

# 日本地震工学会誌

Japan Association for Earthquake Engineering

## No.3

Jan.2006

特集：入力地震動と土木構造物の応答



<http://www.jaee.gr.jp/>

日本地震工学会

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館  
Tel:03-5730-2831 Fax:03-5730-2830

# INDEX

## 巻頭言

---

巻頭言／安田 進	1
----------	---

## 特集：入力地震動と土木構造物の応答

---

入力地震動と設計／井合 進	2
地震応答解析における入力地震動をどう考えるべきか／一井 康二、津野 厚、酒井 久和	4
地盤構造探査からみた入力地震動／盛川 仁	10
土木構造物（鉄道高架橋）の地震時変形量の推定／西村 昭彦、金本 昌幸	20
地盤・構造物系の有効応力解析における境界条件／渦岡 良介	24
振動台実験に用いる地震波形をどう考えるべきか／大友 敬三	28
液状化による地盤流動の検討方法／安田 進	32
地中埋設管の設計用地震荷重と検討課題／大町 達夫、大嶽 公康	37

## 報告：

---

「日本地震工学会・大会－2005」報告／新井 洋	41
第1回構造実験工学の高度化に関する国際会議(AESE2005)の開催報告／伊藤 義人	46
第18回原子炉構造力学国際会議参加報告／岡村 茂樹	47
「E-ディフェンス見学会」報告／中澤 博志	49
木造戸建て住宅の耐震補強検証実験速報／槌本 敬大、箕輪 親宏、坂本 功	50

## 学会ニュース：

---

学会ニュース	54
--------	----

## 年間カレンダー：

---

年間カレンダー	57
---------	----

法人会員一覧

日本地震工学会のご案内・入会案内

## 編集後記

---



## 巻頭言

安田 進

●東京電機大学理工学部建設環境工学科

昨年秋にチリで開かれたIASPEIの会議で、チリの太平洋沿岸で発生する地震によるアルゼンチンの被害予測に関する研究発表があった。その帰りにボリビアに寄ったところ、やはりチリの地震によって350km程度も離れたラパスでも斜面崩壊や液状化が発生するのではないかと、知人の地質学者が推定していた。さらに、スマトラ沖地震1周年記念の会議が12月にシンガポールであった時、将来スマトラの海岸に沿って南東に震源が移った場合、シンガポールでも震央距離が500km以内になり被害を受けるのではないかと心配していた。

このような心配ごとを聞いていて、1985年メキシコ・ミチョアカン地震によるメキシコ市の被害を思い出した。地震後筆者は大町達夫博士（東京工業大学教授）らとメキシコ市や震央付近の太平洋海岸を見て回ったが、震源域付近の海岸段丘上ではあまり構造物に被害がなかったのに対し、震源域から約350kmも離れたメキシコ市で多くの建物が倒壊していて、大変驚いた。ただし、メキシコ市でも周辺の丘陵地ではまるで被害が発生していなかった。

メキシコ市はメキシコ盆地の南西部に発達した都市である。市の中心地は湖に火山灰からなる粘土やシルトが堆積してできた超軟弱地盤からなっている。表層は $V_s=40\sim 60\text{m/s}$ 程度の超軟弱な粘性土層から構成され、その深さも大変深い。それに対し、市の西部は火山岩からなる丘陵地区である。地震記録を収集してみると、丘陵地帯では $30\sim 40\text{cm/s}^2$ の地表最大加速度であったのに対し、中心地の湖沼地区では最大で $168\text{cm/s}^2$ の値が記録されていた。しかも長周期の波が長い時間継続していた。このように湖沼地区では丘陵地区に比べて加速度だけでも数倍大きく、速度や変位ではさらに大きく、また継続時間も長かった。超軟弱層や盆地状の地形の効果によってメキシコ市の中心部では非常に大きく地震動が増幅されたようである。

耐震設計にあたってはこのような表層の増幅特性を良く考慮しておく必要がある。

話が変わるが、1964年新潟地震の際、信濃川に架かっていた昭和大橋が落橋した。これや県営アパートの被害などが液状化の研究を盛ん行う契機となったが、当の昭和大橋の落橋のメカニズムに関してはまだ議論が続いている。地震後に杭の破損状況や地盤状況の調査が行われ、①震動による慣性力が大きくて落橋した、

②液状化で地盤反力が低下し変位振幅が大きくなって落橋した、③左岸側からの地盤流動が杭基礎を押し落橋した、との三つの案が出された。その後、約20年経って行われた航空写真測量によって左岸側の護岸付近で数mもの地盤流動変位量が生じていたことが明らかになり、③の可能性が高いと思われてきていた。

ところが、若松加寿江博士（防災科学技術研究所）や田蔵隆博士（清水建設）が主体となり筆者も加えていただいて、落橋を目撃した人に対する詳細な聞き込み調査を2年前から行ってみたところ、以下のようなことが分かってきた。

i)落橋は地震発生後1分余りたってから始まった。

ii)橋が落ち始めた後に左岸側の護岸付近の地盤が川に向かって流れ出していった。

地震の主要動は地震発生後10秒程度で終わっている。したがって、①のメカニズムで落橋していないことになる。ただし、この時点で地盤が液状化し、地盤の反力は低下したはずである。そして、主要動後も続く揺れや余震によって②のメカニズムで落橋したと考えられる。その後に左岸側の地盤が大きく流れ出てきたようなので③のメカニズムでもないと考えられる。なお、流動の変位分布の解析も行ってみたところ、落橋した杭まで流動は押し寄せてきていなかった。

このように表層地盤自体が液状化のような破壊を起こしさらに地盤全体が流動してしまうと、地盤から構造物への入力は大変複雑になる。耐震設計を行うにあたってはこのような挙動をよく考慮する必要がある。

さて、今回の特集のテーマは「入力地震動と土木構造物の応答」である。これは地震が地下深いところで発生して地盤内を伝わってきた後、表層で増幅し、地表面にある土木構造物がそのためにどのような応答するか、との問題を扱うものであろう。上記の二例でも分かるように、土木構造物の応答は発生する地震動のそのものの性質から始まって、表層の増幅特性、地盤の変状の有無、土木構造物の種類などによって大きく左右される。このように大変複雑な挙動に関して、この特集号ですべて解説するのは大変難しいと思われるが、各論の執筆者はこの道の第一人者ばかりであり、分かりやすく解説していただけることと思われる。

# 入力地震動と設計

井合 進

●京都大学防災研究所地盤災害研究部門 教授

## 1. はじめに

設計規準類に示された設計震度や設計スペクトルを使って、手順どおりに設計していれば十分な耐震性を有する構造物ができあがると信じてきた時代は終わった。これからは、設計者や関係技術者が、入力地震動と設計について十分に理解を深めることが必要とされる。本稿では、意外と見落としがちなる3つの事項について、アラカルト風にとりまとめた。

## 2. レベル1、レベル2地震動の導入に隠されているもの

わが国では、阪神大震災を契機として、レベル1、レベル2の2段階の地震動を設計で用いるようになった。それ以前は、レベル1地震動を対象とした許容応力度法による設計だったので、これを上回るレベル2地震動に対する設計が盲点だったために、阪神大震災のような大きな災害が発生したとされる。そこで、現在では、レベル1地震動への設計は従来の設計法を踏襲、レベル2地震動へは新たな設計法で対応するというスタンスをとっている。

米国では、世界に先駆けて2段階(多段階)の地震動を設計で用いているようになったが、その経緯は、わが国とは逆である。以前から弾塑性挙動を簡易的に組込んだレベル2地震動対応(安全性照査)の設計を行ってきた米国では、この設計により、レベル1地震動に対する使用性は、結果として、自動的に満足できるであろうと信じていた。ところが、レベル1地震動に相当する1994年ノースリッジ地震において、非構造部材の被害に伴う莫大な経済的被害(使用性の障害)が発生したため、これを契機に、レベル1地震動に対する使用性の照査を明示的に行うことになったのである。

翻って、わが国で、阪神大震災より以前に行っていた許容応力度法における震度(設計スペクトル)が、使用性を照査することを目的としたレベル1地震動だったのか、については不明な点が多い。設計上の約束事としての許容応力度法の枠組みのもとで、総合的な意味でレベル2地震動のような強い地震動に対する安全性の確保を期待していたが、限界があった、とするのが自然な解釈であろう。このような点を見抜

いて、レベル1地震動に関する新たな考え方が提示されている(土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会、2003)。

## 3. 性能照査型設計法で性能照査ができるか

阪神大震災を契機として、各種の設計規準類は、性能照査型設計法に衣替えをしてきている。その際に、設計入力地震動が設計スペクトルなどで与えられているものも多く、効率的な設計業務が可能となっている。それでは、これらの設計スペクトルなどを用いて、想定地震(例えば、地域防災計画で想定する地震)に対する性能照査や被害想定ができるであろうか?これは、相当に難しく、事実上は不可能といってもよい。例えば、平行して鉄道橋と道路橋が架かっている場合、そのうちのどちらが先に被害を受けるかという基本的な課題に対して、二つの設計規準類をそれぞれ独立に精査しても、答えは見つからない。設計スペクトルと構造物の特性がセットになっているためである。問題がさらに深刻となるのは、地上構造物と地中構造物の耐震性能の相互比較である。両者では、地震動を入力する標高(深さ)が異なるので、それぞれの構造物で想定している地震が同じレベルのものか否かについて、判断する手がかりがない。

このような反省から、国際標準(ISO23469)では、1)「地震動の設定」の後に「地震作用の決定」をする2ステップの手順を踏むこと、2)地表面における地震動が設計に直接用いられない場合でも、地上構造物の耐震設計との整合性を確認するために、地表面の地震動を求めしておくことが望ましい、としている(Iai, 2005)。

## 4. 地震動の空間的変動

ライフライン施設のような地中にネットワークを構築する形式の構造物では、入力地震動として速度応答スペクトルなどを用いて地盤のひずみを推定し、設計や広域被害推定などを実施するケースが多い。このような方法に適用性があるのは、地盤条件の水平方向の変化が無視できる場合に限られる。

地形、地盤物性値、地層構成などの水平方向変化がある場合には、これらの影響を適切に評価する必要が

ある。図1は、これらの典型的な例を示している。特に、同図(b)に示すように、埋没した不整形地形の上で建設される場合にも、地盤条件急変部付近には著しいひずみが発生する可能性があることを忘れないようにしたい。

参考文献

- 1) Iai, S. (2005): "International standard (ISO) on seismic actions for designing geotechnical works - An overview, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25, pp.605-615
- 2) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会(2003) : 土木構造物の耐震設計における新しいレベル1の考え方(案) <http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taishin/Level1.html>

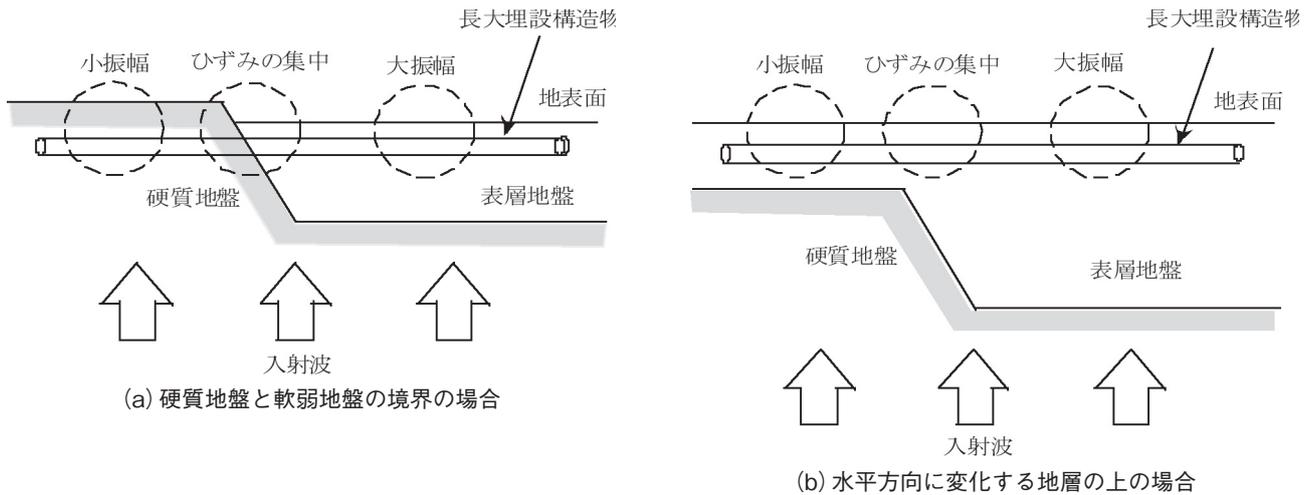


図1 地盤条件の水平方向の変化がもたらす地震動の空間的変動の例(ISO23469より)

# 地震応答解析における入力地震動をどう考えるべきか

一井 康二／野津 厚／酒井 久和

●広島大学 ●港湾空港技術研究所 ●防災科学技術研究所

標記のテーマでの原稿執筆依頼を事務局から頂いた。

しかし、とても大きなテーマであり、入力地震動はかくあるべし、などという議論をわずか数人の研究者で結論付けるわけにはいかない。また、本誌の性格からしても、それは著者に期待されている内容ではないだろう。むしろ、入力地震動を考える際の視点について、地震応答解析の観点から論点を整理し、今後の研究開発の糧となる資料の作成が期待されていると解釈したい。

このため、ある架空の地震工学者2名の対話という形式で記事を作成した。この対話は、筆者による議論や各種専門家へのヒアリングによって作成したものである。この二人の対話について、読者諸兄からのご意見・ご批判を頂くことができれば、幸いである。

## 1. 土木構造物への入力地震動をどう考えるべきか

A：土木構造物への入力地震動については、例えば、専門家の間での最新の合意事項をとりまとめたものとして土木学会の第三次提言があります。

([www.jsce.or.jp/committee/earth/index.html](http://www.jsce.or.jp/committee/earth/index.html))

従って現時点では、土木学会の第三次提言に従っておけばいいと思います。以上、このテーマ終わり。

B：そんなに簡単でいいのでしょうか？具体的には、地震動について、第三次提言ではどのように述べられているのでしょうか？

A：地震動の部分については、エッセンスは次のような感じではないかと思います。

- ①近くに内陸活断層がある場合にはそれによる地震動をL2地震動として考慮しましょう（これは第一次提言、第二次提言と変わらず）。
- ②しかし場所によっては内陸活断層より海溝型地震の揺れが厳しいですから、そういう場所では海溝型地震の揺れがL2になりますね。
- ③内陸活断層地震と海溝型地震では発生確率が全然違いますから「確率レベル」でL2を定義するのは苦しいですね。そこでL2を「最大級の地震動」と定義しましょう。
- ④近くにプレート境界も内陸活断層も無いときは、最低限の要求としてM6.5の直下地震を考慮しま

しょう。

⑤いずれにしても、まず対象地震を決めて、それが発生したときの地震動としてL2地震動を評価します。

B：なるほど、L2地震動の話ばかりのようですが、それはともかく、その情報だけでは、設計のための地震応答解析の際に、技術者が困惑するのは確かかもしれませんね。

A：どういうことでしょうか？

B：地震応答解析を何のために行うかといえば、基本的には設計のために行うのでしょうか。でも、設計においては科学的・技術的見地以外の要件も要求されるので、その観点で入力地震動をどう考えればいいのか、担当技術者は困ってしまうのですよね。特に、土木構造物の場合は建築と違って公共のものが多いので、施主の判断とか設計者の判断で決めたという説明が通りにくいからです。

A：うーん。よくわかりません。どういうことでしょうか？

B：例えば、入力地震動あるいは地震応答解析も含めた全体の解析精度という観点で議論してみましょう。

## 2. 入力地震動と地震応答解析の精度について

B：突然ですが、「精度」って何でしょうか？

A：単純に言えば、計算値（あるいは予測値）と真値の差です。例えば、強震動予測の場合なら、東海地震が発生するとの前提でどこかの地点で予測したゆれと、実際に発生したゆれとの差です。

B：そうですね。個々のケースであれば、そうかもしれません。でも、土木構造物なので、設計体系としての精度が議論される必要があるでしょう。

A：設計体系としての精度？

B：つまり、ある対象地震に対してある地点の地震動を予測する、あるいは、ある地震動に対して構造物の残留変形量を予測するといった場合に、誰が予測するかわからないわけです。Aさんと完璧でも、私やCさん、Dさんといった数多くの人がいろいろなやり方で予測することが可能です。そうしたときに、何が「精度」であり、何が最適化されなければなら

ないのでしょうか？

A：そうですね。例えば、 $i=1,2,\dots,n$ のn人がおのおのの方法で予測した時の予測値が $X_i$ 、真値が $Y$ とすると  
 $f = \sum (Y - X_i)^2 \rightarrow \min$  (目標1)

が設計体系の目標であり、その最適化の程度を精度と呼んでいるのではないのでしょうか？また、場合によっては、 $X_i > Y$ なる条件の下に(目標1)の実現を図る場合もありますね。いわゆる安全側の配慮です。

B：なるほど、でも、目標1を議論するには重要な問題がひとつあります。例えば、地震応答解析のための入力地震動の場合、真値というのはわかるのでしょうか？例えば、第3次提言で言うL2地震動というのは、真値がわかりますか？

### 3. 入力地震動における真値と社会的合意

A：例えば、過去の観測記録というのは、特定の地震が特定のサイトで観測された場合の真値として考えられませんか？構造物の被害予測手法であれば、過去の被災事例の再現性や振動実験の結果を真値として、手法の適用性や精度を評価しますよね。地震動についても同じ考え方は適用できないのでしょうか？

B：でも、L2地震動であれば、「最大級」の地震動ですよね。たまたま起こった地震の観測記録は、「最大級」よりはたぶん小さい観測記録でしょう。L1地震動にしても、例えば再現期間75年の地震動として定義されたとしても、具体的にそれに対応する地震動を観測記録として得ることは不可能に近いのではないのでしょうか？

A：そうですね。例えば、「最大級」についての真値を知るためには、ある地点で一万年くらい観測をすれば、まあ、その中で一番強かったものが「最大級」といってもいいでしょう。再現期間75年のL1地震動にしても、一万年も観測すれば対数の法則が成り立つのでそれなりに把握できるでしょう。

B：一万年ですか・・・。

A：もちろん、人類が絶滅している可能性もあるくらい気の長い期間なので、「神の視点」にたたないと真値は見えてこないかもしれませんね。

B：「神の視点」でないと見えないようなものを、どうやって設計で考慮すればいいのですか？

A：耐震設計の過程において真値を評価できるものできないものを整理しておいたほうがいいですね。

私の考えだと、①どこの震源断層がどの確率で動くかという前提条件、②特定の震源断層において将来生じる地震の断層破壊過程、③特定の震源断層の特定の破壊過程が発生した場合の構造物への入力地

震動または表層の地震動の評価、④特定の地震動が作用したときの特定の構造物の挙動、の4段階を考慮しなければなりません。このうち、③については既往の観測記録、④については既往の被災事例や振動実験結果などを真値として議論することは可能だと思います。

B：①とか②は？

A：科学的考察に基づいた上で、社会的合意に頼らざるを得ないでしょうね。

B：社会的合意？

A：専門家が現時点の知見や考察に基づいて正しいと判断した結果に従うしかないということです。

B：例えば？

A：そうですね。ある特定の断層が活断層なのかどうかという判断は、実態は活断層研究者の合議で決まっています、活断層マップにまとめられていますよね。活断層でどの程度の規模の地震がどの程度の確率で発生するかの判断なら、地震調査研究推進本部 (<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>) の長期評価部会で判断されていますよね。もちろん、情報不足の点については、多くの仮定に基づく判断でしょうが。

B：「社会的合意」というのは、例えば専門家が5人くらい集まって合意できればOKなのですか？

A：どうでしょうね。よくわかりません。でも、いくら民主主義の国でも納税者全員の投票などにしたら、知識のない人が間違った投票をしてしまう恐れがあるので、合議は知識のある人に限るべきでしょう。米国では二種類の距離減衰式に対して住民投票で重みを付けるなどといったこともあるそうですが、あまり賛成できませんね。

結局のところ、有識者による合議が、場合によっては権威のヴェール力も借りながら、社会的合意としてみなされているのではないのでしょうか。ほかにいい方法もないし、問題もあるかもしれませんが、今のところはそうした方法がとられているというのが現状ではないのでしょうか。

B：合議のメンバーの責任は重大だし、メンバーの選定も重要ですね。

A：そうですね。でも、社会的合意の比重が大きいのは①と②の過程ですが、③と④に関わる技術者の責任も重大なのですよ。

B：どういうことでしょうか？

### 4. 技術者によって結果が変わるということ

A：設計体系の観点から考えた場合、人によって設

計の結果が違うことは設計体系として望ましくない、という見方があります。この結果、従来の設計体系では、前述の目標1ではなくて、

$$f = \sum \sum (X_i - X_j)^2 \rightarrow \min \text{ (目標2)}$$

を念頭においていたと考えることができます。

B：つまり、真値というものはあまり意識せず、誰が行っても同じ結果が得られるような手法を積極的に採用していたということですね。

A：そうです。そして、目標2を満足するために使用可能な手法を制限していたというのが実態ではないでしょうか？

B：具体的にはどんな例がありますか？

A：例えば、震度法を採用して、地域別震度を与えてしまうというのはその典型でしょう。誰がやっても同じ結果が得られますし、安全率で評価したら、小数点以下まで議論することができます。

B：大雑把な地域区分の地域別震度はともかく、その結果として得られる安全率が、小数点以下の数字まで出ているとなんとなく精度が高いように思えますね。

A：でも、地域区分が大雑把なことからわかるように、本当は精度の悪い方法ですよ。それでも通用していたのは、目標1よりも目標2が重視されていたということだと思います。

B：なぜでしょう？

A：技術的なことからいえば、地震動の評価手法や応答解析法が発展途上だったということかもしれません。でも、むしろ会計検査などのシステムに起因する問題が関係しているかもしれませんね。

B：それで、目標1を認識した設計体系になると、技術者にはどのような影響があるのですか？

A：目標1を意識すると、当然、その実現に向けて高度な手法を導入せざるをえなくなります。従来ですと、例えば設計コンサルタントが少なくとも100人以上は理解し、実際に使える手法でなければ設計に導入すべきでないという意見もあったのです。しかし目標1を実現するためには、そうも言っていられなくなるので、必然的に高度な手法を導入していくという方向性になるのではないのでしょうか。

B：手法を高度化すれば、予測値が真値に近づくと単純に考えればいいのでしょうか？

A：もちろん、手法を高度化するだけで精度が上がるわけではなく、手法に見合うだけの十分な調査は行うという方向性でなければなりません。ですから、与えられた条件で設計を行うのではなく、設計に必要な条件を明示し、必要な調査を事前に指摘する方

が技術者には必要となってくるでしょうね。

B：すべてのプロジェクトについて、それだけの力量を持つ技術者が必要になるのでしょうか？それに、そんなにレベルの高い技術者は数多くいるのでしょうか？

A：そうですね。必ずしも全てのプロジェクトということはないと思います。プロジェクトの重要度で分ける。つまり、非常に重要なプロジェクトは力量のある技術者が高度な手法で設計を行い、それ以外のプロジェクトは目標1のfが大きくなるように手法を制限して一般の技術者が設計するということになるかも知れませんね。

B：当然、力量のある技術者に選ばれるほうが儲かるわけですね。

A：そうですね。そして、そのほうが競争原理が働いて、全体の技術レベルが向上するということですね。よしあしは別にして、今の世の中の流れはそういうことだと思います。技術者資格制度というのは、そういうことでしょうか。入力地震動についての資格制度はないみたいですが。

B：気がついたのですが、目標1をめざして力量のある技術者が、十分な調査に基づき、高度な手法で設計したとしても、建設コストが安くなるとは限りません。真値とは近づくかもしれませんが、結果的に、より丈夫なものを作る必要が生じてコストが上がるかもしれません。

A：そうです。ですから、力量のある技術者による高度な設計に対して、より多くの報酬が支払われるとしても、それは建設コストが下がるからではなく、より真値に近い設計をしていることに対する対価でなくてはなりません。

B：一般には、高度な設計をすると、安全の余裕部分が削減できるからコストが下がると思われているようですが？

A：それは、現在の設計体系で、本当に過剰に安全側の設計になっている場合ですね。本当に安全側かどうかは構造物によっても異なるでしょうし、そうだとすると、個別のケースにおいてはばらばらしているはずですから、コスト削減分が技術に対する評価の対象となるのはおかしいでしょう。

B：そうですね。コスト削減分で評価されるなら、耐震設計をごまかすなどのインチキが増えてしまうかもしれませんね。

## 5. 入力地震動予測と地震応答解析の不確実性

B：技術者の力量や、設計手法の選択の違いによる

予測値と真値の乖離の問題についてはわかりました。でも、設計プロセス全体で見たとき、入力地震動の精度というのはどのように捉えればいいのでしょうか？

A：そうですね。すでに述べた①から④までのプロセス全体で見ると、不確実性は非常に大きいのではないでしょうか？

B：具体的にはどの程度のものなのでしょう？

A：では、順に考えて見ましょう。①についていえば、ある特定の断層が動くか動かないかという判断があります。でも、土木学会の推奨にしたがって活断層のないところでもM6.5の直下型地震を想定していたとすると、ある特定の断層が想定外に動いたとしても、そのマグニチュードの差に起因する程度しか、地震動は大きくなりません。実際には、断層からの距離などもあるので、過小評価していたとしてもせいぜい半分程度ではないのでしょうか？一方、小さいほうは、動く想定していた断層が一万年経過しても動かなかった場合は、地震動はかなり過大評価していたことになるでしょう。

B：M7.0の直下型地震を想定することにしておけば、過小評価のほうはもっと余裕を見込めますよね。

A：そうです。ただ、建設費も増加するので、そのバランスから社会的合意の下で、判断する必要があるということですね。

B：②の断層破壊過程についてはどうでしょう？

A：最も不確実性が大きいのは、破壊の伝播方向でしょうね。破壊が近づいてくるときには地震動が大きくなり、破壊が遠ざかるときには地震動が小さいというディレクティビティの話です。

B：最大級を考える、ということは、最悪の方向に破壊が伝播するケースを考えないといけないということですね。

A：かならずしも社会的合意がすべてのケースについて得られているかどうかわかりませんが、たぶん、内陸活断層地震を想定してL2地震動を評価する場合には、「破壊が近づいてくるといったシナリオに基づいて地震動を評価する」というのが妥当な選択でしょう。なぜなら、もともと兵庫県南部地震による甚大な被害を契機としてL2地震動の導入が図られたわけで、甚大な被害をもたらした地震動は破壊伝播効果により生成されたのですから。その場合、実際に破壊伝播が近づいてくるケースが生じた場合でも、予測値が観測値を大きく下まわる心配はありませんが、逆に破壊伝播が遠ざかるような地震が発生すれば、そのときの地震動は設計地震動と比較して

著しく小さかったということになるでしょう。そうした点について、例えば税金で作られる土木構造物の場合は、納税者などの関係者の理解が得られていれば良いのだと思います。

B：断層が一方向に破壊する場合、断層の両端だと、どちらかは精度がよく、反対側は精度が悪かったという評価になりますね。

A：さらにいうと、この影響は多くの構造物に対して影響の大きい周期1秒から2秒前後（正確にはアスペリティサイズから決まるコーナー周波数の前後）で最も影響が大きくなります。困った事実です。

B：なるほど。でも、①および②による不確実性は真値も神様の視点でないといけない話なのであきらめるとして、③はどうでしょう？

A：対象地点のサイト特性（地震基盤→地表、もしくは地震基盤→工学的基盤）を把握するために現地での強震記録を利用できるかどうかにかかっていると思います。強震記録によってきっちり検証されたサイト特性を利用できる場合には、不確実性は倍半分よりはましな程度だと思います。せいぜい1.5倍程度でしょうか。地下構造を詳細に調べるという方法もありますね。

B：倍半分というのは、+100%～-50%程度の誤差ということでしょうか？

A：そうですね。考えてみれば変な表現ですね。④については、対象とする構造物によっても異なってくると思います。土の変形が問題となる場合と、土の変形は考慮しなくてもよい場合でも違うでしょうし。また、被災事例が積み重ねられている構造物ほど精度のよい解析もできるでしょう。

B：液状化による変形に対するブラインド解析などでは、一桁ぐらい予測値が異なることもありますよね。解析手法の問題なのか、事前に正しいパラメータを設定できなかったからなのか、よくわかりませんが。振動台の制御も万全ではないので、予定と違う地震動が入力されてしまうこともあって、完全な条件でのブラインド解析も難しいです。

A：そうですね。でも、地盤の影響が小さい構造物であれば、かなり高精度に予測することも今では可能でしょう。地盤の変形が問題の場合は、地震動の継続時間中に変形が累積していく過程が問題となります。場合によっては、液状化時の側方流動現象のように地震動終了後にも変形が持続する場合があります。でも、最大応答だけが問題となるような構造物だってありますよね。

B：構造物によって、設計プロセス全体としての不確

実性は異なるということですね。だから、構造物の種類によって、一部の力量のある技術者しかできないような高度な解析手法を標準にしたり、簡便法でもOKにしたり、といった判断が関与する余地があるわけですね。

A：そうです。それに、構造物の重要度も重要なファクターです。原子力構造物と港湾構造物では、許容される不確実性の程度も違うでしょう。

B：原子力の場合は、隕石が落ちてでも大丈夫のように造ってほしいですね。

## 6. 入力地震動の不確実性の評価指標

B：でも、倍半分とか、1.5倍というのは、なにを指標とした表現なのでしょう？

A：そうですね。漠然と使っていますが、実は人によって認識が違うのではないのでしょうか。土構造物を扱う人の場合は、変形量、特に残留の変形量に着目して精度を議論する人が多いようです。でも、その他の構造物では、塑性率であったり、部材の応力だったりするのでしょね。

B：地震動の場合は？

A：私の場合は、一般的な港湾構造物にとって影響の大きな周期1-3秒のフーリエ振幅によく着目します。応答スペクトルは継続時間の影響が入らないので、私はあんまり気にしませんね。また、最大加速度は、予測という意味でばらつきも多いし、被害との相関もあんまりよくないですね。

