



地盤・建物系の高密度強震観測の展開と建物動的挙動の検討

飛田 潤¹⁾、福和伸夫²⁾、小島宏章³⁾、浜田栄太⁴⁾

1)正会員 名古屋大学大学院環境学研究科、助教授 工博
e-mail:tobita@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)正会員 名古屋大学大学院環境学研究科、教授 工博
e-mail:fukuwa@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

3)正会員 名古屋大学大学院環境学研究科、助手 博士(工学)
e-mail:hiroaki@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

4)元名古屋大学大学院生 修士(工学)

要 約

地盤・建物系の詳細な振動観測を通じて明らかにすべき構造物の動的特性を整理し、150以上の建物における常時微動、振動実験、強震観測の結果に基づいて、地盤と建物の動的相互作用特性などに影響を及ぼす要因を限られた観測を適切に組み合わせることで系統的に明らかにする観測方法を提示する。これを本論では戦略的強震観測と呼ぶ。また、観測の計画・実施・分析・データ整理などに当たって必要となる諸点について検討を加え、特に中低層建物を対象として、建設中の建物の特性変化に着目した動的相互作用の検討や、地震計の設置条件による計測震度への影響などについて示している。また、観測に用いる機材やデータ公開に関する知見も示している。これら一連の成果により構造物の振動観測で留意すべき項目をまとめたものである。

キーワード： 地盤・建物系、強震観測、常時微動、中低層建物、動的相互作用、立体振動、建設時連続観測、観測データ公開

1. はじめに

限界耐力計算法の導入により地震荷重の動的な効果が明確に考慮できるようになり、地盤の増幅や地盤・建物動的相互作用、建物の固有周期や減衰が陽な形で荷重評価プロセスに取り入れられた¹⁾。これは、現在までの知見に基づいて、一般的な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たものといえる。また、さらに高度なモデル化に基づいて、構造物の立体挙動や地盤との動的相互作用などを考慮した構造解析手法を状況に応じて活用することもできる。しかしそのベースにあるのは、地震動入力と建物の応答の正確な理解、それに基づく建物の耐震性能の適切な把握である。

一般的な中低層建築物は、地盤と構造物の動的相互作用の影響を強く受けることが知られ、その性質の適切な評価の重要性については、主に理論的な検討により多くの指摘がなされてきた²⁾。しかし地盤と構造物の双方が多様な条件の下で、動的相互作用や構造物への入力を系統的に検討できる観測記

録は必ずしも十分ではなく、設計時のモデル化の検証や定量的なパラメータの設定に不明点が残り、一般的な構造設計において動的相互作用効果を積極的に考慮するには至っていない。一方で上部構造物については、多様な構造特性や形状不整形性、非線形性や二次部材の影響などにより振動特性の評価が難しい場合が多い。兵庫県南部地震で、新耐震設計法の二次設計レベルに対して2倍以上の地震入力を受けながら、中低層RC造建物の被害率が高くなかったことは、実際に建物に作用する地震力と建物耐力の評価が十分ではないことを示している。このような特性を検討できる強震観測記録はほとんどなく、適切な観測記録の蓄積と検討はきわめて重要である。E ディフェンスが稼動を始めた現在でも、一定規模以上の多様な構造物の特性を地盤も含めて検討するための観測の意義は減じられていない。もちろん、従来から高度なモデル化が行われてきた重要・特殊建物（超高層、免震、電力関連大規模施設など）についても、建物の振動性状と設計時のモデル化の検証のための観測は重要である。

地盤・建物系の振動特性を詳細に検討するに当たっては、観測対象の選定、計測の計画、測定機材、測定方法、データ処理、分析、結果の評価、多数の結果の蓄積・整理・データベース化、知見の一般化と利用など、振動実測にかかわる一連の過程のトータルな高度化が必要である。これらの一部のみに力を入れても、全体がバランスよく適切に扱われない限り、実建物の振動特性の正確な把握と設計への有益なフィードバックは困難である。

本論ではこのような背景から、地盤・建物系の強震観測により明らかにすべき構造物の動的特性を整理し、そのための観測体制や観測・分析の要点を検討することにより、振動観測で留意すべき諸点をまとめて提示することを目的とする。その際に、著者らが実施してきた多数の観測結果を整理し、系統的な観測プログラムの提示を行っている。また、観測条件や観測機器、観測結果の整理やデータベース化に当たって有用なシステムについても検討を行う。

2. 高密度強震観測の系統的整理による戦略的強震観測

本論では、図1に示すように、多様な観測条件を整理して少数の建物の観測から系統的に最大限の特性を分離・抽出・検討できる一連の観測プログラムを提示する。これを本論では「戦略的強震観測」と呼ぶ。この観測の特徴は以下の通りである。

まず建物の建設段階を迫った連続観測を導入した点に特徴がある。これにより地盤・基礎条件が同一で階数の異なる建物の特性比較が可能となり、固有振動数やモード減衰、有効入力動の階数依存性が得られる。また基礎の構築に伴う入力の変化や、二次部材の有無による影響も検討できる。さらに長期的に見れば、平面増築の前後では偏心の差異によるねじれ応答や床の面内・面外変形の特徴、耐震改修の前後では上部構造の剛性等の影響、隣接棟の建設による隣棟間の構造物－地盤－構造物相互作用の特性などが扱える。これらに加えて、ほぼ同規模で地盤条件、基礎構造、上部構造の特徴が様々な建物などに着目した複数の建物の比較が含まれている。上部構造特性が類似の建物群（ある地域の小学校建物など）からは地盤・基礎条件の差異を明確にでき、逆に、同一の敷地内で階数の同じ建物から上部構造・基礎構造の構造形式の差が得られる。

以上の系統的な考察の基礎となるのは筆者らがこれまで10数年にわたり実施した多数の観測事例であり、ほぼ全数を表1にまとめて示す。建物記号・番号で示すように、これらは複数の観測シリーズを含んでいる。NU-**は名古屋大学キャンパス内の建物であり、建設中の連続観測や増築・耐震改修前後の比較、多様な規模や地盤・基礎条件の組み合わせなどの検討が行われている。ES-**は上部構造が類似の名古屋市内の小学校校舎を対象として、地盤条件や相互作用の影響などを検討したものである。GR-**は庁舎建築であり、ほとんどは免震レトロフィット実施中か、今後予定されている。HR-**は高層建物、BI-**は免震建物（レトロフィット含む）であり、建設中や免震レトロフィット前後なども含めた長期連続観測が特徴である。そのほかに社寺などの文化財や住宅の観測事例がある。

これらの観測事例を、観測目的やその背景、観測・分析技術の進展などを含めて時系列でまとめたのが表2である。特に名古屋大学内の中低層建物に関しては、観測目的と観測体制の概略をポンチ絵

とともに示した。青枠が微動、赤枠は強震観測を示す。1990年代後半にはK-NETなどの地盤強震観測や自治体の震度通報体制が整備されたが、一般的な中低層建物の強震観測例はごくわずかであった。従って事例を増やすべく強震計の設置とネットワーク接続の開発を行い、同時に環境振動も視野に入れて常時モニタリングを展開した。また常時微動の多点同時観測により複雑な振動特性や相互作用の検出も行い、強震観測を補っている。これらの過程において、構造物の耐震性能を適切に評価するために重要な動特性の検討・抽出が進み、以下の諸点に注目した観測体制を構築するとともに、それらを効率的に観測するために上述の「戦略的強震観測プログラム」が整理されてきたと見てよい。

- 1) 構造物と地盤の動的相互作用（慣性と入力との相互作用の適切な評価）
- 2) 構造物の固有振動数と減衰定数
- 3) 隣接する建物間の相互作用特性
- 4) 構造物の立体振動特性、二次部材の影響、非線形特性

このような高密度の観測体制の構築や測定機材・測定方法については、新たな工夫が必要な場合が多い。表2の2000年以降では、条件が制約される建設現場における強震観測システムに関して、機材や設定も含めて開発が進んでいる。またこれらの検討の結果として、観測対象、観測成分、観測イベント数がいずれも多数となる場合に、観測データを有効に整理して利用するための工夫が必要であり、ウェブを用いたデータベース化とデジタルデータ公開のためのシステム、多点同時記録のリアルタイム監視システム、さらには映像ともリンクした観測体制に発展している。

