1997.
- 128) Pashley, R.M.: Multilayer adsorption of water on silica: An analysis of experimental results, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.78, No.1, pp.246-248, 1980.
- 129) Emerson, W.W.: The structure of soil crumbs, *Journal of Soil Science*, Vol.10, pp.235-244, 1959.
- 130) Collins, K. and McGown, A.: The form and foundation of microfabric features in a variety of natural soils, *Geotechnique*, Vol.24, No.2, pp.223-254, 1974.
- 131) van Olphen, H.: An introduction to clay colloid chemistry, John Wiley and Sons, p.94, 1963.
- 132) Matsuo, S. and Kamon, M.: Microscopic study on deformation and strength characteristics of clay soil, *Proc. of 9th Int. Conf. SMFE*, Vol.1, pp.201-204, 1977.
- 133) Hatano, R. and Sakuma, T.: A plate model for solute transport through aggregated soil columns. II. Experimental results and application of the model, *Geoderma*, Vol.50, pp.25-36, 1991.
- 134) 西田義親, 八木則男, 二木幹夫：雨水浸透による地盤内発生間隙圧と斜面安定, *土木学会論文報告集*, No.262, pp.91-100, 1977.
- 135) 八木則男, 矢田部龍一, 山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊, *土木学会論文報告集*, No.330, pp.107-114, 1983.
- 136) Matsuo, S.: A study of the effect of cation exchange on the stability of slopes, *Proc. of 4th ICSMFE*, Vol.1, 1961.
- 137) 松尾新一郎, 富田武満：斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, *材料*, Vol.19, No.205, 1970.
- 138) 松尾新一郎, 富田武満：モンモリロナイト系粘土の物理化学的および工学的特性に及ぼすカリウム固定の影響, *材料*, Vol.26, No.290, 1977.
- 139) Matsui, T., Ito, T., Mitchel, J.K. and Abe, N.: Microscopic study of shear mechanisms in soils, *Journal of geotechnical engg., ASCE*, Vol.106, No.GT2, pp.137-152, 1980.
- 140) 喜田大三：土壌構造と結合物質の作用および改良剤の利用に関する研究, *京都大学博士論文*, 1961.
- 141) 岩田進午：土のはなし, 大月書店, 1985.
- 142) 三土正則：農耕地土壌分類改善のための土壌断面データ集, *農業環境技術研究所資料*, Vol.12, p.56, 1991.

- 143) 岩田進午, 喜田大三監修: 土の環境圏, 株式会社フジ・テクノシステム, pp.53, 1998
- 144) Farrar, D.M. and Coleman, J.D.: The correlation of surface area with other properties of nineteen british clay soils, *Journal of Soil Science*, Vol.18, pp.118-124, 1967.
- 145) Smith, S.J.: Relative rate of chloride movement in leaching of surface soils, *Journal of Soil Science*, Vol.114, pp.259-263, 1972.
- 146) 馬場秀和: H₂OガスならびにN₂ガスを用いた各種土の比表面積測定結果とその発現機構について—細粒土の比表面積, 細孔容量と物理性に関する研究(1), *農業土木学会論文集*, Vol.171, pp.1-6, 1994.
- 147) 岡島秀夫: 土壌肥沃土論, 農文協, p.235, 1976.
- 148) 日本土壌肥料学会編: 土壌の吸着現象, 博友社, pp.85-128, 1981.
- 149) 岡島秀夫, 今井弘樹, 牧田規子: 土壌の養分供給能に関する研究(第3報) 硝酸化成にともなう固相養分の放出について, *日本土壌肥料学会誌*, Vol.45, pp.389-394, 1974.
- 150) Barden, L., Madedor, A.O. and Sides, G.R.: Characteristics of unsaturated clays, *Proc. of ASCE*, Vol.95, No.SM1, pp.33-51, 1969.
- 151) Barden, L. and Sides, G.R.: Engineering behavior and structure of compacted clay, *Proc. of ASCE*, Vol.96, No.SM4, pp.1171-1200, 1970.
- 152) Barden, L., McGown, A. and Collins, K.: The collapse mechanism in partly saturated soil, *Engineering Geology*, No.7, pp.49-60, 1973.
- 153) Knodel, P.C.: Construction of Large canal on collapsing soils, *Proc. of ASCE*, Vol.1, No.GT1, pp.79-94, 1981.
- 154) Dudley, J.H.: Review of collapsing soils, *Proc. of ASCE*, Vol.96, No.SM3, pp.925-947, 1970.

第3章 粒子間力に関する理論的考察

概要：土中水の化学ポテンシャルと土の物理化学的性質の間の相互作用によって生じる粒子間力¹⁾を、粒子間の液体架橋および粒子接触によるマトリックスポテンシャルの粒子間力と、粒子表面間とバルク相のイオン濃度差による浸透ポテンシャルの粒子間力の2つに分けて理論的に考察し、それぞれの制御法を示し、両方のポテンシャルを合わせた粒子間力式を提案する。

3. 1 マトリックスポテンシャルによる粒子間力

3. 1. 1 粒子接触が存在しない場合

平衡状態では微小変位があっても自由エネルギーは不変であるという熱力学原理から、図-3.1に示す液体-気体の界面が曲率半径 R_1 , R_2 の曲面であるとき、面を微小面積だけ外側へ移動させた面積増加 ΔA は式(3.1)で近似できる²⁾。

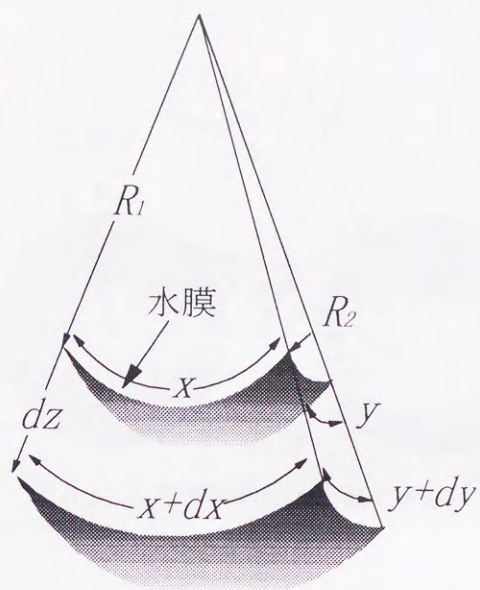
$$\Delta A = (x + dx)(y + dy) - xy = xdy + ydx + dxdy = xdy + ydx \quad (3.1)$$

ここに、 $xdy \gg dxdy$, $ydx \gg dxdy$ から、微小変化の自乗項は無視できる。

仕事 W は式(3.2)となる。曲面での圧力差を ΔP とすると、曲面の移動に伴う気体の仕事 W' は式(3.3)となる。

$$W = \gamma_L dA = dG = \gamma_L (xdy + ydx) \quad (3.2)$$

ここに、 γ_L ：液体-気体間の液体表面張力、 dG ：自由エネルギーの増加分


 図-3.1 熱力学的な水膜変形モデル²⁾

$$W' = \Delta P x y dz \quad (3.3)$$

力学的平衡状態から、 $W=W'$ となり、式(3.4)となる。

$$\gamma_L (x dy + y dx) = \Delta P x y dz \quad (3.4)$$

$dx = x dz / R_1$ 、 $dy = y dz / R_2$ の相似関係から、式(3.4)はYoung-Laplaceの式(3.5)となる³⁾。

$$\Delta P = \gamma_L \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad , \quad \Delta P : \text{Laplace 圧} \quad (3.5)$$

Tolmanは式(3.6)を示し⁴⁾、液体表面張力は曲率によって変化するとしたが、その変化量は、ギブス・トルマン・ケーニッヒ・バフの方程式⁴⁾から極めて少ないとされている。

$$\frac{\gamma_L}{\gamma_{L0}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\delta}{R} \right)} \quad (3.6)$$

ここに、 γ_{L0} : 液体表面張力、 γ_L : 曲面をもった液体表面張力

δ : 実験による推定値 = 10^{-10} m程度、 R : 曲率半径

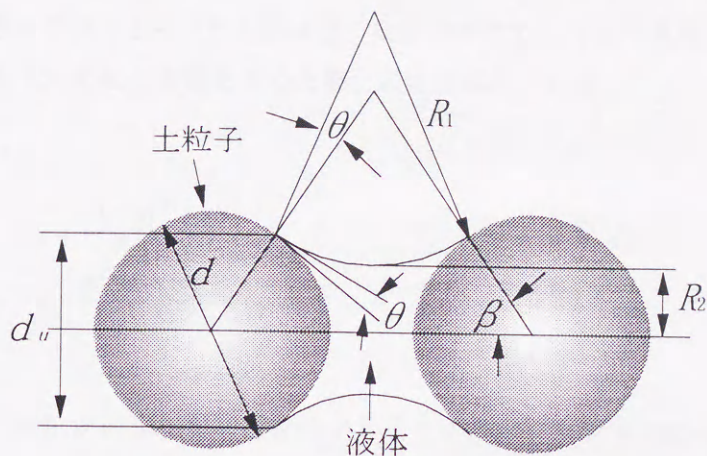


図-3.2 土粒子間の液体架橋モデル⁵⁾

PietschとRumpf⁵⁾は、図-3.2の粒子間の液体架橋モデルにおいて、粒子間の液体架橋が鞍型の場合、粒子間に式(3.5)のLaplace圧が作用するとして、式(3.7)の毛管圧力および式(3.8)の水膜の液体表面張力による力の和の式(3.9)の粒子間力が生じることを示し、液量増加で増加し、極大を経て減少すると解析的に示した。

$$F_K = -\Delta P \frac{\pi}{4} d_u^2 = -\gamma_L \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \frac{\pi}{4} d^2 \sin^2 \beta \quad (3.7)$$

ここに、 F_K ：毛管圧による粒子間力、 $d_u := d \sin \beta$ 、 d ：粒子直径

β ：液量に対する角度、 ΔP ：Laplace圧 = $u_a - u_w$ (サクシオン)

u_a ：間隙空気圧、 u_w ：間隙水圧

$$F_R = -k \sin(\beta + \theta) = -\gamma_L \pi d \sin \beta \sin(\beta + \theta) \quad (3.8)$$

ここに、 F_R ：線張力による粒子間力、 k ：線張力 (= $\gamma_L \ell = \gamma_L \pi d \sin \beta$)

ℓ ：接触線長、 θ ：固体-液体間の接触角

$$F_M = F_K + F_R = -\gamma_L \pi d \sin \beta \left[\sin(\beta + \theta) + \frac{d}{4} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \sin \beta \right] \quad (3.9)$$

ここに、 F_M ：マトリックスポテンシャルによる粒子間力

式(3.9)の二粒子モデルの粒子間力と、土のような粒子集合体の平均的な粒子間力である引張強さの関係は、Rumpf⁶⁾によって式(3.10)で与えられる。神保ら⁷⁾は式(3.10)の引張強

さは空隙率の影響を受け、さらにその値は粒子集合体の充てん方法で異なることを指摘し、Shinoharaら⁸⁾は充てん方法の影響を含めた修正式を提案している。

$$\sigma_z = \frac{(1-\varepsilon)}{\pi} \kappa \frac{F_M}{D^2} \quad (3.10)$$

ここに、 σ_z : 引張強さ、 ε : 空隙率、 κ : 見かけの配位数、 D : 平均粒径

以上から、粒子接触が存在しない場合のマトリックスポテンシャルによる粒子間力を代表する物理量はサクションであり、同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる土では、サクションの値で粒子間力の大小を比較することができる。

3. 1. 2 粒子接触の影響

2つの剛体球（直径： d_1 , d_2 ）の粒子接触による付着力は、Derjaguin⁹⁾によって式(3.11)で与えられる。

$$F_D = 2\pi \frac{d}{2} W_{132} \quad (3.11)$$

ここに、 F_D : 粒子接触による付着力、 $\frac{d}{2} := (\frac{1}{d_1/2} + \frac{1}{d_2/2})^{-1}$

W_{132} : 固体1と2の媒質3の中での付着仕事(相互作用自由エネルギー)

実際の粒子は完全な剛体ではなく、接触による外部負荷あるいは表面間引力の作用で弾性的に変形する。この力が、2つの表面を引付け、外部負荷がゼロであっても有限の接触面積が生じることになる。

弾性球の接触による付着力に関する厳密な理論は、Johnson, KendalおよびRoberts¹⁰⁾によって検討され、JKR理論として理論的に定式化されている。JKR理論によれば、2つの同質の球（直径： d_1 , d_2 ）が外部負荷 F で互いに押しつけられると、接触領域は式(3.12)で示される半径で与えられる。

$$a^3 = \frac{d/2}{K} \left[F + 3\pi \frac{d}{2} W_{132} + \sqrt{6\pi \frac{d}{2} W_{132} F + (3\pi \frac{d}{2} W_{132})^2} \right] \quad (3.12)$$

ここに、 a : 接触領域の半径、 F : 外部負荷、 K : 固体の弾性率

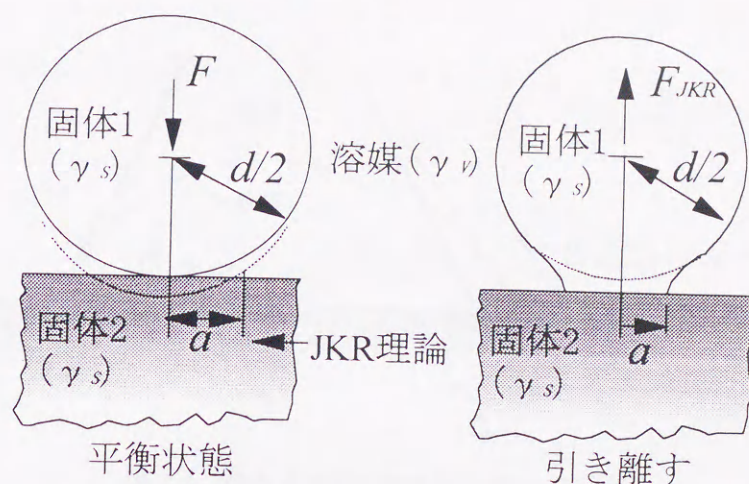


図-3.3 JKR理論の模式図 (平面上の球において) ¹⁾

図-3.3の平面上の球において、外部負荷 $F < 0$ の付着力である粒子間力 F_{JKR} は、式(3.13)で与えられる。

$$F_{JKR} = -3\pi \frac{d}{2} \gamma_{sv} \quad (\text{JKR極限}) \quad (3.13)$$

ここに、 F_{JKR} : 粒子接触による粒子間力、 $\frac{d}{2} := \frac{d_1}{2}, (d_2 = \infty)$

γ_{sv} : 固体-溶媒間の界面張力(液体中では γ_{SL} 、真空中では γ_s)

γ_{SL} : 固体-液体間の界面張力、 γ_s : 固体-気体間の固体表面張力

Lennard-Jonesポテンシャルを仮定した解析から得られた粒子接触による粒子間力は、式(3.13)のJKR極限からDerjaguin-Muller-Toporov理論の式(3.14)のDMT極限まで変化するとされている¹⁾。

$$F_{DMT} = -4\pi \frac{d}{2} \gamma_{sv} \quad (\text{DMT極限}) \quad (3.14)$$

ここに、 F_{DMT} : 粒子接触による粒子間力

これらの研究で得られた重要な結論は、粒子の弾性率 K は接触半径 a には影響を与えるが、粒子接触による粒子間力には影響しないことである。この結論は、Shchukin¹⁾²⁾によって、

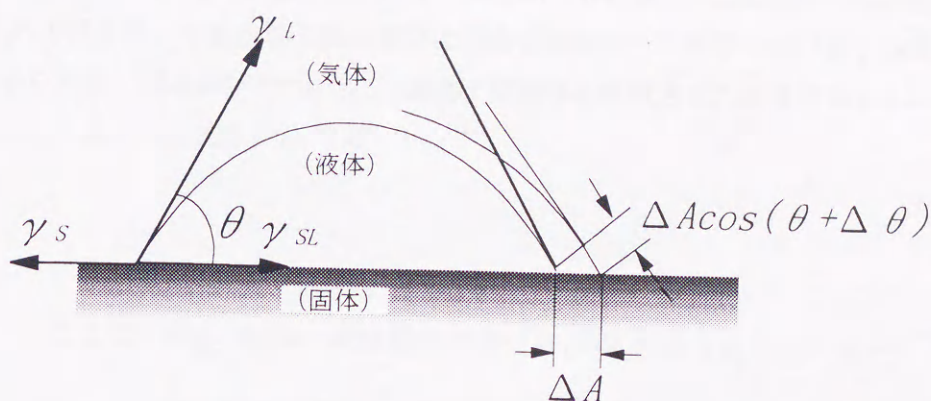


図-3.4 固体上の液体の付着仕事モデル¹⁴⁾

飽和および不飽和の様々な表面で実験的に検証されている。しかしながら、この理論は完全に滑らかな表面を仮定している点、さらに2つの固体の接触領域が増大（前進）した場合と収縮（後退）した場合は、付着仕事（表面自由エネルギー） W が異なり、前進付着仕事は後退付着仕事よりも小さく、履歴効果とエネルギー散逸が生じる点等が、未解明な研究テーマとして残されている¹¹⁾。

以上から、同じ粒径の粒子において外部負荷 $F < 0$ の粒子接触による粒子間力は、近似的に固体-溶媒間の界面張力で決定される範囲内にあることがわかった。よって、式(3.13)~式(3.14)の範囲の粒子接触による粒子間力、式(3.9)の粒子接触が存在しない場合の粒子間力の2つの力が同時に作用する式(3.15)を提示できる。

$$F_{MS} = F_M + (F_{JKR} - F_{DMT}) \quad (3.15)$$

ここに、 F_{MS} : 粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルによる粒子間力

FogdenとWhite¹³⁾ は、このような状態の粒子間力を式(3.16)で理論的に定義している。

$$F_{FW1} = -4\pi \frac{d}{2} (\gamma_L \cos \theta + 0.75 \gamma_{SL}), \quad F_{FW2} = -3\pi \frac{d}{2} (\gamma_L \cos \theta + \gamma_{SL}) \quad (3.16)$$

ここに、 F_{FW1} : 固体間の付着が強い場合の粒子間力

F_{FW2} : 曲率半径 R_1, R_2 が非常に小さい場合の粒子間力

式(3.13), 式(3.14)および式(3.16)の固体-液体間の界面張力 γ_{SL} と液体-気体間の液体表面張力 γ_L の関係は, 平衡状態の微小変位は自由エネルギーに影響しないとする熱力学原理から求められる. 図-3.4に示すように, 固体上に液体を接触させた場合の自由エネルギーの変化である付着仕事は式(3.17)となる¹⁴⁾.

$$W_{SL} = \gamma_L + \gamma_S - \gamma_{SL} \quad (3.17)$$

ここに, W_{SL} : 固体-液体間の付着仕事(相互作用自由エネルギー)

図-3.4の表面積 ΔA の変化に伴う自由エネルギー変化 ΔG は, 式(3.18)となる¹⁵⁾.

$$\Delta G = (\gamma_{SL} - \gamma_S)\Delta A + \gamma_L \Delta A \cos(\theta + \Delta\theta) \quad (3.18)$$

式(3.19)および式(3.20)の関係から, 式(3.21)のヤングの三相系の関係式が得られる.

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta G}{\Delta A} \right) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} [(\gamma_{SL} - \gamma_S) + \gamma_L \cos(\theta + \Delta\theta)] = 0 \quad (3.19)$$

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} (\Delta\theta) = 0 \quad (3.20)$$

$$\gamma_{SL} - \gamma_S + \gamma_L \cos\theta = 0 \quad (3.21)$$

式(3.17)および式(3.21)から, 付着仕事 W_{SL} は式(3.22)のヤング・デュプレの式²⁾となる.

$$W_{SL} = \gamma_L(1 + \cos\theta) \quad (3.22)$$

式(3.22)から, 付着仕事は液体表面張力 γ_L と接触角 θ の関数であることが示された.

接触角は多少の液量変化では変化せず¹⁶⁾, 親水性固体では $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$, 疎水性固体は $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$, 液体表面張力と比例関係にある¹⁶⁾. 清浄な粒子と水との接触角はゼロに近いとされることから¹⁷⁾, 親水性表面が支配的な粒子の付着仕事は, 液体表面張力で

決定されると考察できる。

このような親水性表面の粒子では、式(3.21)の $r_L \cos \theta$ は r_{SL} より相対的に大きいとされることから¹⁷⁾、式(3.16)の不飽和状態の粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルによる粒子間力においては、液体-気体間の液体表面張力が支配的影響を与える因子である。

以上から、親水性表面の粒子の外部負荷 $F < 0$ の粒子接触による粒子間力は、液体表面張力で決定され、例えば、疎水性面が支配的な土壤有機物等を含む土¹⁸⁾ では、固体-液体間の接触角によって、液体表面張力以外に固体-液体間の界面張力および付着仕事の影響が加わると考察できる。

3. 1. 3 まとめ

粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルによる粒子間力を代表する物理量は、親水性表面の土粒子ではマトリックスポテンシャルのサクションであり、液体表面張力によって制御することができる。同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる土では、このサクションの値で粒子間力の大小を比較することができる。但し、疎水性面が支配的な土壤有機物等を含む土では、固体-液体間の接触角によって、液体表面張力以外に固体-液体間の界面張力および付着仕事の影響が加わる。

3. 2 浸透ポテンシャルによる粒子間力

3. 2. 1 接触値定理による定義

水和イオンを含む水膜に覆われた2つの同種帯電粒子の浸透ポテンシャルによる粒子間力は、イオン濃度差で決定され、近似的に式(3.23)の接触値定理で与えられる¹¹⁾。

$$F_{OSM}(x) = kT \left[\sum_i \rho_i(x/2) - \sum_i \rho_i(\infty) \right] \quad (3.23)$$

ここに、 $F_{OSM}(x)$ ：浸透ポテンシャルによる粒子間力

x ：粒子表面間距離、 k ：ボルツマン定数 = 1.38066×10^{-23} J/K

T ：絶対温度(K)、 $\sum_i \rho_i(x/2)$ ：中央部($x/2$)の全イオンの数密度

$\sum_i \rho_i(\infty)$ ：バルク相の全イオンの数密度

数密度：1M = $1 \text{ mol/dm}^3 = 6.022 \times 10^{23}$ 分子/ dm^3

式(3.23)は、対イオン（粒子が負に荷電している場合は正のイオンを指す）の吸着が無く、表面電荷密度が一定で表面間距離に無関係であれば常に成立する。式(3.23)から、粒子間力の強さは、粒子間中央部のイオン濃度とバルク相のイオン濃度の差で決定し、粒子間中央部のイオン濃度がバルク相より大きい場合は反発力、逆の場合は引力となることがわかる。

浸透ポテンシャルは、蒸気圧法やサイクロメーター法等¹⁷⁾によって測定することができ、マトリックスポテンシャルによる粒子間力と同様に、同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる土では、浸透ポテンシャルのサクションの値で粒子間力の大小を比較することができる^{6), 7), 8)}。

対イオンの吸着および表面電位の変化による粒子間力の変化は、約100nm～電気二重層の粒子表面間距離では、van der Waals引力と静電的な反発力の相互作用であるDerjaguinおよびLandauならびにVerweyおよびOverbeekの定義したDLVO理論で決定され、約1nm～4nmの電気二重層以下の距離においては、DLVO理論では説明できない非DLVO力で決定する^{11), 19)}。

土鉱物の表面電荷の起源については、付録Aにおいて考察している。

3. 2. 2 約100nm～電気二重層の距離で生じる粒子間力 (DLVO理論)

2つの粒子表面間の距離が約100nm～電気二重層では、van der Waals引力と静電的な反発力の相互作用理論であるDLVO理論で粒子間力は決定される¹⁹⁾。van der Waals引力は水和イオンが存在する場合は減衰し、静電的な反発力に比べ、イオン濃度とpHの変化に敏感ではない。よって、近似的に一定と考えて支障はなく、その場合の粒子間力は静電的な反発

力によって決定されることになる。

2個のイオン電荷 Q_1 と Q_2 間のCoulomb相互作用の自由エネルギーは式(3.24)となる。

$$W(x) = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r x} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r x} \quad (3.24)$$

ここに、 ϵ_0 : 真空中の誘電率 = 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r : 媒質の比誘電率(例えば25°Cの水 = 80), x : 2個の電荷間の距離

e : 電気素量 = 1.602×10^{-19} C, Z_1, Z_2 : イオン原子価数

Coulomb力は、式(3.25)で与えられる。

$$F_C = -\frac{dW(x)}{dx} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r x^2} \quad (3.25)$$

極性の大きい水中のイオンは、イオン-双極子間相互作用によるCoulomb力によって、イオン周りに水分子が配向し、水和イオンとなって存在する。イオン価数が大きく、イオンが小さいほど水和の度合いは大きく、強く結合している。純水もイオンを有しており、陽イオンとしてオキシニウムイオン H_3O^+ 、水酸化物イオン OH^- が存在し、3個の水分子が水和して $H_3O+(H_2O)_3$ および $OH^-(H_2O)_3$ を形成しているとされる。このような水和イオンは親水性である²⁰⁾。

種々のイオンを含む水において、固体表面からの距離 x におけるイオンのBoltzmann分布は式(3.26)で与えられる。

$$\rho_{xi} = \rho_{\infty i} e^{-z_i \psi_x / kT} \quad (3.26)$$

ここに、 ρ_{xi} : 固体表面距離 x におけるイオン i の濃度(電位 $\psi_x \neq 0$)

$\rho_{\infty i}$: バルク相($x = \infty$)におけるイオン i の濃度(電位 $\psi_\infty = 0$)

表面から任意の距離 x におけるイオンの全濃度は、式(3.27)で与えられる。

$$\sum_i \rho_{xi} = \sum_i \rho_{\infty i} + \frac{\epsilon\epsilon_0}{2kT} \int_0^x d\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2 \quad (3.27)$$

ここに、 $\sum_i \rho_{xi}$: 距離 x における全イオン数密度, ψ : 電位

$\sum_i \rho_{\infty i}$: バルク相における全イオン数密度

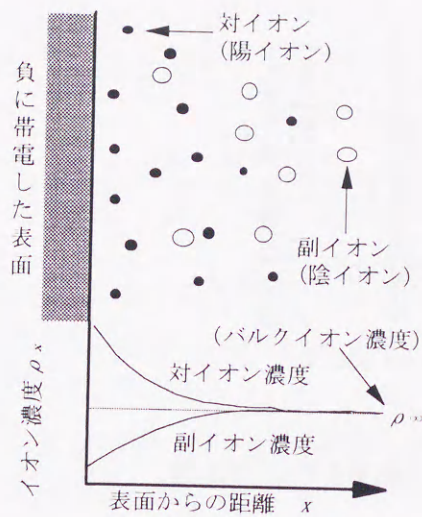


図-3.5 イオン濃度分布の模式図

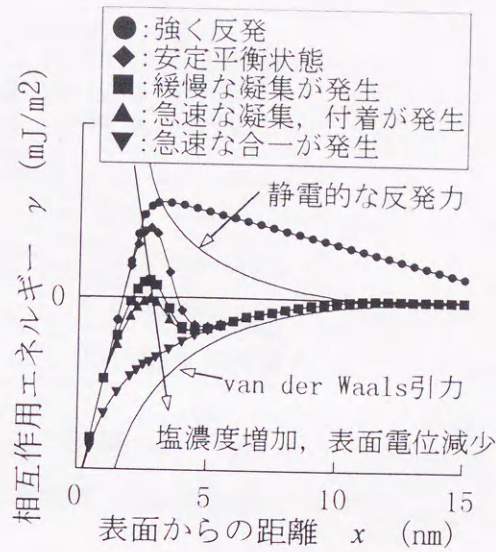


図-3.6 DLVO理論の解説模式図¹¹⁾

電荷密度 σ の表面におけるイオンの全濃度は式(3.28)で示される²¹⁾。

$$\sum_i \rho_{0i} = \sum_i \rho_{\infty i} + \frac{\sigma^2}{2\epsilon\epsilon_0 kT} \quad (3.28)$$

ここに、 $\sum_i \rho_{0i}$: 表面における全イオン数密度、 σ : 表面電荷密度

$\sum_i \rho_{\infty i}$: バルク相における全イオン数密度

図-3.5にイオン濃度分布を模式的に示す。一定表面電荷の表面では、イオン濃度上昇に従い表面電位は減少する。特にイオン価数の影響は大きく、2価イオン濃度が1価イオン濃度の約3%以上で、表面電位は2価イオンによって決定される¹¹⁾。3価イオンはさらに強力で、バルク相のイオン濃度が 10^{-5} mol/dm^3 以上で負に帯電した表面が中和され、電荷の反転が生じる場合がある¹¹⁾。しかしながら、陽イオンは常に陰イオンに囲まれており、電荷の反転で粒子表面が正帯電した場合でも、引き続き陽イオンの吸着が生じる。

イオン濃度増加によって、イオン結合が起こり、表面電荷密度 σ と電位 ϕ の両方を低下させる傾向にあり、イオン濃度と粒子間力の間には複雑な作用が存在する。Stern層もしくはHelmholtz層等の電気二重層の厚さ (Debyeの長さ) を越える距離において有効なDLVO理論で考察するならば、図-3.6¹¹⁾ にイオン濃度と粒子間力の関係を模式的に示すように、イオン濃度の増加によって、静電的な反発力は減少し、van der Waals引力によって粒子間力は

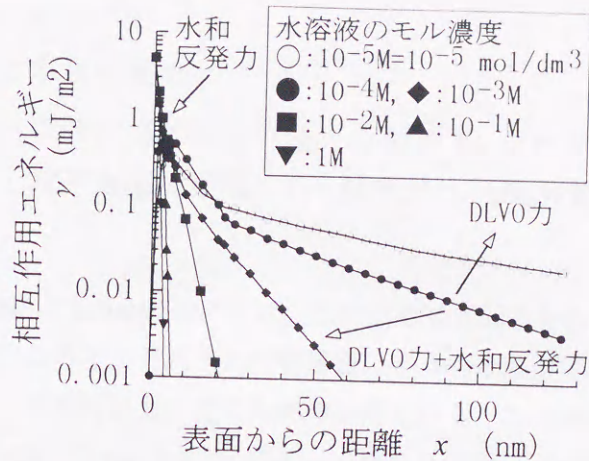


図-3.7 シリカ表面の水和力の測定例 (NaCl水溶液) ^{11), 24)}

減少するとされており、イオン交換で制御できることになる。

3. 2. 3 電気二重層以下の距離で生じる粒子間力 (非DLVO力)

スメクタイト鉱物等の粘土は、電解質水溶液中で膨潤し互いに反発する。また、シリカ分散系やコロイド粒子は、非常に高いイオン濃度の中でも安定に存在する。これらの現象をDLVO理論で説明すれば、粒子は互いに付着し、凝析することになり、理論が破綻する。

このようなDLVO理論では説明できない力は非DLVO力と定義され、イオン相関引力、溶媒和力、疎水性力および立体力等¹¹⁾をあげることができる。ここでは、非DLVO力の中で最も影響が大きいと考えられる溶媒和力およびイオン相関引力について考察する。

3. 2. 3. 1 溶媒和力

非DLVO力の一つの溶媒和力(溶媒が水の場合は水和力と称する)は、互いに接触した2つの粒子表面間の付着の強さを決定する際に重要とされている。この水和力は、近似的に式(3.23)の接触値定理で説明される。粒子表面間のイオン数密度がバルク相のイオン数密度より増加すると反発力が生じ、逆の場合は引力が作用する。粒子表面が接触した場合、粒子表面間に水和イオンが浸入できず、粒子表面間のイオン数密度はゼロとなり、バルク相のイオン数密度相当の付着力が作用することになる^{22), 23)}。

図-3.7に測定例を示す^{11), 24)}。親水性表面間では親水基をもつ表面に水分子が強く結合し、反発力が生じるとされている。この水和反発力は、Van Olphen²⁵⁾が粘土表面間に対して研究を行っている。最近になって、雲母表面間およびシリカ表面間で水和反発力が詳しく測定され、水和反発力が約1nmの減衰長をもって指数関数的に減衰することが明らかとなり、親水性表面間に作用する水和反発力は、式(3.29)の経験則に従うとされている¹¹⁾。

$$F_H = F_{H0} e^{-x/\lambda_0} \quad (3.29)$$

ここに、 F_H ：水和反発力

F_{H0} ：表面の水和性に依存するが通常、 $3 \sim 30 \text{mJ/m}^2$ 以下

x ：粒子表面間距離、 λ_0 ：減衰長(1:1電解質の場合、 $0.6 \sim 1$)

Pashley²⁶⁾ およびPashleyとIsraelachvili²⁷⁾ は、水和力の制御因子をみつける目的で行った実験から、塩濃度が高くなると、それぞれの電解質に特異的な濃度で水和陽イオンが負に帯電した表面に結合し、水和反発力が生じる結果を得ている。この結果では、陽イオンの水和数の順序 ($\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$) に従って強さと作用範囲が増加することから、水和反発力はイオン交換で制御できると結論している。

さらにIsraelachviliとPashley²³⁾ は、2つの雲母表面間の水和力は、約4nm以下では反発力であるが、約1.5nm以下では、水分子の直径(約0.25nm)に等しい周期の振動を示し、0.28nm および0.56nmにおける極小は、負のエネルギーで起きることを示している。この結果から、Vianiら²⁸⁾ が示したモンモリロナイトの粘土板では、約2nmの距離までは間隔を狭くしていくに従い反発力が増加する現象が説明され、さらに、Del Penninoら²⁹⁾ が示した粘土板が0.25nmと0.55nmの厚さをもつ水層を間に挟みながら、積層して安定な集合体をつくる現象が、水和力の極小点と一致することが明らかとされている。

3. 2. 3. 2 イオン相関引力

電気二重層内の対イオンは表面において、強く分極可能な層を形成している。Guldbrandら³⁰⁾ は、向かい合う2つの層間では一種のvan der Waals引力であるイオン相関力が作用すると考察し、この引力は表面から約4nm以下の距離において重要で、表面電荷密度および対イオン価数と比例関係にあると結論している。

例えばWennerstromら³¹⁾ は、対イオンが1価の場合、電荷密度の高い表面間ではイオン相関力は静電的な反発力を10%~15%低下させるが、2価の対イオン(例えば Ca^{2+})の場合、イオン濃度が非常に希薄でも、約2nm以内ではイオン相関引力は、静電的な反発力を上回ると結論した。このイオン相関引力は、Kjellanderら³²⁾ が実際に測定している。

従来から水中における粘土鉱物の膨潤は、静電的な反発力が原因であるとされており、例えばNorrish³³⁾ は、粘土表面は水中で解離し、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} イオンが生じて体積膨潤すると結論し、van Olphen²⁵⁾、PashleyとQuirk³⁴⁾ およびKjellanderら³²⁾ は、約3nm以下の表面間距離では水和反発力も関与している考察している。しかしながら、Kjellanderら³²⁾ およびKhan³⁵⁾ らは、ある種の粘土(例えば、本研究で用いたスメクタイト細粒分等)が粘土表面間に強い付着力が生じ膨潤しない理由は、イオン相関引力が原因と述べている。

3. 2. 4 まとめ

浸透ポテンシャルによる粒子間力は、約100nm～電気二重層および約1nm～4nmの電気二重層以下の粒子表面間距離において作用し、同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる土では、浸透ポテンシャルのサクシヨンの値で粒子間力の大きさを比較することができる。また、その性質はイオン交換³⁶⁾で制御可能であるが、第2章の2.5.2項で示したように、それぞれの土に固有な分配係数でイオンは固相と液相に分配されるために、粒子表面間距離、土粒子の表面電荷密度およびイオン結合等の対象とする土の状態を示す詳細なデータが必要である。イオン交換と吸着現象の考察は付録Bで述べている。

3. 3 化学ポテンシャルによる粒子間力式の提案

3. 3. 1 粒子間力式の提案

粒子間力式を式(3.30)に提案する³⁷⁾。この粒子間力と、土のような粒子集合体の平均的な粒子間力である引張強さの関係は、例えば、Rumpf⁶⁾の式(3.10)やShinoharaら⁸⁾の修正式から与えられ、同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる土では、化学ポテンシャルのサクシヨンの値で粒子間力の大小を比較することができる。

$$F_A(x) = a_1 F_{MS} + a_2 F_{OSM}(x) \quad (3.30)$$

ここに、 $F_A(x)$ ：新納の粒子間力、 x ：粒子表面間距離

F_{MS} ：粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルによる粒子間力

$F_{OSM}(x)$ ：浸透ポテンシャルによる粒子間力

a_1, a_2 ：土粒子組成、表面電荷と性質、水和イオン、飽和度等で異なる係数

式(3.30)の浸透ポテンシャルによる粒子間力 $F_{OSM}(x)$ は、式(3.31)に示すように粒子表面間距離によって、2つの理論で説明される力に分離できる。

$$F_{OSM}(x) = a_{21} F_{DLVO}(x) + a_{22} F_{UDLVO}(x) \quad (3.31)$$

ここに、 $F_{DLVO}(x)$ ：DLVO理論で説明される粒子間力 ($x = \text{約}100\text{nm} \sim \text{電気二重層}$)

$F_{UDLVO}(x)$ ：非DLVO力による粒子間力 ($x = \text{電気二重層以下}$)

a_{21}, a_{22} ： a_2 と同様な係数

粒子表面間距離が約100nm以上では浸透ポテンシャルによる力は理論的に作用せず、 F_{MS} の中で式(3.9)の F_M のみが作用する。約100nm～電気二重層では、 F_M および式(3.31)のDLVO理論で説明される $F_{DLVO}(x)$ が作用する。同様に電気二重層以下では F_M および非DLVO力による $F_{UDLVO}(x)$ が作用する。粒子が接触する場合、 F_M に式(3.13)から式(3.14)の範囲の付着力を加えた式(3.15)の F_{MS} または式(3.16)が作用し、さらに式(3.23)の中央部の全イオン数密度をゼロとした $F_{UDLVO}(x=0)$ が加わる。これらの粒子間力には、影響の程度を表す係数 α が存在する。

以上の粒子間力式の解説を粒子表面間距離で整理すると以下ようになる。

1. 粒子表面間距離が約100nm以上：マトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。
2. 粒子表面間距離が電気二重層～約100nm：DLVO理論で定義される浸透ポテンシャルおよびマトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。

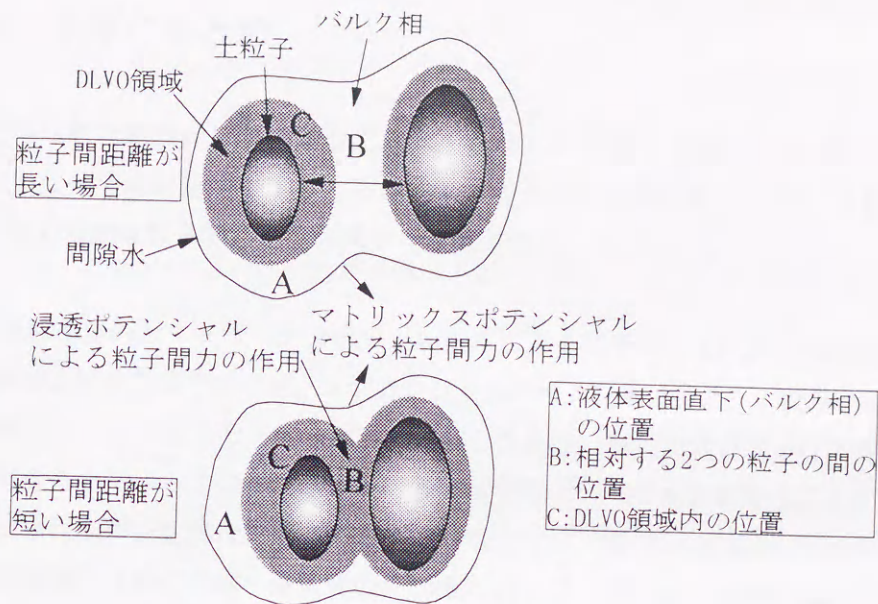


図-3.8 間隙水が付着した土粒子モデル^{38), 39)}

3. 粒子表面間距離が電気二重層以下：非DLVO力で定義される浸透ポテンシャルおよびマトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。

4. 粒子が接触する場合：粒子接触による付着力と浸透ポテンシャルによるバルク相イオン数密度相当の粒子間力およびマトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。

3. 3. 2 二粒子モデルによる提案式の解説

岩田ら^{38), 39)}が示した土粒子モデルを加筆修正した図-3.8の間隙水が付着した土粒子モデルを用いて、提案した粒子間力式の意味を解説する。図中にはDLVO理論および非DLVO力の影響領域をDLVO領域として示した。

図-3.8の粒子表面間距離が長い場合（約100nm以上）には、バルク相のA点および粒子間中央部のB点は等しい化学ポテンシャルであり、DLVO領域内のC点は他の点よりイオン濃度が大きい。この状態では式(3.23)の浸透ポテンシャルによる粒子間力は作用せず、粒子間力はマトリックスポテンシャルで決定される。下の図の相対する粒子表面間距離が短く、互いのDLVO領域が重なった場合には、表面電荷密度や比表面積が大きい土粒子はDLVO領域のイオン濃度が高く、B点とA点の間にイオン濃度差が生じ、粒子間には浸透ポテンシャルによる反発方向の粒子間力が生じる。また、粒子表面間距離がイオンが侵入できないほど短い場合には、バルク相のイオン濃度の方が高くなり、引力方向の粒子間力が発生する。提案した粒子間力式は、このような浸透ポテンシャルによる粒子間力とマトリックスポテンシャルによる粒子間力の間の相互作用を含めた点に特徴がある。

3. 4 本章のまとめ

本章で得られた結論は以下の通りである。なお、粒子間力(単位: mJ/m^2)は、物理学の慣例に従い反発方向を正值とする。不飽和土の粒子間力は常に負(引力)であり、この場合の粒子間力増加は粒子間力自体の減少を意味する。

- 1) 粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルによる粒子間力を代表する物理量は、親水性表面の土粒子ではマトリックスポテンシャルのサクションであり、液体表面張力によって制御することができる。同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる土では、このサクションの値で粒子間力の大きさを比較することができる。但し、疎水性面が支配的な土壌有機物等を含む土では、固体-液体間の接触角によって、液体表面張力以外に固体-液体間の界面張力および付着仕事の影響が加わる。
- 2) 浸透ポテンシャルによる粒子間力は、約 100nm ~電気二重層および約 1nm ~ 4nm の電気二重層以下の粒子表面間距離において作用し、同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる土では、浸透ポテンシャルのサクションの値で粒子間力の大きさを比較することができる。また、対象とする土の粒子表面間距離、土粒子の表面電荷密度およびイオン結合等の状態が明らかであれば、イオン交換で制御可能である。
- 3) 粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルによる粒子間力をあわせた粒子間力式を提案した。提案した粒子間力式の解説を粒子表面間距離で整理すると以下のようなになる。
 1. 粒子表面間距離が約 100nm 以上: マトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。
 2. 粒子表面間距離が電気二重層~約 100nm : DLVO理論で定義される浸透ポテンシャルおよびマトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。
 3. 粒子表面間距離が電気二重層以下: 非DLVO力で定義される浸透ポテンシャルおよびマトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。
 4. 粒子が接触する場合: 粒子接触による付着力と浸透ポテンシャルによるバルク相イオン数密度相当の粒子間力およびマトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。

参考文献

- 1) 久保輝一郎, 神保元二, 水渡英二, 高橋 浩, 早川宗八郎: 粉体 理論と応用, 改訂二版, 丸善, pp.324-332, 1979.
- 2) 渡辺信淳, 渡辺 昌, 玉井康勝: 表面および界面, 共立出版, pp.1-3, 1973.
- 3) Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B.P.: Soil-Water Interactions Mechanisms and Applications, Marcel Dekker, pp.195-203, 1988.
- 4) 小野 周: 表面張力, 共立出版, pp.17-85, 1980.
- 5) Pietsch, W. and Rumpf, H.: Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln, Chemie Ingenieur Technik, NO.39, pp.885-893, 1967.
- 6) Rumpf, H.: Zur Theorie der Zugfestigkeit von Agglomeraten bei Kraftübertragung an Kontaktpunkten, Chemie Ingenieur Technik, No.42, pp.538-540, 1970.
- 7) 神保元二, 浅川貞雄, 曾我尚人: 粉体充てん層の引張強度による付着力の測定, 材料, 第17巻, 第177号, pp.88-92, 1968.
- 8) Shinohara, K. and Tanaka, T.: Ultimate Tensile Strength of Cohesive Powders based on Non-Uniform Packing Model, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.8, No.1, pp.50-56, 1975.
- 9) Derjaguin, B.V.: Untersuchungen über die reibung und adhesion, IV. Theorie des Anhaftens kleiner teichen, Kolloid Zeitschrift, No.69, pp.155-164, 1934.
- 10) Johnson, K.L., Kendall, K. and Roberts, A.D.: Surface energy and the contact of elastic solids, Proc. R.Soc. London, Ser.A, No.324, pp.301-313, 1971.
- 11) J.N. イスラエルアチヴィリ (近藤 保, 大島広行訳): 分子間力と表面力, 第二版, 朝倉書店, pp.205-325, 1997.
- 12) Schukin, E.D. (J.M. Georges, ed.): In microscopic aspects of adhesion and lubrication, Elsevier, Amsterdam, pp.389-402, 1982.
- 13) Fogden, A. and White, L.R.: Contact elasticity in presence of capillary condensation, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.138, No.2, pp.414-430, 1990.
- 14) Adamson, A.W.: Physical Chemistry of Surfaces, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, pp.61-63, 1976.
- 15) Adamson, A.W.: Physical Chemistry of Surfaces, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, pp.339-363, 1976.
- 16) 小野 周: 表面張力, 共立出版, pp.17-85, 1980.
- 17) 土壌物理研究会編: 土の物理学, 森北出版, pp.211-225, 1979.
- 18) 社)日本化学会編: 土の化学, pp.50-109, 1993.
- 19) 例えば, 土壌物理研究会編: 土の物理学, 森北出版, pp.47-71, 1979.

