

# 建物の地震時挙動に関する問題点の整理

飛田 潤\* 福和伸夫\*\*

\*名古屋大学工学部社会環境工学科 tobita@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

\*\*名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 fukuwa@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

## 1. はじめに

耐震技術の歴史において建物の地震時挙動の解明は、観測や被害調査などに基づく現象の把握、適切なモデル化と理論解析、実験や観測による検証とパラメータなどの定量的評価、そしてさらに次の重要な現象の把握、と繰り返しながら進展してきている。この過程で強震観測の果たした役割は、大別して未知の現象の認識、技術の確認、そして既知モデルに対する定量的な情報などである。

1950年代から米国や日本で研究的に実施された建物に関する地震観測では、主に現象の発見・確認に力点が置かれ、続く1960~70年代のコンピュータ発展時期における応答解析・応答予測手法開発の基礎になったと考えられる。その後1990年代まで日本を中心として、技術の先端である電力関係の構造物や超高層建物、免震・制振建物などを対象として実験と強震観測が進められた。充実した観測態勢をとったものも多かったが、高度な技術の検証という意味合いが強く、解析手法の妥当性や免震による応答低減効果の検証など限定された利用しかなされていない場合も多い。一方、一般の中低層建物については、地震時応答挙動に関する70年代までの知見に基づいた耐震設計に落ち着いており、観測対象建物も最近では増加しておらず、実地震時挙動に関する知見の蓄積は必ずしも進展していない。

このような状況で1995年兵庫県南部地震が発生し、様々な問題が明らかになった。新耐震の二次設計で考慮する3倍以上のレベルの入力を受けても建物被害率が高くなかったことは、実際の建物に作用する地震力と建物耐力の評価に疑問があることを示している。この特性を検討できる建物の強震記録は、兵庫県南部地震に限らず未だほとんどなく、観測態勢の手薄さは明らかである。さらにこれらの記録のなかで

も公開されて活用できるものはさらに少なく、利用態勢も改善されるべきである。

限界耐力計算法の導入により地震荷重の動的な効果がより明確に考慮できるようになり、地盤の地震動増幅特性や地盤と建物の動的相互作用効果、建物の周期や減衰特性が陽な形で荷重評価プロセスに取り入れられた。これは現在までの知見に基づいて、主な対象となる中低層建物の地震応答に最も影響の大きい要素を考慮して、設計法としては格段に進歩したと言えるであろう。しかし一方で、そこで用いるべき地盤や建物に関する知見は必ずしも十分整理されておらず、定量的評価のための情報はさらに不足している。実際に適切な設計を行うには、各種調査や強震観測によるバックデータの整備が急務であり、そのためにも多数の観測例による定量的な情報の蓄積が必要である。

ここでは一般的な中低層建物を中心に、強震観測により明らかにしていくべき問題点をまとめて述べ、そのために必要な観測やデータ利用について筆者らが試みている事例を通じて議論したい。

## 2. 建物の地震時挙動に影響する諸点と強震観測

地震時挙動に関する問題点を表1に整理した。以下に説明を加えるが、具体的な図は省略したので参考文献を適宜ご参照頂きたい。

表1 本節で述べる問題点の整理とキーワード

---

地盤 - 構造物の動的相互作用：周期と減衰、入力低減
上部構造の応答分布：モード形、建物増幅、地震力
隣接建物間相互作用：都市部の密集建物、ロッキング
減衰定数：低減衰、共振、継続時間、モード間連成
立体振動特性：立体モード、ねじれ、床面内変形
二次部材の影響：雑壁、フレーム剛性、固有周期
振幅依存性・非線形性：固有周期と減衰の変化・変動
基礎構造の応答と地震力：杭基礎、根入れ基礎
上下動応答：超高層・免震の上下動相互作用

---

## 2.1 地盤 - 構造物の動的相互作用<sup>1)</sup>

動的相互作用効果は、特に中低層建物や剛な構造物の地震応答において支配的であり、最も適切に考慮すべき要因の一つである。20世紀前半から理論検討がなされ、20世紀後半には理論と数値解析、そして大規模実験と地震観測により発展した。地震観測については Housner や山原による観測記録から現象を見抜いた研究が知られている<sup>2)</sup>。

相互作用効果には慣性の相互作用と入力の相互作用がある。慣性の相互作用については、その効果を代表する地盤インピーダンスを地震観測や常時微動から直接求めることは困難であるが、相互作用の影響として現れる地盤 - 建物連成系周期の長周期化と減衰の増大は、観測記録から求めることができる。このためには建物の頂部(RF)、基部(1F)、および地盤地表(GL)の観測が最低限必要であり、さらに基礎固定系の特性を適切に評価するために基部の両端部における上下動から求めたロッキング( )が必要となる。伝達関数の評価は、RF/GL から相互作用系の特性、RF/1F からスウェイのみ拘束した場合の特性(ロッキングの影響は含まれている)そしてRF/(1F+H )からはスウェイ・ロッキングをいずれも拘束した基礎固定系の性質が得られる( H は建物の有効高さ)。

