

# 大規模地震に対する堆積平野上の長周期構造物の耐震設計を考える

福和 伸夫

名古屋大学大学院環境学研究科

## 1. はじめに

拙稿では、今後、発生が懸念される南海トラフでの巨大地震を念頭において、大規模堆積平野に立地する高層建物や免震建物の安全性を考えてみたい。

南海トラフでは、過去繰り返しM8クラスの巨大地震が発生しており、時間予測モデルの考え方に則れば、近い将来に巨大地震が発生する可能性を否定できない。東海地震説が唱えられて25年を経過した現在では、いわゆる東海地震の単独発生ではなく東南海地震や南海地震との連動も念頭に置くべきである。従って、今後建築する建物にあっては、供用期間中に南海トラフでの巨大地震に遭遇することを前提に耐震設計をする必要がある。もしも、1707年宝永地震のような地震規模になれば、震源域の大きさは700kmにも達し、その破壊継続時間は三百秒にも及ぶ。このため、従来の設計行為では想定していなかった、極めて継続時間が長く長周期が卓越した地震動を設計時に想定する必要がでてくる。長周期構造物の安全性について、特に、共振に時間を要し、継続時間の影響の大きい低減衰の超高層建物や、累積損傷の影響の大きい塑性ダンパーを用いた免震建物に関しては、既存建物についても今一度安全性を吟味する必要が有ろう。

今春から、中央防災会議において東海地震の震源域の見直しが行われており、また、東南海地震や南海地震に関する調査委員会も設置され、大綱化に向け検討が始められつつある。また、現在、浜名湖から名古屋にかけての広域のエリアで地殻変動の異常が継続して観測されており、東海地震と東南海地震のセグメント境界部分での「スロー地震」との報告もある。長周期建築物の設計に従事するものは、南海トラフの状況を注視すると共に、十分な知識を持って南海トラフでの地震について建築主に説明をする責任がある。その上で、必要とすべき耐震性能について、建築主と設計者の間で合意するべきであろう。

一方、この数年間、文部科学省の主導の下で、全国3平野（関東平野・濃尾平野・京都盆地）において大規模な地下構造調査が実施され、基盤岩に達する深部地盤構造の姿が明らかにされつつある。また、全国6大学（東京・京都・北海道・東北・名古屋・九州）に整備された大都市圏強震動総合観測ネットワークにより、6大都市圏の強震動特性の分析も進められつつある。これらの分析から、堆積平野における地盤特性とやや長周期域の地盤震動特性との相関も明らかになりつつある。

さらに、昨年施行された新たな耐震規定を契機に、建物の耐震性能が把握できることを前提とした性能設計への動きが加速している。性能設計では、我々建築技術者の技術的知見が十分にあることが前提となる。特に、建物の耐震性能の評価能力と地震荷重（地震動と建物の振動特性）の評価能力が共に十分に無いと、性能設計化は建物の耐震安全性向上に逆行する危険性を孕んでいる。地震荷重の大きさを据え置いた上での積極的な相互作用効果の導入などは、低層建物の耐震安全性を考える上では気がかりな点である。免震・制震設計においては、地震動評価と、振動数・減衰の設計が基本となるので、地震動特性と建物の振動特性に関する把握力を高めることが極めて重要である。

拙稿では、以上のような現況に鑑み、筆者が調査した事例を通して、建物の地震時挙動、地盤の震動特性についての我々の理解度を再検証し、現在の技術力について自問すると共に、今後の長周期構造物の設計をよりよいものにするための議論のきっかけにしたい。

## 2. 強震観測に見る建物応答の特徴

筆者らは、観測事例の少ない10階建以下の中低層建物の振動挙動を理解することを目的に、名古屋大学

東山キャンパス内において、9つの建物で強震観測を実施し、約20の建物で常時微動計測を実施してきた。加えて、鉄骨系の戸建住宅や免震建物についても、振動実験・強震観測を実施し、建物振動特性の設計上の仮定と実挙動との差異について分析を進めてきた。その結果、概略以下のような知見を得ている。これらから、現実の建物の振動挙動は、設計時の仮定と矛盾する点が少なからず存在し、我々の振動挙動把握度は未だ十分な段階に達していないと判断される。

