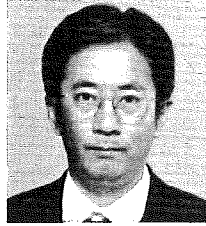


免震建物について思うこと

名古屋大学先端技術共同研究センター 福和伸夫



1. はじめに

私が始めて免震という言葉を目にしたのは16年前である。当時、私は建設会社入社2年目の超新米で、原子力発電施設に対する免震構造の適用性に関する受託研究プロジェクトに参加していた。仕事を一緒にさせて頂いたのは、小柳義雄・田村和夫・小畑益彦・佐藤俊明の各氏で、各氏は引き続いて免震構造研究や地震動研究で大活躍されている。この受託研究はフランス電力公社が先駆けたケーブル発電所やクルアス発電所に啓発されての研究だったが、国内の研究実績は少なくニュージーランドや米国の事例を手探りで調査した。このため随分沢山の英文文献を読んだ。その後、英文文献をこれほど一度に大量に読んだ記憶がないのは私の不勉強の証明かも知れない。当時は、免震構造物の基本的な動特性もよく分からなかったため、極く単純な1自由度系の非線形応答計算を大量に実施し、入力地震動の特性や装置の復元力特性と応答特性の関係を丹念に調べたり、振れれ入力に対する免震効果やロッキング入力に対する応答増幅の懸念などに関する検討を若干行った。しかし、当時の私は主として地盤と構造物との動的相互作用に関する研究を行っていたため、地盤との相互作用をシャットアウトする免震構造に対しては複雑な気持ちを抱いていた。そんなこともあり、一時期免震構造物と真剣に向き合ったものの、その後十年ほど免震からは距離を置いて過ごすこととなった。

再び免震構造に接したのは、名古屋大学に異動した直後で、大学周辺に建設される都市高速道路や地下鉄に対する振動対策として学内超精密機器の除振問題を考えたときであったが、免震化は具体化せず兵庫県南部地震を迎えた。兵庫県南部地震は世に免震ブームを引き起こしたようで、私の所にもいくつかの相談があったが何れも具体化しなかった。状況が一変したのは1995年の暮れで、建築センターの免震構造評定委員会の末席を汚すようになってからである。以来、2年余り免震とどっぷりお付き合いするようになった。民間出身故に評定委員会の重要性や責任の重さは十分に認識していたが、自分とは関係のない世界だと思ってい

たので、少なからず困惑した。現在は、現場から離れて5年ほどたって錆ついた頭を修復しつつ新米委員の一人として評定業務にお付き合いしている。が、震災後の地方での強烈な業務量に加え、余りの数の免震物件で当方のペースもかき乱されることとなり、研究室自体も危機状態を迎え、最近では自分自身の危機管理が最重要研究課題となっている。

2. 最近感じていること

しばらく東京で過ごしていたこともあり地方に移って東京と地方との違いを痛感する。東京はあらゆる人々の興味の対象であり、と同時に、多くの大学や国立研究機関、大企業の技術研究所が集まっている。このため、大量の研究者が東京を中心に地震防災の問題に取り組んでいる。これと比べると地方は誠にお寒い状況にある。私が住む名古屋は曲がりなりにも三大都市圏の一つなので状況はまだ良い方だが、隣接する岐阜県や静岡県には建築学科がある大学すらない。地方には実務設計者は数多くいるものの、スタッフ部門の技術者や研究者の数が圧倒的に少なく、地震防災や耐震設計を考えるための基礎を蓄積する体力に乏しい。免震構造評定委員会にも地方の案件が数多く申請されるが、その多くが在京の設計者によって支援されている。とくに、地震荷重の設定に関しては地域の設計者だけでの対応は難しいようである。しかし、設計用入力地震動の設定や地盤を考慮した応答解析には地域ごとの地震活動度や地盤特性を十分に配慮する必要があり、地域に根差した検討が極めて重要である。地域にスタッフ的な人材を増やすと共に、地元の大学と連携して地域の耐震解析技術の蓄積を増やすことが強く望まれる。さもなければ、免震構造の普及もままならず、地域ごとでの適切な地震荷重の設定ができなければ性能規定化も絵空事になってしまう。