中低層建物による計測例からは周期と減衰の増大が確認され、その効果は一般に建物高さや剛性・形状、基礎構造、地盤剛性などの影響を受けている<sup>3)</sup>。このような効果をなるべく分離して統計評価できるように、多様な建物における多数の観測記録が期待されることはいうまでもない。一方で、系統的な観測により少数の観測対象からより多くの傾向を抽出する工夫も必要である。たとえば、ある建物について建設中に階数の増加に従って観測を繰り返せば、まったく同一の地盤・基礎条件で建物階数のみが増加する場合の特性の変化を知ることができる。また、階数が共通で上部構造形式や基礎構造形式の異なる建物の比較なども考えられる<sup>4)</sup>。

結果として相互作用が固有振動数に及ぼす影響は、低層時で大きく、階数の増加に伴って

減少すること、基礎・地盤に比して上部構造の剛性の大きい場合に相互作用の影響が大きいことなどが確認されている。公団住宅や小学校など上部構造の規模・構造が比較的共通な建物群の計測・分析から地盤・基礎条件の影響を分離した研究もある<sup>5),6)</sup>。

このような観測では、相互作用系の周期、減衰、モード形の評価のためにスウェイ・ロッキングが分離できる観測は重要である。また、常時微動においては、表面波に起因する回転入力により基礎固定系の伝達関数の推定が困難になるケースがあり<sup>7)</sup>、この意味でもロッキングを計測する必要性は大きい。

次に入力の相互作用については、重要な指標である基礎入力動は無質量剛基礎の応答であるため観測から直接求めることはできず、上部構造が存在した状態での基礎の応答である有効入力動が観測される。相互作用による入力の低減効果は入力損失として知られており、地震記録でも確認されている。安井ら<sup>8)</sup>によれば兵庫県南部地震において観測された建物基礎と地表の最大値の関係から、地表に比べて加速度で約3割、速度で約1割の入力低減効果が認められている。

入力の相互作用効果は基礎半幅  $B$  と地盤のせん断波速度  $V_s$  により決まる無次元化振動数  $a_0=2\pi f B/V_s$  の関数として表現され、高振動数ほど入力が減少する。先に述べた建設中の建物における観測では、階数により有効入力は変化しないこと、地盤条件と建物規模がほぼ同様の場合に有効入力動の傾向も類似していることが示されている<sup>4)</sup>。また、規模・地盤条件の異なる建物の比較では、全体的傾向として規模の大きな建物ほど高振動数で基礎応答が低減している。地盤と基礎の最大応答値の比較では、入力する地震動の卓越振動数が高いほど有効入力の低減が顕著になるが、上部構造物の固有振動数に近い卓越振動数を持つ入力ではばらつきが大きく、上部構造物の慣性力によりむしろ増幅するケースもある。さらに隣接棟がある場合には、規模の大きい建物の影響により規模の小さい方の建物の入力が増加することもある<sup>9)</sup>。

このように、入力の相互作用による入力低減

効果は、建物規模と地盤状況の関係の他に入力地震動の周波数特性や周辺建物などにも左右され、地震によるばらつきもかなり大きい。設計においてこの効果を一般的に地震荷重の低減に結びつけることには慎重であるべきと考えられる。

大レベルの応答において基礎が地盤から浮き上がることにより入力低減された可能性について検討例<sup>10)</sup>がある。顕著な非線形特性によるエネルギー吸収と減衰増大の効果は現象としては予想されるが、観測による直接的な検証は十分なされていない。

## 2.2 上部構造の応答分布

動的相互作用の影響が大きい中低層建物では、建物の弾性変形率に比べてスウェイ・ロッキング率が大きくなる。一般にこれらの指標は(1次の)固有振動数付近で算出するが、入力の卓越振動数が異なることを考慮して、振動数の関数としてスウェイ・ロッキング率および弾性変形率を表示してみると、振動数の上昇とともに弾性変形の割合が増加することがわかる<sup>9)</sup>。すなわち、地震動の卓越振動数によって上部構造のモード形や応答増幅率が変動することになる。屋上/地盤の最大加速度比を様々な建物で計算してみると、入力地震動の卓越振動数成分によって応答増幅効果にかなりの変動が見られる。同一の地盤・建物でも地震動によって変動があることから、建物と地盤の固有周期の同調だけでは応答増幅特性を表せないこともわかる。またスウェイ・ロッキングの存在により、上部構造の地震力分布は基礎固定時のそれとは異なることになり、この効果を耐震設計時の地震力分布の設定に際して考慮すべきである。

以上の検討のためにも、前節で指摘したスウェイ・ロッキングが分離できる観測が必要となる。

## 2.3 隣接建屋間相互作用

地盤を介した隣接建屋間相互作用は、主に規模の大きい原子力施設で検討されてきた。しかし都市域のように密集して多数の建物が存在する場合には、一般の建物でも隣接する建物間の相互作用の影響が無視できず、単独建物の特

性に基づく入力評価や応答推定の適用には注意が必要である<sup>10)</sup>。このような効果により入力や応答が増加するか減少するかは場合により異なるが、特に大規模な建物に隣接する小規模建物の場合に影響が大きく<sup>9)</sup>、入力が増加する可能性もあり、上部構造の衝突問題なども含めて、単独建物としての評価が全く意味をなさないことも考えられる。

