

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

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ADJACENT LOW AND MEDIUM-RISE BUILDINGS BASED ON EARTHQUAKE OBSERVATION, FORCED VIBRATION EXPERIMENT AND MICROTREMOR OBSERVATION

松山智恵*, 福和伸夫**, 飛田 潤***

Chie MATSUYAMA, Nobuo FUKUWA and Jun TOBITA

In order to comprehend dynamic characteristics of adjacent 3-story RC building and 6-story Steel Reinforced Concrete (SRC) building, earthquake observation, forced vibration experiment and microtremor observation were carried out. The following results are obtained. The adjacent buildings are affected by both of Soil-Structure Interaction (SSI) and Dynamic Cross Interaction (DCI). The input loss of earthquake motion is not clear for both of adjacent buildings. The dynamic characteristics of smaller building are much affected by larger one. DCI effects are shown to be transmitted by soil, including rocking and torsion of buildings.

Keywords: Soil-structure interaction, Dynamic cross interaction, Transfer function, Effective input motion, Rocking

建物と地盤との動的相互作用, 隣接建物間相互作用, 伝達関数, 基礎有効入力動, ロッキング

1. はじめに

都市域には軟弱地盤上に立地した中低層RC造建物が多数あり, 建物と地盤との動的相互作用の影響が大きいことが指摘されている。これらの建物の多くは隣接して建てられており, 隣接する建物同士が地震時に地盤を介して相互に影響し合い, 単独建物とは異なった地震時挙動をすることが考えられる。単独建物の振動特性については過去に多くの計測・検討がなされているが, 建物と地盤との動的相互作用効果が顕著な中低層建物の詳細な計測はあまり行われていない(例えば1)2)。隣接する中低層RC造建物についての詳細な計測事例は殆どなく, 隣接建物が振動特性に与える影響についての定量的な資料は十分ではない。

隣接建物の実測事例としては, 原子力発電施設の耐震性確証のために, 実際の地盤上に大型の縮小試験体を建設して実施した地震観測, 振動実験の事例がある³⁾⁴⁾。高層建物については, 大場他⁵⁾による人力加振実験による隣接建物の計測事例があるが, 建物と地盤との動的相互作用の影響が大きい通常の中低層建物についても実測データの蓄積が望まれる。動的相互作用効果のひとつである基礎有効入力動については, 単独建物では, 兵庫県南部地震における強震観測記録について安井他⁶⁾が検討している。しかし, 隣接する建物が動的相互作用効果に及ぼす影響は研究されていない。

一方, 解析的な検討としては, 境界要素法を用いた2次元問題に対する中井他⁷⁾, 3次元問題に対する吉田他⁸⁾の検討に加え, 原子力発電施設を対象とした検討が存在しており, 重量の比較的大きな建物との連成効果が重要であることが指摘されている⁹⁾。

著者等は, 3階建RC造と6階建SRC造の2棟が東西に隣接する名古屋大学工学部9号館を対象に強震観測を実施している¹⁰⁾。また, 詳細に振動特性を計測するため, 6F建物1階に設置されている振動台を用いて隣接方向に加振する強制振動実験も行った¹¹⁾¹²⁾。

本論文は, 強震観測記録に基づいて隣接する中低層建物の地震時挙動を検討し, さらに, 多点で同時計測を行った強制振動実験と常時微動記録も参考にすることで, 隣接する中低層建物の振動特性を総合的に明らかにしようとするものである。強震記録では, 複数の観測記録に基づいて平均的な振動特性を検討すると共に, 入力地震動の周期特性が異なる2つの記録の分析を通して, 隣接建物間相互作用効果を詳細に考察した。また, 隣接する建物が入力相互作用効果に及ぼす影響を検討するため, 有効入力動についても検討を行った。強制振動実験では, 共振曲線, モード形から隣接した中低層建物の振動特性について検討している。

2. 対象建物と計測概要

* 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生
** 名古屋大学先端技術共同研究センター 教授・工博
*** 名古屋大学工学部社会環境工学科 助教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Nagoya Univ.
Prof., CCRST, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, School of Eng., Nagoya Univ., Dr. Eng.

