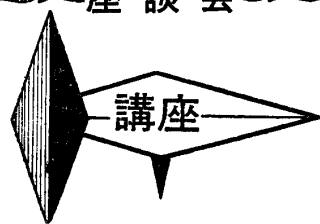


## 座談会



## 「地震応答解析のための土の動的性質」

主催：講座委員会

開催日：昭和60年12月19日

場所：土質工学会会議室

## 出席者（敬称略）

司会：栗林栄一（豊橋技術科学大学工学部）

龍岡文夫（東京大学生産技術研究所）

国生剛治（(財)電力中央研究所原子力部）

海野隆哉（国鉄構造物設計事務所）

（以上、本講座執筆者掲載順）

岩崎好規（(財)大阪土質試験所）

谷口栄一（建設省土木研究所動土質研究室）

土岐憲三（京都大学防災研究所）

西尾宣明（東京ガス㈱技術研究所）

萩原庸嘉（鹿島建設㈱技術研究所）

## 担当講座委員：

牧原依夫（㈱東京ソイルリサーチ）

村上幸利（山梨大学工学部）

（前）那須 誠（国鉄鉄道技術研究所）

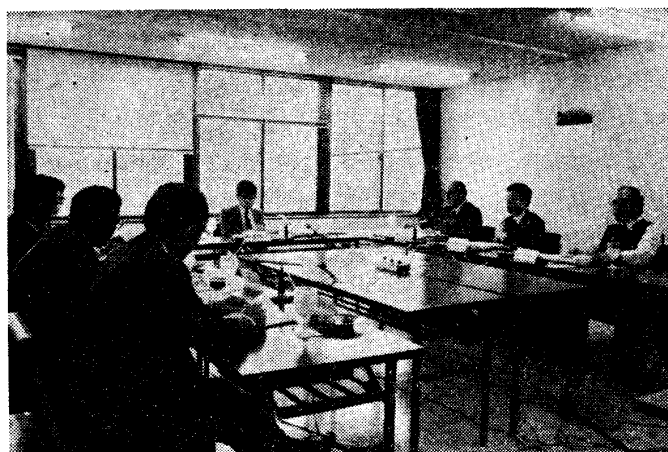


写真-1

## 1. 地震応答解析の現状と動向

司会：まず最初に、この講座の表題には「地震応答解析のための」という修飾が頭に付いております。あえて付けたわけは、既に4年前に液状化に関する講座が開かれており、今回の講座がそれと非常に近接した分野であって、内容が重複しては読者に迷惑でありますので、地震応答解析のための土の動的性質ということにした次第です。

まず、土に関連した地震応答解析の現状と動向を最初に吟味してみたいと思います。恐れ入りますが、土岐先生からそのことについての御意見がありましたら、お聞かせ願えないでしょうか。

土岐：現在、この地震応答解析は、特に地盤、あるいは土に関連した応答解析を行っているほとんどの場合が、いわゆる等価線形化の手法なのです。もちろん、それから少し離れたところのものも多少ありますが、概して等価線形化手法によるものなのです。これは特に、構造関係では古くから使われてきたものでありまして、もうそろそろ土が絡んだ地震応答解析の分野においても卒業してもいいのではないかという印象をかねてから私は持っております。

私の個人的な視点だと思いますが、等価線形化手法というのは、現時点から見れば、中途半端なものではないかと思うのです。と申しますのは、両極端があるわけです。今、行われているような等価線形化手法による地震応答解析と

というのは、実は、これは線形系解析でほとんど出来ることにすぎないのですね。言い換えますと、応力レベルで見ますと、線形系であっても非線形系であっても、結果においてはほとんど変わらないのですね。ですから、線形解析で応力を決めておいて、あとは土の非線形の応力～ひずみ関係から、ひずみを出せばそれで十分なはずですね。これは正しい等価線形化をやった場合とほとんど変わらない結果が得られるはずで、今のレベルであれば、こういった非線形化で十分に出来る話の域を出ていないのではないかと思うのです。

それから、今のような非線形解析から一步出するためには、やはり今は計算機の力が随分強くなっておりますから、少々のことなら簡単に出来るわけでして、もう少しきちんとした非線形、あるいは非弾性解析というものをやっていったらいいのではないかと思います。個々のレベルではそういうことを皆さんおやりになっているわけですが、実際の場面が使われているかということになると、決してそうではないわけです。多くの人がいろいろな場所で、きちんと非線形解析というのを使いましょうと言いつてもいいのではないか、そういう時期にきているのではないかということに非常に感じております。