B：それは、土構造物を対象にしているからですね？その考え方は一般的なのでしょうか？

A：継続時間の影響を特に気にするのは、私の場合、土構造物を対象とすることが多いためです。しかし構造物によって着目すべき点が違うと思いますから、より多くの専門家の意見を伺いたいですね。

B：実は、いろいろと聞いてみると、実際には応答スペクトルを使って設計することが多いので、応答スペクトルのばらつきが重要という意見があるようです。また、地震動そのものよりも、入力のばらつきによる構造物の損傷程度のばらつきが重要であるとの意見もあるようです。

A：最後の意見は、結局、構造物の被害が問題になるので、地震動のみを切り離して議論するより、全体を通じての議論が必要ということですかね。

B：別の言い方をすると、構造物の応答を主眼に置いた地震動の見方が必要という意見ですね。各種の構造物において、そのおかれている状況（応答特性と社会的要請の両面、あるいはそのどちらか）を踏ま

えて入力地震動を設定する視点が必要、ということでしょうか？

A：例えば、鉄道の構造物と港湾の構造物では、いろいろな面で異なりますがそれぞれについて、その種の構造物に精通した技術者が、その視点で入力地震動を議論する必要があるということでしょうか？

B：そういうように解釈することもできますね。

## 7. まとめ

本稿をまとめるにあたり、著者らは草稿ができた段階で、種々の意見を得るべく、若手地震工学研究者の会 (<http://www.wcatfish.dpri.kyoto-u.ac.jp/~gyee/>) のメーリングリストを通じて概ね最終ページに示すようなアンケート調査を行いました。しかし、時間が無かったこともあり、十分な数の回答は得られませんでした。アンケートに対する直接の回答という形ではありませんが、複数の有益な御意見をいただいたので、それらについては本文中に反映させてあります。最終ページのアンケートについては引き続き御意見をお待ちしています。

最後になりますが、地震動を評価する側とそれを使う側との一層の意見交換が必要であること、また、入力地震動に関する合意形成に向けて、学会の果たすべき役割は大きいと痛感しました。土木構造物以外の種々の構造物等のことも考えると、第三次提言は合意形成へのまだ第一歩という感もありますが、学会における合意形成に至った先輩諸氏に対し敬意を表して本稿を終わりたいと思います。

謝辞：本稿を作成するに当たり、東京電力・植竹氏、産総研・吉見氏、ニュージェック・羽田氏、東京大学・本田氏から貴重なコメントをいただきました。ここに記して謝意を表します。

## ＜入力地震動の精度の評価についてのアンケート＞

地震工学に関連する研究をなさっている方にお尋ねします。

地震応答解析に基づく耐震設計において、不確実性が入り込む要素としては、種々のものがあります。ただ、現時点での最高の技術者が十分に相談して判断をしたとき、残される不確実性はどの程度だと思われますか？また、社会的に許容される不確実性はどの程度だと思いますか？

次の各質問にお答えください。根拠等はなくともかまいません。細かい条件も設定していませんので、勘でお答えいただければ幸いです。

Q 1：あなたがある特定の地震を対象として特定の地点の地震動を評価したとします。評価した地震動と、実際に将来生じる地震動との差については、どの程度の乖離を覚悟するべきでしょうか？「+ ? %から- ? %の誤差が標準偏差ぐらいとして生じる」という形でお答えください。

(回答例：プラス側には、せいぜい倍程度、マイナス側には、1/10ぐらいまで小さい地震動であることがありえる)

Q 2：実際の地震動の予測はいくつかのプロセスに関する仮定や推定の上で成立していると思います。上記の回答については、次のどのプロセスの評価の違いによる違いが支配的だと思いますか。

①対象活断層（もしくはプレート境界）で発生する地震の規模自体が不確実であるという現実の状況下での想定断層の評価

②どの断層でどのような規模の地震が生じるかまでは与条件であるとした上での（いいかえれば巨視的断層パラメタは与条件であるとした上での）、断層破壊過程などの評価

③詳細な断層破壊過程も与条件であるとした上での（いいかえれば微視的断層パラメタやその他の震源パラメタも与条件であるとした上での）、伝播経路やサイト特性に関する評価

(回答例：感覚ですが、①が支配的で乖離原因の5割以上。②が3～4割程度かな。③は事前の地震観測などをすればかなり減らせて、2割以下)

Q 3：上記の、あなたの作成した入力地震動について、作成した地震動の、実際に将来生じる地震動の差について、社会的にはどの程度の乖離であれば許容されると思いますか？

(回答例：+100%から-50%、倍半分なら許容される)

Q 4：上記の誤差は、何を指標に評価していますか？また、それは何故ですか？

(回答例：周期1-3秒のフーリエ振幅、一般的な港湾構造物の変形に影響を大きく及ぼす指標だと思っているので)

(回答例：最大加速度。土木構造物の設計は旧来の震度法の考え方によるものが多いので)

回答方法：筆頭著者（一井, [ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp](mailto:ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp)）宛にメールで御回答下さい。

回答期限：特に設定しません。

# 地盤構造探査からみた入力地震動

盛川 仁  
●東京工業大学

## 1. はじめに

構造物への入力地震動を設定する、という手続きは、究極的には、ある場所で発生しうる最大の地震動を予測する、ということにはほかなりません。精度の高い地震動予測を行うために、波動方程式を差分法によって直接数値的に解いて、特定の地点での地震動を計算する技術がこの10年くらいで非常に注目されています。その背景として、計算機の急速な性能の向上により、これまでとてもできそうにもなかった計算の実行が次々に現実のものとなった、ということが挙げられるでしょう。

計算機の高速度化と低価格化、関係者による計算技術の普及のための努力により、地震動の数値計算は、かつてのようなごく一握りの研究者や技術者のものではなく、誰にでも比較的簡単に実行可能なものとして、広く利用されるようになってきました。ただし、地震や地盤の適切なモデルがあつてはじめて意味のある計算結果が得られる、という実に単純きわまりない事実には、多いに注意を払っておかねばなりません。

また、巷に存在する多くの構造物の固有周期は1秒から0.2秒の間におさまる、と考えてよいと思いますが、現時点ではこのような周期帯域において、差分法によって地震動を直接計算することは非常に困難であると考えられています。もちろん、計算機資源としての物量を投入することである程度は解決できる問題ではあります。しかし、その一方でそれだけの詳細な計算に見合うだけの詳細な地盤や地震に関する情報があるわけではありませんから、たとえ計算が実行できたとしても、その結果に現実の現象のシミュレーションとしての意味があるかどうかは別の問題です。

以上のように、すでに、地震動予測というのは、計算の技術そのものから、その前提となる地震や地盤のモデル化をどうするか、というところが眼前の問題となつてきています。将来発生するかもしれない地震の特性を事前に規定することは、本質的に困難を伴う作業です。しかし、地盤構造については、次の地震が発生するまでに、今すぐにも調査をすればそれがそのまま地震動予測の精度の向上に貢献するという実にわかりやすい特徴があります。このことは、地盤構造探

査を実施するということが地震動予測をする上で投資効果の高い作業であることを示唆しています<sup>1</sup>。地盤構造の推定には、物理探査と呼ばれる様々な手法が駆使されますが、構造物を専門にやっている技術者や研究者には少し縁遠いもののように思われます。本稿では、構造物への入力地震動を計算する際に、どうしても避けて通れない地盤構造のモデル化について主として微動を用いた地盤構造探査という観点から思いつくままに書き連ねていきたいと思ひます。ここで対象とする地盤構造とは、地震基盤とよばれるせん断波速度が3 km/s程度の層から上(表層)の構造に限ります<sup>2</sup>。

なお、以下には、筆者の不勉強による誤解、勘違い、思い込みなどが少なからず含まれている可能性があります。書いていることを鵜呑みにしないで、ぜひ批判的に目通しいただき、お気づきの点やご意見がありましたら、是非、お知らせいただければ、と考えています<sup>3</sup>。

## 2. 微動探査法

微動探査法というのは、かつて、北海道大学の岡田広先生が使われた言葉のように記憶していますが、名前がどうであれ、微動を使った地盤探査は日本では広く利用されてきました。微動を用いた地盤探査には、主として2つの方向性があり、ひとつは、1地点で3成分の微動を観測し、水平動/上下動スペクトル比(H/V)を計算し、その形状から地盤構造を議論しようとするものと、もうひとつは、多地点で同時に観測を行うアレー観測を行って位相速度を推定し、その位相速度を満足する地盤構造を求める、というものです。以下では、前者を三成分単点観測、後者をアレー観測と呼ぶことにします。

1：いささか我田引水と言われるかもしれませんが...

2：地球物理学的には、地殻やマンツルの構造という話のほうに興味をひくような雰囲気がありますが、そのような全地球的規模の地盤構造は構造物の設計をどうしようか、というような工学的な目的には直接的なご利益があまりありませんので、省略します。

3：なんと手前勝手なやつ、と思われそうですが、せつかくこういう記事を書かせていただく機会を頂戴したのですから、有効に活用して勉強や議論の糧にしたい、思う次第です。

## 2.1 微動とは何か

そもそも、微動とは何なのでしょう。微動とは、常に存在しているごく微少な震動のことを言います。もちろん、体にはまったく感じない震動です。そして、その震動は地面の震動なんだから、その場所の地盤構造の影響を受けた震動であるわけで、そこから地盤構造に関する情報を抽出できるはずだ、と考えるのです。従って、微動探査とは、そこらへんに落ちていくごく小さな震動を拾ってきて、地盤構造を推定する手法、と行うことができるでしょう。微動探査においては、震源を準備する必要もありませんし、いつでもどこでも、必要なときにセンサーを持ち出して、観測をすれば直ちに、必要な情報を得ることができる、という点で非常にお気楽で便利な方法であるといえます<sup>4</sup>。

震源がいない、というのは便利ではありますが、見方を変えると震源が何かわからない、ということであり、地震や人工地震を用いた他の物理探査法に比べると観測によって得られる波の素性がよくわからない、ということが問題になります。実体波だろう、という説や、表面波だ、という説がありますが、現実には両方が混じっているのでしょう。ただ、微動の観測記録から地盤構造に関する何らかの情報を抽出するためには、微動がどのような素性の波であるか、ということを決めたうえで理論を構築し、解析を実施する必要があります。筆者個人は微動は大部分が表面波で構成されているだろう、と考えていて、この考え方は、それほど、マイナーな立場ではないと思っています。

微動の震源はなんだかわからない、と上に書きましたが、これは、震源をきちんと一意に特定できない、という意味であって、どのような物理現象によって、微動が生成されているのか、ということはいまだに理解されています。1秒から10秒程度の周期帯を「やや長周期帯」と呼ぶことがあります。このやや長周期帯の微動は通常「脈動」と呼ばれていて、海の波が海底を叩くことによって生じる波であると考えられています。これは、天気図と脈動レベルの相関性や台風の進行状況と脈動の伝播方向との関係などから、間接的に示されています。

日本のように四方を海に囲まれていて、500kmも行けば必ず海岸にぶつかるような地域では、日本のどんな場所でも脈動をかなり高いレベルで観測できることには納得できます。しかし、チベット山脈のふもと、海から数千km離れた山奥でもそれなりのレベルで脈

動は観測されています<sup>5</sup>。このように、地球上のどこへ行っても脈動を観測できそうだと、ということは<sup>6</sup>、地盤構造を決める、という目的からはそれなりに便利なことではあります。一方、1秒よりも短周期側の微動は、「短周期微動」と呼ばれることがあります<sup>7</sup>。短周期微動は主として、自動車や工場などから発生する人工的な振動が震源と考えられています。そのため、多くの場合、昼間は震動レベルが高く、深夜は非常に低くなる、また、平日はレベルが高く、日曜日は低い、といった日毎、週毎の周期的変動が見られます。日本のように社会活動が活動的な地域では短周期微動が非常に卓越しますが、人里離れた奥地へ行くと短周期微動よりも脈動の方が卓越する場合があります<sup>8</sup>。

## 2.2 微動を観測する

三成分単点観測にしろ、アレー観測にしろ、微動を観測して記録をとらないと、地盤構造を推定する、という話からはじまりません。微動を観測するためには、センサー（換震器、地震計）が必要です。しかも信号のレベルが非常に小さいため、高感度のセンサーを使うことになります。もちろん、短周期微動を観測する場合は、信号レベルが小さいとは言っても、やや長周期の脈動に比べれば信号レベルはずっと大きいですから、センサーの感度がほどほどでも、それなりの記録をとることができます。したがって、短周期微動の観測にあたっては、どのようなセンサーを用いても、よほど作りが悪いものでなければセンサーの性能が問題になることはないと言えます。

しかし、脈動を観測するためにはそれなりの準備が必要です。

小型のセンサーを用いると、観測もお手軽で、便利なのですが、小型のセンサーに入っている振り子の固有周期は1秒よりも短いのが普通です。そのため、1秒よりも長周期領域ではセンサーの感度が非常に低くなっており、脈動の信号は短周期微動にマスクされてしまったり、アンプ回路から混入するノイズに埋もれたりして正しい信号を得ることが難しくなります。従って、固有周期が2秒とか10秒というようなセンサーを使うことになります。固有周期が長ければ長い

4：微動探査の技術は世界中を見回してみても、日本においてもっとも普及しているように思われます。これは、微動探査の普及を目指して実際の観測をコツコツと積み重ねてきた先人の大いなる努力の賜物と言えると考えています。

5：中国雲南省の奥地、麗江盆地で脈動が観測されたときは、素直に感動しました。

6：確認したわけではありませんが...

7：単に「微動」と言ったとき、デフォルトで短周期微動を指している場合も少なくありません。

8：もちろん、地盤構造や天候にもよりますから、この記述は、だいたいのイメージです。

ほど、センサーを安定して設置することが難しくなりますので、お手軽、という微動のよさが多少スポイルされてしまう、ということは覚えておく必要があります。

そこで、小型でも長周期成分を正確に記録するという目的で、サーボ型のセンサーが用いられることがあります。これは、振り子に対してフィードバックをかけることで、見かけ上、センサーの感度が長周期領域まで一定となるようにしたものです。しかし、フィードバックをかけるときにサーボアンプを用いるのですが、このアンプが必ずしも予定通りに安定な動作をしない、という問題があります。特性上はDC（直流成分）までフラットなレスポンスを示すはずのアンプも、微妙にゼロ点がフラフラ動いてしまい、記録を見たときに、その振動が信号によるゆらぎなのか、アンプのゆらぎなのか区別がつかない、ということになってしまいます。

サーボ型センサーでは、振り子の状態が設計値と厳密に同じである、という前提でフィードバックをかけているわけですが、実際には、センサーを設置したときに期待通りの特性になっていることはあまり期待できません。水準器で水平をとってセンサーを設置しますが、水平にしたつもりでも少しは傾いているのが普通であって、その場合は、固有周期や減衰定数は設計値とは異なっています。振り子の本来の固有周期よりも長い周期帯では、センサーの特性の設計値との小さなズレはそのまま測定値の大きな誤差として出力されますから、これは、たいへんです。

信号とノイズの区別がつかない、という点では、上記のアンプ系のノイズも馬鹿になりませんが、観測時の風の影響も無視できません。風に吹かれてセンサー全体が揺らされる場合、その周期はだいたい3～10秒で揺れます。従って、記録から、脈動と風の違いを区別することはできません。この問題を解決するには、記録を取る段階で風の影響が入らないように対処するしかないわけですが、ほとんど体を感じないような弱い風であっても、高感度な観測を行っているために、ばっちり風を拾ってしまい、わけのわからない記録になってしまいます<sup>9</sup>。段ボール箱などをセンサーにかぶせて風よけをする、というのが単純ですが一番確実な対策です。

短周期微動を観測している場合には気がつきにくいのですが、センサーのすぐ横を人や自動車が通った場合、地面が傾いて、そしてまた元に戻ります。ちゃんとしたセンサーならば、この地面の傾きをきっちり捉

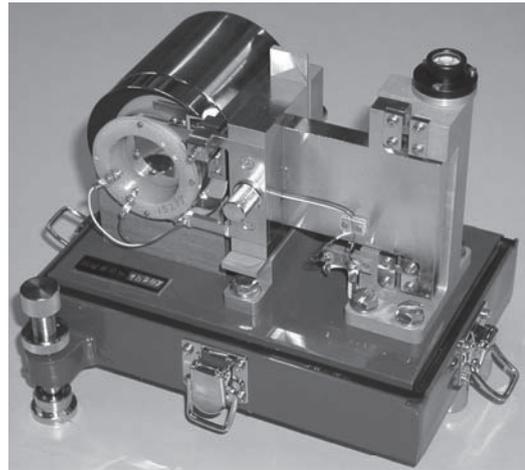


写真1 動コイル型地震計の例

えることができますので<sup>10</sup>、この地面の動きが、脈動と同じやや長周期領域の震動として記録に残ります。

結局の所、脈動を観測する場合には、サーボ型を使うよりは、昔ながらの単純明快な動コイル型でしかも、固有周期が長いセンサーを使うのが一番間違いがない、と考えています。もしも、小型のセンサーを使うのであれば、動コイル型を使用し、観測のたびにセンサーの特性をきちんと測って解析の際に厳密な計器補正をかける、というのが次善の策と言えるでしょう。参考までに、写真1に筆者が用いているセンサーの例を挙げておきます。これは、固有周期が2秒と比較的長いわりには小型ですので、持ち運びにも便利です。厳密な計器補正によって少なくとも10秒までは正確な記録を得ることができます。脈動観測では、適切なセンサーを用いて、風対策をきっちりとおこない、そのうえで、観測中はセンサーに近づかない、というごく当たり前のことをすれば、信頼性の高い記録を得ることができるでしょう。

### 2.3 三成分単点観測

三成分単点観測は、これまで、日本国内では実に多くの人々によって実施されてきて、地盤構造の推定の資料として広く使われてきました。

微動が表面波だとすれば、H/Vは表面波の楕円率（ellipticity）を表しているはずですから、H/Vのピークや谷を与える周期は地盤の速度構造と強い相関があるはずです。もちろん、観測されたH/Vの形状を満足する速度構造を逆解析によって探索する、という方法もあり得ますが、実際には局所解が多すぎて、正攻法

9：センサーがある程度重いケースに入っている場合は、風の影響は受けにくくなりますが、それも程度問題です。また、上下動成分は風の影響はほとんど受けません。

10：これが記録されないようなセンサーの出力は信用してはいけない、ということでもあります。

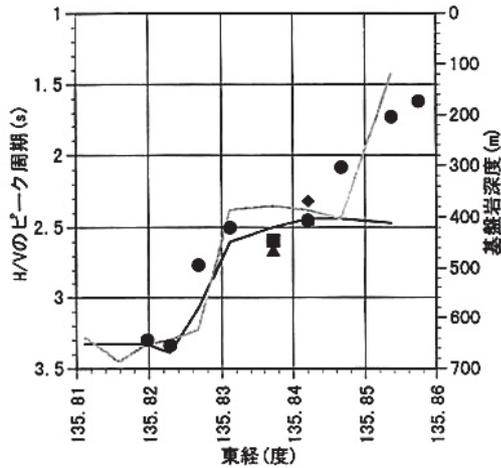


図1 H/Vのピーク周期と基盤岩までの深さの関係

ではとてもではありませんが、まともな解を発見できません。結局のところ、H/Vのピークを与える周期の変化が速度構造のもっともコントラストの強い部分の深さの変化に対応している、という予測と多くの観測事実を根拠として、H/Vのピーク周期の変化から基盤の相対的な深度の変化を追跡する、というのが微動の三成分単点観測記録の上手な利用法と言えます。

図1にある場所において反射法によって得られている基盤までの深さとH/Vのピーク周期の関係を反射法の測線にそってプロットしたものを挙げておきます。折れ線がH/Vのピーク周期で線の色の濃い、薄い水平動成分をそれぞれNS (南北)、EW (東西) 成分について別々にプロットしたためです。●が反射法による解釈図から読み取った基盤岩までの深さをプロットしたものです。なんとなく、対応がついている、という程度ですが、大雑把には、H/Vのピーク周期で基盤までの深さの相対的な変化が表現されていると言えるでしょう。

H/Vの値そのものが地盤の増幅度を表している、という考え方も広く受け入れられていますが、実際のところ、うまく説明できる場合もあれば、そうでない場合もあったりしてどのような条件下でうまくいくのか、ということがはっきりしていません。また、このような考え方の理論的背景としては、微動を実体波と見なしているようなようでもあり、そうでないようでもあり、H/Vを地盤の増幅度とみなしてよいのかどうか、ということについては、筆者は確信を持って何かを言うことができません。当面は、三成分単点観測から得られる記録において、利用できる量はH/Vのピーク周期であり、必要ならば次に述べるアレー観測の記録とあわせて議論するのが妥当であろう、というのが筆者の率直な印象です。

実際のところ、最近の地盤構造推定に関する研究の

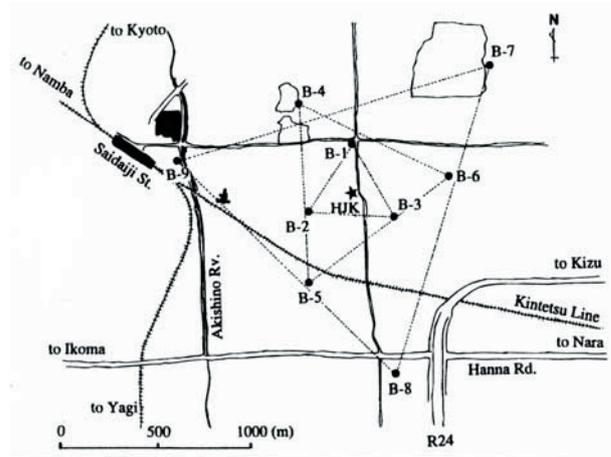


図2 微動アレー観測の観測点配置の例

様子を見ていると、単純にH/Vのみを用いる、という手法はかつてに比べて著しく減少し、次節に述べるアレー観測をおこなって、物理的意味が明確な位相速度を推定した上で速度構造を求めようとする手法が主流になってきているようです。三成分単点観測による地盤構造の推定手法はその簡便さから広く普及しましたが<sup>11)</sup>、計測器の低価格化、特にGPSによって校正される高精度の時計の普及による記録の同期の容易化により、アレー観測を実施することに対する敷居が低くなった、ということも現在の傾向を後押ししているのでしょう。

## 2.4 アレー観測

微動が表面波である、と考えれば、その位相速度を推定し、地盤の速度構造をかなりもっともらしく推定することができます。このためには、たくさんの地震計で同時に記録をとってそのなかのコヒーレントな波を抽出して位相速度を推定する、という作業が必要になります。このような観測法をアレー観測と呼んでいます。一般には1重または2重の正三角形およびその重心位置にセンサーを置くことでアレーを構成しますが、解析法によって、センサーの設置場所の制約が厳しかったりそうでもなかったりします。

図2に奈良の平城宮跡でアレー観測を行った際の観測点の配置の一例を挙げておきます。HJKという点を中心として半径300m ~ 1kmほどのアレーを構成しています。また、地震計をおく間隔を調節することで様々なスケールの地盤構造を知ることができます。位相速度を知りたい波の波長によってだいたいのアレーのサイズが決まりますが、これは、見たい地盤構造の

11: 簡便である、ということの魅力は今でも十分に高いと思いますが、物理的背景の不明瞭さがなんとなく足かせになっているように思います。

深さのスケールでもあります。ただ、あまりにも大きなアレーを設定した場合、コヒーレントな波を捕まえることが難しくなってしまう、理論から期待されるような長い波長の波の位相速度を推定することは難しくなるようです<sup>12</sup>。

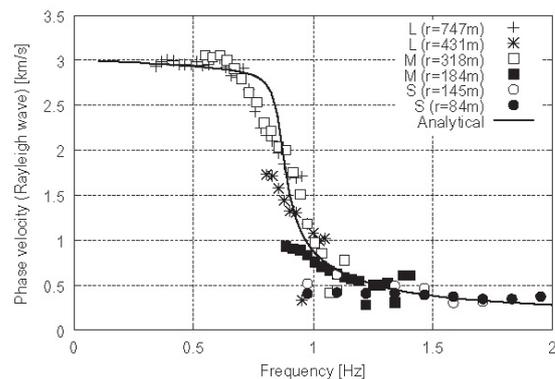
アレー観測記録の解析については、かつては広く用いられていたけれどもプログラミングが面倒な周波数-波数 (F-K) 法から空間自己相関 (SPAC) 法に主役の座が入れ替わってきているように見えます。SPAC法は、理論の枠組みが単純明快で、プログラミングが容易であること、比較的ノイズに強いこと、小さいアレーで F-K法に比べて長い波長の波の位相速度を推定可能であること、などの特徴が、アレー形状において厳しい制約が存在する<sup>13</sup>、という欠点に勝る魅力である、と認識されるようになってきたことが、このような傾向につながっているものと考えられます。

アレー観測によって地盤の速度構造を推定する方法は、位相速度と云う物理的に非常にわかりやすい量を用いますから、理論的背景も明快でたいへん結構なのですが、残念ながら、困ったこともあります。深い構造を調べたい、という場合、波長の長い波を捉えなくてはなりませんから大きなアレーを設置しなくてはなりません。推定された位相速度から地盤の速度構造を求める際に、私たちは、アレーの下の地盤が水平成層構造であることを仮定して解析するのが普通ですが、アレーが大きくてキロメートルのオーダーになると、この仮定がかなり怪しい場合がでてきます。もちろん、解析をすれば何かしらの答えはできますが、でてきた速度構造が一体何を反映しているのかわからない、ということになってしまいます。

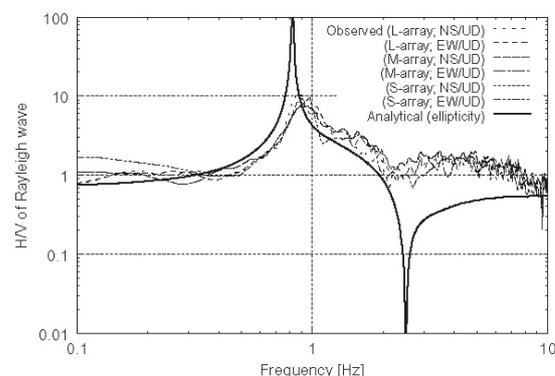
アレー観測では、たくさんの地点での同時観測をやっとうやくひとつだけ速度構造が決まる、ということになります。つまり、あんまり効率が良くないのです。三成分単点観測の場合は、観測を行ったらその分だけ、カバーする領域が広がっていくという目に見えるヨロコビがありますが、アレー観測の場合は、1日かかってやっと1ヶ所、という具合でそれなりにたいへんです<sup>14</sup>。

12: これは経験上の話ですので、単に筆者の観測がヘタクソなだけかもしれません。位相速度にもよりますが、センサーの間隔が2kmを超えるアレーで観測を行うと、インコヒーレントな波で記録が埋め尽くされているような気がします。あくまでも筆者の感覚では、ということですが。

13: SPAC法では正確に正三角形または正五角形になるように観測点を設置しないとなりません。F-K法では、観測点の配置については、ルーズでも問題ありませんが、偏った形状にすると位相速度の推定精度は悪くなります。



(a) 観測から得られた Rayleigh 波の位相速度と地盤の速度構造モデルから計算される Rayleigh 波の基本モードの理論分散曲線



(b) 観測から得られた H/V と (a) で用いた地盤の速度構造モデルから計算される理論楕円率 (ellipticity)

図3 微動の位相速度とH/V

そんなわけですから、要所ではアレー観測を行って、きっちりと速度構造を推定しておき、基盤の3次元形状を決めるために面的に観測点を増やすには三成分単点観測をたくさんやってアレー観測点の間を埋める、というこれら2つの観測法を組み合わせるとするのは悪くない方法と言えるでしょう。

### 3. もっと詳しく知りたい

#### 3.1 微動データの高精度解析

微動探査法は比較的簡単に地盤の速度構造を推定することができますから<sup>15</sup>、たいへん便利な方法です。しかし、面的に観測点を増やすために三成分単点観測を行った場合、得られた結果があまり安定していないのではないかと、という精度への不安がなんとなくつきまといま<sup>16</sup>。そのため、たとえば、位相速度とH/Vの組

14: もちろん、頑張ればいいじゃん、という説もないわけでもないのですが、最近になって、頑張りにも限度があるってことを、理性とは関係なく肉体が強く主張するようになってきました。

15: 反射法や屈折法に比べて、と云う意味ですが

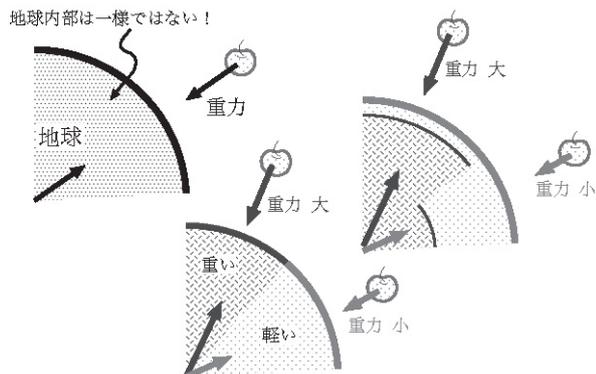


図4 重力異常の概念

み合わせや、微動と別の物理量との組み合わせにより、結果の妥当性を多面的に検証しながらよりよい精度で速度構造を推定しようとする研究が多くなってきています。特に微動アレーの観測の際に、三成分の微動を観測しておけば、位相速度とH/Vを同時に検討することができますから、位相速度を満足する速度構造から理論的に求められるellipticityが観測値から得られるH/Vとどの程度整合しているか、についての検討はかなり広く行われるようになってきています。位相速度におけるあいまいさをH/Vによって補って速度構造の推定結果をより高い精度で求めようとするためには非常に合理的な考え方といえるでしょう。

図3にアレー観測から求められた位相速度とH/Vを満足する地盤の速度構造から求められるRayleigh波の基本モードの理論分散曲線およびellipticityの例を示します<sup>17</sup>。