このような特性の解明のためには、周辺地盤も含めた面的な高密度観測が要求されるため、常時微動や強制振動実験などの併用が実際的である。

## 2.4 減衰定数

中層～高層のS造建物では上部構造が柔で内部減衰も少なく、比較的良好な地盤に建設された場合は特に相互作用の影響が少なく、連成系の減衰が小さい場合が多い。たとえば文献<sup>11)</sup>のデータベースでは高さ50m以上・1次固有周期1秒以上のS造建物の半数近くが1%以下の減衰しかなく、0.5%程度の建物も少なくない。RC系でも階数の多いものでは1%以下の場合もある。比較的周期が長くて低減衰の建物では共振による応答の成長に時間がかかり、大レベルの応答が長時間にわたって継続する可能性がある<sup>たとえば<sup>12)</sup></sup>。特に規模の大きな地震では地震動の長周期成分が卓越し、かつ継続時間も分のオーダーまで長くなることから、長周期・低減衰建物の応答解析は十分長い継続時間について検討することが不可欠である。従来の超高層建物等の設計における応答解析の時間長はせいぜい数10秒であり、最もクリティカルな海溝型の大規模地震に対しては決して十分とはいえない。

また特に低減衰系において複数の固有値が近接する場合(フレーム構造で水平2方向の特性が類似の場合など)に、モード間カップリングによりうなりが生じ、減衰評価に影響を及ぼすことがある<sup>13)</sup>。

このような高層・低減衰建物で計測を行う場合には、地盤や1階の加速度成分でストップトリガをかけると後半の共振部分の記録が得られないこともあり得るため、記録時間を十分長く確保することが重要となる。

## 2.5 立体振動特性

中低層建物は複雑な形状を持つ場合が少なくない。一般的な一本棒モデルへの置換が不適切になる場合として、各階平面内において剛心と重心が食い違う場合のねじれ応答の問題がある。また特に細長い平面形状の場合には、床面が面内で弓形に変形するモードが卓越することが知られている。L字型平面建物においても複雑なねじれと床の面内変形が観測されており、さらにウイング部の増築により対称軸を持つコ型平面になった後も、新たな床面内変形モードが無視できない大きさで生じていた<sup>14)</sup>。1階床面における上下動の多点観測からは基礎版の面外変形も確認されている<sup>15)</sup>。

このように不整形な形状の多い中低層建物では、構造的に明快な高層建物などよりはるかに複雑な立体振動性状を示し、しかも建物個別に異なる性状を適切に評価することは容易でない。また平面形状によって程度は異なるが、設計で仮定している面内剛床は保たれていない可能性があることにも留意すべきである。これらの検討のためには各階に1カ所の観測点では不足であり、より高密度な観測が必要となる。高密度配置による常時微動計測により振動モードの概要を把握したうえで、必要な強震観測計画を立てることが現実的であろう。

## 2.6 二次部材の影響

常時微動や小地震の観測結果では、固有周期が設計時の解析値よりかなり短めになる傾向がある。この原因として、振動モデルの作成に当たってフレームに取り付く耐震壁は考慮されるが、腰壁・垂壁・袖壁などの剛性は十分評価されていないことが考えられる。試みに実在建物のフレームについてFEMにより剛性を評価してみたところ、純フレームに対して耐震壁付きフレームの剛性が10倍以上となり、一方、腰壁・袖壁がついたフレームでも4倍程度とかなり大きくなった<sup>16)</sup>。この腰壁・袖壁付きフレームの剛性を考慮して全体フレームの周期をモデルから計算すると、実測値にかなり近い値となる。このように、一般的なモデル化では十分考慮されていない腰壁・垂壁・袖壁などの二次部材は、大変形時の耐力としてはさほど効い

ていないとしても、フレーム剛性で数倍の差を生じ、振動解析では影響が大きいことに留意すべきである。

鉄骨住宅などではさらに軽微な間仕切や仕上などの二次部材も周期・減衰両面で顕著に影響し、建設段階ごとに振動特性が激変する<sup>17), 18)</sup>。

このような二次部材の影響の把握には、実測値だけでなく建物概要および設計時の検討値を参照することが必要であり、これらの情報を実測データと同時に使用できることが望ましい。

## 2.7 振幅依存性・非線形性

振幅レベルの増大に伴い、建物振動数の低下と減衰の増大が生じる。この変化は比較的小さな振幅では可逆的であり、常時微動と地震時特性の関係を考察する際などに有用である。応答振幅がある程度大きくなると、構造体の損傷による剛性低下のため不可逆的な振動数の低下が生じる。構造体に顕著な損傷を受けるほどの地震応答記録が観測された例はさほど多くはない。宮城県沖地震の東北大学建設系<sup>19), 20)</sup>、三陸はるか沖地震の八戸工業大学<sup>21)</sup>はいずれも1Gあるいは数100galの応答で顕著な被害を受け、振動数で1/2~1/1.5、剛性で1/4~1/2となっている。このような記録は、相互作用や立体振動などあらゆる面から検討を加えて地震荷重の設定に活用すべきであろう。