以上、本論文では主に中低層建物で検討すべき諸点に関して第3章で、また観測・分析に当たって検討・注意すべき点やデータベースとデータ公開に関する工夫を第4章でそれぞれ述べる。

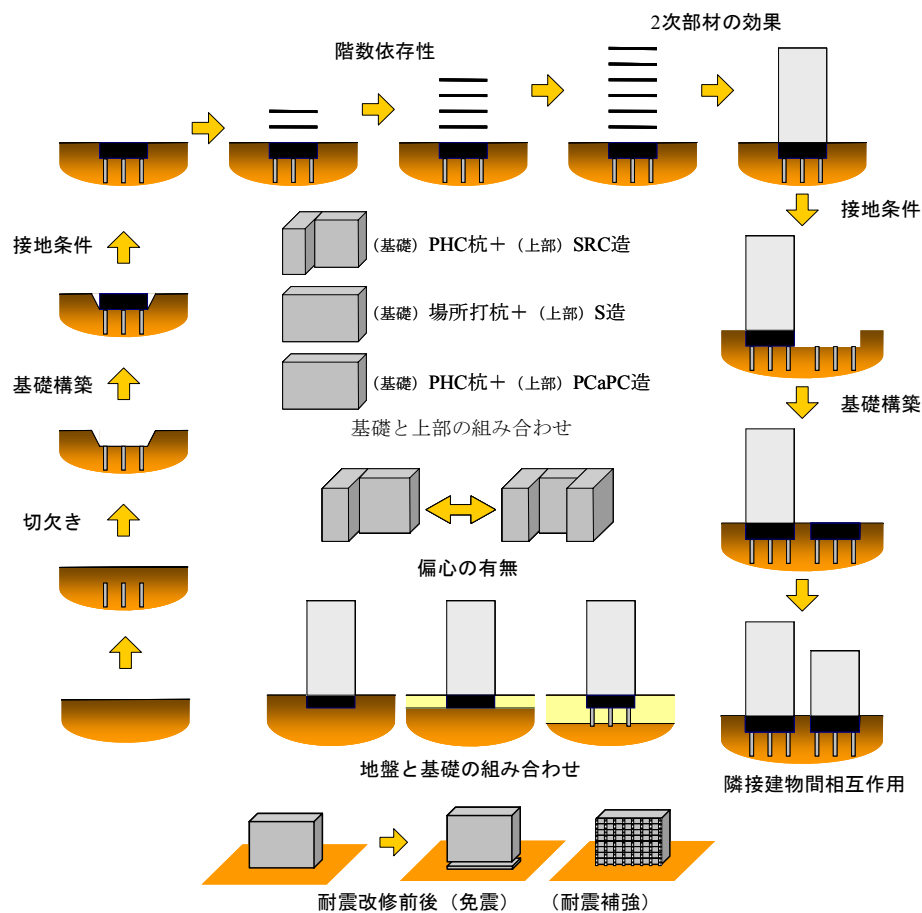


図1 地盤・建物系の戦略的強震観測（振動計測）の概念

表2 名古屋大学における建物振動計測と強震観測の展開

建物No.	構造	1980~	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
NU-04	RC4	アナログ地震計	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法	固有周期・減衰の推定 常時微動の分析手法
NU-14,15	RC6, RC3														
NU-16	SRC10														
NU-20	RC3~6														
NU17	RC1														
BL-01	免震RC4														
NU-22	SI0, RC7, etc.														
NU-27	PC7														
その他の地震・微動等の観測															
背景・状況意義															
計測手法															
固有振動数															
減衰定数															
主な問題と知見															
SS1															
立体振動等															

3. 評価すべき実建造物の応答特性と高密度強震観測の重要性

3.1 慣性の相互作用による固有振動数低下と減衰増大の特性

慣性の相互作用について、地盤ばね（インピーダンス）を地震や常時微動の観測から同定することは容易ではないが、相互作用の影響による地盤-建物連成系の固有振動数や減衰の変化は観測記録から求めることができる。中低層建物による観測例からは、固有振動数の低下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³⁾⁶⁾。この効果をなるべく分離して評価するためには、多様な建物における多数の観測記録が必要である。一方で、先に述べたように、建設中に階数の増加に従って観測を繰り返せば、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が得られる⁷⁾。図2に上部構造形式の異なる3棟（NU-16,22,27）について建設中の常時微動特性の変化を示す。相互作用系では基礎固定系に比べて固有振動数が低く、減衰も大きめの傾向があり、その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PCaPC（プレキャスト・プレストレストコンクリート）造やSRC造建物で相互作用の影響が大きいことなどがわかる。逆に、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⁸⁾⁹⁾。

これらの観測では、相互作用系の固有振動数、減衰、モード形の評価のためにスウェイ・ロッキングが重要である。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、さらに基部両端の上下動から求めたロッキング(θ)が必要となる。RF/GLの伝達関数から相互作用系の特性、RF/1Fからスウェイ固定系の特性、そしてRF/(1F+H θ)からはロッキングも固定した基礎固定系の性質が得られる（Hは建物の有効高さ）。表1では、連成系と基礎固定系について固有振動数と減衰定数を表示しているが、これらの基礎固定系の多くはスウェイ固定系を表示している。ロッキングも固定した伝達関数は不安定になる場合もあり、この場合は伝達関数の振幅のみを用いてカーブフィットを行うことも多い。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ことがあり¹⁰⁾¹¹⁾、この意味でもロッキングを計測する必要性は大きい。

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¹²⁾。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。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、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関係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とも言える。

3.2 入力の相互作用による有効入力動の特性

入力の相互作用の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、振動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の基礎の応答である有効入力動が観測される。安井ら¹³⁾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割の有効入力動の低減（入力損失）が得られている。

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Vsによる無次元化振動数 $a_0=2\pi fB/Vs$ の関数で表現され、高振動数ほど入力が増加する。図3の建設中建物（NU-16,22,27）における常時微動観測結果では、地盤条件と建物の平面規模がほぼ同様の場合は無次元化振動数もほぼ同様のため有効入力動の傾向が類似していること、階数により有効入力動の高振動数での減少傾向は変化しないこと、上部構造物の固有振動数付近で影響が見られ、上部の剛性が相対的に大きい建物で顕著であること、などが読み取れる。また、平面規模・地盤条件の異なる建物の比較では、平面規模の大きな建物ほど

無次元化振動数も大きくなり、有効入力動が低減する。地盤と基礎の最大応答の比較では、入力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、質量の大きい建物に隣接する小建物の入力が増加することもある¹²⁾。

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ため、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が低減された可能性について検討例¹⁴⁾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。

