

建物—地盤の動的相互作用から見た強震観測

Seismic Observation of Soil Structure Interaction System

福 和 伸 夫 飛 田 潤
Nobuo FUKUWA and Jun TOBITA

This paper shows the desirable seismic observation system in order to grasp the effect of soil-structure interaction. First, the present status of seismic observation of buildings in Japan is reviewed and the shortage of seismic observation of medium or low rise RC buildings is pointed out. In the dynamic characteristics of these buildings, the soil structure interaction plays a dominant role. Next, after explaining the typical soil structure interaction phenomena through the several examples observed by the authors, important aspects in the design of seismic observation system are noted from the SSI point of view. Finally, the newly developed seismic observation systems which can be easily realized using Internet are demonstrated.

Keywords: soil structure interaction, seismic observation, kinematic interaction, inertia interaction
建物と地盤との動的相互作用, 強震観測, 入力との相互作用, 慣性の相互作用

1. はじめに

建物と地盤との動的相互作用は、中低層建物の地震時挙動における支配的要因である。このため、これらの建物の合理的な耐震設計の基礎資料として、動的相互作用現象を明らかにするための強震観測データの充実が望まれる。本論では、動的相互作用に着目した強震観測について議論することを目的に、第2節で動的相互作用の観点から見た強震観測の現状を概観し、第3節で動的相互作用に関わる一般的性状を筆者等の実測記録^{1)~3)}を参照しながら解説し、第4節で強震観測に当たっての着眼点を整理しつつ今後の観測対象・体制・方法の在り方について論じる。

2. 動的相互作用からみた強震観測の現状

従来、主たる強震観測の対象建物は、原子力関連施設を中心とする重要電力施設と、超高層建物や免震建物などの動的設計を前提とする長周期構造物に限られ、多数存在する一般中低層建物の観測事例は極めて少ない。図1は「建築物の減衰」⁴⁾でデータベース化された地震応答観測事例を整理したものであるが、全18件のうち、軒高が50mを超えるものが15件となっている。

(1) 電力施設

電力施設の強震観測は主として電力会社によって行われており、その性質上、公開度は必ずしも高くなく、原子炉建屋やタービン建屋など、特殊な構造特性を有する構造物の観測事例が多い。原子炉建屋の場合、建物規模が大きく剛性が高いため、軟質岩盤サイトに立地する場合には動的相互作用効果が大きい。このため、初期の段階から動的相互作用に着目した実建屋の強震観測が行われ^{5)~6)}、1980年代からはブロック基礎・縮小建屋模型試験体を用いた強震観測や振動試験が精力的に行われてきた。(財)原子力発電技術機構が継続的に実施してきた原子炉建屋と地盤の動

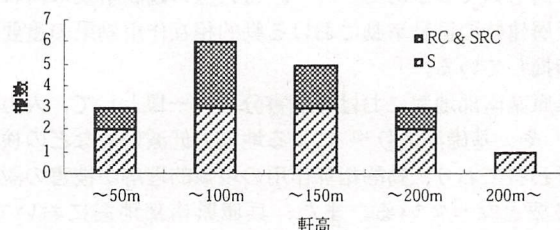


図1 「建築物の減衰」でDB化された強震観測事例⁴⁾

的相互作用に関する試験、原子炉建屋の埋込み震動効果試験、基礎浮上に関する試験、原子炉建屋の隣接効果試験などは代表的な例である⁷⁾。最近では、原子炉建屋の限界性能を確認するために、自然地震を待つのではなく、石炭採掘現場での発破を制御することにより人工的に強震動を生成し、構造物の終局状態に至る地震観測を行おうという提案もされている⁸⁾。

これに対して、火力発電所施設などは、軟弱な地盤に立地する場合が多く、膨大な数の杭に支持された長大構造物としての特徴を有する。このため、杭の地震時挙動や位相差を有する入力に着目した観測事例が多い^{9)~10)}。

(2) 超高層建物と免震建物

超高層建物の場合、開発初期の段階で精力的に強震観測が行われたため、良好な地盤に直接基礎で支持された構造的にバランスの良い整形な建物の観測事例が多い¹¹⁾。一般の建物に比べて構造特性が明快であり、固有周期が長周期で動的相互作用効果が小さいため、地下階・1階と屋上階に各1台の地震計を設置した事例が多く、動的相互作用効果やロッキング・ねじれ動を含む立体振動特性の考察が可能な観測事例は少ない。

同様に、免震建物の場合にも、地盤条件が良好な初期の建物の観測事例が多く、動的相互作用効果を回避した長周期構造物であるため、相互作用がないことを前提にした観

測が一般的である¹²⁾。これらの観測は一般に建築主の予算で設計・建設に携わった民間会社により行われている場合が多く、公的な建物を除くと観測記録の公開度は高くはない。

(3) 中低層建物

中低層建物の場合には、基準法に則った静的な耐震設計が行われること、建物規模が小さく研究者の興味の対象になりにくかったこと、技術開発指向の強い大手民間会社にとっては魅力的な観測対象ではなかったこと、などの理由で観測事例が少ない。本会の「構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム」で取り上げられた事例としては、杭基礎のRC住宅

¹³⁾ や病院¹⁴⁾ の事例などがあり、兵庫県南部地震における観測結果¹⁵⁾ の分析も行われている。また、大学建物の強震観測事例もいくつかある^{2, 16~17)}。これらの観測結果は何れも中低層建物の振動挙動における動的相互作用効果の重要性を指摘している。

兵庫県南部地震における被害分析の一環として、入力損失¹⁸⁾ や、基礎浮上り¹⁹⁾ による地震力低減効果などの検討も行われており、動的相互作用の現象的理解が被害の説明に必要となっている。また、兵庫県南部地震において、1000Gal以上の地動を受けたにも拘わらず新耐震設計法による中低層RC建物の被害数が希少であったことは、建物の耐震性能評価における技術力の限界を示すものでもある。

動的相互作用の地震力低減効果の実証的な把握は、動的相互作用効果が導入された限界耐力計算法の実証的裏付けや、地震力設定の妥当性の検証のためにも必要度が高い。

我が国における建築物の強震観測については、本会作成の「建築構造物の振動実験」²⁰⁾、「建築物の耐震設計資料」¹¹⁾に良くまとめられており、その後の動向は「建築物の減衰」⁴⁾に、動的相互作用に着目した現状については「入門・建物と地盤との動的相互作用」²¹⁾に良く整理されている。1998年に行われたUJNRの日米動的相互作用ワークショップでは、強震観測を含む振動実験・観測の日米の現状が相互に報告されており、動的相互作用に留意した強震観測の在り方²²⁾や、膨大な観測記録の分析²³⁾など、米国研究者の中低層建物に対する勢力的な取り組みが見て取れる。

3. 実測記録を通した動的相互作用効果の一般的性質

3.1 動的相互作用が重要となる問題

図2に示すように、動的相互作用とは、物性値の異なる2つの連続体、すなわち無限媒体の地盤と有限媒体の構造物が相互に力を授受する現象であり、構造物の振動応答によって生じた慣性力が地盤に作用する際に生じる「慣性の相互作用」と、地盤の震動が構造物に入力する際に生じる「入力の相互作用」の2つの効果から構成される。前者は構造物を支持する動的相互作用ばね「地盤インピーダンス」、後者は相互作用ばねを介して入力する「基礎入力動」とい

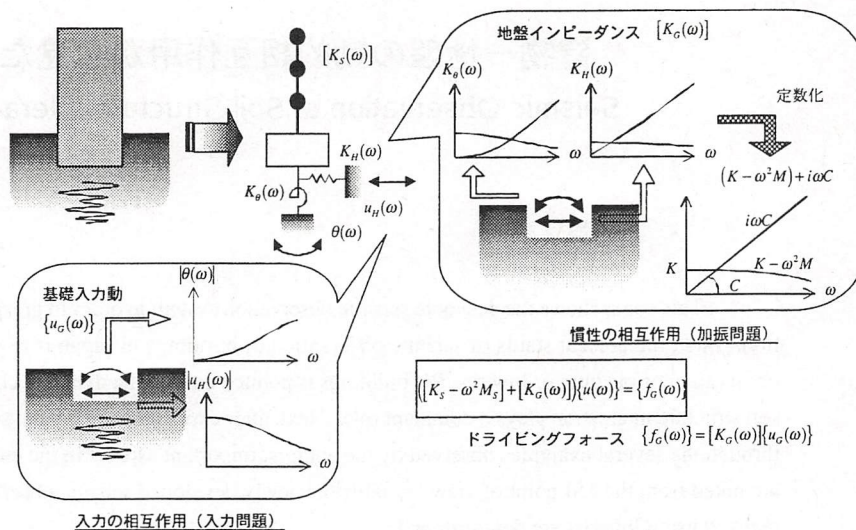


図2 動的相互作用と動的サブストラクチャー法

う基本物理量によって代表される。「地盤インピーダンス」と「基礎入力動」の積は「ドライビングフォース」と呼ばれ、地震時に地盤が構造物に与える強制外力となる。構造物応答に伴う慣性力は構造物・地盤間でやりとりされる相互作用力として地盤に付加的に作用する。