またこれほどの大レベル応答でなくても、地震を経験するごとに構造体は多少なりとも損傷を受け、さらに長期間にわたる劣化も加わって、建物の振動特性は変化していく<sup>19)</sup>。このような記録群の周期等から建物の損傷劣化評価を行うことも必要である。このためにはある程度以上の振幅の記録に限ってよいので比較的簡易で安価な強震計でも十分であり、その代わりに設置対象建物の著しい増加が望まれる。

## 2.8 基礎構造の応答と地震力

杭基礎の応答性状と作用する地震力、さらには破壊のメカニズムには不明点が多い。しかし建物や地盤の地震観測に比して杭体の挙動の観測例は少ない<sup>たとえば 22)</sup>。杭頭慣性力と地盤変形の寄与度合、杭周辺の地盤バネ剛性と減衰の評価、群杭効果、群杭内部と外部の地盤の挙動、

杭を介した上部構造への入力機構など、未解明な点が数多くあると考えられる。同様に、根入れ基礎の応答低減効果や地下震度の適切な設定のためには、地盤の挙動と基礎への土圧の計測が必要となる。現状ではこれらの計測例は少なく、しかも地盤の非線形性が顕著になるような強震時のデータは全くないと言っても良いであろう。基礎構造や地下部分の挙動の把握は、上部構造に作用する地震力の評価に必須であると同時に、上部構造を支える安全性の評価の面でも重要であり、詳細な観測例が必要とされている。

強い地震動を受けた地盤は非線形挙動を示し、特に地下水位の浅い緩い砂地盤は液化化や側方流動により構造物に大きな影響を与える。このような現象の発生機構と基礎構造への影響を明らかにできる観測態勢が望まれている<sup>た</sup>とえば<sup>23)</sup>。

## 2.9 上下動応答

超高層建物や免震建物では、長周期化により水平応答が低く抑えられているため、相対的に上下動の重要性が増す。一般的な中低層建物では上部構造の上下方向の固有周期はかなり短い<sup>が</sup>、超高層建物では地震動の卓越周期の範囲に入ってくる(横田他<sup>24)</sup>によれば  $T = 0.0084N + 0.065$ )。この際には上部構造の剛性が相対的に高いため地盤との動的相互作用効果も無視できなくなる。また、免震建物でも上部構造の構造要素のスリム化や大スパンの梁の使用などにより上下応答の重要性が増している。特に地盤が軟弱な場合は、上下動における剛性が免震層よりも地盤の方が小さくなるので、地盤との動的相互作用解析が必要となる。このように、長周期構造物については水平動に関しては地盤に比して上部構造や免震層が柔らかいため相互作用の影響は小さいが、上下動では十分な検討が必要であり、同様に地盤も含めた上下動に関する観測も必要である。

なお、免震については多くの地震観測例があるが、応答低減効果の検証だけでなく、ねじれ振動、高次モード形、基礎部分の相互作用や杭の挙動など、詳細な観測により明らかにすべき未知の現象が未だ残っていると思われる<sup>25)</sup>。

## 3. これからの強震観測とデータ利用

### 3.1 戦略的な強震観測態勢

ここまで述べてきたように、強震観測を中心とした実験・実測により明らかにしていかなければならない点は数多くある。特に多数存在する中低層建物については一般に、動的相互作用、平面・高さ方向の不整形性、二次部材、隣接建物などの影響を強く受けており、振動特性は非常に複雑かつ個別性が高い。また特に地盤条件が良くない場合は常時微動による振動システム評価も困難になる<sup>7)</sup>ことから、極力多くの強震観測例を蓄積することが期待される。これらに対応していくためには、大別して以下の方針をとるべきと考える。

#### (1) 比較的簡素な観測態勢で多数の実例

現象そのものは比較的明らかになっている簡易な項目については、できる限り多数の建物・多数の地震による定量的な情報蓄積を行うことが必要である。最低限の観測は建物頂部のみ、あるいは頂部と1階で周期と減衰が評価可能な配置、次は相互作用特性の評価のために地盤観測点とロッキング観測の追加、さらに建物により個別性の高いねじれや床の面内変形などの立体挙動を検出可能な観測態勢の整備、の順となる。

これらのデータは多数になるため、収集・整理・利用するシステムの開発は不可欠である。カリフォルニアでは建設時に強震観測を義務づけるなどして耐震設計用のデータを蓄積しており<sup>26)</sup>、行政側のプログラムによるリードも重要である。

このタイプの観測においては観測機器も従来の高精度かつ高価な機器から変化せざるを得ない。特に最も簡易な周期と減衰程度を目的とした観測態勢においては、強震計の感度・精度はさほど高いものである必要はない。数ガル程度以上の応答でそこそこのデータが得られれば十分な場合も多い。安価になれば、たとえば避難所となる小学校に多数配置することなどが考えられる(図1)。平常時は理科教材として活用し、建物の劣化モニタリングも行い、災害時には学区毎の超高密度強震観測地点となり、さらに避難所となる小学校校舎の被災度把