- 20) Stanley, H.E. and Teixeira, J.: Interpretation of the unusual behavior of H₂O and D₂O at low temperatures; Tests of a percolation model, *The Journal of Chemical Physics*, No.73, pp.3404-3422, 1980.
- 21) Grahame, D.C.: Diffuse double layer theory for electrolytes of unsymmetrical valence types, *The Journal of Chemical Physics*, Vol.21, No.6, pp.1054-1060, 1953.
- 22) Clunie, J.S., Goodman, J.F. and Symons, P.C.: Solvation forces in soap films, *Nature*, Vol.216, December 23, pp.1203-1204, 1967.
- 23) Israelachvili, J.N. and Pashley, R.M.: Molecular layering of water at surfaces and origin of repulsive hydration forces, *Nature*, Vol.306, November 17, pp.249-250, 1983.
- 24) Horn, R.G., Smith, D.T. and Haller, W.: Surface forces and viscosity of water measured between silica sheets, *Chemical Physics Letters*, Vol.162, No.4.5, pp.404-408, 1989.
- 25) van Olphen, H.: An introduction to clay colloid chemistry, Second Edition, John Wiley and Sons, New York, pp.150-161, 1977.
- 26) Pashley, R.M.: Hydration forces between mica surfaces in electrolyte solutions, *Advances in Colloid and Interface Science*, 16, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, pp.57-62, 1982.
- 27) Pashley, R.M. and Israelachvili, J.N.: DLVO and Hydration forces between mica surfaces in Mg²⁺, Ca²⁺, Sr²⁺ and Ba²⁺ chloride solutions, *Jour. of Colloid and Interface Science*, Vol.97, No.2, pp.446-455, 1984.
- 28) Viani, B.E., Philip, F.L. and Charles B.R.: Direct measurement of the relation between interlayer force and interlayer distance in the swelling of montmorillonite, *Jour. Colloid Interface Sci.*, No.96, pp.229-244, 1984.
- 29) Del Pennino, U., Mazzega, E., Valeri, S., Alietti, A., Brigatti, M.F. and Poppi, L.: Interlayer water and swelling properties of monoionic montmorillonites, *Jour. Colloid Interface Sci.*, No.84, pp.301-309, 1981.
- 30) Guldbbrand, L., Jonsson, B., Wennerstrom, H. and Linse, P.: Electrical double layer forces. A Monte Carlo study, *The Journal of Chemical Physics*, Vol.80, No.5, pp.2221-2228, 1984.
- 31) Wennerstrom, H., Jonsson, B., and Linse, P.: The cell model for polyelectrolyte systems. Exact statistical mechanical relations, Monte Carlo simulations, and the Poisson- Boltzmann approximation, *The Journal of Chemical Physics*, Vol.76, No.9, pp.4665-4670, 1982.
- 32) Kjellander, R., Marcelja, S., Pashley, R.M. and Quirk, J.P.: Double-Layer ion correlation forces restrict calcium- clay swelling, *The Journal of Physical Chemistry*, Vol.92, No.23, pp.6489-6492, 1988.
- 33) Norrish, K.: The swelling of montmorillonite, *Discuss. Faraday Soc.*, No.18, pp.120-134, 1954.

- 34) Pashley, R.M. and Quirk, J.P.:The effect of cation valency on DLVO and hydration forces between macroscopic sheets of muscovite mica in relation to clay swelling, *Colloids and Surfaces*, 9, Elsevier Scientific Publishers, Amsterdam, pp.1-17, 1984.
- 35) Khan, A., Jonsson, B. and Wennerstrom, H.:Phase Equilibria in the mixed sodium and calcium Di-2- ethylhexylsulfosuccinate aqueous system. An illustration of repulsive and attractive double-layer forces, *The Journal of Physical Chemistry*, Vol.89, No.24, pp.5180-5184, 1985.
- 36) 黒田六郎, 澁川雅美訳: イオン交換—理論と応用への手引き—, 丸善, pp.14-21, 1981.
- 37) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一: 非塑性の細粒分を含む土の締固め法, 土木学会論文集. (掲載決定)
- 38) Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B.P.:Soil-water interactions, 2nd.ed., Marcel Dekker, p.35, 1994.
- 39) 岩田進午, 喜田大三監修: 土の環境圏, 株式会社フジ・テクノシステム, pp.69-71,1998.

第4章 粒子間力特性の検証

概要：土および間隙水の組成の違いを応用して、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの粒子間力へ与える影響を実験的に検討し、第3章の3.3節で提案した粒子間力式の概念的な妥当性を検証する。最初に検証方法の解説とその成立条件を示し、次に土質材料および間隙水の組成、実験方法および成立条件の検定結果等を述べ、主に不飽和一軸圧縮試験から得られた結果について考察する。

4. 1 検証方法

4. 1. 1 検証方法の解説

第2章の2.3節、2.4節、2.5節および第3章で示した通り、粒子間力は土中水の化学ポテンシャルと土の物理化学的性質の間の相互作用で生成される。そこで、表面電荷密度または比表面積の大きさおよび疎水性面を有する土壤有機物の有無が異なる砂・粘性土の混合土である中間土を作製し、非イオン性界面活性剤（以下、活性剤と記す）および電解質水溶液を加え、水を添加した場合と比較し、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルの影響を検証する。

ここでは、同じ物性の土を用いて、同じ方法で作製した等しい密度の供試体の実験結果を比較するために、土粒子の配列等の条件は同一と近似的に仮定することができる。その場合の粒子間力は、近似的に間隙水圧 u_a と間隙空気圧 u_w の差であるサクション ($u_a - u_w$) で代表され、例えば粒子間力の増加挙動は、サクションの減少をもって示される。また、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルの粒子間力以外を電磁的粒子間力と記し、浸透ポテンシャルおよびそれにかかわる第3章で未定義な作用を全て含むこととする。

検証方法の概要を図-4.1に示す。電解質水溶液を加えた中間土には浸透ポテンシャル等による電磁的粒子間力の発生が期待できる^{1), 2), 3)}。ペDESTALにイオンの通過を遮断しないセラミックディスクを用いた加圧版法で測定されるサクションは、理論的にマトリックスポテンシャルのみであり、サクションを介しての電解質水溶液と水を添加した中間土の実験結果の比較は、浸透ポテンシャルを補うべく変化したマトリックスポテンシャルの影

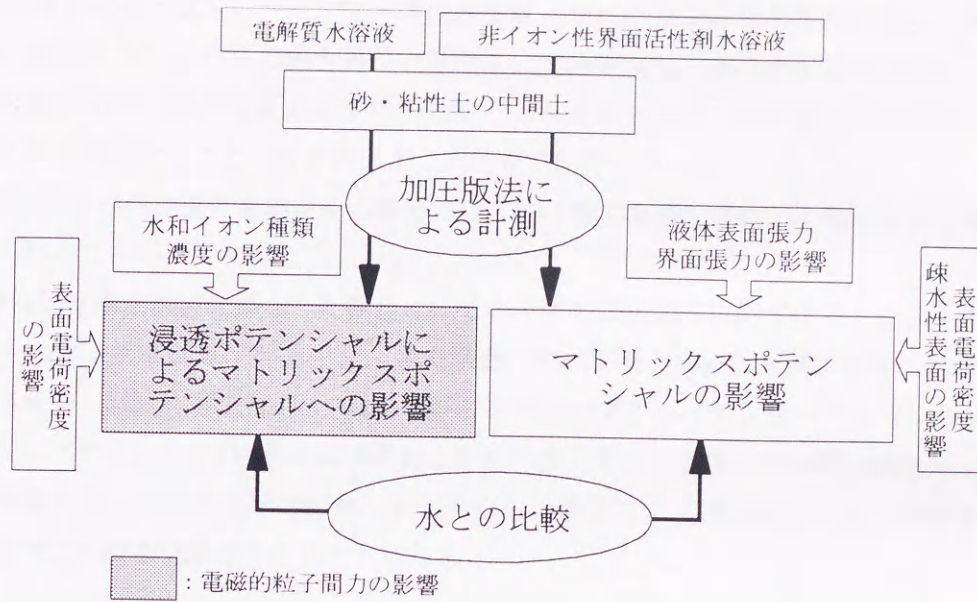


図-4.1 検証方法の概要

響を与えることになる^{4), 5)}。

活性剤水溶液を加えた中間土には、液体表面張力の値に応じたマトリックスポテンシャルによる粒子間力の発生が期待できる⁶⁾。活性剤水溶液および水を添加した中間土のサクシジョンの比較は、マトリックスポテンシャルへの液体表面張力の影響を示し、液体表面張力の値に対するサクシジョンの変動の大きさから、浸透ポテンシャルを補うべく変化したマトリックスポテンシャルの存在を推定することもできる^{1), 2)}。

4. 1. 2 検証方法の成立条件と期待される結果

4.1.1項の検証方法が成立するには、以下の2つの条件を満足する必要がある¹⁾。

検証方法の成立条件

条件1：電解質水溶液の場合、土中水のバルク相のイオン濃度が一定（土粒子表面が飽和吸着状態）であること。

条件2：活性剤水溶液の場合、液体表面張力が一定となる（土粒子表面が飽和吸着状態）臨界ミセル濃度以上で、土粒子表面間とバルク相の間にイオン濃度差が生じないこと。

本研究では、条件1は高いイオン濃度の電解質水溶液を用いることで満足させ¹⁾、条件2に対しては、中間土のサクシジョンが一定となる安定平衡状態に達する活性剤濃度以上で、

条件を満足すると仮定し^{1), 5), 6)}, 活性剤濃度とサクシヨンの関係を加圧版法で実験的に求めて検定した。これらの成立条件の厳密な化学的検定は、遠心分離器等で抽出した土中水の定量分析や有機炭素量の測定¹⁾を行い、それぞれの土質で土中水の組成が近似的に等しいことを確認することで成されるが、本研究では行っていない。

上述の2つの成立条件を満足する場合には、4.1.1項で概略を述べたように以下の実験結果が得られることが期待される。

第1に活性剤水溶液を添加した場合は、その液体表面張力値に応じたマトリックスポテンシャルによるサクシヨンを発生し、水の場合に比べてサクシヨンを減少させ、粒子間力を増加させる。疎水性面を含む土では、条件2を満足せずとも、ヤング-デュプレの式(4.1)およびヤングの式(4.2)の3相系の関係式および液体表面張力と固体-液体間の接触角 θ の直線比例関係から、活性剤成分の固体-液体界面への吸着による接触角低下で、付着仕事は増加し保水力を増す現象が生じることになる。

$$W_{SL} = \gamma_L(1 + \cos \theta) \quad (4.1)$$

ここに、 W_{SL} : 固体-液体間の付着仕事、 γ_L : 液体-気体間の液体表面張力
 θ : 固体-液体間の接触角

$$\gamma_{SL} = \gamma_S - \gamma_L \cos \theta \quad (4.2)$$

ここに、 γ_{SL} : 固体-液体間の界面張力、 γ_S : 固体-気体間の固体表面張力

第2に電解質水溶液を添加した場合は、粒子表面間距離が約100nm以上で、イオンの移動を妨げる因子が存在しない場合には、浸透ポテンシャルの粒子間力は発生せず、マトリックスポテンシャルに何の影響も与えない。さらに粒子が接近した場合（距離：約100nm以下から電気二重層）には、土粒子表面のイオン数密度増加によって土粒子表面間とバルク相の間にイオン濃度差が生じ、浸透ポテンシャルによる反発方向の粒子間力を発生し、マトリックスポテンシャルに影響を与える。同様に粒子が極接近した場合（距離：電気二重層以下）には、DLVO理論で説明できない非DLVO力が作用する。非DLVO力の水和反発力は粒子間力を減少させ、イオン相関引力は増加させる。粒子接触または水和イオンが侵入できない粒子表面間距離が存在すれば、イオン濃度に比例した付着力（負の粒子間力）が生じる。これらの粒子間力はマトリックスポテンシャルに影響をあたえたと考える。

上述のような現象が実験的に確認され、さらに粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルとそれ以外の浸透ポテンシャルの間に相互作用が確認された場合には、第3章の3.3節で提案した粒子間力式は、概念的に粒子間力を表す式として妥当と判断できる。

表-4.1 基本土質材料の物理化学的性質

表示	粗粒分	非塑性細粒分	カオリナイト細粒分	スメクタイト細粒分
土質材料分類 ¹⁾	中砂 (SP)	粘性土 [Cs]	粘土 (低液性限界) (CL)	粘土 (高液性限界) (CH)
産出または名称	ケイ砂6号	DLクレイ	微粉クレイ	有明粘土 (佐賀県川副町)
主要組成	ケイ砂 (高結晶)	ケイ石粉碎物 (高結晶)	・ケイ石粉碎物 70% (高結晶) ・カオリナイト 30% (鉱床鉱物)	・スメクタイト 50% ¹⁰⁾ (土壤鉱物) ・酸化, 水酸化物 ・腐食物質, 等
SiO ₂ 含有率 (%)	95.9	94.8	80.64	59.24 ⁸⁾
Al ₂ O ₃	1.97	2.43	12.00	17.51
Fe ₂ O ₃	0.06	0.91	0.83	6.39
MgO	0.05	0.12	0.07	2.26
その他	1.99	1.39	6.06	13.39
比表面積×10 ³ (m ² /kg)	—	—	10~55 ⁹⁾	474 ⁹⁾
陽イオン交換容量 (meq/kg)	—	—	20~100 ⁹⁾	600~1000 ⁹⁾
土粒子密度 ρ _s (Mg/m ³)	2.660	2.65	2.708	2.607
液性限界 w _L (%)	NP	NP	42.8	71.0 (乾燥後)
塑性限界 w _P (%)	NP	NP	26.1	32.8 (乾燥後)
均等係数 U _c	1.3	3.5	—	—
曲率係数 U _{c'}	1.1	1.8	—	—
粘土分含有率 (%)	0.0	9.5	70.9	69.0
シルト分含有率 (%)	0.1	90.4	29.1	28.8
砂分含有率 (%)	99.9	0.1	0.0	2.2

4. 2 実験方法

4. 2. 1 土質材料組成と検証方法の関係

基本土質材料の物理化学的性質を表-4.1に示す。

粗粒分と表示した中砂はケイ砂で、シリカ分95.9%である。顕微鏡観察によるとその粒子形状は楕円形に近く、比表面積および表面電荷密度は極小さい⁵⁾。

非塑性細粒分と表示した粘性土はケイ石粉碎物で、シリカ分94.8%である。顕微鏡観察によるとその粒子形状は中砂と同様に楕円形に近く、表面電荷は極小さい。

カオリナイト細粒分と表示する粘土（低液性限界）は、粉碎による変異荷電の発生のない鉱床粘土である1:1型鉱物のカオリナイトを約30%、ケイ石粉碎物を約70%含有し、腐食物質を含まないために接触角はゼロに近い。ケイ石粉碎物の産出場所は、非塑性細粒分と同じである。

スメクタイト細粒分と表示する空気乾燥後に粉碎した粘土（高液性限界）は、鉱床鉱物と比べ結晶度が低い2:1型鉱物の土壤スメクタイトを約50%含有し¹⁰⁾、多種の鉱物や水和酸化物および土壤有機物が混在している。そのため、粘土鉱物中の同形置換、鉱物結晶端

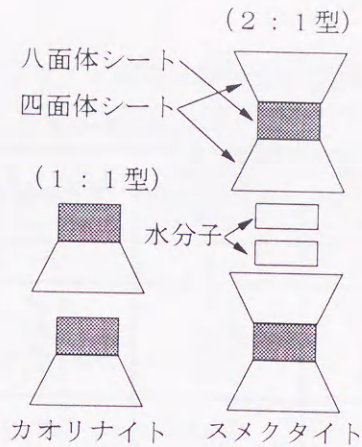


図-4.2 粘土鉱物の構造⁹⁾

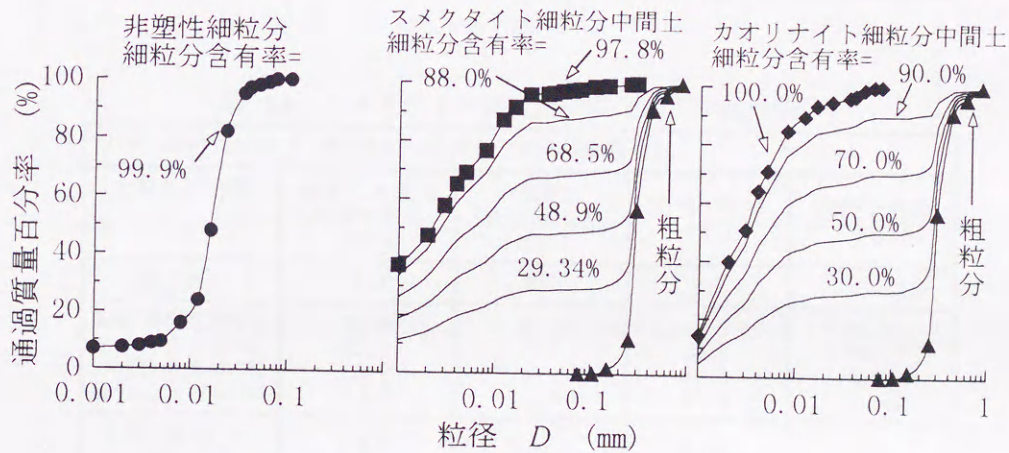


図-4.3 作製した中間土の粒径加積曲線

の破壊原子価部位や非晶質アルミノケイ酸塩、水和酸化物表面に存在する水酸基に基づく荷電、腐食物質のカルボキシル基の解離による荷電や土壌有機物の疎水性面の作用がある。

図-4.2にそれぞれの粘土鉱物の構造⁹⁾を示す。通常のス멕タイト鉱物は図-4.2に示した水分子層によって高膨潤性を示すが、本研究で用いた佐賀県有明湾沿岸部（佐賀県川副町）で採取されたス멕タイト細粒分は低い膨潤性を示し¹⁰⁾、溶脱によってコンシステンシー限界が低下する¹¹⁾。これらの粘土鉱物は、pH5~7の範囲でAlやFeの水和酸化物は正に、粘土鉱物および有機物は負に帯電していると考えられる^{9), 12)}。また、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比（ケイバン比）が大きいため、陰イオン交換作用は大きくはない⁹⁾。

中間土は上述の中砂を粗粒分として、カオリナイト細粒分、ス멕タイト細粒分を混合して作製し、これらの中間土と非塑性細粒分と表示した粘性土を実験に用いた。図-4.3に作

表-4.2 カオリナイト細粒分中間土の工学的性質 その1

カオリナイト細粒分中間土(混合割合=粗粒分:カオリナイト細粒分)				
土質材料分類	砂まじり粘土 (低液性限界) (CL-S)	砂質粘土 (低液性限界) (CLS)	砂質粘土 (低液性限界) (CLS)	粘性土質砂 (SC _s)
混合割合	1:9	3:7	5:5	7:3
細粒分含有率(%)	90.0	70.0	50.0	30.0
粘土分含有率(%)	63.8	49.6	35.4	21.3
シルト分含有率(%)	26.2	20.4	14.6	8.7
砂分含有率(%)	10.0	30.0	50.0	70.0
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.703	2.694	2.684	2.674
液性限界 w_L (%)	40.0	31.6	22.8	NP
塑性限界 w_P (%)	18.46	14.6	11.3	NP
均等係数 U_C 曲率係数 U_C'	—	—	—	—

表-4.3 スメクタイト細粒分中間土の工学的性質

スメクタイト細粒分中間土(混合割合=粗粒分:スメクタイト細粒分)				
土質材料分類	砂まじり粘土 (高液性限界) (CH-S)	砂質粘土 (低液性限界) (CLS)	粘性土質砂 (SC _s)	粘性土質砂 (SC _s)
混合割合	1:9	3:7	5:5	7:3
細粒分含有率(%)	88.0	68.5	48.9	29.34
粘土分含有率(%)	62.1	48.3	34.5	20.7
シルト分含有率(%)	25.9	20.2	14.4	8.64
砂分含有率(%)	12.0	31.5	51.1	70.66
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.612	2.623	2.634	2.644
液性限界 w_L (%)	62.3	46.9	34.7	NP
塑性限界 w_P (%)	31.0	24.0	19.2	NP
均等係数 U_C 曲率係数 U_C'	—	—	—	—

表-4.4 作製した中間土等の性質

	表面電荷密度 比表面積	イオンの表面 吸着容量	有機物の有無
非塑性細粒分	小	小	無し
カオリナイト細粒分中間土	中	中	無し
スメクタイト細粒分中間土	大	大	有り

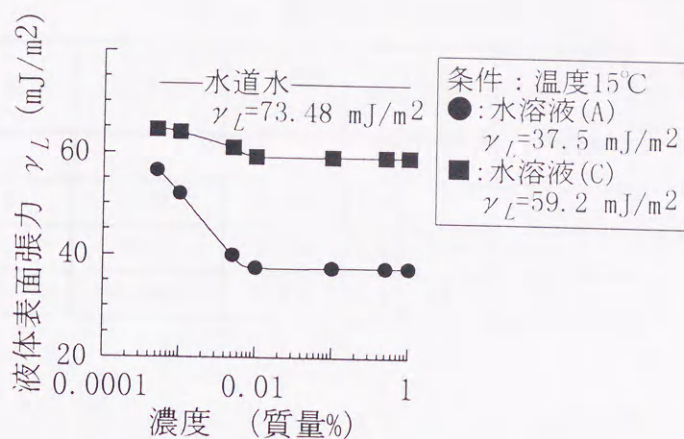


図-4.4 活性剤水溶液濃度と液体表面張力の関係

製した中間土の粒径加積曲線、表-4.2および表-4.3に工学的性質、表-4.4にそれぞれの土の相対的な性質を示す。これらの中間土および基本土質材料の土粒子表面は、その物理化学的性質から考えて負電荷に帯電している部分が支配的である。

活性剤水溶液を添加したスメクタイトおよびカオリナイト細粒分中間土の比較は、検証方法の成立条件を満足せずとも、有機物の有無に起因した疎水性面に対する液体表面張力減少による影響、すなわち、固体-液体間の接触角低下および疎水性面の付着仕事増加等による保水力の増加現象の発生が期待される。非塑性細粒分とカオリナイト細粒分中間土の比較は、表面電荷密度または比表面積に起因した土粒子表面への吸着の影響を与え、マトリックスポテンシャルに対する液体表面張力の影響が明らかになることが期待される。

電解質水溶液を加えた中間土および非塑性細粒分の比較は、土壌有機物の疎水性面は無極性で電気的な粒子間力に関与しないため、スメクタイト細粒分>カオリナイト細粒分>非塑性細粒分の順で大きい表面電荷密度または比表面積^{9), 12)}に起因した土粒子表面へのイオン吸着の影響、すなわち、浸透ポテンシャル等の電磁的相互作用のマトリックスポテンシャルへの影響の発生が期待される。詳細なイオン吸着作用については、付録Aおよび付録Bを参照されたい。


4. 2. 2 活性剤および電解質水溶液の組成

図-4.4に活性剤の水溶液濃度と自由水面での液体表面張力の関係を示す。液体-気体の界面が飽和吸着状態となる臨界ミセル濃度に達すると、液体表面張力は図中に示す値で一定となる。本研究では土粒子間に作用する相互作用自由エネルギーを検討するため、液体表面張力等の界面張力はエネルギー単位 ($\text{mN/m}=\text{mJ/m}^2$) で示す¹³⁾。この変換は厳密には熱力学的に絶対温度 $T=0$ のときのみ成立するが、近似的に問題はない。

このように活性剤水溶液は土の電気的作用に影響を与えないが、液体表面張力および接

表-4.5 電解質水溶液の性質

陽イオン価数	化学式	モル濃度 (mol/dm ³)	pH	陽 イオン	イオン 半径 (nm)	水和イオン 半径 ¹⁾ (nm)	水和数 ¹⁾
—	H ₂ O	10 ⁻⁷	7.0	H ₃ O ⁺	—	0.28	3
1	KCl	0.268	6.9	K ⁺	0.133	0.33	3~4
2	CaCl ₂	0.136	7.3	Ca ²⁺	0.099	0.41	6
3	Al ₂ (SO ₄) ₃	0.058	3.5	Al ³⁺	0.05	0.48	6

触角を減少させる⁶⁾。4.1節の成立条件2を満足するには、と同様に土のサクションが活性剤濃度の影響を受けない濃度、すなわち、固体-液体-気体の界面が飽和吸着状態となる安定平衡状態の臨界ミセル濃度以上の活性剤濃度で、実験を行わなくてはならない。


電解質水溶液の性質を表-4.5に示す。陽イオン価数の異なる典型元素化合物3種類を用いた。土粒子表面間とバルク相のイオン濃度差の影響を検討できるようイオン濃度を変化させ、3価の最小のモル濃度でも4.1節の成立条件を満足する濃度と判断している^{9), 10), 12)}。

それぞれの金属陽イオンは、水溶液中で水和イオンとして存在し、水分子を引き付けて存在する。イオン半径が小さく、イオン価の高いほど水和数は大きく、水分子を強く引き付ける。そのために3価陽イオンはプロトンH⁺を離して酸性を示す。また中間土のSiO₂/Al₂O₃比(ケイバン比)から、陰イオンの影響は重要ではない。

電解質水溶液はイオン濃度に応じて直線的に液体表面張力が大きくなるが、これらの電解質水溶液の増加量は0~2mJ/m²である¹⁴⁾。よって、液体表面張力への影響は近似的に無視でき、粒子表面に吸着し表面電位を減少させる効果のみを考察できる。

4. 2. 3 供試体作製と実験の方法

圧縮試験の供試体は直径50mm高さ100mmの鏡面仕上げのステンレスモールド、検証方法の条件2の検定に用いた供試体は直径50mm高さ30mmの黄銅製モールドで、それぞれ静的に締固めて作製した。それぞれのモールドに含水比調整済みの土を3層(条件2の検定では1層)に分けて均等に入れ、最大荷重49kN、载荷速度1mm/minで静的に締固め、圧入完了後20分間は状態を保持した。完成した供試体は乾燥防止の処置を施し、2日間恒温室に静置した後試験を行った。なお、均一な供試体を得るために、土の含水比調整の際には噴霧器を用いて水滴を細かくして加水し¹⁵⁾、圧縮試験の供試体の土粒子の体積率は、検討した最大の空気間隙率において、標準プロクターの締固め仕事量($E_c=5.6 \times 10^5 \text{ J/m}^3$)相当とした。

-4.5に試験に用いた不飽和三軸圧縮試験用の圧力室を示す。この三軸圧力室は第5章、第6章および第7章でも使用している。間隙水圧測定はサンドペーパーで表面研磨した2mm厚のセラミックディスクが埋め込まれた高さ18mmの黄銅製ペDESTALを通じて行い、

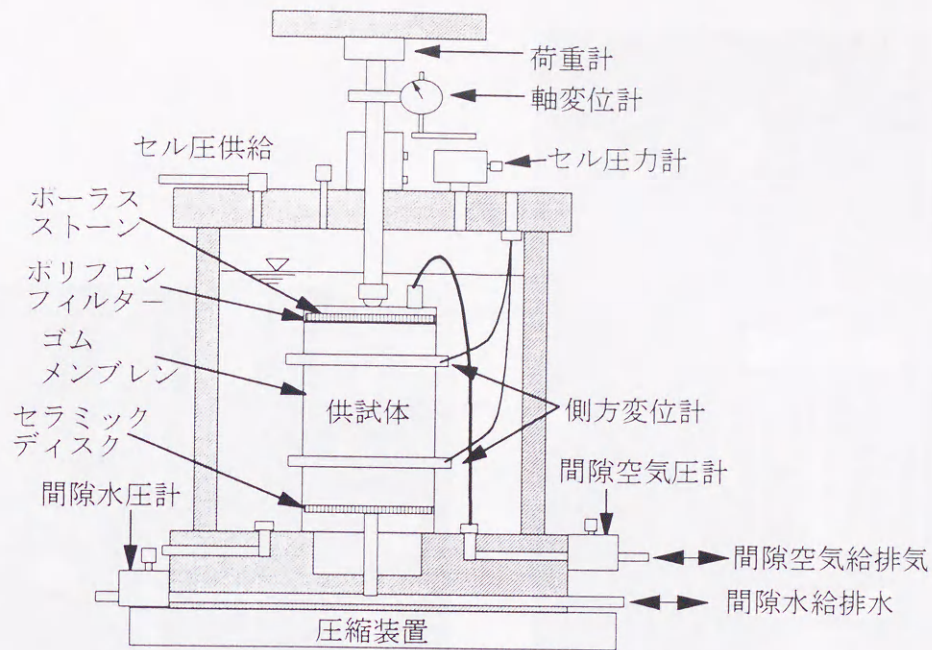


図-4.5 不飽和三軸圧縮試験用の圧力室概要

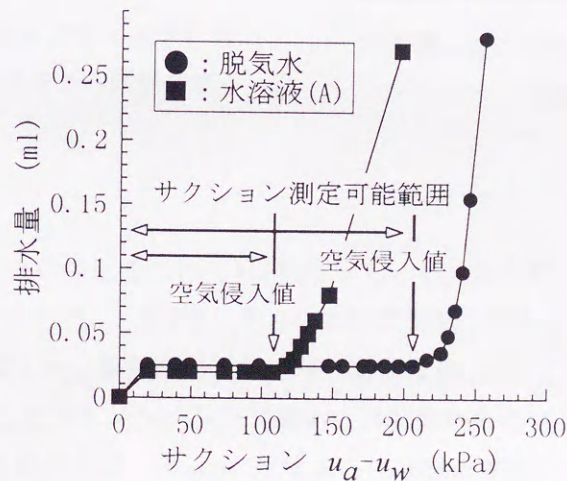


図-4.6 セラミックディスクの通気試験結果

間隙空気圧はアクリル製の上部キャップに接続したホースを三軸圧力室内で解放し、ポーラスストーンを埋め込んだ上部キャップ下の撥水性ポリフロンフィルターを通じて供給した。正確なサクションを計測するために、ペDESTALの高さを低くして間隙水圧測定センサーに接近させている。なお、条件2の検定では上部キャップは使用していない。

セラミックス付きペDESTALの脱気は、写真-4.1に示すように脱気水の中に入れたペDES

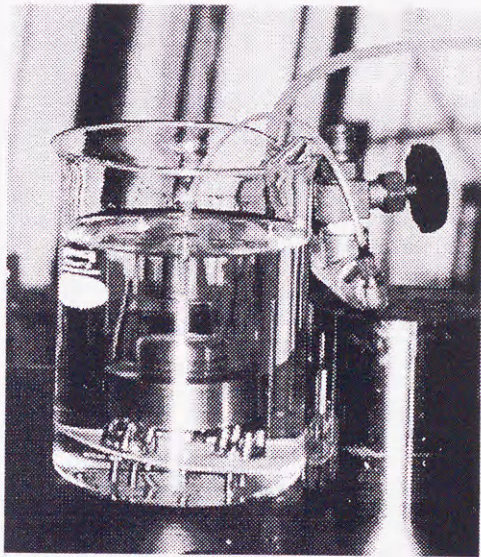


写真-4.1 セラミックディスク付き
ペダスタルの脱気の様子

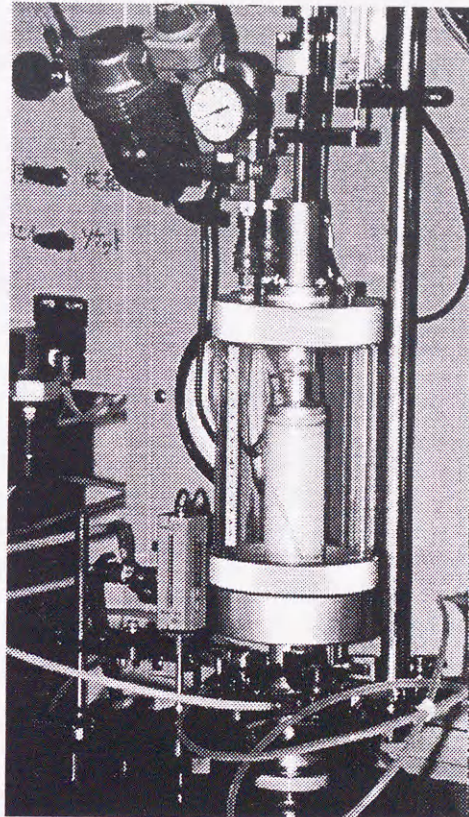


写真-4.2 三軸圧力室内の供試体
の設置状況

タルに大気圧下で98kPaの負圧をかけて3日間行っている。さらに、圧力室に接続された配管やセンサー周辺についても、同様の大きさの負圧で脱気作業を行っている¹⁶⁾。

三軸圧力室内に設置した圧縮試験の供試体は、写真-4.2に示すように、高真空用シリコングリースを薄く塗布したゴムメンブレンで覆い、供試体からのメンブレンを通した排水に注意した。供試体の体積変化は、図-4.5に示すように供試体表面のゴムメンブレンに接着された上下2つの側方変位計および載荷ピストンの軸変位計から求められる。

圧縮試験の手順は不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験¹⁶⁾に従い、せん断試験時のひずみ速度は0.05%/min、間隙空気圧はバック・エア・プレッシャーとして、78.45~215.7kPaの範囲で変え、間隙水圧が正值となるようにしている。三軸圧力室内は水で満たしていない。

図-4.6にセラミックディスクの通気試験結果を示す。水溶液(A)で脱気したセラミックディスクは、脱気水で脱気した場合に比べて空気侵入値が低下し、サクシオン測定可能範囲は脱気水の場合の約半分となる。これは図-4.4に示すように、セラミックディスクの細孔に充填された水溶液(A)の液体表面張力の値が脱気水の約51%の大きさであるために、セラミックディスクの細孔の毛管力が低下したためである。

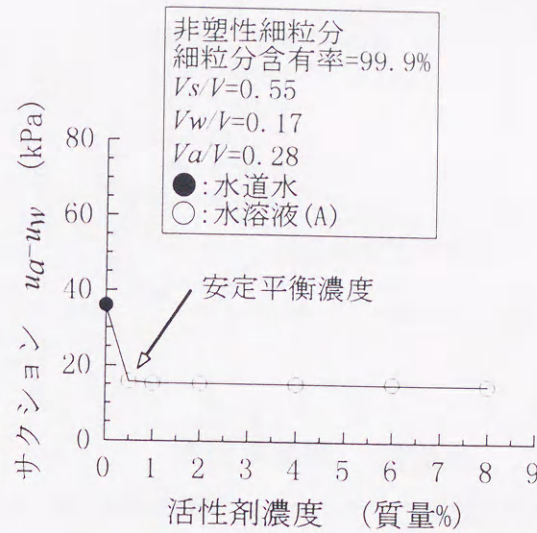


図-4.7 成立条件の検定（非塑性細粒分）

4. 3 検証方法の成立条件の検定

土中水の液体表面張力一定となる臨界ミセル濃度以上で、土粒子表面間とバルク相にイオン濃度差が生じないという条件2を、加圧版法から得られたそれぞれの中間土および非塑性細粒分のサクションと活性剤濃度の関係から検定する。この試験の様子は、第5章の5.2.2.5の土の保水性試験における写真-5.1および写真-5.2と同じである。

図-4.7に非塑性細粒分の実験結果を示す。活性剤濃度0.5質量%以上で活性剤濃度にかかわらずサクション一定となり、土中水の液体表面張力は一定で、土粒子表面とバルク相の間に大きなイオン濃度差が生じていないと判定される。

同様に図-4.8にカオリナイト細粒分中間土の実験結果を示す。活性剤濃度2.0質量%以上で近似的にサクション一定となるが、活性剤濃度に応じたサクション減少挙動は継続しており、固体-液体界面と液体-気体界面の活性剤成分の濃度は等しくない。土粒子表面間とバルク相の間に浸透ポテンシャルによる粒子間力を発生する程度のイオン濃度差は生じていないと考え、濃度2.0質量%以上で土中水の液体表面張力は近似的に一定と判定した。

同様に図-4.9にスメクタイト細粒分中間土の実験結果を示す。土粒子の体積率 (V_s/V) が0.5の場合、カオリナイト細粒分中間土と同様に活性剤濃度に応じたサクション減少挙動は継続しており、固体-液体界面への吸着量が液体-気体界面への吸着量を上回り、近似的にも土中水の液体表面張力一定と判定する安定平衡濃度に到達していない。非イオン性の活性剤成分が有機物の疎水性面に優先的に吸着され、全比表面積も他の中間土等に比べて格段に大きいためと考える。さらに土粒子の体積率 (V_s/V) が0.6では、逆に活性剤濃度に