司会：ただいま、土岐先生から大分手厳しいお話を承りましたが、国生さんの場合、原子力という非常に厳しい問題に携わっておられますし、萩原さんはおそらくコストに絡む要求に応ずるためにかなり細かいことをやらなければならないお立場ではないかと思うのですが、土岐先生の御発言に対して、何か反論という意味ではなくて、お

## 講座

考えを述べていただけませんか。

国生：反論のしようもありません。私が今のお話を聞いて、まず感じますのは、一つはこの講座自身の性格、つまり応答解析のための土の動的性質というものに対してのイメージが、ある意味ではまだ等価線形に結びつくような世の中のレベルであることです。土岐先生のおっしゃった簡易的な方法というものはもちろんあるかもしれませんが、地震応答解析のための土の動的性質を動的な意味で破壊まで追求するようなレベルでとらえる人が、パーセンテージ的にはまだそう多くはないのではないかと。そういうことを感じるわけです。

あと、私自身が大学というところよりは、むしろ現場の問題に絡むところにおります関係で、等価線形というものが実務的にはこれからも中心になっていく、まだピークに達していないという段階ではないかと思えます。実際そういう意味での動的解析が、設計面でうまく使われているという場面ですら、それほど多くはないという印象がありますし、震度法が設計の世界ではまだ幅をきかせているということから考えますと、読者の中心的興味はやはり等価線形での動的解析にあると解釈できますもので、そこを中心に原稿を書きました。

萩原：私も確かに土岐先生がおっしゃるとおりだと思いますが、たとえば実際の解析をする場合でしたら、当然、非線形でやるほうが説明がよくつくと思うのですが、設計は等価線形でやる場合のほうがほとんどですね。それと、建物と土と一緒に解析するとき、土の領域をどこまでとるかという問題があります。この場合、当然、モデルなりフィロソフィーとの兼合いがあるのですが、かなり質点を多く取ったり、非線形性を考えたりしますと、複雑な計算になって計算時間も随分かかってきますので、設計という立場では国生さんがおっしゃったように、等価線形でやっているというのが実感です。

## 2. 動的試験法の現状

司会：土岐先生の将来展望としては、今の計算技術でいくと非線形解析にもっていくべきだということで、皆さんもそう考えておられると思いますが、応答解析についてはこのへんにしまして、いよいよ本論に入っていきたいと思えます。

本講座の2章で、室内試験法としまして、安田さんが国内における室内の動的試験装置の使用状況について統計を示しておられます。これは国内の大学、研究機関等約60機関をお願いをしまして、一体どんな動的試験をやっておられるかを調べたものですが、これで見ますと、やはり繰返し三軸試験が一番多いようです。とにかく、これが圧倒的に多いと



いうことで、結局、我々の情報として入手しやすいものは、室内試験では繰返し三軸試験であるということでございます。

こういうふうな現状から見て、非常に細かい議論するにはまだ情報が必ずしも十分ではありません。ある仮説の下に解析を進めようと思っても、支援する試験装置等が、必ずしも日本全国にあるわけではないということが読み取れるのではないかと思います。

このことについて、何か御見解がございましたら、お願いしたいと思うのですが、谷口さんいかがでしょうか。

谷口：繰返し三軸試験が必ずしも実際の地盤の応力状態を正確に表現しているとは思いませんが、今のところ、現実には試験として一番簡単であるということに使われているのだと思えます。

統計データを見ましても、かなりの数の試験機が日本全国にあるということで、現状は試験機を普及させることに努める段階ではなくて、もう試験機はかなりたくさんあるので、それを標準化しよう、出来るだけ質の高いデータをどこからでも入手出来るようにしようというのが現在の動きだと思います。それで、土質工学会の研究委員会で、標準化ということを目指して活動がなされておりますけれども、今はまだ標準化されていないものですから、たとえば一つの大きな業務をいろいろな会社に分けて発注しますと、各会社で供試体のサイズが違うとか、あるいはB値の計り方がまちまちだとかという問題があります。データそのものの信頼性を高めるために、発注した人がかなりの知識を持って自分でコントロールしないと、いいデータが得られないというのが現状だと思います。そういう意味でこれからの課題は標準化でして、誰がやっても大体似たようなデータが得られるというところを目指すべきではないかと思います。