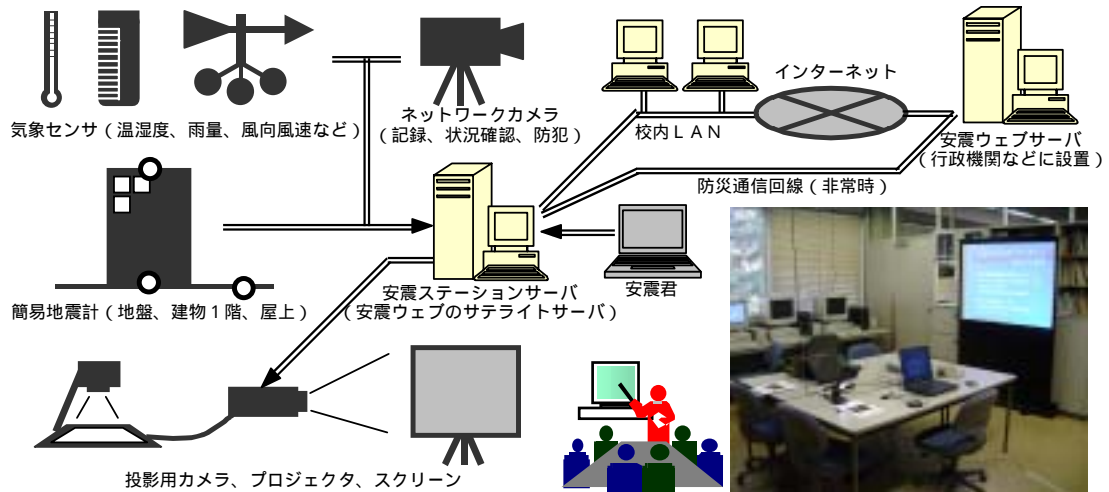


図1 安心ステーションの構成

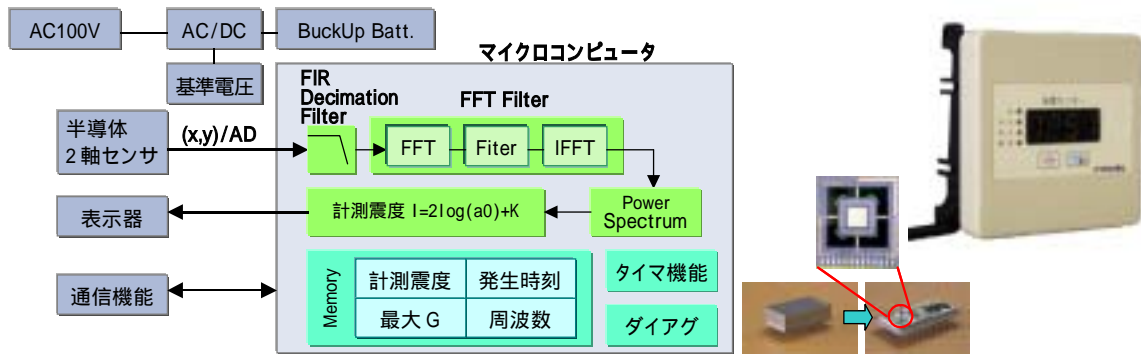


図2 エアバック用半導体センサーを活用した低価格地震計

握にも用いることができる。他の気象センサーやライブカメラと組み合わせて、地域の防災拠点システムを提案している<sup>27)</sup>。

波形記録をあきらめて応答値と被害の関係把握だけに絞ればさらに簡易・安価な機器でも十分である。例として、自動車部品メーカーと協力して開発中の安価なセンサーを図2に示す。エアバッグ作動用の半導体歪ゲージ型センサーを改良し、震度計算回路やメモリー機能を付加したもので、水平2成分、振動数範囲 DC ~ 20Hz、分解能 1 ガル、計測範囲 1000 ガル、震度 2 以上の震度表示を行うことができる。住宅メーカー、ライフライン企業、建物管理会社などと連携し、このような簡易で安価なセンサーを住宅の耐震性能把握・向上や顧客対応に活用することなども考えられるであろう。

## (2) 限定された対象に関する超高密度観測

以上の比較的簡素な計測態勢で多数の観測例を蓄積する一方で、地盤・建物系の詳細な実

挙動把握を行うために、限定された対象について地盤・基礎・建物系の応答・応力・土圧などを含む超高密度強震観測を行うことも期待される。現象そのものに不明な点が多数存在する分野では、ごく少数の対象建物でもよいからできる限り詳細な観測を行う必要がある。ただしこれらは一般にコストがかかるため、公的機関による実施、あるいは研究機関の協働が必要とされる。

## (3) 戦略的な観測プログラムの構築

さらに効率的な観測として、建物の建設段階を追って複数の常時微動計測や継続的な地震観測を行うことにより、図3のような戦略的な観測プログラムが考えられる。基礎構造の施工前後の比較からは有効入力に与える影響が把握できる。また建設中に階数の増加に従って常時微動観測を繰り返し行い、また並行して地震計を設置しておけば、中小地震程度のレベルで、まったく同一の地盤・基礎条件で建物階数のみ