地方に住んでいると××の専門家という立場ではいざらなく、スタンスを広くしている必要がある。自身の八方美人的な性格が災いしているためか、地元への愛着心や現在の所属(先端技術共同研究センターは地域

の産官学共同研究の推進母体)への帰属意識のためなのか、震災後とても多くの地域の仕事に関わった。首都圏では考えられないことだが、地方では一人の人間が関与する範囲がとても広い。その結果、建築以外の部局の仕事も数多くかけもちする。こんなことから、各省庁が個別に行なっている施策の相互矛盾や、自治体間や部局間の壁の高さを痛感する。一方で、時期を失することなく壁に風穴をあけ風通しを良くすることによって防災上有益な成果を多数得ることができることも分かる。震災後の様々な動きの結果、免震設計に有用な情報も数多く生み出されている。筆者が関係したものを中心に名古屋地区の状況を以下に簡単に紹介する。おそらく他の地方でも同様の地域に根差した情報があるはずであり、参考にして頂ければと思う。

- 1) 活断層調査：加木屋断層・天白河口断層・岐阜―一宮断層・養老―桑名―四日市断層・猿投山断層等で実施され、www.jishin.go.jpで最新の調査結果を閲覧できる。愛知県(消防防災対策室)は活断層アトラスを出版している。これらは建設地点の地震活動度の調査に有効利用できる。
- 2) 地震被害想定：名古屋市(消防局防災部)では濃尾・東南海・想定東海の3地震に対する被害想定を実施し、平成9年に地震動予測結果も公表しており、地震動レベルの設定に参考になる。
- 3) 官・民の既存不適格建築物の耐震診断・改修の促進：官庁や公立学校の耐震診断・改修が進み、民間の既存不適格建築物の抽出もされつつある。また耐震性の乏しい重要拠点は免震改修も念頭においた検討がなされている。免震による耐震改修事例(中部大学)もある。
- 4) 官庁の耐震設計指針の策定など：自治体の耐震基準の改訂が進められ用途毎に重要度係数が設定された。また、岐阜県は2施設を、愛知県内でも2市が市庁舎を免震化しつつある。また、愛知県(建築指導課)では建築技術者の意識向上のための地域の特徴を解説した地震教本も作成した。
- 5) 強震観測ネットの整備：愛知県(消防防災対策室)は、18箇所の科技庁強震ネット(www.k-net.bosai.go.jp)に加え、全市町村に計測震度計を設置した(計74箇所)。名古屋市(消防局防災部)も強震計を全区(16地点)に設置し、うち2点は工学的基盤位置にも観測点を有している。
- 6) 地盤データの整備：名古屋市(環境保全局)では平成10年度を目標に約25,000本のボーリングデータのデータベース化と地盤データ活用のための地理情報

システムの開発を進めている。

- 7) 早期被害予測システムの整備：名古屋市(消防局防災部)では前述の強震観測情報を用いて初動体制確立のため早期地震被害予測システムを構築しつつある(平成10年度稼働予定)。
- 8) 地震防災情報サービス：千代田火災海上は創業100周年記念事業の一環として「地震防災情報サービス」をホームページ(www.chiyoda-fire.co.jp)を介して提供している。すでに東京都の情報提供が行われており近々名古屋地区の情報提供も行われる予定である。

以上のように、名古屋市域だけでもこれだけの動きがある。現在、各種調査が進行中のため情報の変化も激しいが、多くは免震構造設計時の地震荷重の設定に有用なものであり、活用が望まれる。