龍岡：動的試験は、本当の意味での動的な試験である超音波パルス法と共振法、ゆっくりと繰り返しているという意味での準静的な試験の2つに分かれるわけです。

最初の頃は、非常に小さいひずみや小さい応力を直接計るのが難しかったために、元々日本で開発された共振法がアメリカで発達してから日本に入ってきて、一時それらがかなり使われていたようですが、歴史的に見ると、もうそれらは歴史の舞台から退かざるを得ない感じになっていると思うのです。というのは、静的な応力とか、静的なひずみを小さいところまで計れるようになってきたために、共振法試験機とか、超音波パルスの試験法の利点が欠点になって、特にそれではなければならないということがなくなったために、相対的に消えていく試験機ではないかと、私は正直に思い始めております。自分自身が共振法を長い間やってきたので、こういうことを言うのは過去を否定するようなのですが、これはエンジニアリングの立場の正直な気持ちで、それが1つの10年間の歴史だっ

たなあという気がしております。

司会：そうしますと、繰返し三軸試験はいかがでしょうか。

龍岡：正直申しまして、黙って発注しますと、時として、むしろやらない方がいいような結果が出るのですね。今までどこか信頼のおけるところで得られた過去のデータを使った方がよい場合がある。実際には管理をきちんとしないと、むしろやらない方がいい場合があると言わざるを得ないと思います。



司会：標準化というのは、やはりそういうふうにならないように、装置だとか、試験法あるいは試料の採取方法を標準化しようということなのでしょうか。

岩崎：だから、何かの動的試験機を発注して、そこに人間を付けても動くわけじゃないですよ。そういうレベルではだめで、もうちょっと考えなければいけないでしょうね。

谷口：この間、液状化の一斉試験がございましたが、それを見ますと、10年前と今回と比べると随分ばらつきが少なくなっています。つまり、学会全体としての知識が増えて、無知に基づくばらつきというものはだんだんなくなってきました。我々が得たそういう知識は標準化という形で、だれにでも還元していけばいいと思うのですけれども。標準化したら全体のレベルが上がるということで、特に飛び抜けて高い技術をもつ人が若干損をするかも知れませんが、全体としては、悪いことよりもいいことの方が多いのではないかと思います。

国生：試験法自身はかなり発達したと私は思っております。難しい試験をしようと思ったら、それなりにお金さえかければいろいろできる。いわば先程、土岐先生がおっしゃったような意味での等価線形の世界では、もうそこらへんは整ってきたと思います。ただ、そこから先へ進む段階で、試験法とそこから出てくる物性の問題は、今、研究者の一番の興味的になっております。そこにはいわゆる試験法という意味でもまだまだ進む余地があるのではないかと思います。いわゆる等価線形の世界では、いろいろな方がいろいろなことをやられて大体のことはわかっておりまして、それなりに注意深くやれば室内実験の範囲では十分に信頼性のあるデータが得られると解釈しております。

ただし、問題は原位置と室内の対応はどうかということで、これはかなり永遠に近いテーマになります。原位置での値を目指して室内試験を工夫するということが、いわば本当の意味での試験法の完成になると思います。

司会：ただいまの御発言のように、繰返し三軸試験はもう既に標準化の時代を迎えつつあるということですが、それより細かい試験については、まだ試験法そのものも問題

でありますし、改良の余地があります。適用法については、これからの問題だというふうな御発言だと思います。

### 3. 土の動的性質

司会：そこで、こういう試験の結果をこの講座ではまとめて要約しているわけですが、せん断弾性係数というのは本当にあるのだろうかとか、それから、材料減衰定数というのはおかしい言葉遣いではないかと思えます。これについては、国生さんは系統的に講座の中でおまとめになっておられるのですが、そのあたりについて御紹介いただけないでしょうか。

国生：多分、栗林先生のおっしゃるのは、土を線形粘弾性体に置き換えることがどのくらい妥当なのかということだと思います。また、減衰定数については、弾性振動論、質点系を中心とした振動論から定義される限界的な減衰定数が求められますが、そういうものを中心として考えた場合に、材料減衰という考え方が成り立つのかという御指摘ではないかと私は解釈しました。いわゆる材料自身の応力～ひずみ関係の中から出てくる減衰というのは、私の解釈では材料減衰と呼んでいいのではないかと考えています。これは日本語がむしろ英語のマテリアル・ダンピング (material damping) という言葉を借りてきた面もあるので、それなりにある程度みんなが市民権を承認している言葉かなと私は思っています。ただ、インターナル・ダンピング (internal damping) という言葉の方が、より地球物理の方面では使われているようですが。



司会：一方では、せん断弾性係数というように弾性体であると見なし、片一方では履歴でエネルギーが失われるようなものを弾性というわけで、たてまえだけで言いますと、非常に矛盾しているようにみえます。それが、土岐先生が言われた中途半端ではないかという御意見になっているかも知れないですね。