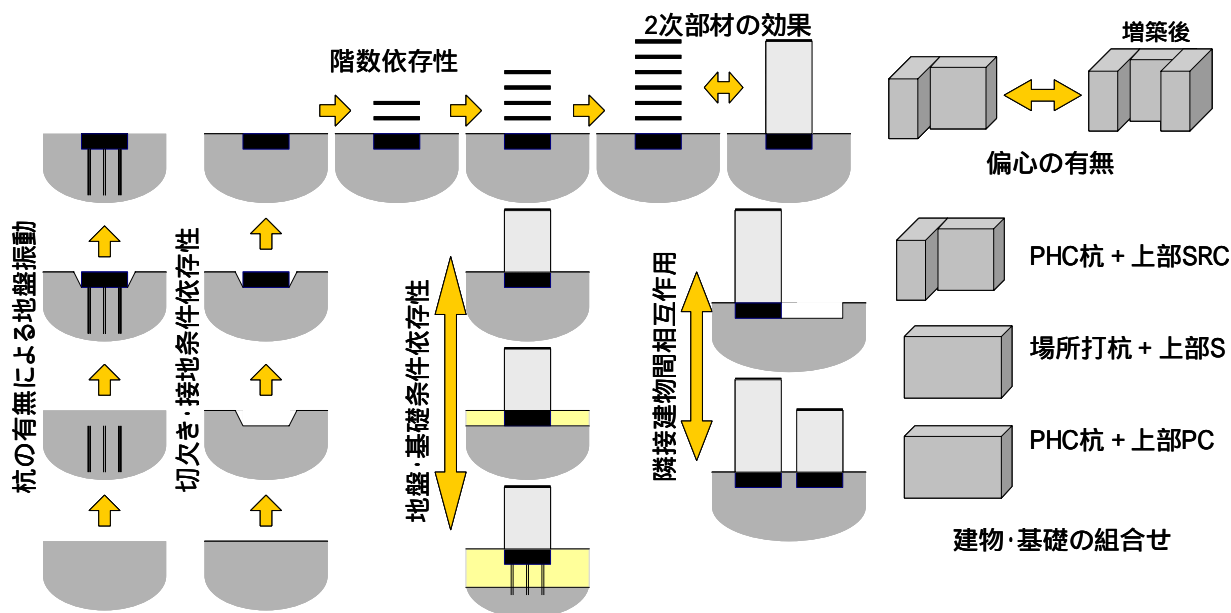


図3 戦略的な観測プログラム

が変化する場合の特性の変化を知ることができる。同様の観測を複数の建物で行えば、地盤や基礎条件の相違を明確にできる。さらに二次部材の有無や隣接建物の有無による特性の比較も可能になる。以上のように、建設段階における計測ケースを適切に組み合わせることにより、1棟の対象建物で何棟もの観測に匹敵する結果を得ることもできるであろう。

### 3.2 データの公開と利用

地盤の強震観測については、兵庫県南部地震以降に、防災科学技術研究所、自治省消防庁、気象庁などの公的機関が中心となって、全国をカバーする観測ネットワークが整備されている。得られたデータは整理・データベース化され、デジタルデータがインターネットを通じて公開されており、多くは一般に使用可能で防災活動や研究に活用されている。鳥取県西部地震や芸予地震などでもわかったように、地震発生が地方であろうとも詳細な加速度分布が得られるだけの高密度かつ均一な配置が全国で確立されている。

一方、建物に関する強震観測は民間主体であるため、観測対象数は頭打ちであり、観測対象は大規模・特殊な建物が多く、多くは首都圏などに集中している<sup>28)</sup>。また観測内容や記録の公開も進んでいないばかりか、記録の整理は各機

関に任されているため人手不足で十分な分析もされていない場合もあるものと考えられる。記録公開の意義や労力に対する理解と評価が全くないことも状況をさらに悪くする。冒頭で述べた兵庫県南部地震における建物強震記録の欠如は、現在でも全く改善されていない。

2章で述べた建物に関する強震観測の問題点を考えれば、一つでも多くの観測例を一般に利用できる形で整理することが望まれる。このような試みの例として、建築学会減衰評価小委員会による建築物の減衰に関するデータベース作成・公開<sup>11)</sup>が挙げられる。またデジタルデータについては、強震観測小委員会による建築会館ほかの強震記録<sup>29)</sup>、建築研究所によるいくつかの建物の強震記録などが公開されている。インターネットの活用では、八戸工業大学の強震観測システム<sup>21)</sup>のデータ公開が先進的な例として挙げられる。地盤・建物の高密度観測について1994三陸はるか沖地震・最大余震をはじめとした多数の地震が整理され、WWWによるアクセス、SQLを利用した検索、デジタルデータのダウンロードなど、現在のK-NETサイトが備える機能のほとんどを1995年当時に提案・構築していた(現在はメンテナンスのため休止しているが、2003年3月に再開の予定。URLは<http://www.takita.archi.hi-tech.ac.jp/>)。