さて、話が変わるが震災後感じる2つの事柄がある。一つは自然現象や技術に対する謙虚さであり、他の一つはベース作りの大事さと村社会からの脱皮である。最近、震災直後に感じた謙虚な気持ちが薄れつつある。「私たちは建物や地盤、地震のことを十分に分かっているだろうか。慣行に甘んじた設計をしていないだろうか。耐震設計や研究のために日々大量の応答解析をしているが、現象を十分に理解した上で適切なモデルや諸元を使っているのだろうか。解析法の精度向上は真の予測精度の向上に寄与しているのだろうか。」こんな疑問が沢山湧いてくる。確かに構造的に明快な超高層ビルや原子力施設に関しては十二分な実験や研究に裏打ちされて理解が進んでいる。しかし大多数を占める中低層建築物の地震時挙動は思いの外分かっていない。住宅に関しては尚更である。建物に比べて、地盤や地震に関してはより一層分かっていない。実際に振動実験や地震観測をしてみると解析では説明できないことばかりが現れて困惑する。私自身は、今まで分かった振りをしていただけではないかと大反省中である。そんなことで、10年以上理論解析ばかりをやっていたが、ここ5年ほどモデル化の基礎作りを心がけている。最近、世の中に余裕がなくなり、分からないものに対して、分かったつもりにしてどんどん前に進み、足元がよろついているように感じる。耐震設計をリードしているはずの超高層や免震建築物の設計においてもルーチンワーク化が進み、設計者が設計行為に創造性や疑問を感じる事が少なくなったような印象も受ける。神戸での強震観測記録や被害実態をみても分かるように、私たちは未だ入力や耐力を十分に把握できていない段階で、建物の性能を適切に評価できるだけの実力を十分に持っていないことを認識すべきだ

の有用性が確認されつつある。また、微動の成因に関しても表面波としての解釈も有力となってきた。しかし、免震設計用の調査結果では、卓越周期の評価に地表記録のフーリエスペクトルや基盤とのフーリエスペクトル比のピークを用いている事例が多い。やや長周期域の卓越に関しても、脈動と解釈し、地盤構造との関係を否定する見解が示される場合もある。構造物の振動数制御を前提とした免震構造物では、地盤の振動性状を正確に掴むことが設計の基本である。著者らは名古屋市内約260地点で微動調査を実施し水平上下スペクトル比により周期分布の推定を試みた。図-5にやや長周期域の周期分布を示す。図の結果は既存の重力探査に基づく基盤深度とよく対応しており、地震基盤以浅の地盤構造を用いて重複反射解析により求めた固有周期との相関も図-6のように高い。なお、免震建築物が多く立地する名古屋市中心部の周期が3~4秒であるのは気になる点である。

(4) 上部構造と下部構造の地震力

図-7のように現行設計法の地震荷重は、上部構造は層せん断力係数で、地下部は地下震度で与え、杭にはこの和を杭頭慣性力として与える場合が多い。まず、上部構造の地震荷重について考えてみる。 A_i 分布が上部構造の振動モード形状と誤解されている場合に時折出くわすので、層せん断力係数 C_i と水平震度 a_i との関係を確認しておく。 i 層以上の重量を W_i 、全重量に対する i 層以上の重量の比を α_i 、総階数を n 、地震地域係数を Z 、振動特性係数を R_t 、標準せん断力係数を C_0 と記すと、水平震度 a_i と A_i は、

$$a_i = Z R_t C_0 \frac{\sum_{j=i}^n W_j (a_i A_i - a_{i+1} A_{i+1})}{W_i}$$

$$C_i = A_i Z R_t C_0 = \frac{\sum_{j=i}^n W_j a_j}{\sum_{j=i}^n W_j}$$

と関係づけられる。このように、層せん断力係数 C_i は i 層から上の震度を層重量で重み付き平均したものである。従って、ベースシア係数 $Z R_t C_0$ は建物の平均的な水平震度を与えるものであり、建物基礎の震度は $Z R_t C_0$ よりも小さい値となる。図-8に、各層の重量が等しい場合の A_i 分布と震度分布を示す。建物周期が長くなると A_i 分布は上部が振れる形となり、基礎部の水平震度は小さくなる。 A_i 分布を用いて超高層建物の1次設計用地震力を評価すると基礎位置の換算水平震度は数十ガル以下になる。一方で、基礎固定モデルを用いた地震応答解析ではレベル1地震動として250Gal程度の入力を与えており、両者には10倍もの開きがある。

地下震度として0.1を採用している例も良く見かけるが、これは1次設計時の地盤地表の動きを80~100Galと考え、対応する震度を地下部慣性力として考えたと思像されるので、基礎部震度や入力地震動の加速度レベルと対応していない。