一般に、構造物にとって動的相互作用の影響が顕著になるのは、下式で与えられる無次元振動数、

$$a_0 = \omega_0 B / V_s \quad (1)$$

が大きな場合であると言われている。無次元振動数 a_0 は、建築物の固有円振動数 ω_0 、基礎の平面サイズ B （基礎半幅を採用する人が多い）、地盤のS波速度 V_s から求められ、建物の平面サイズとS波の波長との比を示している。動的相互作用の影響が顕著になるのは建築物の固有周期における波長に比べて基礎サイズが大きい場合であり、建築物の固有周期が短周期（剛性が大きく低層の建築物）で、建築面積が大きく、地盤が軟弱な場合に相当する。軟弱地盤に立地する中低層RC壁式構造などが典型例であり、学校校舎や低層住宅の張間方向の振動を思い浮かべると良い。

その他に、動的相互作用の影響が重要となるのは、軟弱地盤中の杭の地震時挙動を分析したり、杭支持構造物の入力動を評価する場合、地震時土圧の基礎各部の分担性状を考える場合などである。

3.2 動的相互作用の一般的効果

(1) 慣性の相互作用効果

慣性の相互作用は「地盤インピーダンス」と呼ばれる基本物理量で代表される。地盤インピーダンスは、単位の調和加振変位に対する地盤反力であり、加振振動数に依存した複素関数となる。一般に地震観測からインピーダンス関数を測定することは困難であり、ブロック基礎の起振機実験などによって求められる場合が多い。インピーダンス関数は、図2に示したように、定数化することによってバネ効果・逸散減衰効果・付加質量効果に分解することができ、バネ効果は構造物周期の長周期化に、逸散減衰効果は応答量の低減に寄与する。

構造物剛性に比して地盤剛性が小さい場合には、スウェ

イやロッキングの動きが卓越して構造物の弾性変形割合が低下するため、構造物の地震力分布が基礎固定時と異なってくる。また、一般に、スウェイやロッキングが卓越する振動数ではモード減衰が増大し、弾性変形が卓越する振動数ではモード減衰が減少する。

図3は、1質点系のSRモデルを用いて連成系の固有周期の伸びとモード減衰の関係を示したもので、建物のアスペクト比をパラメータとしている。横軸は基礎固定時の固有周期と連成系の固有周期の比である。図のように、動的相互作用効果によって周期が増大すると共に、モード減衰が増加する。ただし、スウェイに比べて自己釣合系のロッキングは逸散減衰が小さいために、ロッキング動が卓越するアスペクト比が大きい建物では、周期の伸びが大きく減衰が小さくなる。

表1 建物諸元

建物名称	基礎形式	階数	高さ(m)	構造種別	建築面積(m ²)	NS(m)	EW(m)	平均Vs(m/s)
6F建物	杭基礎(12m)	6	22.3	SRC	603.9	15.4	38.0	245
3F建物	杭基礎(12m)	3	11.4	RC	374.4	15.4	24.0	289
4F建物	杭基礎(6m)	4	17.9	RC	1155.0	15.4	75.0	244
10F建物	杭基礎(45m)	10	39.3	SRC	1502.0	32.4	56.0	216

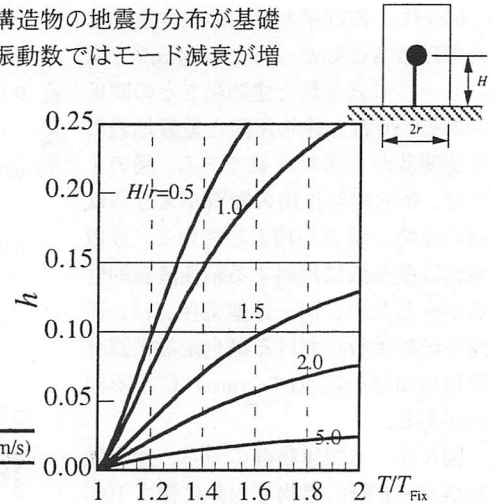


図3 動的相互作用が周期の伸びと減衰増大に与える影響

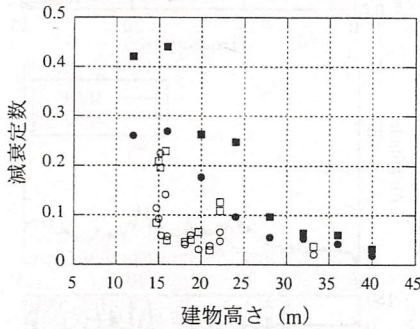


図4 微動に基づくRC建物の減衰定数の建物高さ依存性

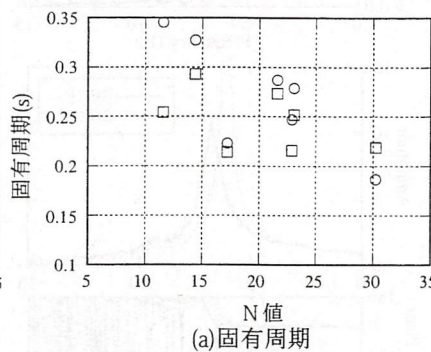


図5 微動に基づく5~6階建RC建物の固有周期と減衰定数のN値依存性

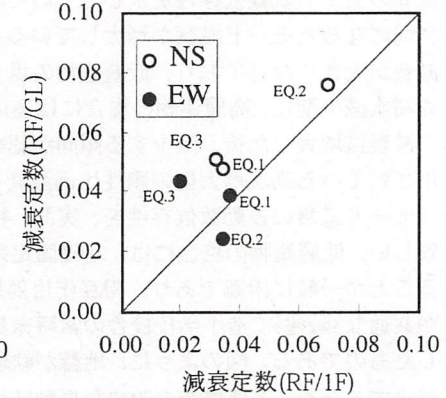
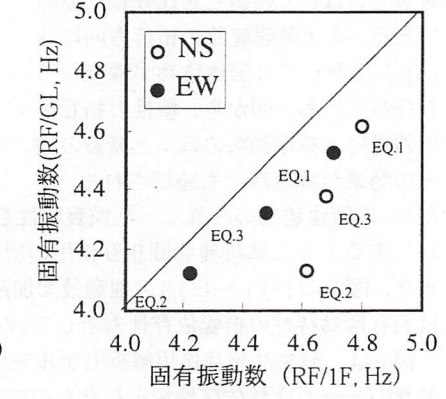
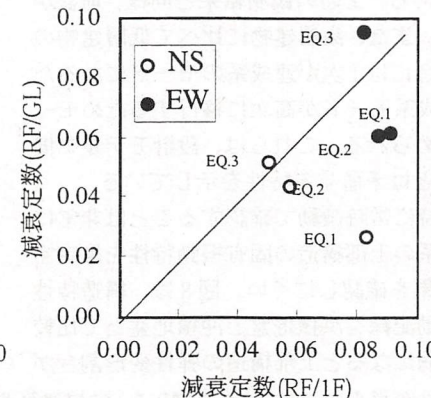
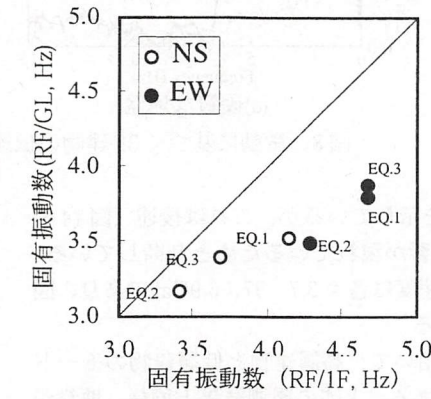
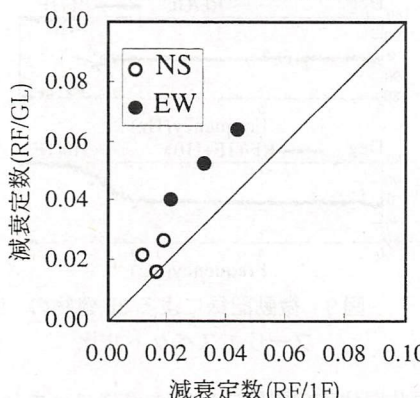
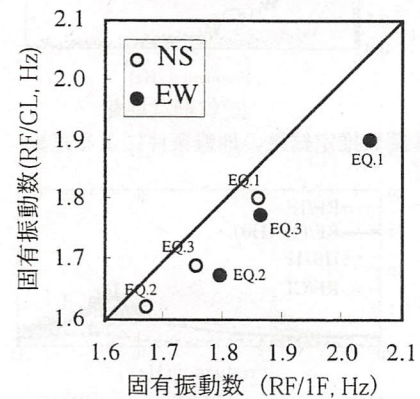
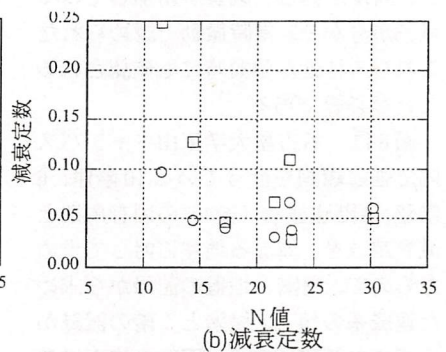


図6 強震観測に基づく固有周期と減衰定数に及ぼす動的相互作用の影響

図4は、名古屋大学内の校舎建物を対象に常時微動から求めた連成系1次のモード減衰定数と建物高さとの関係である。何れも建物屋階と地盤地表の伝達関数から求めた値である。図のように、動的相互作用の影響が大きい低層の建物で減衰が増大している。逸散減衰は振動数に比例する粘性減衰的性質が有るため、同一地盤条件では、連成系の振動数における減衰定数と固有周期の積は一定 ($hT=\text{const}$) になる傾向がある。