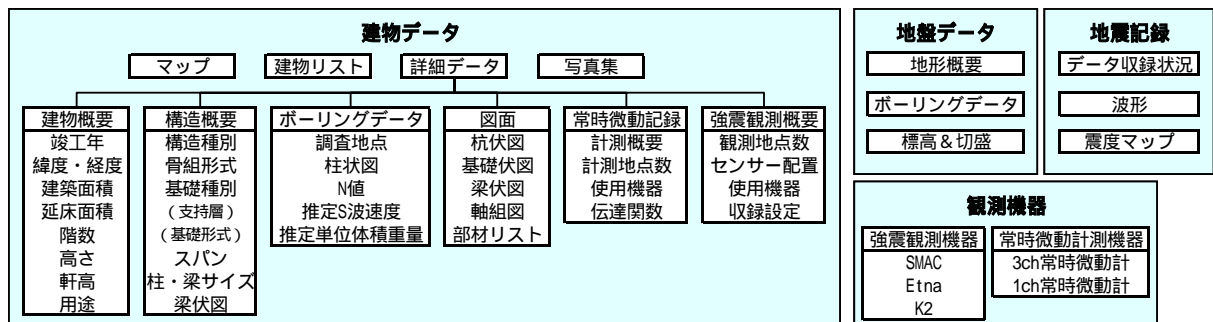


図4 データ分類



建物の詳細データ (建物概要・構造概要) 地震波形一覧 デジタルデータダウンロード画面

図5 データ公開用ウェブシステムの構築 (画面例)

多くの機関が保有する記録をなるべく共通に整理・活用する手段としては、データを一元化して発信するタイプ<sup>30)</sup>と、各機関が共通の形式でそれぞれデータ公開するタイプが考えられる。建物の強震観測は民間が主であり、個性が高いことから、後者が有用と考えられる。一定のひな形に各機関がなるべく従って公開する枠組みができれば、ネットワーク上の分散型データベースへの発展が期待できる。観測記録は、ある程度まとまったデータベースとなることによりその有用性が飛躍的に高まる。地盤の強震観測ではこの集約の効果が比較的わかりやすいが、建物では個々に異なるため工夫が必要である。

ここでは共通のデータ公開を行うために構築したウェブシステムの例を示す<sup>31)</sup>。建物の強震記録を有効活用するためには、建物や地盤に関する詳細情報、観測機器の特性なども加えて一元化することが重要である。大学建物を対象としているため民間に比べて比較的制約は少なく、可能な限りの情報をデータベース化して

いるが、実際には状況により部分的に公開することも想定されている。一方データ所有機関にとっては非公開資料も含めて一元化することにより情報管理の手間を省くことが大きな利点となる。現状は、個別機関では人手不足などによりデータ処理・整理・分析などの有効利用ができなくなりつつあり、情報整理に伴う省力化が情報公開へのインセンティブとなることも期待している。

図4に示すようにデータの分類を行うことにより利用者が利用しやすい構成とし、一方管理側も、変化しない建物概要データと地震ごとに更新される観測データの区別や、項目ごとの公開/非公開の対応などが容易になるように工夫されている。具体的なウェブ画面例を図5に示す。デジタルデータのダウンロードに関しては、ユーザの把握と適切な利用を促すために登録制をとっている。K-NETも当初のフリーダウンロードから登録制に移行しており、今後の一般的な形態として認められていくものと考えられる。



開発したウェブシステムは、将来的に多数の機関により共通性の高いデータ公開のために活用されることを意図／期待して作成されており、希望者にはソースを提供するなどにより展開を図ることを考えている。

最後に重要な点として、意識の問題がある。観測者は自分のデータを囲い込みたがり、建物オーナーや建設会社は建物の真の実力が露わになることを嫌い、一方データ利用者は K-NET などのデータ公開に慣れきってしまい、観測者の苦勞を理解しようとしなない。データ公開の意義を理解し、評価して、自己責任の元に活用していく風土がなければ、共有・協働にはなかなか発展しない。これからの性能を明示した設計のためにも是非必要な姿勢である。先に述べたカリフォルニアの例のように行政によるトップダウンの対応ももちろん期待されるが、われわれ研究者・技術者・設計者が現状を直視し、有用な情報を共有してよりよい耐震構造を目指すためには、意識改革が何より重要である。

#### 4. むすび

本稿では、建物の強震観測の今後を考えるために、建物地震応答に関する問題点を整理し、観測の方針とデータ公開に関する試みを述べた。地盤と建物の地震時挙動は、われわれが思っている以上に把握できていないことを正しく認識し（これは建物耐力の評価についても同様）設計においては適切な判断を、研究においては実現象解明のいっそうの展開を図る必要がある。そのための重要な基礎となる地震観測データは積極的に公開・共有していくことが期待される。現状では動きは鈍いが、ハード・ソフト両面から環境を整えていくべき時期にきている。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996.
- 2) 井口道雄：動的相互作用の近年の動向と今後の課題, 第 6 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム, 5-28, 2001.
- 3) Ghannad, M.A. *et al.*: A Study of the effect of soil-structure interaction on the dynamic properties of

RC structures based on the microtremor records, 構造工学論文集, Vol. 43B, 441-450, 1997.