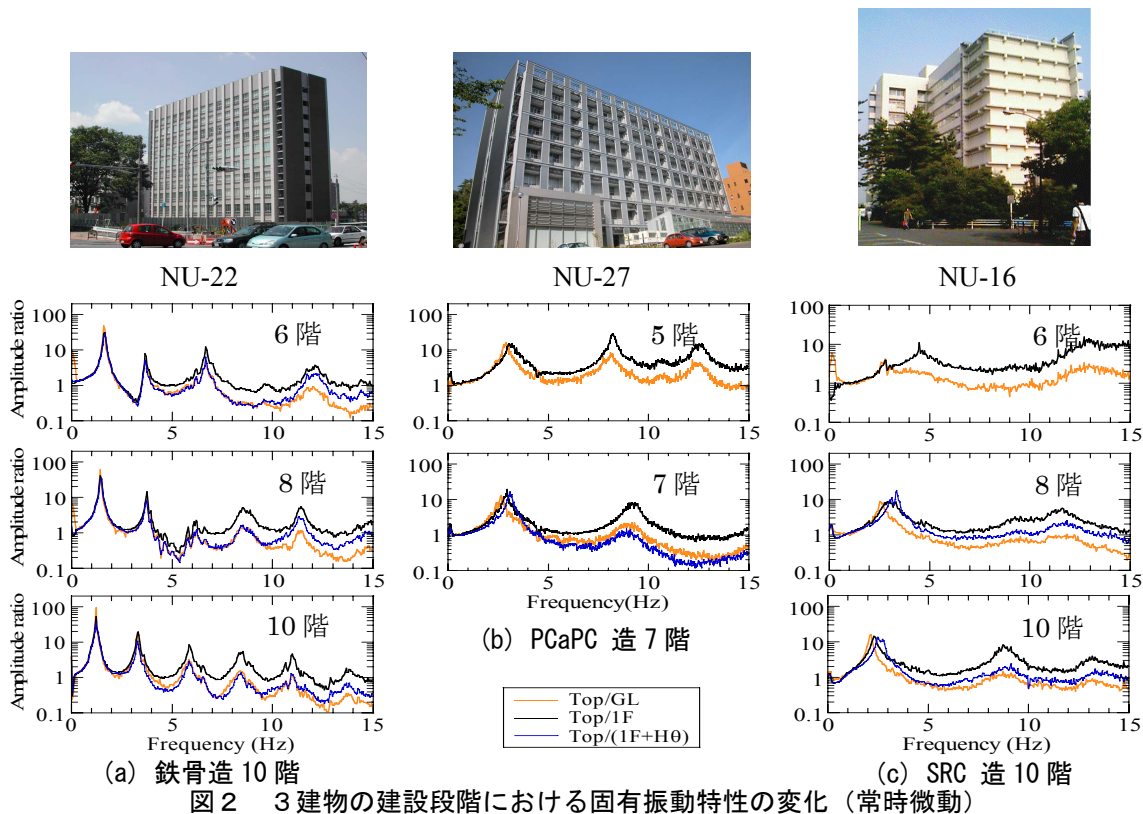


図2 3建物の建設段階における固有振動特性の変化（常時微動）

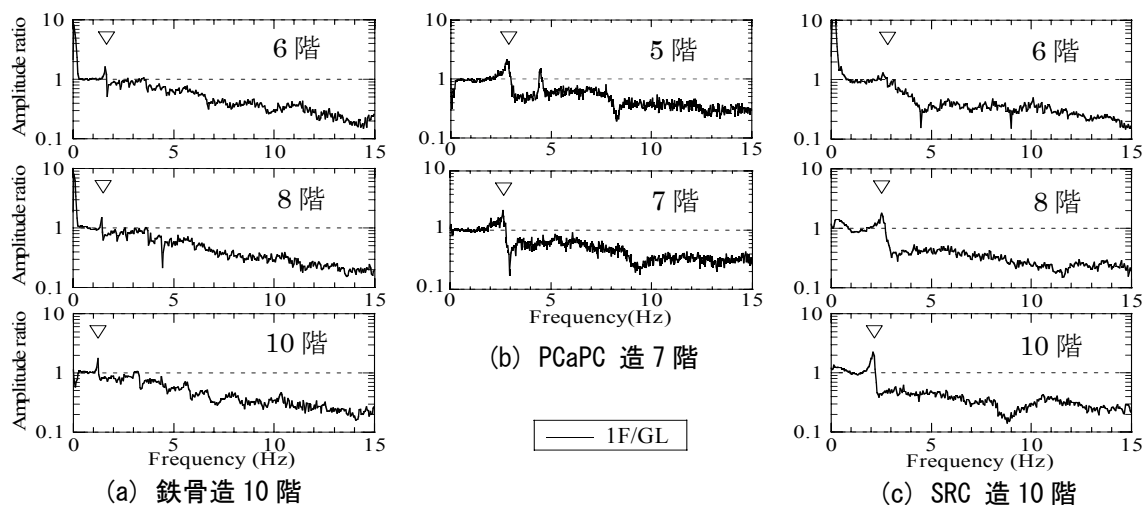
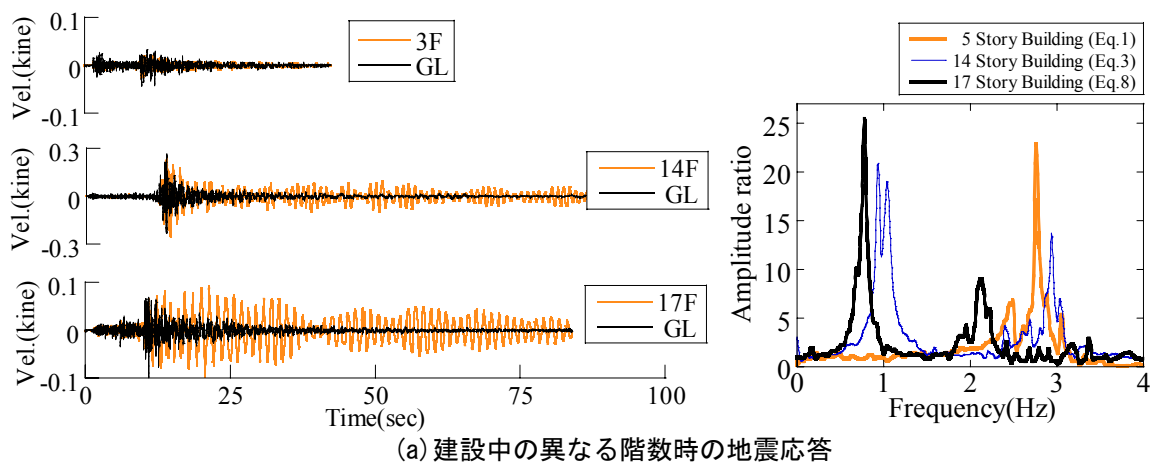


図3 3建物の建設段階における有効入力動の変化（常時微動、▽は連成系の固有振動数）

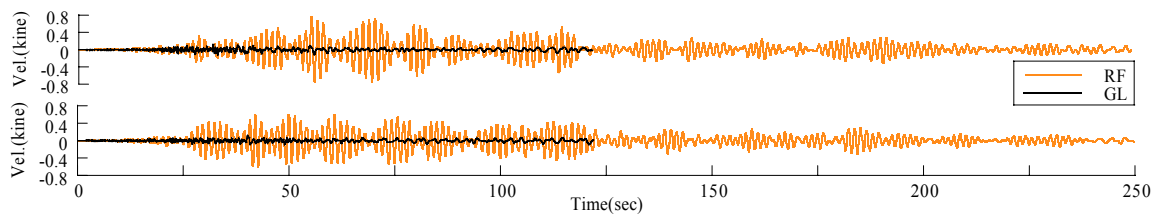
3.3 減衰定数

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¹⁵⁾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。固有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。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。

図 4 に 18 階建て S 造建物 (HR-13) の建設時の地震応答を示す。これらは 3.1～3.2 で述べた動的相互作用の観点から重要な情報を与えており、建物が高くなるほど固有振動数が低下し、低減衰となっているため、上部の応答は増幅し、かつ長時間にわたって継続している。低減衰系において複数の固有振動数が近接する場合 (フレーム構造で水平 2 方向の特性が類似の場合など) には、モード間カップリングによりうなりが生じることが多く、近接固有値の影響を考慮した分析手法を用いないと、減衰評価に大きな影響を及ぼす。また、遠方の地震などで低レベルながら長周期で継続時間が長い入力がある場合などは、地盤や 1 階の加速度成分でストップトリガをかけると、上部構造物が大きく共振する応答の後半部分が記録されないこともあるため、観測トリガや記録時間の設定が重要となる。



(a) 建設中の異なる階数時の地震応答



(b) 遠方の地震による継続時間の長い地震応答 (地表は後半が記録されていない)

