

巨大地震に備えながら建築構造・免震に思う徒然



名古屋大学

福和 伸夫

1 はじめに

筆者が始めて「免震」と言う言葉を耳にしたのは1980年代初頭である。もう少し正確に言うと、最初に出会ったのはBase Isolationという言葉である。基礎絶縁と直訳していた。今から思えば恥ずかしい話であるが、そのときは「免震」と「Base Isolation」に言葉のギャップを感じたように思う。

当時は、大手建設会社に入社して間もない時期であり、動的相互作用解析システムの開発をしながら、電力会社の受託研究で、原子力発電施設への免震工法のフィージビリティスタディを実施していた。この業務のおかげで、比較的早く免震と接することができた。ただ、免震は、構造物と地盤との動的相互作用を除去するシステムだったため、内心、自己矛盾を感じながら業務に勤しんでいた。

フランス電力公社や米国・ニュージーランドの先進事例や、関東地震後の免震の各種アイデア、松下・和泉両先生、多田・山口両先生の設計事例を勉強しながら膨大な数の数値計算をして、免震効果の感覚を養った記憶がある。

その後、十年ほど、免震とは縁の少ない生活をしてきたが、1995年兵庫県南部地震以降の免震建設ラッシュの中、日本建築センターの免震評定委員会のメンバーに加えて頂いたことで、再び、免震と身近に接するようになった。

本稿では、評定委員になって以降十年余り、免震が建築技術の一つとして普及する過程を見ながら感じたことについて、徒然に書き記してみる。

2 振動論の初歩を復習してみる

免震・制震設計のプロの方々に前に、今更だと思いが、自分の備忘録を兼ねて、極く簡潔に1自由度系の振動を復習しておく。ここでは、①継続時

間の長い地震動に対する低減衰長周期建物の共振応答、②パルスの地震動に対する応答、③高層建物の変位応答について、柴田(最新耐震構造解析、1981)の表記に則って、初歩的な式を示し、免震・制震設計での基礎的な留意点を記してみる。

(1) 低減衰長周期建物の共振応答

まず、固有円振動数 ω 、減衰定数 h の初期静止状態の1自由度系に、単位調和地動変位 $y_0 = \cos pt$ が作用した場合の地動に対する過渡応答相対変位は、

$$y = A \left[\cos(pt - \theta) - e^{-h\omega t} \left\{ \cos\theta \cos\omega't + \frac{h\cos\theta + (p/\omega)\sin\theta}{\sqrt{1-h^2}} \sin\omega't \right\} \right]$$

$$A = \frac{(p/\omega)^2}{\sqrt{\{1-(p/\omega)^2\}^2 + 4h^2(p/\omega)^2}} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{2h(p/\omega)}{1-(p/\omega)^2} \quad \omega' = \omega\sqrt{1-h^2}$$

(1)

となる。第1項は定常振動項、第2項は自由振動項である。固有振動数や減衰定数が大きければ($h\omega \gg 0$)、自由振動項が短時間で減衰して定常振動に速やかに収束するが、減衰定数が小さい長周期構造物($h\omega \ll 1$)では自由振動成分の寄与が大きい。式(1)は、 h が微小で $p=\omega$ となる共振時には、

$$y = \frac{1}{2h} \left\{ \sin\omega t - \frac{e^{-h\omega t}}{\sqrt{1-h^2}} \sin\omega't \right\} \approx \frac{1}{2h} (1 - e^{-h\omega t}) \sin\omega t \quad (2)$$

となる。式から、無限時間経過後の定常振幅は地動の $1/2h$ 倍となり、低減衰なほど増幅されるが、その振幅に達するには時間がかかることが分かる。ちなみに、定常状態の振幅の β 倍になるために必要な波の数は、

$$n = -\frac{\ln(1-\beta)}{2\pi h} \quad (3)$$

となる。例えば、 $1/2h$ の9割に振幅が育つのに要する波の数は $0.3665/h$ で与えられるので、減衰定数は1%だと37波、5%だと7波、20%だと2波となる。

周期5秒の構造物だとすれば、低減衰の高層建物の場合には共振が育つのに3分も必要となるが、減衰が20%程度期待できる免震建物では10秒で共振状態に至ることになる。

このことは、低減衰長周期建物の設計用入力地震動の策定に当たっては、建物の固有周期近傍での地盤の卓越振動数のチェックと、継続時間の設定に配慮が必要であることを示している。