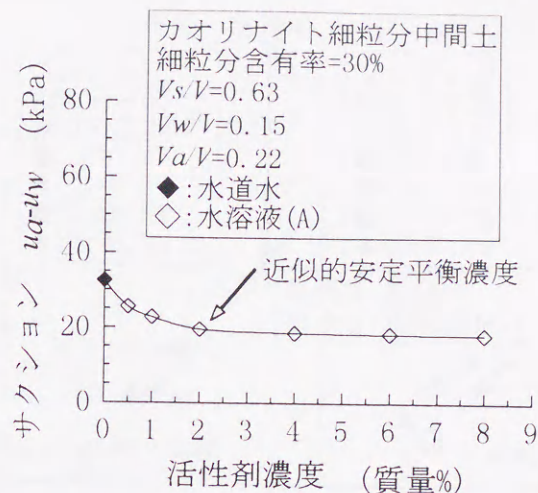


図-4.8 成立条件の検定 (カオリナイト細粒分中間土)

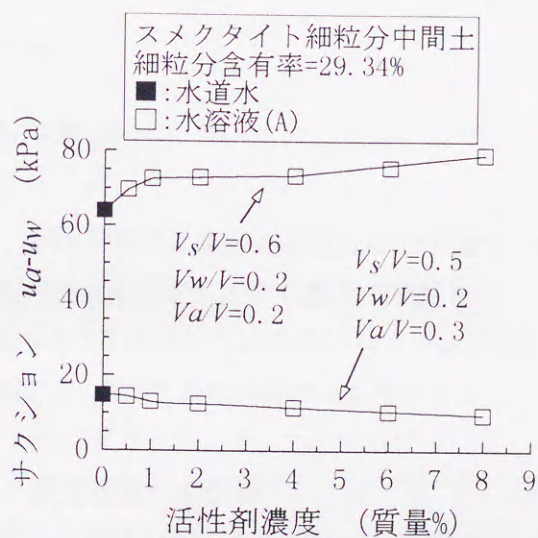


図-4.9 成立条件の検定 (スメクタイト細粒分中間土)

応じてサクシオンは増加する傾向を示している。固体-液体界面への活性剤成分の吸着量増加で、土粒子表面間のイオン濃度がバルク相のイオン濃度を上回り、浸透ポテンシャルによる反発方向の粒子間力が生じ、マトリックスポテンシャルのサクシオンを増加させたと考える。前述の結果と異なるのは、個々の粒子がより接近したことが原因と考える。

以上から、理論的には浸透ポテンシャルによる力が作用する約100nm以下の粒子表面間距離で、その存在が予想されていた。マトリックスポテンシャルとそれ以外の浸透ポテンシャル等の電磁的粒子間力との相互作用が初めて実験的に確認された。このことは、第3章の3.3節で提案した粒子間力式の妥当性を証明するものである。

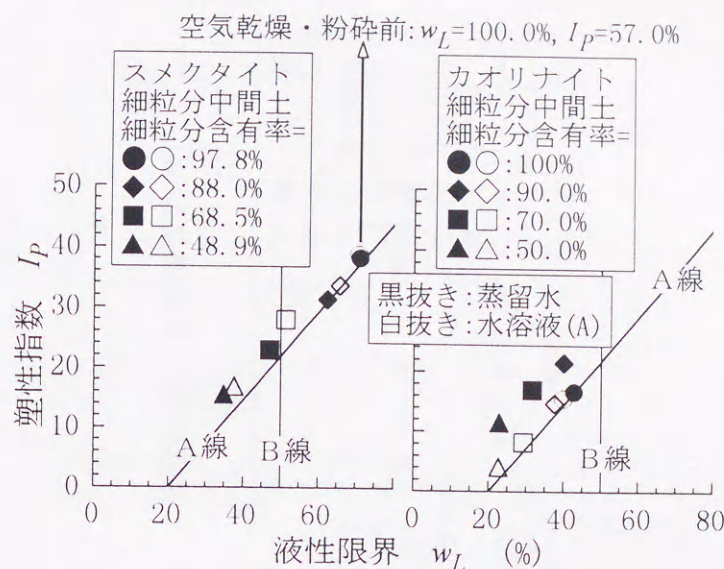


図-4.10 塑性図

4. 4 実験結果の考察

4.3節の検定結果から、活性剤濃度は非塑性細粒分で0.5質量%、カオリナイト細粒分中間土は2.0質量%の検証方法の成立条件を満足する濃度で実験を行った。スメクタイト細粒分中間土は検証方法の成立条件2を満足しないため、イオン濃度差による影響が少ない0.5質量%の活性剤水溶液を添加し、疎水性面の影響のみを考察する。

4. 4. 1 液性限界，塑性指数への影響

作製した中間土に蒸留水および水溶液(A)を加え、2日間恒温で静置後に空気乾燥法で液性・塑性限界試験を行った。得られた塑性図を図-4.10に示す。図に示すようにスメクタイト細粒分は、空気乾燥後に粉碎し、0.25mmの標準網ふるいの通過試料であるため、団粒化が原因と考えられる液性限界および塑性指数の減少が生じている¹⁷⁾。

図-4.11は間隙水組成の影響を明確に表すため、図-4.10のデータの水溶液(A)と蒸留水の差を縦軸にプロットしたものである。

図-4.10および図-4.11から、スメクタイト細粒分中間土の液性限界および塑性指数は、活性剤水溶液の方が増加し、カオリナイト細粒分中間土は逆に減少する。いずれの中間土も細粒分含有率約100%では両者の結果に大きな差は無く、約50%未満は非塑性であった。

土の液性限界および塑性指数の低下現象は、従来はDLVO理論によって、土中の陽イオン濃度低下で静電的な反発力が増加するイオン溶脱現象として説明されてきたが¹⁸⁾、非イオン性の活性剤にそのような電氣的機能は存在しない。よって、このカオリナイト細粒

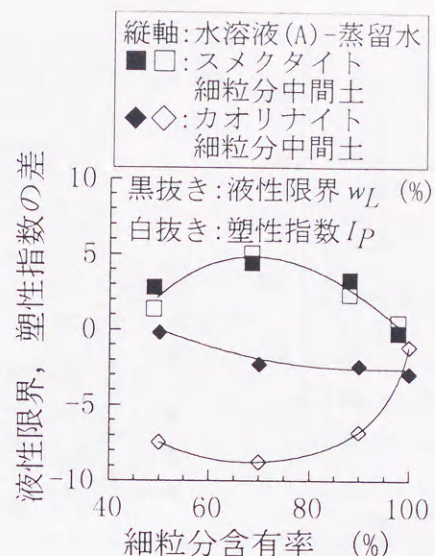


図-4.11 液性限界、塑性指数への活性剤水溶液の影響

分中間土の結果は、新納ら⁶⁾の「液体表面張力減少による粒子間力増加は、粒子の拘束を緩和し液性限界および塑性指数を低下させる」とした考えから説明することができる。この新納らの考えは、第3章の3.1節および3.3節の理論的考察にも適合している。

一方、スメクタイト細粒分中間土がカオリナイト細粒分中間土と逆の傾向を示す原因は有機物の有無から説明できる。すなわち、土中水の液体表面張力減少によるマトリックスポテンシャルの粒子間力増加や、粒子表面間とバルク相のイオン濃度差による浸透ポテンシャルの粒子間力変化よりも、活性剤成分が有機物の疎水性面に吸着されることの影響が先に発現し、その結果、疎水性面の固体-液体間の接触角低下および付着仕事増加が生じて、保水力が増したためと考える。この考察は、図-4.9の活性剤濃度0.5質量%でのサクション減少量が極わずかであること、さらに、疎水性面が多い有機物の洗浄には、疎水性面への吸着能に優れた非イオン性活性剤が効果的であるとする界面科学分野の一般的見解¹⁹⁾から裏付けられる。この考察に従えば、土中水中の活性剤濃度はカオリナイト細粒分中間土よりも低いと予想されるが、土中水の全有機炭素量の測定等による確認は行っていない。

これらの現象が細粒分含有率低下に比例して大きくなり、約70%で極大および極小のピークが生じるのは、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルの粒子間力および電磁的粒子間力、さらに、土粒子表面の性質等から決定される土の保水力と水量の平衡によると推察され、細粒分含有率約100%で間隙水組成の違いの影響が生じない理由は、活性剤成分の多くが土粒子表面へ吸着され、固体-液体-気体間の界面張力が液性限界や塑性指数に影響を与えるほど大きく変化していないためと考える。

以上から、従来はDLVO理論によって説明されてきた液性限界および塑性指数の挙動は、

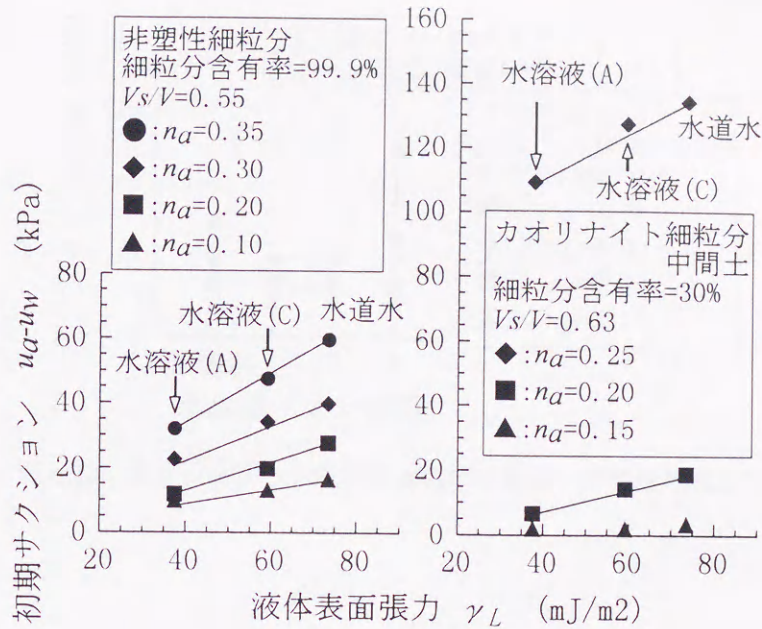


図-4.12 サクションへの活性剤水溶液の影響

粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルの粒子間力およびそれ以外の浸透ポテンシャル等による電磁的粒子間力の作用からも説明できることを示した。

4. 4. 2 サクションへの影響

サククションへの活性剤水溶液添加の影響を図-4.12に、電解質水溶液添加の場合を図-4.13および図-4.14に示す。静的締固めによって土粒子の体積率一定条件で空気間隙率 n_a を変化させ、図-4.12の横軸の液体表面張力の値は、図-4.4に記した自由水面の液体表面張力が一定となる臨界ミセル濃度の値は用いた。なお、供試体を三軸圧力室内に設置して間隙空気圧を作用させ、計測されるサククションが安定した時の値を初期サククションと呼び、この安定を確認した後に軸圧縮過程に移行することになる。また、最大一軸圧縮強さにおけるサククションの値を破壊時サククションと呼ぶ。

図-4.12のそれぞれの土の同一の液体表面張力値において、空気間隙率 n_a が大きいほど初期サククションは大きくなる。これは第2章の2.2節で示した過渡的不飽和状態 (Fuzzy saturation) 以下の飽和度では、メニスカスが発達するほど液体表面張力のサククションへの影響度が増すことを示している。また、それぞれの空気間隙率 n_a での液体表面張力と初期サククションの比例的な関係は、第3章のマトリックスポテンシャルのサククションと液体表面張力の理論的關係を確認するものである。但し、図-4.8で述べたように、厳密にはカオリナイト細粒分中間土の土中水の液体表面張力の値は、臨界ミセル濃度値に到達しておらず、プロットした液体表面張力の値は実際値よりも小さいと推定される。

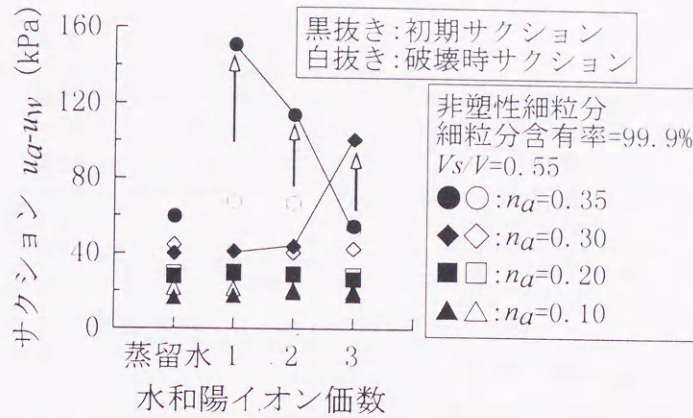


図-4.13 サクションへの電解質水溶液の影響（非塑性細粒分）

図-4.13の非塑性細粒分において、空気間隙率 $n_a=0.35$ の1価および2価の水和陽イオン、 $n_a=0.3$ の3価の水和陽イオンの初期サクションは、破壊時サクションに比べ特異的に大きな値である。この結果は特定の水和陽イオンの価数および空気間隙率で、破壊時に消滅するサクションが発生していることを示している。表-4.5の水和イオン半径およびイオン濃度から、 $n_a=0.35$ では粒子接触または 0.66nm (K^+ の水和イオン直径)未満、 $n_a=0.3$ では 0.96nm (Al^{3+} の水和イオン直径) $\sim 0.82\text{nm}$ (Ca^{2+} の水和イオン直径)の粒子表面間距離が存在し、水和イオンが侵入できずバルク相イオン数密度相当の浸透ポテンシャルによる引力方向の粒子間力が生じ、マトリックスポテンシャルのサクションを増加させたと考察する。この粒子間力は、軸圧縮過程で体積膨張が生じ粒子表面間距離が拡大すると、イオン濃度が均一化して消滅し、破壊時サクションに影響を与えない。

この考察は浸透ポテンシャルによる粒子間力がマトリックスポテンシャルへ与える影響に関して、先の図-4.9の土粒子の体積率 (V_s/V) 0.6での、「粒子表面間に浸透ポテンシャルによる反発方向の粒子間力が生じ、マトリックスポテンシャルのサクションを増加させた」とする考察と浸透ポテンシャルによる粒子間力の作用方向が逆である。このような浸透ポテンシャルの粒子間力の作用方向が異なっても、同様にマトリックスポテンシャルを増加させたとする矛盾した考察を行った理由については、次の図-4.14において述べる。

図-4.14のスメクタイト細粒分中間土の $n_a=0.2$ で、電解質水溶液を添加すると初期サクションが増加する。逆に $n_a=0.3$ では、初期サクションが減少する傾向がみられる。Lambe²⁰⁾の示した電気二重層の成長が、表面電荷密度、含水比および水和陽イオン価数に比例することから、例えば $n_a=0.2$ では、メニスカスが発達し、粒子表面間の電気二重層が静電的影響を生じるに十分な大きさに成長し、実質的に気相となったバルク相のイオン濃度はゼロとなり、粒子表面間に浸透ポテンシャルの反発方向の粒子間力が発生し、マトリックスポテンシャルのサクションを増加させたと考察できるが、これは推測の域をでないものである。また、

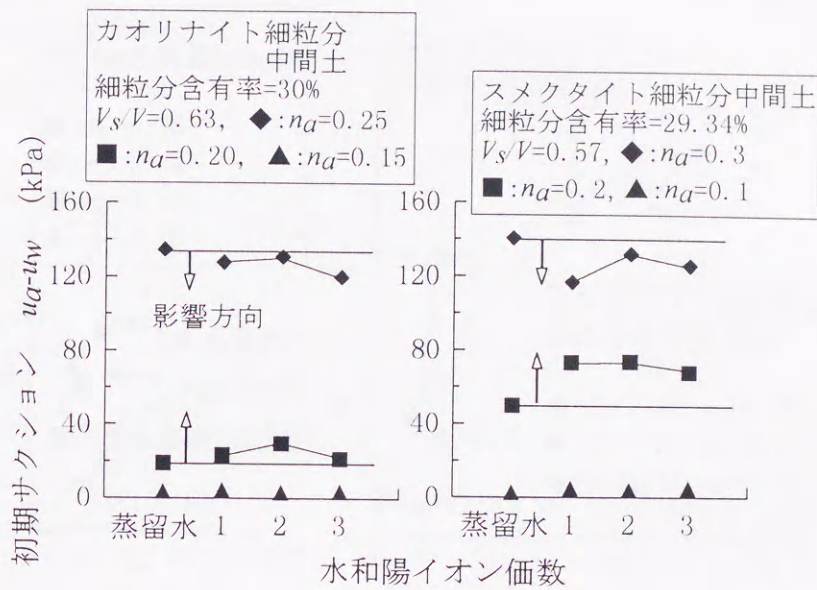


図-4.14 サククションへの電解質水溶液の影響
(カオリナイトおよびスメクタイト細粒分中間土)

$n_a=0.1$ では水和陽イオンの顕著な影響はみられないが、おそらく飽和度が高いためにメニスカスの発達が不十分で、浸透ポテンシャルの影響が表面化していないためと考えられる。

図-4.14のカオリナイト細粒分中間土も同様な傾向であるが、水和陽イオンの影響はスメクタイト細粒分中間土に比べて相対的に小さく、表面電荷密度がスメクタイト細粒分ほどに大きくないために、粒子表面とバルク相間のイオン濃度差が小さいためと考える。その他に、非DLVO力や付着力の影響の有無については、図-4.13の非塑性細粒分のようなイオン濃度との関係がみられないために考察できない。

以上から、表面電荷密度または比表面積の小さい土では、空気間隙率が大きいほどマトリックスポテンシャルのサククションは大きくなり、液体表面張力の影響度は増す。電磁的粒子間力がマトリックスポテンシャルのサククションへ与える影響は、表面電荷密度または比表面積が大きいほど顕著に表れるが、表面電荷密度または比表面積等の土質組成に応じた特定の空気間隙率または飽和度で、増加にも減少にもなると結論できる。

4. 4. 3 一軸圧縮強さへの影響

一軸圧縮強さへの活性剤水溶液添加の影響を図-4.15に、電解質水溶液を添加した場合を図-4.16および図-4.17に示す。

図-4.15の非塑性細粒分の同じ空気間隙率の一軸圧縮強さと初期サククションは、液体表面張力の値が大きくなるほど増加する。さらに、空気間隙率が増すほど一軸圧縮強さと初期

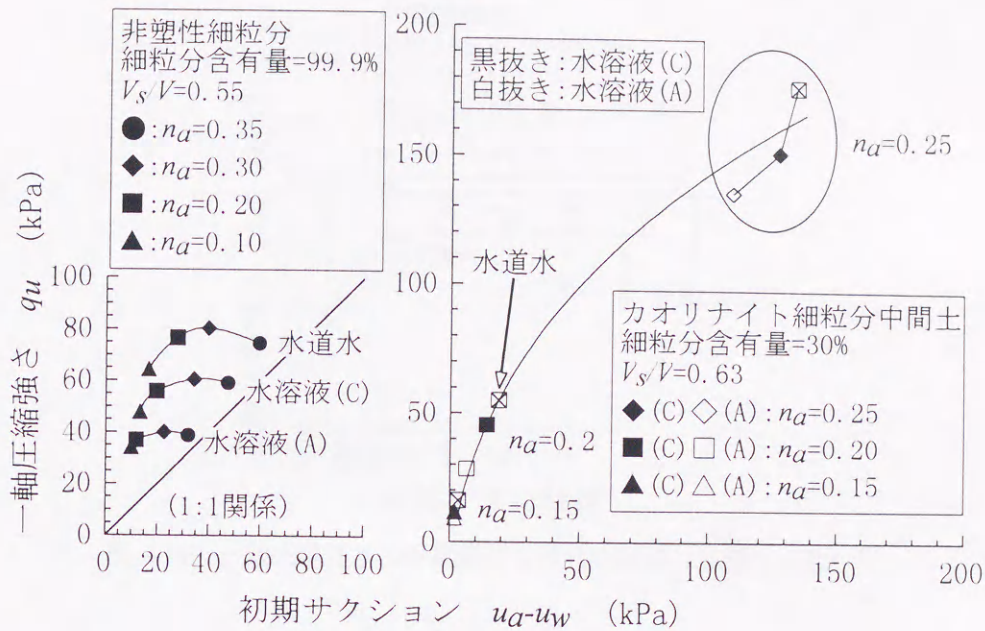


図-4.15 一軸圧縮強さへの活性剤水溶液の影響

サクシオンへの液体表面張力の影響度は等しくなる。このように初期サクシオンと一軸圧縮強さへの液体表面張力の影響が、空気間隙率によって変化するの、メニスカスの発達に伴って液体表面張力の影響が増すことに起因している。

さらに、間隙水の種類ごとに一軸圧縮強さと初期サクシオンの関係にピークが存在する。供試体の作製条件から、粒子表面間距離は同じ空気間隙率で等しく存在すると近似的に仮定できることから、この結果は、PietschとRumpf^{2.1)}が解析的に示した「液量の増大によって粒子間力は増加し、極大値をへて減少する」を証明していると考察できる。

カオリナイト細粒分中間土でも同様に、液体表面張力が小さいほど初期サクシオンおよび一軸圧縮強さは低下し、高い空気間隙率で液体表面張力の影響が増す傾向を示す。

図-4.16の電解質水溶液を添加した非塑性細粒分では、一軸圧縮強さは水和陽イオン価数に反比例的な傾向を示している。このような表面電荷は中和され、van der Waals引力のみが作用している高いイオン濃度状態での、水和陽イオン価数と一軸圧縮強さの反比例的な関係は、DLVO理論では説明できない。よって、DLVO理論が破綻する粒子表面間距離で発生する非DLVO力の一種の水和反発力の影響の可能性が考えられる。

この水和力は水素結合した表面基から生じ、シリカ表面間では常に水和力反発力が測定されている^{2.2)}。Pashley^{2.3)}およびPashleyとIsraelachvili^{2.4)}は、塩濃度が高くなると水和陽イオンが負に帯電した表面に結合して水和反発力が生じること、さらに、陽イオンの水和数の順序 ($Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ > K^+$) に水和反発力の強さと作用範囲が従うことを示して

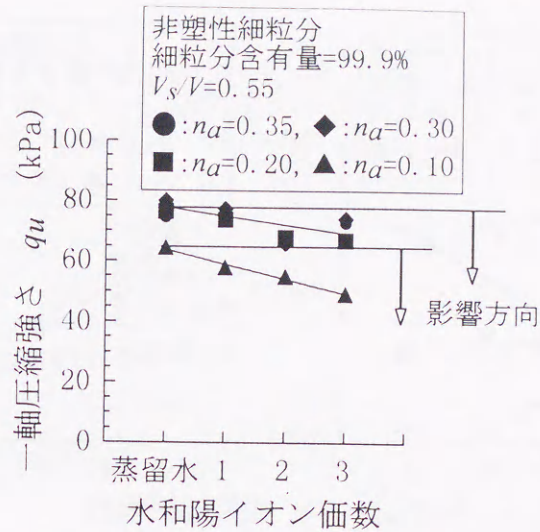


図-4.16 一軸圧縮強さへの電解質水溶液の影響 (非塑性細粒分)

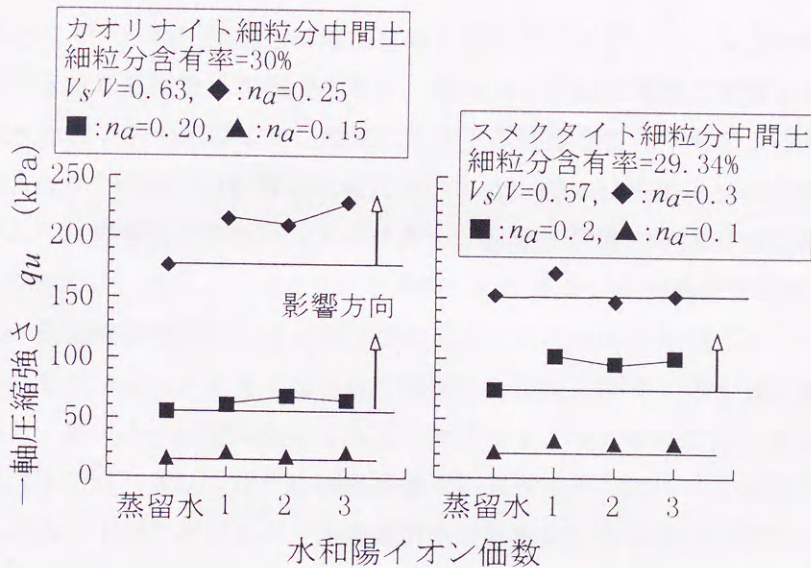


図-4.17 一軸圧縮強さへの電解質水溶液の影響
(カオリナイトおよびスメクタイト細粒分中間土)

おり、実験で用いた土の主な組成鉱物がシリカであることから、水和反発力によって一軸圧縮強さは水和陽イオン価数に反比例的に低下する挙動を示したと考察できる。

図-4.17のカオリナイト細粒分中間土は、空気間隙率 $n_a=0.25$ で水和陽イオンによる強度増加効果が表れ、スメクタイト細粒分中間土は $n_a=0.2$ で同様な傾向を示す。DLVO理論では付着した水の対イオン価数が高いほど粒子表面間の静電的な反発力が低下し、van der Waals引

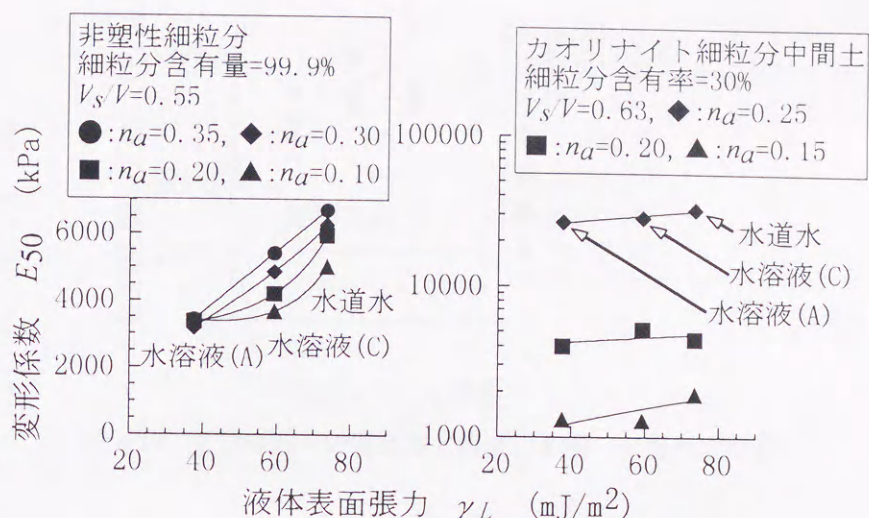


図-4.18 変形係数への活性剤水溶液の影響

力が支配的となり、一軸圧縮強さは増加すると説明されるが、このような特定の空気間隙率で影響が大きくなる現象は説明できない。図-4.14と同様に電気二重層の成長が、表面電荷密度、含水比および水和陽イオン価数に比例する複雑な相互作用によると考えられる。また、非DLVO力や付着力の影響の有無については、図-4.13や図-4.16の非塑性細粒分のような関係がみられず考察できない。スメクタイト細粒分中間土の1価の水和陽イオンの一軸圧縮強さがやや大きいのは、スメクタイト鉱物への K^+ イオンの特異吸着が原因であろう。

以上から、表面電荷密度または比表面積の小さい土の一軸圧縮強さは、マトリックスポテンシャルのサクシオンが大きくなるほど増加し、空気間隙率が増すほど液体表面張力の影響度が増し、最大の一軸圧縮強さを与えるサクシオン値が存在する。粒子表面間距離が電気二重層以下では、非DLVO力の水和反発力によって水和陽イオン価数に反比例的に一軸圧縮強さが低下することがある。表面電荷密度または比表面積が比較的大きい土では、表面電荷密度または比表面積等の土質組成に応じた特定の空気間隙率または飽和度で、電磁的粒子間力は一軸圧縮強さに顕著な影響を与えると結論できる。

4. 4. 4 変形係数への影響

変形係数への活性剤水溶液添加の影響を図-4.18に、電解質水溶液添加の場合を図-4.19および図-4.20に示す。図-4.18の横軸の液体表面張力の値は、図-4.4に記した自由水面での液体表面張力が一定となる臨界ミセル濃度の値は用いた。

図-4.18の非塑性細粒分では、液体表面張力と変形係数に比例的な関係がみられ、空気間隙率が大きいほど顕著となる。カオリナイト細粒分中間土は、対数表示としたために明瞭ではないが、同様な関係が認められる。図-4.12や図-4.15の考察と同様に、メニスカスの発

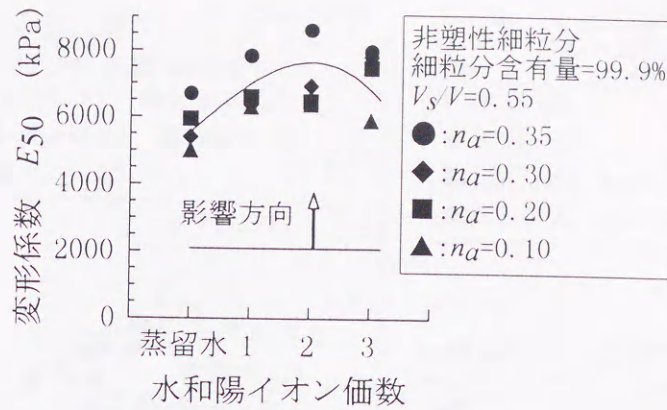


図-4.19 変形係数への電解質水溶液の影響（非塑性細粒分）

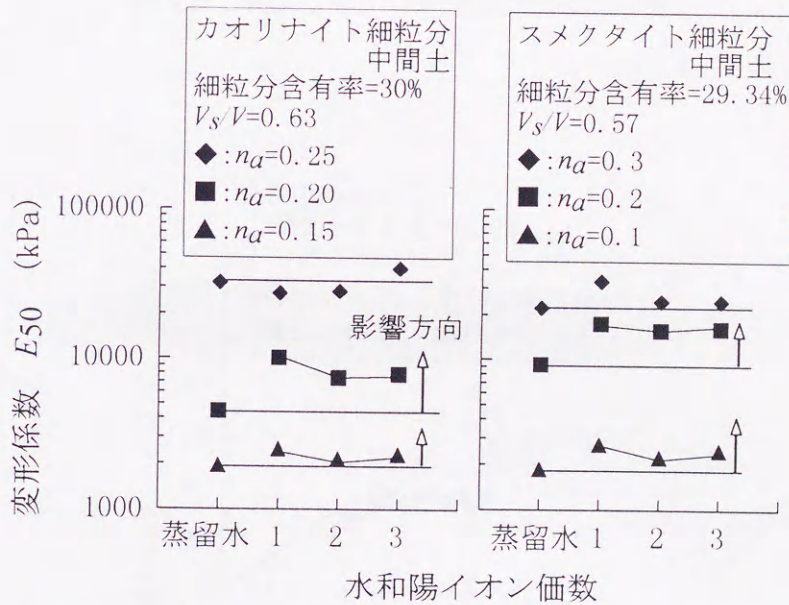


図-4.20 変形係数への電解質水溶液の影響
（カオリナイトおよびスメクタイト細粒分中間土）

達に伴ってマトリックスポテンシャルのサクションに対する液体表面張力の影響度が増すことが原因と考えられる。また、非塑性細粒分では水溶液(A)で一定の変形係数に収束しているが、これは液体表面張力と土粒子の体積率の2つが、変形係数を決定する支配的な因子であることを示している。

図-4.19の非塑性細粒分では、水和陽イオン価数に応じて変形係数が増加する傾向がある。前述の図-4.16の一軸圧縮強さに対する傾向と逆であり、その原因が非DLVO力であるか否かは特定できない。よって、例えばイオン相関引力等の何らかの電磁的粒子間力によって、

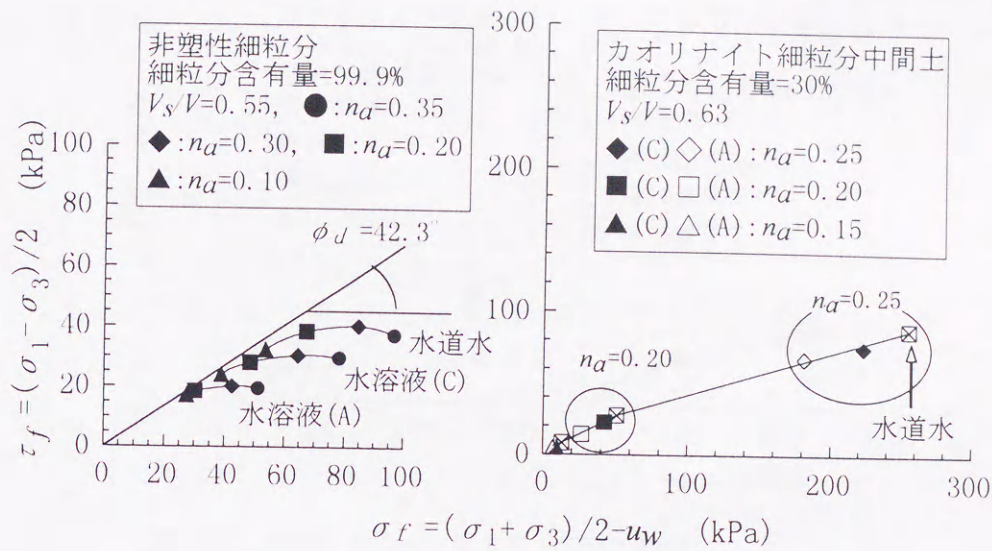


図-4.21 破壊応力点への活性剤水溶液の影響

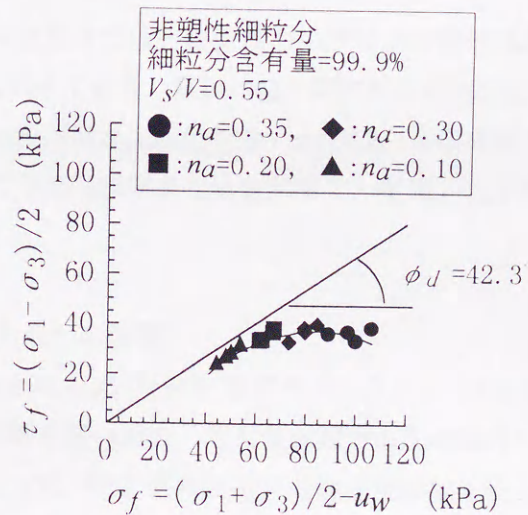


図-4.22 破壊応力点への電解質水溶液の影響（非塑性細粒分）

水和陽イオンは力学的特性をそのイオン価数に応じて硬化させると考察する。

図-4.20のカオリナイトおよびスメクタイト細粒分中間土は、図-4.14の初期サクションや図-4.17の一軸圧縮強さと同様に、特定の空気間隙率で変形係数に影響を与えている。非DLVO力や付着力の影響の有無については、図-4.13、図-4.16および図-4.19の非塑性細粒分のような関係がみられず考察できない。

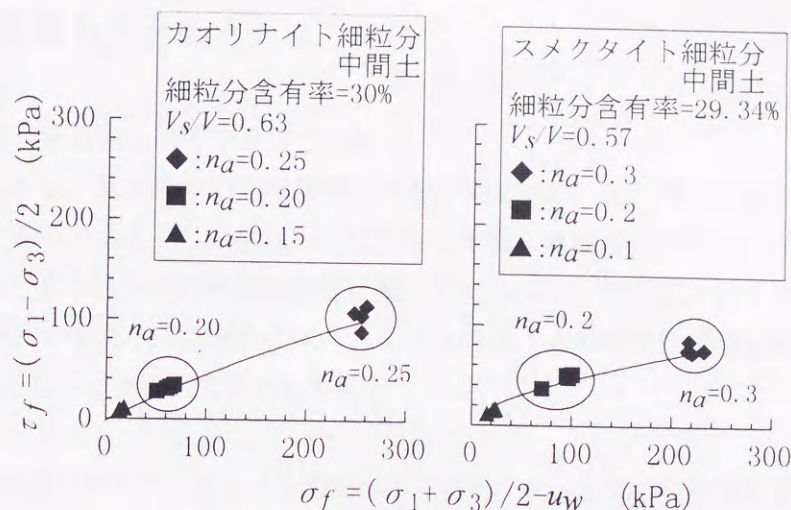


図-4.23 破壊応力点への電解質水溶液の影響
(カオリナイトおよびスメクタイト細粒分中間土)

以上から、表面電荷密度または比表面積の小さい土の変形係数は、液体表面張力と土粒子の体積率が支配的な因子であり、電磁的粒子間力が力学的特性を硬化させる場合がある。表面電荷密度または比表面積が比較的大きい土では、表面電荷密度または比表面積等の土質組成に応じた特定の空気間隙率または飽和度で、電磁的粒子間力は変形係数に顕著な影響を与えると結論できる。

4. 4. 5 破壊応力点への影響

いわゆるBishopの有効応力式^{25), 26)}のパラメーター χ を1とした破壊応力点について、活性剤水溶液添加の影響を図-4.21に、電解質水溶液添加の場合を図-4.22および図-4.23に示す。非塑性細粒分には文献¹⁶⁾の飽和状態での破壊包絡線を記入してある。図-4.21の非塑性細粒分は、液体表面張力減少に応じて非排水せん断強度および破壊時全直応力の低下がみられる。それぞれの間隙水で空気間隙率低下に伴って破壊包絡線に接近する挙動を示し、最大の非排水せん断強度を有する。カオリナイト細粒分中間土も同様な傾向を示している。

図-4.22の非塑性細粒分は、異なる水和陽イオンの同じ空気間隙率の塊が、空気間隙率低下に応じて破壊包絡線に接近する。図-4.23のカオリナイトおよびスメクタイト細粒分中間土も同じ傾向で、空気間隙率の影響は明白であるが、水和陽イオンの影響はみられない。

以上から、表面電荷密度または比表面積の小さい土の非排水せん断強度および破壊時全直応力は、液体表面張力と比例的な関係にあり、空気間隙率が高いほど、その影響度は増すと結論する。

4. 5 本章のまとめ

本章で得られた結論は以下の通りである。

以下の結論から、第3章の3.3節で提案した粒子間力式は、粒子間力の特徴を表す式として、概念的に妥当である²⁷⁾。なお、同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる供試体の実験結果を比較しているため、粒子間力の大きさは近似的にサクシジョンの値で代表され、実験に用いた土の表面は、その物理化学的性質から、負電荷に帯電している部分が支配的であると考えられる。

- 1) 理論的に浸透ポテンシャルによる力が作用する約100nm以下の粒子表面間距離で、マトリックスポテンシャルとそれ以外の浸透ポテンシャル等の電磁的粒子間力との相互作用が存在することを実験的に確認した。
- 2) 従来はDLVO理論によって、土中の陽イオン濃度の変化から説明されてきた液性限界および塑性指数の挙動は、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルの粒子間力およびそれ以外の浸透ポテンシャル等の電磁的粒子間力の作用からも説明できることを示した。
- 3) 表面電荷密度または比表面積の小さい土では、空気間隙率が大きいほどマトリックスポテンシャルのサクシジョンは大きくなり、液体表面張力の影響度は増す。電磁的粒子間力がマトリックスポテンシャルのサクシジョンへ与える影響は、表面電荷密度または比表面積が大きいほど顕著に表れるが、表面電荷密度または比表面積等の土質組成に応じた特定の空気間隙率または飽和度で、増加にも減少にもなる。
- 4) 表面電荷密度または比表面積の小さい土の一軸圧縮強さは、マトリックスポテンシャルのサクシジョンが大きくなるほど増加し、空気間隙率が増すほど液体表面張力の影響度が増し、最大の一軸圧縮強さを与えるサクシジョン値が存在する。粒子表面間距離が電気二重層以下では、非DLVO力の水和反発力によって水和陽イオン価数に反比例的に一軸圧縮強さが低下することがある。表面電荷密度または比表面積が比較的大きい土では、表面電荷密度または比表面積等の土質組成に応じた特定の空気間隙率または飽和度で、電磁的粒子間力は一軸圧縮強さに顕著な影響を与える。
- 5) 表面電荷密度または比表面積の小さい土の変形係数は、液体表面張力と土粒子の体積率が支配的な因子であり、電磁的粒子間力が力学的特性を硬化させる場合がある。表面電荷密度または比表面積が比較的大きい土では、表面電荷密度または比表面積等の土質組成に応じた特定の空気間隙率または飽和度で、電磁的粒子間力の変形係数に顕著な影響を与える。
- 6) 表面電荷密度または比表面積の小さい土の非排水せん断強度および破壊時全直応力は、液体表面張力と比例的な関係にあり、空気間隙率が高いほどその影響度は増す。

参考文献

- 1) J.N.イスラエルアチヴィリ (近藤 保, 大島広行訳) : 分子間力と表面力, 第二版, 朝倉書店, pp.205-325, 1997.
- 2) Adamson, A.W.:Physical chemistry of surfaces, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, 1976.
- 3) Lambe,T.W.:A Mechanistic picture of shear strength in clay, Conf.of shear strength soils, Colorado, pp.503-532, 1960.
- 4) Sridharan, A., Narashima Rao, S. and Venkatappa Rao, G.:Shear strength characteristic of saturated montmorillonite and kaolinite clays, Soils and Foundations, Vol.11, No.3, pp.1-22, 1971.
- 5) Kohgo, Y., Nakano, M., Miyazaki, T.:Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils, Soils and Foundations, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 6) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一: 非イオン性界面活性剤による表面張力低下の不飽和土の締固めに与える影響, 土木学会論文集, No.582/Ⅲ-41, pp.265-274, 1997.
- 7) 社)地盤工学会編: 改正地盤工学会基準・同解説, pp.10-25, 1996.
- 8) 鬼塚克忠, 南里 勝: 生石灰とポゾラン材料添加による建設発生土(有明粘土)の強度発現特性, 土木学会論文集, No.547/Ⅲ-36, pp.97-106, 1996.
- 9) 社)日本化学会編: 土の化学, pp.50-109, 1993.
- 10) 大坪政美, 高山昌照, 江頭和彦: 低膨潤性スメクタイト質海成粘土の練返し強さに及ぼす塩濃度,陽イオン種の影響, 土質工学会論文報告集, Vol.27, No.2, pp.85-92, 1987.
- 11) 三浦哲彦, 赤峰剛徳, 下山正一: 有明粘土層の堆積環境とその鋭敏性について, 土木学会論文集, No.541/Ⅲ-35, pp.119-131, 1996.
- 12) 黒田六郎, 澁川雅美訳: イオン交換—理論と応用への手引き—, 丸善, pp.14-21, 1981.
- 13) 小野 周: 表面張力, 共立出版, pp.17-85, 1980.
- 14) 渡辺信淳, 渡辺 昌, 玉井康勝: 表面および界面, 共立出版, pp.1-40, 1973.
- 15) 軽部大蔵, 加藤正司, 勝山潤一: 不飽和カオリンの有効応力と力学定数, 土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-5, pp.179-188, 1986.
- 16) 地盤工学会不飽和地盤の安定性に関する研究委員会編: 不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.23-58, 1992.
- 17) 飯竹重夫: 関東ロームのコンシステンシー特性について, 土木学会論文報告集, 第277号, pp.85-93, 1978.
- 18) Egashira, K. and Ohtsubo,M.:Swelling and mimeralogy of smectites in paddy soils derived from marine alluvium, Geoderma, Vol.29, pp.119-127, 1983.
- 19) 北原文雄, 玉井康勝, 早野茂夫, 原 一郎: 界面活性剤—物性・応用・化学生態学—, 講談社, pp.221-297, 1989.