- 4) 小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤：常時微動計測・強震観測に基づく動的相互作用効果の階数依存性に関する研究・S 造および SRC 造 10 階建物の建設段階毎の動特性の変化・, 構造工学論文集, Vol. 48B, 453-460, 2002.
- 5) 大場新太郎：地盤性状が建築構造物の振動特性に及ぼす影響に関する研究, 大阪大学博士学位論文, 1983.
- 6) 飛田潤, 八木茂治, 福和伸夫, 西阪理永：常時微動計測による低層 RC 造建物の振動性状と耐震指標に関する考察, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, 1671-1676, 1998.
- 7) 八木茂治, 福和伸夫, 飛田潤：常時微動計測に基づく低層 RC 造建物の伝達関数推定にレーリー波による回転入力を与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 552 号, 77-84, 2002.
- 8) 安井謙, 井口道雄, 赤木久真, 林康裕, 中村充：1995 年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 512 号, 111-118, 1998.
- 9) 松山智恵, 福和伸夫, 飛田潤：強震観測・強制振動実験・常時微動計測に基づく隣接する中低層建物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 545 号, 87-94, 2001.
- 10) 林康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果, 日本建築学会構造系論文集, 第 485 号, 53-62, 1996.
- 11) 日本建築学会：建築物の減衰, 2000.
- 12) 前林和彦, 辻英一, 横田治彦, 浮田高志, 柴慶治, 稲田泰夫：1995 年兵庫県南部地震における超高層建物の応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.B-2, 713-714, 1997.
- 13) 小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤：実測記録に基づく S 造 10 階建て建物の応答性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.B-2, 291-292, 2002.
- 14) 岡田純一, 福和伸夫, 飛田潤：観測記録に基づく SRC 造 10 階建物の平面増築による振動特性変化, 構造工学論文集, Vol.48B, 437-444, 2002.
- 15) 飛田潤, 西山拓一, 福和伸夫, 西阪理永, 村橋亮：常時微動計測に基づく 10 階建 SRC 造建物の立体振動性状, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, 1677-1682, 1998.
- 16) 小島宏章, 岡田純一, 福和伸夫, 飛田潤：S 造および SRC 造 10 階建て建物の実測と解析に基づくモデル化の妥当性と課題, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, No.249(CD-ROM), 2002.
- 17) 西畑尚, 中田信治, 福和伸夫, 飛田潤：鉄骨住宅の固有振動特性に関する研究(その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.B-2, 875-878, 2002.
- 18) Fukuwa, N. *et al.*, Field Measurement of Damping and Natural Frequency of an Actual Steel-framed Building over a Wide Range of Amplitude, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.59,

Nos.2,3, 325-347, 1996.

- 19) Tobita, J.: Evaluation of Nonstationary Damping Characteristics of Structures under Earthquake Excitations, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.59, Nos.2,3, 283-298, 1996.
- 20) 志賀敏男, 柴田明徳, 渋谷純一, 高橋純一: 東北大学工学部建設系研究棟における強震観測とその弾塑性応答解析, 日本建築学会論文報告集, 第 301 号, 119-129, 1981.
- 21) 飛田潤, 滝田貢, 毛呂眞, 伊藤敬一: 強地震動による低層 RC 造建物の振動特性の変化, 構造工学論文集, Vol.45B, 73-80, 1999.
- 22) 和泉正哲, 栗田哲, 林田敏弘, 小駒勲: 地震時における上部構造物を支持する杭の力の伝達機構に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 394 号, 118-128, 1988.
- 23) 酒向裕司, 宮本裕司: 入力地震動の波形特性の違いによる液状化地盤の杭基礎の地震応答, 日本建築学会構造系論文集, 第 514 号, 133-140, 1998.
- 24) 横田治彦, 佐武直紀, 岡田敬一: 振動実験および地震観測データに基づく鉄骨造高層建物の減衰性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 453 号, 77-84, 1993.
- 25) 長谷川泰稔, 飛田潤, 福和伸夫, 八木茂治, 北村敏也: 実大免震建物の振動実験と強震観測, 構造工学論文集, Vol.46B, 307-316, 2000.
- 26) Shakal, A.F. : The California Strong Motion Instrumentation Program and Recent Developments, 日本地震学会ニュースレター, Vol.13, No.2, 50-54, 2001.
- 27) 飛田潤, 福和伸夫: 双方向災害情報伝達に基づく地域防災拠点支援システム, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, No.432(CD-ROM), 2002.
- 28) 高橋克也: 民間での強震観測の光と陰, 日本地震学会ニュースレター, Vol.12, No.6, 9-12, 2001.
- 29) 強震データベースの現状と共同利用の試み, 第 1 回強震データの利用に関するシンポジウム, 日本建築学会, 1995.
- 30) 飛田潤, 福和伸夫, 中野優, 山岡耕春: オンライン強震波形データ収集システムの構築と既存強震計・震度計のネットワーク化, 日本建築学会技術報告集, 第 13 号, 49-52, 2001.
- 31) 小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤, 中野優: 建物強震観測 DB 公開用 web システムの構築, 日本建築学会技術報告集 (投稿中)
- 32) 福和伸夫, 飛田潤: 建物 - 地盤の動的相互作用から見た強震観測, 第 2 回強震データの利用に関するシンポジウム, 日本建築学会, 57-68, 2000.
- 33) 福和伸夫: 耐震設計における動的相互作用に関わる課題, 第 6 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム, 日本建築学会, 135-150, 2001.
- 34) 飛田潤: 観測記録から見た地震荷重, 2002 年度日本建築学会大会構造部門 (振動) パネルディスカッション資料, 日本建築学会, 12-21, 2002.
- 35) 福和伸夫: 名古屋圏における地震防災のためのモノ作りと仕組み作り, 2002 年度日本建築学会大会

災害部門パネルディスカッション資料, 日本建築学会, 2002.