(2) パルスの地震動に対する応答

兵庫県南部地震の震源域の揺れのように、パルスの地震動の場合には、パルス幅と建物固有周期との大小関係が大事になる。一例として、継続時間 $T_0/2$ の矩形パルス型の単位地動加速度が作用する問題を考える。この問題に対する非減衰1自由度系の変位応答は、下式で与えられる。

$$y = \begin{cases} -\frac{1}{\omega^2}(1 - \cos \omega t) & t \leq \frac{T_0}{2} \\ -\frac{2}{\omega^2} \sin \frac{\omega T_0}{4} \sin \left(\omega t - \frac{\omega T_0}{4} \right) & t > \frac{T_0}{2} \end{cases} \quad (4)$$

この最大値は、1自由度系の固有周期 $T (=2\pi/\omega)$ とパルス作用時間との関係で、

$$y_{\max} = \begin{cases} \frac{2}{\omega^2} & T = \frac{2\pi}{\omega} \leq T_0 \\ \frac{2}{\omega^2} \sin \frac{\omega T_0}{4} & T = \frac{2\pi}{\omega} > T_0 \end{cases} \quad (5)$$

と与えられる。上式は、パルス周期と建物固有周期との大小関係の大事さを示している。

建物周期よりも長周期のパルスの入力が入力作用する場合には、建物応答は入力加速度の2倍程度の応答となるが、建物の固有周期に比べてパルス周期が短い場合には、建物応答は励起されにくくなる。

建物の固有周期に比べて短周期の入力 ($\omega T_0 \ll 1$) の場合には、単位加速度矩形パルス地動に対する建物応答は、初速度が $T_0/2$ のインパルス応答に収束する。初速度1のインパルス応答変位振幅は $1/\omega$ となるので、最大加速度応答は $\omega T_0/2 = \pi T_0/T (\ll 1)$ となる。

このように、長周期構造物にとっては周期の短いパルスの影響は小さい。例えば、1秒程度の周期のパルスが作用したときの周期5秒の長周期構造物の応答加速度は地動加速度の0.6倍程度となり、地動加速度の2倍程度に増幅される固有周期1秒以下の中低層建物の応答と比べ、応答が1/3程度に抑制される。

以上に述べてきたように、南海トラフでの巨大地震のように継続時間が長い地震動と、兵庫県南部地震のときの震源域の揺れのような継続時間の短い地震動とでは、長周期構造物の応答特性が大きく異なる。長周期構造物の設計において、深部地盤構造の周期特性を考慮した継続時間の長い地震動と、断層近傍のパルスの地震動の2つの地震動を想定することの大事さがよく分かる。

(3) 建物の変位応答

中高層建物の耐震設計を行う場合、層間変形角を設計クライテリアにする場合が多い。この場合、単純に考えると、建物の応答速度は一定値となり、応答加速度は建物階数に反比例し、応答変位は階数と共に線形的に増加する。

簡単のために、建物の応答モード形を逆三角形モード、層間変形角を Δ とする。建物の1次固有周期が建物高さに比例する ($T = \alpha H$, H は建物高さ(m)) と考え、1次モード形の振動が卓越したとすると、建物頂部の応答変位、速度、加速度は、

$$\begin{cases} y = \Delta H \\ \dot{y} = \frac{2\pi}{T} \Delta H = 2\pi \frac{\Delta}{\alpha} \\ \ddot{y} = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \Delta H = 4\pi^2 \frac{\Delta}{\alpha^2} \frac{1}{H} \end{cases} \quad (6)$$

と書ける。一例として、 $\alpha = 0.03$, $\Delta = 1/100$ とすると、速度応答は建物高さに関わらず200cm/s程度となる。変位応答と加速度応答は建物高さに依存し、250m級の建物では変位振幅は250cm、加速度振幅は160Gal程度となり、25m級の建物ではそれぞれ25cm、1600Gal程度となる。このような関係は、速度一定則を満足する周期帯域内で、減衰定数が同一の建物の地震応答を考えても導くことが可能である。

意外に設計者に認識されていないのは、高層建物の変位応答の大きさである。万一、建物の固有周期に近接した卓越周期を有する地震動が長時間作用し、設計時想定以上の速度応答が生じれば、床応答は数mにもなる。設計者は十分にこの揺れをイメージし、過大な応答変位に対する室内対策の必要性を建築主に勧める必要がある。一度、周期5秒で、往復5mを10回程度走ってみて欲しい。全力疾走しても難しい。応答速度を減じるための減衰

付加の大事さが実感できる。

なお、免震建物の場合には、敷地制約上、免震層の応答変位を設計クライテリアにする場合が多い。このため、長周期化するほど、応答速度、加速度が低減されることになるようである。

3 最近気になっていること

ここまで述べてきたような初歩的な振動論も含め、最近気になっていることを以下に記してみる。余り整理されていないことについては、ご容赦願いたい。

(1) 一般的な構造技術について

我が身を振り返りながら、最近気になっていることリストアップしてみると、

- ① 人員構成の逆ピラミッド化と領域の専門化
- ② 技術者の勉強不足と基礎学力の低下
- ③ 我々の実力の過大評価
- ④ 設計想定震度、耐震・免震・制震の安全性の差、高層ビルの安全性などについての誤解
- ⑤ 構造技術者の会話能力と作文能力
- ⑥ 技術者の地震に対する危機感の無さ