### 3.2 微動と重力の組み合わせ

微動と組み合わせる他の物理量としては重力が有力です。重力値は地球内部の密度の違いを反映している量ですから、そこから得られるものは密度構造であって速度構造とはベツモノです。しかし、そのことは承知のうえで、でも、密度とせん断波速度にはそれなりに高い相関がありますから、密度構造が速度構造と高い相関があるに違いない、と思わせる説得力があります。そのうえ、観測によって得られる重力値は非常に物理的背景がはっきりとしています。ある地点におけるまぎれもなく唯一無二の物理量ですから、微動の三成分単点観測から求められるH/Vのピーク周期というような曖昧な量とは本質的に異なります。そして、こ

の重力値は日本全国にわたって相当な密度でデータが整備されているのです<sup>18</sup>。

地質調査所が重力値の全国の観測データをおさめたCD-ROMを発行したこと<sup>19</sup>、そのなかには密度構造を直接的に反映したブーゲー異常値も含まれていることが、地震動の分野で重力データの利用が広がりつつある原動力となっているのではないかと想像しています。微動のアレー観測によって空間内で離散的に得られている地盤の速度構造を補間して、基盤の3次元形状を得るためにブーゲー異常の形状が使われることがあります。

この方法は上記CD-ROMに収録されているデータをダイレクトに利用することができて、たいへん良さそうなのですが、重力値は地表面から地球の中心までの密度構造を反映して決まる量ですから、私たちが対象としているような地球のスケールから見ればごくごく表層の数kmの密度構造を議論するには、余計な情報がたくさん含まれすぎています。図4に重力異常に関する概念をごく簡単に示しています。

重力を利用する場合は、もう少しきちんとした解析を行わなくてはなりません。特に、非常に深い部分<sup>20</sup>の影響は、表層の細かな変化とは関係なく、広域的なトレンドとして重力異常値の中に現れてきます。もちろん、重力は距離の2乗に反比例して小さくなりますから、地表面での重力値がごく表層の影響を極めて強く受けていることは間違いありません。しかし、だからといって、地球全体の大きな構造も込みにして表層の構造を議論してしまってもよい、ということにはなりません。

ブーゲー異常値から適当な基盤の3次元形状を抽出するためには、対象とする深さにあわせて空間的なバンドパスフィルタをかけることが必要となります。表層を対象とする場合は、もっとも短波長領域のブーゲー異常の変化に着目すればよいことになります。このような、データ取り扱いの際のちょっとした点に注意すれば、重力値は、非常に便利に利用できると考えています。

日本における重力値のデータは驚くほど整備されて

16：図1を見て精度に全然不安を覚えないよ、と云う人はこの節はスキップしていただいても問題ありません。

17：観測値と理論値の整合性は結構良い方だと思いますが、自画自賛でしょうか。

18：重力値は自律航行するミサイル（巡航ミサイルというやつです）が超低空を地面に衝突しないで安定して飛行するためには、その軌道計算において重要な情報です。従って、国によっては国家機密として管理しているところもあるようです。そんな重要なデータが1000円くらいのCD-ROMの形で、自由に誰でも簡単に入手できてしまう日本と云う国は、なんと言ってもいいかわかりませんが、科学的、工学的な立場からは実にありがたいことです。

19：2004年に第二版が発行され、データがさらに充実しています。

20：ここでは、マントルまで、といったスケールで、深いと言っています。

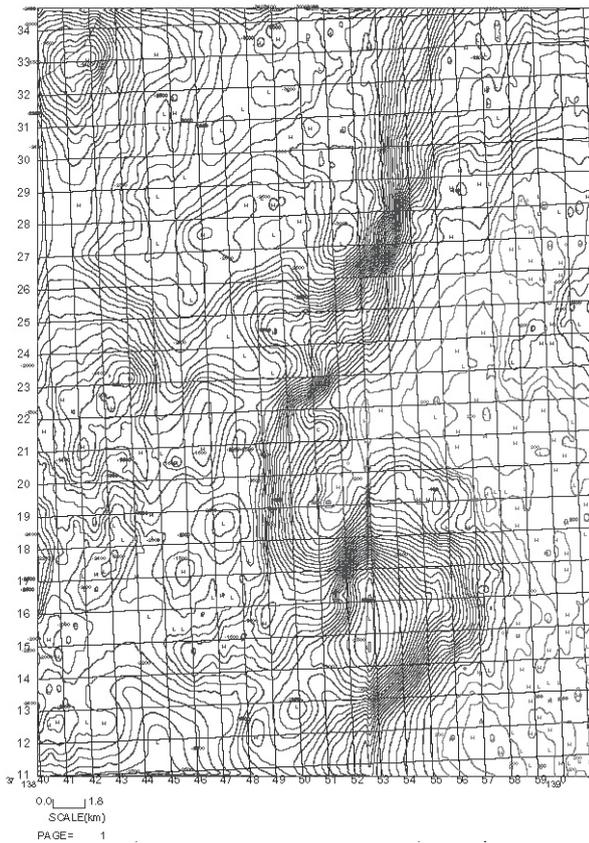


図5 重力異常から求められた重力基盤の例

いますが<sup>21</sup>、しかし、それでもある特定の地域での地震動を計算する、という目的には十分な観測密度ではない場合もあります。結局、これも必要に応じて観測を追加するしかありません。もちろん、既にある観測値とあわせて解析ができること、近年ではGPSの普及により位置決めが簡単になって、脈動の観測に比べてもずっと観測が簡単にできるようになったことを考慮すれば、微動探査と重力探査を組み合わせることもよい考えであると思います。

ある地域において、微動アレー観測から得られた速度構造を制約条件として与えて、重力基盤の3次元形状を求めた例を図5に示します。この図では、細かい基盤形状の変化を追跡するために地質調査所のCD-ROMのデータに独自の観測点を大幅に追加して求めたものです。複雑な基盤形状が読み取れるのではないのでしょうか。

#### 4. 入力地震動を考える

なんだか、予備知識に類する話を書いているうちに、

21：なにしろ、世界中にある可搬型の相対重力計の1/3は日本にある、という話もあるぐらいです。

22：というか、自分の好きな話ばかり書いて、それって完全に我田引水やん、と言われそうです。すいません。でも、ここまで

紙数もいつのまにやら多くなってしまいました<sup>22</sup>。しかし、地震動予測の話をするのがそもその目的でしたから、そのことに多少なりとも言及しなくてはなりません。以下では、差分法が利用できるやや長周期領域と、それが難しい1秒以下の短周期領域について、それぞれ別々に議論したいと思います。

#### 4.1 やや長周期領域の地震動

やや長周期帯域の地震動は、工学的には大スパンの橋梁や石油タンク、高層ビルといった長大構造物の振動に大きな影響をおよぼします。特に、首都圏の深い深い堆積層の上ではこのような周期帯で揺れやすいことが知られていますので、見過ごしにできません。

既にこの周期帯の地震動の数値計算の技術は確立しているといってよい状態にあります。従って、地震の特性と地盤構造さえわかっている、しかもそれなりの計算機を用意することができれば、任意の地点での地震動を計算によって求めることが可能です。

ただし、この前提条件が曲者です。

将来の地震の特性が事前にわかるほど我々は地震について詳しいわけではありませんし、地盤構造についても十分な知識があるとは言えないのが現実です。計算のための技術が確立していることと、それによってよい推定値を得られるかどうか、は全く別の問題なのです<sup>23</sup>。

この周期帯の地震動は地震基盤の3次元的な形状に大きな影響を受けると考えられています。しかし、波長が長いですから、ごく表層の細々とした構造の違いや変化には鈍感です。大雑把に言って、地震動の波長と同程度のスケールの地盤構造の変化をモデル化できれば、数値計算の用には事足りることになります。ですから、脈動を利用した構造推定、というやり方はよい選択であると言えます。

もちろん、地盤構造を知るためには適当な場所でボーリングをして調べるのが確実ですが、関東平野や、大阪盆地のようにキロメートルのオーダーの深い堆積層を有する地域ではもちろんのこと、いつでもどこでも気楽に穴掘りをする、というわけにはいきません。数値計算で使えるような地盤モデルを作るためには、それこそ、そこらじゅうに穴を掘らなくてはならないことになって、とてもたいへんそうです。

そこで、物理探査の手法が使われることになります。

地震動の予測をするために必要なのは、主として速

書いてしまって、今から書き直すのも辛いので(メ切も厳しいし...)ご容赦のほどを。

23：実に当たり前のことですが、時々、こういう基本的な部分が混乱しているような人もおられるようなので、念のために...

度構造ですから、いきなり速度構造がわかる手法が便利です。屈折法探査や反射法探査は比較的大きなスケールから細かい構造までよい精度で決定できる方法としてよく利用されてきました。しかし、残念ながら、センサーを設置した測線に沿った2次元断面しか求められません。3次元的な構造を知るためには、いくつもの測線を設定して観測をしなくてはなりません。

最近では、都市部で発破を用いることができませんから、大規模な屈折法探査はやりにくくなってきています。そうすると、どうしたって、パイプロサイズを用いた屈折法や反射法を行うことになるわけですが、何かとコストがかかってしまいます。ひと昔前に比べれば、反射法探査の単価も驚くほど下がってきているようではあるのですが、高価であることには変わりありません。いつでも、どこでも、というにはかなり敷居が高い、というのが現実でしょう。

結局、ボーリングや反射法のデータに微動探査や重力探査から得られる情報をあわせて地盤構造のモデルを構築する、という実にはありがちな結論に落ち着きます。ただ、波長がある程度長い地震波を対象としていますので、観測点の間隔は1～数kmのオーダーで十分な場合も少なからずあると想像されます<sup>24</sup>。観測点の密度が足りない場合は、微動の三成分単点観測や重力探査を追加することで比較的効率よく広い地域をカバーできることが期待されます。これらの観測法はそれほど高い解像度で地盤構造を推定できるわけではありませんが、基盤形状の非常に細かい変化や詳細な層構造までモデル化したとしても、数値計算の結果にはあまり反映されないでしょうから、効率を優先した観測が有効であると考えられます。

これまでに述べてきた、観測や解析にかかわる種々の注意事項に留意して観測を実施し、データの蓄積を進めていけば、数値計算に必要な地盤モデルを日本全国にわたって整備していくことは現実に実行可能な範疇にある、と考えています<sup>25</sup>。もちろん、このような地盤に関するデータベースを充実させようという動きも活発になってきていますから、それほど遠くない将来に、必要に応じて地盤データをデータベースから引用してきて簡単に数値計算で地震動予測ができるようになっていくかもしれません<sup>26</sup>。

24：もちろん、表層部分のせん断波速度に大きく依存します。

25：あとは、誰がやるか、ですが...

26：やや長周期領域までしか使えない、としても、本当に実現すれば素晴らしいことである、と思います。しかし、本稿の最後に述べていますが、最近観測に対するインセンティブが薄れてきているような気がしています。従って、フィールドでの観測を必要とするような事業はなかなか進みにくいのではないかと、という不安も少なからずあります。

## 4.2 短周期領域の地震動

構造物への入力地震動を取り扱うという工学的な立場からは、1秒よりも短い短周期領域の地震動を考慮することが非常に重要です。しかし、差分法による数値計算によって短周期領域の地震動を厳密に計算することは、現時点ではあまり現実的なことではない、と考えられています。そのため統計的グリーン関数法などを短周期領域に適用して、これを差分法によるやや長周期領域における解析結果と重ね合わせて広帯域の地震動を計算する、というような手法が用いられています。

短周期領域では地震動の波長も短いですから、広域的な地盤構造の影響よりも、局所的な構造が重要になります。極論すれば地盤の3次元構造なんてどうでもよくて、1次元問題として考えれば十分でしょう、と云うこととなります<sup>27</sup>。

短周期帯ではごく表層の構造の影響を大きく受けますから、それほど深いボーリングでなくても、工学的基盤と言われるせん断波速度で600m/s程度の層までの構造がわかればかなり有用であると言えます。しかも、そのようなボーリングは、地震基盤に達するような穴に比べても圧倒的にたくさんありますから、とても有効に利用できます。このこと自体は非常に喜ばしいことなのですが、ここで、問題となるのは短周期帯での地震動は波長が短いために非常に局所的な地盤構造の影響を受けるということです。

つまり、現在のボーリングのデータの密度では全然足りない、ということなのです。浅いボーリングは、一見、たくさんあるように見えますが、短周期帯の地震動を考えるには全然足りていないのです。

例えば、新幹線の例を考えてみます。新幹線構造物はとても重要な構造物ですから、構造物を作るときに、路線に沿って入念な調査が行われます。ですから、ほかの場所に比べても新幹線構造物の周辺では、相当、密なボーリングデータが存在しています。しかし、それでも、高架橋の地震応答を計算するには、ボーリングとボーリングの間の未知の地盤をどのようにして埋めて、構造物の応答計算をしたらよいのか、真剣に悩んでしまうのです<sup>28</sup>。高架橋のような構造物を対象とする場合、入力として与える地震動はどの橋脚にも同じものを与える、という方法も考えられます。しかし、橋脚毎の入力波形に位相差があったり、インコヒーレントな成分が含まれていたりすると、応答はどちらか

27：さすがに、ここまで言い切ってしまうのは言い過ぎであるとは思いますが...

28：2004年新潟県中越地震の際に高架橋がどのような挙動を示したのか、が多くの人に注目されたことは記憶に新しいところです。

という大きくなるようですから、一様に同じ入力を与える、というのは危険側の判断をしてしまう可能性があることになってしまいます。

このような非常に細かい構造を地盤探査で同定することは大きな困難が伴います。

短周期微動の観測や解析はこれまで非常に多く行われてきていますから、このような目的には最適のようにも思えます。しかし、微動の三成分単点観測を利用する場合には、H/Vの物理的根拠があまりよくわからない、ということもあって、うまく構造を説明できていたりいなかったりして困ってしまいます。微動のアレー観測はかなり有望ですが、短周期帯は自動車や工場などの人工的な震源がたくさんあって記録に含まれている波形がノイズなのか信号なのか区別のしようがなかったり、アレーの内側に震源が存在して正しい位相速度を推定できない、という場合も少なくありません。広大なグラウンドのようなところで、息をひそめてひっそりと観測をする、というようになり条件が整っていないと合理的な結果を得ることは難しいでしょう<sup>29</sup>。

重力によって表層の細かい構造を知ろうとすると50m間隔というような極端に密な観測が必要になりますし、本来知りたいはずの密度構造の微小な変化が、周辺の重いもの<sup>30</sup>や軽いもの<sup>31</sup>の影響に埋もれてしまいます。したがって、砂漠のまんなかで観測をする、というような特殊な条件でない限り、細かい構造を知ることが難しいでしょう<sup>32</sup>。

このような状況の元では、短周期領域の地震動に影響の大きい地盤構造を同定することは、やや長周期領域でのそれに比べても非常に困難であると言えます。従って、たとえ、非常にすぐれた計算機が発明されて、これまでできなかったような短い周期領域まで差分法で厳密な計算ができるようになったとしても、地盤構造のモデルのほうがその精度に追い付かない、ということになってしまいます。

地震基盤のように深い構造と違って、短周期領域の地震動に影響を及ぼす浅い構造はすぐ手の届くところにあるため、わかっているような気になってしまいが

ちですが、現実には灯台下暗しというか、あまりよくわかっていない、ということをよく認識しなくてはなりません。

最近では、観測によって、構造を決定するよりも、既に、広く整備されている表層地質図などを参考にして統計的に地盤の速度構造に関するパラメータを簡易的にモデル化する方法も提案されており、用途によっては一定の成果をあげています。

短周期領域の地震動を考える上では、このような種々の方法を組み合わせて少しでも情報量を増やして利用できるものは何でも利用できる、という気持ちで取り組むしかない、と考えています。しかし、より重要な点は、現時点で得られている短周期領域での地震動の推定結果は、このような背景のもとで推定されているということのを正しく認識し、そのうえで、推定精度についての正しい理解をもって結果を活用していくことではないでしょうか。

## 5. 地盤探査をしないですませたい

差分法による数値計算で力づくで地震動を求め、という考えとは別に、もしも、小さな地震の観測記録があれば、その地震のすぐ近くで発生した（または発生するであろう）大地震による地震動を予測できます、という方法があります。これは、半経験的グリーン関数法と呼ばれるものですが、小地震の記録をその地点での地震のグリーン関数とみて、大地震を考える場合には、これを重ね合わせればよい、とする考え方です。

この場合は、小地震の記録をグリーン関数と見なすことにより、途中の地盤構造の影響を全部込みにしたブラックボックスとして扱うことができます。従って、構造に関する細かい話をすべて飛ばすことができる、という大きなメリットがあります。ただ、問題は、そのような都合のよい地震の記録が手元にあるかどうか、ということです。また、予測が必要な場所に地震計がおかれている、ということは、たいいていの場合、期待できませんから、結局使えない、ということになってしまいがちです。

ただ、グリーン関数がわかればいだろう、という考え方は非常に示唆に富んでいます。最近、密かなブームになっているのが<sup>33</sup>、2地点間の観測記録の相互相関がその間のグリーン関数になる、という考えです。しかも、コーダ波のような散乱を強く受けた波の相互相関を利用することができる、ということになっていて、たいへん便利です。ある程度は理論的な背景も明

33：ホンマか？

29：もちろん、これを実際にやっている人もおられますから、やればできることは間違いありませんが、いつでもどこでもお手軽に、というような性質のものでないことは確かです。

30：コンクリート製の高架橋やビルなど。

31：ガソリンスタンドの地下タンクや下水管などの中空のものなど。

32：そして、そのような特別な条件のところの地盤データと云うのはたいいていの場合、私たちにとって不要なのです。誰も人が住んでいないところでは、工学的なニーズがないのが普通ですから。

らかになってきていますので、現実的な応用への取り組みが始められたところ、といえます。ただ、散乱波を利用できるから、といって、そのまま微動のようなよくわからない波に適用できるのかどうかはよくわかりませんし、その適用範囲も明確ではありません。しかし将来有望な手法のような気がしています。地盤探査の話を書きながらこのようなことを言うのも無責任ですが、もし、本当にグリーン関数がわかるのなら、必要な地点間での同時観測をすることで、地盤探査をするよりもよほど効率よく、必要な場所における地震動予測が可能になるはずで

す。地盤構造探査のための手法の高度化の検討だけではなく、全く視点を変えて地盤構造を意識しない手法の開発も同時にすすめられれば非常に有効ではないかと考えて、あえて、ここに記した次第です。

## 6. おわりに

まとまりがないままに、だらだらと長く書いてしまいました。ここまでおつきあいくださった読者の皆様にはとても感謝しています。

地盤構造の推定の話は物理探査学会や地震学会で議論されることが多いのですが、これらの学会の年次講演会などに行ってみると、最近、微動を用いた地盤構造探査の研究が10年前に比べて非常に少なくなっているように思えます<sup>34</sup>。かつては非常に多くの人が微動の観測を行い、そのH/Vから「地盤の増幅度」や「卓越周期」を出したりしていました。このような研究テーマのためのセッションには非常に多くの時間がさかれていましたが、最近ではすっかり少数派となっ

てしまいい、今では花形の座は数値計算に取って代わられたかのようなのです。観測をベースにした研究と云うのは、観測に手間と時間がかかるわりには、たとえば、得られた結果は、コンター図が1枚だけ、とか、速度構造のプロファイルがひとつだけ、というような今時の研究スタイル<sup>35</sup>にはおおよそマッチしていない地味で効率が悪い、ということがこの種の研究テーマが流行らなくなってきた理由の一つでしょう。また、みんなが、どういうわけか無闇と忙しくなって観測をやっているヒマがなくなってきた、ということもあるかもしれません。そして、そ

れを見て若い人が観測に興味を失ってきて、あるいは、観測そのものを知らないという状態になって、ますます、誰もこの種の研究をしなくなる、という悪循環に陥っているようでもあります。地震動予測では地盤構造モデルが結果に及ぼす影響は非常に大きいのですから、地盤構造に関する研究は地震防災上極めて重要な分野であるはずだ、と思うのですが、それが、あまり流行っていない、という事実は、将来にむけて幾ばくかの不安を覚えます。

微動はアレー観測に基づく位相速度の推定法を別にすると物理的背景があまりはっきりしないままに利用されてきたようなところもあります。このことが、微動から得られた地盤構造の推定結果に曖昧さを引き込んでおり、ひいてはそれが研究活動の停滞につながっているのかもしれない。

物理探査の解析法については多くが既に完成されたもの、と云う認識も広がっているようで、新しい解析法の開拓に対する意欲もあまり強くは感じられません。そうは言っても、わずかではありますが、新しい解析手法がコンスタントに提案され続けていることを考えると、観測をしてデータを蓄積する、というだけでなく、まだまだ多くの研究テーマが残されているように思います。

地道なデータの蓄積だけではすぐに飽きがきてしまいます。

そうならないためにも、データの蓄積と併せて、新しい手法の開発、明快な物理的解釈の与え方などについての研究が広く進められることが、微動をはじめとした地盤構造推定に関連する研究テーマの活性化に必要である、と考えています。そして、地盤構造に関する研究の発展は今後の地震動予測にとっても重要かつ必要でもあるのです。

このような意識をもって、研究を進めていくことはもちろんのこと、地盤構造の話ができる工学屋さんの仲間を増やしていく努力も必要であると考えています。そう、そこのあなたも、ぜひ、一緒に！

34：物理探査学会は行ってないので、よくわかりません。しかし、地震学会では10年前と比べてみると、数え方にもよりますが、半分くらいになっています。

35：要求されている成果の単位時間あたりの量（質はどうか、という議論はさておき）が急速に増えている、という現実のことを言っています。



に用いた地震動は耐震設計標準に規定するL2地震動のG3地盤(卓越周期0.25~0.5秒)のスペクトルⅡ(内陸直下型地震動タイプ)適合波である。その波形を図3に示す。

静的非線形解析による結果を図4に示す。これは線路直角方向の解析結果である。これからこの高架橋は $K_{hy}$ が0.41、 $\delta y$ が16cm、 $T_{eq}$ が1.249sである。

この値を用いて所要降伏震度スペクトルから $\mu_r$ を求めると2.74となり、したがって、最大応答変位は44cmとなる。

この解析では残留変位は求まらないが、おおよそ最大応答変位の1/2と考えるとその値は20cm程度となる。また、柱の損傷は降伏は超えるが最大曲げモーメントは超えない損傷レベル2であった。

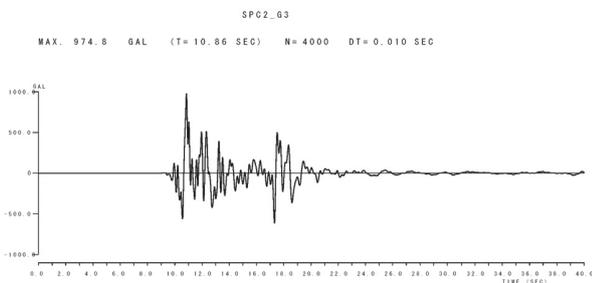


図3 入力地震動波形

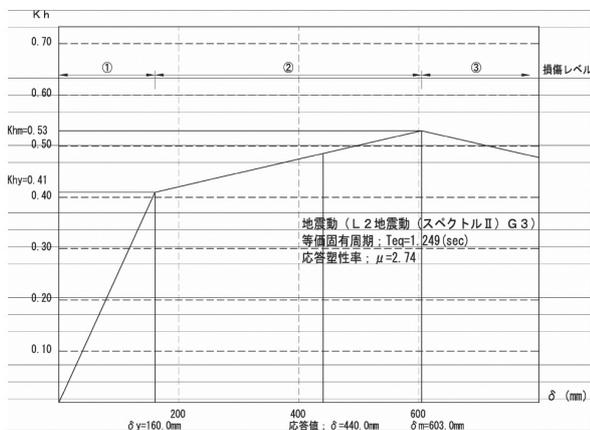


図4 荷重—変位曲線

### 3. 免震高架橋

2. で述べた高架橋に対して、杭とフーチングを切り離し、その間に滑り沓を設置して免震構造とした。その一般形状を図5に示す。なお、杭は高架橋の応答が低下するため、軸力変動が小さくなり、短い杭ですむ。そこで図に示すように、柱1本当たり長さ5mのアットコラム杭9本を設置することとした。アットコラム杭および滑り沓の詳細を図6に示す。

アットコラム杭は攪拌混合によって地盤中に作成したコラムに羽付鋼管を建て込んで作成するもので、大きな鉛直支持力が得られる杭である。

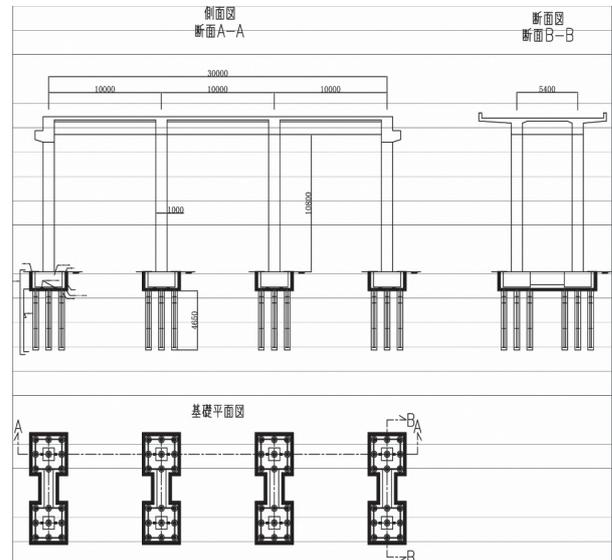


図5 高架橋一般図(アットコラム)

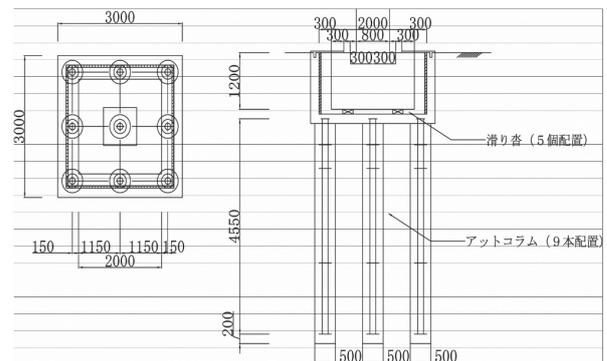


図6 アットコラム杭および滑り沓詳細

応答計算に用いるモデルは、高架橋は骨組モデル、地盤は有限要素モデルとした。構造物付近のモデルを図7に示す。なお地盤の水平方向の広がりは100mとし、側方の境界条件の影響が小さくなるようにした。

地震波はスペクトルⅡ適合波の基盤波とし図2の基盤面(N値50以上の角礫岩でせん断弾性波速度400m/sと仮定)で粘性境界を介して入力した。

入力地震波を、高架橋の梁部(構造物天端)の応答変位波形を図8に示す。高架橋の応答値は最大で21cm程度と先の2. で述べた高架橋の半分程度にとどまっていることが分かる。このときのフーチング底面の滑り沓の履歴を図9に示す。なお、この滑り沓の摩擦係数は0.1とした。

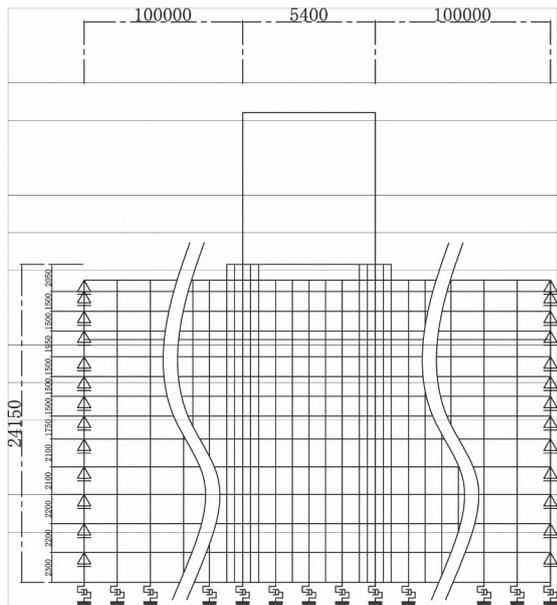


図7 構造物付近のモデル

この図から、沓には滑りが生じており、免震効果を持つことが分かる。高架橋の応答は加速度で283gal、最大変位で21cm、残留変位で5cmとなった。

また、柱は2. の高架橋の断面積 1 m角を80cm角に、さらに鉄筋量をφ32mm10本を8本に減少したにもかかわらず、降伏しない結果となった。

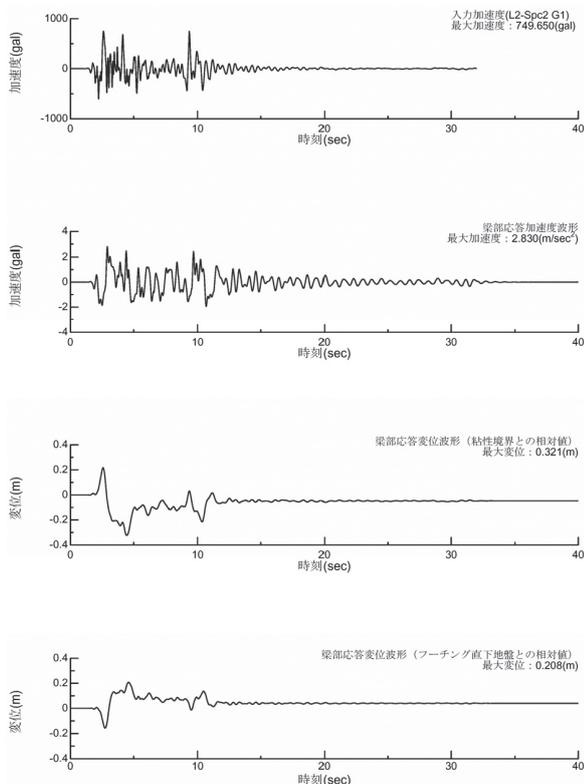


図8 入力地震動および梁部応答変位波形

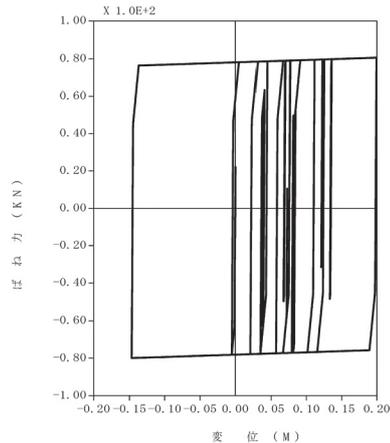


図9 滑り沓履歴曲線

このように、この高架橋は2. で述べた高架橋と比較すると最大応答変位量、残留変位量および柱の損傷がいずれも小さくなった。

この構造の効果はこれから振動試験などを実施してさらに確かめる予定であるが、その経済効果は、杭が大幅に工事費が低減されることに加えて柱等も小さくすることができることから、相当な工事費を低減できることが分かる。