杭の設計を行う場合、根入れによる杭頭地震力の低減を行う場合がある。杭設計時には根入れ低減をし、低減相当分の地震力に対して地下外壁や擁壁の面外せん断力の検討をしていない事例を見かける。上部からの慣性力に対して抵抗するのは杭と地下外壁・擁壁に接する地盤である。地下外壁・擁壁の抵抗分が杭設計時の根入れ低減分に相当する。本来の低減量は杭の水平抵抗と根入れ側面部の地盤抵抗の比となる。地盤が十分に堅固な場合には建物の動きを地盤が支持するので、杭頭慣性力による設計の考え方がよく整合する。

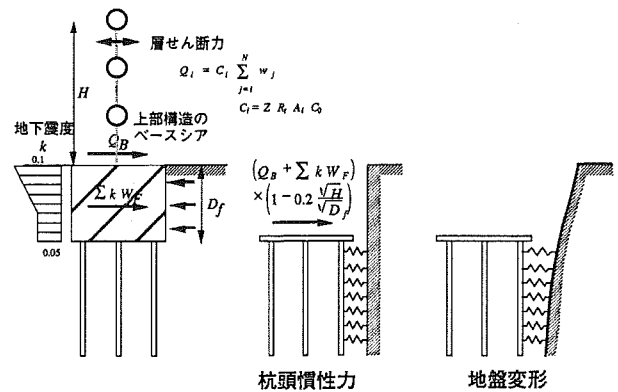


図-7 上部構造・地下部・杭の地震荷重

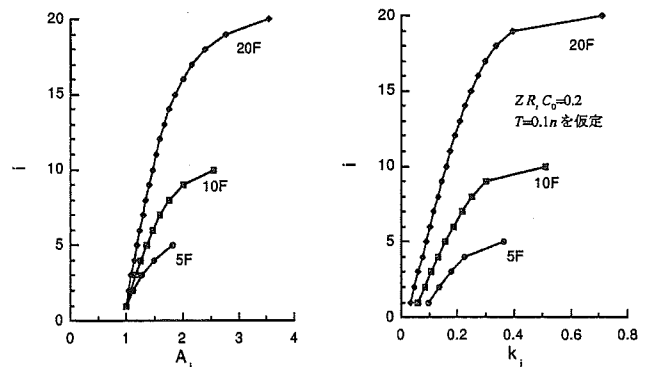


図-8 A_i 分布と震度分布

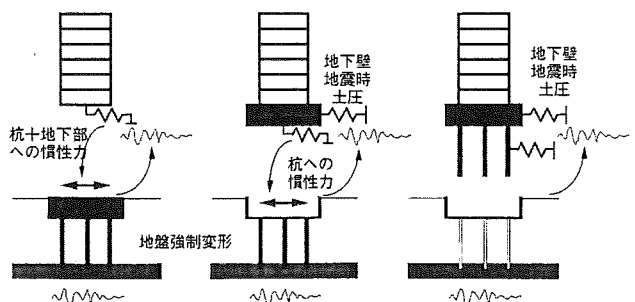


図-9 動的相互作用モデルと地震荷重の考え方

しかし、地盤が軟弱になると地盤の動きが大きくなって、地盤が建物や杭に力を与える。この場合には、物部式などによる擁壁応力の検討や、応答変位法などによる杭応力の検討が必要となる。

以上のように、上部構造—地下部—基礎構造の地震荷重は十分に整合がとれていない。本来で有れば、構造物と地盤との動的相互作用の考え方を踏まえて整合を図るべきであり、図-9などを出発点に考え方を整理することが必要である。

(5) 地盤の応答解析

免震建築物が軟弱地盤に計画されたり、模擬地震動を基盤位置で設定する機会が増えてきたため、地盤の応答解析の重要性が増している。しかし、地盤の応答解析との馴染みが少ないためか、思いもよらぬ落とし穴があるようである。質量密度と単位体積重量の混同、動的変形特性のせん断ひずみの単位(%)の混同、基盤地震動定義の露頭波(2E)と応答波(E+F)との混同、などなどである。