図 4 18 階建て S 造建物 (HR-13) の建設時の強震観測

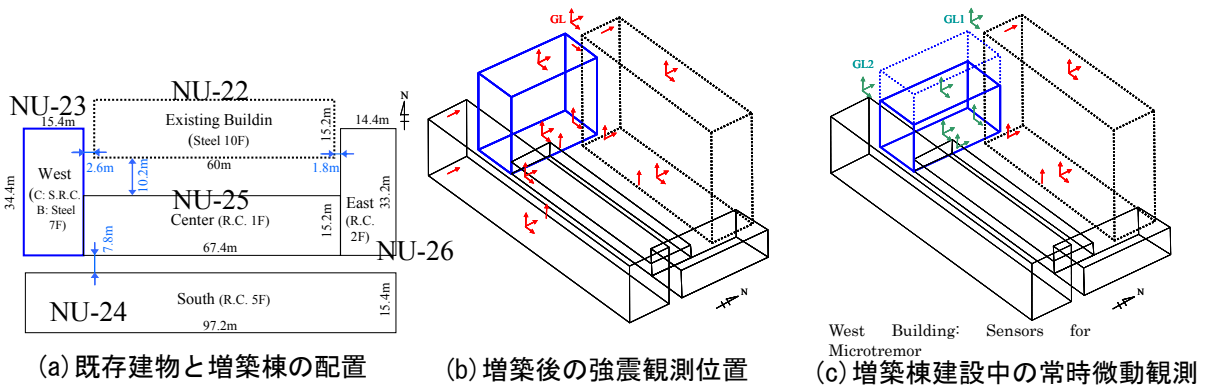
3.4 隣接建屋間相互作用

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¹⁶⁾。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¹²⁾、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。

図5は、S造10階建ての既存建物（NU-22）の振動特性が、周囲の増築棟（NU-23～26）の建設過程でどのように変化するかを常時微動観測等で検討したものである。(a)～(c)に示すように北側の既存棟の西・南・東に隣接棟が建設された。(d)は増築棟の建設前後での既存棟の伝達関数の変化であり、建設前27、建設後18の大地震記録（応答10gal以下）の平均から求めた。5Hz付近の3次モードより高振動数で差異が見られる。(e)～(g)は、このうちSRC造（梁S）7階の西棟とRC造の中棟の建設過程における常時微動と地震の連続観測結果である。固有振動数は東西方向の2次、減衰についてはNS方向の2次・3次などで、中棟の地下掘削が進む2003/4頃を境に性質が変化している傾向がある。

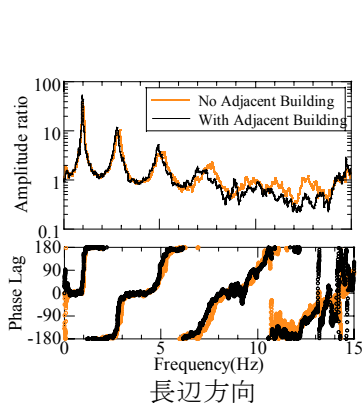
このような特性の解明のためには、周辺地盤も含めた面的な高密度観測が要求されるため、強震観測だけでなく常時微動や強制振動実験などの併用が实际的である。



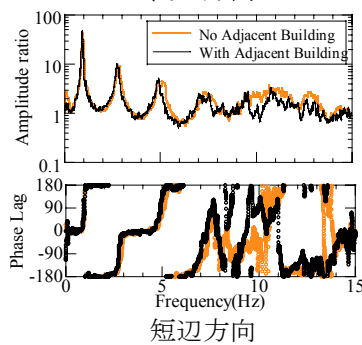
(a) 既存建物と増築棟の配置

(b) 増築後の強震観測位置

(c) 増築棟建設中の常時微動観測

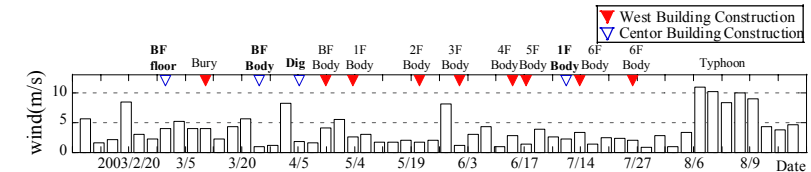


長辺方向

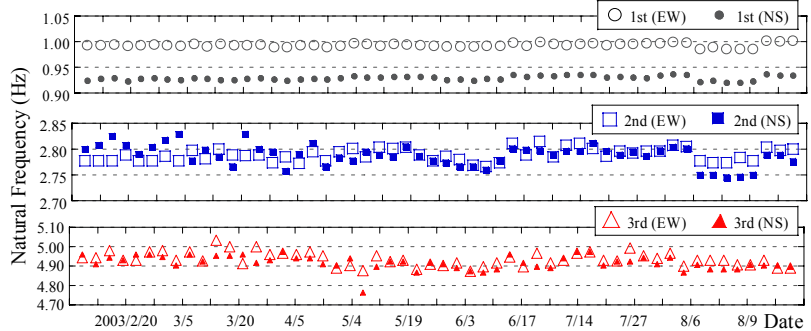


短辺方向

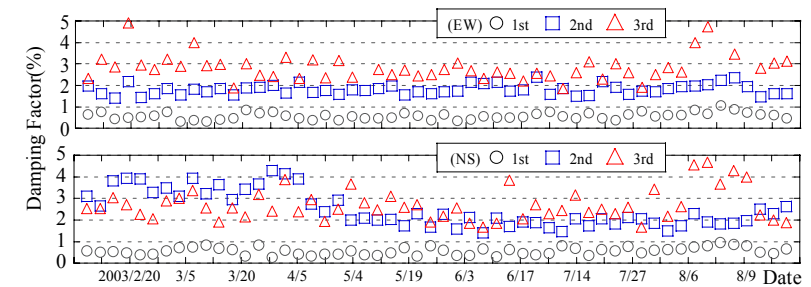
(d) 増築棟建設前後の既存建物特性の変化



(e) 増築棟の建設過程における常時微動観測時の風速



(f) 増築棟の建設による既存棟の固有振動数の変化



(g) 増築棟の建設による既存棟の減衰定数の変化

図5 周辺増築棟（NU-23～26）の建設によるS造10階建て既存棟（NU-22）の振動特性の変化

3.5 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。図6は10階建てSRC造建物(NU-16)の平面増築前後の常時微動観測による立体振動の応答モードを示す。増築前はL字型の平面形状で、複雑なねじれ挙動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、東西のウイングが開閉するような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る¹⁷⁾。1階床面における常時微動の上下動からは基礎版の面外変形も確認されている¹⁸⁾。