#### 4. 制震高架橋

新設の高架橋は耐震設計なり、免震設計を行って建設されるが、既設高架橋において耐震強度が不足する場合は耐震補強工を実施することとなる。ここでは、耐震補強を減衰こまによるものと想定し、線路直角方向を取り上げ、減衰こまを取り付けた場合とそうでない場合の応答値を比較する。図10に高架橋の形状を示す。

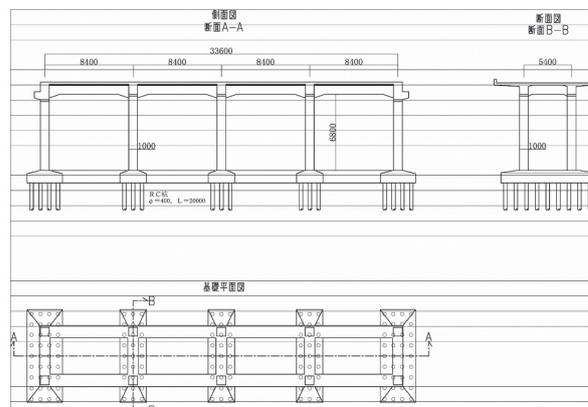


図10 高架橋一般図

この高架橋は4径間の杭基礎形式で、柱の高さは6.8 m、杭はRC杭で、1フーチング当たり端部36本、中

間部27本、長さは20.0mで、径は400mmである。また地盤はG4地盤(卓越周期0.5～0.75秒)である。

この高架橋は静的非線形解析の結果降伏震度(K<sub>hy</sub>)は0.32、降伏変位( $\delta_y$ )は36mmとなった。

また、この高架橋は降伏とほぼ同時に柱が剪断破壊をすることが判明しており、したがって、この高架橋は地震時の柱の変形量を36mm以内に納める必要があり、そのために必要な減衰こまの能力(減衰力)を地震応答解析で求めることになる。

減衰こまは、構造物に生じる層間速度(直線運動)を滑りねじにより回転運動に変換し、増幅された速度を回転部分に充填された粘性体に作用させることで粘性抵抗力を発生させる。さらに、その粘性抵抗力が直線運動への再変換過程において、ねじ部に作用すると摩擦力が発生するものであり、大きな減衰力を得ることができる。その構造を図11に示す。

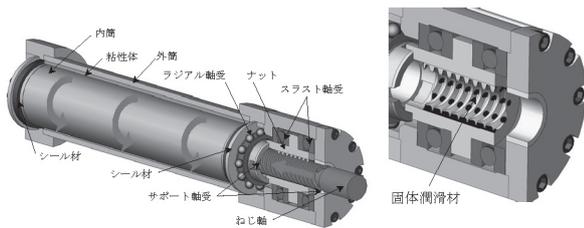


図11 減衰こまの概要図

これを用いることの利点は、減衰力を調整することによりレベル2地震動が作用しても構造物を降伏させないようにすることが可能であり、上部の補強により、基礎に大きな負担を生じさせないようにすることが可能な点である。

動的解析に用いる高架橋のモデルは骨組とし、静的非線形解析の結果から、杭・地盤を集約ばねとした。

図12に減衰こま有、無の解析モデルを、表1に解析結果を示す。

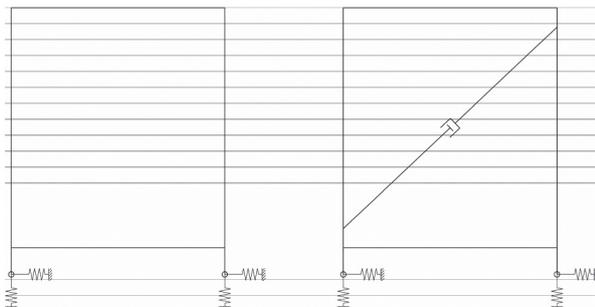


図12 解析モデル図

表1 解析結果

解析ケース	減衰こま能力(kN)	柱部材	
		降伏時の相対変位(mm)	応答相対変位(mm)
減衰こま有	400	36	19
減衰こま無	—		52

本ケースの場合、減衰こまを設置することで柱上下端の応答相対変位は33mm減少しており降伏以内にとどめることが可能となった。

### 5. おわりに

以上、鉄道構造物として一般的に用いられるラーメン高架橋の地震時の応答変位量を求めた。比較のため耐震設計されたもの、免震構造としたもの、さらに、制震工法を施したものの変位量を示した。その結果、一般の耐震設計を実施した高架橋が変位量は最も大きくなった。

構造物の地震時の変位量は入力地震動の性状、構造物および地盤の振動特性や非線形領域を含む変形性能に大きな影響を受ける。したがって、今後この方面の研究のさらなる進展が望まれる。

### 参考文献

- 1) 土木学会：増幅機構付き減衰装置(減衰こま)による構造物の耐震補強工法の設計・施工指針、技術推進ライブラリー No.1、2005.12
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説、耐震設計、丸善株式会社、1999.10

# 地盤・構造物系の有効応力解析における境界条件

渦岡 良介

●東北大学大学院工学研究科

## 1. はじめに

本稿では、地盤・構造物系の有効応力解析における境界条件について概説する。土の応力ひずみ関係は、ひずみや有効拘束圧に強く依存しており、粒状体特有の性質であるダイレイタンスも顕著である。したがって、非線形せん断変形特性やダイレイタンスなどの体積変形特性を表現できるように有効応力で記述した構成モデルが必要となる。また、飽和地盤の運動場を扱うには、多孔質体理論などにに基づき、土骨格と間隙水（不飽和では間隙空気も）の運動方程式を記述する必要がある。このような有効応力で記述された構成モデルと土・水連成場の運動方程式を用いる解析は有効応力解析と呼ばれている。有効応力解析では、土骨格および間隙水に対して境界条件が必要となる。一方、液状化の発生を考慮しない粘性土層などの地震応答解析では、ダイレイタンスを無視した構成モデルが用いられる場合もあり、一般に全応力解析と呼ばれている。全応力解析では過剰間隙水圧は陽に扱わず、構成モデルは全応力で記述される。

## 2. 土骨格の境界条件

### (1) 底面境界

底面境界については、全応力解析と同様に剛基盤あるいは弾性基盤が用いられる。図1は一次元解析における剛基盤と弾性基盤の解析モデルを示している。剛基盤での入力動には、基盤面での上昇波(E)と下降波(F)の和 $u_b$ （合成波、E+F）が用いられる。一方、弾性基盤での入力動には、開放基盤面上の露頭波 $u_f$ （2E）が用いられる。ここで、表層（第1層）と基盤層（第2層）の2層地盤のSH波伝播を考えると、弾性基盤に対する表層の増幅率は波動理論より次式で与えられる。

$$\left| \frac{2E_1}{2E_2} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 k_1 H_1 + a^2 \sin^2 k_1 H_1}} \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{\omega}{V_1 \sqrt{1+2h_1 i}} \quad (2)$$

$$a = \frac{\rho_1 V_1 \sqrt{1+2h_1 i}}{\rho_2 V_2} \quad (3)$$

ここに、下添え字は層番号を示す。kは波数、Hは層厚、aはインピーダンス比、 $\omega$ は角振動数、Vはせん

断波速度、hは減衰定数（第2層の減衰は無視している）、 $\rho$ は密度である。また、剛基盤に対する表層の増幅率は波動理論より次式で与えられる。

$$\left| \frac{2E_1}{E_2+F_2} \right| = \left| \frac{1}{\cos k_1 H_1} \right| \quad (4)$$

さて、後の振動台実験における入力動の議論の参考のため、既往の遠心模型<sup>1)</sup>を対象とした有効応力解析を行い、底面境界条件の影響について考察する。図2は液状化地盤上の盛土をモデル化した遠心模型地盤である。図は50gの遠心加速度を考慮して実物スケールで示している。上部の緩い江戸崎砂層が液状化発生の可能性が高い層であり、下部の密に締められた硅砂層は液状化発生の可能性が低い層である。また、地下水位は地表面と一致している。解析に用いたコードは、二次元有効応力解析コードLIQCA2D04<sup>2)</sup>であり、当該遠心模型実験に対して既にシミュレーションが実施され適用性の検討がなされている<sup>3)</sup>。

実験では剛土槽を用いていることから、シミュレーションでは剛基盤とするのが一般的であるが、ここでは仮想的に弾性基盤（せん断波速度300m/s）とした解析

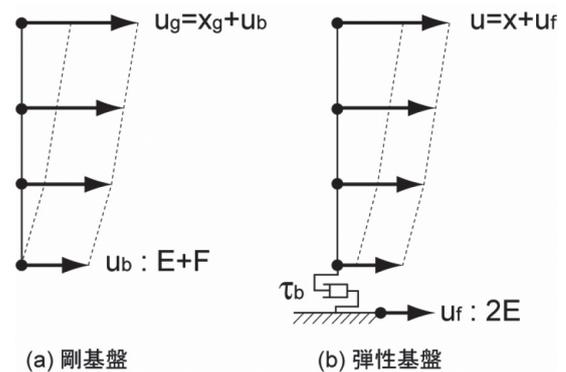


図1 剛基盤と弾性基盤

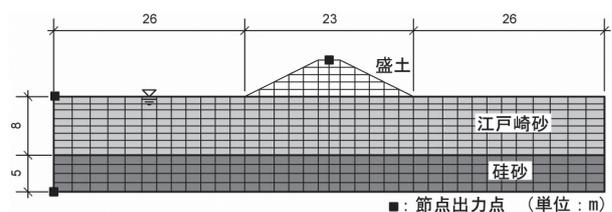


図2 盛土の遠心模型(実スケール)<sup>1)</sup>

も実施し、底面境界が解析結果に与える影響を考察する。また、側方境界は後述する擬似自由地盤境界である。入力動には1968年十勝沖地震の際に八戸港で観測されたNS成分を工学的基盤まで引き戻した露頭波<sup>4)</sup>を用いる。地盤の材料パラメータなどその他の解析条件については、遠心模型実験のシミュレーションと同一である。

図3に盛土天端、側方地盤地表面およびモデル底面における水平加速度の時刻歴を示す。出力対象となる節点位置は図2の■に示している。また、図4に盛土天端の鉛直変位(負値が沈下を示す)の時刻歴を示す。剛基盤のケースにおける応答をE+Fで、弾性基盤のケースにおける応答を2Eで表示している。剛基盤および弾性基盤とも同一の入力動を用いていることから、線形応答を考えれば、式(1)および式(4)からわかるように、地下逸散を考慮している弾性基盤のケースの方が剛基盤のケースより盛土の応答は小さくなる。図3に示すように、加振初期(約4秒まで)においては、弾性基盤のケースの応答が剛基盤のケースの応答より小さくなっている。

この加振初期の応答の違いによって、液状化に至る時刻が両ケースで異なり、その後の応答傾向は加振初期とは異なっている。図3(b)の側方地盤地表面の応答加速度の減少でわかるように、剛基盤のケースにおいて江戸崎砂層が液状化に至る時刻は約4秒であるが、弾性基盤のケースにおいては約7秒である。剛基盤のケースにおいて液状化が発生する約4秒以降では、図3(a)に示すように盛土天端の応答は、液状化発生が遅い弾性基盤のケースの方が大きくなる。また、弾性基盤のケースにおいて液状化が発生する約7秒以降では、図3(c)に示すように、モデル底面における応答が剛基盤のケースとほぼ等しくなっている。液状化地盤ではせん断剛性が著しく低下し、弾性基盤のケースにおいても基盤面に対するインピーダンス比が小さくなる。このため、式(1)および式(4)からわかるように、弾性基盤のケースでも剛基盤のケースに近い応答が得られたと考えられる。この結果、両ケースにおける盛土天端の沈下量は図4に示すように、最終的には同程度となっている。

以上、盛土の遠心模型地盤を対象とした有効応力解析結果を示したが、この結果はあくまでもここで対象とした単純な解析条件下で得られたものであり、多層地盤では異なる結果となる可能性もある。

## (2) 側方境界

側方境界については、以下の境界が用いられる。

### ① 鉛直ローラー

最もシンプルな境界である。剛土槽を用いた模型実

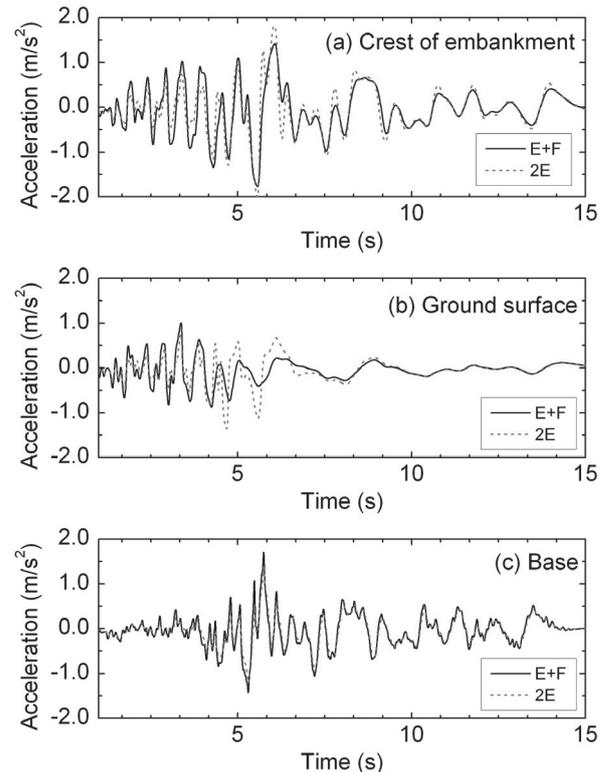


図3 水平加速度の時刻歴

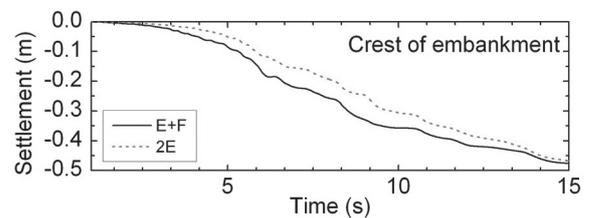


図4 盛土天端の沈下量の時刻歴

験のシミュレーションなどで使用される。実物の解析で用いる場合には、側方境界からの反射波の影響を小さくするため、モデル幅を十分に広くする必要がある。

### ② 繰返し境界

解析モデル両端の同一深度の節点変位が等しくなるように拘束する。水平成層地盤を扱う一次元解析で用いられる。また、多次元解析においても、側方境界の地盤条件(土層構成、物性)が同一であれば使用することができる。

### ③ 粘性境界

自由地盤部をダッシュポットにより接続する。自由地盤部の応答は一次元解析により別途計算される。

### ④ 擬似自由地盤境界

解析領域の影響を受けにくい幅広の自由地盤部(一次元挙動となるように要素両端の同一深度の節点変位

が等しくなるように拘束する)を接続する。

いずれの境界でも、間隙水の浸透を考慮する場合には、土骨格の鉛直変位が生じるため鉛直方向を自由とする必要がある。全応力解析においてモデルの対称性を表現する際に用いられる鉛直固定・水平ローラーは、間隙水の浸透を考慮する有効応力解析では鉛直方向の変形が発生することから用いることはできない。また、エネルギー伝達境界などの線形の構成モデルおよび周波数領域を対象とした境界は用いられない。

有効応力解析は、地震中の地盤や構造物の応答値の予測のみならず、地震後の残留変形の予測にも使用される場合がある。ただし、有効応力解析の残留変形予測に対する精度は十分とはいえないのが現状であり、その適用には十分な注意が必要である<sup>5), 6)</sup>。盛土構造物や直接基礎構造物などの重量構造物、地中構造物などの軽量構造物、護岸構造物などの抗土圧構造物を扱う問題では、地震前の状態でもせん断応力(初期せん断応力)が地盤内に生じている。地盤が液状化した場合、せん断剛性が著しく小さくなることから、わずかな初期せん断応力の存在によって、残留せん断変形が生じることになる。一例として、河川堤防の有効応力解析で得られた地震後の残留変形図<sup>7)</sup>を図5に示す。この解析では、側方境界として上記④の擬似自由地盤境界を用いている。図に示すように堤体から離れた側方境界部分でも解析モデル外側への水平変位が生じていることがわかる。また、側方境界として、上記③の粘性境界を用いた重力式護岸の有効応力解析では、背後地盤では海側への水平変位(解析モデル内側)が発生している<sup>8)</sup>。これらの残留水平変位は液状化に起因した流動変形の一部であり、地盤条件によっては、対象としている構造物より大きなスケールで発生する可能性があることに留意する必要がある。

### 3. 間隙水の境界条件

間隙水に対しては、圧密解析と同様な境界条件が用いられる。間隙水の境界条件としては、過剰間隙水圧の値が指定される水頭固定境界(基本境界)と過剰間隙水量が指定される流量固定境界(自然境界)がある。

地下水位位置は過剰間隙水圧0の水頭固定境界とされる場合が多い。しかしながら、上部の不飽和層の透水特性を考慮すれば、過剰間隙水圧0の設定は液状化の判定上は危険側となる場合もある。ある埋立地の水平成層地盤を対象とした一次元解析の結果を一例として示す。図6に地震中(20秒まで)および地震後の地下水位近傍要素における過剰間隙水圧比(地震中に発生した過剰間隙水圧を初期有効上載圧で除したもの)

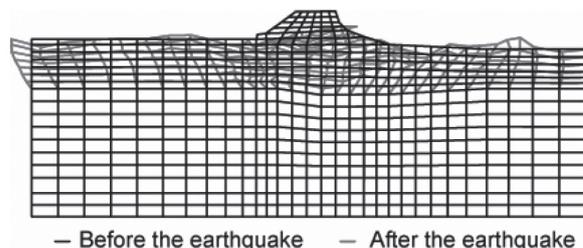
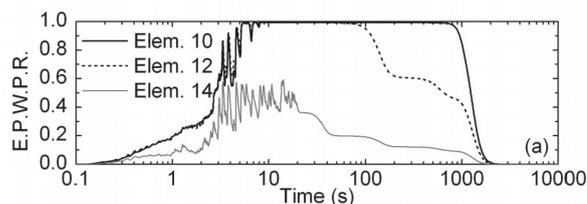
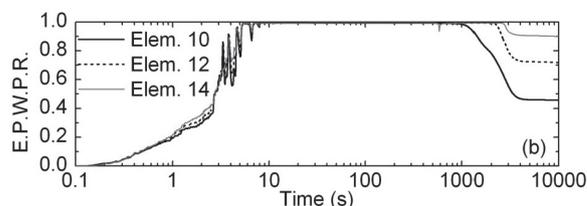


図5 河川堤防の有効応力解析事例<sup>7)</sup>



(a) 地下水位位置は過剰間隙水圧0の排水境界



(b) 地下水位以浅の不飽和浸透特性を考慮

図6 過剰間隙水圧の時刻歴<sup>9)</sup>

の時刻歴<sup>9)</sup>を示す。(a)は地下水位位置で過剰間隙水圧を0に固定したケース、(b)は地下水位以浅の地盤の不飽和浸透特性を考慮したケースの結果をそれぞれ示している。また、要素14が地下水直下の要素であり、要素10、12はより深い位置の要素である。図に示すように、地下水位以浅の地盤の不飽和浸透特性を考慮した場合、地下水直下の要素14でも過剰間隙水圧比が1に達しているほか、過剰間隙水圧の消散速度も遅くなっている(ただし、実際には噴砂などの影響でこれほど遅くならない可能性がある)。地下水以浅の不飽和層の挙動は、杭やフーチングに作用する土圧、盛土構造物などの変形量に影響すると考えられ、不飽和層の挙動予測は今後の課題といえる。

### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所: 法先固化改良による盛土の耐震対策効果に関する動的遠心模型実験報告書, 土木研究所資料, 第3688号, 2000.
- 2) 液状化解析手法LIQCA開発グループ: LIQCA2D04 (2004年公開版)資料, 2004.
- 3) 国土技術研究センター: 河川堤防の地震時変形量の

解析手法, JICE資料第102001号, 2002.

- 4) 野津厚, 上部達生, 佐藤幸博, 篠澤巧: 距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係, 運輸省港湾技研資料, No.893, 1997.
- 5) 渦岡良介, 立石章, 八嶋厚: 液状化メカニズム・予測法と設計法, 7. 液状化解析法(その2), 講座, 土と基礎, Vol. 51, No. 2, pp. 49-54, 2003.
- 6) 吉田望, 渦岡良介: 地盤工学実務シリーズ18, 液状化対策工法, 地盤工学会, pp. 84-114, 2004.
- 7) Matsuo, O., Okamura, M., Uzuoka, R. and Mihara, M.: Numerical analyses of the damaged dikes in the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Paper Number 621, 2000.
- 8) Iai, S., Ichii, K., Liu, H. and Morita, T.: Effective stress analysis of port structures, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No.2, pp.97-114, 1998.
- 9) 渦岡良介, 久保哲夫, 八嶋厚, 張鋒: 不飽和層への浸透現象を考慮した液状化解析, 土木学会論文集, No. 694/III-57, pp. 153-163, 2001.

# 振動台実験に用いる地震波形をどう考えるべきか

大友 敬三

●(財)電力中央研究所

## 1. はじめに

土木分野における振動台実験事例は斜面や盛土など土構造物の地震時安定性、地盤液状化関連(対策工法も含む)と側方流動、杭基礎や地中構造物と地盤の動的相互作用、鉄筋コンクリート構造・鋼構造の弾塑性応答、など広い範囲に及んでいる。これらの実験的研究で得られた成果が地盤や構造物に及ぼす地震の影響に関する現象解明や耐震設計法の開発に役立ってきていることは疑いないところである。

最近、強震観測記録の公開、K-NETやKiK-netなどの強震観測網の充実、さらに強震動合成手法の普及などのおかげで振動台実験に利用される地震波の選択幅が広がっている。また、E-ディフェンスの本格運用に伴って実大構造物模型の震動破壊実験に関する関心が高まっている。

このような状況を踏まえつつ、本稿では、まず、地震波加振の位置づけを整理し、次に、地震波加振と密接な関係を持つ振動台制御技術の一端を解説する。それらに基づいて、振動台実験に用いられる地震波形を選択する上での留意点、利用方法などについて述べてみたい。なお、本稿では、重力場の振動台実験を対象にしている。

## 2. 地震波加振の位置づけ

### 2.1. 地震波加振の目的

振動台実験における加振には、1)正弦波ステップ加振、2)正弦波掃引加振、3)ホワイトノイズ加振、4)正弦波N波加振(Nは波数)、5)地震波加振などが用いられている。1)～3)は供試体の振動特性把握、4)は供試体の基本的な応答特性(塑性領域応答含む)把握、にそれぞれ利用される。これらに対して、5)地震波加振の目的は大まかに以下のように分類できる。

- ①現象の再現・解明
- ②理論の適用範囲の確認
- ③解析モデルの構築・検証
- ④非線形解析手法の妥当性検証のためのデータ取得
- ⑤地震被害の再現・原因究明
- ⑥新工法や新構造形式の安全性照査
- ⑦耐震補強等の効果確認

⑧設計した構造物の安全性の確認

⑨新技術等の評価検証

それぞれの地震波加振目的は研究内容と振動台加振能力(加振性能限界、積載質量、台寸法など)などの観点から次のように評価できる。①～④は基礎的な内容であり、実験データの分析や解析手法の適用などの検討が加えられる。一方、⑤～⑨は実証的・応用技術的な内容であり、極端に言えば、実験データそのもので目的が達成される。

振動台加振能力の観点からは、どちらかといえば、①～④については中小振動台クラスと水平一軸加振での対応が可能と考えられる。一方、⑤～⑨については、供試体を実物あるいは大型模型が求められるから、大型あるいは超大型振動台クラスの利用が望まれるであろう。三次元加振が伴えば申し分ないといえる。

### 2.2. 地震波加振における代表波形

これまでに数多く実施されている振動台実験を振り返ると、地震波加振の代表的な波形は次のようになろう。

- ①1995年兵庫県南部地震以前の既往加速度強震記録
- ②1995年兵庫県南部地震の強震加速度記録
- ③耐震設計基準・指針類における設計用地震動

①としては、El Centro波、Taft波、八戸波、などが代表的である。兵庫県南部地震以前では、サイトを特定した設計用地震動作成の重要性が認識されていなかった。また、旧来の耐震基準・指針類においては、動的解析に用いる地震動としてこれらが推奨されていた。このような理由により、地震波加振の定番波形として利用されてきた色彩が強い。

②については、しばしば東神戸大橋周辺地盤上、JR西日本鷹取駅、神戸海洋気象台、神戸大学などの加速度記録などが用いられている。これらの観測地震動は構造物に壊滅的な被害を及ぼした地震動、あるいは既往最大という観点からの利用と思われる。

③については、たとえば、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計<sup>1)</sup>におけるスペクトル適合設計地震動の加速度波形が挙げられる。この種の波形は当然のことながら、関連する構造物や施設を対象とした場合

の耐震性評価についての説明性が高いといえる。

その他、最近では波形合成法による想定地震動も実験目的に応じて利用されてきている。

### 3. 振動台制御と地震波加振

振動台実験では、供試体が振動台を揺すり返すことで振動台の動きが変化する相互作用が生ずる。この効果は、振動台質量に比して供試体の質量割合が大きく、供試体の共振振動数付近で顕著となる。このような相互作用は振動台による地震波形の再現性を著しく低下させる。

このような相互作用を振動台制御により処理する方法が2つある。ひとつは実時間サブストラクチャハイブリッド実験または振動台型ハイブリッド実験、もうひとつは反力補償制御機構と呼ばれるものである。

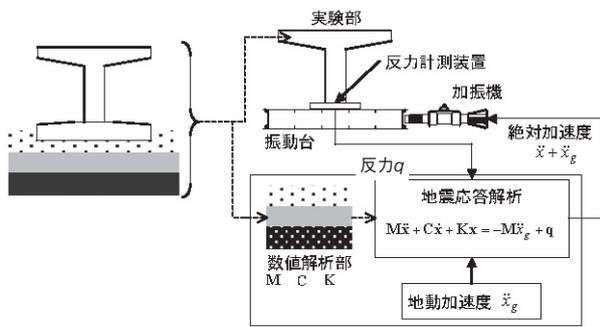


図1 振動台型ハイブリッド実験の概要

#### 3.1. 振動台型ハイブリッド実験

振動台型ハイブリッド実験<sup>(2)~(4)</sup>では、図1に示すように下部構造(地盤を想定しても良い)が数値解析部として取扱われる。上部構造に相当する部分は実験部として振動台上に供試体として設置される。この場合、反力計測装置(ロードセルや分力計)を介して固定される。地動加速度を $\ddot{x}_g$ 、上部構造の反力を $q$ とすると、下部構造である数値解析部の運動方程式は変位ベクトルを用いると

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g + q \quad (1)$$

で表せる。ここに $M$ 、 $C$ 、 $K$ 、はそれぞれ質量、減衰係数、剛性マトリックスである。反力ベクトルは上部構造との結合点にあたる成分にのみ反力を持つ。式(1)を解いて上部構造との結合点における絶対加速度 $\ddot{x} + \ddot{x}_g$ を求めて振動台に入力する。

振動台により上部構造が励起され、結合点に生ずる反力を数値解析部にフィードバックする。計算機部では、次のステップの地動加速度と計測反力とから計算

を進める。以上の過程を繰り返せば、上部構造は下部構造に据え付けられた状態と同等の加振実験となる。

#### 3.2. 反力補償制御

振動台実験においては、供試体の共振振動数付近でのゲインを補正する伝達関数補正加振が採用される。しかしながら、供試体が破壊する過程においては、振動台の制御系は供試体の特性変化(たとえば、剛性低下)の影響を強く受け、伝達関数補正制御による方法では、目標とする波形の再現性が低下する。このような問題を解決するために「反力補償」と「適応フィルタ」を用いた実時間反力補償制御技術<sup>(5)</sup>が開発導入されている。

実時間反力補償制御の概念を図2に示す。反力補償制御は、供試体反力の相殺に必要な加振力は発生する補償信号を出力する。このような条件を満たす補償器は加振機の油柱共振周波数よりも高周波数域でノイズの影響を強く受ける特性を持つ。このため、油柱共振周波数よりも低周波数領域に適用される。

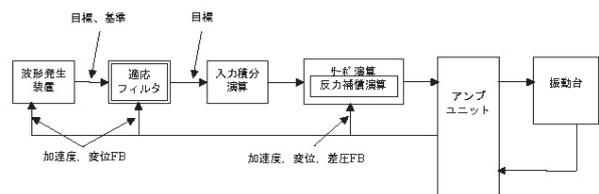


図2 実時間反力補償制御機構

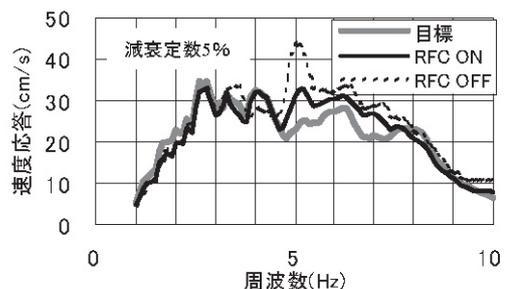


図3 反力補償制御による供試体速度応答スペクトル

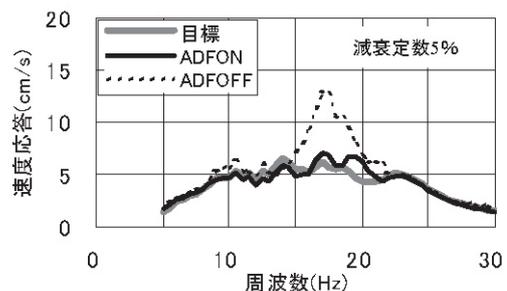


図4 適応フィルタによる供試体速度応答スペクトル

適応フィルタは目標信号と実際の出力信号を比較し、両者の振動台伝達特性を極めて短時間に同定して修正信号を作成する。同定するにあたっての周波数サンプリング刻みを細かくする必要があるため、必然的に高周波数領域における適用性が高い。