- 20) Lambe, T.W.:The structure of compacted clay, Proc.of ASCE, Vol.84, No.SM2, pp.1-34, 1958.
- 21) Pietsch, W., Rumpf, H.:Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln, Chemie Ingenieur Technik, No.39, pp.885-893, 1967.
- 22) Horn,R.G., Smith, D.T. and Haller, W.:Surface forces and viscosity of water measured between silica sheets, Chemical Physics Letters, Vol.162, No.4.5, pp.404-408, 1989.
- 23) Pashley, R.M.:Hydration forces between mica surfaces in electrolyte solutions, Advances in Colloid and Interface Science, 16, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, pp.57-62, 1982.
- 24) Pashley, R.M. and Israelachvili, J.N.:DLVO and Hydration forces between mica surfaces in Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} and Ba^{2+} chloride solutions, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.97, No.2, pp.446-455, 1984.
- 25) Bishop, A.W.:The measurement of pore pressure in the triaxial test, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.38-46, 1960.
- 26) Aitchison, G.D.:Relationship of moisture stress and effective stress function in unsaturated soils, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.47-52, 1960.
- 27) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一:非塑性の細粒分を含む土の締固め法, 土木学会論文集. (掲載決定)

第5章 粒子間力制御法の提案

概要：界面活性剤による粒子間力の制御法を提案し、最も安定した制御効果が期待できる界面活性剤の種類を土粒子表面への吸着モデルから考察し、土構造物の設計・施工において重要な土質特性^{1), 2), 3)}に対する界面活性剤添加の影響から、その考察を検証する。また、提案した粒子間力制御法で締固めた場合と通常の締固めのそれとを比較し、第1章の1.1節および第2章の2.2節等で示したCoulombの摩擦法則から導いた土の締固め現象に関する考察を実験的に検証し、提案した粒子間力制御法の考え方の確かさを明らかにする。

5. 1 制御法の提案

5. 1. 1 最適な粒子間力の制御法

第3章の3.3節で考察し、第4章で検証したように、浸透ポテンシャル等による電磁的粒子間力は、粒子表面間距離がその理論的な影響範囲（約100nm）以下で有効で、その制御はイオン交換で可能である⁴⁾。しかしながら第2章の2.5節等で示したように、自然界の土の組成は堆積環境で大きく異なり、浸透ポテンシャルを決定する土中のイオンは、土に固有な分配係数で固相と液相に分配され、さらに、例えば第4章の4.4節の図-4.14、図-4.17および図-4.20等の実験結果等からも、安定した制御は困難であることが明らかとなった。

それに比してマトリックスポテンシャルによる粒子間力は、理論的に粒子表面間距離が電磁的粒子間力の影響範囲（約100nm）以下では、例えば第4章の4.3節の図-4.9のように、浸透ポテンシャルの影響を受けるものの、それ以上の表面間距離や表面電荷または比表面積が小さい土では、例えば第4章の4.4節の図-4.12、図-4.15、図-4.18および図-4.21に示すように、液体表面張力によって制御することができる。

以上から、本研究の主な研究対象とする土が、非塑性～低塑性の表面電荷または比表面積が比較的小さい、相対的にマトリックスポテンシャルによる粒子間力が大きな^{5), 6), 7)}不飽和土であることから、界面活性剤（以下、活性剤と記す）水溶液による液体表面張力減少によるマトリックスポテンシャルの粒子間力の制御が最適であると結論できる。

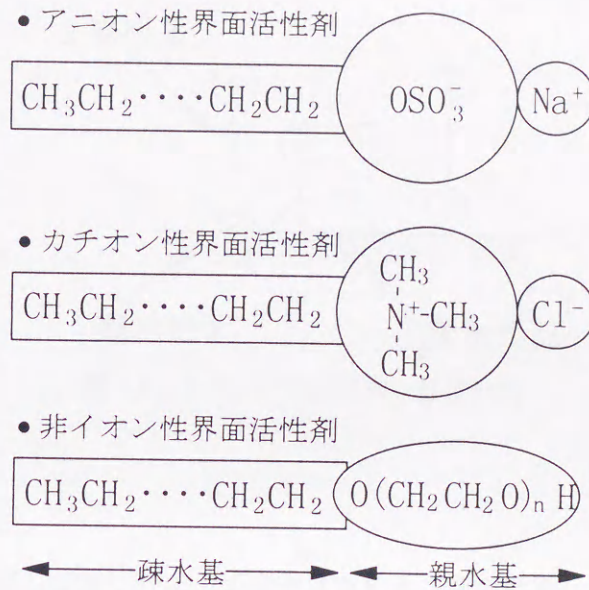


図-5.1 代表的な活性剤の構造モデル

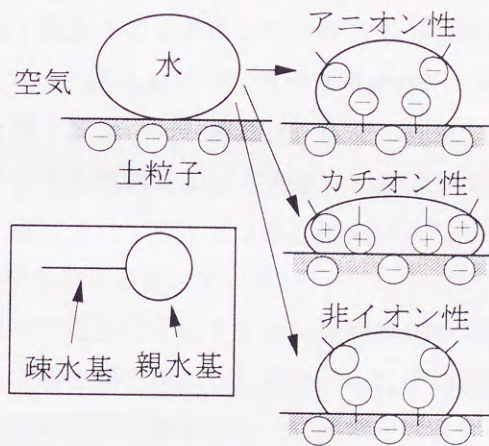


図-5.2 負電荷に帯電した土粒子表面への活性剤水溶液の吸着モデル

5. 1. 2 界面活性剤の化学構造と土への吸着現象

図-5.1に代表的な活性剤の構造モデルを示す⁸⁾。図-5.1に示すように、アニオン性（陰性）活性剤およびカチオン性（陽性）活性剤は親水基に電荷を有しており、土粒子の表面電荷の影響を受ける。本研究では上記以外の両性イオン活性剤等については検討していない。

一般的な表層土を構成する負電荷に帯電した土粒子表面⁹⁾への吸着モデルを図-5.2に示す。カチオン性活性剤は親水基が吸着し土粒子表面の疎水性を高め、アニオン性活性剤と非イオン性活性剤は、疎水基が吸着し親水性を高めることができる。アロフェン等の鉱物

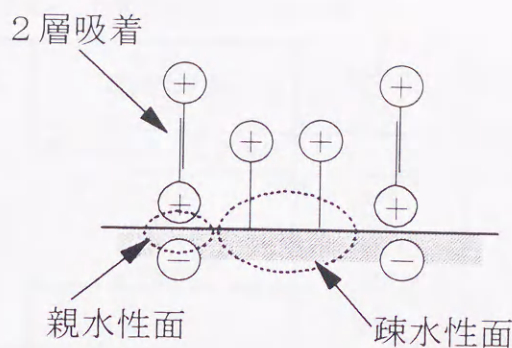


図-5.3 カチオン性活性剤の吸着形態

の表面は正電荷に荷電しており⁹⁾、その場合はカチオン性活性剤とアニオン性活性剤の吸着は逆となるが、親水基に電荷を有しない非イオン性活性剤は、そのような表面電荷の影響を受けない。また、親水性固体の土粒子でも必ず疎水性面も存在するが、疎水性面は電荷を有しないために、そこには電荷を有しない活性剤の疎水基が吸着する。例えば、図-5.3に負電荷に帯電した土粒子表面へのカチオン性活性剤の吸着形態⁹⁾を示す。さらに、活性剤濃度が飽和吸着量以上では、図-5.3に示す2層吸着現象が生じることもある。

このように活性剤の土粒子表面への吸着には、表面の性質や電荷が大きく影響し、イオン性界面活性剤（アニオン性活性剤およびカチオン性活性剤を示す）の吸着速度や吸着力は、土粒子の表面電荷で決定され、非イオン性活性剤は土粒子表面の親水性および疎水性等の性質が支配的な影響を与えるとされている^{10), 11)}。

よって、負電荷に荷電された土粒子にカチオン性活性剤を添加した場合や、正電荷に荷電した土粒子にアニオン性活性剤を添加した場合、土粒子の固体-液体界面へ活性剤成分が優先的に吸着し、特に表面電荷密度または比表面積が大きい場合は、土中水の液体表面張力を臨界ミセル濃度付近まで低下させるに高い濃度が必要となる。また、高い濃度の活性剤を添加した土の個々の土粒子表面間の距離が約100nm以下に接近した場合は、例えば第4章の4.3節の図-4.9で考察したように、土粒子表面間とバルク相の間のイオン濃度差で、浸透ポテンシャルによる粒子間力を発生する可能性もある。非イオン性活性剤の場合のこのような固体-液体界面へ活性剤成分が優先的に吸着する現象は、疎水性面を多く有する有機物等が多量に混在する土に添加した場合に生じるとされている。

以上の土粒子表面への活性剤の吸着作用に関する考察から、有機物含有量が少ない土の場合には、土粒子の表面電荷の影響を受けない非イオン性活性剤が、安定した吸着作用を示すことは明らかである。よって、提案した液体表面張力減少によるマトリックスポテンシャルの粒子間力制御法では、非イオン性活性剤添加による方法が最も安定した制御効果が期待できると結論できる。

表-5.1 土質材料の工学的性質 その1¹⁾²⁾³⁾

土質材料分類	シルト (低液性限界) (ML)	粘性土 [Cs]	粘性土まじり礫質砂 (#SG-Cs)
産出(名称)等	豊橋技術科学大学構内	DLクレイ	名古屋市内工事現場
細粒分含有率(%)	73.9	100	6.9
粘土分含有率(%)	10	9.5	—
シルト分含有率(%)	63.9	90.4	6.9
砂分含有率(%)	26.1	0.1	53.9(礫分39.2%)
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.670	2.650	2.750
液性限界 w_L (%)	32.8	NP	NP
塑性限界 w_p (%)	27.1	NP	NP
均等係数 U_c	11.2	3.5	18.2
曲率係数 U_c'	1.03	1.8	1.14

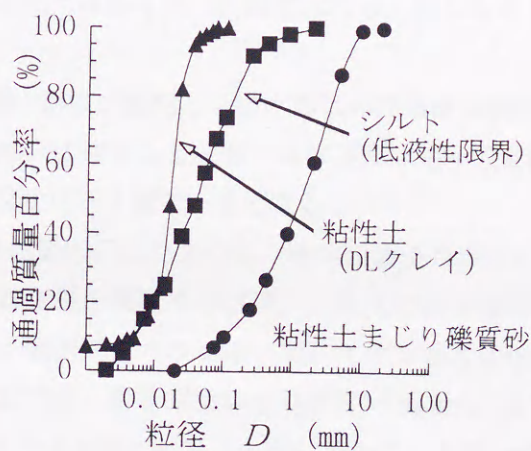


図-5.4 粒径加積曲線

5. 2 設計・施工の上で重要な土質特性に対する活性剤の影響

土構造物の設計・施工において重要な土質特性¹⁾²⁾³⁾に対する界面活性剤添加の影響を実験的に検証し、5.1節で示した「活性剤のなかでも非イオン性活性剤が最も安定した粒子間力制御効果を期待できる」という考察を検証する。なお、本章において粒子間力と記述する場合は、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルによる粒子間力を示す。

5. 2. 1 土質材料および活性剤の性質

実験に用いた土質材料は、表-5.1に示すシルト（低液性限界）、粘性土および粘性土まじ

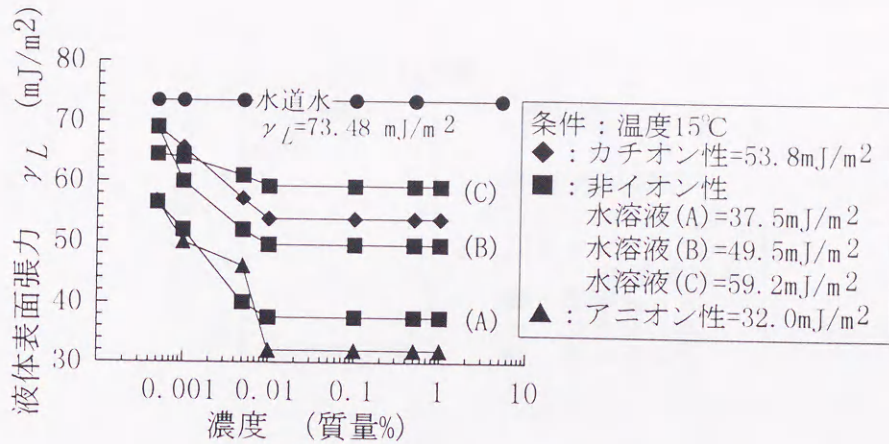


図-5.5 活性剤水溶液の濃度と液体表面張力の関係

り礫質砂である¹²⁾。粘性土は第4章の非塑性細粒分と同じものである。図-5.4に粒径加積曲線を示す。

図-5.5に用いた活性剤水溶液の濃度と自由水面における液体表面張力の関係を示す。一定の濃度（臨界ミセル濃度）に達すると液体-気体界面は飽和吸着状態⁸⁾となり、自由水面の液体表面張力の値は図中に示す値で一定となる。

第4章の4.1節および4.3節で示したように、液体表面張力減少によるマトリックスポテンシャルの粒子間力の制御効果を検証するには、土中水の液体表面張力が一定となる臨界ミセル濃度以上で、土粒子表面間とバルク相の間にイオン濃度差が生じないという条件を満たす必要がある。本章では、第4章で活性剤濃度0.5質量%以上で条件を満たすことを確認した粘性土とそれよりも粒度が粗い土を用いるので、濃度0.5質量%で実験を行った。

5. 2. 2 実験結果の考察

5. 2. 2. 1 液性限界，塑性指数への影響

空気乾燥法で調整したシルト（低液性限界）を用いた¹³⁾。塑性図を図-5.6に示す。蒸留水に代えて活性剤水溶液で加水すると塑性指数、液性限界は低下する。カチオン性活性剤は液体表面張力の値が相対的に大きいにもかかわらず低下量が大きく、アニオン性活性剤は液体表面張力は最も低い最大の低下量ではない。

この結果について、カチオン性活性剤は土粒子界面の負電荷に親水基が吸着し、固体表面の疎水性を高め、付着仕事は低下し接触角が大きくなる。液体表面張力との相乗効果で、土粒子間の粒子間力が効率的に増加（粒子間力自体は減少）したと考える。アニオン性活性剤は土粒子の負電荷に反発し疎水基が吸着し、固体表面の親水性が高まり接触角は小さくなる。さらに土粒子界面の負電荷と同じ極性であるために電荷ロスが生じ、液体表面張力の大きさに比べて相対的な粒子間力の増加量は大きくないと考察できる。

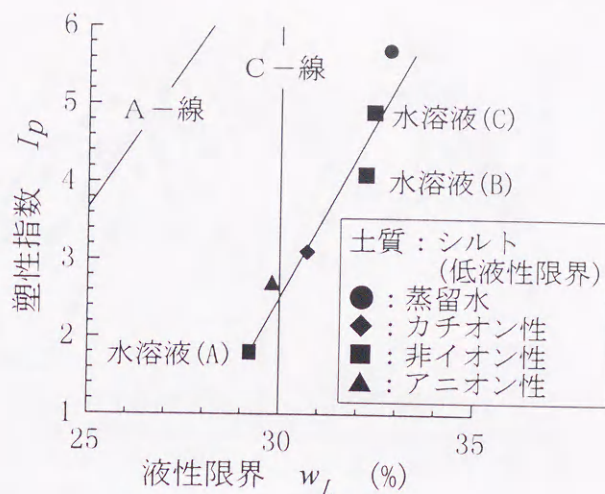


図-5.6 塑性図

同様に、非イオン性活性剤は土粒子表面の電荷に関わりなく疎水基が吸着し、固体表面の親水性を高め、液体表面張力の値に応じて粒子間力が増加したと考察する。

このように粒子間力は塑性指数、液性限界と反比例的な関係にあることを示すことができる。液体表面張力の減少および固体-液体間の接触角の変化の相互作用によって増加した粒子間力に応じて、塑性指数、液性限界が低下したという考察は、三浦ら¹⁴⁾の示した海成粘土の陽イオン濃度減少による溶脱現象が同様な傾向を示し、その原因がDLVO理論から説明される静電的な反発力の増加として説明されることから裏付けられる。これについては、第4章の4.4.1項でも同様の考察を行った。

以上から、非イオン性活性剤は他のイオン性活性剤に比べて、その液体表面張力の値に応じた安定した作用を液性限界および塑性指数に与えると結論できる。

5. 2. 2. 2 締固め性への影響

図-5.7に標準プロクターの $E_c=5.6 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ の締固め仕事量での突固めによる締固め試験(A-b法)の結果を示す¹³⁾。活性剤水溶液を添加すると、水道水の場合に比べて最適含水比は低下し、最大乾燥密度は増加し、低い含水比ほど高い乾燥密度が得られる。

粘性土まじり礫質砂の最適含水比の値は、液性限界および塑性限界と同じ順序で低下し、シルト(低液性限界)の場合は、活性剤のイオン性に関わらず、図-5.5の液体表面張力の値と比例的な関係にある。また、粘性土まじり礫質砂の最大乾燥密度は、土粒子表面が負に荷電していると仮定した場合の活性剤の吸着力の大きさの順序、すなわち、カチオン性活性剤>非イオン性活性剤>アニオン性活性剤に従って高くなる傾向であるが、シルト(低液性限界)の実験結果は異なっている。以上の実験結果には実験誤差の存在も考えられるが、有泉ら¹⁵⁾の示したとおり、土の種類、活性剤のイオン性および液体表面張力に起因

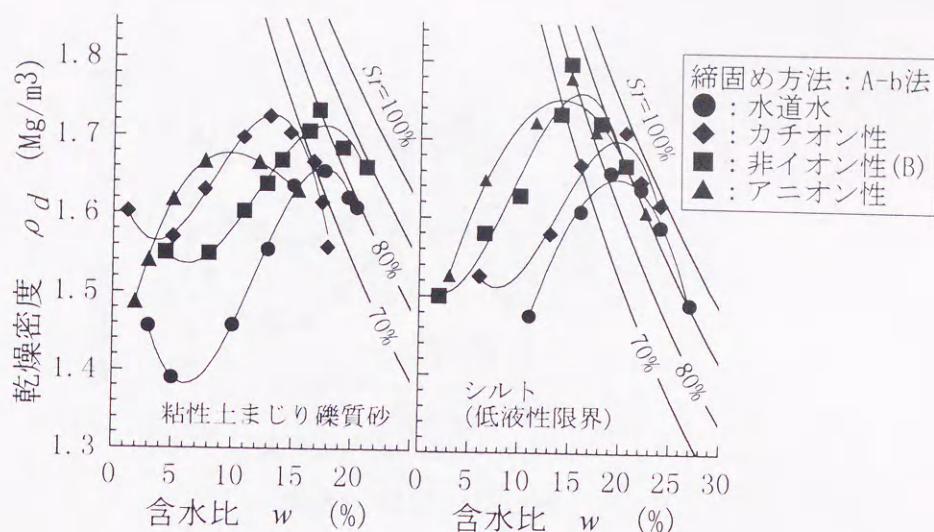


図-5.7 締固め試験結果 その1

した複雑な相互作用が存在し、イオン性活性剤の締固めに対する制御効果は土質で異なる可能性が高いと考察できる。

また、粘性土まじり礫質砂はシルト（低液性限界）に比べ、活性剤による粒子間力制御効果、すなわち乾燥密度の増加量が少ない傾向にある。この理由は、締固め過程において粒径が大きな粘性土まじり礫質砂では、土粒子接点で互に加圧し、第3章の3.1.2項で示した接触面積を広げ、さらに比表面積が小さいために液体架橋による粒子間力自体も相対的に大きくない。それに比べ、粒径の小さいシルト（低液性限界）は、土粒子に直接的に作用する締固め力は少なく、主に土粒子間の粒子間力に作用し、比表面積が大きいため粒子間力自体も相対的に大きいことが原因と考察できる¹⁶⁾。よって、活性剤での粒子間力制御による締固め密度の増加は、液体架橋による粒子間力自体が大きい、粒径の小さい土がより効果的と考えられる¹⁷⁾。

非イオン性活性剤水溶液を添加した粘性土（DLクレイ）の3種類の締固め仕事量による試験結果を図-5.8、図-5.9および図-5.10に示す。図-5.8の水道水は、最適含水比よりも乾燥側で締固め仕事量の影響が大きく、図-5.9および図-5.10の非イオン性活性剤を添加した場合は、締固め仕事量が多いほど乾燥密度は高く、最適含水比は低く分布する。

同じ締固め仕事量で水道水を添加した場合と水溶液の場合を比較すると、液体表面張力の値が低い方が最適含水比は低くなる。また、異なる締固め仕事量のそれぞれの締固め曲線は、含水比が高くなるにともなって互いに接近する傾向にある。この理由は、粒子間力自体が大きな低い含水比領域では、活性剤水溶液添加での液体表面張力減少による粒子間力自体の減少量が大きく影響し、活性剤水溶液によって減少した粒子間力自体に比例する摩擦力と締固め力との力関係から、締固め密度は高くなる。また、粒子間力自体が小さい

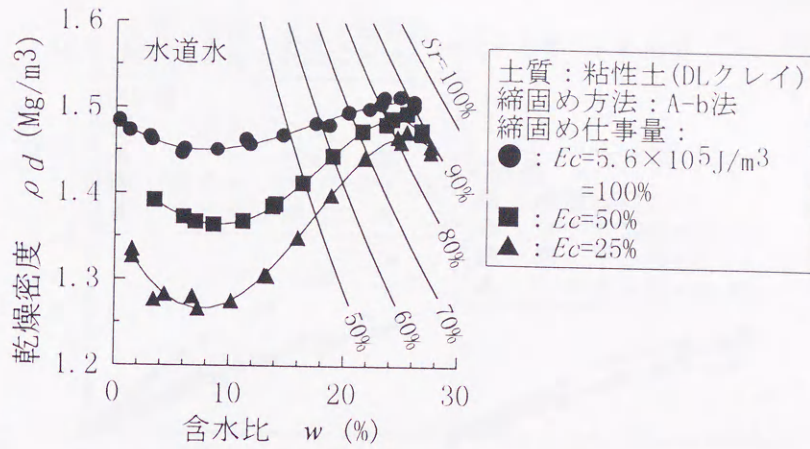


図-5.8 締固め試験結果 その2

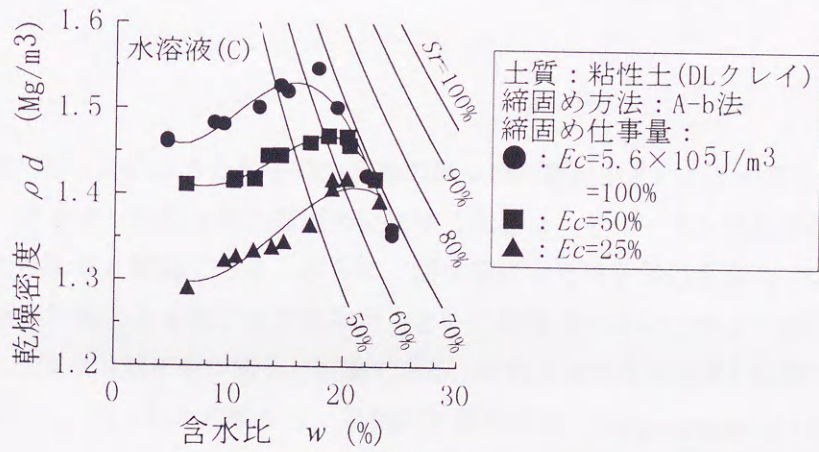


図-5.9 締固め試験結果 その3

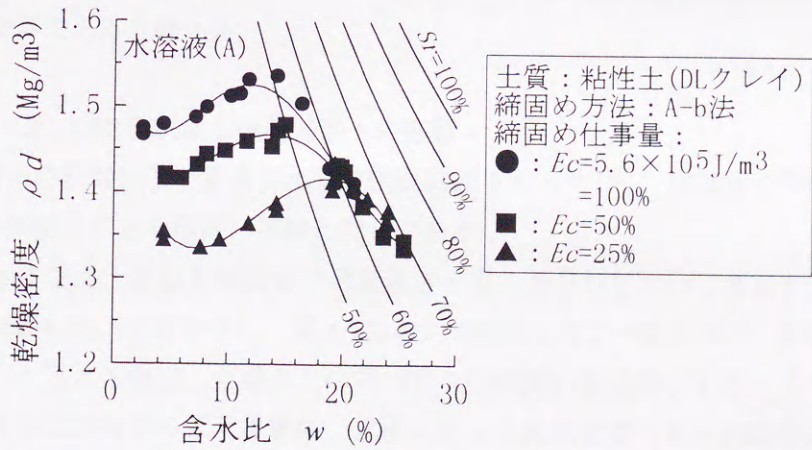


図-5.10 締固め試験結果 その4

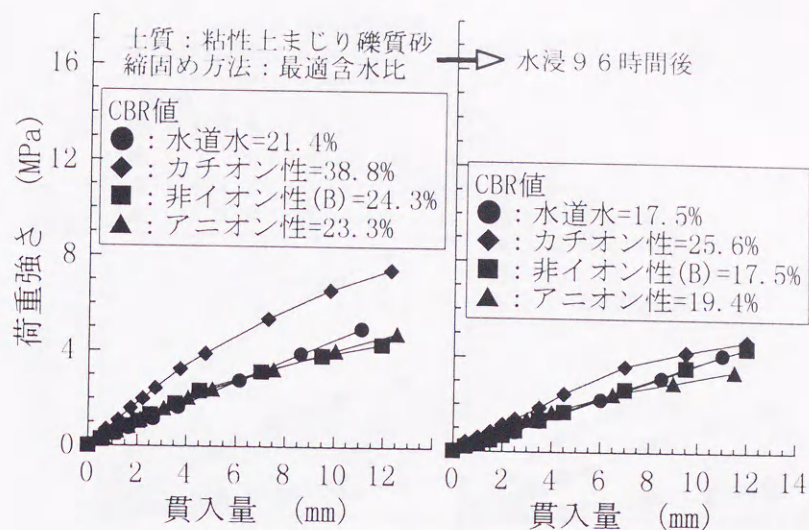


図-5.11 荷重強さ-貫入量曲線（粘性土まじり礫質砂）

高含水比領域では、このような粒子間力自体の減少の影響が小さいことが原因と考察する。

以上から、非イオン性活性剤の縮固めに対する影響は、他のイオン性活性剤に比べて安定した作用を与えると結論できる。さらに、活性剤による粒子間力制御法での縮固め密度の増加は、液体架橋による粒子間力自体が大きい、粒径の小さい土がより効果的で、有効な上限の含水比または飽和度があると結論できる。その上限の含水比または飽和度の値は、第2章の2.2節および2.3節の考察から、過渡的不飽和状態（Fuzzy saturation）と封入不飽和状態（Insular air saturation）の境界の空気侵入値と考えられ、図-2.4の収縮定数試験¹³⁾の第1段階収縮過程と第2段階収縮過程の境界値に相当する。また、同様にその下限の含水比または飽和度の値は、乾燥による体積変化限界である第2段階収縮過程と第3段階収縮過程の境界の収縮限界であると考えられる。

5. 2. 2. 3 CBR値による強度特性への影響

図-5.7の縮固め試験結果の最適含水比でCBR試験を行った¹³⁾。供試体の作製方法は、前述の5.2.2.2の突固めによる縮固め試験と同じである。

図-5.11に示す粘性土まじり礫質砂の荷重強さ-貫入量曲線について考察すると、カチオン性活性剤が最大のCBR値を示し、図-5.7の最大の乾燥密度と一致するが、水浸96時間後は他の活性剤や水道水を添加した場合との相対的なCBR値の差は縮小する。このカチオン性活性剤の水浸後のCBR値の低下現象は、水浸によって変化する何らかの因子の存在を示唆している。

次に図-5.12のシルト（低液性限界）の最適含水比での荷重強さ-貫入量曲線では、図-5.7

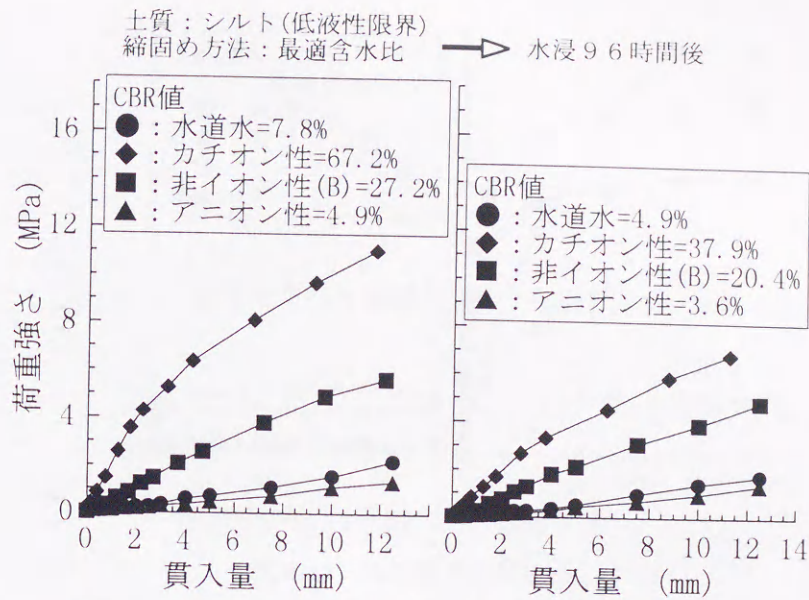


図-5.12 荷重強さ-貫入量曲線 (シルト (低液性限界))

で高い乾燥密度を示したアニオン性活性剤のCBR値が最も小さい。両図ともにカチオン性活性剤を添加した場合において、最大のCBR値が得られており、この結果は、従来の貫入抵抗から密度を予測する方法の妥当性を否定し、CBR値を決定する因子として密度以外の何かが存在することを示している。

以上の結果を考察すると、活性剤水溶液で締固めた土の粒子間力自体は、液体表面張力の低下によって既に水道水より減少しており、水浸による物理的な粒子間力の変動量は、水道水で締固めた場合よりも減少していること、さらに、シルト(低液性限界)ではカチオン性活性剤とアニオン性活性剤が、両極端のCBR値を示すこと等から、土粒子表面が負に荷電していると仮定した場合のカチオン性活性剤>非イオン性(B)活性剤>アニオン性活性剤の順で大きい土粒子表面への親水基の吸着力と密度が相互に影響して、CBR値を変化させたと考察することができる。

すなわち、活性剤成分の吸着力の差で土粒子表面の活性剤濃度に差が生じ、DLVO理論で説明される静電的な反発力の減少量に差が生じて、最適含水比でのCBR値を変化させ、さらにそれが水浸によって大きく変化するのは、水道水中の水とイオンの吸着によるイオン交換の影響を受けたためと考察する。

また、粘性土まじり礫質砂とシルト(低液性限界)のCBR値に対する活性剤の影響の違いは、比表面積の大きさに起因した粒子間力自体の大きさや活性剤の吸着量の違いが反映された結果と考察する。

これらの考察は、非イオン性(B)活性剤や水道水の場合のCBR値の水浸による変動が、他

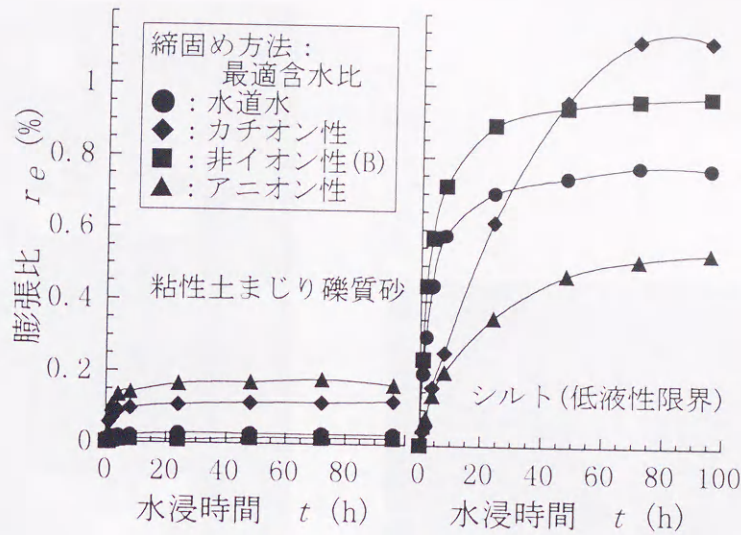


図-5.13 吸水膨張試験結果

の活性剤に比べて相対的に小さいことや、次の5.2.2.4の吸水膨張特性への影響からも理解できる。また、例えばFrydmanら¹⁸⁾によると、 K^+ イオンで処理した粘性土は最大乾燥密度や最適含水比は大きく変化しないが、特異吸着によってCBR値は増加することも吸着力の影響を示すものであり、前述の考察を裏付けるものである。

以上から、非イオン性活性剤は他のイオン性活性剤に比べて、CBR試験による強度特性に対して、安定した作用を示すと結論できる。

5. 2. 2. 4 吸水膨張特性への影響

図-5.13に吸水膨張試験結果を示す¹³⁾。この結果は、先の5.2.2.3のCBR試験における最適含水比で作製した供試体を水浸させて得られたものである。

図-5.13の右図のシルト（低液性限界）において、非イオン性(B)活性剤および水道水は初期膨張が大きく早期に安定するが、カチオン性およびアニオン性活性剤は相対的に膨張継続時間が長いことがわかる。CBR値は増大するが密度は高くないカチオン性活性剤は膨張が大きく、逆のアニオン性活性剤は小さい結果となった。

この結果について、活性剤水溶液で締固めた土の粒子間力自体は、液体表面張力の低下によって水道水より減少しており、水浸による物理的な粒子間力の変動量は、水道水で締固めた場合よりも減少している。よって、イオン性活性剤で締固めた試料は、水道水に含まれるイオンによるイオン交換反応によって吸着力の変化が生じ、非イオン性(B)活性剤と水道水は液量の増加による粒子間力自体の変化のみが生じることが、両者の結果が異なる原因と考える。

このことは、図-5.13の左図の粘性土まじり礫質砂において、イオン性活性剤で締固めた

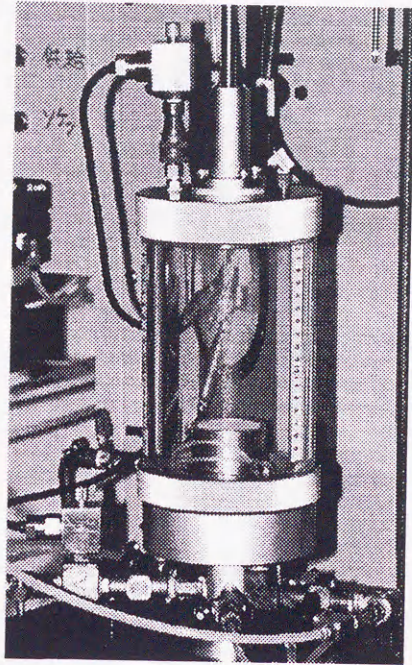


写真-5.1 三軸圧力室を用いた土の保水性試験の様子

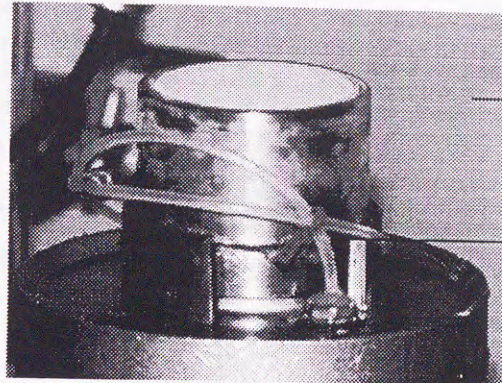


写真-5.2 土の保水性試験の供試体設置状況

試料の膨張比が、水道水や非イオン性(B)活性剤の場合よりも大きいことから理解できる。また、粘性土まじり礫質砂とシルト（低液性限界）の吸水膨張量の違いは、比表面積の大きさに起因したものとする。

以上から、非イオン性活性剤は他のイオン性活性剤に比べて、吸水膨張特性に対して安定した作用を示すと結論できる。

5. 2. 2. 5 土の保水性への影響

土の保水性試験^{13)、19)}は、第4章の図-4.5に示す不飽和三軸圧縮試験用の圧力室を用いて行った。供試体寸法は直径50mm高さ30mm、黄銅製モールドに含水比10%の調整試料を入れ、落下高さ100mm質量1kgのコンパクターを用いて、近似的に等しい乾燥密度になるように動的に締固めて作製した。

作製した供試体の飽和作業は、モールドをペDESTALに設置し、体積の膨張および収縮が生じないように、軸変位の計測によって鉛直圧を20kPa～40kPaに変えた体積一定条件下で²⁰⁾、供試体下面からセラミックディスクを介して、供試体頂部に対して0.1～0.5kPaのバックプレッシャーで脱気水または非イオン性活性剤水溶液を吸水させることで行った。ここではイオン性活性剤を用いた試験は行っていない。この飽和作業中の供試体からの排

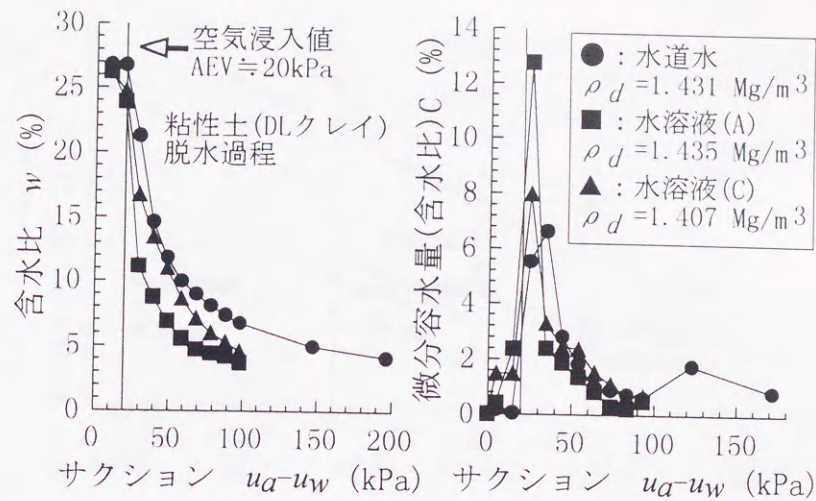


図-5.14 土の保水性試験結果

水は、供試体上部に撥水性ポリフロンフィルターを介して接続ホースを三軸圧力室内で解放したアクリル製キャップを取り付けることで遮断している。

ビューレットで計測される吸水量から、飽和度が約100%に達したことを確認した後に、供試体上部の撥水性ポリフロンフィルターおよびアクリル製キャップを取り外し、所定の空気圧（セル圧）を作用させて、脱水過程の加圧版法¹⁹⁾でサクシオンを測定した。なお、第4章の図-4.6のセラミックディスクの通気試験結果から、サクシオンの測定限界は水道水の場合200kPa、水溶液(A)の場合は100kPaとしている。

写真-5.1に不飽和三軸圧縮試験用の圧力室を用いた試験の様子を示す。写真-5.2は供試体上部の撥水性ポリフロンフィルターおよびアクリル製キャップを取り外し、所定の空気圧（セル圧）を作用させている供試体の様子である。