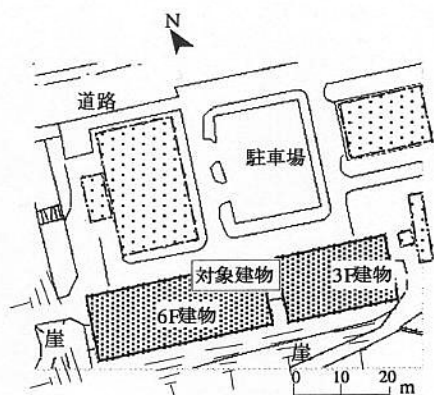


図1 建物配置図

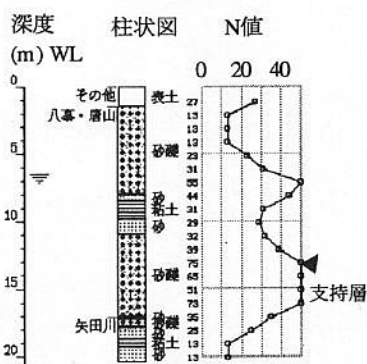


図3 対象建物ボーリング柱状図

2.1 対象建物

対象建物の配置図を図1に、断面図・平面図・基礎・杭状図をセンサー配置と共に図2に示す。また、図3に対象建物直下のボーリング柱状図を示す。対象とする2棟は6階建SRC造（6F建物）と3階建RC造（3F建物）であり、両棟は構造的に独立し、通路部分のExpansion Jointを介して3mの距離で東西に隣接している。これらは、洪積丘陵地の尾根筋に立地し、その南側は約10m、西側は約3mの崖となっている。基礎形式は共に杭基礎で、図3に示すGL-12m付近を支持層とし、基礎梁は約2mの埋込みがある。また、6F建物1階にある振動台の基礎は建物基礎と構造的に縁が切れており、間に砂が挿入されている。

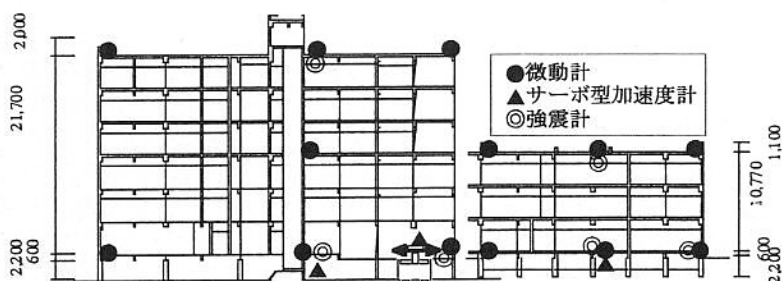
2.2 強震観測システム

強震観測位置を図2に◎で示す。1996年に6F建物1階・屋上・地盤（GL-1m）の3地点で観測を始め、その後、検出器を増設し現在では両建物のロッキング、ねじれ動を把握するため6F建物、3F建物各4地点と地盤1地点の計9地点でサーボ型加速度計による強震観測を行っている。データの収録は100Hzサンプリングで行っており、現在までに、6F建物28記録（GL-1mで最大約50Gal）、3F建物13記録（同25Gal）が得られている。

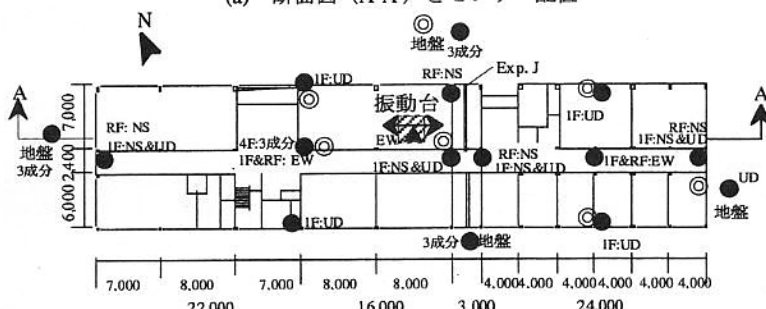
2.3 強制振動実験、常時微動計測概要

6F建物が低層の3F建物に及ぼす影響について詳細に検討するために、6F建物1階に設置されている振動台を用いて隣接方向（長辺方向）の強制振動実験を深夜から早朝の静寂時に行った。合わせて、深夜静寂時に常時微動計測を行った。