地盤の応答解析の基本は、地盤を平行成層置換できるかどうかの判断、地盤の速度・密度構造や地盤材料の動的変形特性の設定、等価線形解析と逐次非線形解析の選択や全応力解析と有効応力解析の選択、などにあり、留意すべき点が多い。評定を通して気づいた点を以下に列記する。

- 1) PS検層による地盤速度構造は走時設定に人間の判断が入るので、幅を持った解釈が必要である。
- 2) 動的変形特性試験の利用には試料の攪乱、拘束圧・塑性指数依存性に対する配慮が必要である。また、動的変形特性試験結果をヤング係数に適用すべきではない。
- 3) 等価線形解析の適用限界に留意する必要がある(加速度用、0.1~1%程度以下のせん断ひずみ)。
- 4) 逐次非線形解析用復元力モデル作成に当たっては、動的変形特性の適合度の確認が必要である。
- 5) 地盤が過度に塑性化すると地盤自身が免震効果を生み出し地表加速度が大きく減じられるので、全応力解析による地表加速度を用いた液状化判定は液状化危険度を過小評価する可能性がある。
- 6) 地盤を離散化して解析する場合、最小波長を表現できる質点間隔(塑性化後の等価S波速度 V_s と解析対象振動数 f から定まる最小波長 $\lambda = V_s/f$ を5~6分割)を用いる必要がある。
- 7) 応答変位法による杭の検討では、地盤変位と地盤係数の設定が鍵になる。地盤係数を過小評価すると杭頭慣性力による応力は過大に、地盤強制変位による応力は過小に評価される。

当たり前の事が多く設計者の方に対して失礼な項目ばかりであるが、全てが十分に配慮された設計事例に接する機会は極めて少ない。

(6) 上部構造のモデリング

上部構造の地震応答解析によく用いられるのは基礎固定の水平1方向等価せん断型質点系モデルであり、剛性比例型減衰が用いられる場合が多い。検討用に、ねじれ動や上下動を考慮した解析も行われる。以下では、筆者が携わった観測事例や簡単な解析例を通してモデル化上の問題点を考えてみる。

表-1は、名古屋大学内の4階・6階・10階建の建物の地盤・1階・屋上階で得られた1997年愛知県東部地震(M5.6)の強震観測記録の最大加速度の一覧である。表から幾つかの事が指摘できる。3つの建物は100m位しか離れていないにも関わらず、地盤地表の水平動(EW方向)は2倍弱の差がある。これは表層の地盤条件の差異に起因している。地表と1階の動きを比較すると、地盤が軟弱で建物平面サイズが大きい建物で1階の動きが減じられており、入力損失効果が認められる。また、建物階数の増加と共に上下動の増幅が顕著となっている。10階建の建物については詳細な微動計測も実施しており、顕著なねじれ動やロッキング動(杭基礎にも関わらず50%ものロッキング率)、床の面内弾性変形や基礎の面外変形が認められた。また、観測で得られた固有振動数は設計時の1.2(100ガル相当)~1.5(微動)倍となっていた。これらの結果は、水平1方向モデル、基礎固定モデル、剛床仮定の妥当性に疑

表-1 愛知県東部地震での3つの建物の最大加速度(Gal)

	4階建			6階建			10階建		
	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD
最上階	74.88	101.20	36.62	96.54	106.15	33.40	107.24	130.32	122.94
1階	57.29	50.08	24.09	42.76	58.51	20.60	48.30	60.61	18.11
地表	50.32	73.55	31.43	44.12	55.81	38.94	72.08	97.12	37.04
建物概要	RC造、75m×15.4m 盛土、杭基礎(6m)			SRC造、38.8m×15.4m 切土、PC杭(12m)			SRC造、60m×34.4m 埋立地、RC杭(45m)		

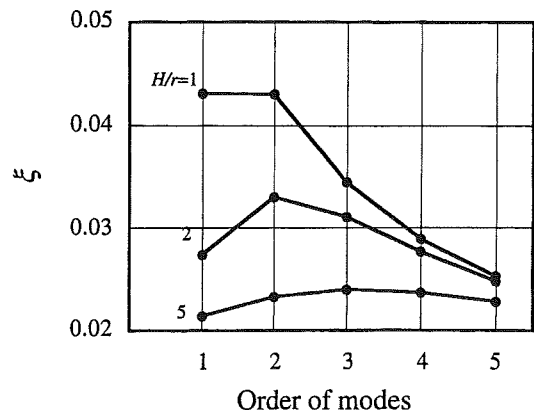


図-10 動的相互作用考慮時のモード減衰 ($V_s=200\text{m/s}$)