図5は、上記建物群のうち、建物階数が5～6階の建物を対象に深さ10mの平均N値と固有周期・減衰定数の関係を示している。地盤が軟弱になると、周期が伸び、減衰が増加している様子が分かる。常時微動で認められたこれらの特性が強震時にも確認されることが必要である。

図6は、名古屋大学東山キャンパス内で強震観測を行っている10階建、6階建、4階建建物(表1)の固有周期と減衰定数を、異なる地震に対して求めたもので、屋階と地盤の記録から求めた連成系の値と、屋階と1階の記録から求めた基礎固定系(回転の拘束は考慮していない)の値とを比較したものである。尚、6階建建物の桁行方向にはExp.J.を介して3階建建物が隣接して存在している。図から、慣性の相互作用効果による振動数の低下と減衰の増大の効果が地震時にも確認される。ただし、6階建建物のみ異なった減衰特性を示しているが、これは後述(図14～17)するように隣接建物間相互作用の影響が現れているためと判断している。また、図中のEQ.1～EQ.3の地動最大加速度は各々3.7、97、6.9Galであり、図は固有振動特性の振幅依存性も示している。

図7は、簡易な相互作用解析モデルを用いて、高層建物と低層建物のモード減衰のモード次数依存性を示したものである。上述の観測結果と同様、地盤が軟弱になるとモード減衰が増大している。また、高層建物に比べて低層建物の減衰が大きくなっており、低層建物の場合には1次が連成系のモードになるため高次減少型に、高層建物の場合には連成系モードが高次に移行するためモード減衰は増大した後、減少する傾向が認められる。これらは、設計モデルで慣用されている高次増大型の剛性比例減衰とは矛盾する特性を示している。

モード減衰の振動数依存性を、実測、特に常時微動で確認することは非常に難しい。低層建物の場合には、基礎固定系の上部構造の固有振動特性を推定することが一般に困難であり、相互作用効果を確認しにくい。図8は、構造特性が共通な3階建RC造小学校校舎の常時微動記録を洪積地盤と沖積地盤とで比較したものである。図のように、地盤が軟弱になると上部構造の弾性変形割合が減少するため、上部構造の明確な振動特性が得られにくくなる。特に、学校建築や共同住宅の張間方向のようにロッキングが卓越しやすい場合に顕著である。

ロッキング動が励起される場合には、図9に示すようにロッキング動の拘束の有無により、基礎固定系の振動特性の推

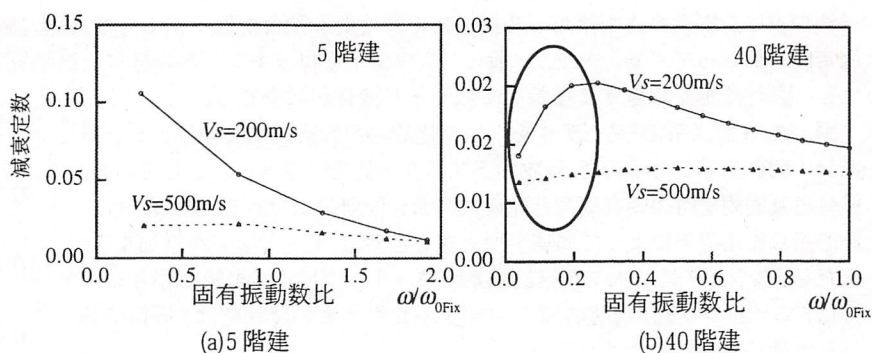


図7 階数と地盤条件の異なる建物のモード減衰

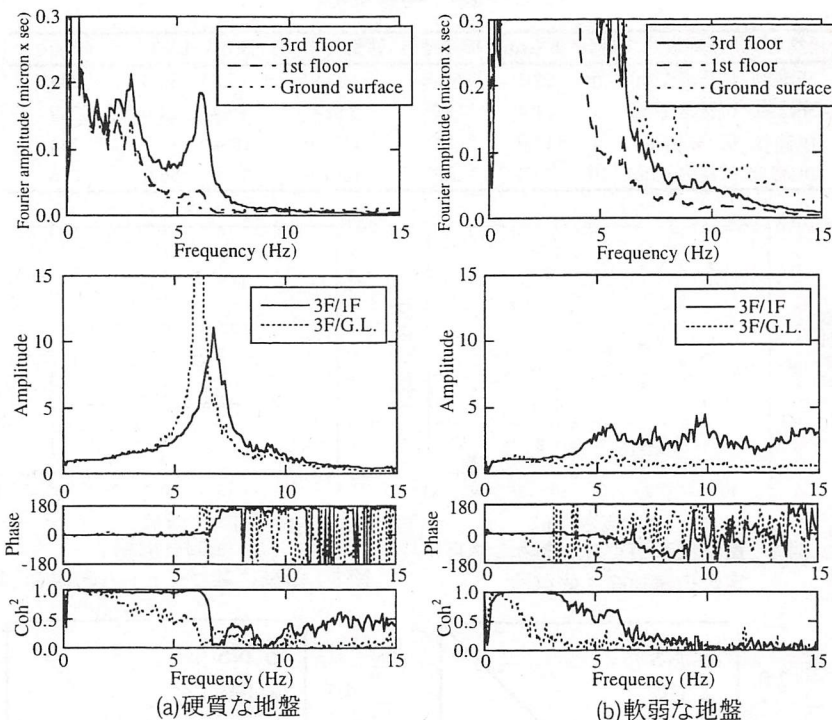


図8 微動に基づく3F建物の伝達関数推定結果の地盤条件による差異

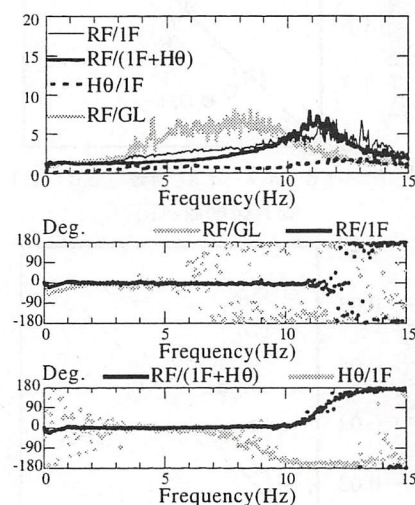


図9 微動記録による3F建物のフーリエスペクトル比

定結果が異なる。屋階と基礎との伝達関数はスウェイのみを拘束した振動系を、屋階と屋階位置の剛体変位（スウェイ・ロッキングの寄与分）との伝達関数（ $RF/(1F+H\theta)$ ）はスウェイとロッキングを拘束した基礎固定の振動系を表す。常時微動のように、表面波入力が卓越し、位相の異なる入力が想定される場合には、ロッキング動が励起されやすいため、ロッキング動の観測の重要度が増す。相互作用の存在による固有振動特性の変動を把握するには、基礎固定系の振動特性が基本値を与えるので、強震観測においても Celebi²²⁾が指摘しているように基礎のロッキング動を抽出できる観測体制を整えるべきである。

一方、高層建物の場合には、システムの推定精度や観測精度の限界のために、3～4次までのモード減衰しか推定ができておらず⁴⁾、図7(b)において減衰定数が増大する振動数範囲（図中○印）でしか結果が得られていない。このため、「減衰特性は高次増大型で剛性比例型減衰の利用が妥当である」と考えられるようになった。スウェイ・ロッキング動と弾性変形が分離でき、高次成分まで分解能を有する観測体制が望まれる。

（２）入力の相互作用効果

入力の相互作用は無質量基礎の応答である「基礎入力動」によって表現される。一般に、入射波に位相差が有ったり、基礎に根入れが有ったりすると、自由地盤地表の動きに比べ、水平動入力が減少し、回転動入力が励起される傾向がある。このような特性は、入力損失として現象的に理解されている。ただし、基礎入力動を直接観測することは不可能であり、我々が観測できるのは、上部構造が存在した状態での基礎の応答「有効入力動」である。有効入力動は、図10に示すように入力の相互作用に加え上部構造の応答の影響を受けており、結果は上部構造の特性に左右される。

図11は、兵庫県南部地震における観測記録を用いて、建物基礎と地盤地表の最大加速度の関係を示したものであり¹⁸⁾、地盤地表に比較して約3割の入力低減効果が認められている。

図12は、名古屋大学内の4つの建物（表1）について、地震時の地盤の動きと建物基礎の動きの平均フーリエスペクトル比（各20波程度の記録を利用）を、図13は地震動の等価振動数（地動の主要動部の最大加速度PGAと最大速度PGVからPGA/PGV/2 π で簡易的に卓越振動数を評価）と最大加速度比の関係を示したものである。全体的傾向として、規模が大きな建物ほど高振動数で基礎応答が低減しており、その効果は地震動の卓越振動数が高いほど顕著となっている。しかし、上部構造の固有振動数（□、▽）近傍でばらつきが大きく増幅も見られる。また、2つの建物が相互に

隣接する3F建物と6F建物は、結果のばらつきが著しく、規模の小さい3F建物では増幅傾向にある。これは後述するように隣接建物間相互作用の結果であると考えられる。以上のことから、「入力の相互作用」の観点からは、地盤と基礎との同時計測の重要性が指摘できる。