図-5.14に試験結果を示す。左側に水分特性曲線、右側にそれを擬微分した水分分布曲線を示す²¹⁾。図-5.14の左側の水分特性曲線から、同一含水比におけるサクシオンの値は、水道水>水溶液(C)>水溶液(A)の順序で低下する液体表面張力の値に応じて小さくなり、非イオン性活性剤水溶液を吸水飽和させた場合は、水道水のそれよりも粒子間力が増加していることがわかる。同様に右側の水分分布曲線から、空気侵入値付近の微分含水量は、水道水>水溶液(C)>水溶液(A)の順序で低下する液体表面張力の値が低いほど大きく、さらにサクシオンが大きくなると水分分布曲線は接近し、両者の差は縮小する。この結果から、液体表面張力の減少は、軽部ら²²⁾の示したバルク水の保水力の低下に大きな影響を与え、乾燥が進むにつれてその影響は徐々に低下すると考察できる。

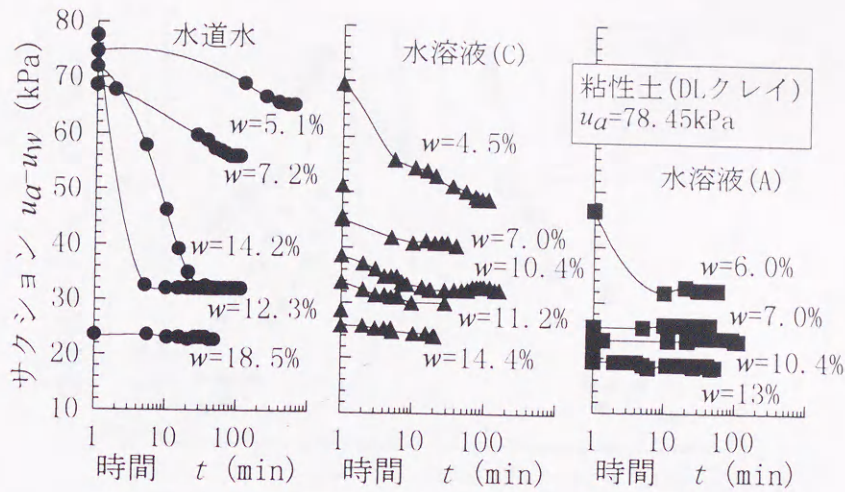


図-5.15 初期サクションの測定に要する時間

5.3 締固め現象の検証

提案した非イオン性活性剤水溶液添加による粒子間力制御法で締固めた場合と、通常の水道水で締固めた場合の結果を比較し、第1章の1.1節および第2章の2.2節等で示したCoulombの摩擦法則から導いた土の締固め現象に関する考察を、実験的に検証し、提案した粒子間力制御法の考え方の確かさを明らかにする。

5.3.1 実験方法

試料は表-5.1および図-5.4の粘性土である。活性剤水溶液の濃度は、0.5質量%で使用した。

第4章の図-4.5に試験に用いた不飽和三軸圧縮試験用の圧力室を示す。不飽和一軸圧縮試験の供試体寸法は直径50mm高さ100mm、供試体を容易に押し出すために鏡面仕上げした2つ割モールドを用い、それぞれのモールドに含水比調整済みの土を5層に分けて均等に入れ、5.2.2項の土の保水性試験で用いたコンパクターによって、標準プロクター相当の $E_c = 5.6 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ の締固め仕事量で動的に締固めて作製した。なお、空気乾燥した土質試料に、水道水または水溶液を加水する際には、噴霧器を使用して水滴を細かくし、各層の締固めを行う前に、土を全断面ピストンで軽く押さえている²³⁾。

間隙水圧の測定は水道水で脱気飽和を行ったセラミックディスクが埋め込まれたペDESTALを通じて行い、間隙空気圧は上部キャップに接続したホースを三軸圧力室内で解放し、ポラスストーンを埋め込んだ上部キャップ下の撥水性ポリフロンフィルターを通じて供給した。圧縮試験の試験手順は不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験²⁴⁾に従い、せん断試験時のひずみ速度は0.05%/min、間隙空気圧はバック・エア・プレッシャーとして78.45kPa

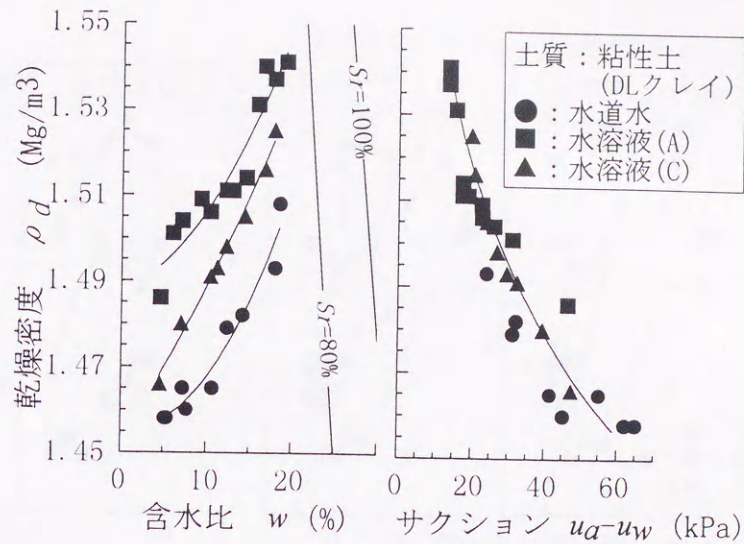


図-5.16 締固め密度と含水比および初期サクシヨンの関係

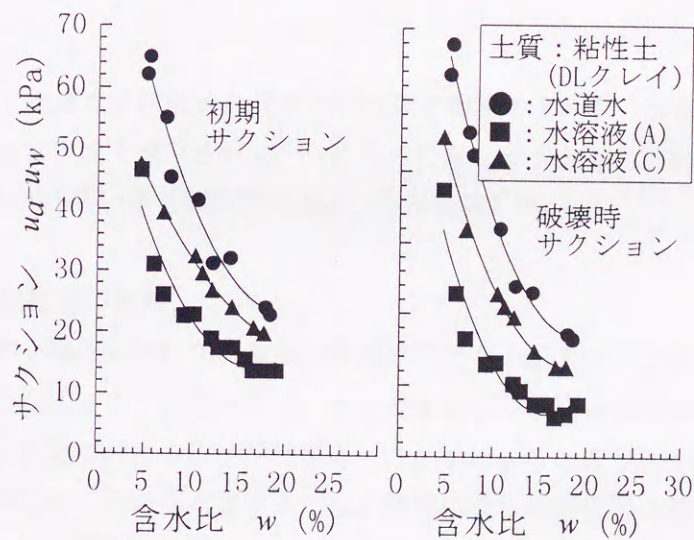


図-5.17 初期および破壊時サクシヨンと含水比の関係

を与え、間隙水圧が正值となるようにしている。他の条件は第4章の4.2.3項と同じである。

図-5.15は供試体を三軸圧力室内に設置し、間隙空気圧78.45kPaを作用させた直後からのサクシヨンの時間変化を示したものである。図-5.15に示される供試体のサクシヨンが安定した時の値を初期サクシヨンと呼び、この安定を確認した後に軸圧縮過程に移行することになる。

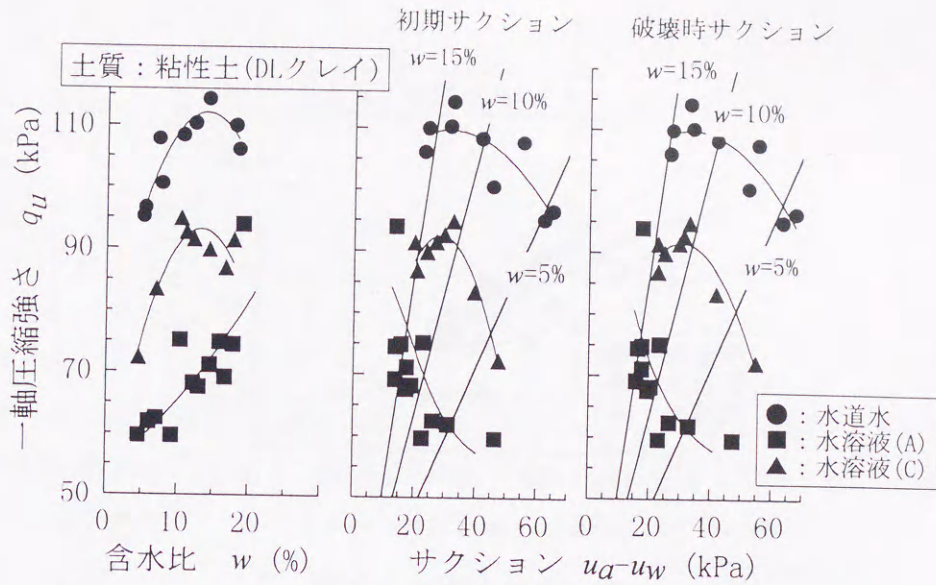


図-5.18 一軸圧縮強さと含水比、初期および破壊時サクションの関係

図-5.15において水道水で締固めた場合と活性剤水溶液のそれを、含水比に近いもので比較すると、従来は含水比で決定される²⁵⁾とされてきたサクションが安定するに要する時間は、サクションが小さいほど短時間であることが判明した。

5. 3. 2 実験結果の考察

図-5.16に不飽和一軸圧縮試験の供試体の乾燥密度と含水比および初期サクションの関係を示す。図-5.16の左図から、締固めに用いた水道水および水溶液の液体表面張力の値が小さいほど、同一含水比における乾燥密度が高いことがわかる。さらに、図-5.16の右図に示されるように、締固めに用いた水道水または水溶液の液体表面張力の値は異なるにも関わらず、サクションと乾燥密度は同一ライン付近に分布し、反比例的な関係にあることがわかった。この結果は、サクションが粒子間力を代表する物理量であると考えれば、締固め密度は粒子間力に反比例する摩擦力と締固め力との平衡によって決定されるとしたCoulombの摩擦法則から導いた締固め現象に関する考察を、実験的に証明するものである。

図-5.17に初期サクションおよび破壊時サクションと含水比の関係を示す。破壊時サクションとは最大一軸圧縮強さにおけるサクションの値である。図-5.17に示すように同一含水比における初期および破壊時サクションは、締固めに用いた水溶液の液体表面張力が低いほど小さく、図-5.14と同様に液体表面張力減少による粒子間力の増加効果が表れている。

図-5.18に一軸圧縮強さと含水比および初期および破壊時サクションの関係を示す。同一の含水比またはサクションにおける圧縮強さは、締固めに用いた水溶液の液体表面張力の

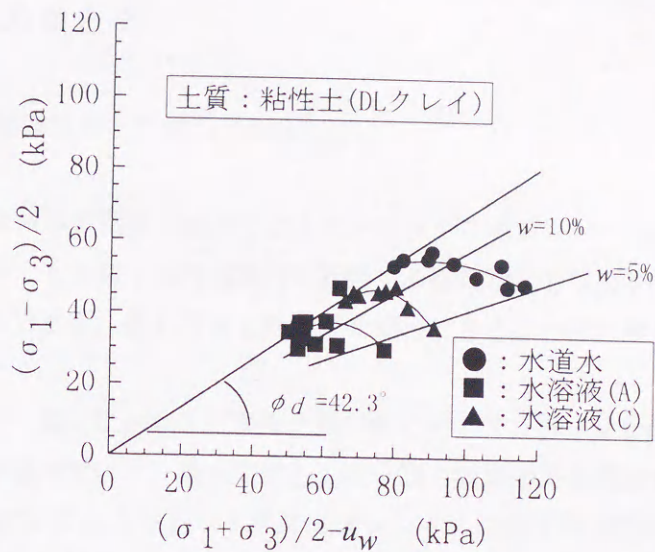


図-5.19 破壊応力点の分布

値が小さいほど低下し、それぞれの曲線では含水比の増加またはサクシジョンの減少に応じて圧縮強さは強まり、ピークが存在することがわかる。

図-5.19に参考文献²²⁾の飽和状態の破壊包絡線と、いわゆるBishopの有効応力式^{26) .27)}のパラメーター χ を1と仮定した破壊応力点を示す。締固めに用いた水道水または水溶液の液体表面張力の値が低いほど、非排水せん断強度および破壊時全直応力の低下がみられる。それぞれの液体表面張力の値が異なる間隙水ごとに破壊応力点を近似した曲線は、空気間隙率低下に伴って破壊包絡線に接近する挙動を示し、パラメーター χ が1に接近する傾向が示され、最大の非排水せん断強度を生じる破壊時全直応力の存在を確認できる。

以上から、液体表面張力の減少に応じて、マトリックスポテンシャルであるサクシジョンおよび一軸圧縮強さは低下し、相対的に締固め密度が増加することを確認し、さらに第1章の1.1節および第2章の2.2節等で示したCoulombの摩擦法則から導いた土の締固め現象に関する考察を実験的に証明し、提案した粒子間力制御法の考え方の確かさを明らかにすることができた。

5. 4 本章のまとめ

本章で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 界面活性剤での液体表面張力減少によるマトリックスポテンシャルの粒子間力制御法を提案し、その中でも土粒子の表面電荷に起因する複雑な吸着作用を発生しない非イオン性活性剤による方法が、最も安定した効果を期待できることを土粒子表面への吸着モデルから示した。
- 2) 土構造物の設計・施工において重要な土質特性に対して、非イオン性活性剤は土粒子の表面電荷等の影響を受けず、最も安定した粒子間力制御効果を発揮することを確認した。
- 3) 液体表面張力減少によるマトリックスポテンシャルの粒子間力制御法には、有効な上限および下限の含水比または飽和度があり、その上限の値は土の空気侵入値、下限の値は収縮限界である考えを示した。
- 4) 締固め現象の実験的検証において、液体表面張力の減少に応じて、マトリックスポテンシャルであるサクションおよび一軸圧縮強さは低下し、相対的に締固め密度が増加することを確認し、締固め密度は反発方向を正值とする粒子間力に反比例する摩擦力（粒子間力自体には比例する）と締固め力との平衡によって決定されるとした、Coulombの摩擦法則から導いた締固め現象に関する考察を実験的に証明し、提案した粒子間力制御法の考え方の確かさを明らかにした。

参考文献

- 1) 社)日本道路協会編：道路土工要綱，丸善，pp.26-348，1997.
- 2) 土質工学ハンドブック改訂編集委員会編：土質工学ハンドブック，地盤工学会，pp.809-1303，1982.
- 3) 土の締固めと管理編集委員会編：土の締固めと管理，地盤工学会，pp.281-343，1991.
- 4) 松尾新一郎，富田武満：斜面安定に及ぼすイオン交換の影響，材料，第19巻，第205号，pp.53-58，1970.
- 5) 土壌物理研究会編：土の物理学，森北出版，pp.36-71およびpp.211-225，1979.
- 6) 森 麟，齊藤一郎：液分の性状にもとづく土の締固めの研究，土と基礎，Vol.18，No.2，pp.37-45，1970.
- 7) Adamson, A.W.:Physical Chemistry of Surfaces, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, pp.61-63 and pp.339-363, 1976.
- 8) 新納 格，正田要一，蔣 建群，栗林栄一：非イオン性界面活性剤による表面張力低下の不飽和土の締固めに与える影響，土木学会論文集，No.582/Ⅲ-41，pp.265-274，1997.
- 9) 社)日本化学会編：土の化学，pp.50-109，1993.
- 10) 例えば，丸井智敬，村田逞詮，井上雅雄，桜田 司：表面と界面の不思議，工業調査会，pp.192-211，1995.
- 11) 例えば，渡辺信淳，渡辺 昌，玉井康勝：表面および界面，共立出版，pp.122-133，1973.
- 12) 社)地盤工学会編：改正地盤工学会基準・同解説，pp.10-25，1996.
- 13) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説，地盤工学会，1990.
- 14) 三浦哲彦，赤峰剛徳，下山正一：有明粘土層の堆積環境とその鋭敏性について，土木学会論文集，No.541/Ⅲ-35，pp.119-131，1996.
- 15) 有泉 昌，牧隆 正，和田茂治：有機物処理による粘土の性質の改変に関する研究，土木研究所報告，第116号，pp.53-77，1963.
- 16) 久保輝一郎，神保元二，水渡英二，高橋 浩，早川宗八郎：粉体 理論と応用，改訂二版，丸善，pp.324-332，1979.
- 17) 大北康治，中沢重一：不飽和土の締固め機構について，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.141-148，1987.
- 18) Frydman, S., Ravina, I., Ehrenreich, T.:Stabilization of heavy clay with potassium choride, Geotechnical Eng., Vol.8, pp.95-108, 1977.
- 19) 例えば，Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.:Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley and Sons, pp.64-106, 1993.
- 20) 亀井健史，榎本雅夫：土の粒度の違いが締固めた土のコラプス沈下量に及ぼす影響，土木学会論文集，No.535/Ⅲ-34，pp.65-72，1996.

- 21) 土壤物理性測定法委員会編：土壤物理性測定法，養賢堂，pp.157-159，1975.
- 22) 軽部大蔵，加藤正司，浜田耕一，本田道識：不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について，土木学会論文集，No.535/Ⅲ-34，pp.83-92，1996.
- 23) 軽部大蔵，加藤正司，勝山潤一：不飽和カオリンの有効応力と力学定数，土木学会論文集，第370号/Ⅲ-5，pp.179-188，1986.
- 24) 地盤工学会不飽和地盤の安定性に関する研究委員会編：不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.23-58，1992.
- 25) 北村良介，城本一義，名倉照彦，堀之内毅：不飽和土の力学特性に関する一考察，不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.71-78，1992.
- 26) Bishop, A.W.:The measurement of pore pressure in the triaxial test, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.38-46, 1960.
- 27) Aitchison, G.D.:Relationship of moisture stress and effective stress function in unsaturated soils, Proc. of Conf. pore pressure and suction in soils, pp.47-52, 1960.

第6章 一般的な表層土に対する 制御効果の検証

概要：有機物を含まない一般的な表層土の粒度を網羅する土を、非塑性の砂質土～粘性土および低塑性の砂質土～粘土の2つに分けて、2種類の細粒分と中砂を混合して作製する。この作製した中間土を用いて、細粒分含有率や液体表面張力および締固め仕事量の影響について、提案した粒子間力制御法で締固めた場合と通常の締固めのそれとを比較して考察し、提案した粒子間力制御法による締固め効果を検証する。

6. 1 検証の目的と実験方法

第1章から第5章までに得られた成果から、粒子間力と締固め密度の関係に関するものを整理し、本章の目的と実験方法について述べる。

6. 1. 1 目的

第1章の1.1節および第2章の2.2節等で考察したように、締固め過程において密度がある程度増加した段階では、せん断変形破壊によって密度が高まるとすれば、式(6.1)のCoulombの摩擦法則から¹⁾、せん断応力 τ_f とその抵抗力である摩擦力 $\sigma_f \tan \phi$ および見掛けの粘着力 c との力関係によって土粒子が再配列され、平衡状態で締固め密度が決定する²⁾。

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi = c + \mu_f \sigma_f \quad (6.1)$$

ここに、 τ_f ：破壊面上の破壊時のせん断応力、 c ：見掛けの粘着力

ϕ ：内部摩擦角、 $\tan \phi = \mu_f$ ：摩擦係数、

σ_f ：破壊面上の破壊時全直応力、 $\sigma_f \tan \phi$ ：摩擦力

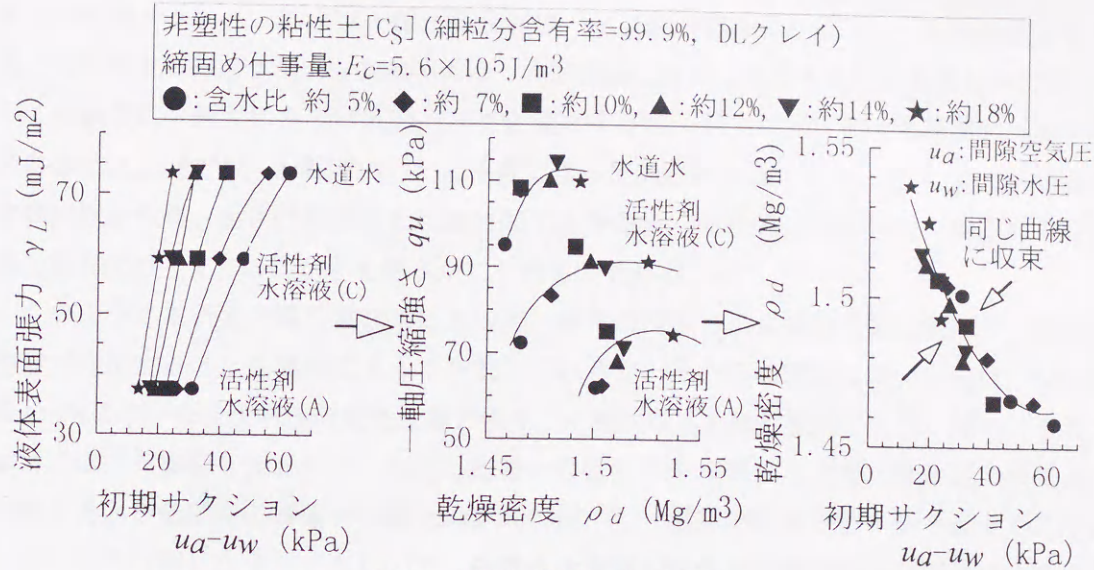


図-6.1 締固め現象の検証結果

このことから、土粒子の形状が影響する摩擦係数³⁾以外の破壊面上の破壊時全直応力、すなわち不飽和土では、土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力の制御によって、締固め密度を増加させることが可能となる。

この考察について、第3章の理論的考察の3.3節において粒子間力を式(6.2)で定義し⁴⁾、第4章において、この式は概念的に粒子間力の特性を表すものとして妥当である判定した。

$$F_A(x) = a_1 F_{MS} + a_2 F_{OSM}(x) \quad (6.2)$$

ここに、 $F_A(x)$: 新納の粒子間力, x : 粒子表面間距離

F_{MS} : 粒子接触を含むマトリックスポテンシャルによる粒子間力

$F_{OSM}(x)$: 浸透ポテンシャルによる粒子間力

a_1, a_2 : 土粒子組成, 表面電荷と性質, 水和イオン, 飽和度等で異なる係数

さらに第5章では、式(6.2)の粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルによる粒子間力 F_{MS} の、非イオン性界面活性剤（以下、活性剤と記す）を用いた液体表面張力減少による制御法が、最も安定した制御効果を期待できることを示し⁴⁾、提案した粒子間力制御法で締固めた場合と通常の締固めのそれとを比較している。

図-6.1に第5章の5.3節で得られた実験結果の一部を整理して示す。図-6.1から、活性剤水溶液の液体表面張力減少による粒子間力増加（粒子間力自体は減少）効果によって、締固

め土の初期サクシオンおよび一軸圧縮強さは、水道水の場合より低下し、乾燥密度と粒子間力を代表する初期サクシオンの関係は、同じ曲線上付近に収束することを明らかにした。

この結果は、締固め密度は反発方向を正值とする粒子間力に反比例する摩擦力（粒子間力自体には比例する）と締固め力との平衡によって決定されるとした、式(6.1)のCoulombの摩擦法則から導き出された締固め現象に関する考察を、実験的に証明し⁵⁾、提案した粒子間力制御法の考え方の確かさを明らかにしたものである。

このように本研究の第5章までにおいて、液体表面張力による粒子間力制御で、締固め密度が増加することを実験によって証明しているが、それらの実験に用いた土は、シルト分90.4%の均一な粒度特性の粘性土等であり、一般的な土とは粒度的にも言い難い。そこで本章では、有機物を含まない一般的な表層土の粒度⁶⁾を網羅する土を、非塑性の砂質土～粘性土および低塑性の砂質土～粘土の2つに分けて、2種類の細粒分と中砂を混合して作製した。この作製した中間土を用いて、細粒分含有率や液体表面張力および締固め仕事量の影響について、提案した粒子間力制御法で締固めた場合と通常の締固めのそれとを比較して考察し、提案した粒子間力制御法による締固め効果を検証することを目的としている⁴⁾。

6. 1. 2 実験方法

6. 1. 2. 1 土質材料および活性剤の性質

中間土の作製に使用した基本土質材料は、第4章の表-4.1に示したものである。図-6.2、表-6.1および表-6.2に作製した中間土の粒径加積曲線および工学的性質を示す⁷⁾。図-6.2の非塑性細粒分中間土の細粒分含有率99.9%、カオリナイト細粒分中間土の細粒分含有率100%および粗粒分は、作製に用いた基本土質材料の粒度分布である。

中間土は中砂を粗粒分とし、細粒分として、表面電荷密度の極小さい非塑性細粒分と表示する粘性土およびカオリナイト細粒分と表示する粘土（低液性限界）を混合して作製した。作製した非塑性細粒分中間土は、非塑性の砂質土～粘性土に相当する粒度となり、同様にカオリナイト細粒分中間土は、低塑性の砂質土～粘土に相当する粒度となる。これらの2つの中間土は、有機物を含まない一般的な表層土の粒度⁸⁾を網羅している。

図-6.3に活性剤の水溶液濃度と自由水面での液体表面張力値の関係を示す。液体-気体間の界面が臨界ミセル濃度に達すると飽和吸着状態となり、自由水面の液体表面張力は図中に示す値で一定となる。

第4章の4.1.2項および4.3節で示したように、液体表面張力減少による粒子間力制御効果を検証するには、土中水の液体表面張力が一定となる臨界ミセル濃度以上で、かつ土粒子表面間とバルク相の間にイオン濃度差が生じていないという条件を満足する活性剤水溶液濃度で実験を行う必要がある。本章では、細粒分に非塑性の粘性土（DLクレイ）を用いた非塑性中間土は、第4章の4.3節において、この細粒分が条件を満足することを確認した濃度の0.5質量%、同様にカオリナイト細粒分中間土は第4章の4.3節において、細粒分含有率

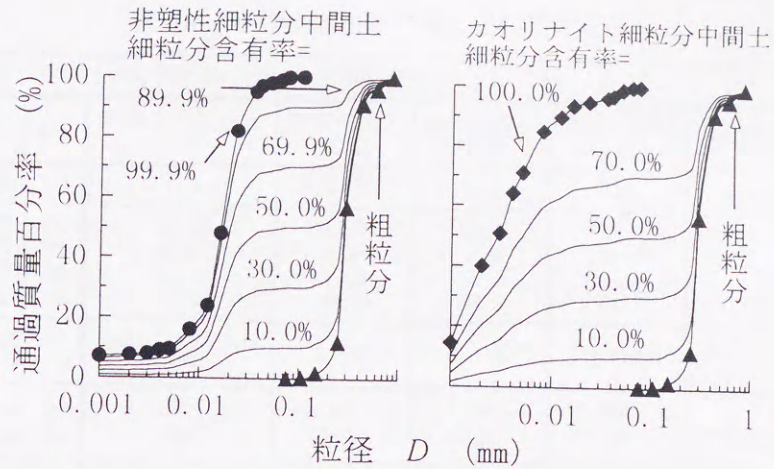


図-6.2 粒径加積曲線

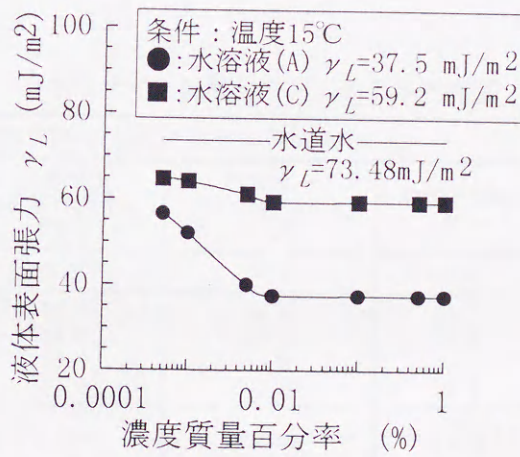


図-6.3 活性剤水溶液濃度と液体表面張力の関係

30%で条件を近似的に満足することを確認した2.0質量%の濃度で実験を行った。

6. 1. 2. 2 供試体作製と実験の方法

供試体は直径50mm高さ100mm、鏡面仕上げの2つ割モールドを用い、モールドに含水比調整済みの土を5層に分けて均等に入れ、落下高さ100mm質量1kgの第5章の5.2.2項の土の保水性試験で用いたコンパクターで、標準プロクター相当の締固め仕事量である $E_c=5.6 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ およびその半分の $2.8 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ で動的に締固めて作製した。なお、均一な供試体を得るために、加水する水滴を細かくし、各層の締固めを行う前には、土を全断面ピストンで軽く押さえている⁸⁾。供試体は2日間恒温室に静置した後に不飽和一軸圧縮試験を行った。

第4章の図-4.5に用いた不飽和三軸圧縮試験用の圧力室を示す。間隙水圧の測定は脱気飽

表-6.1 非塑性細粒分中間土の工学的性質

非塑性細粒分中間土(混合割合=粗粒分:非塑性細粒分)					
土質材料分類	砂まじり粘性土 (C _s -S)	砂質粘性土 (C _s S)	砂質粘性土 (C _s S)	粘性土質砂 (S _c S)	粘性土まじり砂 (S-C _s)
混合割合	1:9	3:7	5:5	7:3	9:1
細粒分含有率(%)	89.9	69.9	50.0	30.0	10.0
粘土分含有率(%)	8.6	6.7	4.8	2.9	1.0
シルト分含有率(%)	81.4	63.3	45.2	27.1	9.0
砂分含有率(%)	10.1	30.1	50.0	70.0	90.0
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.651	2.653	2.655	2.657	2.659
液性限界 w_L (%)	NP	NP	NP	NP	NP
塑性限界 w_p (%)	NP	NP	NP	NP	NP
均等係数 U_c	3.5	3.6	26.0	20.7	4.0
曲率係数 U_c'	1.9	1.3	0.1	1.4	3.2

表-6.2 カオリナイト細粒分中間土の工学的性質 その2

カオリナイト細粒分中間土(混合割合=粗粒分:カオリナイト細粒分)				
土質材料分類	砂質粘土 (低液性限界) (CLS)	砂質粘土 (低液性限界) (CLS)	粘性土質砂 (S _c S)	粘性土まじり砂 (S-C _s)
混合割合	3:7	5:5	7:3	9:1
細粒分含有率(%)	70.0	50.0	30.0	10.0
粘土分含有率(%)	49.6	35.4	21.3	7.1
シルト分含有率(%)	20.4	14.6	8.7	2.9
砂分含有率(%)	30.0	50.0	70.0	90.0
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.694	2.684	2.674	2.665
液性限界 w_L (%)	31.6	22.8	NP	NP
塑性限界 w_p (%)	14.6	11.3	NP	NP
均等係数 U_c	—	—	—	4.0
曲率係数 U_c'	—	—	—	3.2

和したセラミックディスクが埋め込まれたペダスタルを通じて行い、間隙空気圧は上部キャップに接続したホースを三軸圧力室内で解放し、ポーラスストーンを埋め込んだ上部キャップ下の撥水性ポリフロンフィルターを通じて供給した。供試体の体積変化は側方変位計および載荷ピストンの軸変位計から求められる。

圧縮試験の試験手順は不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験⁹⁾に従い、せん断試験時のひずみ速度は0.05%/min、間隙空気圧はバック・エア・プレッシャーとして78.45~215.7kPaの範囲で変え、間隙水圧を正值としている。三軸室内は水で満たしていない。他の条件等は第4章の4.2.3項と同じである。

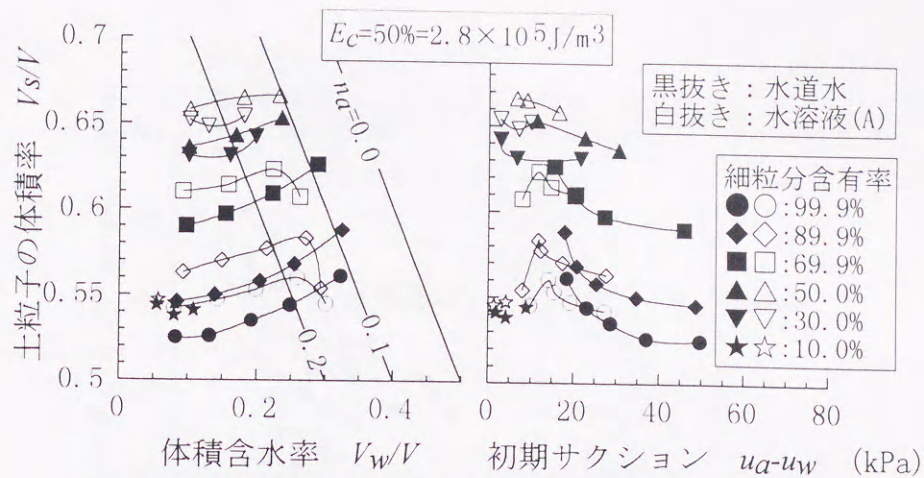


図-6.4 体積率表示の締固め特性 その1 (非塑性細粒分中間土)

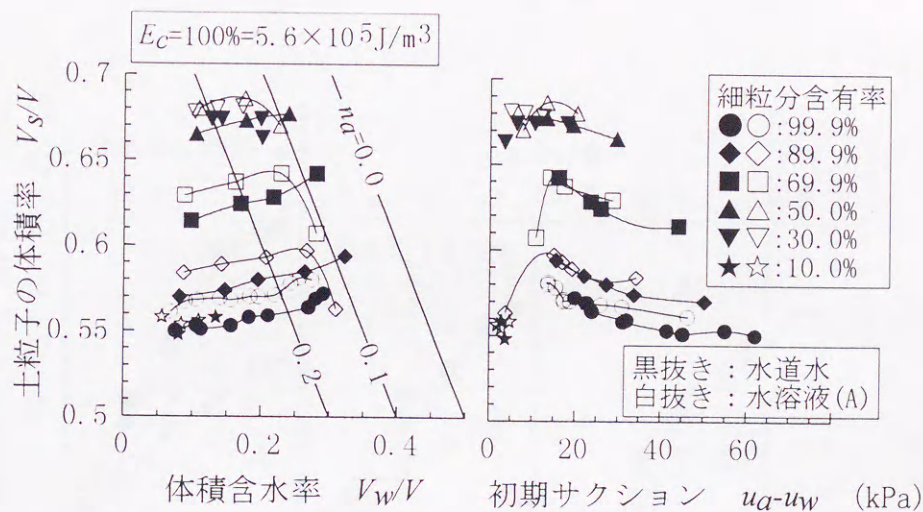


図-6.5 体積率表示の締固め特性 その2 (非塑性細粒分中間土)

6. 2 非塑性の砂質土～粘性土に対する制御効果

6. 2. 1 細粒分含有率の影響

図-6.4および図-6.5の左側に非塑性細粒分中間土の体積率表示による締固め曲線、右側に初期サクシヨンの関係を示す。なお、供試体を三軸圧力室内に設置して間隙空気圧を作用させ、計測されるサクシヨンが安定した時の値を初期サクシヨンと呼ぶ。

締固め仕事量の異なる図-6.4および図-6.5の左側において、それぞれの細粒分含有率30%

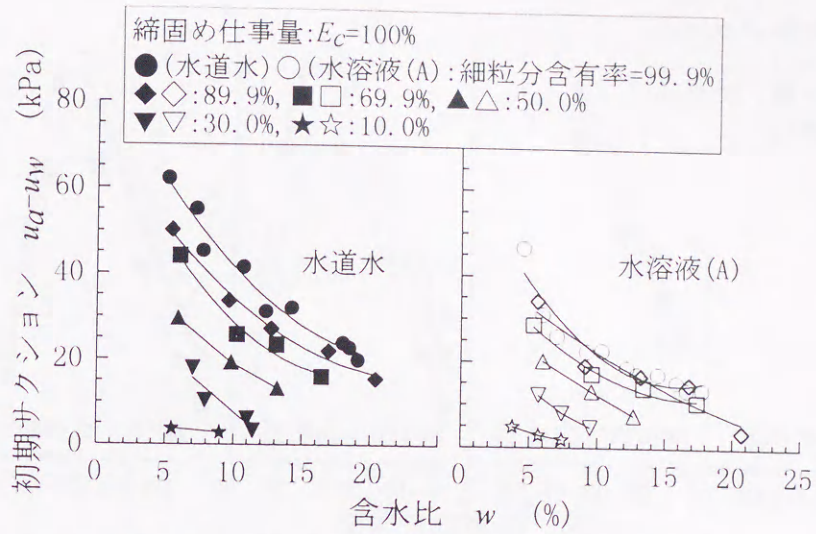


図-6.6 初期サククションと含水比の関係 (非塑性細粒分中間土)

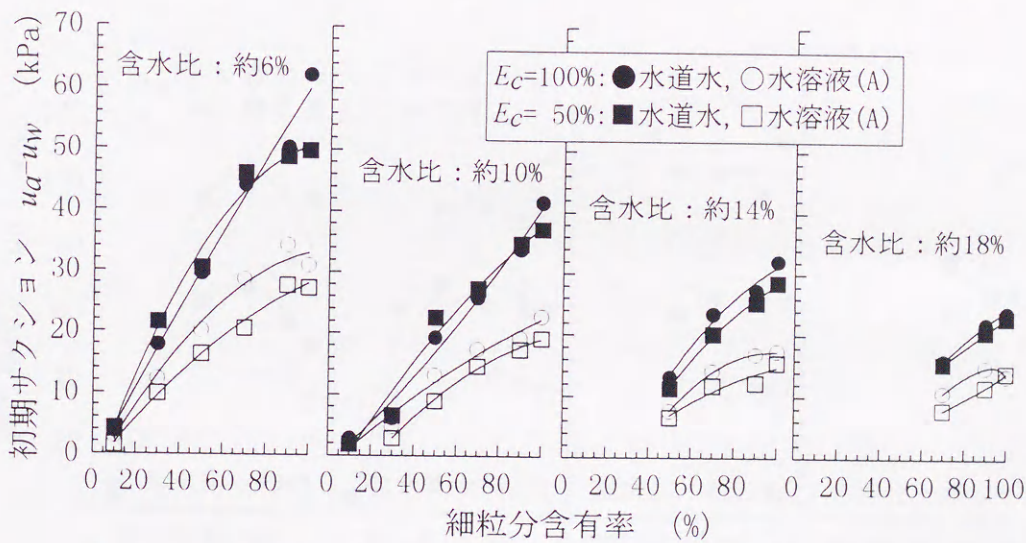


図-6.7 初期サククションと細粒分含有率の関係 (非塑性細粒分中間土)

以上の締固め曲線で、水溶液(A)を添加した場合の土粒子の体積率は水道水のそれを上回る。また、細粒分含有率10%は、表-6.1に示すように均等係数が小さな均一粒度であり、初期サククションも小さいために、有意な曲線は得られていない。

図-6.4および図-6.5の右側において、水道水および水溶液(A)の初期サククションと土粒子の体積率の関係曲線は、粒子接触の影響で、初期サククション増加および細粒分含有率減少に応じて離れる傾向にあるが³⁾、細粒分含有率50%以上では、図-6.1の右図と同様に同じ曲

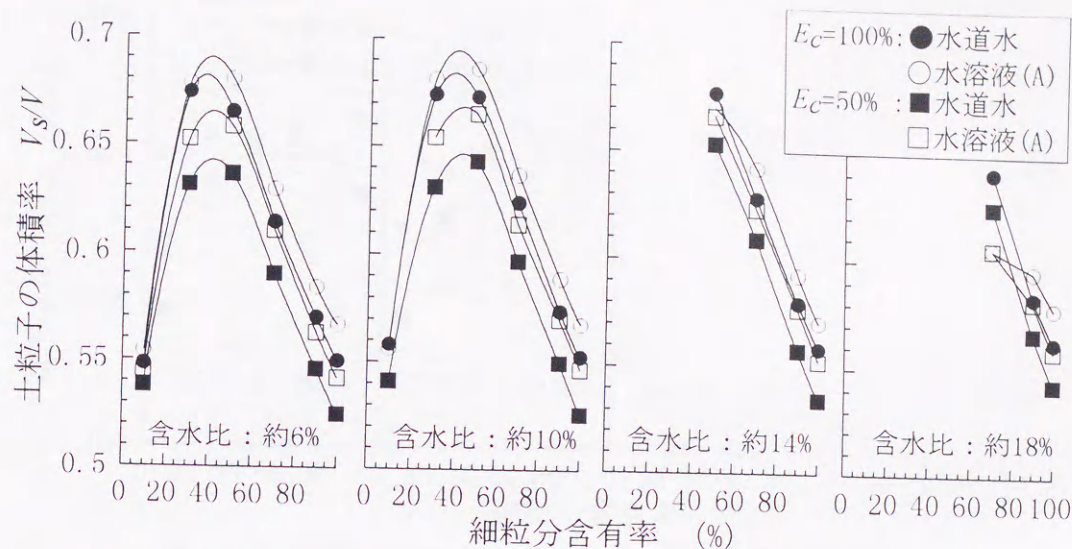


図-6.8 土粒子の体積率と細粒分含有率の関係（非塑性細粒分中間土）

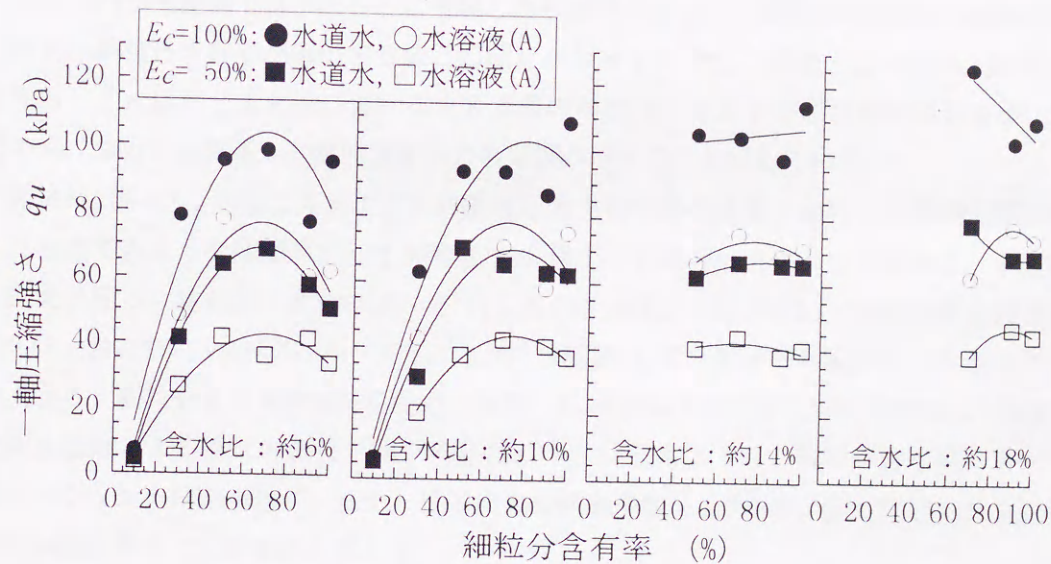


図-6.9 一軸圧縮強さと細粒分含有率の関係（非塑性細粒分中間土）

線で近似できる。

図-6.6に締めめ仕事量 $E_c=100\%$ の初期サクシオンと含水比の関係を示す。含水比に反比例して初期サクシオンは減少し、細粒分含有率が増加するほど同一含水比における初期サクシオンが増すことがわかる。これは第3章および第4章で得られた実験結果と同じである。