などが思い浮かぶ。①は誰もが感じていると思う。30代以下の構造技術者の少なさである。建築学会の委員会などでも、小委員会の委員は40歳以上の中年ばかりである。委員会の数は随分増えたが、研究領域が細分化し、戦線を拡大しすぎているように思う。全体を見る目が減退し、逆ピラミッド構造の中で、若手技術者はヘトヘトのように感じる。

②は、私自身の反省点でもある。20代の時には、毎日、通勤電車の中で専門書や論文を読んでいた。基礎的な本や、論文を良く読み、プログラムも沢山書いた。このところ、本当に頭と手を鍛えていない。周辺を見るとそんな人が多い。私の研究室の卒業生を見ても、皆、勉強する時間が無いと言っている。普段、使っている設計式の背景も十分理解していないようである。先日、ある大手建設会社の勉強会で、50人くらいの構造研究者・設計者の前でお話しをした。その時、 β 法の応答計算やSRモデルのプログラムを作ったことのある人に挙手をしてもらったが、手が挙がったのは著名な60前後の研究者二人だけだった。どこでも目にするのだが、これが実態のように思う。

③は、自分で手を動かした研究者が減少すると

共に顕在化してきた。例えば、設計式の中には、十分に分かっていることと、良く分からずに仮定していること、の2種類があるはずだが、設計式に疑問を感じる技術者が減ってきているように感じる。一方で、普段、設計で用いている解析は極めて高度になってきた。私たちは、建築物のことについて、どこまで分かっているのかを明らかにした上で、地に足をつけて解析をする必要がある。良い道具を使える料理人になることは意外と大変だと思う。

④はその一例である。例えば、「2次設計の想定震度は？」と訊ねると、震度6強とか震度7と答える技術者が意外に多い。だが、想定している地動加速度は震度6弱の上限程度のはずである。しかし、実際に建っている建物の実力については、安全率、雑壁などの余力、動的相互作用による逸散減衰や入力損失効果などもあり、一般に設計時想定より耐力が大きい。ただし、ピロティや免震の場合は、余力が小さい場合が多い。免震・制震だから安全という話も良く聞く。免震・制震を採用して地震力を低減し、その分、躯体の断面を削れば、安全性は在来の構造と何ら変わらない。免震のように免震層変位で終局状態が規定される場合には、終局時の余裕度がかえって小さくなる場合もある。高層ビルの安全性についても、応答解析などの高度な解析をしているから一般建物より安全という話をときどき聞く。しかし、入力地震動の速度レベルは、一般建物と変わらない。深部地盤構造に伴う地盤周期特性の考慮や構造物の減衰の適切な評価をしていない場合には、想定外の応答になることもあり得るはずである。

⑤は、構造技術者が一般の方と話をするときの会話・作文能力の問題である。構造技術者が、意匠設計者や設計依頼主に対して、分かりやすい言葉で地震危険度や耐震安全性について説明したり、構造安全性の確保の重要性を主張することが減っているように思う。知恵の有る依頼者であれば、将来の地震危険度の高さや損失の大きさを知り、さらに数%のコストアップで格段の安全性向上ができると聞けば、判断は変わると思う。また、構造計算書や評定図書も他人が理解できるような書類になっていないように思う。これでは、ピアレビューも困難である。

そして、最も気になるのが、⑥の危機感の無さ

である。講演の度に受講者全員に家具固定の有無の質問をするが、構造設計者の自宅の家具固定率は一般市民と比べ高くは無い。家具の固定すらしていない技術者は、地震に対する危機感が不足していると思う。私自身、地震のことを真剣に考えるようになって、突っ張り棒をやめ、家具を壁に固定した。私なら、家具固定をしていない設計者には構造設計は依頼したくない。

(2) 免震建物について

話のついでに、免震設計についても少し記しておきたい。①地震動、②基礎・地盤、③上部構造、④説明性について、感じることを記しておく。

まず、①地震動についてである。東京以西では、建物の供用期間中に、非常に高い確率で東海・東南海・南海地震の揺れに遭遇する。当然、これらの地震に対して、建物を健全に保つことが望まれる。当該地盤のやや長周期の卓越周期と、巨大地震故の地震動継続時間の長さを念頭においた設計は必須である。また、上下動やロッキング・ねじれ入力については分かっていないことも多い。根入れ基礎、形状が不整形な基礎、斜めから入射する地震動では、少なからずロッキング入力やねじれ入力が存在しているはずである。