（３）その他の効果

上部構造の応答分布

動的相互作用の影響が大きい建物では、建物の弾性変形に比べて、スウェイやロッキングの動きが相対的に大きい。図14は、上述の隣接する3F建物と6F建物の強震時の伝達関数を示したものである。何れも10波以上の記録から求めた平均的な特性である。図15は、2棟のスウェイ・ロッキング・弾性変形の割合を示している。図のように、低層の建物の方が、伝達関数のピークがなだらかになり、スウェイやロッキングの占める割合が大きい。振動数の上昇と共に弾性変形の割合が増加するため、地震動の卓越振動数によって上部構造の応答分布が変動することになる（長周期の入力が多いと剛体的挙動となる）。図16は、地震動の等価振動数と屋階と地盤の最大加速度比との関係を示したものである。建物階数による増幅度合いの違いや、入力地震動の振動数成分による応答増幅効果の差異などが明瞭に現れている。設計で慣用されている建物増幅比2.5は相当幅をもった値であることが分かる。また、同一の地盤・建物であってもこのような変動があることは、建物と地盤の固有振動数の同調だけでは応答増幅特性を表せないことを示唆している。スウェイやロッキング動の存在は、上部構造の地震力分布が基礎固定時のそれと異なることを意味しており、耐震設計時の地震力分布の設定に際して留意すべきである。

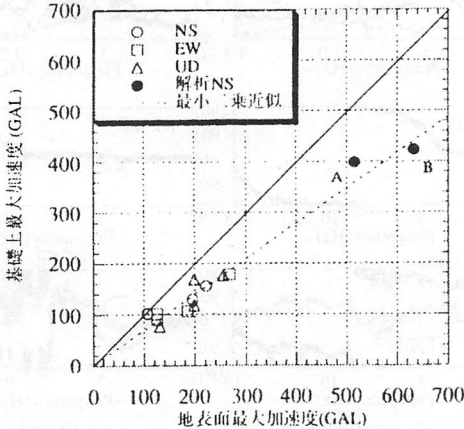


図11 兵庫県南部地震で観測された基礎と地表の最大加速度の関係

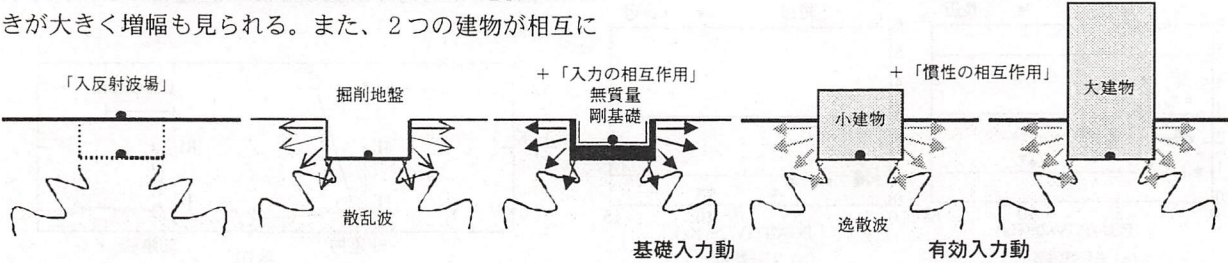


図10 基礎入力動と有効入力動

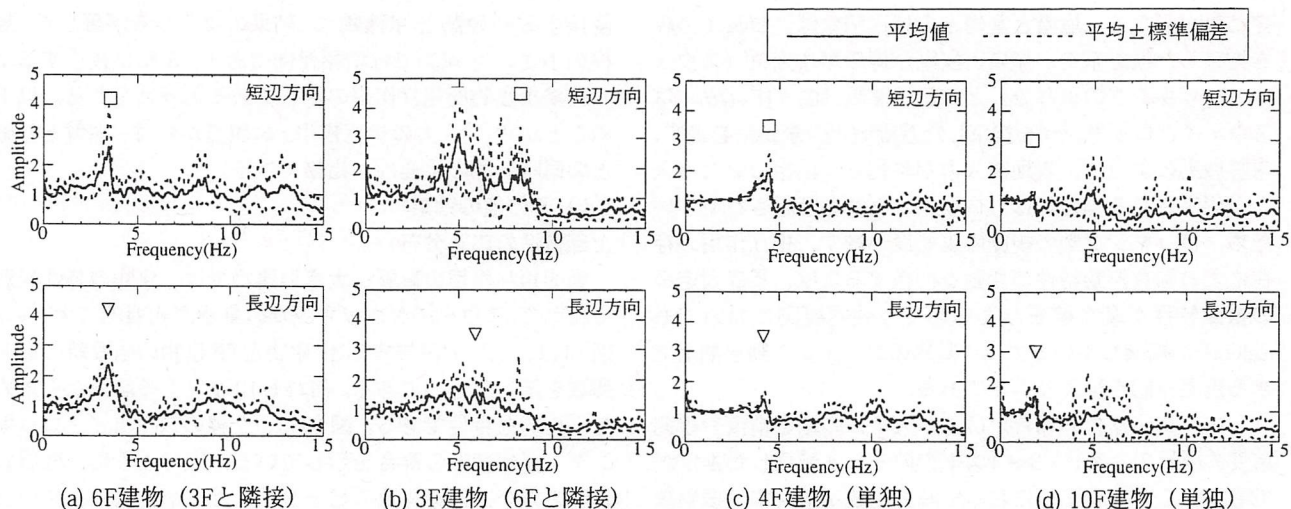


図12 強震観測による階数の異なる4つの建物のGL-1mに対する1Fのフーリエスペクトル比 (上段から短辺, 長辺)