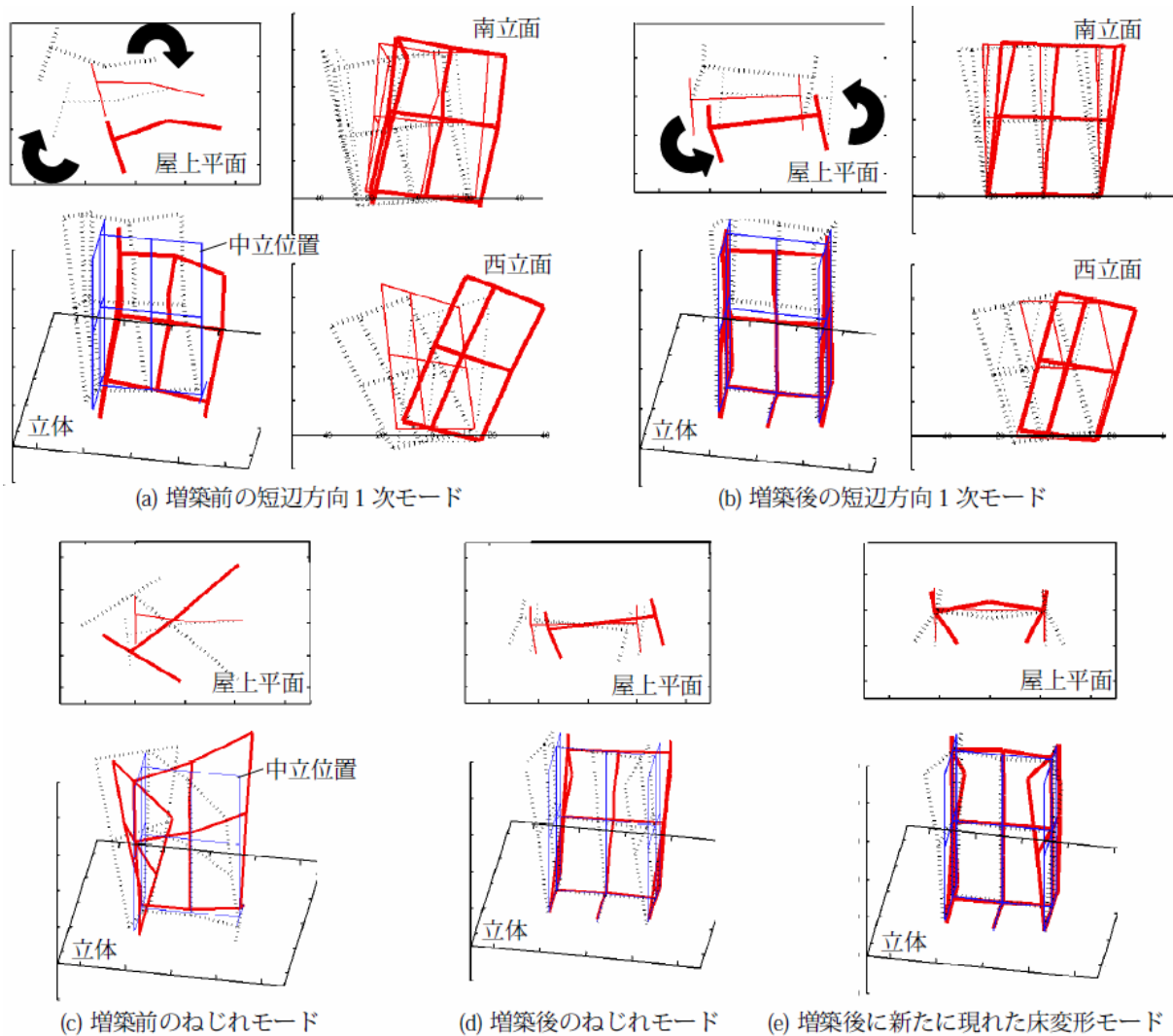


図6 不整形な平面を持つSRC造10階建て建物(NU-16)の増築前後の常時微動立体モードの変化

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。高密度常時微動計測により応答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。また、得られた応答モード特性を解析による固有モードと比較することで、床剛性などのモデル化の妥当性の検証を行う必要もある。

図面の上では整形な建物であっても、必ずしも立体振動性状が明快とは限らない。図7は長方形平面の整形な建物（NU-27）の常時微動立体振動の観測例であり、強震観測システムを常時モニタリングとしても利用している。(b)に示すようなモニタ画面により立体応答モードの動きを監視していると、整形な建物であってもねじれや床変形などのモードが時刻により明確に現れ、複雑であることがわかる。図のようなねじれが卓越するモードは常時微動時には頻繁に現れているが、これは風などによる入力の特長も影響しており、地震時との比較が重要である。常時モニタリングと立体表示は、このような特性の発見に使えと同時に、(c)のように環境モニタリングシステムの一部として動作しており、研究者・技術者のみならず一般に建物振動に関する啓発を行うことも試みている¹⁹⁾。

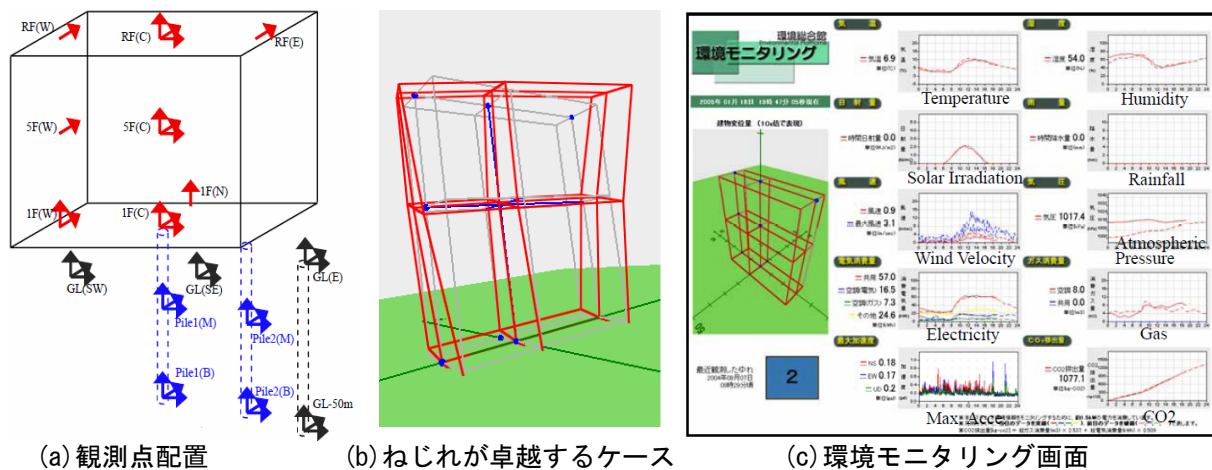


図7 整形なPCaPC造7階建て建物（NU-27）の立体振動常時モニタリング

3.6 二次部材の影響

常時微動や小地震の観測結果では、固有振動数が設計時の解析値よりかなり高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腰壁・垂壁・袖壁などの剛性が評価されていないことが考えられる。試みに10階建てSRC建物（NU-16）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²⁰⁾。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固有振動数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、固有振動数や応答に及ぼす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固有振動数・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²¹⁾⁻²³⁾（HS-01~04）。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。

3.7 振幅依存性・非線形性

振幅レベルの増大に伴い、建物の固有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固有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^{24),25)}、三陸はるか沖地震の八戸工業大学²⁶⁾はいずれも1Gあるいは数100galの応答で顕著な被害を受け、固有振動数で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、動的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振動特性は変化していく²⁴⁾。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。ある程度以上の振幅の地震に限れば比較的安価な強震計でも観測可能であり、その代わりに設置対象建物の著しい増加が望まれる。

4. 地盤・建物系振動観測およびデータ処理における問題点と対処

4.1 強震計の設置条件による影響

地盤の地震動を観測する目的で設置された地震計において、設置条件によっては希望する特性とは異なる影響を受けている場合がある²⁷⁾。すなわち、地盤に直接設置する場合でも何らかの地震計基礎は必要であり、基礎と地盤の相互作用により何らかの影響は避けられない。また、建物間相互作用からもわかるように、規模の大きい建物の近くの地表では、建物の影響を受けている可能性がある。たとえばK-NETでは統一的な基準を定めて地震計基礎を設置するなど配慮がなされている。一方、全国の各市町村に設置されている計測震度計などでは、場所の制約や管理の都合などから、規模の大きい庁舎建物の近傍、あるいは建物の1階に設置されている場合も多い。

図8に、様々な構造、規模の建物における地表最大加速度(PGA)と建物1階最大加速度(PBA、BはBaseの意)の関係を多数の地震記録について示す²⁸⁾。これは3.2節で扱った入力相互作用であり、平面規模の大きい建物ほど1階の応答が小さくなる入力損失の傾向が現れている。図9には図3と同様の1階と地表の伝達関数を複数の建物で求めている。これらから、上部建物の影響(慣性の相互作用)により、特定の周波数帯域では増幅する場合もありうる。また⑤のように、規模の大きい建物④に隣接する場合には、その固有振動数の影響を受けて増幅することもある。図9からはさらに、地震時の観測状況の特性を常時微動でおおむね評価できることも確認できる。

以上の状況を念頭に、実際に建物内・建物近傍に設置された震度計の観測値を地表記録と比較して、設置条件の検討を行った例を示す。図10(a)は検討を行った地震計の設置位置を示しており、震度計1は地上8階地下1階SRC造建物(GR-04)の地下1階ドライエリア、震度計2は地上6階地下1階RC造建物(GR-01)の地下1階に設置されている。比較対象の地表地震計は、地上11階地下2階SRC造

