

# 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く、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なら、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ね。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力

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ないですね。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ない。

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のでしょうか？

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うかね。

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ー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ータやその他の震源パラメー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。