つぎは、②地盤・基礎に関わることである。地盤の応答解析で、局所的に歪みが極端に大きく自然免震になっている事例に、ときどき出くわす。こういった場合、地盤の要素分割や物性値の与え方についての検討が不十分な場合が多い。杭に関しては、地盤の強制変形による検討が行われていない場合が多い。検討が行われている場合も杭周地盤バネを過小評価している例が多い。また、最近、杭頭を半剛接とした杭基礎を目にすることが増えてきたが、杭頭を半剛接にすると、杭頭剛接時のような入力損失効果が失われて建物応答が増大することが忘れられているように思う。その他、擁壁の地震時土圧の分担性状や、上下動応答に対する地盤ばねの影響、中間階免震時の免震層以下の応答への動的相互作用効果、地下震度の取扱いなど、課題が多く残されていると感じる。

そして、③上部構造についてである。最近、上部構造が柔らかいために、弾性変形が応答増幅した設計例を良く見る。こういった建物に、剛体的応答を前提とした告示免震の計算方法を採用する

のは避けたい。また、高次モードが卓越する場合には、剛性比例減衰を採用すると過大な減衰を与えることになることも注意が必要である。最近、ロングスパン梁や構造スリットの採用、部材断面の節約などの事例に多く出会う。

最後は、④設計依頼者への説明の仕方についてである。免震マンションの広告を見ると、免震だから安全というコピーを良くみる。設計者も免震は安全であると強調しすぎていないだろうか。免震故の終局時の余裕度の低さについてはきちんと説明しておくべきだと思う。また、官庁営繕の建物の場合には、I類の建物であっても免震で有れば通常の入力レベルで設計されている場合が多い。明らかに、品確法の耐震等級3の考え方と矛盾している。この点も、依頼者に一度は説明をするべきだと思う。

4 今、やろうとしていること

ここまでに述べてきたような問題意識のもと、最近、心がけているのは、

- ・できるだけ多くの揺れを測る
 - ・揺れを測る道具を作る
 - ・建物と地盤の揺れを知る
 - ・地下と土地の過去を知る
 - ・相互作用の影響を知る
 - ・長周期の揺れを再現する道具を作る
 - ・建物の揺れや倒壊状況を模型で再現する
 - ・防災活動の仕組み作りと教育・啓発を実践する
- などである。個々については、機会を改めて報告することにしたいが、免震・制震に関わることだけ若干補足しておく。

私どもの研究室では、東海地区の強震観測機関の観測ネットを相互接続した大都市圏強震動総合観測ネットを整備したり、名古屋市内の全小学校での常時微動記録を公開してきた。東海地区の強震観測点の地震波形・応答スペクトルや、各小学校の微動H/Vスペクトルを参照できるので、建設地近傍の地盤卓越周期を知る手がかりとなる。さらに、濃尾平野については、深部地下構造を知ることのできる三次元ウェブGISも整備されている。

また、LAN接続型の廉価地震計E-Catcher、H/VスペクトルやRD波形を自動生成できる簡単微動計ミクロンを開発してきた。後者は、地盤の卓越周期や、建物の固有周期・減衰定数を現地で把握でき

る便利な道具である。

これらのデータは、愛知県設計用入力地震動研究協議会での地震動評価や、三の丸地区での設計用入力地震動評価にも活かされてきた。

また、名古屋で建設中の高層建物を対象に、建設時に強震観測を継続的に実施し、建物高さによる建物応答性状の違い把握してきた。また、高層建物の長周期応答を再現できる長周期ロングストローク簡易振動台を開発し、従来は困難だった変位振幅3m、最大速度500Kineの揺れの体験を実現した。これにより、高層ビルの揺れの特徴や、免震・制震にするメリットを、誤解無く伝えることができるようになった。

こういった活動は地元技術者や建物オーナーの方の啓発にも繋がりがつつある。名古屋市三の丸地区での5つの官庁建物(合同庁舎2号館、愛知県庁本庁舎、同西庁舎、名古屋市役所本庁舎、同西庁舎)

の免震改修の実現にも多少なりとも寄与したように思う。

本年8月3日に行われた愛知県設計用入力地震動研究協議会の総会では、免震構造協会との共催で、5つの免震改修建物についての設計報告会を実施した。同一敷地で計画された5つの免震改修事例を相互比較することにより、免震改修のキーポイントがあぶり出されてきた。本年12月5日には5つの免震改修建物の連続現場見学会を計画している。異なる施工段階の免震改修建物を一度に見学できる珍しい機会になるだろう。

最後に、「地」という文字の大事さを付け加えておきたい。最近、「地」が軽視されているように思う。私自身は、様々な「地」(地球・地域・地震・地盤・地史・地誌・地名・地理・地学・地質・地形・地道・地元・地力・地べた)を大事にしたいと思っている。