これらの反力補償制御技術の実例<sup>6)</sup>を紹介する。図3は塑性応答を伴う供試体の速度応答スペクトル(減衰定数5%)を示している。供試体の共振振動数が低下したことにより、反力補償制御がない場合には、供試体の弾性共振振動数付近での応答が大きい、すなわち、振動台特性が低下していることが明らかである。これに対して、反力補償制御がある場合(図中のREC ON)には、供試体の塑性化に左右されずに振動台の応答特性が安定している。

適応フィルタ制御用供試体に関する同様な速度応答スペクトルを図4に示す。塑性応答時には、適応フィルタ制御がある場合(ADF ON)で供試体の固有振動数約17Hz付近での振動台応答特性の低下がうまく補償できており、適応フィルタ効果が顕著に認められる。

## 4. 地震波をどう選択するか

### 4.1. 実験種別の観点

あらゆる目的の地震波加振に共通して、地震動強度の大小にかかわらず供試体に擬共振が生ずるように、供試体の動的力学特性や周期特性を考慮して地震波を選択することが肝要である。この場合、供試体の応答が塑性領域に達すれば、剛性低下に伴って固有振動数が低下する。このことを見込んだ上で弾性時の固有周期よりも長い周期が卓越する地震波を用いることが賢明である。適切な観測地震波が得られない場合には、幅広い周期帯域に平坦なスペクトル特性を有する模擬地震波を用いることも有効である。さらに、実時間反力補償制御手法と組み合わせれば、波形の再現性を損なうことなく供試体の塑性化に適応した加振が期待される。

2.1で示した②理論の適用範囲の確認、③解析モデルの構築・検証、④非線形解析手法の妥当性検証のためのデータ取得、など実験データと理論的ならびに数値解析的検討と連携した検討が必要な地震波加振については、位相特性の異なる地震波を数種類用意して検討するのが理想的である。地盤材料や鉄筋コンクリートならびに鋼部材の非線形履歴特性は地震波の位相に大きく影響される。この結果、構造系の応答がばらつくことも知られている。このため、単一の位相特性だけの地震波加振結果のみからでは、応答の過小評

価や適用範囲を見誤る可能性があるからである。

2.1で示した①現象の解明や応用実証的な加振を目的とする地震波加振においては、地震動強度(加速度、速度、変位など)のみならず継続時間の影響、すなわち総エネルギー入力について考慮すべきである。たとえば、鉄筋コンクリート部材では、繰返し荷重を受けることにより耐力が低下することが知られているからである。また、地盤や構造物の進行性破壊についても不明な点が多いため、継続時間の影響評価も重要である。

### 4.2. 地震波選択の留意点

試験研究機関等が保有する固有の振動台には、それぞれの設計思想で定められた加振性能限界がある。当然のことながら、この範囲内で加振可能な周期特性、最大振幅、継続時間などを有する地震波が選ばれる。E-ディフェンスにおいては、同震動台の有効利用に資するための強震動データベース<sup>7)</sup>が構築され、このデータベースにおいて、選択された地震動ごとに上述の制約条件を判定する機能が備わっている。このようなユーザ向け地震波選択ツールは大変貴重である。

さて、昨今、地震工学分野で話題になっている長周期地震動の特徴としては、周期1秒以上における変位振幅の卓越や数分間にも及ぶ継続時間などが挙げられる。これらの扱いについては、振動台加振能力の観点からは注意が必要である。

電気油圧サーボ方式の振動台を用いて加速度制御で加振する場合には、変位の長周期成分の特性が低下する。これは、制御回路における入力積分回路に組み込まれたハイパスフィルターの折れ点周波数の影響を受けるからである。多くの振動台では、加振性能設計は正弦波の加速度振幅に基づいており、変位振幅は設計条件に考慮されない。このため、使用する振動台におけるハイパスフィルターの特性を勘案した再現可能な変位振幅の周期特性を知る必要がある。

地震波も正弦波も同様であるが、それぞれの速度振幅と加振継続時間はアキュムレータ容量に支配される。アキュムレータは、電気油圧サーボ型振動台で多用されている油圧システムの構成要素である。例えば、E-ディフェンスでは、JR西日本鷹取駅における三成分地震記録を再現できる容量<sup>8)</sup>を有している。ただし、同地震観測記録の継続時間は40秒間(ただし、主要動部は約20秒間)である。しかるに、1944年東南海地震を想定した強震動波形合成例<sup>9)</sup>では、少なくとも300秒間は振幅の大きな波動が継続している。このように、振動台設計で考慮されていなかった継続時間に

対する加振能力については、事前の確認が必要となる。加振能力を超えるようであれば、速度振幅を抑えることや継続時間の短縮などの工夫が求められる。

## 5. おわりに

振動台実験を行う上で、地震波の選択の幅が広がった。地震波形の再現性を高めたり、対象構造物の設置条件に合わせて加振制御も可能になってきている。このような状況を踏まえた上で、地震波加振の目的と照らし合わせながら振動台実験における地震波形の選択について考えてみた。新たな形態の地震被害を経験する前に、適切な地震波形の選択に基づく振動台実験により、想定される地震被害像を明らかにしていくことが望まれる。

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、丸善、1999.
- 2) 堀内敏彦、井上雅彦、今野隆雄、山岸 渡：振動台を用いた実時間ハイブリッド実験システムの開発（第1報、実験概念の提案と剛体モデルを二次構造物としての成立性検討）、日本機械学会論文集（C編）、64巻、622号、pp.1949-1956、1998.
- 3) 小長井一男、野上仁昭、勝川藤太、鈴木猛康、三神 厚：構造物とその基礎の相互作用を反映させる振動台の制御、土木学会論文集、No.598/I-44、pp.203-210、1998.
- 4) 五十嵐 晃、家村浩和、田中 創：デジタルフィルタ変位補償制御を用いたサブストラクチャーハイブリッド振動台実験、第11回日本地震工学シンポジウムCD-ROM論文集、pp.1637-1641、2002.
- 5) 堂園美礼、堀内敏彦、勝俣英雄、今野隆雄：非線形供試体反力の実時間補償による振動台制御、第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、pp.53-58、2001.
- 6) 大友敬三、酒井理哉：実時間反力補償制御を採用した振動台の性能確認、第59回土木学会年次学術講演会CD-ROM講演概要集、2004.
- 7) 独立行政法人防災科学技術研究所：大都市大震災軽減特別プロジェクト II 震動台活用による構造物の耐震性向上研究、成果報告書（平成16年度）、pp.802-872、2005.
- 8) 小川信行：日本振動技術協会「やや長周期地震動問題を考える」講習会資料、pp.75-106、2004.
- 9) 加藤研一、諸井孝文、池田 孝、宮本祐司、武村雅之：1944年東南海地震による長周期地震動—経験的グリーン関数法に基づく地震記録の再現—、日本地震工学会・大会—2005梗概集、pp.314-315、2005.

# 液状化による地盤流動の検討方法

安田 進

●東京電機大学理工学部建設環境工学科

## 1. はじめに

ゆるい砂地盤が液状化すると構造物が沈下や浮上するだけでなく、地盤全体が数mのオーダーで流れ出してしまうこともある。これを地盤流動とか側方流動とか呼んでいる。流動が発生するとそこに建っている構造物は地盤の動きに引きずられて甚大な被害を受ける。したがって、地盤から構造物への入力変位量としてはこの場合が最大の値となり、耐震設計を行うにあたって、このような非常に大きな地盤の変位量も考慮しておく必要がある。

ところが、地表面で数mにも及ぶ変位が生じることが定量的に分かったのは約20年前であり、10年前頃から土木構造物の耐震設計に考慮され始めたにすぎない。したがって耐震設計への考慮の仕方や流動変位量の推定方法等が確立したとは言い難いのが現状である。ここでは、液状化にともなう地盤流動に関して研究、技術開発の経緯を紹介し、設計方法や流動量の推定方法について述べる。

## 2. 地盤流動が認識されるようになった経緯

1964年に発生したアラスカ地震と新潟地震が液状化に関する研究を精力的に行う契機となったが、この時にはまだ流動に関しては信濃川の川岸が流れ出したのではないかとの定性的な認識しかされていなかった。これに対し、約20年後に発生した日本海中部地震後の調査で流動量の定量的な把握が行われるようになった。

日本海中部地震では能代市の緩やかな砂丘末端斜面で液状化によりガス導管などが大きな被害を受けた。地表面勾配は2～3%と緩やかであった。この被災原因を調べるため、地震前・後の航空写真を用いて地表面の変位量の測量を行ってみたのが図1である<sup>1)</sup>。この地区には前山と呼ばれる低い丘を中心として周囲に緩やかな斜面があり、その緩斜面に沿って地盤が動いていた。その変位量は最大で5mにも及んでいた。これにより埋設管や家屋、道路が被害を受けた。

それなら新潟地震の時はどうだったのかと、次に新潟市内も測量してみたら、信濃川沿岸では護岸の崩壊にともなって8mを超える変位量が生じていた。流動した範囲も最大で護岸から約300mまで達していた。

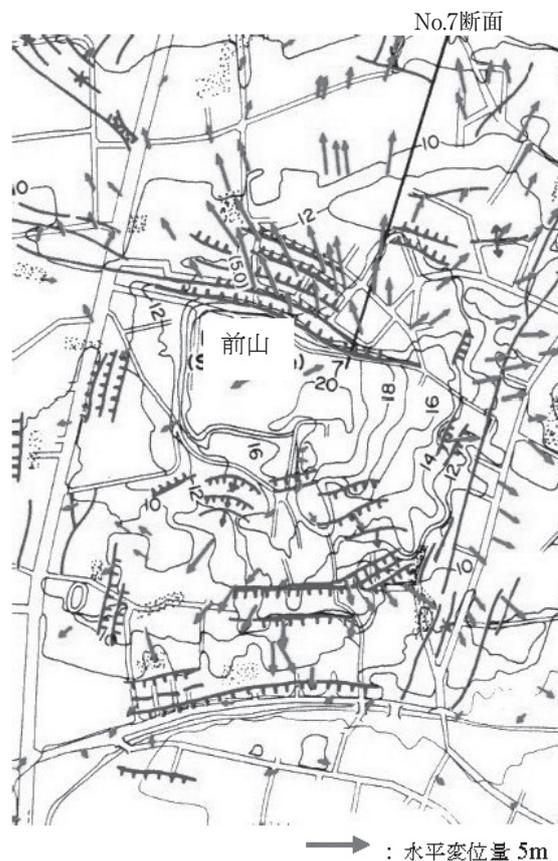


図1 能代市の前山付近の水平変位分布測量結果<sup>1)</sup>

さらに、過去の事例として、1923年関東地震、1948年福井地震、1971年サンフェルナンド地震などについて同様の調査が行われ、また、丁度、1990年フィリピン・ルソン島地震、1991年コスタリカ・テリーレリモン地震、1993年北海道南西沖地震で流動が発生したため、これらの事例も詳しく調べられた。振動台実験や解析でこのような地盤流動を再現することも研究された。

これらにより地盤流動の定量的な把握が行われていたところに、1995年兵庫県南部地震が発生した。この地震では、神戸およびその周辺の各地で岸壁・護岸が数mほどはらみ出した。そして液状化した背後地盤が海に向かって流れ出した。その流動範囲は背後100m程度まで及んだ。流動した地盤にあった橋梁や建築物、タンクなどの杭基礎が海側に押されて甚大な被害を受けた。図2は神戸のLPG貯蔵タンク基地で発生し

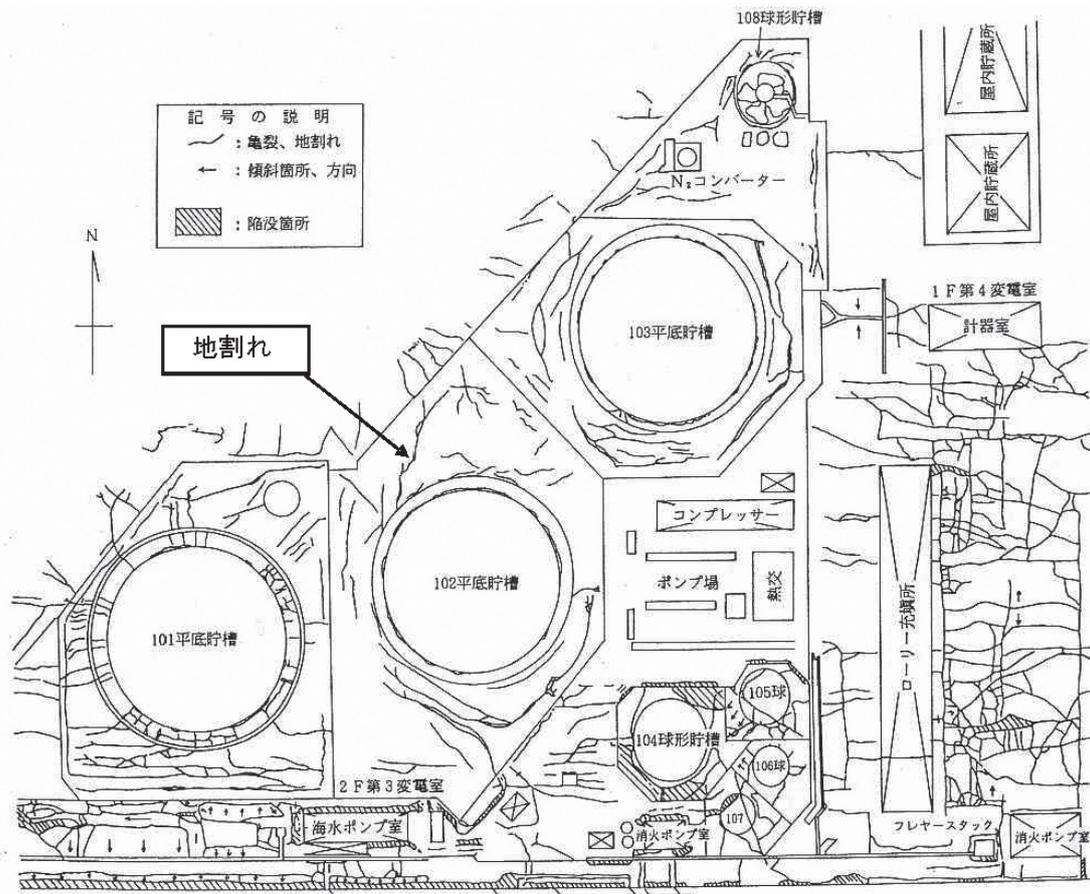


図2 兵庫県南部地震において地盤流動が発生したLPG貯蔵タンク基地における地割れ発生状況<sup>2)</sup>

た地盤流動状況<sup>2)</sup>を示す。ここでは護岸がはらみだし、背後の敷地全体が海に向かって流動し、地割れが多数発生し、また局所的に地盤が陥没した。そして、小型タンクの杭基礎などが流動によって被害を受けた。

地盤流動が発生した地域に対して、地震後に航空写真による変位量の測定はもとより、クラックの発生をもとに地盤の水平変位分布を調査することや、被災した杭の深さ方向の破損状況を調べるなど、多くの調査が行われた。また、岸壁が大きくはらみ出した原因について、運輸省港湾技術研究所などで有効応力法による地震応答解析や振動台実験が行われた<sup>3)</sup>。これらによりまず岸壁がはらみ出した原因が説明された。

そして、杭基礎の被害が甚大であったため、地盤流動が杭基礎に与える影響に関して振動台実験や解析による研究が多く行われてきた。

### 3. 地盤流動の特徴

上記の例でみられるように、液状化にともなう地盤の流動には、図3に示したように緩やかな傾斜地盤で斜面に沿って発生する流動と、岸壁や護岸の移動にともなう背後地盤の流動の2つのタイプがある。

通常地震時にすべり破壊を生じる斜面は $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ といった急な斜面である。これに対し、地盤が液状化した場合には、能代市の例でも見られるように $2 \sim 3\%$ といった非常に緩い勾配の傾斜地盤でも大きく流れ出す。このような緩い傾斜地盤では滑らそうとする力は当然大変小さい。したがって、液状化によって地盤のせん断強度や剛性が大幅に減少したことにより、このような流動が発生すると考えることができる。

一方、護岸・岸壁が前にはらみ出した場合、もし背後地盤が液状化していなければ $(45^{\circ} - \phi/2)$ 程度の角度の滑り面で地盤がくさび状に滑るだけである。ただし、 $\phi$ は土のせん断抵抗角であり、通常砂では $30^{\circ}$ 前後である。したがって、神戸の事例のように岸壁や護岸が10m程度の高さであれば、背後の6m程度の範囲の地盤が岸壁や護岸に向かって滑り落ちるだけである。ところが、前述したように新潟では最大300m、神戸では100m程度の範囲の地盤が流れ出した。このように液状化した場合には岸壁・護岸背後地盤の流動範囲が数十倍にもなってしまうのである。

さて、地盤流動によって生じる水平変位量の水平および鉛直方向の分布はどのようになるであろうか。地

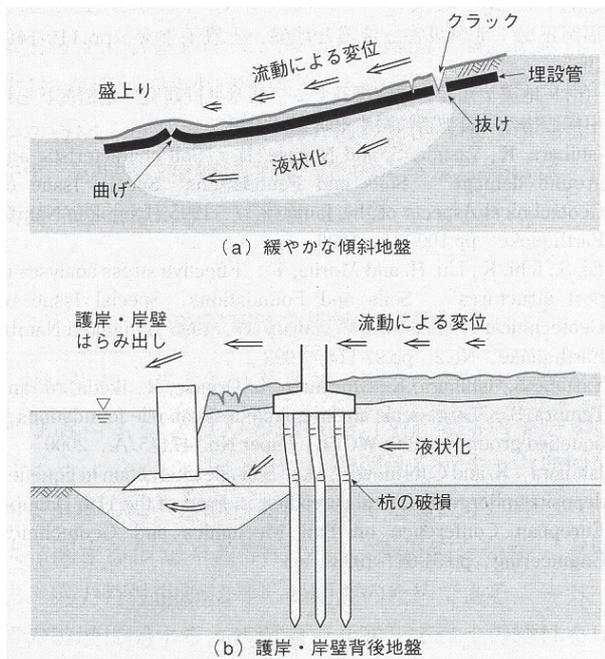


図3 地盤流動のタイプ

表面における水平分布に関しては神戸の岸壁背後地盤について石原らが地割れ分布と幅を詳しく測定し、図4のようにまとめている<sup>4)</sup>。これを見ると、流動範囲内で水平変位量が直線的に減少するのではない。従って、流動範囲内でも地盤の水平ひずみは岸壁・護岸に近いほど大きいと言えよう。一方、水平変位量の鉛直方向分布に関しては振動台実験での観察が行われている。ただし、液状化層が厚い模型地盤での実験が出来ないためはっきりしないが、cos分布に近いので、このように仮定して杭の設計を行うことが多い。

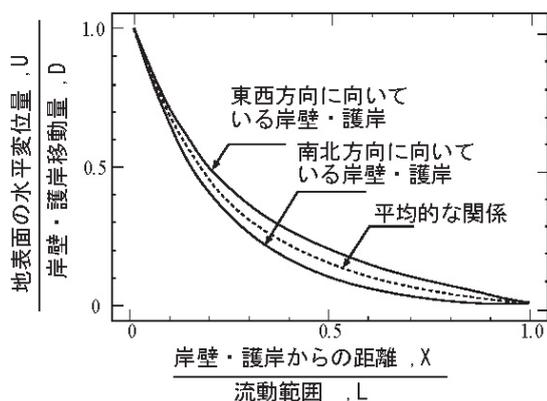


図4 岸壁・護岸背後地盤の水平変位分布のまとめ<sup>4)</sup>

ところで、このような地盤流動が発生するタイミングはいつ頃であろうか。これを探るためにこれまでいくつかが聞き込み調査が行われてきているが、なかなか難しい。最近やっと証言が得られたのは新潟地震の際

の昭和大橋付近の護岸背後地盤の流動のタイミングである。これは“巻頭言”に述べておいたが、どうやら地震が始まって1分余りたってから落橋し、その後護岸背後地盤の流動が発生したようである。簡単に言うと、地震の主要動で液状化が発生し、その後“よいしょ”と地盤が動き始めたということであろう。このタイミングが杭の設計を行う時には特に大切であり、今後も検討が必要と考えられる。

#### 4. 地盤流動が構造物に与える影響と現行の設計方法

土木構造物の種類は多く、また地盤との接し方も多岐にわたっているため、地盤流動が発生した場合に各構造物に与える影響もそれぞれ異なっている。建築物と配管も含めて、その影響を挙げてみると表1のようになるのではないかと考えられる。

表1 地盤流動により構造物が受けると思われる影響

構造物の種類	地盤流動の影響
直接基礎の建築物・貯蔵タンク・鉄塔・架台	基礎が水平方向に引張りや圧縮される。また、流動に伴う地盤の鉛直沈下により不同沈下する。
杭基礎の橋梁・高架橋・建築物・貯蔵タンク・塔・架台・鉄塔	杭が曲げ破壊する。また、杭頭変位が大きくて落橋する。
岸壁、護岸	岸壁や護岸が大きくはらみ出し、矢板式では破損する。
ガス導管、上・下水道管、電力・通信ケーブル、地上配管	管の曲げや圧縮、引っ張り破壊が発生する。
造成盛土、道路・鉄道盛土、ダム	盛土が崩れる。

兵庫県南部地震以降、地盤流動の影響を耐震設計指針類に導入することが熱心に検討されてきた。そして、道路橋、鉄道、港湾、建築物、上水道、下水道、高圧ガス、高圧ガス導管の耐震設計で流動を考慮するようになってきている。各基準類で設計方法が異なるが、大別すると次のような考えに基づいている。

①杭基礎：流動する地盤からの土圧が杭を水平方向に押すと考える（土圧法と呼んでいる）か、または地盤の水平変位量の鉛直方向分布を推定し地盤バネを介して杭に加えて（応答変位法と呼ぶ）、杭の曲げモーメントや杭頭変位量を求める。

②埋設管や地上配管：地表面付近の水平・鉛直変位量の水平方向分布やひずみを推定し、その値を管に与えて管に生じる応力を求める。

## 5. 地盤流動量の推定方法

上述したように、土圧法以外の地盤流動に対する設計方法では地盤の水平方向および鉛直方向の変位量の分布を推定する必要がある。この推定方法には、①被災事例をもとに導き出した経験則で推定する方法と、②解析を行って推定する方法がある。①の方法は例えば、高圧ガス施設的设计指針<sup>5)</sup>に導入されている。この方法では、まず岸壁・護岸の移動量を、次に流動範囲を推定し、最後に変位分布をもとに任意の地点の水平変位量を求めるようになっている。ただし、このような経験則では当然のことながら推定精度は②に比べて劣るし、また、種々の岸壁・護岸や地盤の条件には対応できない。

これに対し、②の方法ではまず地盤流動なるものがどのようなメカニズムで発生するのかを確定し、解析方法を選定する必要がある。日本海中部地震後に流動の実態が明らかになってから、まず(財)地震予知総合研究振興会の中に設けられた研究会などで議論がたたかわされた<sup>6)</sup>。その時には7つ程度の案が出されていたが、最近ではこれが整理され、流動する土を①固体としてとらえる考え方、②液体としてとらえる考え方に大別して分類が行われるようになった。そして、液状化による地盤や構造物の大変形に用いている解析手法を地盤流動にも適用することが行われてきた。

このような経緯のもと、現在ではいくつかの方法で地盤流動変位を解析することが行われている。例えば、有効応力法による動的解析プログラムを用いて井合ら<sup>3)</sup>、渦岡やCubrinovski<sup>7)</sup>らは岸壁・護岸背後地盤の解析を行っている。また、筆者達は静的解析法である“ALID”を用いて護岸背後地盤や傾斜地盤の解析を行ってきた<sup>8)</sup>。一例として、図1に示した能代のNo.7断面に沿ってALIDで解析した変位量と実測値を比較したもの<sup>9)</sup>を図5に示す。変位量が異なっている地点もあるが全体には解析でも実測に近い変位量が得られていると言えよう。

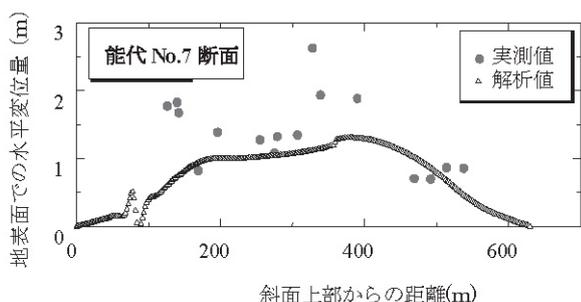


図5 能代市のNo.7断面(図1参照)に対するALIDによる水平変位量の推定結果と実測地の比較<sup>9)</sup>

このように、特に兵庫県南部地震以降、地盤流動を解析することがかなり行われるようになってきているが、解析方法による結果の違いに関してはまだ明らかにされていない。ただし、前述したように液状化による大変形の解析方法を用いて地盤流動の解析を行っているので、液状化による大変形で解析方法を比較した例が参考になるであろう。

このような液状化による地盤や構造物の変形に関する一斉解析(比較解析)は既に約15年前に地盤工学会で試みられている<sup>10)</sup>。この時は新潟地震で沈下した県営アパートを対象に行われたが、推定された沈下量は実測値に比べてかなり小さく、また、解析プログラムによって大きく異なっていた。その後、液状化に伴う大変形を表現できるように各解析方法とも改良を重ねられてきた。3年前にはポートアイランドの地盤に高さ12m、幅10mのタンクが設置された場合を想定して、一斉解析が行われた<sup>11)</sup>。ここでは最近我が国で良く使われるようになってきている有効応力解析による動的答解析コード“FLIP”、“STADAS”、“LIQCA”、“DIANA”、“NUW2”、“STADAS2”と、前述した静的解析の“ALID”が用いられた。図6のa～gがそれらの方法による沈下量の解析結果を示している。これに見られるように、数10cmといった大きな沈下量も推定できるようになってきた。各解析結果もかなり近づいてきたがまだ少し異なった結果となっている。これに関し、筆者は解析には詳しくないので、解析に詳しい吉田望教授(東北学院大学)が話していらっしゃることを引用させていただくと、対象としている構造物や地盤と同様なケースで変形量が分かっている事例に対してまず解析方法を適用し、キャリブレーションの方法を習得しておいてから対象構造物の解析を行えば各方法で信頼のおける結論が得られるであろう、とのことである。

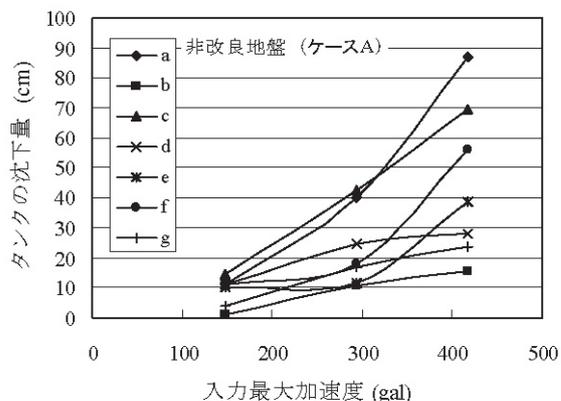


図6 液状化によるタンクの沈下に関して行われた一斉解析結果<sup>11)</sup>

以上みてきたように流動変位量の推定方法はまだ確立されていなく、各解析方法の確立や新たな方法の開発、また、それに用いる地盤の調査・試験方法の開発、耐震設計基準類への導入など、研究・技術開発が必要であろう。

## 7. あとがき

ここでは述べなかったが、地盤の密度や種類によって流動量が大幅に変わることには留意が必要である。また、地盤流動の問題にはこの他に、流動が構造物に与える影響の考慮の仕方や、対策方法など他にも多くの研究・技術開発の課題を抱えている。

なお、地盤工学会では流動に関する研究委員会が開かれ、それが文献12にまとめられているので、一読していただければ幸いです。

## 参考文献

- 1) 浜田政則・安田進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集、No.376、Ⅲ-6、pp.211-220、1986.
- 2) 高压ガス保安協会：高压ガス設備等耐震対策に係わる基礎・液状化分科会報告書、1996.
- 3) Iai, S., Ichi, K., Liu, H. and Morita, T.  
“Effective stress analyses of port structures”, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No.2, pp.97-114,1998.
- 4) 石原研而・安田進・井合進：液状化にともなう岸壁・護岸背後地盤の流動の簡易予測方法、土木学会第24回地震工学研究発表会講演集、pp.541-544、1997.
- 5) 高压ガス保安協会：高压ガス設備等耐震設計指針一レベル2耐震性能評価解説編一、2000.
- 6) (財)地震予知総合研究振興会：一日米共同研究一―地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究、1989.
- 7) 渦岡良介・Misko Cubrinovski: 護岸背後地盤の群杭に作用する側方流動圧に対する三次元有効応力解析の予測精度、日本地震工学会・大会-2005梗概集、pp.220-221、2005.
- 8) 安田進・吉田望・安達健司・規矩大義・五瀬伸吾・増田民夫：液状化に伴う流動の簡易評価法、土木学会論文集、No.638 /Ⅲ-49、pp.71-89、1999.
- 9) Yasuda, S., Shimizu, Y., Koganemaru, K., Isoyama, R. and Ishida, E.: Estimation of the zones susceptible to liquefaction-induced flow in Tokyo, Proc. of the 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering and 11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering, Vol.2, pp.545-552, 2004.
- 10) 井合進・他：液状化に関する一斉計算、地盤の液状化対策に関するシンポジウム論文集、地盤工学会、pp.77-190、1990.
- 11) Sento, N., Yasuda, S., Yoshida, N. and Harada, K. : Case studies for oil tank on liquefiable sandy ground subjected to extremely large earthquakes and countermeasure effects by compaction, 13th WCEE, Paper No.1259, 2004.
- 12) 地盤工学会：講座「液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響」土と基礎、Vol.47, No.5-Vol.48, No.4, 1999-2000.