問を投げかけるものである。また、ちょっとした表層地盤の違いによる入力地震動の変動や、入力損失効果、雑壁などの2次部材の剛性評価、上下動増幅の重要性を示唆している。従来の地震観測が超高層建物や原子力発電施設に限られがちであり、中低層建物の観測記録が少なかったため、モデル化の妥当性を考える材料がなかったことが原因しているかも知れない。免震構造物は殆どが中低層であり、振動挙動の把握が設計の前提となる建物なので、適切な振動モデル構築の重要度が高い。

ついでに、減衰と上下動の2つの問題について付け加えておく。上部構造の減衰モデルとして剛性比例型が採用されることが多い。元来、剛性比例型減衰の採用は、基礎固定モデルの利用を前提に、上部構造の減衰に地下逸散減衰効果を見込んでいたためと思われる。しかし、動的相互作用を考慮したときのモード減衰は図-10に示すように高次増大型ではない。既存の実験資料の多くが高層建物の低次の数次に対して整理されているため誤解されたと思われる。なお、図-10は上部構造は複素減衰2%としスウェイの相互作用バネのみを考慮したときの各次のモード減衰を示したもので、 H/r はアスペクト比である。

もう一つは上下動の振動解析モデルについてである。上部構造の上下方向のモード剛性、免震装置の軸剛性、地盤バネの上下剛性の値を試算してみると容易に理解できるが、これらは上部構造剛体1自由度モデルや基礎固定モデルを採用できる剛性バランスではない。最近、高層でスパンを飛ばした免震建築が増えており、免震構造物の上下応答解析の位置づけは高い。また、入力地震動としてEl Centro上下動が用いられる機会が多いが、10Hzに顕著な卓越があり10Hzを避けるかどうかで応答値が著しく変化する。このように上下動振動解析に関しては数多くの課題が残されている。

(7) データ整備と有効活用の必要性

免震構造物の設計では地震や地盤に関わる数多くのデータを利用する。第2節にも述べたように、兵庫県南部地震以降、地震や防災に関わる情報が種々の機関で整備されつつある。しかし、地盤情報に関してはデータが質・量ともに不足した状態が変わっていない。また、獲得されたデータも各機関でバラバラに整備され、統合環境下で利用できる状況には余りない。今後は、設計に必要となる基礎データを協力して整備すると共に、耐震設計に必要な各種のデータを利用できる統合環境を整備していく必要がある。その際には地理情報システム (GIS) が有効利用できると思われる。

4. おわりに

随分失礼なことを長々と書いてしまった。こんなことを設計者の方に申し上げることができるようになったのは、免震建築物の普及のお陰である。日本免震構造協会を始め、免震構造を支える方々の努力で動的設計の考え方が根付いてきたことは素晴らしいことだと感じる。これによって、都市や建物の安全性が向上するだけでなく、研究と実務設計の間の壁が低くなり、耐震技術レベルの向上にも多大な寄与をする。免震建築に携わる設計者の方々は、免震建築を突破口に、設計の自由度を増すと共に、真に技術が活きる世界を作っていただきたい。今後、免震ならではの夢のある建築物や、思っても見ない技術が出てくることを期待してやまない。

拙稿では、筆者が日頃感じている疑問点などについて記した。若輩かつ浅学ゆえに生意気で不適当なことを述べたかもしれないが、お気づきの点が有れば是非ご叱責頂きたい。

参考文献

- 1) 壇一男、神田順：上下限値を有する極値分布を用いた地震危険度解析、日本建築学会構造系論文報告集、第363号、pp.50-56、1986
- 2) Y.Fukushima, T.Tanaka: A New Attenuation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, ShimizuTech.Res.Bull, No.10, 1991
- 3) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道研究報告、4、pp.18-27、1988