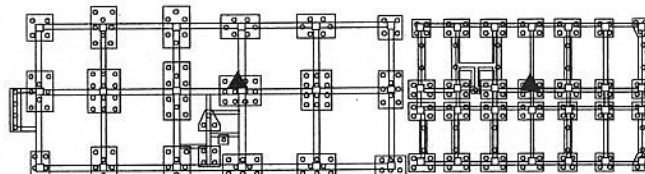
計測点位置を図2中に●、▲で示す。建物の並進・ねじれ・ロッキング・弾性変形を分離して分析するため及び周辺地盤の地形の影響を調べるために、建物内20地点（27成分）及び地盤4地点（10成分）にセンサーを設置し、全地点で同時計測を行った。建物・地盤上の計測



(a) 断面図 (A-A') とセンサー配置



(b) 平面図とセンサー配置



(c) 基礎・杭状図とセンサー配置

図2 断面図・平面図・基礎・杭状図とセンサー配置

点●には、固有周期1秒の動コイル型微動計を用い、25Hz若しくは15Hzのローパスフィルターを通し、200Hzサンプリングで、原則として変位成分を収録した。また、振動台・基礎梁上の計測点▲にはサーボ型の加速度計を設置した。屋上のねじれ動の分析と周辺地盤応答への地形の影響の分析が可能な点が強震観測と異なっている。なお、地盤記録としては崖の影響の少ない建物北側の強震観測地点付近の記録を主として用いる。

強制振動実験では、低振動数から大きな加振力を得るため、可動部質量約600kgの振動台に質量約1tonのおもりを積載し、定加速度約600Gal（加振力約1tonf一定）で振動数を時間と共に掃引する正弦波スイープ加振を行った。加振振動数は、強震観測結果から得られた両建物の1次固有振動数を含む2Hz～15Hzに設定した。

スイープ方法（線形掃引と対数掃引）、加振振動数の上昇と下降の違いやスイープ速度の違いによる相互の差を分析した上で、ここでは20分間2Hz～15Hzリアススイープ振動数上昇の長辺方向（隣接方向）加振の記録を用いる。フーリエ解析時には、スイープ全継続時間の波形をフーリエ変換し、0.2HzのParzenウィンドウで平滑化した。