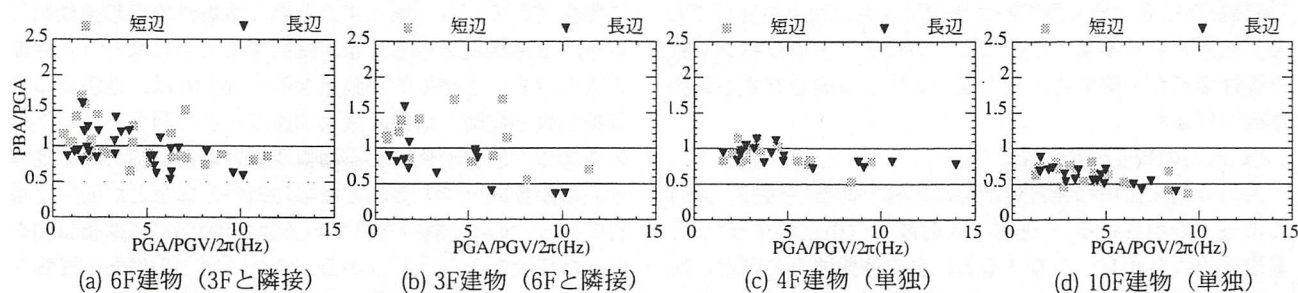


図13 地震動の卓越振動数 (PGA/PGV/2π) と有効入力動 (基礎と地表の最大加速度比) の関係

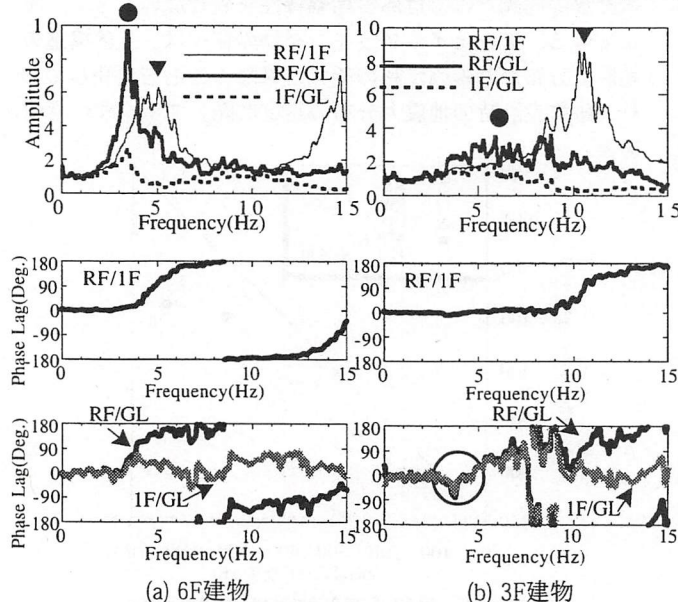


図14 強震記録による隣接する6F・3F建物の伝達関数

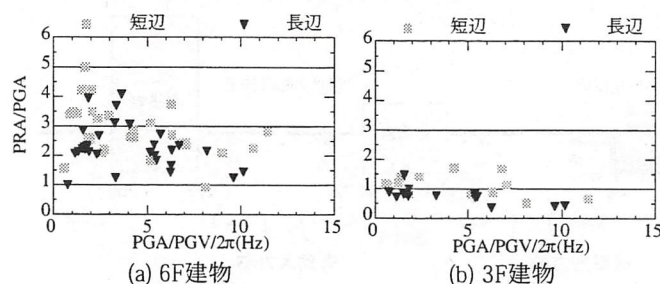


図16 地震動の卓越振動数と建物の加速度増幅比の関係

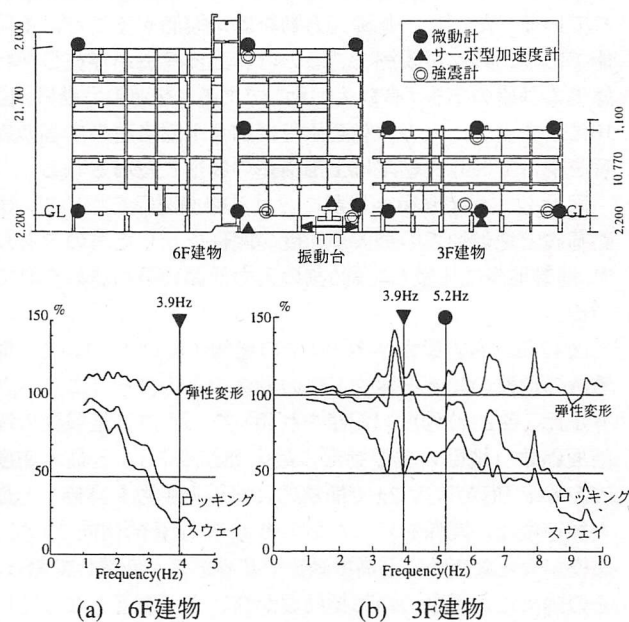


図15 地震時の隣接する6F・3F建物のモード寄与

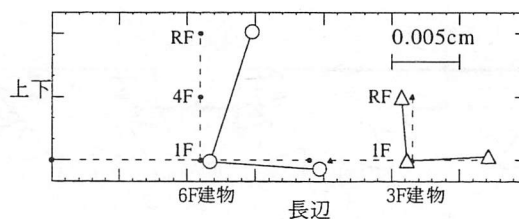


図17 地震時の隣接する6F・3F建物の1次振動モード

隣接建屋間相互作用

図14中、6F建物の卓越振動数近傍で3F建物のRF/GL・1F/GLの位相(図中○印)に乱れが生じていることから、地盤を介した隣接建屋間相互作用の存在が示唆される。図17は、6F建物の固有振動数における両棟の振動モード形を示している。図のように両建物がおじぎをするように逆位相でロッキングをしており、ロッキングを介した隣接建屋間相互作用が認められる。図12～13における3F建物の振動特性の変動の大きさは、隣接建屋間相互作用の結果であると推察される。都市部の建物の場合、隣接して建物が存在することが多いので、単独建物の特性を安易に適用することは危険である。特に、大規模な建物に隣接する小規模建物の場合には注意が必要である。

立体振動特性

図18と図19は、高密度常時微動観測によって、上述の10F建物の振動特性を調べたものである。この建物は1995年に建設され図のようにL字型平面をした10F棟に1F付属棟が接続された平面形をしており、本年、増築が完了しコ字平面形になった。基礎は約50mの場所打コンクリート支持杭である。図から偏心に伴うねじれ動、床の面内変形、基礎版の面外変形などの存在が認められる。上部応答に占めるスウェイ・ロッキング割合を検討したところ、杭基礎にもかかわらず1次周期では50%程度のロッキング率が観測された。これらの結果(床の面内変形・ねじれ動、基礎版の面外変形・ロッキング動)は、中低層建物の振動挙動把握の難しさを示している。これらは、1フロア1点といった観測点配置では把握できない現象であり、立体振動挙動に着目した高密度観測体制が必要である。

地震動の特性

入力波動の種別(実体波・表面波)や、入射角・方位角によって、入反射波場に位相差が生じ、ロッキング動やねじれ動が励起されるので、地震動の空間変動の把握が必要である。入反射波場の把握のためには、平面及び深さ方向の広がりをもった地盤の観測点設置が望まれる。

地盤の特性

地盤の成層性により地盤は固有の周期特性を有し、揺れを増幅さ

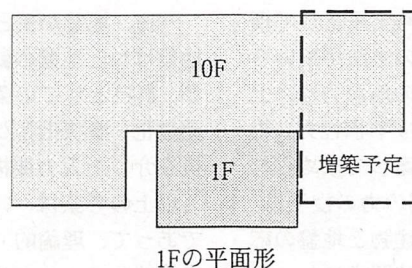
せる。同時に、1次振動数(カットオフ振動数)以下では表面波が伝播しにくく逸散減衰が小さくなる。これらは、インピーダンス関数や基礎入力動に影響を与えるため、上部構造との共振やモード減衰の減少に寄与する。

強い揺れを受けると地盤材料が塑性化し、履歴減衰が増大するため逸散減衰効果が相対的に減じられる。また、地下水位面が浅い緩い砂層では液状化や側方流動が発生する。このような地盤の固有振動特性の変化や、地盤変状について監視できる観測体制が望まれる。

震源断層近傍のパルス的な揺れと、繰り返し回数の多い継続時間の長い揺れとでは液状化の発生機構が異なるとの指摘もあり²⁴⁾、パルス状の波に対する逸散減衰効果の分析と合わせて、杭体や上部構造への影響についての検討が必要であろう。

杭基礎の応答特性

杭基礎の応答性状については未だ不明な点が多い。その一因は、杭体そのものの観測事例が少ないことにもある。杭頭慣性力と地盤変形の寄与の度合い、杭周囲の地盤バネ剛性と逸散減衰の評価の仕方($k=7N$ の妥当性、ウィングラーバネ仮定の妥当性)、バネ剛性・逸散減衰に対する群杭効果(バネ剛性に対する杭間隔と $1/N$ の妥当性、減衰係数に対する群杭効果)、杭を介した上部構造への入力機構、群杭の内部と外部の地盤の塑性化・液状化挙動の差異、杭頭慣性力の各杭の分担割合、杭-地盤系の上下抵抗・ロッキング抵抗など、不明確な点が多々残されている。何れも耐震設計上重要な項目ばかりであり、現状良く用いられている地震応答解析モデルについても、モデル各部が実証されていない段階にある。構造物の立体振動挙動が追える観測



1Fの平面形

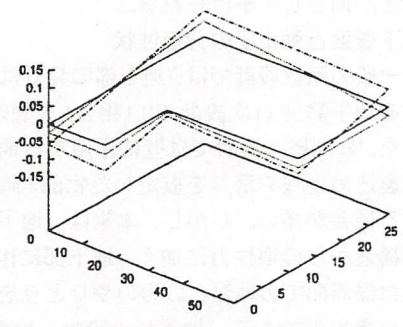


図19 常時微動記録による10F建物の短辺並進モード時の基礎版の変形状

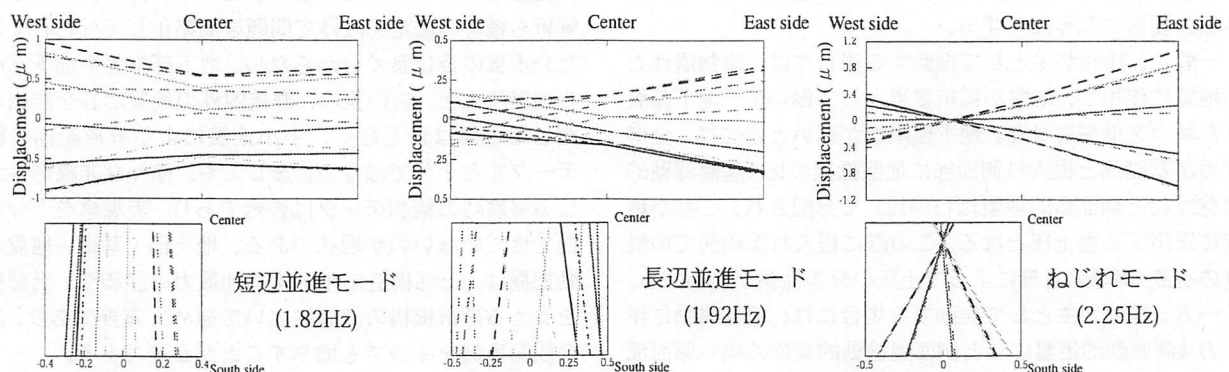


図18 常時微動記録による10F建物のRF床のモード形

に加え、中杭と外杭について杭体の深さ方向の歪み計測、群杭内部と外部の地盤挙動の計測などが望まれる。

根入れ、接地条件

基礎の根入れは地盤との接触面積を増やすため、地盤のバネ抵抗と逸散減衰を増加させ、その効果は振動方向成分によって異なる(回転>水平>上下)。根入れによるバネ抵抗の増大は根入れ部の拘束効果を高め、上部構造のモード形を変化させる。バネ抵抗や逸散減衰の増大度合いは、根入れ側面部の接触条件(地盤との隙間の有無、滑動や剥離の有無)によって左右されるので、地下外壁周囲の土圧分布の計測が望まれる。

一般には、根入れによって入力低減すると考えられているが、場合によっては入力面の面積増加により入力が増大することもある。根入れが存在すると、直接基礎の場合、水平入力動は減少し、回転入力動が増大する。水平入力動の低減は基礎床付け面が深くなるため、地表に比べて地中の揺れが減少する効果大きい。これに対して、回転入力動は根入れ側面部の地盤の揺れに伴うものである。このため、根入れ側面部をドライエリアにし、地盤との縁を切った方が応答低減に寄与する場合もある。同様に、隣接建物の地下部が根入れ効果を減じる場合もある。

根入れによる応答低減効果を設計に積極的に導入するのであれば、根入れによる応答低減の疎外要因についての実証データを蓄積しておくことが必要である。地下部周辺の接地条件や隣接建物の建設前後の有効入力動の差異の検討などが例として挙げられる。

地下震度と動土圧の分担性状

一般の耐震設計では、地下部の設計は地動加速度に対応する地下震度(1次設計で0.1相当)を想定する場合が多い。また、外周壁の検討では壁に作用する地震時土圧として楔状裏込め土塊の滑りを仮定した物部・岡部の方法が用いられる機会が多い。しかし、本来は、地下部の地震力は、上部構造からの慣性力に加え、地下部に作用する慣性力、根入れ部周囲での地盤との力のやりとりを勘案して求められるべきものである。地震時の建物-地盤間の力の授受は、基礎部に加え、根入れ部周囲でも行われ、建物と地盤の応答性状に依存して、図20のように地盤が抵抗要素になったり加力要素になったりする。