土岐：今、せん断弾性係数の話が出てきたので思い出したのですが、こういう解析をする場合、一番初めにいろいろな方法でせん断弾性係数  $G$  を求めますね。たとえば、有限要素を使って応答解析をしようなどというときには、まず  $G$  を決めます。そうしますと、今度はポアソン比は大体こんなものであろうと当たりますと、ヤング率  $E$  がわかります。これで解析が出来ますと、こうやるわけです。ところが非常に具合が悪いのは、軟弱な地盤でしたら、ポアソン比を 0.5 でいいですよとやりますから、 $G$  がわかりますと直ちに  $E$  がその 3 倍に出て、それで計算できるわけです。静定解析ならば何ら問題ないわけです。ところが、 $E$  と  $G$  の関係が 3 倍になっているときには、ちょうど縦波の速さは無限大になってしまいます。本当にそれでいいのですか。

## 講座



写真-2

本当はいけないはずなのですね。どこかに加わった体積変形がそのまま無限大の速さで伝わってしまっていることになるわけです。

FEM でやりますと、要素の大きさがありますから、ある時間での断面では、解析対象領域の一番端にかかった力が瞬間に他端までは伝わりません。実際には計算上の問題がありますから。しかし、一つの要素を伝えるには、無限小のゼロの時間で伝わっているわけです。非常におかしいことが起こっているわけで、そういうのは本当は具合が悪いのではないのでしょうか。この講座で、どなたかのにありましたけれども、ポアソン比が0.5なんかにはなりませんよということが書いてありましたが、物性の方から考えて、まさにそのとおりなのでしょう。だけど、実際の解析の場面を見ますと、よくそういうふうにおやりになっている。あれは、やはり応答解析という観点からすると、不都合なのではないかと私は思っているのですけれども、どうなのでしょう。

国生：実際に応答解析で、ポアソン比を0.5に近づけるとおかしなことが起こるといので、あまり根拠なしに0.48とか、結局そんな値を入れてやっている場合が見受けられますね。

土岐：それでもほとんど同じことです。ですから、私が申し上げたいのは、やっぱりそういうことはやめて、ちゃんと  $G$  を計り、PS 検層をきちんとやって、縦波速度  $V_p$ 、横波速度  $V_s$  というのは本当に正しい値が求まるかどうか分かりませんが、少なくとも本当と思われる測定値から出すべきではないのでしょうか。

国生：次善の策だと思いますが、よく最近行われているのは、 $V_p$ 、 $V_s$  の両方を計って、そこから出したポアソン比を使って解析する方法です。

土岐：非常に軟弱な地盤でもポアソン比は絶対に0.5に近いなんて言えないはずなのです。大きく0.5から離れたって一向に構わないわけです。実際の値を使えばそれで

いいわけです。

司会：ポアソン比というのは、今、分かっているのですか。

国生：それこそ排水状態によって幾らでも変わりますし、弾性から外れることによって、ポアソン比とは何ぞやという基本的な問題が残ってきます。

土岐：できるだけ分からないものは使わない方がいいと思うのです。はっきりしたものからやっていった方がいいでしょう。間接的な手法で追及して探していくのは、最後にまちがったものになるかも知れないですね。

国生：基本はやっぱり実測に基づいて決めたもので、とりあえず今のレベルでは弾性もしくはちょっと非線形性を考慮したものに乗せて解析するというのが、実務的な立場としてはやむを得ないと思うのです。特別な場合を除いては、一挙になかなか非線形まではとてもいけないのが実状だと思います。

司会：さて、それでは今の材料減衰定数のことであるお話が出たのですけれども、次に、我々はどういう土については、ある程度分かっており、どういう土については、非常に知識が不足しているかという点に議論を移したいと思えます。

岩崎：実際の地震波形のシミュレーションをやってみようと思ったときに大体うまくいかないですね。せいぜいうまくいって、応答スペクトルぐらいで何とか形が似ているなあというぐらいのことであって、位相までかっちり合わせるということをすると、非常にしんどいですね。

一つには、そういう物性の決め方の問題があるでしょうけれども、もう一つには、たとえば地盤に水平構造を仮定するにしましても、本当に地盤が水平になっているのかとか、下から本当に垂直に入射しているのかとか、ほかの絡みがかなり効いてきます。基盤の上方に数十メートルの軟弱地盤があるというインピーダンス比の大きい場合には、かなり荒っぽいうことをやってもうまくいきます。しかし、軟岩から岩盤にかけての速度差の大きくないところでは、かなり工夫がいるようです。物性がPS検層から与えられている場合、検層結果で得られた1メートル毎の速度検層値の微細な変化をそのまま用いるのと、ある程度の平均化を行った場合を比較しますと、後者のほうが非常によいシミュレーション結果を与えているケースがあります。これは、対象としている波長によって層構造のとらえ方を考慮する必要があるケースと思われれます。