常時微動計測については、10分間の波形データから20.48秒の区間を29個選んでアンサンブル平均した。

3. 地震時の平均的な振動特性

地盤（GL-1m）の観測最大加速度が3Gal以上の強震記録を用いて伝達関数推定を行い、平均的な振動特性を考察する。用いた記録は6F建

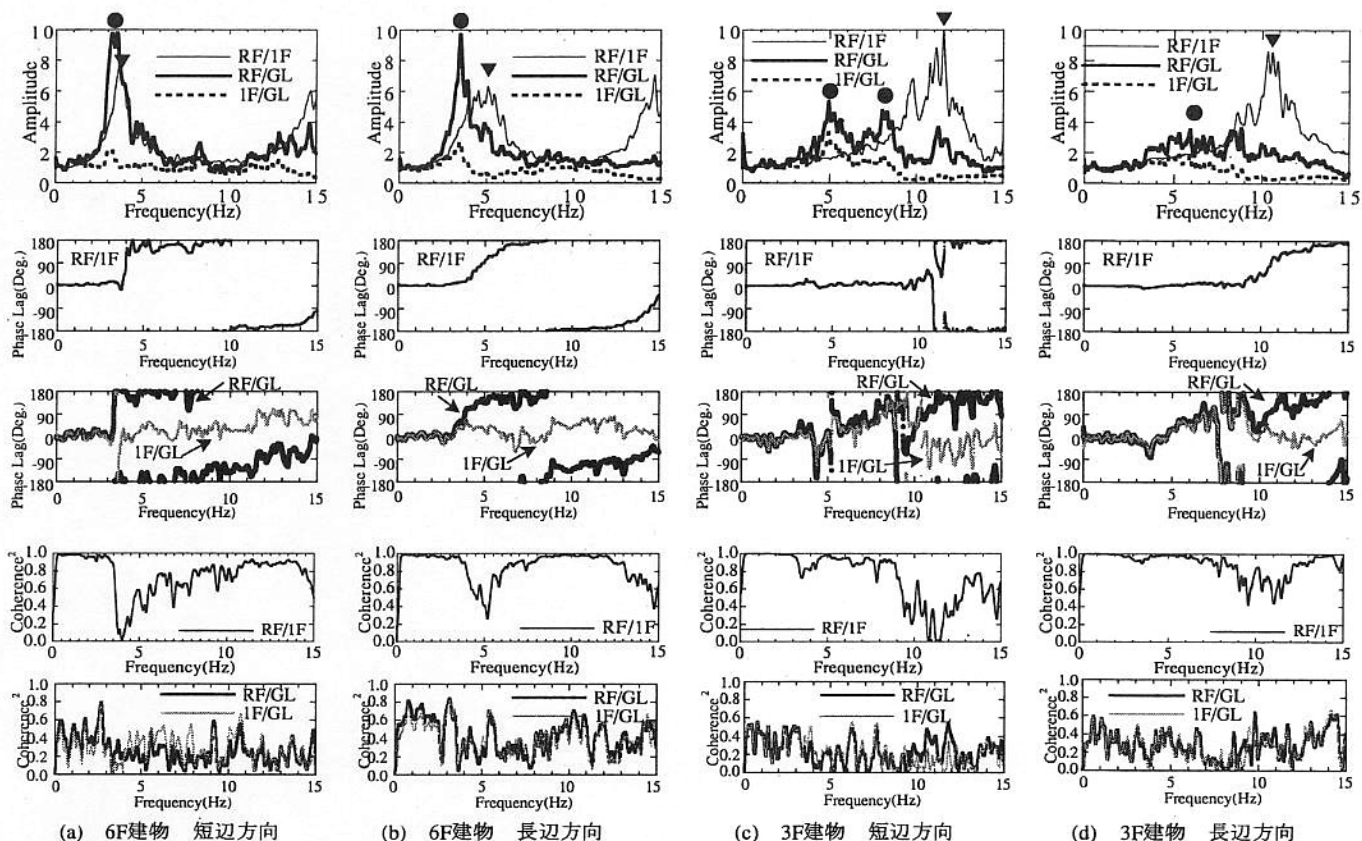


図4 複数の強震記録から求めた伝達関数 (上から振幅・位相遅れ・コヒーレンス)

物16記録, 3F建物9記録である。伝達関数はエネルギースペクトルを用いたHv推定法で評価し, 伝達関数の特徴を明瞭にするために, 0.2Hz幅のParzenウィンドウで平滑化した。ここでは, 地震時の平均的な振動特性を検討するために, 入力側のRMS値で入出力を基準化してアンサンブル平均しており, 各記録の寄与を平等に扱っている。

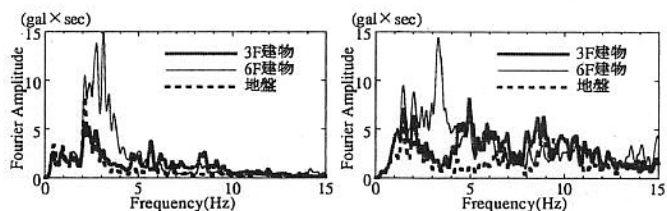
屋上 (RF), 1階 (1F), 地盤 (GL) の伝達関数をコヒーレンスと共に図4に示す。RF/1Fはスウェイのみ拘束した系に対応し, その卓越振動数を▼で示す。6F建物では, 短辺方向は3.6Hz付近, 長辺方向は5Hz付近にピークを示す。3F建物では, 短辺方向は11Hz付近, 長辺方向は10.5Hz付近にピークを示す。RF/1Fのコヒーレンスは全般に1に近く, 1Fに対するRFの応答については1入力1出力の線形システムの特徴を示している。