一般に、建物が主として振動する場合には、建物慣性力が地盤に作用し、地盤が抵抗要素として働いて、地下部層せん断力を低減させる。地下部剛性が高いときには、全慣性力が基礎部と根入れ側面部に地盤抵抗の比(基礎部動的地盤ばねと側面動的地盤ばねの比)で分配され、これが地盤に作用する動土圧となる。この際に根入れ部周囲での滑りの有無・剥離の有無によって土圧の分担性状が変動する。

一方、地盤が主として振動する場合には、地盤震動に伴う力(側面動的地盤ばねと側面地盤動的変位の積=側面部のドライビングフォース)が建物に作用し、地下部層せん断力が増加する。この力は強震時には主として根入れ部外

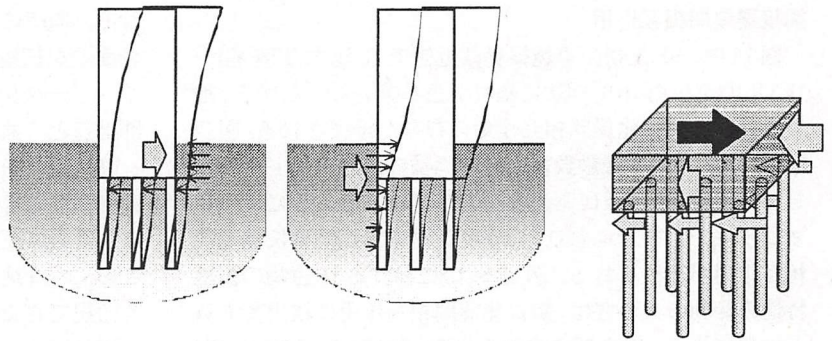


図20 建物・地盤の振動と地震時の各部の力のやりとり

周壁の面外せん断力によって受けとめられ、地下部の耐震壁に力が流れていくことになる。

このような力の授受は、地盤と建物の相対的な堅さの違いや、地震動の卓越振動数に依存する。通常の建物の地下部には、直交壁が多く存在して地下部周囲の壁の面外抵抗を高めているため、上部構造の慣性力、地下部に作用する慣性力、地下部周囲でやり取りされる力を各層レベルで加算することにより層せん断力が得られる。しかし、免震建物の免震層ピット擁壁のように直交壁が存在しない場合には、各層レベルでの力の釣合関係が変化し、周囲との力の授受を算定する際には擁壁の面外剛性を考慮した評価が必要となる。

基礎形式が杭基礎の場合には、地下部周囲と杭とで建物慣性力に抵抗し、地下部周囲抵抗と群杭抵抗の比で建屋慣性力が分配される。これが、杭頭慣性力の根入れ低減効果に対応する。群杭で負担する慣性力は、杭頭水平変位が同一であるとの水平剛床仮定の下で、各杭に配分される。弾性論の範囲では、周辺杭の負担割合が内部杭に比べて相当高くなる。但し、杭周囲地盤の局所的塑性化や、群杭周辺地盤と内部地盤の塑性化度合の違いによって、各杭の負担荷重が平準化されることも考えられる。

一方、地盤が主として振動するときには、杭周囲の動的地盤ばねと地盤の動的変位の積が杭体に作用する力となるが、群杭としての条件下での各杭体に作用する力、地盤が塑性化・液状化した時の群杭内外の地盤特性の差異や、群杭を介した入力機構など、未だ未解明な事柄も多い。

以上の考察は、いずれも、頭の中で筆者が想定したものであって、理論的・実証的に検証されたものではなく、相当複雑なメカニズムとなっている。現状行われている理論解析も種々の仮定を設けて問題を簡略化して行われているため本当の姿は良く分からない。地下部応答や地下部周囲の地震時土圧、杭の歪み、群杭内外の地盤応答を詳細に実測した事例は殆どなく、中小地震による線形範囲の観測データすら十分ではない。ましてや、様々な非線形性が生じる強震時の観測データは皆無であり、実現象を十分に把握できていないのが現状である。地下部・基礎・地盤の挙動把握は、上部構造に作用する地震力の評価や、上部構造を支える抵抗機構の評価において極めて重要であり、詳細な観測事例を1つでも増やすことが必要である。

上下動応答

従来、超高層建物や免震建物のように長周期構造物の耐

震設計は主として水平動に対して行われてきた。これらの建物の設計検討では、上部構造の変形や免震層の変形が卓越することが前提となっているため、動的相互作用に対する配慮は余りされてきていなかった。しかし、長周期化に伴う水平応答の抑制に伴って、相対的に上下動応答の重要度が高くなっている。上下動に対しては、動的相互作用の影響が大きいため注意が必要である。

超高層建物の上下卓越振動数（横田他²⁵⁾によると $T=0.0084N+0.065$)は地震動の卓越周期域に入り、上部構造剛性が相対的に高いので動的相互作用効果が大きくなる（相互作用に伴う逸散減衰効果を考慮しないと過大な上下応答になる可能性がある）。

免震構造物の場合も、上部構造物の耐震要素を削減したり大スパン梁を利用したりするため、設計上、上下応答の重要性が増している。特に、軟弱地盤に立地する場合には、上部構造・免震層・地盤の上下剛性の中で、地盤剛性が一番小さくなることがあるため、上下応答に関しては、地盤との動的相互作用を考慮しない応答解析は意味をなさなくなる。このような観点から、これら長周期構造物においては、上下動応答に着目した観測体制の充実が望まれる。

4. 動的相互作用に着目した強震観測のあり方

4. 1 建物毎の強震観測の着眼点

(1) 超高層建物

超高層建物の強震観測において、上部構造を中心に実証されるべき項目は、耐震部材の終局挙動の把握、モード減衰のモード次数依存性（剛性比例減衰の妥当性）の把握、上下振動の建物内増幅特性と減衰特性の把握、偏心の存在による強震時の立体振動性状の把握、などである。特に減衰性能と上下動特性についての実証が早期に望まれる。

最近、適用例が増えている制振との関連では、減衰付加効果を利用した例が多いことから、非制振時の構造物の真の減衰性能の把握が必要である。また、振動数同調型のTMDやTLDでは、振動特性の2次部材依存性（振幅依存性）を把握した上でのTMD・TLD効果の議論が必要である。さらに、制振の有無による制振効果の検証、強震時の制振効果の把握、などの強震観測による実証が望まれている。

また、臨海部など、軟弱な地盤に立地する杭支持構造物の場合には、地下部の地震荷重評価が未だ合理性を欠いていることから課題は多く、強非線形状態を含む地盤の増幅特性の検証、群杭内地盤と周辺地盤の塑性化・液状化挙動の把握、側方流動の検出に始まり、地下部・基礎部の入力機構と抵抗機構、地下外周地盤・群杭・壁杭の慣性力の分担性状、内杭と外杭の荷重分担、杭の深さ方向の応力分布と杭頭慣性力・地盤変位の寄与度、地下外周部の接地条件による土圧分担性状の変動、非線形時のパネの群杭効果の変動、逸散減衰・入力に対する群杭効果の解明など、実現象を把握するための強震観測が望まれる。我が国全体で数棟でもよいので、地下部や基礎各部の応答、土圧分布、周辺地盤応答などを詳細かつ高密度に観測した事例を共同で構築する時期に来ていると考えられる。

(2) 免震建物

免震建物の前提である長周期化と減衰増大効果を実証す

ることに加え、従来余り検討されていなかった、ねじれ動、ロッキング動、上下動に関する検討が望まれる。筆者らの数少ない観測事例では、偏心が殆ど存在していない低層基礎免震建物にも関わらず、ねじれ動が認められ、ロッキング動も少なからず生じている²⁶⁾。免震構造物はロッキング入力や上下動入力に対しては免震効果はなく、ねじれ入力に対しては免震層隅角部の変形が大きくなる。従って、大スパン梁や免震層浮上りに対する上下動応答、根入れ時や異種基礎を採用した場合のロッキング動入力・高層免震建物のロッキング応答、位相差入力に対する大規模長大構造物のねじれ動などの検討が必要であり、水平動以外の基礎入力動の検討も重要事項となる。

また、中間層免震を採用する場合には免震層以下の部分の地震時挙動把握には動的相互作用の考慮が必要であり、この部分でロッキング動が励起される可能性もある。最近では、軟弱地盤に立地する免震建物も多く、超高層建物の項で述べたような地下部・基礎部での入力機構と抵抗機構の把握が重要である。とくに免震建物の場合には、地下外周部と接する擁壁の面外剛性が小さいため、その土圧の分担性状の把握が必要である。従来の免震建物の地震観測例の多くは、免震層の上下の水平動の観測が重視され、免震効果の宣伝的要素が多かったように見受けられるが、今後は免震建物の弱点の把握のための観測が必要な時期になっている。

(3) 中低層建物

中低層建物は、超高層建物や免震建物と比較して、一般に構造的な明快さに乏しく、構造特性が複雑で、平面的な偏心や高さ方向の剛性変化なども存在し、隣接して建物が存在する場合も多い。また、袖壁・垂壁・腰壁が存在し、耐震部材として考慮していない2次部材も多い。建物周辺地盤との接地条件の多様さや、異種混合基礎の採用などはさらに問題を複雑にしている。地盤条件が良好でない場合も多く、固有振動数も比較的高いため、動的相互作用効果が強く、固有周期の伸び、逸散減衰の増加、スウェイとロッキング動の卓越、入力損失、などといった形で構造物の地震時挙動に影響を及ぼす。軟弱地盤に立地する中低層建物の場合、常時微動に基づくシステム推定が困難であることもあり、強震観測の充実が望まれる。