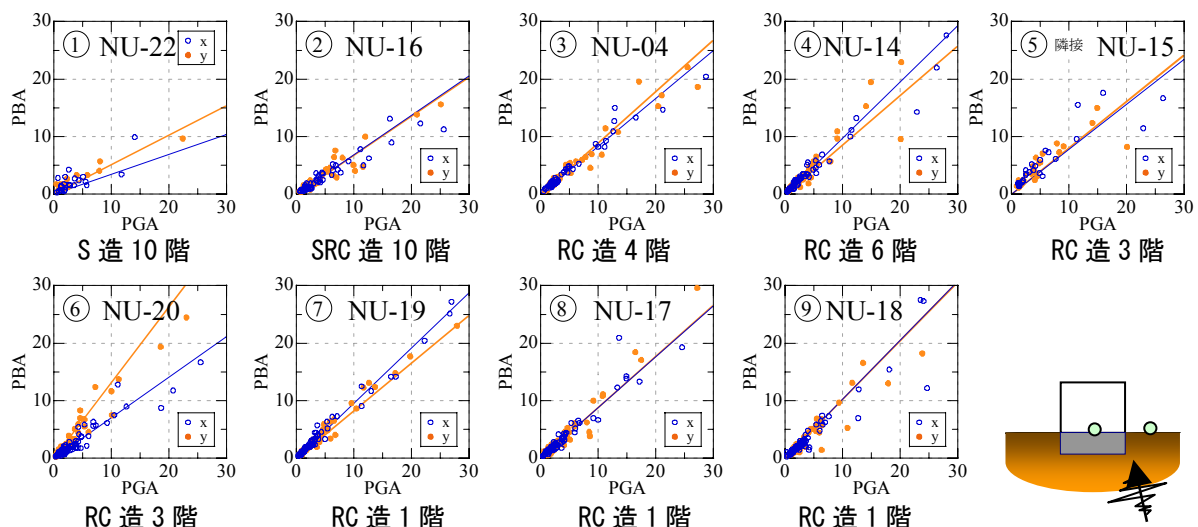


図8 地表(PGA)と1階(PBA)の最大加速度の関係

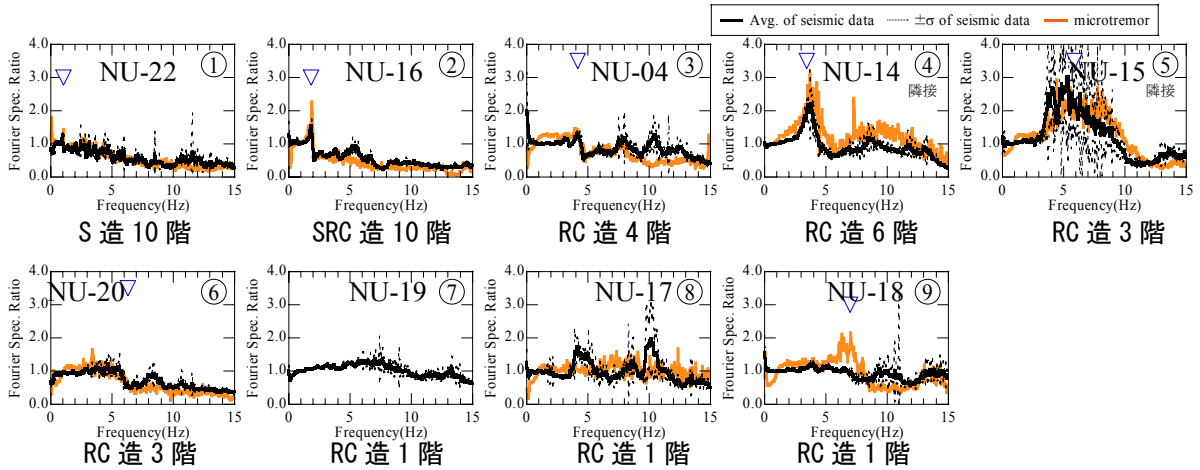


図9 地震と常時微動による入力評価の相違 (1F/GL、▽は連成系の固有振動数、黒：地震、橙：微動)

建物 (GR-05) から約 20m の位置にある。これらの建物は 500m 程度の範囲内にあり、地盤条件はほぼ共通である。(b)は地表の計測震度に対する震度計 1・2 の計測震度を複数の地震で比較した結果である。回帰直線の傾きはほぼ 1 で、y 切片 (地表に対する建物内震度の低下分) は震度計 1 で-0.06、震度計 2 で-0.15 程度、最も差が大きい地震で-0.5 程度となっている。文献¹³⁾によれば地表に対して建物内で最大加速度が 0.7 倍、最大速度が 0.9 倍程度とされており、計測震度がおおむね加速度と速度の積の対数になるとして建物内の計測震度の低下を概算すると $\log_{10}(0.7 \cdot 0.9) \approx -0.2$ 程度となって、実測結果とほぼ対応する。また地震規模や震度による相違はこの図からは明確でない。

図 11 に建物内と地盤の最大加速度の比と最大速度の比を、入力の周波数特性を表す等価卓越振動数 (最大加速度比では $PGA/PGV/2\pi$ 、最大速度比では $PGV/PGD/2\pi$ 、ただし PGA 、 PGV 、 PGD はそれぞれ地表最大加速度、速度、変位) との関係で示す。これにより、入力の短周期成分が卓越する場合ほど建物内の低下が大きいこと、加速度比の EW に見られるように、建物により東西方向の特性が異なることなどがわかる。これは観測点と建物との位置関係が影響していると考えられる。図 12 では震度計 2 について、常時微動による建物内/地表のスペクトル比を地震時と比較している。EW 方向で傾向が異なること、上部構造の影響が地震時のほうが大きいことなどが異なるが、図 9 とあわせて、ある程度は地震時特性を常時微動から推定できることがわかる。