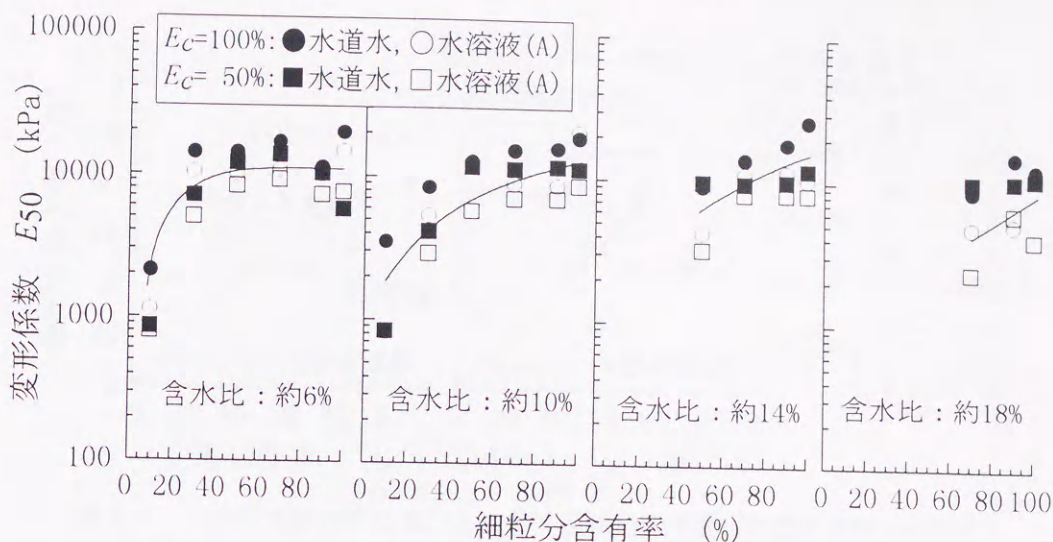


図-6.10 変形係数と細粒分含有率の関係（非塑性細粒分中間土）

±0.2%の誤差範囲で含水比ごとに整理した初期サクシヨンと細粒分含有率の関係を図-6.7に示す。細粒分含有率が増加するほど初期サクシヨンは増し、水道水と水溶液(A)の差も拡大する。これは同じ含水比における比表面積の増加は、土の不飽和状態を発達させ、粒子間のメニスカスが発達し、液体表面張力の影響が増すことを示している¹⁰⁾。

図-6.8は図-6.7と同様に含水比ごとに整理した土粒子の体積率と細粒分含有率の関係を示したものである。全体傾向として水溶液(A)を添加した場合の土粒子の体積率は、水道水のそれを上回る。特に含水比約6%および約10%では、締固め仕事量 $E_c=100\%$ の細粒分含有率30%以上および $E_c=50\%$ の10%~30%以上で、水溶液(A)の土粒子の体積率は、水道水のそれを上回り、細粒分含有率約40%で最大となる。 $E_c=100\%$ の方が細粒分含有率10%~30%で活性剤水溶液による液体表面張力減少の影響が小さい理由は、低い細粒分含有率によって初期サクシヨン自体が小さく、また、粒子同志の接触や表-6.1の均等係数に代表される粒度特性の影響が増すことが原因と考える^{3), 11), 12)}。

図-6.9は図-6.7と同様に含水比ごとに整理した一軸圧縮強さと細粒分含有率の関係を示したものである。全体傾向として水溶液(A)を添加した場合の一軸圧縮強さは、水道水のそれを下回り、活性剤水溶液による液体表面張力減少がせん断強さを低下させることが表れている。同様に図-6.10の変形係数と細粒分含有率の関係では、水溶液(A)の場合は水道水よりやや低く分布する傾向がみられる。

以上の図-6.9および図-6.10に示されたように、活性剤水溶液による液体表面張力減少によって、締固め密度は増加しても一軸圧縮強さや変形係数は低下することは、第5章の5.3節の結果と同じである。これについては、後の第7章の7.2節で、浸水等によって強度特性は回

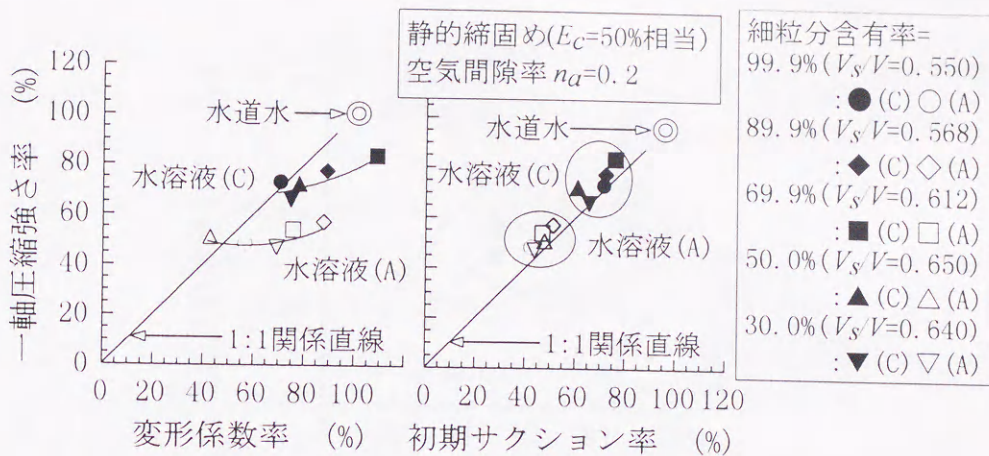


図-6.11 一定空気間隙率における液体表面張力の影響 (非塑性細粒分中間土)

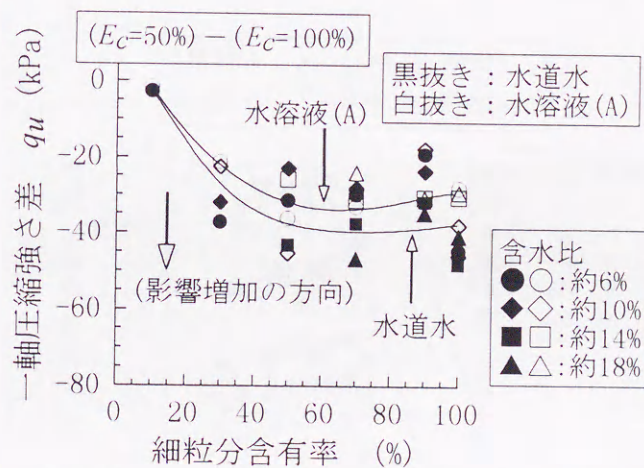


図-6.12 一軸圧縮強さへの締固め仕事量の影響 (非塑性細粒分中間土)

復することが確認されており、この結果が直接に実用化を考える上での支障とはならない。

図-6.11は図-6.4の $E_c=50\%$ における空気間隙率 $n_a=0.2$ の線と交わる土粒子の体積率および体積含水率で、静的な締固めを行い、液体表面張力の影響を検討したもので、水道水の場合を100%として正規化してある。静的な締固め方法は第4章の4.2.3項に準じている。

図-6.11の一軸圧縮強さ率と変形係数率の関係では、水道水>水溶液(C)>水溶液(A)の順序となる液体表面張力の値の大きさに応じて、一軸圧縮強さおよび変形係数は減少する。同様に右図の一軸圧縮強さ率と初期サクシオン率の関係では、液体表面張力の値に応じて、初期サクシオン率と一軸圧縮強さ率は1:1関係直線付近に分布し、近似的に対等な関係

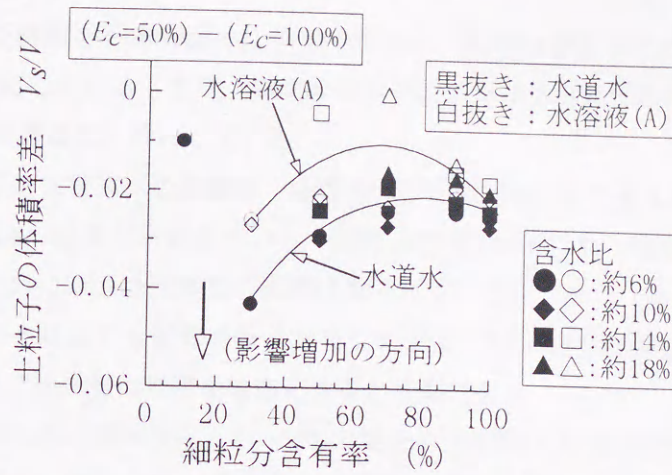


図-6.13 土粒子の体積率への締固め仕事量の影響 (非塑性細粒分中間土)

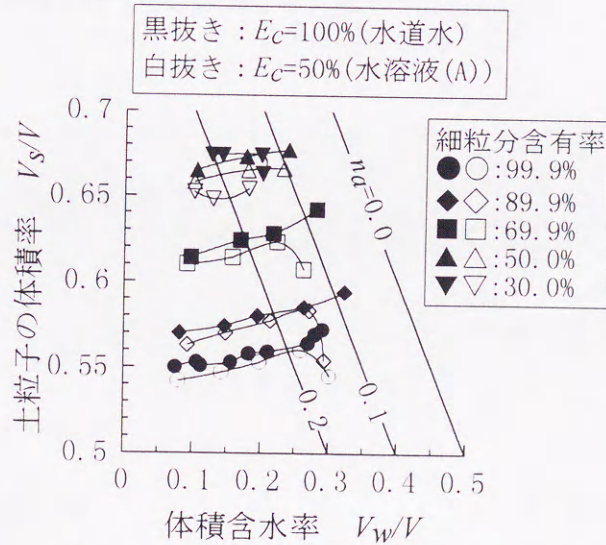


図-6.14 液体表面張力の減少効果 (非塑性細粒分中間土)

にあることがわかる。従って、土の締固めがせん断変形破壊を生じて密度が高まる現象と考えれば、締固め密度は土の粒子間力（第3章で考察したように、粒子間力は初期サクションで代表される）と締固め仕事量の力関係で決定することを示している。

6. 2. 2 液体表面張力および締固め仕事量の影響

図-6.12および図-6.13は、詳細に制御法の効果を検証するために、締固め仕事量の差をプ

ロットしたものである。

図-6.12の一軸圧縮強さへの締固め仕事量の影響は、細粒分含有率に応じて増加し、その傾向は図-6.9に対応している。また、間隙水の違いによる顕著な差はみられないが、やや水溶液(A)のほうが影響は低く分布している。

図-6.13の土粒子の体積率への影響は、細粒分含有率約30%付近で最も大きく、表-6.1の均等係数の値や図-6.8の結果と対応している。細粒分含有率10%は均一粒度で、初期サクシオン自体も小さいために締固め仕事量の影響は得られていない。また、水溶液(A)を添加した場合は、水道水のそれよりも影響が低く分布しており、粒子間力制御法による締固めは、低い締固め仕事量で効果的に密度を増加させると考察できる。

図-6.14は $E_c=100\%$ の水道水使用、 $E_c=50\%$ の場合の水溶液(A)使用の2つの体積率表示による締固め曲線をプロットしたものである。細粒分含有率50%以上の両者の締固め曲線は近接することから、液体表面張力の約50%減少は、締固め仕事量の約50%増に匹敵し、表面張力減少で締固め効率が向上することを端的に示している。細粒分含有率の減少に応じて、両者の締固め曲線が離れる傾向を示すのは、初期サクシオン自体が低下すること、さらに粒度や粒子形状等の影響が増すのが原因と考える^{3),7)}。

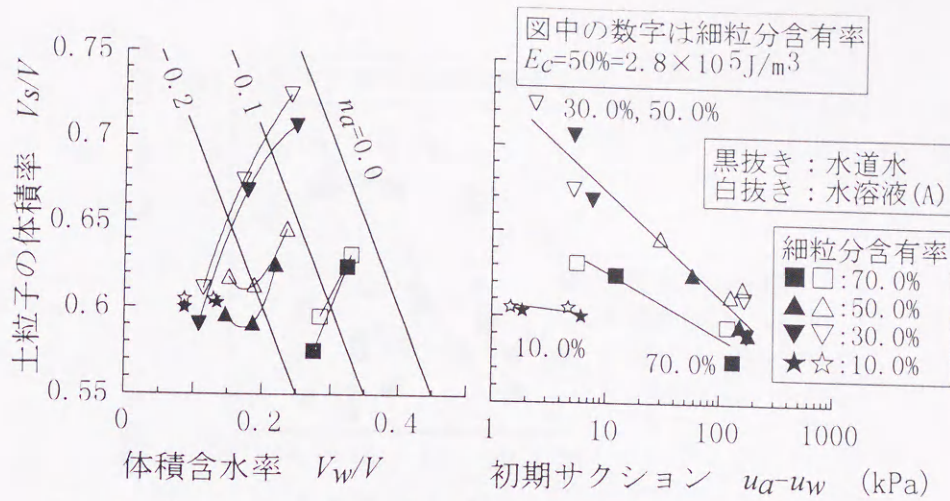


図-6.15 体積率表示の締固め特性 その1 (カオリナイト細粒分中間土)

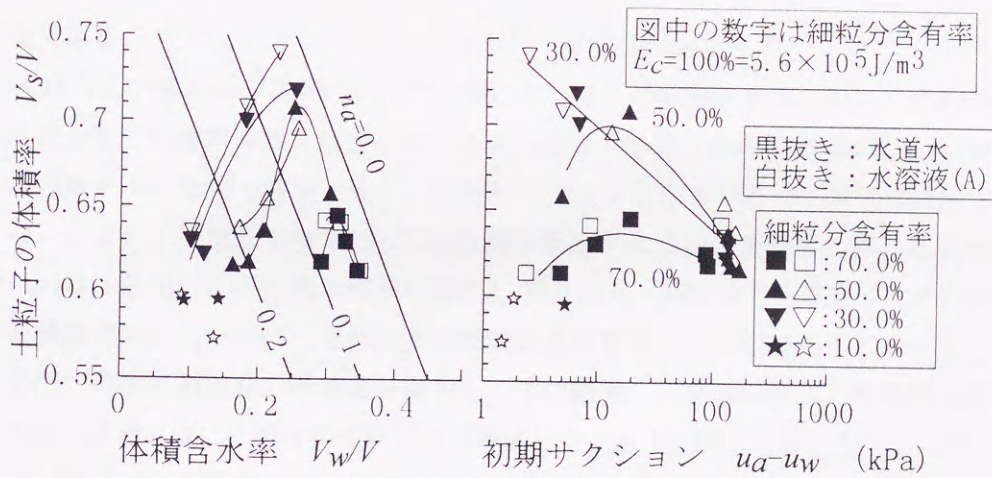


図-6.16 体積率表示の締固め特性 その2 (カオリナイト細粒分中間土)

6. 3 低塑性の砂質土～粘土に対する制御効果

6. 3. 1 細粒分含有率の影響

図-6.15および図-6.16の左側にカオリナイト細粒分中間土の体積率表示による締固め曲線、右側に初期サクシヨンの関係を示す。なお、供試体を三軸圧力室内に設置して間隙空気圧を作用させ、計測されるサクシヨンの安定した時の値を初期サクシヨンと呼ぶ。図-6.16は標準プロクター相当の仕事量 ($E_c=100\%$)、図-6.15はその半分の $E_c=50\%$ で動的に締固め

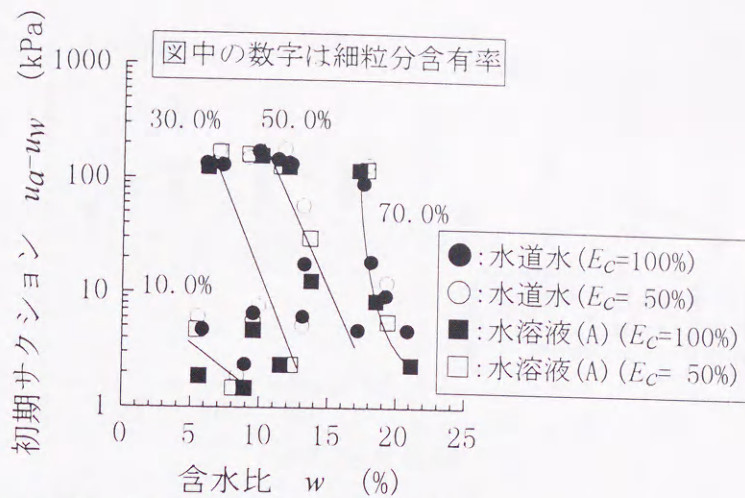


図-6.17 初期サクションと含水比の関係 (カオリナイト細粒分中間土)

た場合である。

図-6.15および図-6.16の左側の締固め曲線において、細粒分含有率50%以下で水溶液(A)を添加した土粒子の体積率は、水道水のそれを上回る。細粒分含有率10%は表-6.2に示すように均等係数が小さな均一粒度であり、初期サクションも小さいために有意な曲線は得られていない。また、細粒分含有率70%に活性剤水溶液による液体表面張力減少の影響がみられないのは、添加した活性剤水溶液の濃度2.0質量%が、細粒分含有率30%での近似的な安定平衡濃度であったために、それ以上の細粒分含有率では表面積の増加によって、固体-液体界面への活性剤成分の吸着量が増加し、その結果、土中水の液体-気体間の液体表面張力を減少させるのに必要な活性剤成分が不足したこと等が原因と考えられる⁷⁾。

また、図-6.15および図-6.16の右側の初期サクションと土粒子の体積率の関係では、先の6.2節の非塑性の砂質土～粘性土の細粒分含有率50%以上において、液体表面張力の値が変化しても初期サクションと締固め密度の間に比例的関係が得られた結果と同じく、土中水の種類にかかわらず同一ライン上に分布する傾向がみられる。これらの結果は、締固め密度は粒子間力に反比例する摩擦力と締固め力の平衡で決定することを表している。

初期サクションと含水比の関係を図-6.17に示す。締固め仕事量および間隙水の種類に関わらず、初期サクションと含水比の関係は、細粒分含有率ごとに異なるライン付近に分布し、液体表面張力および締固め仕事量の初期サクションへ与える影響は表れていない。カオリナイト細粒分中間土は、初期サクションの含水比に対する感度が高く、そのために初期サクションを対数表示としたこと等が影響がみられない原因の一つと考えられる。また、含水比と初期サクションは反比例的な関係にあり、細粒分含有率が増加するほど初期サクションが増すことがわかる。これは第3章および第4章で得られた実験結果や先の6.2節の

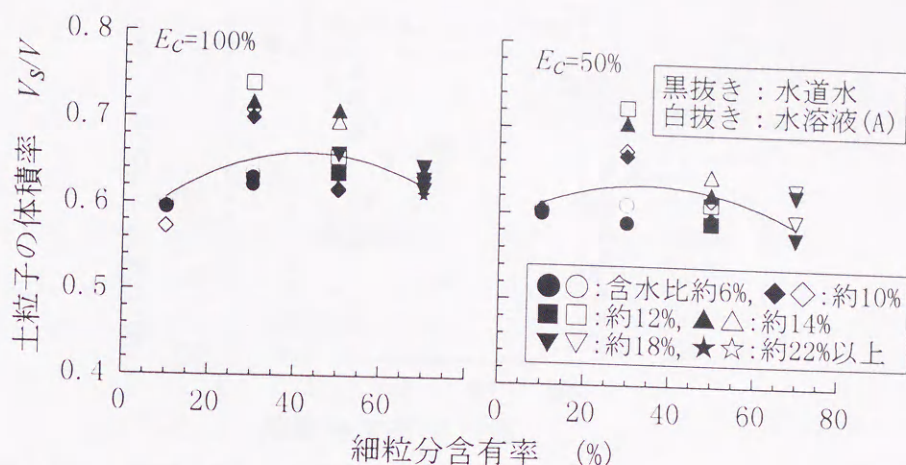


図-6.18 土粒子の体積率と細粒分含有率の関係 (カオリナイト細粒分中間土)

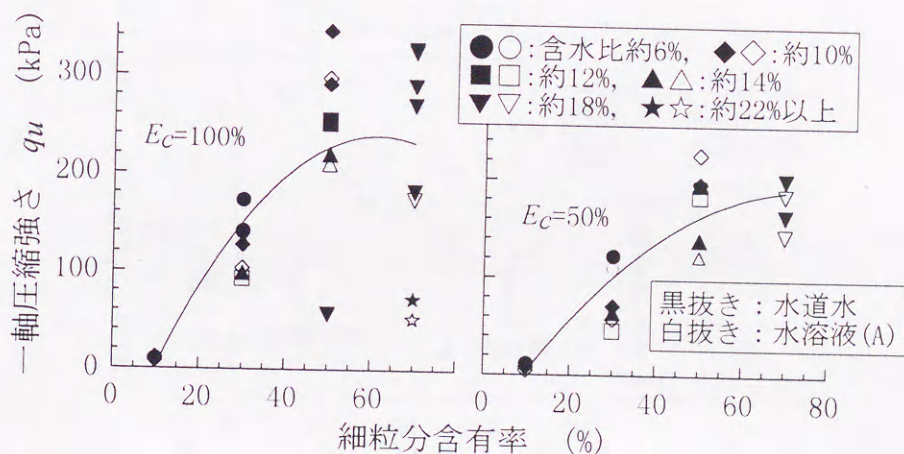


図-6.19 一軸圧縮強さと細粒分含有率の関係 (カオリナイト細粒分中間土)

図-6.6と同じ傾向である。

土粒子の体積率と細粒分含有率の関係を、締固め仕事量ごとに図-6.18に示す。細粒分含有率30%~50%付近に土粒子の体積率のピークがみられる。締固め仕事量 $E_c=100\%$ が $E_c=50\%$ に比べてやや大きく分布しているが、水溶液(A)を添加したことによる液体表面張力減少の影響はみられない。

細粒分含有率と一軸圧縮強さの関係を、締固め仕事量ごとに図-6.19に示す。締固め仕事量 $E_c=100\%$ が $E_c=50\%$ に比べてやや大きく分布しているが、水道水と水溶液(A)の差は表れず、液体表面張力減少の影響はみられない。

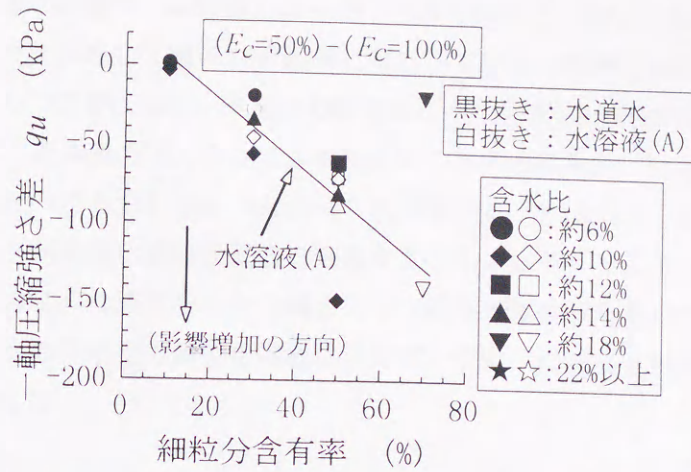


図-6.20 一軸圧縮強さへの締固め仕事量の影響 (カオリナイト細粒分中間土)

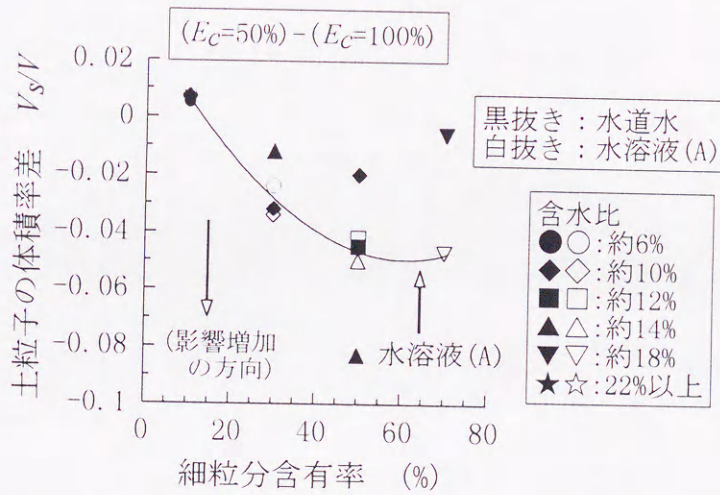


図-6.21 土粒子の体積率への締固め仕事量の影響 (カオリナイト細粒分中間土)

6. 3. 2 液体表面張力および締固め仕事量の影響

図-6.20および図-6.21は詳細に制御法の効果を検証するために、締固め仕事量の差をプロットしたものである。

図-6.20の一軸圧縮強さへの締固め仕事量の影響は、細粒含有率に応じて増加する傾向にあり、図-6.19の結果と対応している。間隙水の違いによる影響の差はみられないが、水溶液(A)のデータはばらつきが少なく、水道水を添加した場合に比べて含水比にかかわらず安定していることがわかる。

図-6.21の土粒子の体積率への影響も図-6.20と同様な傾向で、細粒含有率に応じて増加し、50%付近にピークが存在し、図-6.18の結果と対応している。同様に水溶液(A)を添加した場合はデータのばらつきが少なく、水道水の場合に比べて含水比にかかわらず安定している。

以上において、液体表面張力減少による粒子間力制御の効果が、先の6.2節の非塑性の砂質土～粘性土に比べてみられなかったのは、6.3.1項で述べたように、活性剤水溶液の濃度が土中水の液体-気体間の液体表面張力を減少させるのに不十分であったこと等が原因と考えられる。このような濃度不十分な場合でも、活性剤水溶液を用いた粒子間力制御法による締固めは、土の含水比の影響を過敏に受けず、安定した強度と締固め密度を与えることが明らかとなった。

6. 4 本章のまとめ

本章で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 非塑性の粘性土を10%~30%以上含む砂質土~粘性土は、粒子間力制御法による締固めによって、初期サクシオンおよび非排水せん断強さは減少し、低い締固め仕事量でも効果的に締固め密度を増加させる。但し、均等係数の小さな均一粒度でサクシオン自体が小さい場合には粒子間力の制御効果はみられない。
- 2) 低塑性の粘土（低液性限界）を50%以下含む砂質土~粘土は、粒子間力制御で締固め密度は増加する。粘土分が50%を越える土で制御効果を得るには、高濃度の活性剤水溶液が必要である。
- 3) 低塑性の粘土（低液性限界）を50%以下含む砂質土~粘土において、活性剤水溶液の濃度が不十分な場合でも、粒子間力制御法による締固めは、含水比の影響を過敏に受けないうために、安定した強度と締固め密度を有する地盤の作製が期待できる。

参考文献

- 1) 例えば, 山口柏樹:土質力学(全改訂), 技報堂出版, pp.141-196, 1996.
- 2) 大北康治, 中沢重一:不飽和土の締固め機構について, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.141-148, 1987.
- 3) 吉村優治, 小川正二:粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響, 土木学会論文集, No.487/Ⅲ-26, pp.99-108, 1994.
- 4) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一:非塑性の細粒分を含む土の締固め法, 土木学会論文集, (掲載決定)
- 5) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一:非イオン性界面活性剤による表面張力低下の不飽和土の締固めに与える影響, 土木学会論文集, No.582/Ⅲ-41, pp.265-274, 1997.
- 6) 三土正則:農耕地土壌分類改善のための土壌断面データ集, 農業環境技術研究所資料, Vol.12, p.56, 1991.
- 7) 社)地盤工学会編:改正地盤工学会基準・同解説, pp.10-25, 1996.
- 8) 軽部大蔵, 加藤正司, 勝山潤一:不飽和カオリンの有効応力と力学定数, 土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-5, pp.179-188, 1986.
- 9) 地盤工学会不飽和地盤の安定性に関する研究委員会編:不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.23-58, 1992.
- 10) 社)日本化学会編:土の化学, pp.50-109, 1993.
- 11) 例えば, 土の締固めと管理編集委員会編:土の締固めと管理, pp.1-28, 1991.
- 12) 例えば, Adamson, A.W.:Physical Chemistry of Surfaces, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, pp.61-63 and pp.339-363, 1976.

第7章 実用化に関する基礎的検討

概要：非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土は、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られない問題に対する解決法として、本研究は非イオン性界面活性剤（以下、活性剤と記す）による液体表面張力減少での粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルの粒子間力制御法^{1)・2)}提案した。この粒子間制御法の実用化には、図-7.1に示すそれぞれの項目の検討が必要である。本章では、図-7.1に示したそれぞれの項目について検討し、実用化の足がかりを示す。

7. 1 土に添加する上で最適な活性剤の選定

活性剤には数多くの種類がある^{3)・4)・5)・6)}。最も種類が多いノニルフェノール系は、いわゆる環境ホルモン（外因性内分泌かく乱物質）⁷⁾の疑い物質である。このような物質を土に添加することは、その土中での生分解率が高い場合でも問題があると考えられる。

それ以外では、食品添加物として認可されているソルビタン脂肪酸エステル系やグリセリン脂肪酸エステル系が、環境や生物に対する安全性についての評価が成されている点から、最適な活性剤といえる。しかしながら、販売されているこの種の活性剤は、式(7.1)等で定義されるアトラス社の提唱したHLB（親水性と疎水性のバランス）^{6)・8)}が3～9のものが一般的で、そのために疎水性が強く、水に不溶または白濁分散するものが多い。活性剤を水溶液とするに必要な高い溶解性を有するこの種の活性剤は、現在のところ数種類しかみあたらない。

$$HLB_G = 20 \left(\frac{M_H}{M} \right) \quad (7.1)$$

ここに、 HLB_G : GriffinのHLB⁸⁾

M_H : 親水基部分の分子量, M : 活性剤の分子量

表-7.1 OECDガイドライン（易分解性試験）の一例

No.	301A	301B	301C
試験名	DOC Die-Away	CO ₂ Evolution	Modified MITI(1)
微生物源	1. 下水処理場活性汚泥 2. 二次放流水 3. 表層水 4. 土壌懸濁液 5. 上記1から4の混合物	1. 下水処理場活性汚泥 2. 二次放流水 3. 表層水 4. 土壌懸濁液 5. 上記1から4の混合物	標準活性汚泥(全国10箇所以上の河川、湖沼、海、下水処理場から採取し混合培養)
微生物源の前処理	必要に応じて上記1および2は5~7日間曝気	必要に応じて上記1および2は5~7日間曝気	合成下水で1ヶ月以上の順養
微生物源濃度	懸濁物質(SS) ≤ 30mg/L (10 ⁷ ~10 ⁸ cell/L) L=1リットル	懸濁物質(SS) ≤ 30mg/L (10 ⁷ ~10 ⁸ cell/L)	懸濁物質(SS) ≤ 30mg/L (10 ⁷ ~10 ⁸ cell/L)
培地	無機培地 タイプA	無機培地 タイプA	無機培地 タイプB
被検物質濃度	10~40mgDOC/L DOC=溶存有機炭素	10~20mgDOC/L DOC=溶存有機炭素	100mg/L
試験装置	三角フラスコ振とう	フラスコ通気	クーロメータ攪拌
試験温度および期間	22±2℃, 28日	22±2℃, 28日	25±1℃, 28日
評価方法	DOC測定 (DOC:溶存有機炭素)	発生CO ₂ 測定	BOD測定 (BOD:生物化学的酸素要求量)
合格レベル	70%	60%	60%

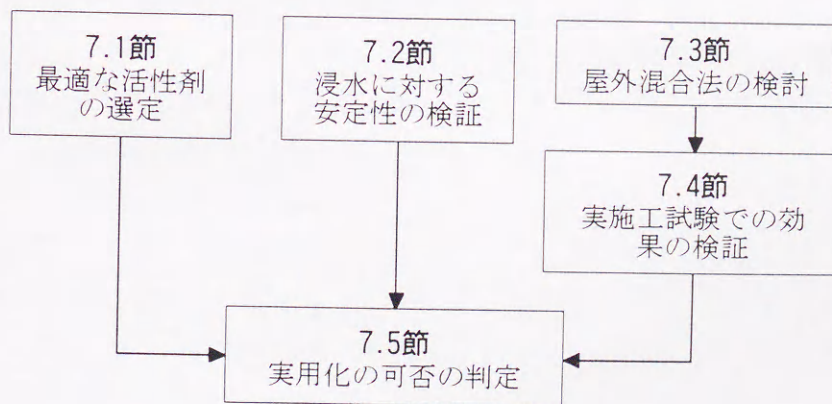


図-7.1 本章の構成と研究の流れ

その他に、土中の微生物によって分解され易い高級アルコール系が適していると考えられる。この種の活性剤は、HLBが10~15の水に対する溶解性の高いものを、数多くの販売されている種類から選択することができ、さらに臨界ミセル濃度における液体表面張力の値も数多く存在する。本研究で用いた活性剤は、この高級アルコール系に分類され、一般にポリオキシアルキレンアルキルエーテルと呼ばれる物質である。

以上の活性剤等の化学物質の環境や人体への影響に対する基準は、一般にOECD（経済協力開発機構）の定めるガイドライン⁹⁾等を参考に作成されている。

表-7.1にOECDガイドライン易分解性試験（301A~301Fの6種類）の中で代表的な3種類を示す。一般に活性剤に用いられる301Bでは、生分解率60%以上で易分解性と判断される。その他に皮膚刺激（モルモット、10%水溶液）、感作性（モルモット、Buehler法）、急性毒性（経口、ラットLD50）、変異原性Ames試験（サルモネラ菌）、魚毒性（ヒメダカLC50、96時間）等の安全性評価¹⁰⁾が必要である。

これらの基準等を満足すれば、土中に活性剤を混合することによる環境や人体への悪影響等は一応ないとされているが、現時点で明らかでない危険性の存在を完全に否定することもできない¹⁰⁾。よって、安全性の面から食品添加物として認可されたソルビタン脂肪酸エステル系やグリセリン脂肪酸エステル系、上述の環境基準等を満足する高級アルコール系が、土に添加する上で適当な活性剤である。なお、本研究の活性剤水溶液(A)は、301B易分解性試験での生分解率は約86%であり、他の基準等も満足している。

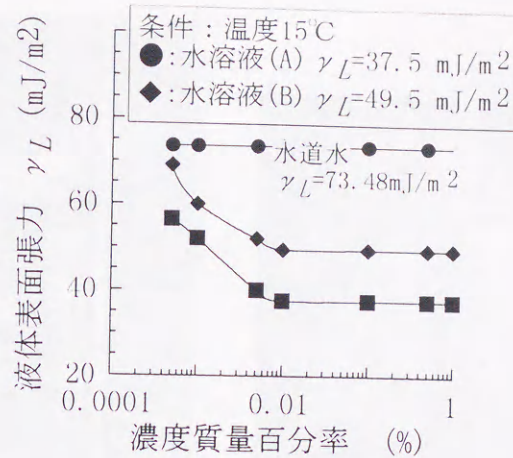


図-7.2 活性剤水溶液濃度と液体表面張力の関係

7. 2 浸水に対する安定性の検証

7. 2. 1 実験方法

第4章の図-4.5に、実験に用いた不飽和三軸圧縮試験用の圧力室を示す。

土質材料は第4章の4.2節の表-4.1に示す粘性土（DLクレイ）、水溶液は図-7.2の濃度0.5質量%の水溶液(A)である。

供試体の寸法は、直径50mm高さ100mm、供試体2個分以上に相当する1kgの土を用意して、水道水および水溶液(A)で含水比調整を行い、モールドに含水比調整済みの土を5層に分けて均等に入れ、落下高さ100mm質量1kgの第5章の5.2.2項の土の保水性試験で用いたコンパクターによって、標準プロクター相当の $E_c=5.6 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ の締固め仕事量で動的に締固めて作製した。締固め後に2日間恒温室に静置した後に、2つの供試体の片方はそのままの状態、他方は浸水させて不飽和一軸圧縮試験を行った。なお、そのままの状態の供試体を「浸水前」と表示し、浸水させた供試体を「浸水後」と表示する。

浸水方法は、供試体に黄銅製2つ割れジャケットを被せた体積一定条件下で、ペDESTALに埋め込んだセラミックディスクを介して、供試体下部から水道水を背圧0.5kPa～1kPaで吸水させ、ビューレットで計測される吸水量から計算した飽和度が、80%以上に達した段階で浸水完了とした。浸水時間は6日間～10日間を要している。浸水作業中においては、大気解放された上部キャップの接続ホースからの排水に注意を払ったが、背圧も極小さく、さらに、上部キャップ下の撥水性ポリフロンフィルターによって、排水は遮断されているために、そのような現象は生じていない。よって、活性剤成分は土中に残留している。

写真-7.1に三軸圧縮試験用の圧力室内での浸水作業中の様子を示す。写真-7.2は浸水完了

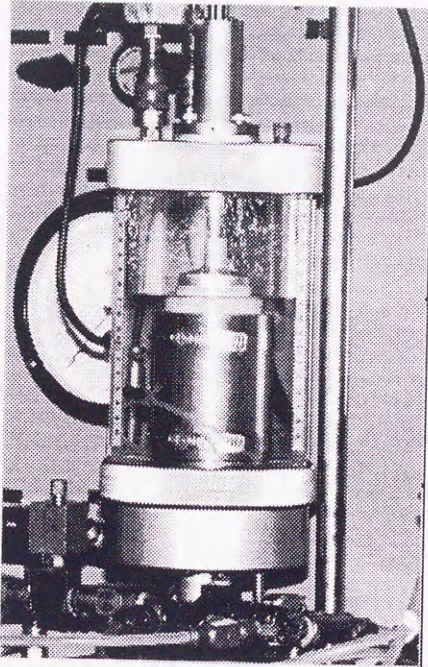


写真-7.1 浸水作業中の様子

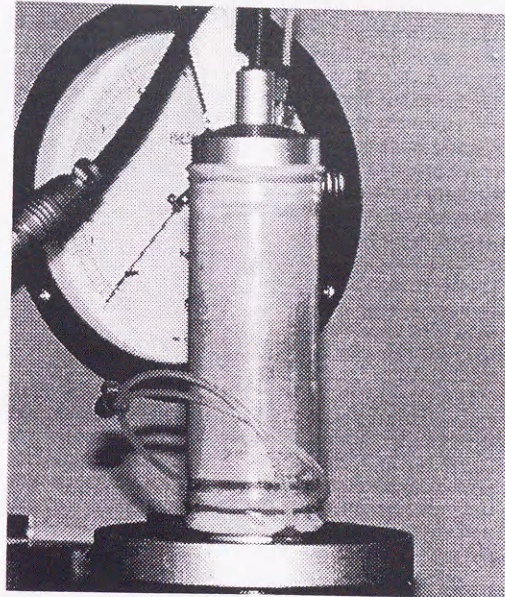


写真-7.2 浸水完了後に脱型した供試体の様子

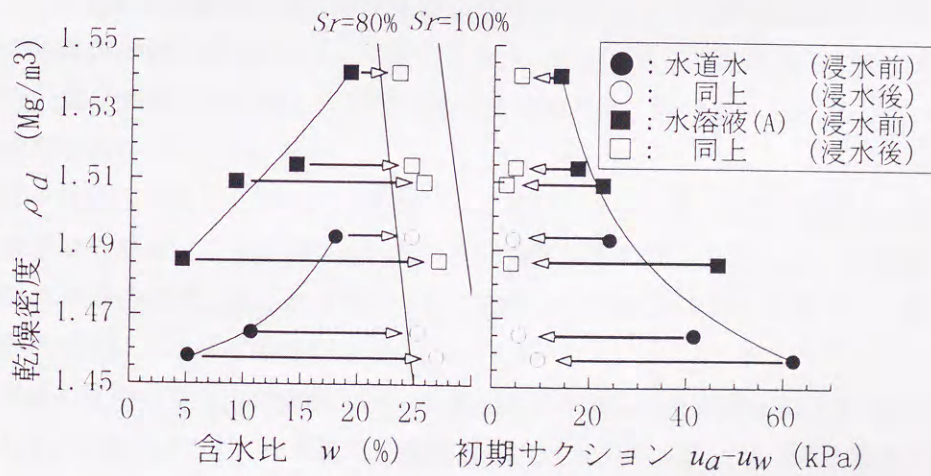


図-7.3 浸水前後の乾燥密度と含水比および初期サクシヨンの関係

後に2つ割れジャケットを外した供試体の様子を示す。この後に、浸水前の供試体と同じ条件で不飽和一軸圧縮試験を行うことになる。

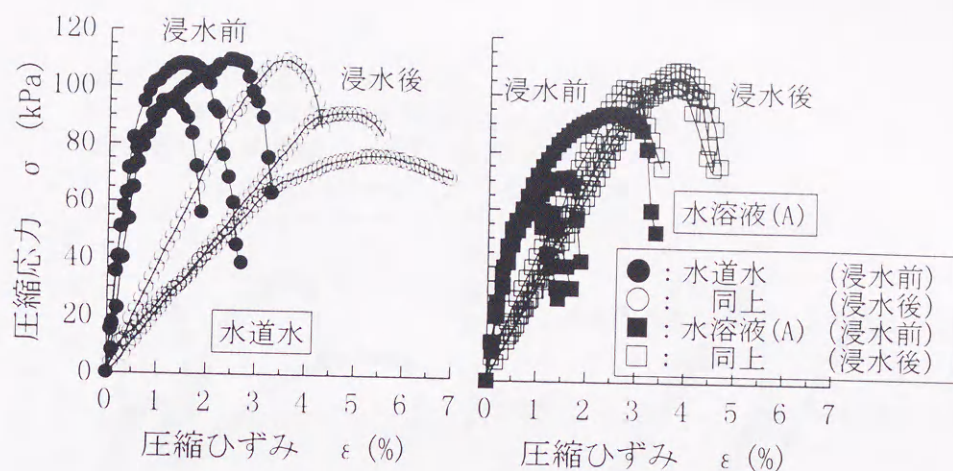


図-7.4 浸水前後の応力-ひずみ曲線の比較

せん断試験手順は不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験¹¹⁾に従い、せん断試験時のひずみ速度は0.05%/min、間隙空気圧はバック・エア・プレッシャーとして78.45kPaを与え、間隙水圧を正值とした。他の条件等は第4章の4.2.3項と同じである。