構造種別（10FのS造とRC造の校舎建物）による応答特性の差：

構造種別による相互作用の寄与の違い、S造の減衰の小ささ（1%以下）、RC造の2次部材の寄与（S造の低減衰の問題は重要。RC造の振動数は設計時想定の倍程度でありモデル化の問題点が多い）  
建物階数や地盤条件による振動特性の差：

建物高さ・地盤条件による相互作用の影響（振動数低下と減衰増大）の強さの違い

建物建設時（10FのS造とRC造の校舎建物の各階施工時）の振動特性の変化：

同一基礎・地盤下での階数変化による相互作用効果（振動数低下・減衰増加・入力損失）の変化（相互作用による応答低減効果は低層RCに顕著。入力損失効果は無次元振動数で同等に扱える）

RC造10F建物の平面的な増築前後の振動特性の変化：

平面増築による偏心状態から無偏心状態への移行によるねじれ動の減少と立体振動特性の変化（中低層建物に関しては剛床仮定の妥当性や1本棒SRモデルの妥当性の検証が必要）

隣接建物（SRC造6F建物とRC造3F建物）間相互作用による小規模建物の特性変動：

隣接建物存在時の相互作用特性の顕著な変動、特に小規模建物の振動特性への隣接建物の影響（建物が隣接して建設される場合は相互作用効果を積極的に導入することは危険かもしれない）

鉄骨造戸建住宅の振動特性：

極めて大きな振幅依存性と、中小振動レベルにおける非常に小さい減衰、ねじれ振動

（戸建住宅の場合、動特性の振幅依存性を考慮した解析が必須と思われる）

免震建物（洪積丘陵地に立地する杭基礎RC造4F建物）の振動特性：

設計との差異、2次モードへのロッキングの寄与、ねじれの励起、杭応答への相互作用の寄与（基礎入力動や、相互作用効果も含めたロッキングやねじれ・上下動に対する配慮が必要と思われる）

### 3．我々の耐震性能の把握度と性能設計

林ら（建築学会構造系論文集、No.528、2000）によれば、兵庫県南部地震における100カイン程度の入力に対してのRC建物（ピロティ階のあるものを除く）の構造的被害率は、中破以上・小破以上に対してそれぞれ、新耐震設計の建物で2～5階は0.3%と2.7%、6～7階は0.9%と15.7%、8～12階は9.2%と33.3%であり、1971年以前の2～5階の場合は6.4%と17.4%、1971～1981年の2～5階の場合は3.0%と11.2%となっている。新耐震設計法では300～400ガル程度の地動に対して終局強度設計をしているはずであるが、想定地動の数倍の地動を受けたにも関わらず低層建物の被害率は極めて小さい。これに対して、10階程度の中層建物の被害率は遥かに大きく、旧耐震基準による低層建物の耐震性よりも劣っている。ただし、中層建物の被害率は、現行耐震基準の地震力レベルに対応した妥当な量であるとも判断できる。

一般に、被害地震における建物被害分析では、全体建物棟数に占める低層建物の割合が高いため、低層建物の被害率に被害分析結果が支配される傾向がある。このため、建物全数に対する年代別被害率のみから新耐震設計法の妥当性の議論を行うことは危険である。むしろ、我々は、「震災の帯」における揺れの強さに対して、どの程度の被害レベルに抑えることを合意するかを議論した上で「耐震基準」における地震荷重の大きさを議論すべきである。兵庫県南部地震において新耐震設計法による建物被害率が少なかったことを論拠に、不明確な設計外の余力を当てにした形で従前の地震荷重の大きさを是認したり、地震荷重の大きさを据え置いたままで相互作用などによる荷重低減効果を積極的に導入することなどに関しては、疑問を感じざるを得ない。

耐震設計の性能設計化を目指すには、特に地震荷重の大きさや入力地震動の大きさの妥当性を議論する

必要がある。そのためには、兵庫県南部地震における建物階数による建物被害率の差異の原因究明が不可欠である。建物階数による被害率の差異の原因の一つとして1秒前後の地震動成分の卓越が考えられるが、それだけでは10倍もの被害率の差は説明できず、設計で考慮していない計算外の余力の寄与が考えられる。一般に低層建物は、