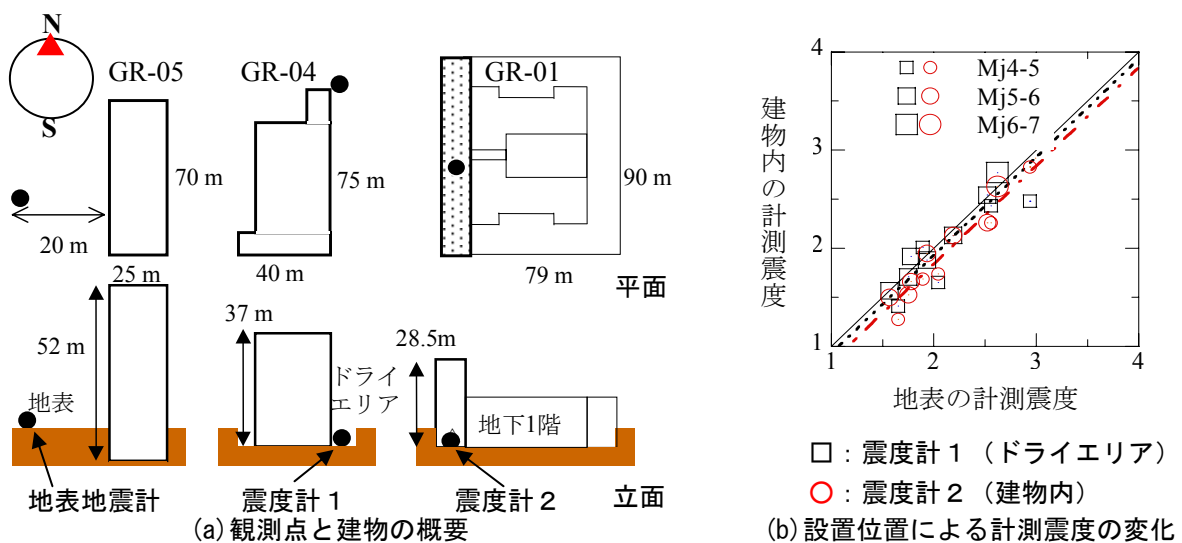


図 10 観測位置・条件による計測震度への影響

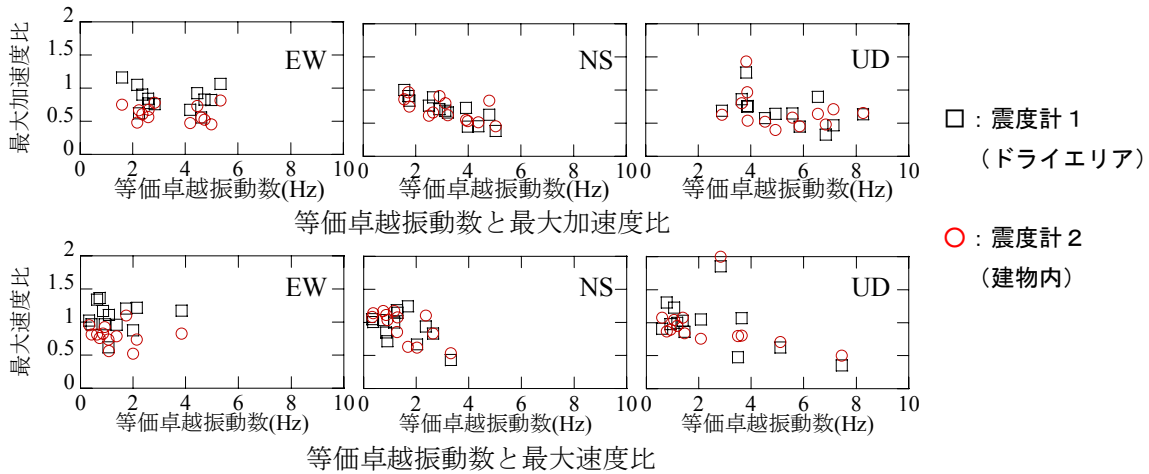


図 1 1 建物内と地盤の最大加速度・最大速度比と地震動の等価卓越振動数との関係

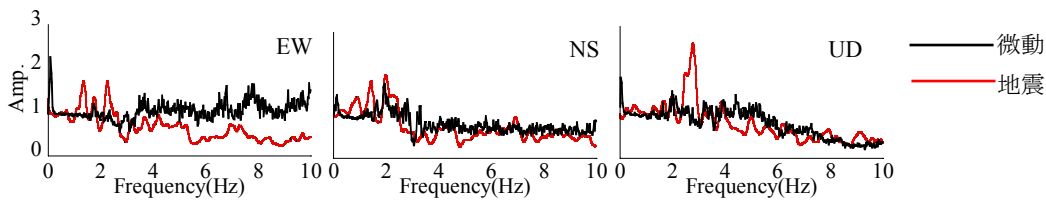


図 1 2 地震時と微動における地表と建物内のスペクトル比 (震度計 2)

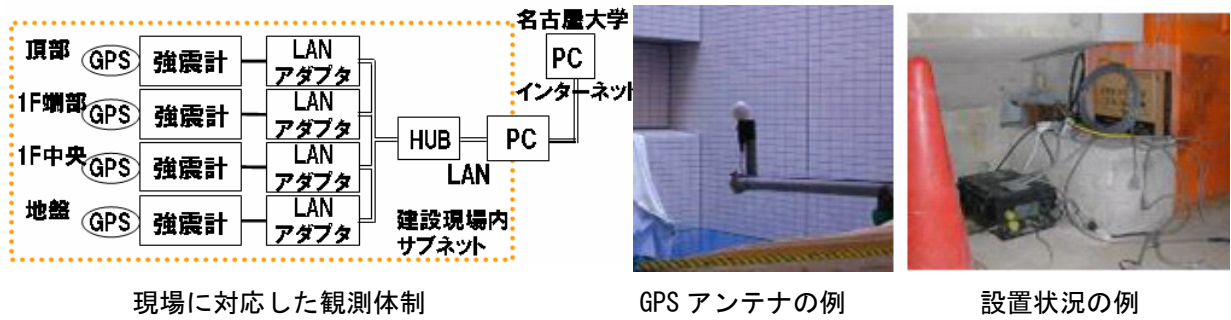
4.2 建設中の建物における観測技術

2章で述べた戦略的観測を支える技術として、建設中の建物における強震観測は重要である。常時微動や起振機実験など臨時的振動実験であれば、その際だけ多数の機材を投入することができるが、継続的な強震観測では本設の場合に比べて制限が多い。具体的には、常時通電された AC 電源の確保が困難なこと、工事現場での作業等によるノイズや誤トリガ、さらには直接的な衝撃による損傷などの障害があること、作業状況に応じて設置場所が限定され、また施工の進行に伴って上層階へ移動させる必要があること、多点のセンサーの同期や時刻精度の確保のための GPS アンテナの配線が困難なこと、そしてリモートのデータ回収やメンテナンスの通信配線が困難なことなどである。

図 13 に建設現場での観測システムを示す。写真は HR-13 建設時の設置状況である。リモートでデータ回収とメンテナンスを行うために LAN ケーブルを配線してサブネット化を行っている。強震計は、最近では IP 接続機能を最初から備えた製品もあるが、従来型であってもシリアルポートをイーサネットに変換するアダプタを用いて LAN 接続可能である。サブネット上では外部との通信を行う PC と接続し、ADSL 等によりインターネットを介して遠隔操作・管理を行う。時刻同期は図 13 のように各強震計に GPS を接続するか、あるいは時刻同期ケーブルで強震計間を接続しても良い。同様にトリガ同期信号用のケーブルも各強震計の間に配線する。すなわち電源、LAN、同期ケーブルを各観測点に準備すればよく、現場配線作業は可能な場合が多い。実際には施工担当の電気工事会社と連携して工事の進捗に伴う盛り換えなどにも対応している。電源は自動車用バッテリーを使用し、DC 入力がない地震計の場合は DC-AC コンバータを用いる。現場での衝撃等に関しては、強震計本体も強靱で防滴性能を備えたものが多いが、金属あるいはプラスチックの簡易なカバーを設置することが一般的である。

トリガ設定については、一般の強震観測に比べて、工事による誤トリガでメモリを圧迫しないための配慮が必要である。具体的には、ノイズの影響を受けにくい建物下部で敏感な共通スタートトリガを設定しておき、上部観測点はスタートトリガレベルをある程度高くして、大きな応答時に万一共通トリガがかからない場合には個別に起動するようにする。特に 3.4 で扱ったような長周期低減衰建物で

はストップトリガと最低記録時間長の設定も重要になる。なお、現在ではメモリ容量に十分余裕があるため、工事による誤トリガも情報として活用するつもりで、敏感なトリガ設定とすることが多い。



現場に対応した観測体制
GPS アンテナの例
設置状況の例
図 1 3 建設現場における振動計測の配線と設置状況

4.3 センサーの新展開や他の情報とのリンク

戦略的な高密度強震観測を推進すると同時に、多様な特性を持つ多数の一般的な観測対象、たとえば中低層建物や住宅などについて、観測体制を整備することが必須である。そのためには必要十分な精度で低コストの強震計が必要となる。すでに、半導体加速度センサーに記録装置、震度演算機能、ネットワーク接続機能、連動機能、時刻校正機能などを組み合わせてコンパクトな筐体に収めた廉価強震計を開発している。従来より一桁安価で、必要な振動レベルと周波数範囲で十分な精度を持っており、これにより高密度の観測体制を安価に構築できれば、新たな知見にもつながる。

さらに、ネットワーク接続された地震計による常時振動モニタリング、ネットワークカメラや気象情報など各種センサーとの統合、さらに緊急地震速報などとの連携も考えられる。環境モニタリングや防災・防犯などの新たな機能を統合することにより、強震観測の質と量の向上につながる。図 14 および先に示した図 7 (c)は構築したシステムの実例である¹⁹⁾。



振動・映像モニタリング
ネットワークカメラによる多地点監視画面
緊急地震速報画面
警報用信号灯
ネットワークカメラ式
図 1 4 強震観測を含む統合モニタリングシステムの実例

4.4 観測記録の蓄積・整理と公開

多数の建物での高密度強震観測体制が充実すると、それに伴ってデータ量が飛躍的に増大し、情報の整理、維持管理に多大な労力を要するようになる。機関で保有する観測成果を、地盤、建物、地震に関する情報とともに整理する必要があり、このための一形式としてウェブインターフェイスによるデータベースを開発している。