# 地中埋設管の設計用地震荷重と検討課題

大町 達夫／大嶽 公康

●東京工業大学 ●日本上下水道設計

## 1. はじめに

地中埋設管路の耐震設計では、応答変位法を用いることが基本とされ、地盤の変位やひずみが設計荷重とされている<sup>1)~8)</sup>。通常、応答変位法では地盤変位の分布形状は水平面内では正弦波形、鉛直面内では1/4正弦波形として設定される。埋設管路に対する設計指針は1995年兵庫県南部地震以降、レベル2地震動の導入に伴い改訂され、設計速度応答スペクトルや液状化地盤における設計地盤ひずみの見直しが行われたが、非液状化地盤における地盤変位量及びひずみの算定方法については、従来と同じ手法が用いられている。

近年、上水道管路の現行指針による計算結果が、実地震の震源域では実状に合わないことが指摘されている<sup>9)・10)</sup>。そこで、本文では、先ず現行設計指針における地震荷重の概要を紹介し、次に耐震計算結果が実状と矛盾する事例を簡単に紹介して、矛盾の原因について若干の考察を加える。

## 2. 現行設計指針による地震荷重の概要

代表的な埋設管路について、各指針による非液状化地盤における地震荷重の関連事項を整理し表-1に示す。1995年兵庫県南部地震以降、共同溝の設計指針以外は改訂された。主な改訂点は従来の地震荷重に加えてレベル2地震動が導入され、後者の設計速度応答スペクトルが従来の応答速度の約8倍の大きさに設定されたことである。また上水道、下水道については、従来考慮されていなかった人工改変地盤や不整形地盤に対する地盤ひずみの割増しが追加された。ただし、一様地盤における地盤変位量及び地盤ひずみの算定方法については、旧指針の方法が引き続き用いられている。

各設計指針では、応答変位法に用いる表層地盤の地盤変位量は、式(1)で算定することが基本とされている。

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (1)$$

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (2)$$

ここで、 $S_v$ ：工学的基盤( $V_s \geq 300\text{m/sec}$ )における設計速度応答スペクトル(cm/s)

$T_G$ ：式(2)による表層地盤の固有周期(s)

$z$ ：地表面からの深さ(m)

$H$ ：表層地盤厚さ(m)

$H_i$ ：第*i*層の地層の厚さ(m)

$V_{si}$ ：第*i*層のせん断弾性波速度(m/s)

各指針の工学的基盤面におけるレベル2地震動の設計速度応答スペクトルを図1に、埋設管路の軸線に沿う地盤変位のイメージ図を図2に示す。埋設管路の軸線に対し角度 $\theta$ の方向から、波長 $L$ の正弦波状の地震

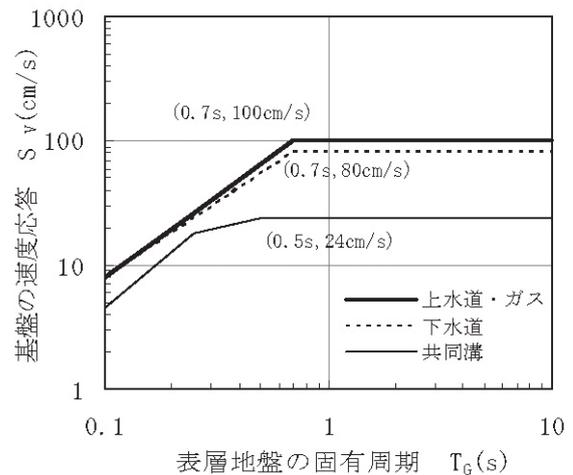


図1 工学的基盤面における設計速度応答スペクトル

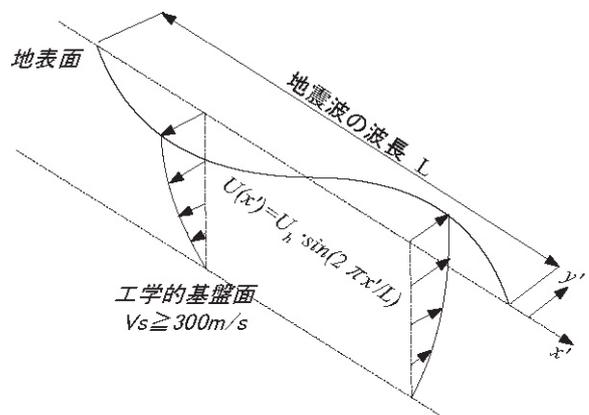


図2 埋設管路の耐震設計で考慮する地盤変位分布

表1 埋設管路の設計指針による地震荷重の概要

項目	上水道 <sup>1,4)</sup>	下水道 <sup>2,5)</sup>	高压ガス <sup>3,6)</sup>	共同溝 <sup>7)</sup>
改訂年度	1979年	1981年	1982年	1986年
応答速度	最大12cm/sec	規定なし	最大12cm/sec	最大12cm/sec
地表面変位	$U_h = 2/\pi^2 \cdot K_h' \cdot S_v \cdot T_G$ $K_h'$ : 耐震設計上基盤面設計水平震度 $S_v : K_h' = 1.0$ における 応答速度(cm/s) $T_G$ : 地盤固有周期(s)	規定なし	$U_h = 2/\pi^2 \cdot \nu \cdot S_v \cdot T_G$ $S_v$ : 応答速度(cm/s) $T_G$ : 地盤固有周期(s) $\nu$ : 地域別補正係数	$U_h = 2/\pi^2 \cdot S_v \cdot T_s$ $S_v$ : 応答速度(cm/s) $T_G$ : 地盤固有周期(s) $T_s = 1.25 T_g$
一様地盤ひずみ	$\epsilon_G = \pi \cdot U_h / L$ $U_h$ : 地盤変位(cm) $L$ : 見かけの波長(cm)	規定なし	$\epsilon_G = 2\pi \cdot U_h / L$ $U_h$ : 地盤変位(cm) $L$ : 見かけの波長(cm)	$\epsilon_G = \pi \cdot U_h / L$ $U_h$ : 地盤変位(cm) $L$ : 見かけの波長(cm)
静的解析手法	応答変位法	規定なし	応答変位法	応答変位法
人工改変地盤	規定なし	規定なし	規定なし	規定なし
不整形地盤	規定なし	規定なし	基盤傾斜角5%以上 ひずみを最大0.07%	地盤条件急変化部 断面力を最大2倍
改訂年度	1997年	1997年	2000年	改訂なし
応答速度	最大100cm/s	最大80cm/s	最大100cm/s	
地表面変位	$U_h = 2/\pi^2 \cdot S_v \cdot T_G$ $S_v$ : 応答速度(cm/s) $T_G$ : 地盤固有周期(s)	$U_h = 2/\pi^2 \cdot S_v \cdot T_G$ $S_v$ : 応答速度(cm/s) $T_G$ : 地盤固有周期(s)	改訂なし	
一様地盤ひずみ	改訂なし	上水道と同じ	改訂なし	
静的解析手法	改訂なし	応答変位法	改訂なし	
人工改変地盤	地表面勾配10%以上 ひずみを1.0 ~ 1.7%	地表面勾配5%以上 ひずみを1.3%	規定なし	
不整形地盤	基盤の不整形性 設計速度を最大1.2倍	規定なし	基盤傾斜角5%以上 ひずみを最大0.3%	

波が入射する場合を想定すると、管軸方向の地表面地盤ひずみは  $\theta = 45^\circ$  で最大となり、その最大値は式(3)で与えられる。

$$\epsilon_{G \chi \max} = \frac{\pi U_h}{L} \quad (3)$$

地盤ひずみは、上水道、下水道、共同溝の設計指針では式(3)で、高压ガスの指針では式(3)の2倍が算定される。上式中の波長Lは上・下水道の指針では、表層と工学的基盤のS波速度  $V_{s1}$  と  $V_{s2}$ 、および表層地盤の卓越周期  $T_G$  を用いて、 $L_1 = V_{s1} T_G$  と  $L_2 = V_{s2} T_G$  を算定し、それらの調和平均として定める方法が用いられている。すなわち、

$$L = \frac{2L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (4)$$

一方、高压ガスの設計指針では、波長Lはレイリー波の位相速度と表層地盤の固有周期から求める方法が用いられている。

### 3. 検討課題の抽出

#### 1) 震源域での埋設管被害と設計値との比較

1995年兵庫県南部地震の際、神戸市ではダクタイル鋳鉄管(以下、DCIP)や鋳鉄管(CIP)などの管種に配水管路の被害が発生した。DCIPの被害率は液状化地盤で0.87件/kmと高かったが、非液状化地盤でも全体の32%(被害率0.35件/km)に及ぶ被害が生じた。そこで現行設計指針に従い、非液状化地盤での被害発生地点を対象として、表1や図1に示す地震荷重をもとに管体応力度や継ぎ手変位量を改めて算定してみると、計算値は許容値以下となり管体破損のみならず継ぎ手の離脱も全く発生しないという矛盾する結果となった<sup>9)</sup>。

2004年新潟県中越地震(M6.8)では、最大震度7を記録した本震に引き続き、これに匹敵する規模の余震が相次いで発生した。これらの地震の震源域では、他のライフラインと同様に上水道管路も多くの被害を受け、42市町村(合併前)の約13万戸で断水が発生した。管路被害率は長岡市で0.30件/km、小千谷市で0.31件/kmであった。しかし現行設計指針による非液状化地

盤での耐震計算の結果は、上記と同様に現実と矛盾するものであった。

これらの矛盾の原因について検討した結果、次に述べるように、現行設計指針で与えられる地盤変位量が実状と比較して過小である点が浮上してきた。

## 2) 工学的基盤と動的地盤変位量との関連性

埋設管路の設計指針では、表層地盤や地盤変位について、次のような仮定をしている。

- ①表層地盤を単一地層に置換した一様地盤と見なす。
- ②表層地盤の1次の振動モードのみを考慮する。
- ③工学的基盤面 ( $V_s \geq 300\text{m/sec}$ ) における変位を0とする。
- ④震源断層の食い違いによる地盤の永久変位の影響は無視できる。

これら以外にも幾つかの仮定条件はあるが、埋設管路の耐震性能に大きな影響を及ぼす要因として、以下ではまず③について、次に④について考える。

設計速度応答スペクトル(図1)と式(1)から定まる地表面での動的変位量を、図3に示す。同図によれば動的変位量は地盤周期とともに増加する。とりわけ  $T_G \leq 0.7\text{s}$  の短周期領域では、変位量は周期の2.3乗に比例して急増するので、地盤周期の適切な評価が特に重要である。

この点に着目して、設計指針で与えられる地表面変位量を強震記録から算定される地表面変位量と比較してみた<sup>10)</sup>。K-net小千谷地点で観測された本震の加速度時刻歴を図4に、それを積分して得られる変位時刻歴を図5に示す。図5によれば、当地点では40cmに及ぶ最大水平変位が発生し、本震後に永久変位が残留している。同図には、算定された永久変位量と、K-net小千谷から約1km離れた電子基準点(GPS観測点)での永久変位量との比較を示しているが、両者は比較的良好に対応している。一方、K-net小千谷では、3m以深で  $V_s \geq 300\text{m/s}$  となるので、現行設計指針に従って地下3mに工学的基盤を設定すると、地盤周期  $T_G$  は式(2)から0.12sと算定され、これに対応する地表面の設計変位量は図3から0.3cm程度となり、実測値の1/10以下と非常に小さい。

長岡、小出、十日町などでの強震記録や断層モデルによる数値シミュレーションによっても、地表地盤の設計変位量が実際の値よりも大幅に小さいことが確かめられる<sup>9)</sup>。図3から明らかなように、地盤の応答変位は地盤周期が長くなるにつれて増加するので、応答加速度や応答速度よりも、深い地盤の影響を強く受ける。現実に即した動的地盤変位量を設定するためには、地盤周期  $T_G$  がもっと長くなるように、工学的基盤面

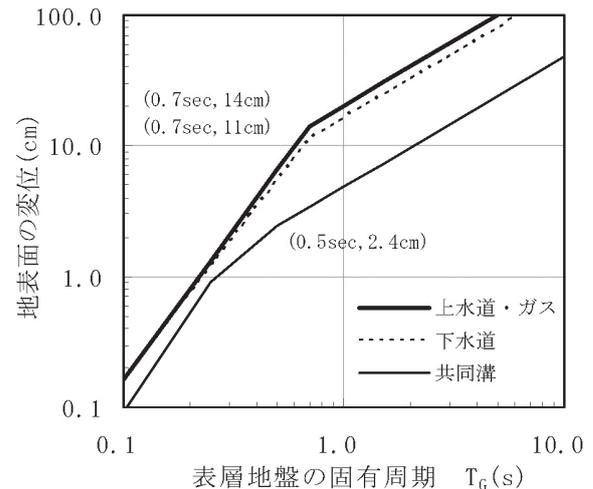


図3 各設計指針の変位計算式による地表面変位

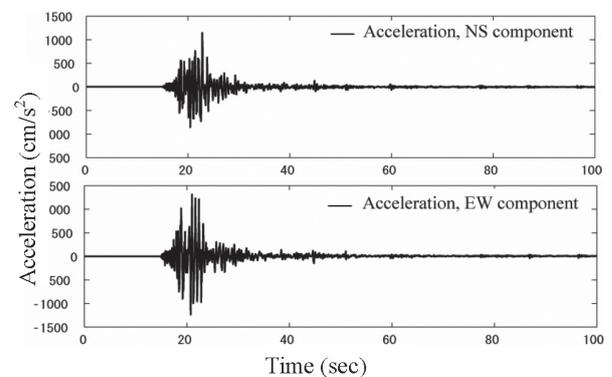


図4 K-net小千谷の加速度時刻歴(本震)

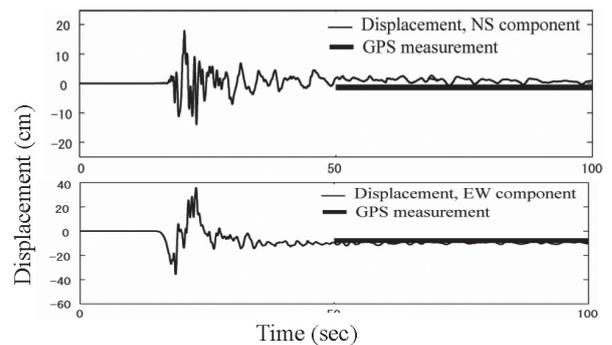


図5 K-net小千谷の変位時刻歴(本震)

をもっと深い位置に設定する必要性を示唆している。

工学的基盤面は、入力地震動を設定する場合、支持力が十分にあり、 $V_s$ が少なくとも300m/s以上で非線形化する可能性がなく、かつ速度コントラストが上層とは大きく下層とは小さい地層境界面に設定される。応答変位法を適用する場合には、より厳密な基盤面の設定方法が必要になるものと推察される。

### 3) 震源域における永久変位の影響

地表に地震断層が出現すると、出現位置が岩盤であるか堆積地盤であるかによらず、断層を横断する構造物が断層変位により地震被害を受けることはよく知られている。1999年台湾・集集地震(Mw7.5)の際、石岡ダム左岸の取水トンネルが数mの段差を生じて破断しトンネル壁にも大小無数の亀裂が発生した被害は、その顕著な事例である<sup>11)</sup>。一方、地表地震断層が現れない場合でも、震源域では地中構造物が断層運動に伴う地盤変位によって被害を受けることがある。1984年長野県西部地震(M6.8)の際、震源域をジグザグに走る発電用導水路トンネルに輪切り状のせん断亀裂が発生した被害はその一例である<sup>12)</sup>。

このように断層活動により周辺地盤に永久変位や永久ひずみが残留することは、震源域(near-field)に特有の一般的現象であり、地中構造物は直接被害を受ける可能性がある。2004年新潟県中越地震の震源域における永久変位分布を、図6に示す。同図のような地盤の永久変位や永久ひずみは、最近の数値シミュレーション技術を使えば評価可能である<sup>10)</sup>ので、震源域における埋設管路の耐震設計のために動的地盤変位とは別に、永久地盤変位に対応する新たな地震荷重を導入することも今や検討課題であると思われる。また活断層の存在が知られていない地域で中規模以下の直下地震が発生する事例も多いことから、M6.5程度の直下地震による地震動をレベル2地震動の下限と定めた土木学会第三次提言<sup>13)</sup>のように、震源域での永久変位や永久ひずみに対応する設計用下限値を設定することも、現実的な対応策として有用と思われる。

### 4. まとめ

1995年兵庫県南部地震以降、地中埋設管路に対する耐震設計指針の多くは、直下地震を想定しレベル2地震動の概念を導入するなどの面で改訂された。ただし工学的基盤面( $V_s \geq 300\text{m/s}$ )を剛体として捉え、地表面と工学的基盤面の動的相対変位から算定される地盤ひずみを設計荷重とする応答変位法の考え方は、従来そのまま継承されている。

一般に地盤の応答変位量は、地盤の固有周期が長くなるにつれて単調増加する特性を示すので、深い地盤構造の影響を受け易い。また現行指針によるレベル2地震動の設計用スペクトルは、 $T_c \leq 0.7\text{s}$ の短周期領域で周期の2.3乗に比例して急増する応答変位量を与えることから、工学的基盤面を浅く設定し地盤周期を短めに見積もると、応答変位を過小に評価する傾向がある。さらに震源域では、断層運動に伴う地盤の永久

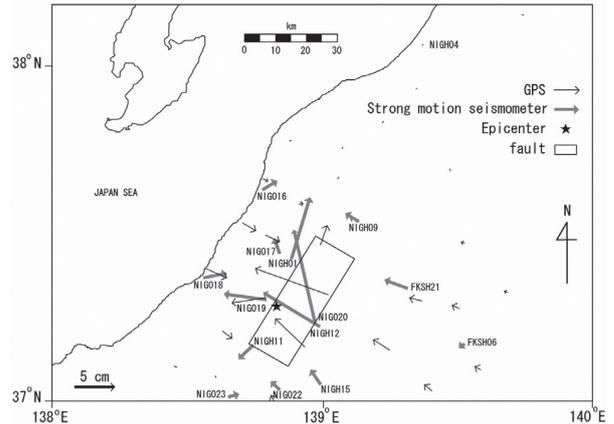


図6 強震記録による変位と電子基準点変位との比較

変位が構造物の耐震性能に影響を及ぼすことも無視できない。

以上より、震源域における埋設管路の地震荷重に関し、現状では工学的基盤面の設定方法と永久変位の影響評価などに検討課題が残されていることを指摘した。

### 謝辞

本文中で紹介した2004年新潟県中越地震の強震記録とGPSデータは(独)防災科学技術研究所と国土地理院に、図4～6は東工大研究生のE.H.Javelaud君に負うことを記して、各位に謝意を表する。

### 引用・参考文献

- 1) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説、1997.
- 2) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説、1997.
- 3) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針、2000.
- 4) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説、1979.
- 5) 日本下水道協会：下水道施設地震対策指針と解説、1981.
- 6) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針、1982.
- 7) 日本道路協会：共同溝設計指針、1986.
- 8) 土木学会：動的解析と耐震設計 ライフライン施設、技報堂出版、pp.142-144、1989
- 9) 大嶽公康、大町達夫：地中埋設管の耐震設計と震源域における地表面変位量について、土木学会第60回年次学術講演会概要集、1259-1260、2005.
- 10) 大嶽公康、大町達夫、久保剛太：新潟県中越地震による上水道管路被害と地表面変位量について、土木学会地震工学論文集、CD-ROM、2005.
- 11) 大町達夫：1999年台湾集集地震によるダムの被害について、ダム工学Vol.10、No.2、pp.138-150、2000.
- 12) 岡田恒男、土岐憲三(編)：地震防災の事典、p.211、朝倉書店、2000.
- 13) 土木学会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説、2000

# 日本地震工学会・大会－2005報告

新井 洋

●防災科学技術研究所

日本地震工学会の第4回目の年次大会「日本地震工学会・大会－2005」が、2005年11月21日(月)～23日(水)の3日間、京大会館(京都市左京区吉田河原町)において開催された。参加登録者数は347名(一般会員215名、学生会員21名、一般非会員57名、学生非会員54名)で、投稿論文265編(オーガナイズドセッション88編、一般講演セッション177編)の口頭発表が行われ、活発な質疑応答および議論が展開された。また、21日の夕刻(17-19時頃)には懇親会が行われ、参加者各位の親睦を大いに深め合った。さらに、22日の昼休み(12-13時)には、本学会災害対応委員会(委員長:壁谷澤寿海/東大)の主催により、2005年パキスタン地震の調査速報会が行われた。筆者は、本大会実行委員会(委員長:林康裕/京大)の一人として参加する機会を得たので、本稿に各セッションおよび懇親会の概要を報告させて頂くこととした。なお、本大会のプログラムについては、梗概集あるいは日本地震工学会ホームページ(<http://www.jaee.gr.jp/>)をご参照頂きたい。

## オーガナイズドセッション

震度計と強震計データの利活用は、本学会「強震動データの共有化及び活用法に関する研究委員会」(委員長:工藤一嘉/東大)と土木学会「震度計の設置促進と震度データの利用高度化に関する研究小委員会」との協同により開催された。投稿論文24編の発表および討論は、内容によってサブセッション(1)-(4)に分けて行われ、最後に全体をとおして総合討論(5)が行われた。会場の参加者数は60-80名程度であった。

(1) 震度ネットワークの意義(座長:安中正/東電設計・片岡俊一/弘前大)では、震度情報ネットワーク、震度を利用した震源インバージョン、空間補間、行政への働きかけについての発表があった。とくに、行政への働きかけおよび震度情報ネットワークの名称に関する議論が行われた。

(2) 震度計の設置環境について(座長:市村強/東工大・宮島昌克/金沢大)では、広島・岐阜・石川・青森各県の震度情報ネットワークのデータ利用、建物のアレイ観測結果に見られる計測震度の差、気象庁の設置環境調査に関する報告・議論があった。

(3) 波形データの活用(座長:野津厚/港空研・境有紀/筑波大)では、震度などの単一指標ではなく波形が必要となる場合として、空間補間、強震動の合成・再現・推定、強震データベース、耐震性能照査に関する報告および議論が行われた。

(4) 震度と強震動の関係(座長:香川敬生/地盤研・佐藤智美/清水建設)では、地震動強さの指標、地震動と被害率との関係、被害推定に用いる適切な地震動指標について報告および議論が行われた。また、強震動データの利用方法として、震源特性の解析、首都圏における地震動特性の把握が紹介された。



写真1 京大会館



写真2 受付の様子

(5) 総合討論(座長：工藤一嘉／東大・神山眞／東北工大)では、さらに話題提供として、翠川三郎／東工大が、消防庁「次世代震度情報ネットワークのあり方検討委員会」(委員長：翠川三郎)の検討内容を説明した。データ保存・収集に関する優先順位の議論および自治体の消極性などが紹介され、その解決策について討論が行われた。また、強震計の稼働率と設置密度および価格に関する議論も展開された。さらに、構造物にも地震計を設置する必要性が強く指摘された。最後に、神山眞が、話題になった内容を一つにまとめた図を用いて、セッション全体を整理した。

既存不適格建物対策を中心とした都市の脆弱性向上策(座長：目黒公郎／東大・村上ひとみ／山口大)では、関連する15件の発表が行われた。耐震補強および室内地震対策の重要性、居住者の理解不足、技術と制度、耐震補強の推進体制の問題について議論された。会場の参加者数は30名程度であった。

システム同定による建築物の減衰評価手法(座長：曾田五月也／早大・斎藤知生／清水建設)では、減衰研究の最近の動向と今後の展望をテーマとして、7件の発表が行われた。ローカルな減衰の定量的評価とメカニズムに基づくモデル化、性能保証への適用、データベースの品質確保・向上に関する議論が行われた。会場の参加者数は20名程度であった。

性能規定型耐震設計(座長：川島一彦／東工大・久保哲夫／東大)は、本学会「性能規定型耐震設計法に関する研究委員会」(委員長：川島一彦)により企画された。投稿論文11編の発表・討論は、内容によって3つのサブテーマに分けて行われた。この際、建築・土木・地盤など各分野間で横断的に議論が進められた。第1のサブテーマ「土木・建築物に対する地震時性能について市民の観点からの意識」では、市民の耐震性向上費用の負担意識と個人ニーズの多様化が指摘された。また、必要な費用負担と向上する安全性評価に関する課題について議論された。第2のサブテーマ「建築物の性能目標と限界状態」では、確率論的な評価の表示、実際の地震力と設計用外力、設計目標における限界値について議論された。第3のサブテーマ「土木施設の性能目標と限界状態」では、構造・地域による性能規定、性能目標に設定する現象と対応する応答の関係、目標性能に対応する物理量の設定と対応策について議論された。会場の参加者数は30名程度であった。

伝統木造軸組(実験・解析)(座長：山田耕司／豊田高専・須田達／京大院)では、伝統木造建物全般について、実験に基づく力学メカニズムに関する5件の報告があった。耐震性評価の問題点、実践的な耐震補強

方法、耐震性評価の耐震・補強設計への活用について議論された。会場の参加者数は30名程度であった。

木造住宅の耐震補強(座長：中治弘行／高松高専・白山敦子／京大院)では、伝統構法木造住宅の耐震補強と耐震診断・被害予測に関する7件の発表があった。新しい補強方法の提案・検証、荒壁パネルの力学特性と損傷性状、耐荷機構の考察が行われた。また、建物群の被害予測手法と被害を低減する戦略的補強法について、補強前に適切な耐震診断を行うことの重要性が議論された。会場の参加者数は40名程度であった。

木造住宅の解析・地震観測(座長：森井雄史／京大・更谷安紀子／京大院)では、木造住宅の解析手法、偏心住宅の地震時応答特性、地震・微動観測データの活用方法に関する6件の発表があった。解析に必要なパラメータの抽出、解析方法の適用範囲の明確化、地震観測データに基づく振動・構造特性把握の重要性が議論された。会場の参加者数は30名程度であった。

地盤・基礎系における耐震設計上の諸問題(座長：志波由紀夫／大成建設・小林恒一／ジャパンパイル・西村昭彦／JR総研エンジニアリング)は、本学会「基礎-地盤系の動的応答と耐震設計法に関する研究委員会」(委員長：西村昭彦)により企画された。セッションの前半では、関連する8件の発表が行われた。液状化地盤中の杭基礎の挙動特性の解明と予測解析モデル、高耐震基礎・既設基礎の耐震補強に関する議論が多く行われた。後半では、委員会の各WGの活動報告とパネルディスカッションが実施された。地盤物性のパラッキの評価および変位挙動の予測に関する議論が行われた。会場の参加者数は30名程度であった。

#### 一般講演セッション

構造物の耐震性能(1)(座長：神原浩／清水建設・西田秀明／土研)では、関連する10件の発表が行われた。不確定性を考慮した性能評価型設計法における応答と損傷との関係、終局変形性能評価、解析手法の実大構造物への適用性、適用地域での材料確保、埋立護岸挙動の把握と予測などに関する議論が行われた。同(2)(座長：中村友紀子／新潟大・高橋典之／東大)では、関連する4件の発表が行われた。超過確率に基づく地震動を用いた建物の耐震性能水準、既存建物の長周期地震応答特性、石油タンクのスロッシング問題、都市の特質を考慮した性能目標について議論された。会場の参加者数は20名程度であった。

土の動的特性・地盤の非線形応答・液状化(座長：末富岩雄／防災科研・藤川智／清水建設)では、関連する6件の発表があった。不飽和土の泥流化機構に関

する室内実験、粘性土のせん断強度と地表加速度に関するオンライン実験、強震記録に見られる地盤の非線形特性、福岡県西方沖地震の地盤災害と事前予測、群杭に作用する側方流動圧の予測について議論された。会場の参加者数は20名程度であった。

土構造物・抗土圧構造物・地中構造物（座長：酒井久和／防災科研・小野祐輔／京大）では、関連する6件の発表があった。新潟県中越地震における道路盛土構造物の被害の再現解析、河川堤防の耐震性評価手法、改良土とジオグリッドによる補強土壁の有効性、不整形地盤中のRC構造物への上下動の影響、埋設管路の現行耐震設計の問題点について議論された。会場の参加者数は30名程度であった。

地盤と構造物の動的問題（座長：仲村成貴／日大・鈴木比呂子／東工大）では、関連する8件の発表が行われた。地盤の大変形時に建築・土木構造物の基礎各部に作用する土圧、地盤と建物との動的相互作用、液状化対策工法に関する議論が行われた。会場の参加者数は30名程度であった。

津波災害（座長：小野祐輔／京大・井上修作／東工大）では、関連する7件の発表が行われた。スマトラ沖地震災害の全容解明、災害調査技術、避難行動シミュレーションに関する議論が行われた。会場の参加者数は30名程度であった。

新潟県中越地震（座長：村田晶／金沢大・吉見雅行／産総研）では、関連する7件の発表があった。被害分析（医療機関、地震動の破壊力、木造建物）、構造物の地震観測（ダム、原子力発電所）、地震動特性に関する議論が行われた。参加者数は30名程度であった。

震源特性（座長：野津厚／港空研・宮腰淳一／清水建設）では、関連する6件の発表があった。被害率分布に基づく1923年関東地震の短周期地震波の発生域、気象庁変位記録に基づく1938年塩屋崎沖地震群の震源過程、円形クラックモデルに基づく破壊伝播効果、2003年十勝沖地震の周期3-10秒のスペクトルに対する支配的パラメタ、P波警報に利用される地震被害指標に基づく新潟県中越地震の破壊開始点の推定、サイト特性を適切に評価することの重要性が議論された。会場の参加者数は70名程度であった。

強震動予測（座長：大野晋／東北大・能島暢呂／岐阜大）では、アスペリティモデルによる強震動予測と即時地震動分布推定のための評価手法に関する5件の発表が行われた。スラブ内地震のアスペリティモデルの設定方法、表層地盤を考慮した地震動の応答スペクトルの補間方法、震度分布を即時把握するための震度の距離減衰式、地震計の長周期ノイズと傾きを考慮し