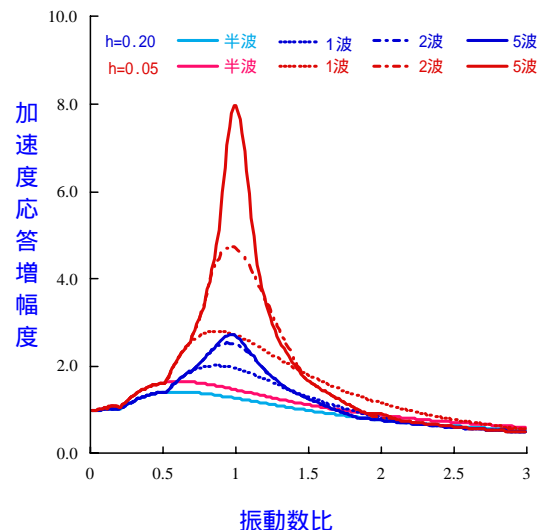
- 1) 固有振動数が高いため相互作用効果が大きく、慣性の相互作用効果によって逸散減衰や固有周期が増加する。特に、軟弱地盤上の剛性の高い建物の場合にはスウェイ・ロッキング変位が支配的になり、建物内応力に関連する弾性変形の割合が小さくなる。
- 2) 構造物の固有振動数位置での入力損失効果が期待できる。
- 3) 高層建物と比べて、設計で見込んでいない雑壁などの2次部材の寄与が大きい。

などの特徴を有している。筆者らの観測事例や簡単な試算では、低層建物の場合1)で倍以上、2)で数割、3)でも倍以上の余力を持っているように見受けられ、これらの余力は建物階数の増加と共に減少する傾向がある。

すなわち、地震荷重を据え置いたままで、実現象に忠実な技術的に高度な検証方法を用いて設計をした場合、実現される耐震安全性が従来より低下する恐れがある。この場合、兵庫県南部地震における10階建建物の被害率を超える被害率を許容することにもなる。すなわち、極端な言い方をすれば、神戸クラスの揺れを受けた場合、低層建物の平均的な被害率が数倍～十倍になることをも覚悟していると解釈することも不可能ではない。一面の技術的合理性を追求することが全体の安全性に寄与しない場合があることの事例であり、新しく導入された検証方法がその一例とならないことを願ってやまない。

#### 4. 共振と減衰

一般に、やや長周期構造物の設計では、建物の振動特性の設計をすることになる。その場合、基本となるのは共振の回避であり、重要となるのは減衰の設計である。では、減衰の効きはどのようになるだろうか？ 簡単のために、地動としてSin波がn波作用した場合の1自由度系の応答を考えてみる。右図は減衰定数hが5%と20%の場合について、入力振動数に対する構造物振動数の比を横軸、最大応答値の増幅度を縦軸にして、Sin波の波の数をパラメータに図示したものである。図から明らかなように、パルス性の入力に対しては減衰の効きは小さく最大応答となる振動数が入力振動数より低くなるのに対し、波の繰返し数が増すと共振振動数に近づき減衰による応答の差異が増大する。



$n\pi h$  の値が十分に小さい時の共振時応答増幅度は、

$$\frac{1}{2h} \left( 1 - \frac{\exp(2n\pi h)}{\sqrt{1-h^2}} \cos 2n\pi \sqrt{1-h^2} \right) \approx \frac{1}{2h} (1 - \exp(2n\pi h)) \approx n\pi(1-n\pi h)$$

で与えられるので、半波パルスの場合には減衰定数によらず1.57倍となる。これに対して繰返し数が増加すると1/2 h 倍に増幅され増幅度は減衰定数に支配される。ちなみに、定常状態に達するのに要する波の数の目安として、90%に増幅(0.9/2h)するのに必要な波の数を求めると0.37/hとなる。

これらのことから、減衰の大きい免震建物の場合には共振周期よりやや周期の短いパルス的な入力に対する応答が、減衰の小さい高層建物の場合には継続時間の長い波に対する共振応答の問題が重要になる。例えば、減衰定数が1%で周期5秒の建物の場合、共振振幅の9割に育つのに185秒も要する。このことは、60秒の継続時間で良しとした告示波の課題の一つであると思われる。今後想定される南海トラフでの巨大地震に対しては、波の繰返し数の問題は留意したいことであり、Jenningsの包絡形などを用いることによって、再検討が必要だと思われる。