司会：解析と結びつけて考えると、土の性質のみならず、地震動の入射という面も考えなくてはいけないということだと思いますが、土そのものを大きく分けた、砂と粘土と岩層に対して、我々はどれくらい、その動的性質に関して



知識を取得しているのでしょうか。この講座では、粘土に関してはあまりありません。それから、岩屑といいますか、巨石に関しても極めて少ない。ただ少ない例ですけれども、国生さんのところではロックフィルダムの材料試験をおやりになっていると思うのですが、そのへんの御紹介をいただけないでしょうか。

国生：相対的に言えば砂がやはり試験しやすいということで、今までどの仕事でもやはりデータが多いという印象を受けましたけれども、粘土とかその他のものについても結構データは集積されつつあります。おっしゃった大きい材料、粗粒材料についてはまだまだ数こそ少ないですが、定性的にはもうかなりのことが分かってきたというふうに私は思っています。ですから、そういう意味で、いわゆる等価線形といいますか、非線形といいますか、どちらがいいのか知りませんが、土の性質を調べなければいけないということについては、かなり特殊な材料を除いて、かなり分かってきているのではないのでしょうか。

ただ、そういう非線形的な現象が起こるといのは、いわば地球物理学的な目で見れば、本当の地球の薄皮の、またその薄皮の部分だけということですから、非線形的な取り扱いが本当に必要になるというのは、まさに工学的に言えば、表層上部の数十メートルの部分なのです。あとはほとんど弾性論、もしくはちょっと非線形を考えて扱えるものだとすれば、当然、岩盤についてあえて非線形でやる必要も工学的にはないでしょう。

谷口：確かに、砂とか粘土とかのデータはたくさんあると思いますけれども、現実にはたとえば火山灰層の山について動的応答解析をしようとする、動的土質定数のデータが全然ありません。実際には、やはり自分がぶつかった現場から採取した土を試験してみるというのが一番良いと思います。そうして、今までに得られている典型的な砂とか粘土の定数を参考に使う方式が良いと思います。

もう一つは、複合地盤がよく出てくるのですけれども、地盤改良をした場合の複合地盤の動的な挙動というのは全然と言っていいほど分かっていない分野だと思います。地震応答解析を使うなどというのは、大体、大きいプロジェクトで厳しい条件だということになりまして、地盤改良をして構造物を造る場合が多いのですが、地盤改良したために柔らかい粘土の中に砂柱があるとか、深層混合処理でセメントの柱があるとか、そういう複合地盤に出会った途端に動的定数が分からない。実験室で小さいエレメントでいくら試験をしても全体的なことはよく分からない。そういう系全体の複合地盤の動的性質がよく分かっていないという問題があると思うのです。



#### 4. 応用問題について

司会：さて、性質のほうはこれぐらいにしまして、次は応用のほうに移りたいと思いますが、講座の中には、軟弱地盤への適用、それから構造物の基礎、ダム、沈埋トンネル、地下構造物について例示されているわけですが、お読みになっての御感想をお願いしたいのですが、西尾さんいかがですか。

西尾：最初、土岐先生がおっしゃった2章までの論調と、3章での応用のされ方というのにかなりギャップがあるという感じを私は受けたわけです。

私どもも例に漏れずそうなんですけれども、等価線形のやりやすいものでやるという方法をとってますので、大体同じようなことをやっているのだなあというふうに読んで読みました。そうしますと、2章の方のかなり格調の高い線形性を議論したものと大分ギャップがあるなあと、正直いってそういう感じがいたしました。

岩崎：何かの実記録と設計との対比はありませんでしょうか。実記録の振幅は小さくても、設計手法のある範囲での妥当性の確認はできると思われれます。そういう意味で、何かの実記録ベースのお話というのが第3章にあってもよかったですのではないかと思います。

国生：しかし、地表で100ガルとか、その程度がやはり限界ですかね。だから結局、非線形、非線形と言っても、線形内でほとんど説明がつくというような現象だったのかも知れません。そこらへんが苦しいところですね。全般を通じて。