た変位波形の推定法などに関する議論が展開された。会場の参加者数は70名程度であった。

入力地震動（座長：宮腰淳一／清水建設・加藤研一／鹿島）では、震源特性と地盤特性に関する5件の発表が行われた。南海トラフ沿いの巨大地震および内陸地殻内地震を対象とした震源近傍の地震動評価、震源特性パラメータのバラツキに関する議論が行われた。また、震源の放射特性および断層の破壊伝播効果の影響を無視できないことが強く指摘された。会場の参加者数は60名程度であった。

ハザード解析・減衰特性（座長：壇一男／大崎総研・中村亮一／東電設計）では、関連する8件の発表があった。地震調査研究推進本部「全国を概観した確率的地震動予測地図」の応用・分析・問題点、距離減衰式の異常震域への対応、異常震域データを利用したプレート境界地震とスラブ内地震との識別について議論された。会場の参加者数は70名程度であった。



写真3 セッションの様子(1)



写真4 セッションの様子(2)

免震・制震 (1) (座長：川瀬博／九大・張富明／防災科研) では、関連する12件の発表が行われた。最大応答と繰り返し回数を考慮した振動居住性能の評価、多自由度動吸振器を用いたロバスト設計法、粘性ダンパと擬似負剛性を用いたセミアクティブ制御によるダンパの最大荷重調整、ニューラルネットワークを用いたアクティブ制振法による非線形系の風応答制御、地震観測データを用いた免震装置の線形復元力特性の同定、福岡県西方沖地震で観測された免震建物の挙動などについて議論された。同 (2) (座長：栗田哲／東北大・福喜多輝／清水建設) では、関連する12件の発表が行われた。微動・地震記録に基づく制振・免震建物の振動特性評価、免震構造物の動的挙動、連結構造物の地震時応答特性と制振効果、制振部材付きの超高層RC建物のモデル化、非構造部材を利用した制震工法、摩擦減衰機構に関する議論が展開された。会場の参加者数は30名程度であった。

損傷同定・ヘルスマonitoring (座長：辻聖晃／京大・米山健一郎／大林組) では、関連する7件の発表が行われた。固有振動数・モードの変化に基づく部材損傷箇所の同定、アコースティックエミッションによる損傷発生時間の検出、安価な地震計を多数ネットワーク接続することで建物・インフラ施設の振動性状をリアルタイムにモニタリングする手法について議論が行われた。会場の参加者数は30名程度であった。

地盤震動 (1) (座長：松岡昌志／防災科研・野口竜也／鳥取大) では、地盤情報のデータベース化・公開・活用に関する4件の発表が行われた。データ整理における測地系、ボーリングデータの位置の精度、自治体地盤モデルの行政界を超えた統一化について議論された。同 (2) (座長：山本俊雄／神奈川大・吉村智昭／大成建設) では、関連する8件の発表が行われた。新潟県中越地震における小千谷市の表層地盤応答、1943年鳥取地震における地盤増幅、荷重速度効果を考慮した構成則、1次元波動論の適用限界、乗用車走行の加振力特性、3次元地形効果などについて議論が展開された。会場の参加者数は50名程度であった。

歴史地震 (座長：植竹富一／東京電力・片岡俊一／弘前大) では、1944年東南海地震の煤書き記録の活用および震度分布を用いた歴史地震の解析に関する4件の発表が行われた。紙ベースデータのデジタル化技術が進展し、今後、過去の大地震記録の解析が進む可能性および震度分布データを震源との関係で議論する機運が高まっていることが指摘された。会場の参加者数は40名程度であった。

地下構造探査・微動 (座長：盛川仁／東工大・前田

寿郎／早大) では、関連する10件の発表が行われた。主として微動アレイ観測に基づく地盤構造推定の報告が多い中、空間自己相関法を拡張してラブ波の位相速度を推定する手法、PS変換波をレシーバ関数を用いて検出する方法が提案された。今後、観測データの蓄積とともに、新しい手法の開発、明快な物理的解釈についての研究を進めることの重要性が指摘された。会場の参加者数は30名程度であった。

構造物の地震応答 (座長：渡邊学歩／東工大・藤井賢志／東京理科大) では、関連する11件の発表が行われた。偏心構造物の応答、確率微分方程式を用いた建物の耐震性の信頼度評価、ニューラルネットワークを用いた構造物の非線形履歴特性評価、構造物の地震応答変動を考慮した必要耐力評価、地盤の非線形性が構造物の応答に及ぼす影響について、主として簡易解析モデルに基づく議論が展開された。また、RCアーチ橋に与える断層変位の影響解析、シールドトンネル・立穴接合部の3次元挙動解析、地盤の影響を簡便に考慮した原子炉建屋の格子型モデル、防災科学技術研究所E-defenseの性能確認実験についての議論が行われた。会場の参加者数は15名程度であった。

リスクマネジメント (座長：清野純史／京大・馬場美智子／防災科研) では、関連する5件の発表が行われた。ライフライン被害が避難行動に与える影響、火災発生時の対応策、防災対策促進のためのリスクコミュニケーションの必要性、防災カルテの開発、学校教職員の災害業務・役割に関する問題点などについて議論された。会場の参加者数は30名程度であった。

防災システムおよび防災計画 (1) (座長：小檜山雅之／慶大・近藤伸也／人と防災未来センター) では、関連する7件の発表が行われた。新潟県中越地震における電力・水道・道路被害データの分析事例、事前対策としてのリスク・信頼性の評価、消防の災害対応などについて議論が行われた。今後、防災計画および災害対応を支援するシステム・要素技術の利用者側の視点に立った研究・技術開発が不可欠であり、分野横断的な研究者間の協力の必要性が指摘された。同 (2) (座長：山崎文雄／千葉大・佐藤健／東北大) では、関連する6件の発表が行われた。地震動予測地図の工学利用と地域防災への利用、統合地震シミュレータの開発と現実対応のためのデータベース構築、計測震度と人的被害との統計的關係、家庭・地域・企業防災カルテの試作と評価の方法、日本における防災型土地利用規制の可能性、防災に関する国家会計の調査報告および表に出ない関連予算の明確化について議論された。会場の参加者数は30名程度であった。

## 懇親会

事前の予想を大きく上回る53名（一般48名、学生5名）の参加者を得た。福喜多輝／清水建設の司会により、日本地震工学会会長：小谷俊介／千葉大の挨拶、太田裕先生／東濃地震科学研究所による乾杯を経て、会は大いに盛り上がった。2時間ほど歓談が続いたところで、宴も酣ではあったが、本大会実行委員長：林康裕／京大より参加者各位および実行委員会・事務局各位へのお礼と感謝の意が述べられ、最後に、本学会次期会長：大町達夫／東工大の締めによって、散会となった。なお、本大会実行委員会および事務局各位の氏名は、梗概集の巻頭言のページに記してあり、本稿では割愛させて頂いた。



写真5 懇親会の様子（最後の挨拶時）

最後に、本稿の執筆にあたり、各セッションの座長を務められた方々に作成して頂いたメモを参考にさせて頂いた。ここに記して謝意を表す。

（文中敬称略）

# 第1回構造実験工学の高度化に関する国際会議 (AESE 2005) の開催報告

伊藤 義人

●AESE 2005 実行委員長/名古屋大学大学院教授

2005年7月19日(火)～21日(木)の3日間、名古屋国際会議場で、第1回構造実験工学の高度化に関する国際会議(The First International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering、AESE 2005)が、名古屋大学と愛知工業大学の共催で行われた。

構造実験技術が果たす役割に焦点を当てた国際会議は、この会議が初めてであると考えられる。20ヶ国から124編の論文(内基調講演論文5編)が集まり、3パラレルセッション(全23セッション)で、講演は行われた。外国人60名を含む208名の参加があった。

会議は、鋼構造、コンクリート構造、複合構造を対象にして、座屈・耐荷力、耐震性能、地震応答、衝撃応答、耐久性などに関して、以下のようなテーマを取り扱った。

- 1) 構造、部材、材料の新実験手法と計測手法
- 2) コンピュータ制御実験
- 3) 実験と解析を組み合わせたハイブリッド実験法の高度化
- 4) モデル化、寸法効果、相似則
- 5) 実験手法の標準化
- 6) 実験結果の統計的評価法と設計への応用
- 7) 実験情報のデータベースと共有手法
- 8) 教育のための構造実験
- 9) 構造、部材、材料の実験・計測・モニタリングに関するその他の事項

具体的には、ハイブリッド実験が5セッション31論文と最多であり、このほかの動的およびサイクリック実験を含めると、耐震実験の論文が半数を超えた。

会議の準備は、2003年から始め、組織委員会(委員長:宇佐美勉名大教授、中島正愛京大教授、名誉委員長:福本昤士福山大学教授)と実行委員会(委員長:伊藤義人名大教授)を作って対応した。インターネットが発達したため、1997年に行ったSDSS'97に比べて、アナウンスなどはホームページを立ち上げて容易に行えるようになったが、会議財政などの準備は難しくなった面もあった。

台風で台湾の基調講演者が1日遅れるなど、ハプニングもあったが、一部プログラムの入れ替え程度で対

応でき、会議自体は予定通りに運営され、その運営に対して高い評価を得た。

今後、第2回は2年半後に上海(中華人民共和国)で、また、第3回はニューヨーク(米国)で行われる予定である。

最後になりましたが、後援いただいた日本橋梁建設協会、(財)名古屋観光コンベンションビューロー、東海構造研究グループ(SGST)、(財)中部電力基礎技術研究所、(財)大幸財団に、また、協賛いただいたIABSE(国際構造工学会)、SSRC(米国構造安定研究協議会)、土木学会、日本建築学会、日本鋼構造協会、日本コンクリート工学協会、日本地震工学会に深謝致します。

# 第18回原子炉構造力学国際会議参加報告

岡村 茂樹

●日本原子力研究開発機構

## 1. はじめに

平成17年8月8日(月)～12日(金)までの5日間、第18回原子炉構造力学国際会議(18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology: SMiRT18)が北京(中国)にて開催された(写真1)。本会議は、原子力の構造系の国際会議としては、総合的で大規模な会議であり、炉心構造、設計手法、構造解析、PSA、地震工学などの構造に係る全般の技術を扱っている。当該研究に携わる研究者・技術者にとって、連日、各国、各技術の現状について、最新かつ充実した内容の報告があった。

## 2. 会議の概要

本会議はTsinghua University(清華大学)のInstitute of Nuclear Energy Technology (INET)によって企画・運営された。

本会議は第1回、第2回とドイツのベルリン(1971年、1973年)で開催され、その後、イギリスのロンドン(1975年)、米国のサンフランシスコ(1977年)、ドイツのベルリン(1979年)、フランスのパリ(1981年)、米国のシカゴ(1983年)、ベルギーのブリュッセル(1985年)、スイスのローザンヌ(1987年)、米国のアナハイム(1989年)、東京(1991年)、ドイツのシュツットガルト(1993年)、ブラジルのポルトアレグレ(1995年)、フランスのリヨン(1997年)、韓国のソウル(1999年)、米国のワシントンD.C.(2001年)、チェコのプラハ(2003年)と二年に一度開催されており、今回で第18回を向かえる大規模な国際会議の一つである。

本会議では次世代原子炉システムであるGeneration IV(第四世代炉)をトピックスとして取り上げている。第四世代炉とは、米国エネルギー省原子力エネルギー科学技術局が提唱した次世代の原子炉の一般的な概念であり、第一世代(原子力開発初期の原型炉)、第二世代(現行軽水炉等)、第三世代(ABWR等の改良型軽水炉)に続く、高い安全性と経済性によって他のエネルギー源と競合できる次世代原子炉システムである。主な概念として、超臨界圧水冷却炉、ナトリウム冷却高速炉、鉛合金冷却高速炉、超高温ガス炉、ガス冷却高速炉など多岐にわたる。

現在、次世代原子炉システムの実用化を目指し、世界中の国で活発に行われている。中でも、中国は次世代原子力システムの開発に力を入れており、本会議の開催場所としては、非常に相応しい場所であったと思われる。

参加国は30ヶ国以上、400名にも及ぶ参加があり、大変盛大な会議となった。参加者の国別内訳は次の通りである。

中国：約90、日本：約50、フランス：約40、韓国：約40、米国：約30。



写真1 SMiRT会場

## 3. 会議の内容

本会議は、5日間で5会場を利用して、基調講演と13のセッションに別れ、およそ450件の報告が行われた。各セッションは以下に示すとおりである。

Computational Mechanics  
Fuel and Core Structures  
Aging, Life Extension, and License Renewal  
Design Methods and Rules for Components  
Fracture Mechanics  
Concrete Material, Containment and Other Structures  
Analysis and Design for Dynamic and Extreme Loads  
Seismic Analysis, Design and Qualification  
Structural Reliability and Probabilistic Safety Assessment (PSA)  
Operation, Inspection and Maintenance

Severe Accident Management and Structural  
Evaluation  
Advanced Reactors and Generation IV Reactors  
Decommissioning of Nuclear Facilities and Waste  
Management

会議初日の8月8日(月)にはオープニングセレモニー(写真2)と総合講演が行われた。総合講演では、主に原子力における安全性についての講演・報告が行われた。その後、午後からは各会議室におけるオーラルセッションが行われた。

地震工学分野におけるセッションでは、地盤と構造物との相互作用などに関する報告が、日本、米国、インド、ロシアから行われ、地震動に関する報告が日本、米国、インド、ブラジルから行われた。

二日目は終日、各会議室においてオーラルセッションが行われた。午前のセッションでは、耐震設計などに関する報告が、日本、フランス、米国、アルゼンチン、イランから行われ、前日と同様な地盤と構造物との相互作用に関する報告が、日本、米国、インドから行われた。午後のセッションでは、地震応答の実験評価や流体と構造物との相互作用に関する報告が中国、フランス、米国から行われた。

三日目は基調講演後にオーラルセッションが行われた。基調講演では、中国国内の動向、今後の原子力技術開発の方向性などが多く報告された。その後の地震工学分野におけるセッションでは、機器の地震評価などに関する報告が、ドイツ、ブルガリア、カナダ、インド、アルゼンチンから行われた。午後のセッションでは、免震技術に関する報告が、日本、米国、ロシアから行われ、実証試験や応答評価などに関する報告が、日本、フランス、中国から行われた。

四日目は、二日目と同様に終日各会議室においてオーラルセッションが行われた。午前のセッションでは、応答解析手法に関する報告が、フランス、米国、中国、ドイツから行われ、機器構造物の応答に関する報告が、日本、インド、ギリシャ、フィンランド、ブルガリア、中国から行われた。午後のセッションでは、地動と確率的評価に関する報告が、日本、フィンランド、スイスから行われ、機器構造物の地震応答に関する報告が、ブルガリア、カナダ、韓国、米国から行われた。

最終日の12日(金)は、午前中のみオーラルセッションが行われ、地震動や地震動のモニタリングに関する報告が、日本、ブルガリア、スイス、韓国、ギリシャから行われた。

地震工学分野においては、およそ80件の報告が行われ、

5日間を通じて、あちこちで熱心な質疑応答が見受けられた。地震工学分野以外でも非常に興味深い報告が数多く行われ、各会場で熱心な議論が見受けられた。本会議の多くは多くの国から参加しており、各国独自のプロジェクトだけでなく、国を超えた共同研究が何件も報告されていた。原子力技術開発が国際的なプロジェクトであることを強く感じさせるものであった。



写真2 オープニングセレモニー

会議前日にWelcome Reception、四日目にBanquet、最終日にはFarewell Partyが企画され、各セッションでの会議室のみならず、様々なところで各分野の研究者・技術者同士が情報・意見交換をする場が多かったのも本会議の特徴であった。また、テクニカルツアーとして、四日目にTsinghua UniversityのINET(高温ガス炉)の見学があった。最終日には、China Atomic Energy Institute(CAEI)の見学(建設中の高速実験炉)が行われた。中国の原子力開発の動向、研究成果などの知見を得る事ができる非常に有意義なツアーであると思われた。

### 3. おわりに

ここでは、第18回原子炉構造力学国際会議の会議報告を行った。原子炉構造という特殊な内容を取り扱う本会議は各国の原子力技術の現状と最新の知見が集約されており、当該分野に関係する研究者・技術者にとって、非常に中身の濃い、有益な会議であった。本会議は、論文の投稿数、規模、培われた歴史からみても、原子炉構造技術開発の発展に大きな影響力を持っている重要な会議である。

次回は、2007年北米で開催の予定である。最新の原子炉構造技術の開発の動向、方向性などに興味のある方は是非参加して頂き、原子炉構造技術の発展に寄与して頂きたいと思います。

最後に本報告書の作成にあたり、大林組の杉木氏には資料提供などを通じて御協力頂きました。記して謝意を表します。

# 「E-ディフェンス見学会」報告

中澤 博志

●日本地震工学会 事業企画委員会

11/11(金)に兵庫県三木市にある独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターにおいて、地震・耐震工学に関連する国内実験施設についての知識を深めることを目的に「E-ディフェンス見学会」を実施した(表1)。

表1 プログラム

12:40-	受付開始
13:00-13:10	公開実験説明
13:10-13:20	JMA 神戸波 (100Gal) X、Y、Z方向
13:20-13:30	建築センター波 400Gal X方向
13:30-14:10	実験概要説明および施設概要説明(2F大会議室)
15:00-15:10	JMA 神戸波 (Full Scale) X、Y、Z方向
15:30-16:00	施設見学 (RC試験体建設現場、実験準備棟、油圧源棟)
16:30-	解散(E-ディフェンス出発)

E-ディフェンスは、防災科学技術研究所が所有する世界最大の震動台を有する実大三次元震動破壊実験施設であり、見学会当日は「平成17年度大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡの木造住宅震動台実験」の中の京町家加震実験の最終日であった。試験体は町家と呼ばれる店舗兼住宅として、京都市内から移築した築70年以上の軸組構法の住宅、同じ軸組を持つ新築住宅の2棟(写真1)であり、



写真1 京町屋試験体

これらの地震時の応答性の違いなどを比較することが実験の目的であった。また、雨天ではあったが、加震実験見学会以外にE-ディフェンスの施設内を案内し、実験準備棟における大型土層の準備状況や震動台の動力源となる設備がある油圧源棟を見てまわるなどの催しが行われた。

本見学会では日本地震工学会の会員・非会員に関わらず見学者の募集を行い、33名もの方々に御参加いただいた。主な所属機関としては、ゼネコンや大学等の研究機関が主で、建築、土木工学を専門とされている方が多く、実大実験への関心の高さを反映してか実験概要の説明では実験担当者との熱心な質疑応答が行われた(写真2)。



写真2 実験概要説明会の様子

また、実験は、時間を分けて表1に示す様に計3回実施され、参加者は古い町家と新しい町家の応答性の違いや、最後のJMA神戸波 ( $a_{max}=818gal$ ) による震動実験においては、古い町家の土壁が崩れる様子を見ることができ、その損傷の状況を食い入る様に見つめていた(写真3)。

最後になるが本見学会を実施するにあたり、施設および加震実験見学の許可を戴いた独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター関係者ならびに京都大学防災研究所関係者にご協力戴いた。ここに深く感謝致します。



写真3 実験見学の様子

# 木造戸建て住宅の耐震補強検証実験速報

植本 敬大

●国土交通省国土技術政策総合研究所 ●独立行政法人

／箕輪 親宏

防災科学技術研究所

／坂本 功

●東京大学大学院工学系研究科

## 1. はじめに

文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」震動台活用による耐震性向上研究の一環として、実際の既存木造住宅2棟を移築し、一方のみに耐震補強を施し、独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターにおいて破壊実験を行った。実験の目的は以下の通りである。

- ・既存木造住宅の地震時崩壊挙動を把握する。
- ・昨年改訂された「木造住宅の耐震診断と補強方法」（国土交通省住宅局監修、日本建築防災協会発行）に基づいて行った耐震診断、補強の妥当性を確認する。

## 2. 移築物件の公募条件

移築する物件を、以下の条件で公募したところ、全部で200件を超える応募があった。

- ・築年数・・・25～50年（昭和30～55年建築）
- ・階数・・・2階建て
- ・構法・・・木造軸組構法（ツーバイフォー、プレハブ住宅は除く）
- ・場所・・・兵庫県内または近傍
- ・棟数・・・最大2棟
- ・移築工事時期：可能な範囲で物件の都合に相応

## 3. 移築物件の概要

応募された中から、前述の条件を満たし、かつ移築工事のための作業スペースを確保できる見通しがある、ほぼ同一仕様、同一建設年の2棟を選定した。

選定された物件は、兵庫県明石市に建つ、築30年の木造軸組構法2階建て住宅（以下、明石H邸と称する）である（外観を写真1、平面の概略を図1に示す）。各部の仕様は表1の通りで、一部に軽微な改修等があるものの、A、B棟はほぼ同じ間取りである。



写真1 移築対象物件の外観

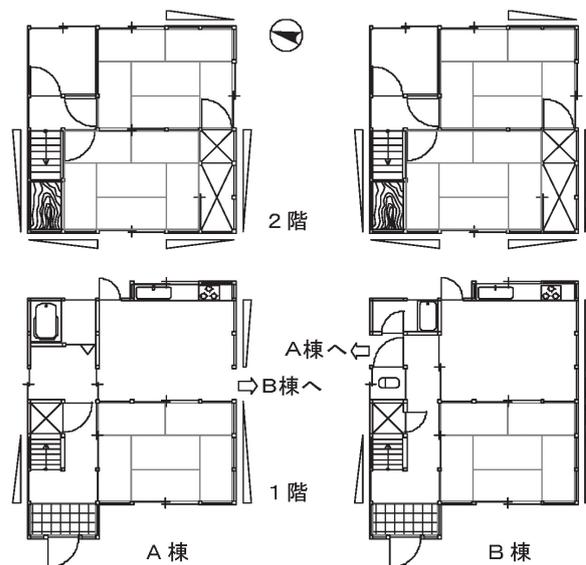


図1 移築対象物件の平面図  
ただし、▲は実際に確認された筋かいの配置

表1 明石H邸の各部仕様、仕上げ表

部位	仕様・仕上げ
屋根	日本瓦葺き、葺き土あり
外壁	ラスモルタル、木ずり下地
内壁	じゅらく塗り仕上げ、土塗り下地
天井	化粧石膏ボード、プリント合板（和室）
床	畳・フローリング
浴室	タイル（B棟）、ユニットバス（A棟）

るものの、A、B棟はほぼ同じ間取りである。この建設年代の典型的な木造住宅のひとつといえる。

明石H邸について常時微動計測を行い、その結果を表2に示す。移築工事によるわずかな初期剛性の低下は否定できない。

## 4. 移築工事の方法

移築工事の方法は以下のような基本的な考え方に基づいて決定した。

- ・道路上を運搬するため、幅3.3 m、高さ3.8 m以内のサイズに分割して移築する。
- ・主振動（図1の南北）方向の壁は損傷させない。

表2 明石H邸常時微動計測結果

建物	測定時期 (建物の状態)	推定重量 (t)	1次卓越振動数 (Hz)	
			X	Y
A棟	6月(現況)	30.5	8.4	5.5
	8月(天井撤去)	25.3	7.8	5.0
	11/16(移築後)	29.0	7.3	4.5
	11/17(微小加振後)	29.0	6.9	4.2
B棟	6月(現況)	30.5	7.2	4.9
	8月(天井撤去)	25.3	7.1	5.0
	11/16(移築後)	29.0	7.0	4.2
	11/17(微小加振後)	29.0	6.6	3.9
	11/20(補強工事後)	28.5	7.2	4.7

- ・接合部を解体するとその性能を再現するのは難しいため、接合部ではないところで分割し、元の材料強度を目標として継手を設計し、補修する。
- ・湿式工法部分を解体するとその性能を再現するのは難しいため、湿式工法部分の分割は必要最小限に留め、やむを得ず分割した湿式工法壁は可能な範囲で元のせん断性能に近くなるよう補修する。
- ・せん断耐力が比較的低い開口部を通るように切断面を設け、切断部分を可能な範囲で元のせん断性能に近くなるよう補修する。

以上の考え方に基づいて、実際の分割方法の概略は、図2、図3の通りである。具体的には、屋根、小屋組を手作業によって部材ごとに解体した。鉛直方向は2階床梁と1階柱頭の間で分解し、1階部分は基礎と土台を分離した。水平方向は、1階、2階ともに主振動方向(図1における南北方向)に沿ってX5通りの数十cm東側で分解した。1階の玄関を含むピースは、幅3.3mを超えないように、玄関部分のみを分離し、別途輸送した。

移築工事の具体的手順は、(1)養生・足場設置、(2)生活残存物撤去、(3)瓦撤去、(4)屋根養生、(5)天井撤去、(6)1F床組撤去、(7)外装切断(写真2)、(8)内装切断、(9)小屋組番付・解体、(10)小屋雨養生、(11)運搬養生(写真3)、(12)吊り具設置、(12)躯体切断、(13)ジャッキアップ、(14)吊り上げ・積込み(写真4)、(15)運搬・E-ディフェンス搬入、(16)先行足場設置、(17)再組み立て(写真5)、(18)養生材撤去、(19)切断部分補修(写真6)、(20)床組復旧、(21)積載荷重設置、(22)小屋組復旧、(23)瓦施工、(24)外壁モルタル復旧、(25)内壁充填、(26)足場撤去、(27)準備棟→震動台試験体移動(写真7)、(28)試験体設置である。

震動台に設置した後の概況を写真8に示す。

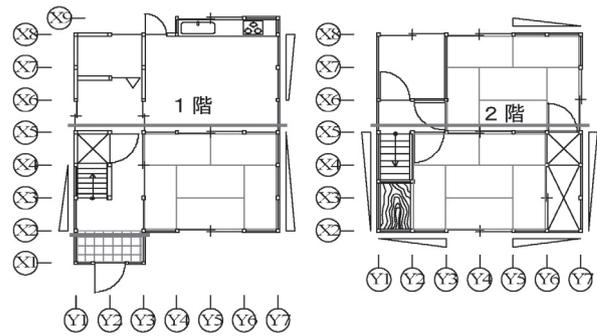


図2 分割方法(A棟の場合、B棟も同様)

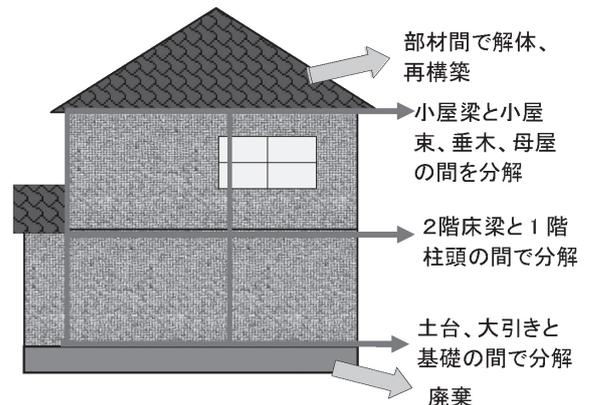


図3 分割・移築方法(南から見た立面図)

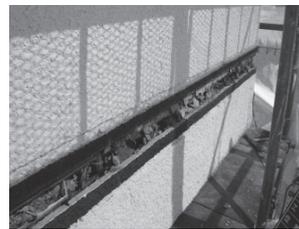


写真2 外壁切断



写真3 運搬養生



写真4 吊り上げ



写真5 再組み立て



写真6 切断部補修(梁)



写真7 試験体移動



写真8 震動台上に移築された既存木造住宅2棟  
(写真提供；独立行政法人建築研究所、河合直人氏)

### 5. 再構築方法の概要

各部を切断して震動台上に輸送し、再構築する際に、各部位の再接合、補修方法は以下の通りとした。

- ・通し柱の補修・・・鋼板添え板+ラグスクリュー、グールド・イン・ロッド
  - ・床梁、小屋梁の補修・・・L字型の特注金物方杖つき+ラグスクリュー
  - ・湿式工法部分（モルタル）・・・速乾性エポキシモルタル
  - ・湿式工法部分（じゅらく等内装）・・・ラスボード（躯体部分とは少々隙間を空けた）+プラスター塗り
- なお、基礎は移築せず、鉄骨架台を基礎と見なしてその上に建物を再構築した。小屋組は極力旧部材を用いて再現したが、もともと葺き土の上に日本瓦葺きで

あったものを移築後は葺き土を用いない瓦葺きとした。積載荷重として2階床に0.6 kN/m<sup>2</sup>の重量を付与した。

### 6. 耐震診断と補強方法

A棟、B棟の耐震精密診断による評点はそれぞれ0.42、0.38であった。B棟の方が耐震診断の評点(充足率)は低く、耐震性に劣る。耐震補強は以下の考え方に基づいてB棟に対して施工した(図4)。

- ・基準法で想定している極めて希におこる地震を上回る、兵庫県南部地震の激震に対しても倒壊に至らぬよう上部構造評点1.5以上を目指す。
  - ・精密診断のうち保有耐力診断法の評点によって補強計画の最終判断をする。そのほかの診断結果は、参考値とする。
  - ・可能な限り、現状のプランを変えず、居住性等の機能が損なわれないようにする。
  - ・特殊な金物を使用せず、誰でも入手できる一般的な材料（筋かい、構造用合板）を用いた。
  - ・接合部低減や耐力要素による配置の低減係数がかからないよう、接合部を補強し、耐力要素をバランスよく配置する。
  - ・接合部の先行破壊を避けるため、または極端に剛強な金物の施工の必要がないよう壁基準耐力の上限(14kN/m)を上回る壁を設置しない。
  - ・外周壁のモルタルをはがすような壁補強は避け、可能な限り、内壁で補強する。
- なお、各棟に劣化診断を実施し、一部に生物劣化