## 5. 堆積平野の地震動特性

濃尾平野においては、過去2年間にわたって地下構造調査が実施され、東西・南北2断面での反射法探査や深層ボーリング、微動アレイ探査が行われた。この結果、従前から予想されていた濃尾傾動が確認され、東から西（養老断層）に向かって堆積層が深くなり、最深部では2000mを超える層厚を持っていることが検証された。得られた結果は、常時微動記録によるやや長周期卓越周期分布とも調和的であった。

また、昨年には大都市圏強震動総合観測ネットワークが整備され、多数の強震記録が得られ始めている。遠距離で発生した規模の大きな地震（鳥取県西部地震や芸予地震）では、やや長周期成分をたっぷり含んだ極めて継続時間の長い記録が得られている。濃尾平野の場合、傾動地塊運動によって、東部から西部に連続的に地盤の卓越周期が長周期化し、名古屋中心部で3秒程度、濃尾平野西部では6秒を超える卓越周期を有しており、観測記録にはこれらの周期成分が明確に現れている。濃尾平野域では、この周期成分が卓越した長い後続波が付加しており、周辺地域に比べ継続時間が大幅に増大している。

中低層建物で重要となるやや短周期成分に関しても、沖積層厚の差異に対応した振動数特性の違いが明確に表れており、地動強さも場所によって変動していることが認められている。ただし、多数の記録で同一の振動数特性が得られているわけではなく、サイトにおける地盤増幅特性に加え、各地震の震源特性や伝播特性を反映した結果となっている。

また、国や自治体を中心に98の活断層調査が精力的に進められつつあり、震源や地震活動度に関する情報も多く得られつつある。ただし、結論付けに関しては性急さを否めない点も感じられる（例えば、濃尾平野内に存在が懸念されていた「岐阜・一宮線」は活断層の存在が否定されたが、地元には異を唱える研究者も多く、これらの結論が一人歩きすることに懸念する識者も多い。）。過去の被害地震には98断層のような活動度の高い断層以外での地震（三河地震や鳥取県西部地震など）も多いので、国の調査結果を参考にしながらも、これをすべて鵜呑みにするのではなく、設計者の判断を加えて想定すべき地震像を設定することが必要であろう。

以上のように、大規模堆積平野のやや長周期域の地盤震動特性、表層地盤のやや短周期域の特性、震源の特性などに関して、関東平野・大阪平野・濃尾平野・京都盆地などを中心に資料が相当蓄積されてきている。また、最近では、Kネットや自治体の震度情報ネットなどで、多くの強震記録が収録され始めており、同一地点で多数の震源の地震動を活用することができるようになってきた。これらの成果を活用すれば、従前とは異なる方法（例えば波形合成法）での設計用入力地震動の策定や地震動特性の検証も可能である。ここ数年、震源断層モデルを考慮して設計用入力地震動を策定する事例が増えてきているが、策定手法が画一化してきているくらいがないわけではないので、最新の知見を積極的に取り入れた地震動策定手法が根付いていくことが望まれる。

なお、愛知県では、設計に従事する民間の有志が出資して「愛知県設計用入力地震動研究協議会」を立ち上げ、最新の成果を取り入れて設計用入力地震動を策定しつつある。また、国では地震調査研究推進本部が平成16年度までに日本全国を概観する地震動予測地図を策定する予定である。今後、これらの成果を利用した設計が拡大すると思われ、免震建物の設計者はそのリーダー役になることが期待されている。

## 6. おわりに

筆者の周辺を中心に、免震建物や高層建物などの耐震設計を進める際に、参考になるのではと思われる事例を紹介した。このところの産業界の不景気や大学の急激な改革が相俟って、建築技術に関しても、足が地についた腰の据わった研究が減ってきているように感じる。物事をじっくりと考えることが減り、いろいろな問題を分かったことにしてしまっただけで、先を急いでいる印象を強く受ける。しかし、観測事例を通していくつか示唆したように、私たちは思いのほか、自分たちの建てている建物や地盤のことを分かっていないように感じる。技術の進歩のために性能設計を進めることには大賛成であるが、地震に対する安全性をどのように担保するかについては、今一度議論が必要だと思われる。自然は、常に私たちの弱いところを突いてくるので、是非、自然に対して謙虚な態度で、技術を過信せずに耐震設計を進めていきたい。