岩崎：たとえば、横軸の基盤からの入力、縦軸を地盤表面での応答にとると、最初のうちは線形になるのでしょうか、そのうちに変わってくる。

いかに入力速度を大きくしても、応答加速度はもう飽和してくるのです。Gも小さくなりますよ。その代わり、ダンピングも大きくなってしまって、それらが相殺してしまう。これは、多分、入力地震波を小さいところから大きいところまで考えてみて、それでどうなるかなあという全体像を把握しておけば、通常の小さい地震時の観測結果が、



写真-3

## 講座

ああこのあたりかとすぐ分かってくるのではないかと思うのです。

だから、現場での真実というのは、ただ単に大地震、被害が起こったときのみならず、やっぱり通常の小さいときを常々見ておくということが私は非常に大切ではないかと思えます。

**西尾**：私もおっしゃるとおりだと思います。私どもは、実はあるところで地震観測をしております。宅造地なのですけれども、丘陵地帯を切り崩しまして平らにしましたところ、その基盤といっても横波速度が600 m/sぐらいのもので、それに崩した土を埋めて、住宅地をしているところなんです。ちょっと解説いたしますと、ガスパイプで横方向に長いものですから、少なくとも数十メートルぐらいの範囲での土の挙動の変化というものが非常に大きな影響を及ぼすということで、水平方向の広がりの変化に注目しているわけです。いままでに微小地震を14回ほど観測していますが、それで10ガル、最高で数十ガルという程度の値を測定しているわけです。その結果が説明できるようにシミュレーションしてみると、土質定数は調査したものをを使うわけですが、本数が少ないですから、ばらつきも多く、どう定めたらいいかというのが難しいわけです。そうやって何とかかんとか、平均して減衰定数をどのようにするとか、Gをどのくらいにするとか。実際には同じ層ではないのですけれども、大体均一の層と考えて計算をしてしまう。何とか観測値に合うような土質定数をつかまえられれば、それは正しかったのだと思うのですけれど、現実をやってみますと、そのへんが非常に難しいという気がしますね。

**岩崎**：小地震のケースでさえ問題が解決していないのに、大地震まで考えるのは荷が重いと思います。しかし、現実問題として、大地震を対象とした耐震設計を行う必要があるのです。それはそれなりに行っていくことにはなりますが、小地震による現象と大地震によるものとの橋渡しをしていく必要がありますね。

**国生**：多分、おっしゃったような意味で幾つかの試みはされていると思うのです。大きい地震での観測記録が取れたという、非常にラッキーなことはあまりないのです。実際の現場での地震観測から最適化法みたいなもので、なるべく物性を逆に推定してやろうということで、その物性が実際どのあたりから非線形性を示すかということと比較している例というのは幾つかありますね。だから、こういう研究というのは非常に貴重だと思うのです。むしろ、そういうものを積み重ねていって、さっき私が申し上げたような室内試験の適用性というものがどこまであるのかということをはっきりさせることが、この範囲に含まれるテーマの重要な課題だと思います。



**司会**：今のことに関連しまして、大川さんが建築物について実測例と解析結果の比較を出しているわけです。建築に限らず、土木の分野でもなかなか実測記録はよほど確信が得られない限り公表しない保守的な風潮は、何も日本に限らずあると思うのです。これの裏話をしますと、大川さんは国内の建物では絶対に実測記録は出ないから非常に書きにくい。ではラテンアメリカタワーを書いたらどうですかということで、これはよく調べてお書きいただいたわけです。それを見ますと、測定値が設計値よりも大分低いということであって、安全性の問題は少ないにしても、予測の精度としてはあまり良くないということになるわけです。

国鉄、電力会社、建設省では集中的に観測しているわけですけれども、その測定した結果をまとめて公表するというような機会はあるのでしょうか。

**海野**：今まで国鉄では、設計時点での動的解析をした構造物に計器を付けてから大きい地震がきたという例がありません。この間、茨城県中部あたりでありましたが、あれがようやく橋脚の天端に付けていた地震計では110ガルぐらいを越えました。まだ、そういう段階です。

**司会**：そういうものをできるだけ出していただいたほうがいいですね。しかし、ダムの場合は非常に出しにくいでしょうね。

**国生**：ある程度だしていると思いますよ。たとえば、ロックフィルダムについても学会などを通じてかなり観測結果の公表がされていると思います。今後なるべく公表される方向にむかっていくのではないかと思います。

**司会**：しかし、ここでなぜ公表されないかという点は、それぞれ機関の事情というのがあるわけですから、仕方がない面もあると思いますけれども、できるだけ出してほしいですね。

**土岐**：やはりそういう記録をとるといえるのは、実は大変なことだと思うのです。ですから、取れたからさあ出せというのは非常に酷な話であって、やっぱりそれを取るまでの苦労というものが報われるためには、それでなにかの解析をして、あるいは研究をして初めて報いられるわけですから、やはりそれだけの時間を与えて差し上げなければいけないわけです。