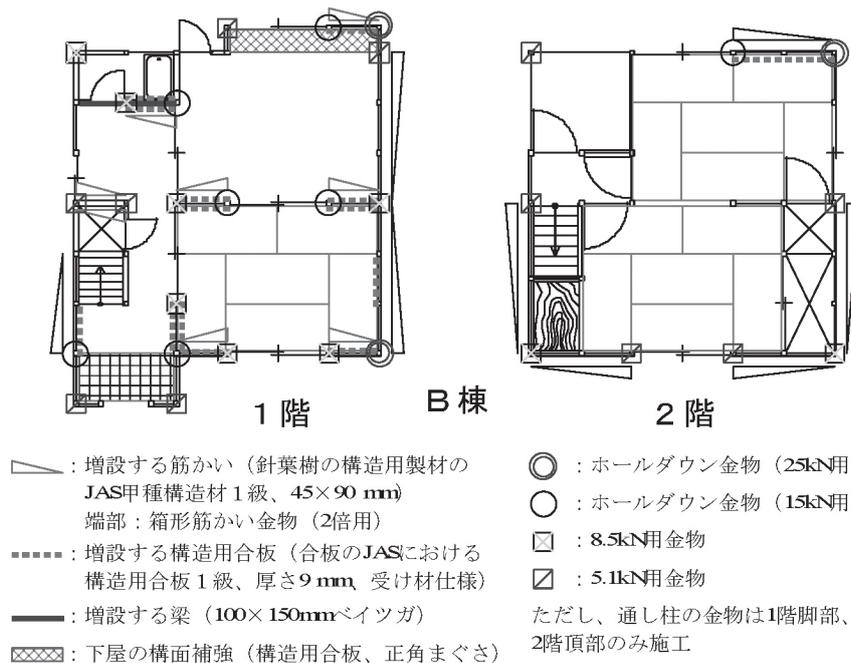


図4 耐震補強箇所と方法

(腐朽・蟻害)が認められたが、経年の割に軽微であったため、耐震診断では考慮しないこととした。

## 7. 入力波

1995年兵庫県南部地震においてJR鷹取駅で観測された実波形(図5)をフルスケールで入力した。各成分の最大値を表5に示す。入力方向はNS方向が建物の桁行(Y)方向となるようにした。

表5 JR鷹取波の各成分の最大値

	加速度(gal)	速度(kine)	変位(cm)
NS	641.7	149.2	86.33
EW	666.2	117.0	37.78
UD	289.5	16.50	11.15

なお、表中の数値は積分変位波形の発散を防ぐために、別途中立軸補正を行ったものであるが、波の強さは原記録と同じである。

## 8. 実験結果

JR鷹取波のフルスケール加振により、耐震補強をしなかったA棟は倒壊し、B棟は倒壊しなかった。各棟の2階床中央の加速度波形と、1階中央部の層間変位の時刻歴波形をそれぞれ図5、6に示す。倒壊時の様子を写真9に示す。

倒壊しなかったB棟においても、補強した筋かいの引き抜け(1箇所)、補強した構造用合板を留め付けたくぎの引き抜けなどが確認された。倒壊したA棟下屋の鉛直構面は倒壊方向と直交方向に倒れ、当該鉛直構面は水平力を負担していない項とが明白であった。



写真9 移築試験体の倒壊挙動(手前A棟、奥B棟)  
(写真提供: 独立行政法人建築研究所、河合直人氏)

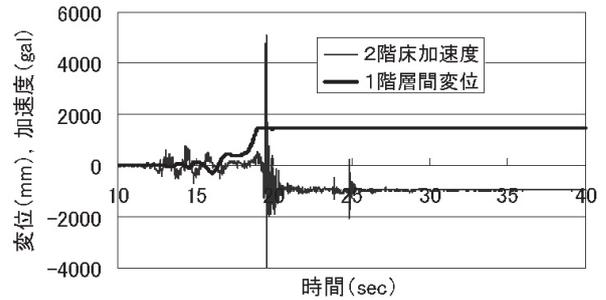


図5 A棟の2階加速度と1階層間変位の時刻歴

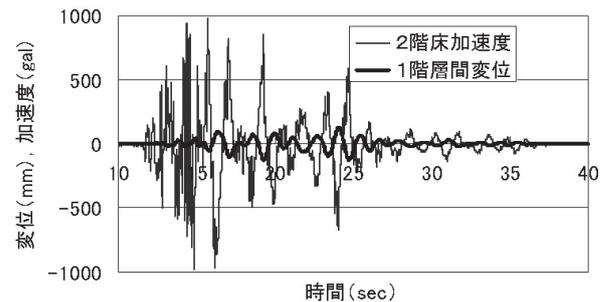


図6 B棟の2階加速度と1階層間変位の時刻歴

## 9. まとめ

以上より、既存木造住宅2棟を震動台上に移築し、一方に耐震補強(精密診断による評点1.5以上)を施し、これにJR鷹取波の減は計を入力した結果、以下が得られた。

- ・耐震補強を施さない既存木造住宅(耐震精密心段位による評点0.42)は、倒壊に到った。
- ・耐震補強を行った既存木造住宅は、補強した筋かいや構造用合板の接合に損傷が確認されたが、倒壊には到らなかった。

## おわりに

本実験は著者以外に以下のメンバーを含めたグループで検討して実施したものである。河合直人、中川貴文(以上、建築研究所)、五十田博(信州大学工学部)、腰原幹雄(東京大学生産技術研究所)、杉本健一、青木謙治、鈴木憲太郎(以上、森林総合研究所)、三宅辰哉(日本システム設計)、藤田聡(東京電機大学)、古屋治(東京都立工業高等専門学校)、佐久間順三(設計工房佐久間)、平野茂(一条工務店)

# 日本地震工学会ニュース No.113

(2006年1月13日配信)

## 《日本地震工学会関連のニュース》

### ○地震工学会論文集・特集号について

論文集編集委員会

このたび論文集編集委員会では、各分野の横断的な技術課題、先端的な技術課題などをはじめとする地震工学に関するタイムリーな課題を特集号として取り上げ、いつ、どこでも必要な学術論文を入手できる電子ジャーナルとしての特性を積極的に活用したいと考えております。特集号では大会のオーガナイズド・セッション(OS)やシンポジウム、会員による公募によって、特定のテーマに関する論文や報告を募集し、論文集として発行したいと思います。特集号のテーマの受付、発行方法、論文・報告の募集から審査・発行までの手続き、などの詳細は日本地震工学会・学術論文のホームページに掲載されていますので、ご参照ください。つきましては皆様の積極的な特集号への応募をお願いいたします。

<http://www.jaee.gr.jp/journal/index.html>

### 【地震工学会論文集特集号「震度計と強震計データの利活用」投稿論文公募について】

表記の特集号への論文投稿の申し込みは1月9日に締め切らせて頂きました。多数の応募を頂き、ありがとうございました。しかしながら年末年始のサーバー障害(サーバー停止期間:1/2 08:44 - 1/6 10:29、サーバー不調期間:1/6 10:29 - 1/10 11:23)により、この期間中に論文集特集号申し込みされた方は、メールが学会宛に届いていない可能性があります。そこで該当される方は至急、学会宛にメールを再送して頂くよう、お願い致します。(論文集編集委員会)

<http://www.jaee.gr.jp/journal/index.html>

### ○会員アンケート調査結果のご報告(1/9)

日本地震工学会では、会員の皆様へのサービス向上を図るため、昨年11月8日～11月21日の期間、メールによる会員アンケート調査を実施させて頂きました。

このアンケートの結果がまとまりましたので以下のサイトをご覧ください。ご協力ありがとうございました。  
<http://www.jaee.gr.jp/members/questionnaire.html>

### ○第12回日本地震工学シンポジウム(2006)

期 日：2006年11月3日(金)～5日(日)

会 場：東京工業大学大岡山キャンパス

(東京都目黒区大岡山2-12-1)

論文形式：4ページ、全文審査

論文締め切り：2006年5月初旬予定

<http://www.jaee.gr.jp/news/information/sympo2006.html>

## 《地震災害情報》

<2005年中国江西省の地震の関連情報>

○2005年中国江西省の地震に関する情報をホームページに掲載しています。

<http://www.jaee.gr.jp/news/disaster/2005china.html>

<2005年イラン南部の地震の関連情報>

○2005年イラン南部の地震に関する情報をホームページに掲載しています。

[http://www.jaee.gr.jp/news/disaster/2005S\\_iran.html](http://www.jaee.gr.jp/news/disaster/2005S_iran.html)

<2005年パキスタンの地震関連情報>

○2005年パキスタンの地震に関する情報をホームページに掲載しています。

<http://www.jaee.gr.jp/news/disaster/2005pakistan.html>

<2005年宮城県沖の地震の関連情報>

○2005年宮城県沖の地震に関する情報をホームページに掲載しています。

<http://news.jaee.gr.jp/news/disaster/2005miyagi.html>

<2005年福岡県西方沖地震の関連情報>

○2005年福岡県西方沖地震に関する情報をホームページに掲載しています。

<http://www.jaee.gr.jp/news/disaster/>

2005hukuoka\_W.htm

○九州大学の福岡県西方沖地震 調査・観測情報

<http://fukuokaeq.arch.kyushu-u.ac.jp/index.htm>

## 《国の地震防災情報》

### ○地震調査研究推進本部

「全国を概観した地震動予測地図」報告書  
(2005/12/14更新)

[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/  
05mar\\_yosokuchizu/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar_yosokuchizu/index.htm)

## 《新刊紹介》

### ○「日本の地形・地盤デジタルマップ CD-ROM付」若松加

寿江・久保純子・松岡昌志・長谷川浩一・杉浦正美 著  
本書は地形・地盤特性のGIS(地理情報システム)データ

ベースであるが、これまでの同種のデータベースとは異なり、日本全国を対象に統一基準に基づき地形区分が行われている。内容は、データの解説に加えて、高潮や洪水氾濫による浸水域の予測、地盤の平均S波速度分布の推定、液状化危険度の予測、流域単位の潜在的侵食速度分布の推定手法とその成果図となっている。付属のCD-ROMには、地形分類、表層地質(地質時代区分)、標高、傾斜、起伏量などの数値データが約1km四方の基準地域メッシュ単位で保存されている。ファイル形式は、GISソフトにそのまま組み込めるMapInfo TAB形式、Shape File形式に加え、ASCII形式(テキストデータ)、高解像度のサンプル画像(ビットマップ形式)の4種類とユーザーの便宜にも気を配られている。地震ハザード評価をはじめとして自然災害の被害分析、建設、地理、教育、環境など多方面での本書の活用が期待される。内容は、

<http://www.utp.or.jp/shelf/200511/060748.html>

でも紹介されている。

(弘前大 片岡俊一)

A5判・函入 112頁+CD-ROM 1枚

価格：9,000円(税別)

発行：東京大学出版会 ISBN4-13-060748-0

発行年月：2005年11月

### ○「地盤液状化の物理と評価・対策技術」吉見吉昭・福武毅芳 著

液状化や流動のメカニズムを最新の知見で解説し、液状化地盤に構造物を設計するための解析技術のノウハウを提示。液状化の周辺分野の知識も平易かつ体系的にまとめ、解析法は簡易法から詳細解析まで記述してあるので、実務者にも研究者にも理解しやすい内容になっている。また、実験、構成式、解析にあたっては、構造工学と地盤工学の専門家間の相互理解を深めるよう心がけるとともに、図、コラム、脚注、付録などを多く用いた丁寧な解説を施しているため、読者の理解を大いに助けるだろう。

A5版330ページ

定価：4,000円(税別)

発行：技報堂出版

発行年月：2005年10月

## 《行事案内行事予定・論文募集(関連学協会を含む)》

### ○ Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics -Special Issue on Seismic reliability analysis of structures-

原稿締切：2006年7月31日

[http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/  
fulltext/112216680/main.html,ftx\\_abs](http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/112216680/main.html,ftx_abs)

### ○(社)物理探査学会 第2回地震防災シンポジウム

「首都圏の地下構造と地震防災」

主催：(社)物理探査学会 地震防災研究会

共催：(社)物理探査学会 地盤探査研究会

大都市大震災軽減化特別プロジェクト1

東京工業大学 都市地震工学センター

日時：平成18年1月20日(金) 10:00-17:20

会場：早稲田大学国際会議場

(総合学術情報センター内)

お申込み及び詳細は下記のホームページまで

[http://www.segj.org/research/bosai/j\\_sympo3\\_prog.  
html](http://www.segj.org/research/bosai/j_sympo3_prog.html)

### ○第7回都市地震防災セミナー(東京)

日時：2006年1月24日

主催：21世紀COE「都市地震工学の展開と体系化」

東京工業大学都市地震工学センター(CUEE)

[http://www.cuee.titech.ac.jp/Japanese/Events/Data/  
seminar\\_060124.html](http://www.cuee.titech.ac.jp/Japanese/Events/Data/seminar_060124.html)

### ○第55回理論応用力学講演会 講演募集

開催日：2006年1月24日(火)~26日(木)

開催場所：京大会館(〒606-8305 京都市左京区吉田河原町15-9)

<http://news-sv.aij.or.jp/nctam/>

### ○【震災対策技術展(横浜)シンポジウム

「安全な住宅はいのちを救うー日本と諸外国を対象としてー」のご案内

脆弱建造物の改修と人口集積地域の地震防災対策推進とその方策に関する研究委員会では、2月2日午後には震災対策技術展横浜会場にてシンポジウムを開催いたします。国内外の講師により、脆弱建造

物の地震防災対策を推進するための先進的な技術・行政制度・コミュニティー活動を紹介しますので、奮ってご参加ください。

1) シンポジウム概要

日時：2月2日(木) 12:30-16:00

場所：横浜国際平和会議場(パシフィコ横浜) 204会場

定員：150名、資料代：1,000円

プログラム・講演者等は下記のWEBにてご確認ください。

<http://www.exhibitiontech.com/etec/seminar-y.html>

2) お申込み

「震災対策技術展」事務局 担当：兼松

事前登録用WEB：

<http://www.exhibitiontech.com/etec/syotaiiken.html>

○第25回震災予防協会講演会「災害列島の自然を考える

る：地震・火山・津波と日本人」

日時：2006年2月3日(金) 13:00-16:25

場所：パシフィコ横浜

主催：震災予防協会

参加費：1000円(資料代を含む)

講演(全て仮題)：

・日本列島の土台を創った巨大地震  
平 朝彦(独)海洋研究開発機構)

・巨大津波のなぞにせまる  
佐竹健二(独)産業技術総合研究所)

・巨大噴火の歴史と日本人  
鎌田浩毅(京都大学)

(司会：武村雅之(鹿島建設))

<http://www.soc.nii.ac.jp/kazan/J/>

○ニュージーランド地震工学会(New Zealand Society for Earthquake Engineering)

年次大会講演募集

日時：2006年3月10-12日

場所：Napier, New Zealand

アブストラクト締切：2005/10/13

詳しくは下記をご覧ください。

<http://www.nzsee.org.nz/EVENTS/nzsee2006firstcall.pdf>

○100th Anniversary Earthquake Conference- Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake- (San Francisco, California, USA)

日時：2006年4月18-22日

※下記からレジストレーションができます。

<http://www.1906eqconf.org/fullconfReg.htm>

○3rd International Symposium on "THE EFFECTS OF SURFACE GEOLOGY ON SEISMIC MOTION" ESG 2006

日時：2006年8月30日- 9月1日

場所：Grenoble, France

<http://esg2006.obs.ujf-grenoble.fr>

○1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology

日時：2006年9月3- 8日

場所：Geneva, Switzerland

<http://www.ecees.org>

○5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering

日時：2007年5月14-16日

場所：Tehran, Iran

アブストラクト締切：2006年6月1日

<http://www.iiees.ac.ir/SEE5>

○9th Canadian Conference on Earthquake Engineering

日時：2007年6月27-29日

場所：Ottawa, Canada

<http://www.9ccee.ca/>

○14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)

日時：2008年10月12-17日

場所：Beijing, China

<http://www.14wcee.org>

○その他の行事等は下記のページをご覧ください。

<http://www.jaee.gr.jp/news/information/index.html>

---

JAEE NEWSのバックナンバーは

[http://www.jaee.gr.jp/news/back\\_number/index\\_b.html](http://www.jaee.gr.jp/news/back_number/index_b.html)

で御覧いただけます。

JAEE NEWSへのお問い合わせ・ご意見は [admin@news.jaee.gr.jp](mailto:admin@news.jaee.gr.jp) にお寄せください。

---

入会・資料等の問い合わせは

事務局 ([office@general.jaee.gr.jp](mailto:office@general.jaee.gr.jp), 電話：03-5730-2831、FAX：03-5730-2830) にお寄せください。

---

## 年間カレンダー

### 日本地震工学会 主催・共催・関連団体行事予定一覧

2006年1月現在

#### <主催行事>

日 程	行 事 名	開催場所
2006年 11月3～5日	第12回日本地震工学シンポジウム	東京工業大学

#### <共催行事>

2006年 1月24～26日	第55回理論応用力学講演会	京大会館
-------------------	---------------	------

#### <関連団体行事>

2006年 2月2日～3日	第10回震災対策技術展	横浜
2月3日	第25回震災予防協会講演会「災害列島の自然を考える：地震・火山・津波と日本人」	パシフィコ横浜
3月9～11日	防災に関する国際シンポジウム (ISMD 2006)	高知工科大学
3月10～11日	ACEE2006 (Asia Conference on Earthquake Engineering)	Manila, Philippines
3月10～12日	ニュージーランド地震工学会	New Zealand
3月22～23日	第10回震災対策技術展	福岡
4月18～22日	100th Anniversary Earthquake Conference -Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake-	San Francisco, USA
7月23日～27日	ASME (米国機械学会) Pressure Vessels and Piping Conference 2006	Vancouver, Canada
8月14～17日	STESSA2006 (Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas)	東京
8月30～9月1日	3rd International Symposium on "THE EFFECTS OF SURFACE GEOLOGY ON SEISMIC MO- TION" ESG 2006	Grenoble, France
9月3～8日	First European Conference on Earthquake Engineering and Seis- mology	Switzerland
2007年 5月14～16日	Fifth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering	Tehran, Iran
6月27～29日	9th Canadian Conference on Earthquake Engineering	Ottawa, Canada
2008年 10月12～17日	The 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)	Beijing, China

下記の企業・団体は日本地震工学会の法人会員(2006年度)として、地震工学の発展に貢献されています。

日本地震工学会会長 小谷 俊介

**【特級】**

(建設)

株式会社大林組  
鹿島建設株式会社  
大成建設株式会社  
(電気・ガス・鉄道)  
関西電力株式会社  
東京電力株式会社  
(各種団体)  
社団法人プレハブ建築協会

**【A級】**

(建設)

株式会社奥村組  
小田急建設株式会社  
株式会社熊谷組  
清水建設株式会社  
株式会社竹中工務店  
戸田建設株式会社  
(設計・コンサルタント)  
株式会社阪神コンサルタンツ  
(電気・ガス・鉄道)  
四国電力株式会社  
中部電力株式会社  
東北電力株式会社  
(各種団体)  
社団法人静岡県建築士事務所協会  
社団法人土木学会  
社団法人日本建築学会  
財団法人日本建築センター  
社団法人文教施設協会

**【B級】**

(建設)

安藤建設株式会社  
東亜建設工業株式会社  
東急建設株式会社  
飛鳥建設株式会社

(設計・コンサルタント)

株式会社建設技術研究所大阪本社  
ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社  
中央復建コンサルタンツ株式会社  
株式会社社長大  
株式会社東京建築研究所  
東電設計株式会社  
株式会社ニュージェック  
(電気・ガス・鉄道)  
九州電力株式会社  
電源開発株式会社  
日本原子力発電株式会社  
東日本旅客鉄道株式会社  
北陸電力株式会社  
(官公庁・公団・公社)  
国土交通省国土技術政策総合研究所  
独立行政法人防災科学技術研究所  
(各種団体)  
危険物保安技術協会  
社団法人建築業協会  
全国建設労働組合総連合  
社団法人全国地質調査業協会連合会  
損害保険料率算出機構  
財団法人電力中央研究所  
財団法人日本建築防災協会  
(建材・システムなど)  
株式会社エヌ・ティー・エス  
ジャパンシステム  
サービス株式会社  
東京鉄鋼株式会社

**【C級】**

(建設)

五洋建設株式会社  
東洋建設株式会社  
株式会社福田組  
株式会社本間組  
真柄建設株式会社

(設計・コンサルタント)

株式会社大崎総合研究所  
基礎地盤コンサルタンツ株式会社  
株式会社構造計画研究所  
ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社  
株式会社システムアンドデータリサーチ  
株式会社篠塚研究所  
株式会社スリーエーコンサルタンツ  
株式会社ダイヤコンサルタント  
財団法人地域地盤環境研究所  
株式会社日建設計  
株式会社安井建築設計事務所  
(電気・ガス・鉄道)  
東邦ガス株式会社  
(官公庁・公団・公社)  
独立行政法人港湾空港技術研究所  
(各種団体)  
財団法人愛知県建築住宅センター  
財団法人大阪建築防災センター  
社団法人高層住宅管理業協会  
構造調査コンサルティング協会  
財団法人国土技術研究センター  
財団法人防衛施設技術協会  
千葉県耐震判定協議会  
社団法人日本クレーン協会  
社団法人日本ガス協会  
社団法人日本建築構造技術者協会  
財団法人日本建築設備・昇降機センター  
財団法人日本建築総合試験所  
社団法人日本免震構造協会  
日本木造住宅耐震補強事業者協同組合  
財団法人宮崎県建築住宅センター  
(建材・システムなど)  
エイム株式会社  
株式会社CRCソリューションズ



# 日本地震工学会のご案内

## 1. 日本地震工学会の目的

我が国は、世界でも有数の地震国であり、古くから世界をリードする地震学ならび耐震技術に関する学問や技術開発が行われてきました。ところが、これらの活動は、これまで、建築、土木、地盤、地震、機械等の分野に分かれて行われてきており、地震工学としてまとまった活動を行う学会がありませんでした。しかし、たとえば1995年兵庫県南部地震による被害を見ても明らかなように、大都市の耐震性を向上させるためには、関連した各分野の研究者や実務者が協力して、問題解決に当たる必要があります。

このようなことから、2001年1月1日に日本地震工学会が発足しました。日本地震工学会の目的は、地震工学の進歩および地震防災事業の発展を支援し、もって学術文化と技術の進歩と地震災害の防止と軽減に寄与することにあります。

## 2. 日本地震工学会はどのような分野を対象としているか

日本地震工学会は、これまでの地震工学関係の研究者や技術者のみならず、地震そのものや地震による災害に関わるあらゆる分野の人々にとって有益な交流の場となるものであります。したがって、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野を対象としています。

日本地震工学会が対象とする分野はこのように大変幅広いものですが、これをもう少し具体的に示すと、地震動や活断層の工学的評価、建築物、道路・鉄道施設、電力・上下水道・ガス・通信等のライフライン施設、地盤・土構造物、河川施設、港湾施設、機械施設等多岐にわたる施設・構造物の地震前の耐震化、地震時の機能維持、地震後の復旧などのほか、国や自治体の地震防災対策、地域防災計画、地震危険度評価、発災後の対応、医療対策、震災時の救援救急システム、震後復興、地震災害調査と分析、さらには国際的な震災軽減の技術的支援、地震防災教育などの分野となります。

## 3. 日本地震工学会はどのような活動を行うか

日本地震工学会は、電子メディアを活用して充実した論文集を効率的に会員の皆さんにお届けするほか、会員の皆様にインタラクティブな情報交換の場を提供します。また、年次学術講演会などの定期的な研究発表会の開催、地震工学・地震防災関連の講習会や研修会の開催、調査・研究プロジェクトの指導・推進、新技術の評価、耐震基準の開発・普及、技術者の生涯教育支援、地震防災施策の提言、地震工学・地震防災分野における国際交流ならびに国際貢献を担う活動、地震工学の広い分野が連携した地震災害調査とその成果の公表、などを行っています。

## 4. 日本地震工学会はどのような組織か

日本地震工学会は、会員の会費に支えられた任意団体として活動を行っています。活動の充実とともに、将来は法人格をもった団体に発展させます。

会則、学会組織、役員、最近の活動状況などの詳しい情報は下記の日本地震工学会のホームページをご覧ください。

<http://www.jaee.gr.jp/>

事務局 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館 日本地震工学会

E-mail : office@general.jaee.gr.jp、Tel : 03-5730-2831、Fax : 03-5730-2830

## 5. 歴代会長

- |        |      |        |       |        |      |
|--------|------|--------|-------|--------|------|
| ・初代会長  | 青山博之 | ・第二代会長 | 岡田恒男  | ・第三代会長 | 土岐憲三 |
| ・第四代会長 | 石原研而 | ・第五代会長 | 入倉孝次郎 | ・現会長   | 小谷俊介 |



# 日本地震工学会 入会案内

日本地震工学会は、これまでの地震工学関係の研究者や技術者のみならず、地震そのものや地震による災害に関わるあらゆる分野の人々にとって有益な交流の場となるものであります。したがって、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野の方々を対象としています。

## ▼ 申込方法

個人会員（正会員・学生会員）用及び法人会員用の申込書（PDF ファイル）は、ホームページ（<http://www.jaee.gr.jp/>）からダウンロードすることができます。必要事項を直接記入して、事務局に郵送もしくはファックスするか、Adobe Acrobat で必要項目を記入して保存し、そのファイルを電子メールに添付して事務局にお送りください。

事務局 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館 日本地震工学会  
E-mail : office@general.jaee.gr.jp、Tel : 03-5730-2831、Fax : 03-5730-2830

## ▼ 年会費

◇会費種別と年会費			◇年度途中入会の年会費		
会員種別	会費	入会金	入会の申込日	正会員	学生会員
正会員	10,000円	1,000円	3～5月	10,000円	3,000円
学生会員	3,000円	なし	6～8月	7,500円	2,250円
法人会員	特級 200,000円以上	なし	9～11月	5,000円	1,500円
	A級 100,000円	なし	12～2月	2,500円	750円
	B級 50,000円	なし	*法人会員は年度途中入会でも通年の会費を納めて頂きます。		
	C級 20,000円	なし			

## ▼ 一般規則で定める会員資格

### 【正会員の資格】

地震工学・地震防災の分野に関する学歴・経験をもつ個人で次の各号の一つに該当する者。

- (1) 大学を卒業した者
- (2) 高等専門学校または同程度以上の学校を卒業し、実務経験を持つ者
- (3) 高等学校を卒業し、実務経験を持つ者
- (4) 上記の分野以外を専門とする者または外国の学校を卒業した者の正会員としての資格は前各号に準じ、かつ、この会の目的に寄与するに必要な学識経験を持つ者
- (5) その他理事会で、前各号と同等以上の資格ありと認められた者

### 【学生会員の資格】

地震工学あるいは地震防災に関連する学術・技術を学ぶため、大学院、大学、専門学校、高等学校およびこれに準ずる学校に在学中の個人

### 【法人会員の資格】

地震工学あるいは地震防災およびこれらに関連する次の事業を営む法人等とする。

- (1) 建設業、建設設計業、建設コンサルタント、建材業、その他これらに準ずるもの
- (2) 製造業、公益事業、報道・情報事業、保険業、その他これらに準ずるもの

## ▼ 入会の承認と資格の発効

入会申込書受理後、理事会の審査を経て入会が承認されます。理事会の審査は入会申込書受理月の翌月に行われます。なお、理事会での入会承認後に、会員証と会費請求書が送付されます。

会員としての効力は、正会員にあっては入会金および会費を、学生会員および法人会員にあっては会費を納めたときに生じます。

## ▼ 会員の特典

### 【正会員・学生会員】

1. 役員の選挙権と被選挙権を持ちます。(正会員のみ)
2. 総会における議決権をもち、総会に出席して意見を述べることができます。(正会員のみ)
3. 日本地震工学会「JAEE NEWS」のメール配信を受けられます。
4. 日本地震工学会のホームページから「地震工学論文集」を閲覧・入手できます。
5. 日本地震工学会「JAEE NEWS」や「コラム」への投稿ができます。(ただし、掲載の可否および掲載号については当会に一任させていただきます。)
6. 日本地震工学論文集に論文発表ができます。(ただし、審査があります。)
7. 日本地震工学研究発表・討論会で論文発表ができます。
8. 研究発表会、講習会、講演会、見学会等に会員割引で優先的に参加できます。
9. 委員会に委員として参加する資格が得られます。

### 【法人会員】

1. 正会員・学生会員の上記特典のうち「5.」、「6.」、「7.」を除く特典。ただし、法人会員には被選挙権はありません。
2. その他に次の特典があります。

特 典 内 容	法人会員種別			
	特級	A級	B級	C級
講習会等の行事に会員会費で参加できる人数	12人	6人	3人	1人
地震工学会誌への広告の割引掲載	掲載箇所等については当会に一任させていただきます。			
研究発表会等の催し物会場でのパンフレット配布	制限のある場合もあります。			
学会ホームページと法人会員ホームページとのリンク	法人会員リンク集を掲載します。			
法人会員のイベント情報等の学会ホームページへの掲載	掲載の時期、掲載箇所等については当会に一任させていただきます。			

### 編集後記：

2005年11月に京都で開催された大会で、第4回目を数えた日本地震工学会大会もいずれの会場でも盛会に終了したとの声が多数届いております。学会が順調に発展しつつあることを喜ばしく感じております。

本号の特集では、土木系耐震技術を取り上げる予定でしたが、耐震技術について議論する前に構造物の応答、さらに前段階の入力地震動について、土木系技術者の悩みや考え方、最新の研究動向について整理しておいてもよいのではないかと考え、原稿執筆の依頼をさせていただきました。すなわち、特集にタイトルをつけるとすれば「入力地震動と土木構造物の応答」といったものを企図したつもりです。このような漠然とした要望を深く斟酌して頂き、すべての執筆者の方から大変力のこもった原稿をいただきました。大変感謝しております。冊子として発刊されることになった日本地震工学会誌も今回でNo.3、ますます充実させなければならないという気負ばかりでやや空回りした感はありましたが、仕上がりはいかがなものになっているでしょうか。皆様の知的興奮を若干でも刺激するものになっていれば幸いです。

日本地震工学会会誌編集委員会委員長 森下 正樹 (核燃料サイクル開発機構)  
同委員 中瀬 仁 (東電設計株式会社)

### 編集委員

委員長	森下 正樹	日本原子力研究開発機構
幹事	古屋 治	東京都立工業高等専門学校
委員	渡邊 鉄也	埼玉大学
委員	五十田 博	信州大学
委員	大保 直人	鹿島建設
委員	中瀬 仁	東電設計
委員	三宅 弘恵	東京大学地震研究所

---

### 日本地震工学会誌

---

2006年1月31日発行

編集・発行 日本地震工学会  
〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館  
TEL 03-5730-2831 FAX 03-5730-2830

---