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、個別性が高いことから、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。地盤強震観測では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²⁹⁾。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。大学の建物を対象としているため民間に比べて制約は少なく、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、個別の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難しくなっており、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。具体的なウェブ画面例を図15に示す。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。



図 15 建物強震観測データの整理・公開のためのウェブシステム

5. 結論

本論では、地盤・建物系の高密度強震観測により明らかにすべき構造物の動的特性を整理し、そのために必要な観測体制の構築や観測・分析の要点を検討することで、地盤建物系の特性把握のための観測の要点をまとめて提示した。その際に名古屋大学で行った150以上の建物の振動実測・強震観測結果から具体例を示し、一連の観測内容・観測手法の発展・展開の過程で地盤・建物系の振動実測の方法論の構築につながっていることを述べている。結果として、少数の建物に関する系統的な観測から最大限の特性を分離して検討する一連の観測プログラムを構築し、本論文ではこれを「戦略的強震観測」と呼んでいる。

本論で示した観測の要点と知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 構造物と地盤の動的相互作用について、慣性の相互作用については連成系と基礎固定系の固有振動数と減衰定数から、入力相互作用を有効入力動の特性から考察した(3.1、3.2節)。この際に、建設中の建物の連続観測により地盤と基礎の条件をほぼそろえて上部構造のみ異なる比較を行い、さらに同一敷地で地盤条件が類似で上部構造が異なる例、上部構造が共通で地盤・基礎が異なる例などの一連の比較により、動的相互作用の特性を評価できることを示している。また、重要なパラメータとしてスウェイ・ロッキングの観測の必要性と、それらを考慮した伝達関数の有用性を示した。
- 2) 構造物の減衰定数について、特に減衰の小さい中層～高層のS造建物の地震応答特性を通して考察した。また長時間継続する応答の特性を確実に観測し、水平2方向で近接する固有振動数を適切に評価する分析法を導入する重要性を示した(3.3節)。
- 3) 隣接する建物の相互作用特性について、既存棟の周辺に隣接棟が建設される際の連続観測により影響を考察した(3.4節)。都市域に密集する建物群では隣接棟の影響は避けられず、特に規模(質量)の大きい構造物に隣接する小規模構造物の入力特性などに影響が大きいことを指摘し、それを検出するための双方の建物の観測体制の必要性を述べた。
- 4) 上部構造の複雑な立体振動特性を把握するための観測体制と応答モードの特性について明らかにした(3.5節)。特に中低層建物は個別に異なる不整形性を持つため応答モード特性が複雑なこと、床の面内・面外変形の影響がモードと固有振動数によっては無視できないこと、整形な建物でも入力の影響などでねじれが卓越することを示し、多点観測体制の有効性を述べている。さらに二次部材の影響や非線形性により振幅依存性がある場合の注意点をまとめている(3.6、3.7節)。
- 5) 強震計・震度計の設置条件の影響として、規模の大きい建物の内部あるいは近傍に設置された計測震度計を近傍の地表観測点と比較検討した(4.1節)。結果として震度にして0.1～0.2程度の系統的な相違が生じること、これは一般的な有効入力動の低減から予測される範囲であることを示し、震度計の設置条件の影響について考察した。
- 6) 本論文の重要な観測方法である建設中の連続強震観測について、機材の設置や観測時の各種設定についてまとめて検討した(4.2節)。また、リアルタイムモニタリングを効果的に運用するために、振動のみならず映像や緊急地震情報との統合を提案している(4.3節)。さらに得られたデータの有効活用のために、ウェブインターフェイスによる地盤・建物観測データベースの設計と利用を提示した(4.4節)。以上のような機材と運用の展開により、長期にわたり継続的な振動計測が実現でき、さらに各種教育や防災啓発にも利用しうることを論じた。将来的には、建物強震観測の質量両面の向上に加えて、観測データの公開と共有を通じて、現象の解明と設計資料の蓄積を行うことが、耐震設計の高度化に必須となる。

謝辞

本論文で述べた多数の振動観測、分析、システム構築等について、名古屋大学技術職員平埴義正氏、名古屋大学大学院生・学生の諸氏、建物所有者・設計者・建設現場担当者などの諸氏、応用地震計測(株)ほか多数の方々のご協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006.
- 2) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996.
- 3) 中川大, 福和伸夫：構造・基礎・地盤条件が RC 系構造物の振動性状に及ぼす影響に関する研究—名古屋大学東山地区の常時微動記録に基づいて—, 日本建築学会学術講演梗概集, 1995, pp.343-344
- 4) 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, 1997, pp.441-450.
- 5) Tobita, J., Fukuwa, N., and Yagi, S : Experimental Evaluation of Dynamic Characteristics of Low and Medium-rise Buildings with Soil-Structure Interaction, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000, Paper No.1343(CD-ROM).
- 6) Fukuwa, N. and Tobita, J : SSI Effect on Dynamic Characteristics of Low & Medium-rise Buildings based on Simplified Analysis and Observation, The 2nd UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, 2001, CD-ROM.
- 7) 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, 2002, pp.453-460.
- 8) 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.
- 9) 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, 1998, pp.1671-1676.
- 10) 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一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, 2002, pp.77-84.
- 11) 福和伸夫, 山崎靖典, 小島宏章, 飛田潤：観測記録に基づく微動時・強風時・地震時の建築物の応答性状の違いの分析, 日本建築学会構造系論文集, 第 598 号, 2005, pp.61-68.
- 12) 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, 2001, pp.87-94.
- 13) 安井譲, 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, 1998, pp.111-118.
- 14) 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, 1996, pp.53-62.
- 15) 日本建築学会：建築物の減衰, 2000.
- 16) 文学章, 福和伸夫：隣接建物の存在が直接基礎の動的相互作用特性に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 600 号, 2006, pp.97-105.
- 17) 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, 2002, pp.437-444.
- 18) 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, 1998, pp.1677-1682.
- 19) 飛田潤, 福和伸夫, 中野優：地域防災協働態勢を支援するシステムと防災拠点の構築, 日本建築学会技術報告集, 第 20 号, 2004, pp.367-370.
- 20) 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.
- 21) 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, 2002, pp.875-878.
- 22) 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, 1996, pp.325-347.

- 23) 福和伸夫, 西阪理永, 高橋広人, 中村仁, 飛田潤, 河合良道: 振動実験に基づくスチールハウスの固有振動特性に関する研究, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 1998, pp.1599-1604.
- 24) Tobita, J.: Evaluation of Nonstationary Damping Characteristics of Structures under Earthquake Excitations, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.59, Nos.2,3, 1996, pp.283-298.
- 25) 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, 1981, pp.119-129.
- 26) 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, 1999, pp.73-80.
- 27) 中野優, 田中久美子, 福和伸夫, 飛田潤, 鎌田丈史: 濃尾平野における最大加速度分布と地震計の設置条件の影響, 第11回日本地震工学シンポジウム, 2002, pp.251-256.
- 28) 小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤: 強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第587号, 2005, pp.77-84.
- 29) 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, 第17号, 2003, pp.553-558.

(受理: 2006年3月28日)

(掲載決定: 2007年2月13日)

Development of Soil-Structure Earthquake Response Observation for Evaluation of Dynamic Characteristics of Buildings

TOBITA Jun¹⁾, FUKUWA Nobuo²⁾, KOJIMA Hiroaki³⁾
and HAMADA Eita⁴⁾

1) Member, Associate Professor, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

2) Member, Professor, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng

3) Member, Research Associate, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng

4) Former Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, M. Eng.

ABSTRACT

Earthquake response observation and vibration tests were examined for evaluating dynamic characteristics of soil-structure system of existing buildings. Approximately 150 buildings have been tested and observed in the past 15 years. Based on the results, new strategic response observation program is proposed, which reveals appropriate combination of limited observation in systematic way. Detailed discussion is made for some important points concerning planning of observation, new equipments and operation, data analysis and database, and future aspects of earthquake response observation.

Key Words: Soil-Structure System, Earthquake Response Observation, Ambient Vibration, Low- and Mid-rise buildings, Soil-Structure Interaction, Spacial Response, Successive Observation during Construction, Web Database