**萩原**：建築物では、観測した建物についてシミュレーションしているものは、随分、学会の論文にも出ています。ただ、あまり大きい地震ではないのです。大島あたりの地震が東京で取れたぐらいのものであります。そういうものというのは、解析的に説明が



くように、いろいろな定数を考えたりというのが実状ですね。モデル化をどうするかということにも兼合ってきていると思います。

話は変わりますが、たとえば地震波を逆応答する場合、地表面で250ガルぐらいとして、20メートルとか30メートルまでの地中の加速度分布を求めたいといって、シェーク(shake)などでやりますね。そうすると、ある地震波では、地盤中で1000ガル以上になってしまったりすることがあります。先程、国生さんが言われたように、減衰というのは非常に私は気になります。これは減衰だけでなく、記録された地震波形そのものに含まれた特性かもしれないが、

国生：自分が減衰のところをたまたま担当したから言うのではないのですけれども、減衰の問題というのは線形、非線形という以前の問題として、まだまだ残された問題は大きいと思うのですね。

特に、長距離を波が進むという場合の評価が、益々これから必要となると思いますので、そうすると途中で内部減衰といいますか、材料減衰といいますか、そういうもので失われるもののエネルギーの評価というのは、非常に距離が長い場合には効いてきます。今のお話に当てはまるかどうかわかりませんが、一般的に、地表での地震波をかなり深く下方に戻しますと、高周波の部分が非常に強調されて出てくると思います。これは何も大きい地震、小さい地震、線形、非線形の問題ではない。それ以前の材料減衰のメカニズム問題ということで、私が書いた中にもそのことをかなり強調させてもらったのです。いわゆる無限小にひずみになった場合の減衰というのは、どういうメカニズムによって生ずるのかということ、かなり重要な問題ではないかと思っております。それが、粘性減衰という扱いで一般に解析に入れられる面が大きいですが、履歴減衰は入らないので、そういう扱いだけでいいのか。そこらあたりをかなり大学での研究としてやっていただく必要があるのではないのでしょうか。

## 5. 判定基準と設計への適用

司会：応用例を見ましても、先程の岩崎さんの御指摘のように、実証するような情報はほとんどないのですね。それからもう一つは、判定基準みたいなものが極めてあいまいで、あったとしても主観的であります。その検証については先程から御議論があるとおりで、ある程度時間を掛けて待つより仕方がないでしょう。さて、判定基準については、いかがでしょうか。

海野：実際、設計する立場から言いますと、今までは通常、震度法に代表される静的解析法でやってきておりますが、その静的解析法での判定基準は、過去の震害に基づいて主として出来ていますから、そういう点での根拠はかなりしっかりしております。一方、動的解析法は、入力地震波の大きさとか、波形とか、そういった根本的な問題から

始まって、全体的にどうもいま一つはっきりしません。本当に信頼度が高いのか、震害との突き合わせが少ないのでちょっと疑問があると思います。否定的な意見かも知れませんが。

構造物の耐震設計に際し応答解析を行う場合、土の動的な性質のほか、構造物の動的性質を正しく評価する必要があります。動的解析を行うような構造物は複雑なものが多く、計算上の制約から素人目に見ても得心のいくモデル化がなされている例は少ないと思われます。そういう点で、この講座を見ますと、土だけの、いわゆる軟弱地盤とか、ロックフィルダムなどを除いて、鉄筋コンクリートなどの構造物が絡んでくると、今までの震度法を考慮しながら設計をやらなければならないという印象を非常に強く受けました。

土岐：その問題になりますと、私は少し申し上げたいことがあります。この講座でも、たとえば橋梁とダムの問題がまさにおっしゃったことになるわけで、川島さんがお書きになった開北橋での記録は多分700ガルぐらいに達しています。ところが、設計は震度0.2でやっている。話が合わないではないかというふうな御指摘をいろいろなところから受けるわけです。馬場さんが書かれたダムのところでもそうでした、震度0.2の設定震度で設計したものが動的に検証すると、800ガルぐらいでやっ壊れるという話があるわけです。おかしいではないかというわけです。ところが、動的な計算をしますと、実際に観測されたものと似たような結果になるわけです。それは、やはり従来の震度法というもので、あまりにも物を見すぎてきたからいけないのでして、もう震度法というものを頭の中からなくしてしまったらいいのです。要するに、たとえば先程の0.2で設計したものが700ガルまで壊れませんでしたというのは、実は動的に検討すれば、700ガルまでもつものを静的には0.2の震度しかもたないという評価をしてしまっているわけです。ですから、震度0.2と言わないで、動的に700ガルまでもちますという言い方をすればいいのではないのでしょうか。ダムの場合でも震度0.2で静的に設計しましたというのではなくて、動的に800ガルまでもつように設計しましたと、こういう言い方をすればいい。そうしないと、いつまでも動的解析というのが、設計の場で肩身の狭い思いをしなければならないと私は思います。