このような背景から、まず、スウェイとロッキングの検出ができる観測を行うことが必須条件である。次に、建物階数と動的相互作用効果の大きさの関係や、動的相互作用による長周期化と減衰増大効果を実証的に把握するための観測事例の蓄積が必要となる。さらに、ねじれ動や床の面内変形性状の分析に基づく水平剛床仮定の妥当性の把握、2次部材の存在に伴う振幅依存性の把握、隣接建物との動的相互作用による入力や抵抗機構の変動の把握、基礎入力動と有効入力動の差の把握などを主眼とした強震観測も必要である。

中低層建物の今後の強震観測について考える参考例として筆者等が準備を進めている中低層建物の観測メニューを図21に示す。ここでは、名古屋大学キャンパス内の建物、名古屋市内の小学校建物、高層の病院建物などを観測対象

として、中低層建物の地震時挙動に及ぼす動的相互作用効果を分解して明らかにすることを目的にしている。すなわち、①同一地盤・基礎条件における偏心による動特性の変動

官庁建物は単年度予算で施工されることが多いため、当初偏心のある状態で建設された後、偏心のない状態に増築される事例が多い。前出の10F建物（工学部新1号館）では、L字型平面からコ字型平面に増築されている。現在、増築前後での強震観測を実施中である。

②切欠き効果・埋戻し効果が入力動に与える影響

現在建設中の10F鉄骨造建物（総合研究棟）の基礎工事段階において、掘削前、掘削後、基礎構築後、地下階建設後、埋戻し後にわたって周辺地盤と基礎とで同時観測を行うことにより、有効入力動に与える切欠き効果、基礎の重量効果、埋戻し効果の把握が可能となる。

③建物階数が慣性の相互作用と有効入力動に与える影響

上記10F建物の上部躯体建設時に周辺地盤、基礎、躯体最上階で同時観測を行うことにより、同一地盤・基礎条件下で、周期の伸びやモード減衰に及ぼす建物階数依存性を把握することができる。また、上部躯体の階数と有効入力動との関係、若しくは、有効入力動と基礎入力動との差異の検討が可能となる。同様の目的で名古屋市内で建設中の17F鉄骨造病院建物でも地震観測の準備中である。

④2次部材の存在が動特性に与える影響

上記10F建物は鉄骨フレーム構造で、外周はカーテンウォール形式となっている。カーテンウォール設置前後や内部間仕切り設置前後の動特性の変動を観察すると共に、完成供用後の動特性の振幅依存性を分析することにより、2次部材の寄与を分析することができる。

⑤隣接建物建設による動特性の変動(隣接建物間相互作用)

上記10F建物は将来的にEJを介して隣接建物が建設される予定になっている。隣接建物建設時の動特性の変化を観察することによって、隣接建物の階数変化も考慮した形で隣接建物間相互作用効果を抽出することができる。

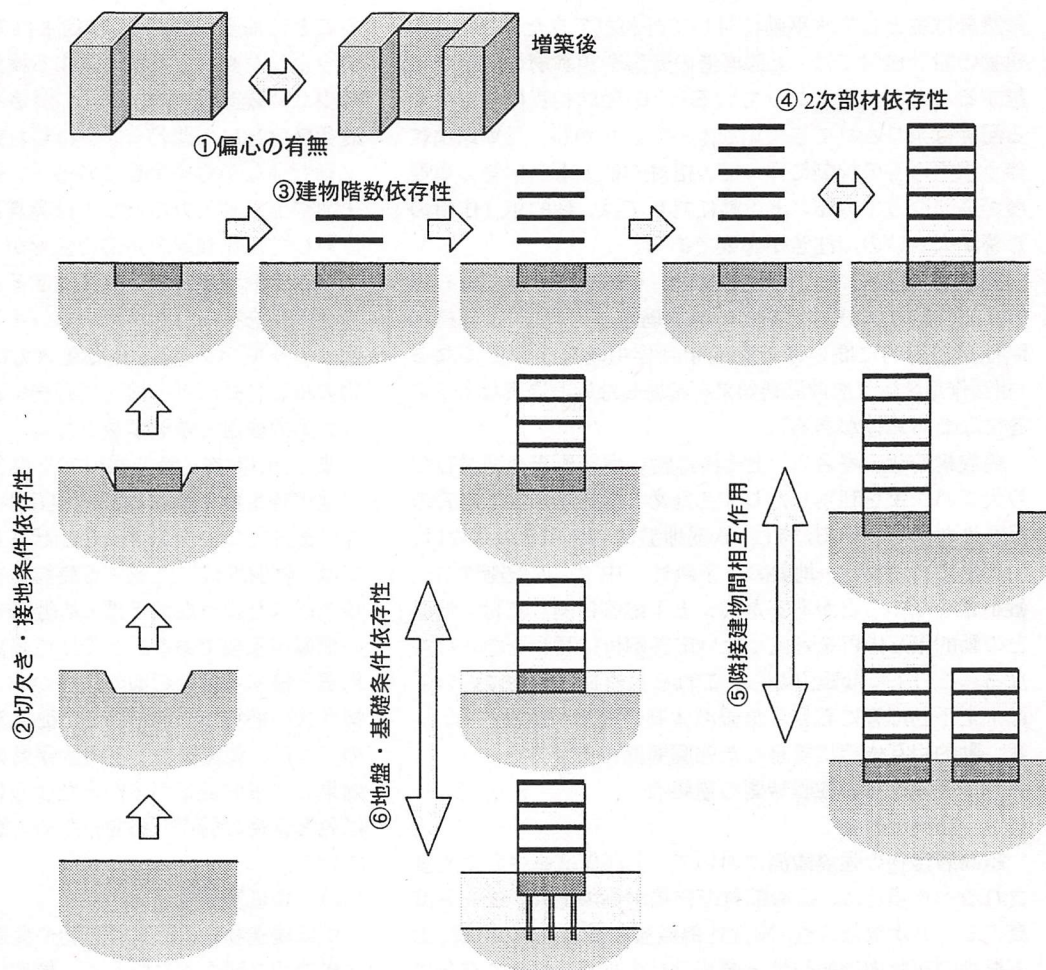


図21 中低層建物を中心とする強震観測メニューの一例

⑥同一建物に対する地盤条件や基礎条件の影響

同一の上部構造特性を有する名古屋市の学校校舎を対象として、異なる地盤条件や基礎条件の建物・地盤の観測を行い、地盤条件や基礎条件による動的相互作用効果の差異を分析する。

以上の地震観測は、比較的容易に実現することができるものである。今後、同様な試みが幾つかの機関で実施されることにより、より信頼性の高い耐震設計法を作っていくことができると考えられる。

4. 2 目的に応じた観測体制の在り方

ここまで、動的相互作用に着目した強震観測の技術的課題を総括的に述べてきた。これらの課題を克服するには強震観測の質・量の充実が求められる。その方法には、

- ①建物観測事例の不足の抜本的解決
 - ②それなりに動的相互作用に着目した観測数の増加
 - ③動的相互作用の実現象把握のための高密度観測の実現
- の3つの立場が考えられる。

中低層建物の強震観測事例が殆どない現状では、建物内に1点でも良いので①を実現すべきであり、そこに設置する地震計も松・竹・梅のグレードがあっても良いと思われる。強震時の被害との相関分析を主たる目的にするのであれば、地動の最大強さだけでも有益なデータとなる。波形収録を諦めれば、エアバック作動用などに用いられている

超小型半導体センサーの改良利用も考えられる。現状のエアバック用センサは数百円であり、分解能は低いが量産化されているので高精度化を図っても数万円で実現できる可能性がある。このタイプの超安価なセンサーは住宅の品確法に絡んで今後ニーズが増えるかも知れない。最近では分解能が1Gal程度の半導体センサーを利用し、波形収録も可能な数十万円程度の小型地震計も開発されてきている。強震を対象とするのであれば利用価値は高い。

従来型のサーボ型センサーを用いた地震計は未だ百万円程度の価格であり、②③などの精度を要する観測のためのセンサーとしての利用に適している。②では、最低限、地盤、基礎、屋階の各3chの同時観測が必要であり、基礎のロッキング動検出のため、2つの上下センサーを付加した11ch観測が基本構成となる。可能であれば、基礎と屋階のねじれ動が検出できるようさらに2つの水平センサーがあると良い。

③は相当な高密度観測が必要であり、②の観測点に加え、床の面内変形挙動や、基礎版の面外変形挙動が把握できるだけの上部構造へのセンサー設置、外杭と内杭に対する深さ断面方向の鉄筋歪み計設置、地下外周壁への土圧計設置、群杭の内部地盤と自由地盤の地表・地中同時観測などが必要となる。

4. 3 高密度強震観測ネットワークの新しい構築方法

動的相互作用に着目した強震観測を行う場合、地盤や建物に複数のセンサーを設置する必要があり、多点同時観測を実現するネットワークの構築が必要となる。従来は、地震計メーカーが供給するアナログ信号ケーブルを用いて複数の検出器を多チャンネルの収録機に接続し、モデムとNTTアナログ回線を介してデータ取得することが多かった。しかし、最近では様々な通信媒体の利用が可能になってきており、従来とは異なるネットワークの構築法が想定される。ここでは、シリアルポートしか持っていないセンサーの利用を前提に、筆者等が試みたネットワークの構築法を紹介する。