7. 2. 2 実験結果の考察¹²⁾

図-7.3に浸水前後の乾燥密度と含水比および初期サクシヨンの関係を示す。図-7.3から、浸水後の供試体の飽和度は80%以上に達しており、浸水方法の条件を満足している。なお、供試体を三軸圧力室内に設置して間隙空気圧を作用させ、計測されるサクシヨンが安定した時の値を初期サクシヨンと呼ぶ。

不飽和一軸圧縮試験から得られた応力-ひずみ曲線を図-7.4に示す。水道水を添加して締固めた場合は、浸水による圧縮強さの低下および軟化傾向がみられるが、水溶液(A)を添加して締固めた場合には、逆に浸水後の方が圧縮強さが向上する傾向がみられ、浸水前後の曲線の形状変化は、水道水の場合に比べて小さい。

次に締固め直後の含水比の値に近い、水道水添加の場合と水溶液(A)のそれを比較する。

図-7.5および図-7.6では、浸水前の圧縮強さは水道水の方が強いが、浸水後は水道水の圧縮強さは低下し、逆に水溶液(A)は圧縮強さが増加し、両者の関係は逆転している。この傾向は、図-7.5の浸水前の含水比が約5%の方が図-7.6の約10%よりも顕著に表れている。

図-7.7の最適含水比（第5章の図-5.8および図-5.10によると水道水で22%、水溶液(A)で12%）付近またはそれ以上の18.0%と19.2%で締固めた場合は、水道水と水溶液(A)の浸水後の圧縮強さは近似的に同じである。

以上の結果について以下のように考察する。水道水を添加して低い含水比で締固めた粘性土は、負の粒子間力が強く、摩擦力と締固め力の平衡状態で決定する締固め密度は低く

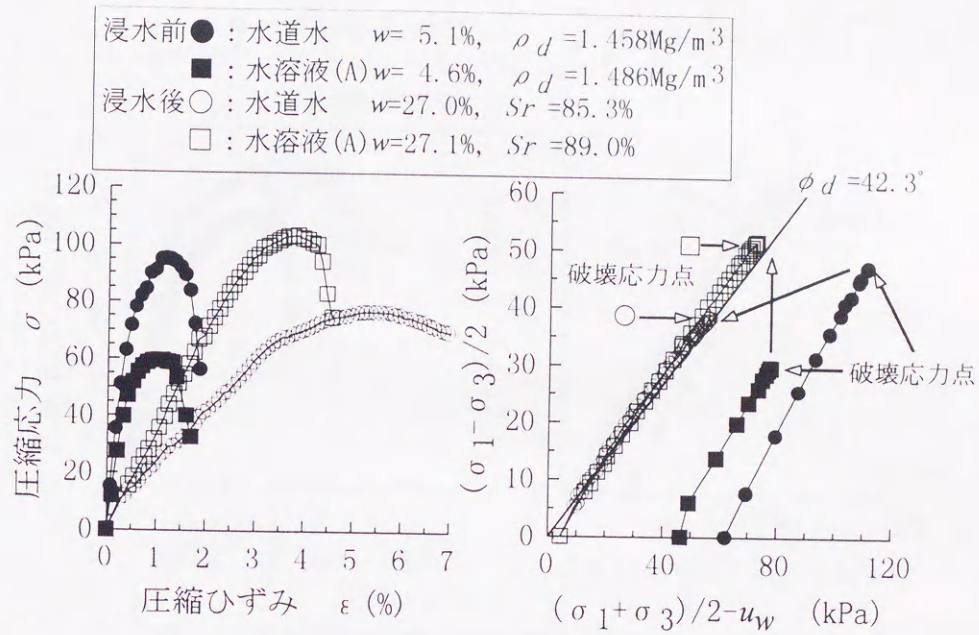


図-7.5 浸水前後の比較 (浸水前の含水比 約5%)

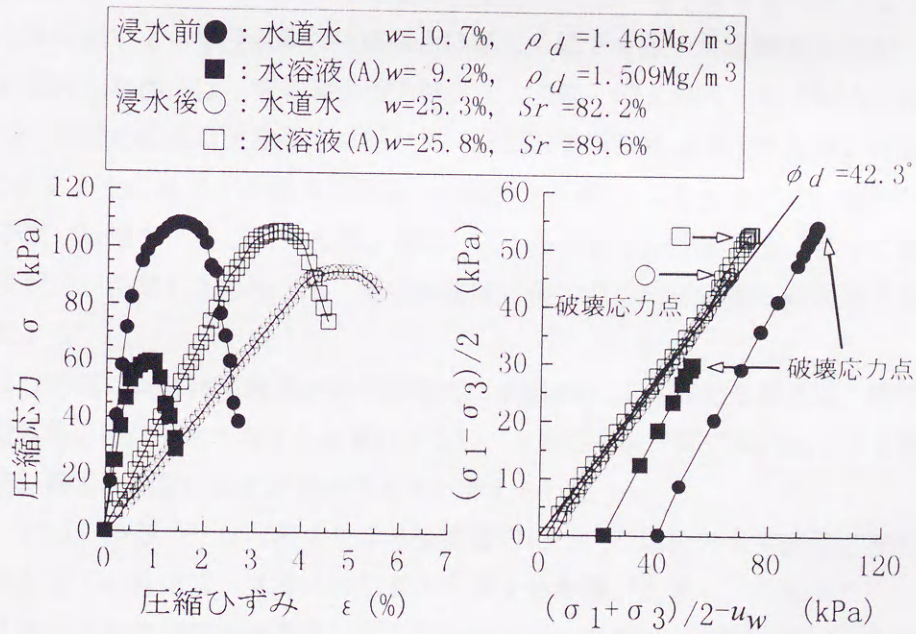


図-7.6 浸水前後の比較 (浸水前の含水比 約10%付近)

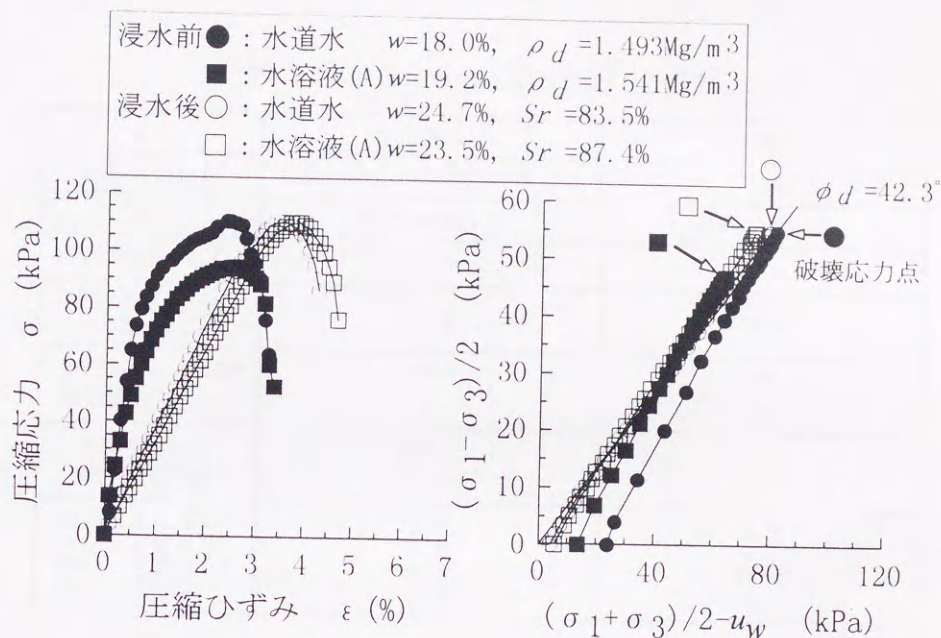


図-7.7 浸水前後の比較 (浸水前の含水比 18%と19.2%)

なる。浸水によってサクションがある程度解放されると、粒子骨格を保持する粒子間力の増加または消滅によって浸水後の圧縮強さは著しく低下する。水溶液(A)を添加して低い含水比で締固めた粘性土は、液体表面張力減少による粒子間力増加（粒子間力自体は減少）によって、締固め直後の圧縮強さは弱い、締固め密度は水道水よりも高い状態にある。図-7.2に示すように水道水の液体表面張力の値は水溶液(A)よりも大きく、浸水の初期段階では粒子間力は減少（粒子間力自体は増加）し、圧縮強さは増加する。さらに飽和度が高まり粒子間力が消滅した場合でも、締固め密度が高いために圧縮強さは大きく低下しないと考察できる。

このように低い含水比で締固めた供試体ほど、水溶液(A)で締固めた場合は、締固め時の含水比の浸水後の圧縮強さへ与える影響は少ないことから、粒子間力制御法による締固めは、品質の高い締固め地盤の作製が期待できると考えられる。

また、村田、渋谷¹³⁾は、浸水による強度変化について過去の研究成果を整理し、浸水による強度低下の原因は、見掛けの粘着力の減少の影響が大きく、内部摩擦角の影響は少なく、上載圧力および締固め密度に大きく依存することを示しているが、上述の実験結果から、さらに具体的な原因として、粒子間力自体の減少という物理的作用が浸水による強度低下の原因の一つであることが明らかとなった。

表-7.2 土質材料の工学的性質 その2

表示	建設発生土	山砂
土質材料分類	粘性土まじり礫質砂(#SG-C _s)	粘性土まじり礫質砂(SG-C _s)
産出	愛知県豊橋市	愛知県猿投町
自然含水比 w_n (%)	16.5	6.1
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.59	2.6
液性限界 w_L (%)	NP	NP
塑性限界 w_p (%)	NP	NP
均等係数 U_c	30.7	17.3
曲率係数 U_c'	0.75	1.2
粘土分含有率 (%)	6.9	2.9
シルト分含有率 (%)	3.2	4.0
砂分含有率 (%)	47.9	53.9
礫分含有率 (%)	42.0	39.2

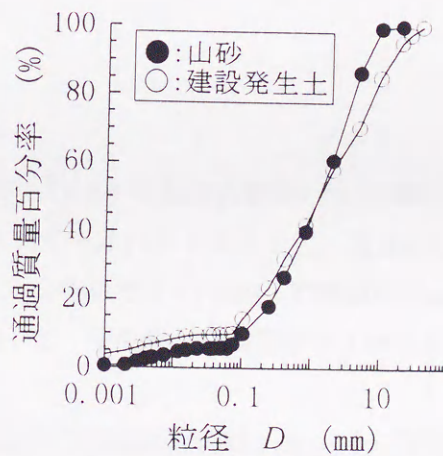


図-7.8 粒径加積曲線

7. 3 屋外混合方法の検討

7. 3. 1 土質材料および活性剤の性質

土質材料の工学的性質および粒径加積曲線を表-7.2および図-7.8に示す。いずれも粘性土まじり礫質砂に分類され、産出場所で建設発生土および山砂と表示する^{14)・15)}。観察では建設発生土に腐食物質の存在は認められない¹⁶⁾。活性剤は図-7.2の水溶液(B)を用いた。

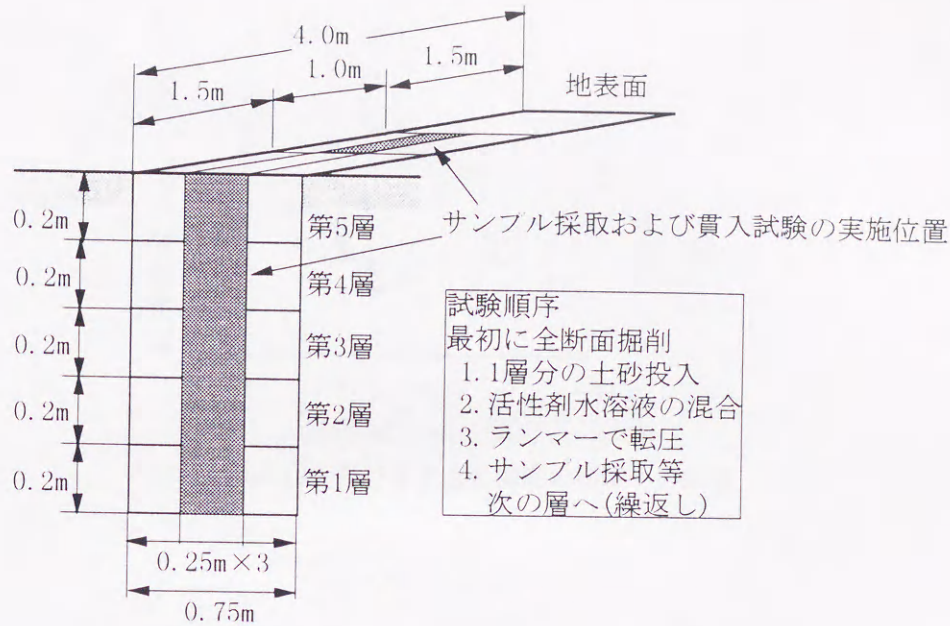


図-7.9 モデル地盤の概要と試験手順

7. 3. 2 実験方法

モデル地盤を図-7.9に示す。仕上がり締固め層厚0.2mで5層の締固めを行った。

締固めに用いた衝撃型ランマーはハンドガイド式、質量63kg、足回り型式は平板型絶対剛性（寸法0.33m×0.33m）、公称接地圧7.35kPa、打撃数9回/secである。締固め走行回数はモデル地盤の長辺方向に沿って、中央部、左周辺部および右周辺部の各1回で、走行速度は平均0.04m/secであった。

図-7.9のモデル地盤の長辺方向の両端部1mは、ランマーの回頭に使用し、中央部1mおよび掘削壁面間の中央部の各締固め層上部で、原位置密度試験として砂置換法（注砂法）および含水比測定用のサンプル採取を行い、埋戻し終了直後、4日後および36日後に土研式貫入試験¹⁷⁾を実施した。埋戻し後の上載荷重は無く、3日後に降雨を記録している。水溶液(B)の濃度は1.0質量%、水溶液添加量は埋戻し土量あたり、建設発生土は0.08m³/m³、山砂は0.13m³/m³、同量の水道水の試験も実施した。

検討した活性剤水溶液の現場混合方法は以下の3種類である。

「ミキサー混合」は活性剤水溶液を添加した土を、傾胴型ミキサーで約10秒間混合の後に投入、「散布バックホー敷きならし」は埋戻し土を投入後、活性剤水溶液を均一に散布し、バックホーで混合目的の敷きならしを実施、「散布」は敷きならし後に活性剤水溶液の散布だけを行った。水道水は「散布バックホー敷きならし」方法を用いている。

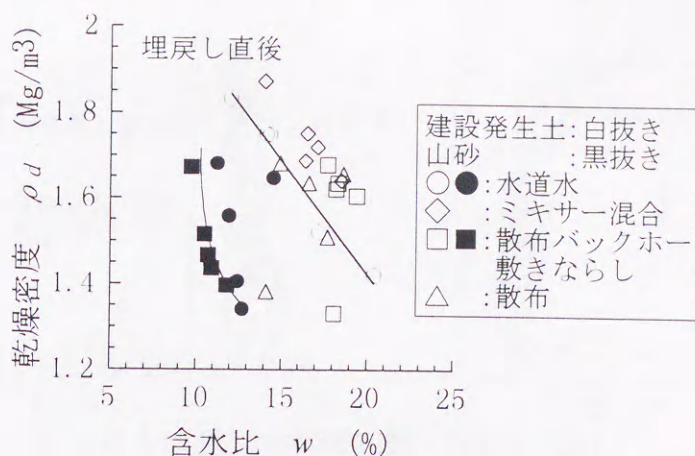


図-7.10 屋外混合法の締固め密度への影響

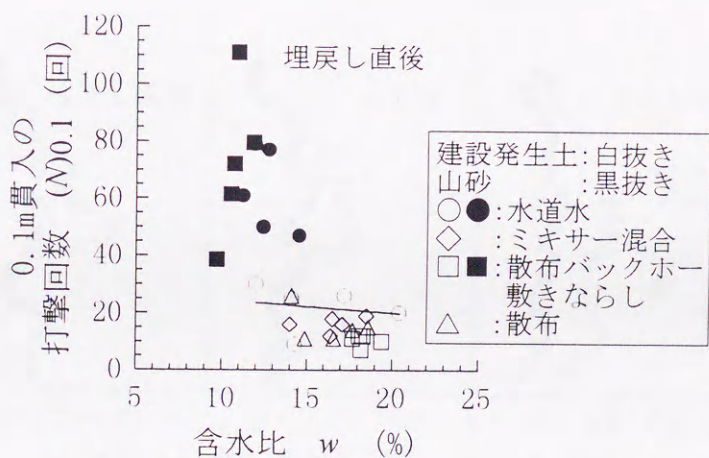


図-7.11 屋外混合法の打撃回数への影響

7. 3. 3 実験結果の考察^{18)・19)}

図-7.10に埋戻し直後の各締固め層上部で、砂置換法（注砂法）および採取された土質サンプルから得られた乾燥密度と含水比の関係を示す。建設発生土の水道水と活性剤水溶液を用いた各混合方法では、「散布」に効果はみられないが、「ミキサー混合」および「散布バックホー敷きならし」は同一含水比における乾燥密度の増加傾向がみられる。

図-7.11は表層まで埋戻しが終了した直後に行った土研式貫入試験の結果と含水比の関係を示したものである。建設発生土の活性剤水溶液は、水道水に比べ0.1m貫入に要する打撃回数が減少し、活性剤水溶液の添加による液体表面張力減少によって、一軸圧縮強さが低

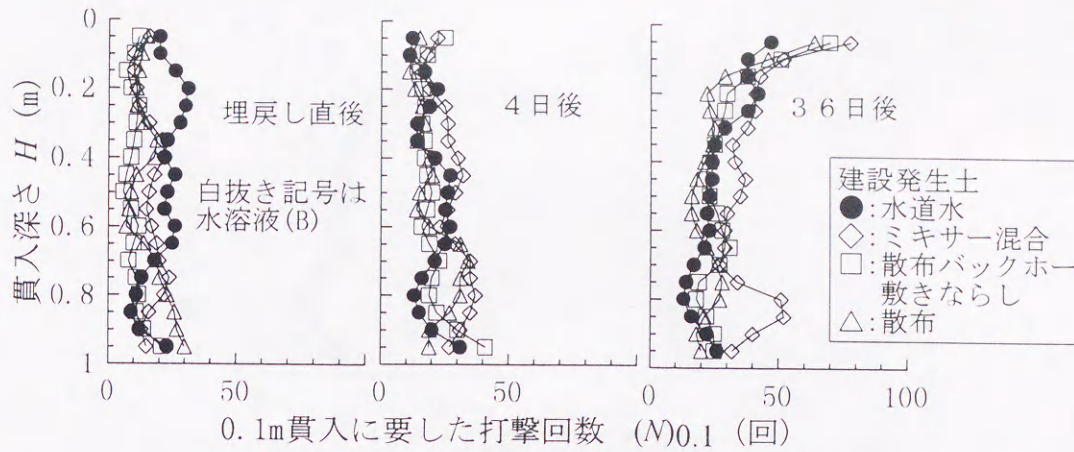


図-7.12 屋外混合法と打撃回数の変化の関係 (建設発生土)

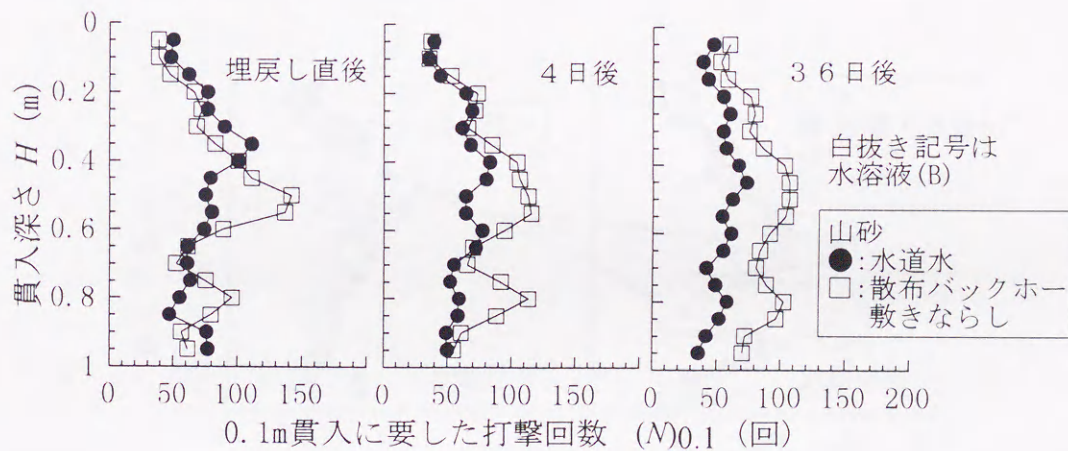


図-7.13 屋外混合法と打撃回数の変化の関係 (山砂)

下する効果が表れている。

図-7.10および図-7.11において、山砂には活性剤水溶液の有意な影響はみられない。細粒分含有率が建設発生土よりも低く、マトリックスポテンシャルによる粒子間力自体が相対的に小さいことが、活性剤水溶液の影響のみられない原因の一つと考えられる。

建設発生土の貫入試験結果を図-7.12に示す。埋戻し直後に打撃回数の減少が生じた活性剤水溶液のケースは、時間経過とともに打撃回数が増加する傾向がみられ、36日後の「ミキサー混合」は全域で水道水を上回っている。

図-7.13に山砂の場合の貫入試験結果を示す。図-7.10および図-7.11の埋戻し直後の乾燥密

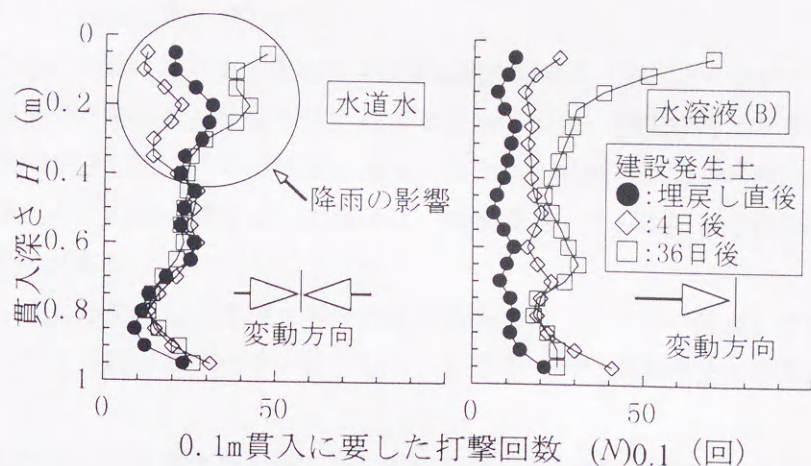


図-7.14 活性剤の有無と打撃回数の変化の関係 (建設発生土)

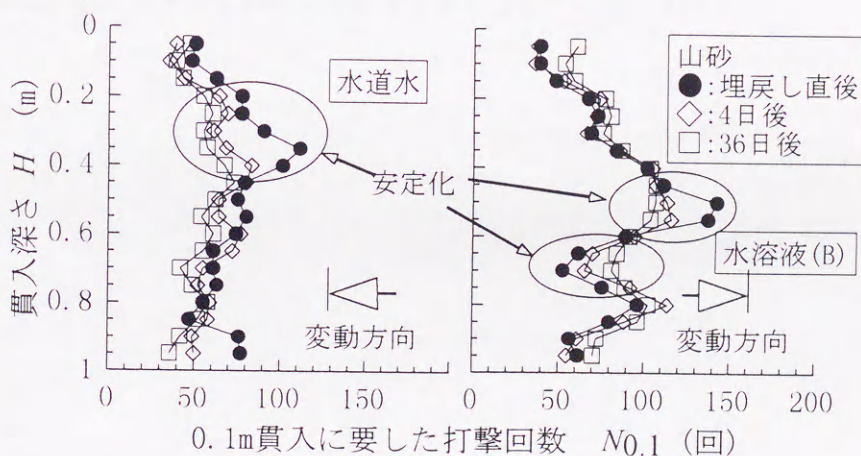


図-7.15 活性剤の有無と打撃回数の変化の関係 (山砂)

度や打撃回数には、活性剤水溶液の効果がみられなかった山砂であるが、「散布バックホー敷きならし」による混合では、時間経過とともに打撃回数は増加し、36日後には全域で水道水を上回ることがわかる。

図-7.14に建設発生土における水道水および活性剤水溶液の「散布バックホー敷きならし」で混合した場合の打撃回数変化を示す。左の水道水の場合、地表面下0.4m付近までに打撃回数の変動がみられ、4日後の打撃回数低下は3日後に記録した降雨の影響が考えられる。地表面下0.4m以下の深さでは経過日数による変動は少ない。右の活性剤水溶液の場合は、

時間経過とともに打撃回数が増加する。

同様に図-7.15に山砂における水道水および活性剤水溶液の「散布バックホー敷きならし」で混合した場合の打撃回数変化を示す。左の水道水の場合、時間経過とともに打撃回数はやや減少の傾向がみられ、右の活性剤水溶液の場合は逆に増加傾向がみられる。両図の埋戻し直後に突出した打撃回数を示した箇所は、時間経過とともに打撃回数が減少し、収束安定化する傾向がある。

以上から、最も効果的な活性剤水溶液の屋外混合法は「ミキサー混合」であるが、実用性の面から有利な「散布バックホー敷きならし」でも、活性剤水溶液の効果が得られると考察できる。

さらに、活性剤による液体表面張力減少で生じた貫入試験の打撃回数低下は、時間経過とともに次第に回復することが明らかとなった。この回復現象の原因は先の7.2節で考察したように、活性剤によって低下した液体表面張力が降雨等の浸透で回復すること、さらに表-7.1のOECD易分解性試験301Bでの添加した活性剤水溶液(B)の生分解率は、約80%以上³⁾と高いことから、活性剤成分の微生物による生分解^{6),9)}も考えられる。その他の化学反応による原因は、活性剤そのものが非反応性であることから否定される。

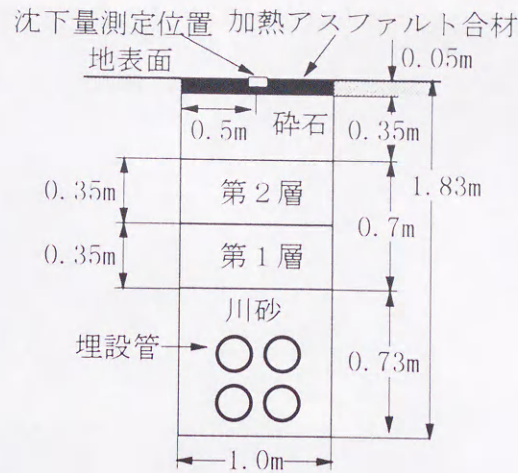


図-7.16 埋戻し断面

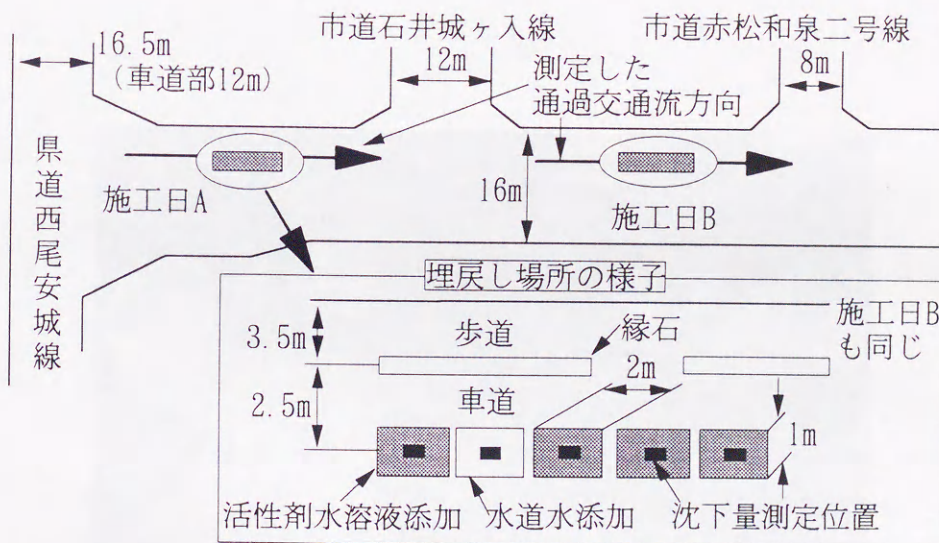


図-7.17 現場周辺と埋戻し場所の概要

7. 4 実施工試験での効果の検証

7. 4. 1 実験方法

図-7.16に埋戻し断面, 図-7.17に現場周辺と埋戻し場所の概要を示す。

施工場所は愛知県安城市内である。締固めに用いたランマーは7.3節の屋外混合法の検討で用いたものと同じである。活性剤水溶液の混合方法は「散布バックホー敷きならし」を



写真-7.3 活性剤水溶液の散布の様子

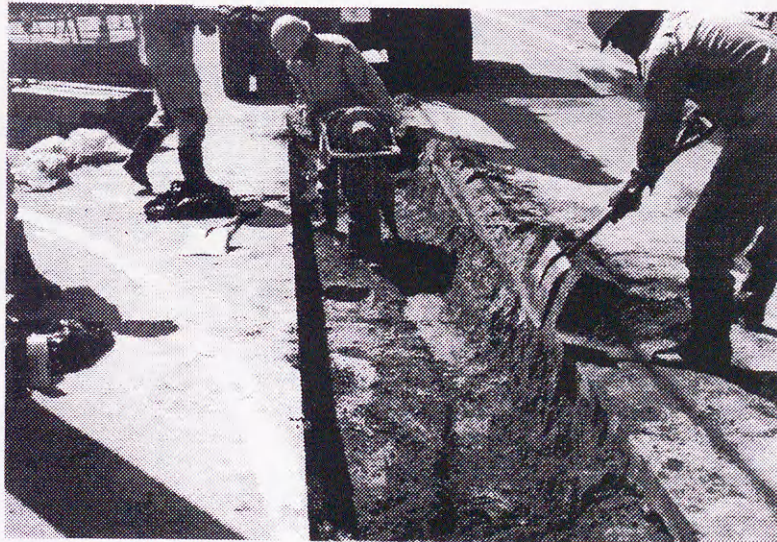


写真-7.4 衝撃型ランマーによる締固め作業の様子

用いた。

活性剤水溶液は図-7.16の埋戻し断面の第1層および第2層の締固めに使用し、締固めは0.35m×2層および0.7m×1層の2種類、活性剤水溶液は水溶液(A)と水溶液(B)を混合して作製

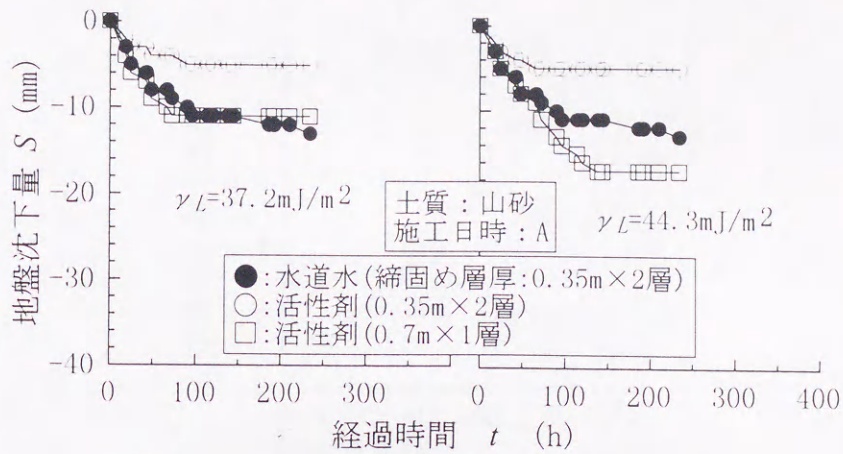


図-7.18 地盤沈下量と経過時間の関係 (施工日A)

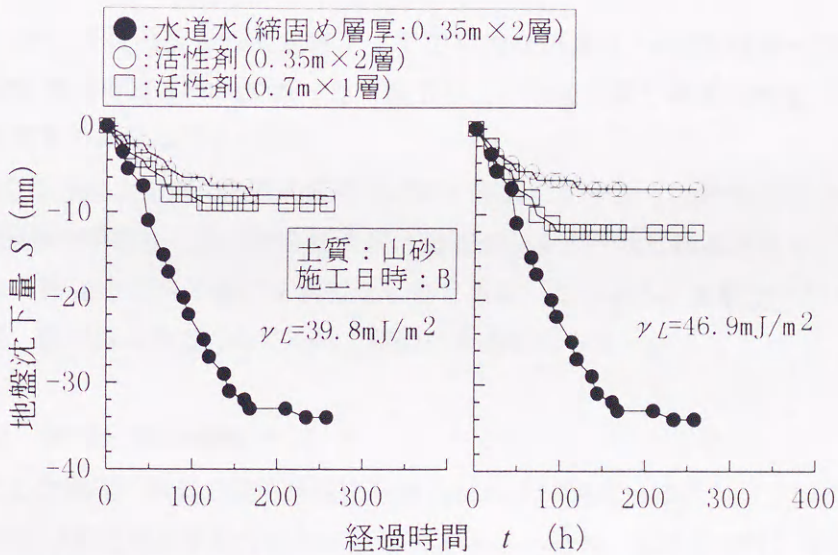


図-7.19 地盤沈下量と経過時間の関係 (施工日B)

した液体表面張力の値が $37.5 \sim 46.9 \text{ mJ/m}^2$ の4種類で、天候や締固め作業によるバラツキを考慮して施工日を変え、それぞれ液体表面張力の大小2つの組み合わせの2種類の活性剤と水道水添加の試験を実施している。活性剤水溶液濃度は0.25質量%、添加量は埋戻し土量あたり $0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$ である。

土質材料は表-7.2および図-7.8の山砂である。仮復旧後の地盤沈下量の測定は、埋戻し直後をゼロとして、図-7.16および図-7.17に示す掘削壁面間の中央部の定められた位置で水準

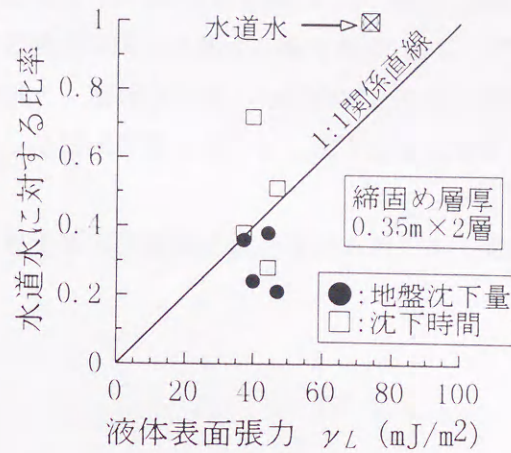


図-7.20 実施工から得られた粒子間力制御法の効果

測量で行った。仮復旧後から測定終了までの平均交通量は、午前7時から午後7時の間で3881台、指定最高時速は40kmであった。施工日ごとの各埋戻し場所は隣接しており、近似的に交通荷重等の条件は同じである。

写真-7.3に活性剤水溶液の散布の様子を示す。写真に示すように散布に用いたノズルの先端には6箇所穴があり、そこから活性剤水溶液がシャワー状に散布される。写真-7.4はランマーによる締固め作業の様子を写したものである。このように衝撃型ランマーはハンドガイド式で、掘削面の長辺方向に沿って締固め作業を行った。

7. 4. 2 実験結果の考察^{20), 21)}

施工日ごとの埋戻し地盤の沈下量変化を図-7.18および図-7.19に示す。

図-7.18の左の活性剤水溶液の液体表面張力が小さい場合、水道水と同じ締固め層厚と埋戻し回数の活性剤水溶液は、水道水に比べて地盤沈下量が減少し、沈下安定に要する時間が短縮する。さらに、2倍の締固め層厚で埋戻した活性剤水溶液とその半分の層厚の水道水は、地盤沈下量および沈下安定に要する時間は同じ程度である。

右の活性剤水溶液の液体表面張力が大きい場合でも、同じ締固め層厚と回数水道水と活性剤水溶液の結果は同様な傾向であるが、2倍の締固め層厚で埋戻した活性剤水溶液の沈下量は、その半分の層厚の水道水の場合より大きくなる。このことから、液体表面張力が小さい場合には、活性剤水溶液による締固めは厚層締固めにも効果的であると考察できる。

図-7.19でも図-7.18と同様な傾向がみられる。このように地盤沈下量の減少および沈下安定に要する時間の短縮が生じる原因は、液体表面張力減少による粒子間力の増加によって、粒子間の摩擦力が低下し、埋戻し直後の締固め密度が増加したためと考察する。

図-7.20は図-7.18および図-7.19の締固め層厚0.35m、埋戻し回数2回の最大地盤沈下量とその時の埋戻し完了からの経過時間を水道水の場合を1として、プロットしたものである。地盤沈下量および沈下時間と、液体表面張力の値の間に有意な関係はみいだせないが、液体表面張力減少によって、地盤沈下量は減少し、沈下安定に要する時間が短縮されることは明らかである。

以上から、提案した粒子間力制御法による締固め効果を、実施工において確認することができた。

7.5 本章のまとめ

本章で得られた結論は以下の通りである。各節ごとに結論を示す。

これらの結論から、粒子間力制御法による締固め法の実用化は十分に可能であり、低い締固め密度が原因で生じる地盤沈下現象等の地盤災害の軽減や防止、さらに、安定した強度と締固め密度を有する地盤の作製に効果が期待される。

7.1節の最適な活性剤について

- 1) 環境や人体への悪影響がない活性剤として、食品添加物として認可されたソルビタン脂肪酸エステル系やグリセリン脂肪酸エステル系、または環境基準等を満足する高級アルコール系をあげた。

7.2節の浸水に対する安定性の検証結果

- 1) 活性剤水溶液による粒子間力制御法で締固めると、浸水前の圧縮強さは低下するが、浸水後の圧縮強さは向上し、締固め時の含水比が浸水後の圧縮強さへ与える影響は少なく、品質の高い締固め地盤が期待できる。
- 2) 浸水によって土の強度が低下する原因の一つは、粒子間力自体の減少である。

7.3節の屋外混合法の検討結果

- 1) 最も効果的な活性剤水溶液の屋外混合法は「ミキサー混合」であるが、実用性の面から有利な「散布バックホー敷きならし」でも、活性剤水溶液による粒子間力制御法の効果が得られる。
- 2) 活性剤水溶液による粒子間力制御法で締固めた地盤の貫入試験の打撃回数低下は、時間経過とともに回復する。

7.4節の実施工試験の結果

- 1) 活性剤水溶液による粒子間力制御法での締固めは、通常の水道水による締固めに比べて埋戻し直後の締固め密度が増加し、その結果、その後の地盤沈下量が減少し、さらに沈下時間が短縮される。
- 2) 活性剤水溶液による粒子間力制御法での締固めは、厚層締固めにも有効である。