海野：いわゆる耐震設計で考えている構造物の破壊とか強度とかに対し、実物は、構造細目による補強や施工管理が十分に行われた場合など、はるかに頑丈な場合もあります。動的解析にももちろん目の目を見させたほうがいいことは事実なのですが、評価法の対応がまだうまくいっていないということなのですかね。

土岐：ただ、たとえば地震が起きて構造物が壊れないではないか、目で見て損傷がないではないかというふうな言われますけれども、たとえば鉄筋コンクリートの橋がある



写真一4

としますね。表面にはクラックはないかもしれない。あるいは人間の目に見える所にはないかもしれない。だけど、内部で既に損傷を受けている場合だってないとは言えません。ですから、我々人間の目に見える損傷というのと、本当に内部に蓄積されている損傷というものはやっぱり分けて考えなければならないと思うのです。たとえば、土木研究所の川島さんが実験をしていますけれども、彼のやっている実験を見ましても、非常にそういう感を受けるのですけれども、目で見えるかどうかだけで我々は判断してはいけないのではないのでしょうか。

司会：評価の問題は非常に難しいとは思いますが、いずれ基準を作って、共通の見解を持たない限りは、いつまでたっても動的解析が花嫁道具みたいなお飾りで、何かを説得するときのオブラートのような使われ方になってしまうという感じがするわけです。

岩崎：今、社会的な重要構造物では静的解析をやって、もてばよし、もたざれば動的解析まで踏み込んで厳密に検討しようというような思想もないわけではないようだけれども。

国生：そうですね。実際の現象に対して静的解析が必ず動的な解析をカバーしていますよと、言えるものかどうか知りませんが、適用条件に留意すれば静的解析でカバー出来るからこそ、そこで止めているのです。単に静的解析は簡便であるから、そこで止めているというだけではなくて、静的解析の適用が困難な場合や、簡便な方法による評価結果から詳細な検討が必要と判断される場合には、動的解析も行うことになっています。

谷口：土構造物に限れば、震度法から出てくるのは、ただ単に安全率がたとえば1.2という情報であって、土構造物が地震時にどのくらい変形するかという情報は全然出てこないわけです。現在では地震の後に土構造物に残留する沈下量とか変形量がどのくらいか、それをみんな知りたいわけです。その時には、どうしても動的解析をやらざるを得ない。だから、動的解析がそういう意味では全然肩身の狭い思いをしているのではなくて、その分野ではもう震度法は全然歯が立たないから、現在でも動的解析は大いばりで通用していると思います。

土岐：だから、一層のこと震度法がないとしたほうがいいのではないですかと申し上げているわけです。なければ謙虚にずっと動的解析をきちんと見ようという気になるわけです。

海野：構造物の動的解析といいますと、降伏点応力度を越えるような大きなひずみが、ある程度発生しても許容していかないとだめなケースのほうが多いのではないかと思うのです。そうでないと、経済的にならないものですから。そういう時にどこまで許容するかという問題は、結局、構造材料の靱性率などが関連する我々の知識が若干乏しいところでありまして、なかなか基準化したり一般化するまでは行かないという感じを私は持っています。

司会：そうすると、判定基準があまりはっきりしないけれども、実際問題としては機能している場合があるというふうに考えてよさそうでございます。特に先程の例にありました、土木施設あり、建築物あり、それから内部の設備ありとなってくると、これはあらゆる基準が全部違うわけであって、それをばらばらに設計したのでは不均等なものになりますので、確かにこういう場合は動的解析というのは非常に有力な手段であるという見方もできます。

ということで、このへんで時間になりましたので、一応、終わりにしたいと思います。否定的な意見も少々ありました。しかし、将来いろいろな困難な問題が出てくるにしても、方法を充実させていけば、より一層、動的解析が有用な手段となっていくのでしょうか。土木や建築の構造物の地震応答解析にとって、絶対に避けて通れない土の動的性質といったものが、またより一層重要になってくるということを確認して、本日の座談会の締め括りにさせていただきます。どうもありがとうございました。