図22は既存の技術を用いて実現できるネットワーク構築法の一覧である。図の上半分は、アナログ信号ケーブルを用いた既存の強震観測ネットワークの利用を前提に、収録機とデータサーバとの接続法として、NTTアナログ電話、ISDN、携帯電話、PHS、インターネットの5種類を想定している。以前は一般アナログ回線が多かったが、現在では移動体通信が普及し、携帯電話やPHSも設置の自由度や容易さからトータルコストでは見合うようになってきた。ISDNはLAN間の転送としても有用である。転送速度では

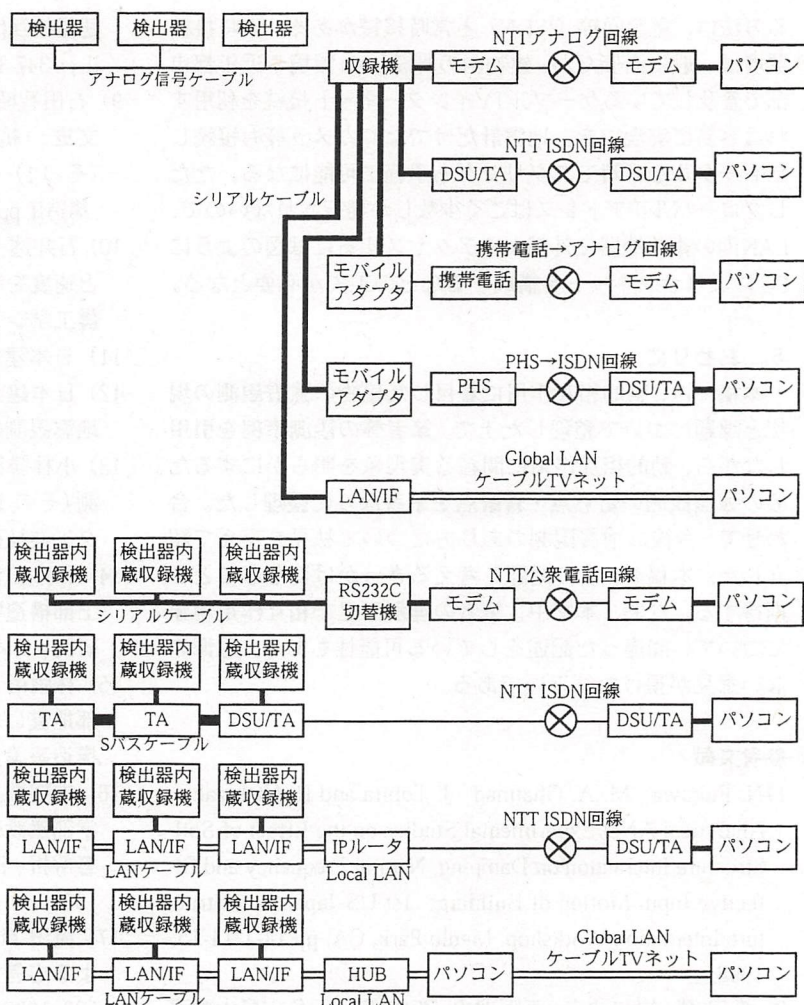


図22 種々の情報伝達手段を用いた高密度強震ネットワーク

ISDNについてPHSが高速だが、受け側にPHSまたはISDNを必要とする。受け側はISDN回線にDSU (Digital Signal Unit) +TA (Terminal Adapter) を接続し、S/T端子にISDNルータ、アナログ端子にモデムを接続することにより、地震計側の回線がISDN、一般電話、携帯電話、PHS、LANのいずれであっても発着信可能となる。

これに対して、図の下半分は、比較的に安価な検出器内蔵型の収録機を用いてネットワークを構築する方法を示している。RS232Cの切替機と通常電話回線を用いて、電話をかけ直す事により各収録機の記録を回収する方法、ISDN回線と直列接続したTAを用いる方法、ISDN回線に接続されたIPルータ下にプライベートLAN環境を構築しLANアダプタ（シリアル→TCP/IPプロトコル変換器）を介して収録機を接続する方法、インターネットに接続したパソコンをサーバとしてプライベートLANを構築し収録機を接続する方法などである。

LANやインターネット常時接続は、データ転送速度やデータ監視のリアルタイム性において電話回線より格段に優れている。地震計等の観測機器については、現状では未だにシリアルポートが一般的であるが、LANアダプタを用いればシリアルポートから直接LANに接続できる。各地点で複数の観測機器を接続したLANをデータサーバへ接続す

る方法は、電話回線 (ISDN) と常時接続がある。常時接続環境は一般に高価だが、建物内の既設LAN環境や近年都市部で普及しているケーブルTVインターネット接続を利用すれば容易に実現でき、地震計だけでなくカメラ等も接続したトータルな常時モニタリングも手軽に可能になる。ただしグローバルIPアドレスはごく少数しか発行されないで、LAN内の複数機器に外部からアクセスするには図のようにPCによりサブネットを構成するなどの工夫が必要となる。

5. おわりに

本稿では、動的相互作用に着目した建物の強震観測の現状と課題について整理した上で、筆者等の観測事例を引用しながら、動的相互作用に関わる実現を明らかにするための強震観測の留意点・着眼点を筆者なりに整理した。合わせて、今後の強震観測のあり方について私見を交えて紹介した。本稿が、この問題を考えるきっかけになることを期待する。なお、本文中、筆者の理解不足で相互作用現象について、間違った記述をしている可能性もある。忌憚らない意見が頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) N. Fukuwa, M. A. Ghannad, J. Tobita and R. Nishizaka : Analytical AND Experimental Studies on the Effect of Soil-Structure Interaction on Damping, Natural Frequency and Effective Input Motion of Buildings, 1st US-Japan Soil Structure Interaction Workshop, Menlo Park, CA, pp.14-14-15, 1998
- 2) 飛田潤, 福和伸夫, 西阪理永, 西山拓一 : 名古屋大学東山キャンパスの高密度地震観測に基づく建築物の減衰特性推定, D&D'97 シンポジウム「21世紀のダンピング技術」講演論文集, 41-44, 1997
- 3) 松山智恵, 福和伸夫, 飛田潤, 中野優, 八木茂治 : 建物内の振動台を用いた強制振動実験に基づく中低層RC造建物の隣接建物間相互作用の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.339-340, 2000
- 4) 日本建築学会 : 建築物の減衰, 2000
- 5) 武藤清, 林高明, 大村文, 大松沢恭一, 内田一義, 河西良幸, 安藤治彦, 他 : 異なる地盤上にある二つの原子炉建屋の振動性の比較, (その1:地震観測結果), (その2:振動モデル), (その3:地震シミュレーション解析), 建築学会大会梗概集, p569-574, 1974
- 6) 武藤清, 水野教宏, 杉山信夫, 小林俊夫, 本橋章平, 草野直幹 : 原子炉建屋における観測地震のシミュレーション解析, (その1:地盤系の解析), (その2:建屋系の解析), (その3:建屋, 地盤連成系の解析), 建築学会大会梗概集, p833-838, 1980
- 7) Y. Kitada, M. Kinoshita, M. Iguchi and N. Fukuwa : Soil-Structure Interaction Effect on an NPP Reactor Building - Activities of NUPEC; Achievements and the Current Status, Proc. UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, 1998
- 8) 北田義夫, 久保哲夫, 瀬尾和大, 福和伸夫, 兼近稔 : 大規模制御発破による人工地震動を応用した大加速度下での地盤・建屋相互作用試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.347-348, 2000
- 9) 石田智昭, 齋藤英明, 田中英郎, 西澤友弘, 小林靖, 柳下文雄 : 「杭基礎建屋の地震観測記録のシミュレーション」(その1) ~ (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.413-418, 2000
- 10) 石井透, 金子美香, 杉山武 : 実体波と表面波の伝播方向と速度を考慮した長大構造物の入力地震動, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.355-360, 1994
- 11) 日本建築学会 : 建築物の耐震設計資料, 1981
- 12) 日本建築センター : 免震構造建築物—その技術開発と地震観測結果, 1992
- 13) 小林勝巳 : 10層住宅における地盤—杭—建物の地震観測(その1) 観測システムの概要と観測結果の一例, フジタ工業技術研究所所報, 第23号, 1987
- 14) 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, 1988
- 15) 林康裕, 藤森健史, 安井諒, 井口道雄 : 1995年兵庫県南部地震における相互作用効果と建物応答, 日本建築学会構造系論文集, No.520, pp.45-51, 1999
- 16) 志賀敏男, 柴田明德, 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応答実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, pp.119-129, 1981
- 17) 滝田貢, 飛田潤, 毛呂真, 伊藤敬一 : 多点同時記録による応答モードの評価, 構造工学論文集, Vol.43B, 493-502, 1997
- 18) 安井諒, 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考察, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.111-118, 1998
- 19) 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, No.485, pp.53-62, 1996
- 20) 日本建築学会 : 建築構造物の振動実験, 1978
- 21) 日本建築学会 : 入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996
- 22) M. Celebi : Planning and Implementation of a Soil Structure Interaction Experiment, Proc. UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, 1998
- 23) J. P. Stewart : Empirical Assessment of Soil-Structure Interaction Effects from Strong Motion Recordings, Proc. UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, 1998
- 24) 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, pp.133-140, 1998
- 25) 横田治彦, 佐武直紀, 岡田敬一 : 振動試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, pp.77-84, 1993
- 26) 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, pp.307-316, 2000.3