参考文献

- 1) 新納 格, 正田要一, 栗林栄一, 泉洋一郎: 掘削土の土質改良方法, 特許第2519614.
- 2) 新納 格, 正田要一, 栗林栄一: 土の締固め・圧密方法, 特許第2816653.
- 3) 花王株式会社: 花王の界面活性剤, 1988.
- 4) 理研ビタミン株式会社: 理研の化成品, 1994.
- 5) ライオン株式会社: 製品カタログ, 1996.
- 6) 北原文雄, 玉井康勝, 早野茂夫, 原 一郎編: 界面活性剤—物性・応用・化学生態学—, 講談社, pp.4-47, 1989.
- 7) 例えば, 環境庁: 外因性内分泌攪乱化学物質問題への環境庁の対応方針について—環境ホルモン戦略計画SPEED'98—, 1998年5月.
- 8) Griffin, W.C.: Jour. Soc. Cosmet. Chemists, No.5, p.249, 1954.
- 9) OECD: Oecd Guidelines for Testing of Chemicals, Organization for Economic, 1994.
- 10) 北原文雄, 玉井康勝, 早野茂夫, 原 一郎編: 界面活性剤—物性・応用・化学生態学—, 講談社, pp.497-508, 1989.
- 11) 地盤工学会不飽和地盤の安定性に関する研究委員会編: 不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.23-58, 1992.
- 12) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一: 非イオン性界面活性剤による表面張力低下の不飽和土の締固めに与える影響, 土木学会論文集, No.582/Ⅲ-41, pp.265-274, 1997.
- 13) 村田重之, 渋谷秀昭: 攪乱・不攪乱灰土の水浸ならびに浸透水の作用による強度低下, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.117-126, 1987.
- 14) 社)地盤工学会編: 改正地盤工学会基準・同解説, pp.10-25, 1996.
- 15) 建設発生土利用マニュアル検討委員会編: 建設発生土利用技術マニュアル, 財団法人土木研究センター, 1995.
- 16) 社)日本化学会編: 土の化学, pp.50-109, 1993.
- 17) 谷藤正三, 森 麟: 貫入試験による地盤支持力の測定, 建設省土木研究所報告, 第83号, pp.1-24, 1952.
- 18) Masada, Y., Izumi, Y., Niuro, T. and Kuribayashi, E.: Study on strengthening of soft soil in physico-chemical treatments, Proc. of the tenth World Conf. on Earthquake Engg., Vol.3, pp.1145-1150, 1992.
- 19) 新納 格, 栗林栄一, 正田要一, 泉 洋一郎: 界面活性剤による掘削土の再利用法, 第37回土質工学シンポジウム—土質工学と環境問題—発表論文集, pp.15-20, 1992.
- 20) 新納 格: サクション制御による急速締固め工法の開発: 低平地研究, 佐賀大学 低平地防災研究センター, No.6, pp.75-83, 1997.
- 21) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一: 非塑性の細粒分を含む土の締固め法, 土木学会論文集, (掲載決定)

第8章 結論

非塑性～低塑性の粘性土を多く含む不飽和土は、土の骨格構造を支える機構によって土粒子の移動が妨げられ、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られない問題を提示した。この問題に対する解決法の提案を目的として、表面物理学的な視点から考察を行い、不飽和状態の土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力の式を提案し、それを実験的に検証し、上述の問題の解決法として、非イオン性界面活性剤での液体表面張力減少による粒子間力制御法を提案した。さらに、非塑性～低塑性の砂質土から粘土に分類される一般的な表層土の粒度を網羅する中間土を作製し、その中間土を対象にして、提案した粒子間力制御法の効果を室内実験で吟味し、実施工試験等の屋外試験で効果を検証し、実用化の足がかりとなる基礎的検討を行った。

以下に各章で得られた結論をまとめる。

なお、本研究での粒子間力（単位： mJ/m^2 ）は、物理学の慣例に従い反発方向を正值としている。よって、不飽和土の粒子間力は常に負（引力）であり、その場合の粒子間力の増加は粒子間力自体の減少を意味することになる。また、付録以外の本論文中での土粒子とは、力学的な乱れによって分離可能な1次粒子と2次粒子以上の粒団の塊を指し、土と記す場合は、これらの1次粒子と粒団から構成される巨視的な粒子集合体を指している。さらに、実験に用いた土の表面は、その物理化学的性質等から、負電荷に帯電している部分が支配的であると考えている。

第1章 序論

研究の目的および意義および全般的な構成について記述した。

第2章 研究の背景

被害規模の大きな地震被害を例に、地盤被害軽減の重要性および地盤改良の有効性を示し、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土は、工学的に安定した地盤とみなせる締固め密

度が得られない問題の重要性を示した。さらに、この問題に対する解決法の案を示し、この案の基本となる土の骨格構造を支える機構を生成する粒子間力の性質について、過去の研究を振り返りながら考察し、研究の目的と意義を明確にした。本章で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 被害規模の大きい地震被害を例にして、地盤被害軽減の重要性を示し、不飽和土の粒子間力によって土粒子の移動が妨げられ、非塑性～低塑性の粘性土を多く含む土は工学的に安定した地盤とみなせる締固め密度が得られない問題を示した。その他にこの低い締固め密度が原因で生じる災害例として、長期にわたる緩速な地盤沈下現象、降雨等で飽和度が増加した場合の地盤沈下現象や斜面崩壊現象等を示した。
- 2) 破壊面上の破壊時全直応力のなかで、飽和土の摩擦抵抗に有効な直応力は有効応力とされるが、不飽和土では有効応力では説明できない粒子間力が大きな影響を与えることを示し、上述の1)で示した問題の解決法の案として、この粒子間力の制御を提案した。
- 3) 締固めに用いるような乱された不飽和土の骨格構造を支える機構は、土中水の化学ポテンシャルと土の物理化学的性質の間の相互作用で発生する粒子間力で、生成されるという考えを示した。

第3章 粒子間力に関する理論的考察

土中水の化学ポテンシャルと土の物理化学的性質の間の相互作用によって生じる粒子間力を、粒子間の液体架橋および粒子接触によるマトリックスポテンシャルの粒子間力と、粒子間とバルク相のイオン濃度差による浸透ポテンシャルの粒子間力の2つに分けて理論的に考察した。本章で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルによる粒子間力を代表する物理量は、親水性表面の土粒子ではマトリックスポテンシャルのサクションであり、液体表面張力によって制御することができる。同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる土では、このサクションの値で粒子間力の大きさを比較することができる。但し、疎水性面が支配的な土壌有機物等を含む土では、固体-液体間の接触角によって、液体表面張力以外に固体-液体間の界面張力および付着仕事の影響が加わる。
- 2) 浸透ポテンシャルによる粒子間力は、約100nm～電気二重層および約1nm～4nmの電気二重層以下の粒子表面間距離において作用し、同じ方法で作製した物性、密度および粒子配列等が等しいと仮定できる土では、浸透ポテンシャルのサクションの値で粒子間力の大きさを比較することができる。また、対象とする土の粒子表面間距離、土粒子の表面電荷密度およびイオン結合等の状態が明らかであれば、イオン交換で制御可能である。
- 3) 粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルと浸透ポテンシャルによる粒子間力をあわせた粒子間力式を提案した。提案した粒子間力式の解説を粒子表面間距離で整理すると

以下ようになる。

1. 粒子表面間距離が約100nm以上：マトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。
2. 粒子表面間距離が電気二重層～約100nm：DLVO理論で定義される浸透ポテンシャルおよびマトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。
3. 粒子表面間距離が電気二重層以下：非DLVO力で定義される浸透ポテンシャルおよびマトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。
4. 粒子が接触する場合：粒子接触による付着力と浸透ポテンシャルによるバルク相イオン数密度相当の粒子間力およびマトリックスポテンシャルによる粒子間力が作用。

第4章 粒子間力特性の検証

土および間隙水の組成の違いを応用して、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルとそれ以外の浸透ポテンシャル等が粒子間力へ与える影響を実験的に検討した。以下の結論から、第3章で提案した粒子間力式は、粒子間力の特性を表す式として、概念的に妥当である。

- 1) 理論的に浸透ポテンシャルによる力が作用する約100nm以下の粒子表面間距離で、マトリックスポテンシャルとそれ以外の浸透ポテンシャル等の電磁的粒子間力との相互作用が存在することを実験的に確認した。
- 2) 従来はDLVO理論によって、土中の陽イオン濃度の変化から説明されてきた液性限界および塑性指数の挙動は、粒子接触を含めたマトリックスポテンシャルの粒子間力およびそれ以外の浸透ポテンシャル等の電磁的粒子間力の作用からも説明できることを示した。
- 3) 表面電荷密度または比表面積の小さい土では、空気間隙率が大きいほどマトリックスポテンシャルのサクシオンは大きくなり、液体表面張力の影響度は増す。電磁的粒子間力がマトリックスポテンシャルのサクシオンへ与える影響は、表面電荷密度または比表面積が大きいほど顕著に表れるが、表面電荷密度または比表面積等の土質組成に応じた特定の空気間隙率または飽和度で、増加にも減少にもなる。
- 4) 表面電荷密度または比表面積の小さい土の一軸圧縮強さは、マトリックスポテンシャルのサクシオンが大きくなるほど増加し、空気間隙率が増すほど液体表面張力の影響度が増し、最大の一軸圧縮強さを与えるサクシオン値が存在する。粒子表面間距離が電気二重層以下では、非DLVO力の水和反発力によって水和陽イオン価数に反比例的に一軸圧縮強さが低下することがある。表面電荷密度または比表面積が比較的大きい土では、表面電荷密度または比表面積等の土質組成に応じた特定の空気間隙率または飽和度で、電磁的粒子間力は一軸圧縮強さに顕著な影響を与える。
- 5) 表面電荷密度または比表面積の小さい土の変形係数は、液体表面張力と土粒子の体積率が支配的な因子であり、電磁的粒子間力が力学的特性を硬化させる場合がある。表面電荷密度または比表面積が比較的大きい土では、表面電荷密度または比表面積等の土質組

成に応じた特定の空気間隙率または飽和度で、電磁的粒子間力は変形係数に顕著な影響を与える

- 6) 表面電荷密度または比表面積の小さい土の非排水せん断強度および破壊時全直応力は、液体表面張力と比例的な関係にあり、空気間隙率が高いほどその影響度は増す。

第5章 粒子間力制御法の提案

界面活性剤による粒子間力制御法を提案し、最も安定した制御効果が期待できる界面活性剤の種類を土粒子表面への吸着モデルから考察し、土構造物の設計・施工において重要な土質特性に対する界面活性剤添加の影響から、その考察を検証した。また、提案した粒子間力制御法で締固めた場合と通常の締固めのそれとを比較し、第1章の1.1節および第2章の2.2節等で示したCoulombの摩擦法則から導いた土の締固め現象に関する考察を実験的に検証した。本章で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 界面活性剤での液体表面張力減少によるマトリックスポテンシャルの粒子間力制御法を提案し、その中でも土粒子の表面電荷に起因する複雑な吸着作用を発生しない非イオン性活性剤による方法が、最も安定した効果を期待できることを土粒子表面への吸着モデルから示した。
- 2) 土構造物の設計・施工において重要な土質特性に対して、非イオン性活性剤は土粒子の表面電荷等の影響を受けず、最も安定した粒子間力制御効果を発揮することを確認した。
- 3) 液体表面張力減少によるマトリックスポテンシャルの粒子間力制御法には、有効な上限および下限の含水比または飽和度があり、その上限の値は土の空気侵入値、下限の値は収縮限界である考えを示した。
- 4) 締固め現象の実験的検証において、液体表面張力の減少に応じて、マトリックスポテンシャルであるサクションおよび一軸圧縮強さは低下し、相対的に締固め密度が増加することを確認し、締固め密度は反発方向を正值とする粒子間力に反比例する摩擦力（粒子間力自体には比例する）と締固め力との平衡によって決定されるとした。Coulombの摩擦法則から導いた締固め現象に関する考察を実験的に証明し、提案した粒子間力制御法の考え方の確かさを明らかにした。

第6章 一般的な表層土に対する制御効果の検証

有機物を含まない一般的な表層土の粒度を網羅する土を、非塑性の砂質土～粘性土および低塑性の砂質土～粘土の2つに分け、2種類の細粒分と中砂を混合して作製した。この作製した中間土を用いて、細粒分含有率や液体表面張力および締固め仕事量の影響を、提案した粒子間力制御法で締固めた場合と通常の締固めのそれとを比較して考察し、提案した粒子間力制御法による締固め効果を検証した。本章で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 非塑性の粘性土を10%~30%以上含む砂質土~粘性土は、粒子間力制御法による締固めによって、初期サクションおよび非排水せん断強さは減少し、低い締固め仕事量でも効果的に締固め密度を増加させる。但し、均等係数の小さな均一粒度でサクション自体が小さい場合には粒子間力の制御効果はみられない。
- 2) 低塑性の粘土（低液性限界）を50%以下含む砂質土~粘土は、粒子間力制御で締固め密度は増加する。粘土分が50%を越える土で制御効果を得るには、高濃度の活性剤水溶液が必要である。
- 3) 低塑性の粘土（低液性限界）を50%以下含む砂質土~粘土において、活性剤水溶液の濃度が不十分な場合でも、粒子間力制御法による締固めは、含水比の影響を過敏に受けないうために、安定した強度と締固め密度を有する地盤の作製が期待できる。

第7章 実用化に関する基礎的検討

提案した粒子間力制御法の実用化に必要な基礎的検討を行い、実用化の足がかりを示した。本章で得られた結論は以下の通りである。各節ごとに結論を示す。これらの結論から、粒子間力制御法による締固め法の実用化は十分に可能であり、低い締固め密度が原因で生じる地盤沈下現象等の地盤災害の軽減や防止、さらに、安定した強度と締固め密度を有する地盤の作製に効果が期待される。

7.1節の最適な活性剤について

- 1) 環境や人体への悪影響がない活性剤として、食品添加物として認可されたソルビタン脂肪酸エステル系やグリセリン脂肪酸エステル系、または環境基準等を満足する高級アルコール系をあげた。

7.2節の浸水に対する安定性の検証結果

- 1) 活性剤水溶液による粒子間力制御法で締固めると、浸水前の圧縮強さは低下するが、浸水後の圧縮強さは向上し、締固め時の含水比が浸水後の圧縮強さへ与える影響は少なく、品質の高い締固め地盤が期待できる。
- 2) 浸水によって土の強度が低下する原因の一つは、粒子間力自体の減少である。

7.3節の屋外混合法の検討結果

- 1) 最も効果的な活性剤水溶液の屋外混合法は「ミキサー混合」であるが、実用性の面から有利な「散布バックホー敷きならし」でも、活性剤水溶液による粒子間力制御法の効果が得られる。
- 2) 活性剤水溶液による粒子間力制御法で締固めた地盤の貫入試験の打撃回数低下は、時間経過とともに回復する。

7.4節の実施工試験の結果

- 1) 活性剤水溶液による粒子間力制御法での締固めは、通常の水道水による締固めに比べて埋戻し直後の締固め密度が増加し、その結果、その後の地盤沈下量が減少し、さらに沈下時間が短縮される。
- 2) 活性剤水溶液による粒子間力制御法での締固めは、厚層締固めにも有効である。

関連する論文等の一覧

1. 学術論文

- 1) Masada, Y., Izumi, Y., Niuro, T. and Kuribayashi, E.: Study on strengthening of soft soil in physico-chemical treatments, Proc. of the tenth World Conf. on Earthquake Engg., Vol.3, pp.1145-1150, 1992.
- 2) 新納 格, 栗林栄一, 正田要一, 泉 洋一郎: 界面活性剤による掘削土の再利用法, 第37回土質工学シンポジウム—土質工学と環境問題—発表論文集, pp.15-20, 1992.
- 3) 新納 格: 土の急速締固め・圧密工法の開発, 低平地研究, 佐賀大学 低平地防災研究センター, No.5, pp.107-112, 1996.
- 4) 新納 格: サクション制御による急速締固め工法の開発, 低平地研究, 佐賀大学 低平地防災研究センター, No.6, pp.75-83, 1997.
- 5) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一: 非イオン性界面活性剤による表面張力低下の不飽和土の締固めに与える影響, 土木学会論文集, No.582/III-41, pp.265-274, 1997.
- 6) 新納 格, 正田要一, 蔣 建群, 栗林栄一: 非塑性の細粒分を含む土の締固め法, 土木学会論文集. (掲載決定)

2. 特 許

- 1) 新納 格, 正田要一, 栗林栄一, 泉 洋一郎: 掘削土の土質改良方法, 第2519614.
- 2) 新納 格, 正田要一, 栗林栄一: 土の締固め・圧密方法, 第2816653.

3. 口頭発表等

- 1) 残土の薬剤処理による資源化に関する研究: 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, 第3部, III-216, 1990.
- 2) 界面活性剤による掘削土の再利用に関する実験的研究: 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第3部, 1992.
- 3) 雲仙・普賢岳の噴出堆積土砂の利用法に関する調査研究報告書: 佐賀大学 低平地防災研究センター, 1993.

- 4) 雲仙・普賢岳の噴出堆積土砂の利用法に関する調査研究：第3回科学技術研究交流シンポジウム講演集，佐賀県，pp.4-17，1994.
- 5) シルト質および粘土質建設残土の急速圧密手法の開発：佐賀大学と民間機関等との共同研究成果報告，佐賀大学 科学技術共同開発センター，No.5，pp.54-55，1994.
- 6) 雲仙・普賢岳の噴出堆積土砂の利用法に関する調査研究：VSIニュース，Vol.10，No.1，1995.
- 7) 土の締固め・圧密促進剤の開発：第4回科学技術研究交流シンポジウム—環境にやさしいテクノロジー講演集，佐賀県，pp.31，1995.
- 8) 新時代を築く火山噴出物—その性状と利用の手引き—，V S I 研究会編，リアライズ社，pp.41-43，1995.
- 9) 土の急速締固め・圧密方法に関する研究：第50回土木学会年次学術講演会，第VI部門，VI-313，1995.
- 10) 界面活性剤による掘削土再利用に関する一考察：第51回土木学会年次学術講演会，第VI部門，VI-116，1996.
- 11) 表面張力低下による締固め性改善に関する研究：第52回土木学会年次学術講演会，第III部門，III-B294，1997.

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、豊橋技術科学大学工学部建設工学系教授 栗林栄一先生にご指導、御鞭撻を賜りました。長い間有り難うございました。心から深く感謝いたします。そして、本研究の審査、討論ならびにご指導を賜りました豊橋技術科学大学工学部建設工学系教授 加藤史郎先生、同 物質工学系教授 逆井基次先生、同 建設工学系教授 角 徹三先生、同 建設工学系助教授 河邑 眞先生に厚くお礼申し上げます。

佐賀大学理工学部都市工学科教授 三浦哲彦先生には、土の力学的挙動とその解釈に関する数多くのご指導を賜りました。また、先生の教育研究に取り組む姿は、大変勉強になりました。心からお礼申し上げます。そして、佐賀大学低平地防災研究センター教授 林 重徳先生には、著者の地盤改良の研究を不飽和土の力学特性の研究として発展させるヒントを頂きました。また、同 低平地防災研究センターの日野剛徳博士には、有明粘土に関する情報を頂きました。お礼申し上げます。

インド工科大学カブール校教授 Madhira R.Madhav先生には、研究の進め方等について勉強させて頂き、また夫婦共々お世話になりました。心から感謝しております。鹿児島大学工学部海洋土木工学科教授 北村良介先生には、不飽和土の力学特性に関してご意見を賜りました。お礼申し上げます。

花王株式会社和歌山研究所 水沼達也室長には、界面活性剤や数多くの界面活性作用に関する資料等を提供して頂きました。お礼申し上げます。株式会社光建 正田要一社長は、本研究で成立した2つの特許の特許権者であり、ご支援を賜りました。本研究で発明された粒子間力制御法の実用化を達成されることをお祈り申し上げます。

本研究の大部分は、豊橋技術科学大学工学部建設工学系栗林研究室で実施されたもので、蔣 建群博士をはじめ一瓢良子氏（大有建設株式会社）、濱野秀信氏（株式会社大林組）のご助力を頂きました。お礼申し上げます。

以上にお名前をあげさせて頂いた方々以外にも、数多くの皆様のご助力を賜りました。あらためて深くお礼申し上げます。次第であります。

最後になりますが、私のわがママを許してくれたわが妻 裕子、わが子 希彬、伯邦、そして父 良孝、母 徳子に感謝いたします。

1999年 1月 新納 格

記号の一覧

- τ_f : Coulombの破壊面上の破壊時のせん断応力
 c : 見掛けの粘着力
 ϕ : 内部摩擦角
 $\tan \phi := \mu_f$: 摩擦係数
 σ_f : 破壊面上の破壊時全直応力
 $\sigma_f \tan \phi$: 摩擦力
 σ'_i : Terzaghiの有効応力, $i = 1, 2, 3$
 σ_i : 全応力, $i = 1, 2, 3$
 u : 間隙圧(中立応力)
 α_0 : Skemptonの有効応力式の粒子接触面積
 x : Skemptonの有効応力式の土粒子自身のせん断抵抗角
 C : Skemptonの有効応力式の土の圧縮率
 C_S : Skemptonの有効応力式の土粒子の圧縮率
 u_a : 間隙空気圧
 u_w : 間隙水圧
 χ : Bishopの有効応力式のパラメーター
 $u_a - u_w$: サクシヨン
 $\tilde{\sigma}$: Lambeの有効応力式の鉱物間接触応力
 α_m : Lambeの有効応力式の鉱物間接触面積
 R : Lambeの有効応力式的全粒子間反発力/全粒子間面積
 A : Lambeの有効応力式的全粒子間引力/全粒子間面積
 p'_m : マトリックスポテンシャル, p'_s : 浸透ポテンシャル
 E_c : 締固め仕事量
 w_L : 液性限界(%), w_p : 塑性限界(%), I_p : 塑性指数
 $\sigma_{1,2,3}$: 主応力
 w : 含水比

- x_m : Aitchisonの有効応力式のマトリックスポテンシャルの係数
 x_s : Aitchisonの有効応力式の浸透ポテンシャルの係数
 $\Delta\mu$: 化学ポテンシャル低下量, $\text{pF} = \log|\Delta\mu|$, $(u_a - u_w) = -(\Delta\mu)$
 μ : 土中水の化学ポテンシャル
 μ_0 : 純水の化学ポテンシャル
 $F(L)$: Langmuirの液体分離力
 L : 固体表面からの水膜厚さ
 T : 熱力学(絶対)温度
 v : 液体の分子体積
 p/p_{sat} : 相対蒸気圧
 p_{sat} : 飽和蒸気圧
 ρ_s : 土粒子の密度
 ρ_d : 土の乾燥密度
 dG : ギブスの自由エネルギーの増加分
 γ_{L0} : 平面状の液体-気体間の液体表面張力
 γ_L : 曲面をもった液体-気体間の液体表面張力
 δ : Tolmanの液体表面張力の補正に関する係数, 約 10^{-10}m
 R : 二粒子モデルの粒子間水膜の曲率半径
 F_K : Rumpfの毛管圧による粒子間力
 d : 二粒子モデルの粒子直径
 β : 粒子間の液量に対する角度
 ΔP : Laplace圧 = $u_a - u_w$
 F_R : Rumpfの線張力による粒子間力
 k : Rumpfの粒子間力式の線張力 = $\gamma_L \ell = \gamma_L \pi d \sin \beta$
 ℓ : 固体表面上の液体の接触線長
 θ : 固体-液体間の接触角
 F_M : マトリックスポテンシャルによる粒子間力
 $F_A(x)$: 新納の粒子間力
 $F_{DLVO}(x)$: DLVO理論による粒子間力
 $F_{UDLVO}(x)$: 非DLVO力による粒子間力
 F_S : 粒子接触による粒子間力
 a_1, a_2, a_{21}, a_{22} : 新納の粒子間力式の係数

- σ_z : 引張強さ
 ε : 神保らの引張強さ式の空隙率
 κ : 神保らの引張強さ式の見かけの粒子配位数
 D : 平均粒径
 F_D : Derjaguinの粒子接触による粒子間力
 W_{132} : 固体1と2の間の媒質3の中での付着仕事
 a : JKR理論の粒子接触領域の半径
 F : 直接に粒子に作用する外部負荷
 K : 粒子固体の弾性率
 F_{JKR} : JKR極限における粒子接触による粒子間力
 γ_{SV} : 固体-溶媒間の界面張力(液体中では γ_{SL} , 真空中では γ_S)
 γ_{SL} : 固体-液体間の界面張力
 γ_S : 固体-気体間の固体表面張力
 ε_0 : 真空中の誘電率 = 8.854×10^{-12} F/m
 ε_r : 媒質の比誘電率(例えば25°Cの水 = 80)
 x : Coulombの式の二個の電荷間の距離
 e : 電気素量 = 1.602×10^{-19} C
 Z_i : イオン i の原子価数
 ρ_{xi} : 固体表面距離 x におけるイオン i の濃度(数密度)
 $\rho_{\infty i}$: バルク相($x = \infty$)におけるイオン i の濃度(数密度)
 q_u : 一軸圧縮強さ
 n_a : 空気空隙率
 F_H : 水和反発力
 F_{H0} : 表面の水和性に依存する水和反発力の経験値, 3 ~ 30 mJ/m²以下
 λ_0 : 水和反発力減衰長(1:1電解質の場合, 0.6 ~ 1.1 nm)
 γ : 相互作用自由エネルギー
 V_s/V : 土粒子の体積率
 V_w/V : 体積含水率 = $\theta = \rho_w w \rho_d$
 S_r : 飽和度
 ϕ_d : せん断抵抗角(排水せん断試験), 真の内部摩擦角
 ε : 軸ひずみ

$\sum_i \rho_{xi}$: 粒子間距離 x における全イオン数密度(濃度)

$\sum_i \rho_{xi}$: バルク相($x = \infty$)における全イオン数密度(濃度)

1M : イオン数密度の単位 = $1 \text{ mol/dm}^3 = 6.022 \times 10^{23} \text{ 分子/dm}^3$

ψ : 電位

ψ_0 : 表面電位

Q : 電荷(C), $1 \text{ C/m}^2 = 0.16 \text{ nm}^2$ あたり1単位電荷

F_{DMT} : DMT極限における粒子接触による粒子間力

F_{MS} : 粒子接触のあるマトリックスポテンシャルによる粒子間力

F_{FW1} : FogdenとWhiteによる固体間の付着が強い場合の粒子間力

F_{FW2} : FogdenとWhiteによる曲率半径が小さい場合の粒子間力

W : 付着仕事 = ギブスの相互作用自由エネルギー

x : 粒子表面間距離

k : Boltzmann定数 = $1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

E : 電場の強さ

V : 土の全体積 ($V = V_a + V_s + V_w$)

V_a : 空気等のガス体積

V_s : 土粒子等の固体体積

V_w : 水等の液体体積

U_c : 均等係数

U'_c : 曲率係数

付録A 土鉱物の表面電荷の起源

概要：本論文で用いた粘土鉱物の表面電荷の起源について考察する。

土は固相、液相および気相の三相から成り立っている。土の表層部の気相は、接する大気と比べて二酸化炭素濃度が高く、液相部を成している土中水は単なる水ではなく、各種の成分が溶解した溶液として存在し、環境条件はもとより、固相の性質によっても変化する。固相のうち土鉱物や腐植から各種の成分が土壌溶液に放出され、固相-液相間で溶解・沈殿平衡が成立している。

本論文で用いた層状粘土鉱物は、基本的にケイ素四面体シートとアルミニウムまたはマグネシウム八面体シートから構成され、それぞれのシートで陽イオンの交換が発生している。置換する陽イオンの大きさはほぼ同じで、荷電の過不足のみが生じ、結晶構造には大きな変化は生じない場合を同形置換といい、この荷電を一定荷電と言う。例えば、四面体シートでは Si^{4+} (0.4 Å) よりイオン半径の大きな Al^{3+} (0.053nm)、八面体シートでは Al^{3+} が Fe^{2+} (0.078nm) や Mg^{2+} (0.072nm) と置換し、荷電の不足が生じて負荷電を発生する。

粘土鉱物の構造末端または欠損部には1個のSi、Al、Fe原子とだけ結合している水酸基があり、その一部はプロトンの解離、付加によって負または正の荷電が発生する。この荷電の発生は、溶液のpHおよびイオン濃度に大きく左右されるので変異荷電と呼ばれている。

図-4.2で示したように粘土鉱物は、四面体シートと八面体シートが1枚ずつ重なっている1:1型鉱物、1枚の八面体シートを2枚の四面体シートでサンドイッチ状にした2:1型鉱物に大きく分類できる。本論文では1:1型鉱物として最も風化の進んだオキシソルの主要粘土鉱物であるカオリナイトを用い、2:1型鉱物としてスメクタイトを約50%含有する有明粘土を用いている。

スメクタイトの中でも有明粘土の主成分であるモンモリロナイトは、八面体シートの Al^{3+} が Mg^{2+} と同形置換して負の層荷電を発生している。さらに層間に各種水和イオンを保持し、陽イオンの水和度に応じて12~16 Åに膨張する。この陽イオンは水分子を介して層荷電と結合しており、他の陽イオンと交換が起こる。層間水は有機分子とも交換できるとされ



写真-A.1 非イオン性界面活性を添加した有明粘土（倍率：500倍）

ている。さらに、写真-A.1および写真-A.2に示すように、有明粘土は土壤有機物を含有している。土壤有機物とは、植物が光合成によって生産した有機物が土壤動物や微生物の働きで再び炭酸ガスへと分解されていく途上で、土壤の各種成分や土壤環境の作用で一時的に安定化されて土壤中に滞留しているものと定義される。

土からのこれらの有機物の抽出は、 NaOH 、 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ などの希薄溶液によって土壤有機物を解離させ、また金属イオンとの錯体結合を切ることによって抽出できるが、土壤有機物の疎水性に着目し、アセトン等の有機溶媒による方法も試みられている。抽出された有機物は酸・アルカリへの溶解によって腐植酸、フルボ酸、ヒューミンの3つに分けられる。腐植酸は量的に最も多く、暗色無定形の高分子を主成分とする多種多様な物質の集合体である。フルボ酸は腐植酸より酸素に富み、炭素含有量は少ない。ヒューミンは酸・アルカリに不溶であるが、その原因はヒューミン自体の分子量が巨大であり、土壤の粘土鉱物や鉄・アルミニウムの酸化物と錯体を形成しているためと推察されている。このような土壤有機物の機能は、土壤全体の陽イオン交換能の20%~70%を受け持ち、金属イオンの保持機能にあり、金属イオンとの間で錯体を形成するとされている。

写真-A.1に0.5質量%濃度の非イオン性界面活性剤の水溶液(A)を加えた有明粘土の39kPa



写真-A.2 水道水を添加した有明粘土（倍率：500倍）

での再圧密試料、写真-A.2に同量の水道水を添加した場合の同じ条件の再圧密試料の電子顕微鏡写真を示す。いずれの試料にもけい藻等の土壌有機物の存在が確認できる。

写真-A.1の活性剤水溶液を添加した試料は、写真-A.2の綿毛構造に近い状態にある水道水を添加した試料に比べ、土粒子が配向化して平行性の高い構造となっていることがわかる。綿毛構造は粒子間の反発力が引力に比べて小さいときにできる構造で、粒子の再配列が配行構造に比べ困難で、圧密が完了するに要する時間は長いとされている。よって、両者の土粒子の配向構造の相違は、液体表面張力減少による粒子間力の増加によって、土粒子の再配列が促進されたのが原因と考えられ、本論文の粒子間力制御法の効果を、顕微鏡写真からも検証することができる。

付録B イオン交換と吸着現象

概要：本論文で用いた粘土鉱物に、塩類を加えたときに起こる化学変化をイオン交換と吸着にわけて考察する。

1. イオン交換

イオン交換は、土の固相表面のイオン交換基上で起こるもので、土中水に溶存した状態とイオン交換基に保持された状態との間の変化と定義できる。イオン交換基に保持されたイオンのうち、一部は液相中に拡散的に分布している。イオンが土粒子表面に保持される力は、イオンと荷電表面との間の電氣的相互作用による引力である。土はイオン交換体（粘土鉱物や腐植が結合して複合体を形成したもので、陰・陽イオンに対する吸着能を有する）の混合物であり、環境等の要因によって組成や荷電特性が変化する。土には粘土鉱物中の同形置換、鉱物結晶端の破壊原子価部位や非晶質アルミノケイ酸塩、酸化物、水酸化物表面に存在する水酸基に基づく荷電、腐食物質のカルボキシル基の解離による荷電が存在し、イオン交換基として機能している。

同形置換による荷電密度は、液相中のpHや塩濃度の影響を受けない一定荷電である。スメクタイト鉱物で多く、60~100cmol/kgである。これに対し鉱物結晶端の破壊原子価部位や非晶質アルミノケイ酸塩、Fe、Al、Mn、Si等の酸化物および水酸化物表面に存在する水酸基に基づく荷電、腐食物質のカルボキシル基の解離による荷電は、pH依存性の変異荷電である。通常、スメクタイト等の鉱物は同形置換による荷電が主要とされているが、本論文で用いた有明粘土は、腐食物質や酸化物鉱物を含有しており、変異荷電的性質も加わっている。一般的なpH範囲（5~7）ではAlやFeの水和酸化物は正に、粘土鉱物は負に帯電している。

2. 吸着

イオン吸着現象は、液相のイオン濃度が境界面で変化する現象と定義される。吸着は土壌固相表面または固相中に元素が保持される現象であり、表面または固相の変質を伴う。

固相は無機成分と有機成分とから成り、無機成分は1次鉱物と風化して生成された2次鉱物である。2次鉱物は各種粘土鉱物やFe, Al, Mn, Si等の酸化物または水酸化物で構成され、環境条件によって変化する。2次鉱物は比表面積が大きく、さらに荷電しており、表面に交換性イオンを保持している。有機成分は複雑な高分子の混合物で解離基をもち、イオン交換や無機成分との複合体形成に関与している。

吸着にはvan der Waals力だけが働いている弱い物理吸着から共有結合の強い力が働いている化学結合までの広範囲の結合エネルギーがある。多くの物質は、水のような極性の強い媒質と接すると、本来電荷をもたない物質であっても帯電が生じる。水溶液中のイオンの固体への吸着は、熱運動して一様に混合しようとするイオンと界面の電位によって決定される。界面電荷は、界面の近傍にある陽イオンと陰イオンの分布に影響を与え、界面電荷と反対符号のイオンを引きつけ、同符号のイオンを遠ざけ、電気二重層が形成される。しかしながら、水和イオンの中心は表-4.5に示した水和半径以内には近づけない。そこで、界面から水和イオン半径に等しい距離にあるStern面が形成されることになる。

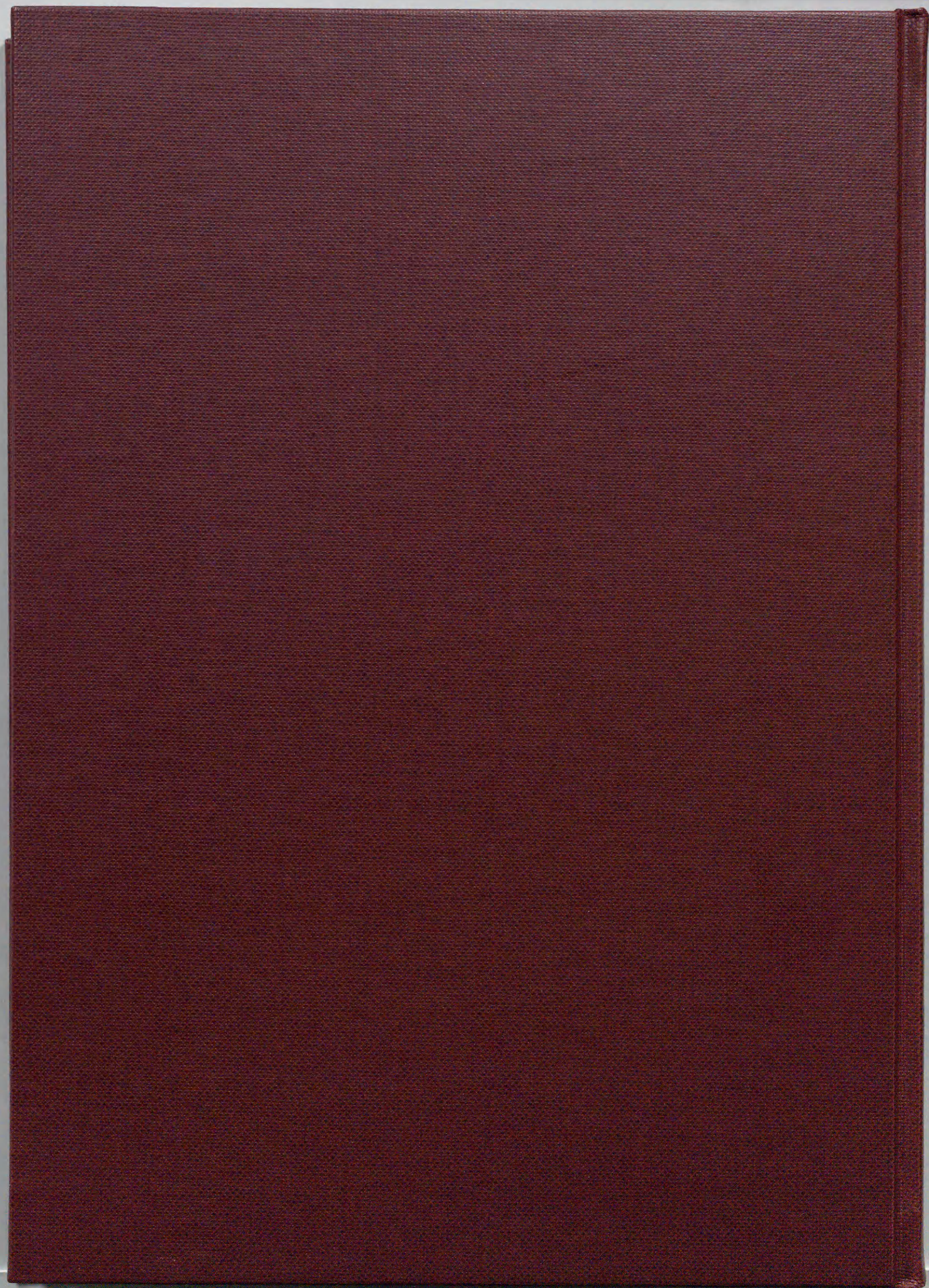
電気二重層は、Stern面の外側にある拡散領域と内側の内部領域に分けられる。Stern面より内側にイオンの中心が存在するイオンは特異吸着イオンであり、自らの水分子を脱水するか、歪ませて吸着して存在している。この特異吸着イオンは熱運動に勝ち、脱水和するほどの力で吸着しており、一般的なイオン交換反応では交換脱着されない。

陽イオンの粘土への吸着における選択性は、 Na^+ や K^+ 等のアルカリ金属イオンはイオン半径の増加と共に増加する。すなわち、イオン半径が大きなものほど水和半径が小さくなり、粘土表面の負電荷と陽イオン間の静電的結合が強まるためである。しかし、2価の陽イオンではイオン半径との明瞭な関係は認められていない。また、荷電数の高いものほど選択的に吸着するとされており、その場合は Ca^{2+} 、 $\text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 、 Na^+ 、 NH_4^+ の順序となる。

変異荷電性の交換基は Ca^{2+} の選択性、一定荷電性の交換基は K^+ 、 NH_4^+ に対する選択性が高いとされている。本論文で用いたスメクタイト鉱物では、 K^+ 、 NH_4^+ が特異的に吸着される特異吸着イオンであり、第4章の図-4.14、図-4.17および図-4.20において、 K^+ の特異的な吸着現象がややみられる。この吸着現象にはイオン半径の大きさと小さな水和度が関係している。これらの陽イオンは上下のケイ酸塩層を強く引きつけ雲母様構造をつくり、水分子が侵入できない形となる。従ってコンシステンシー限界や膨潤性の低下を示す。しかしながら、この固定態も水和力の大きな Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ によって徐々に交換される。

土壌粘土鉱物への有機イオンの吸着は無機イオンと基本的には同じであるが、有機イオンは無機イオンよりも大きなものが多く、構造も複雑なため、静電的あるいは配位子交換による結合のほかに、水素結合、van der Waals結合あるいは立体化学的性質が関係している。正電荷をもつ有機イオンは、粘土鉱物に静電的に結合できる。それゆえ陽イオン交換容量の大きなモンモリロナイトを主体とする本論文で用いた有明粘土は、カオリナイトを主体とする土よりも多く吸着されることになる。さらに、カオリナイト鉱物に吸着された有機イオンは NH_4Cl 溶液で離脱するが、モンモリロナイトに吸着した有機イオンはほとんど溶出

しない。つまり、単に静電気的作用による吸着ではなく、立体化学的性質も関与していると考えられる。有機イオンの正荷電の発現は、官能基におけるH⁺の付加や除去が大きく影響するので、吸着量は土壌pHに大きく左右される。有機イオンの正荷電は酸性が強くなるほど発現しやすく、アルカリ性土壌よりも酸性土壌で多く吸着される。



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