建物-地盤連成系に対応するRF/GLの卓越振動数を●で示す。6F建物では短辺方向, 長辺方向とも3.5Hz付近にピークがあり, 連成系の卓越振動数と考えられる。3F建物では短辺方向は5Hz付近と8Hz付近に2つの卓越振動数がある。長辺方向では明瞭な卓越を持たないが位相も考慮すると, 5Hzから6Hz付近に卓越振動数があると考えられる。RF/GLのコヒーレンスは2棟ともRF/1Fに比べて低下している。原因としては, 地震動の空間的な変動や多入力多出力のシステムなどが考えられる。この点については4節で考察を加える。

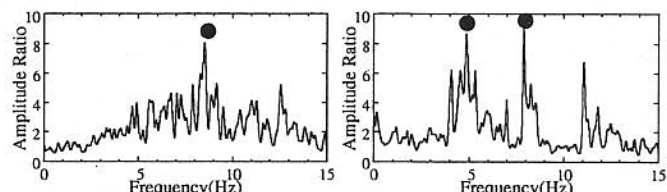
4. 入力地震動の周期特性と建物-地盤系の振動特性

3F建物の短辺方向の伝達関数について, 地震動の周期特性による応答特性の違いを考察する。長周期地震動の例として1999年8月21日和歌山県北部地震 (M5.4, 震源深さD70km, 震央距離Δ208km) を, 短周期地震動の例として1999年11月29日愛知県西部地震 (M4.7,

D51km, Δ7km) を用いる。両建物の屋上と地盤のフーリエスペクトル振幅を図5に, 3F建物短辺方向の相互作用システムである屋上と地盤のフーリエスペクトル比 (RF/GL) を図6に示す。和歌山県北部地震は長周期成分を多く含み4Hz以上の成分が小さい。一方, 愛知県西部地震は長周期成分と短周期成分を共に含む地震動である。3F建物短辺方向のRF/GLは, 長周期地震動と短周期地震動で明確な違いが見られる。和歌山県北部地震では8.5Hz付近に卓越振動数を示すのに対し, 愛知県西部地震では5Hzと8Hz付近の2つの卓越振動数を示す。他の地震でも長周期成分を多く含む地震動では1つの卓越振動数, 短周期成分も含む地震動では2つの卓越振動数を示すことが共通して確認



(a) 1999年8月21日和歌山県北部 (b) 1999年11月29日愛知県西部
図5 短辺方向の屋上と地盤のフーリエスペクトル振幅



(a) 1999年8月21日和歌山県北部 (b) 1999年11月29日愛知県西部
図6 3F建物短辺方向のフーリエスペクトル比 (RF/GL)

されている。また、長辺方向では明確な卓越振動数を示さないため、入力地震動の周期特性による卓越振動数の違いは短辺方向ほど明確に得られていない。

本来、1入力系であれば入力地震動の周期特性によって、相互作用システムの伝達関数が増減することはない。3F建物の短辺方向の伝達関数が長周期地震動と短周期地震動で異なる原因として、以下のことが考えられる。図7に建物周辺地盤の3地点における、常時微動記録長辺方向（速度成分）のフーリエスペクトル振幅を示す。図のように崖の存在する地盤南では長辺方向の動きが地盤北と3-4Hz以上で異なっている。このため、この振動数域では、ねじれ動入力に建物に作用していると考えられる。また、後述するように、強制振動実験から6F建物のねじれの固有振動数が4-5Hzに存在することが確認されている。2つのことから、短周期地震動のみ5Hz付近で3F建物の短辺方向の振動が励起される原因は、南側の崖の存在が長辺方向の地盤の動きの差を生みだし、その結果生じたねじれ動入力が6F建物のねじれ応答を励起し、さらにこの動きが地盤を介して3F建物短辺方向の応答に影響を与えたと考察できる。即ち、隣接建物を介した複数入力の結果、相互作用システムの伝達関数が地震動によって異なることとなったと解釈できる。これは、隣接建物間相互作用の1つの現象である。

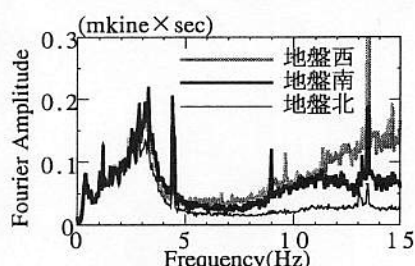


図7 常時微動から求めた長辺方向の地盤のフーリエスペクトル振幅

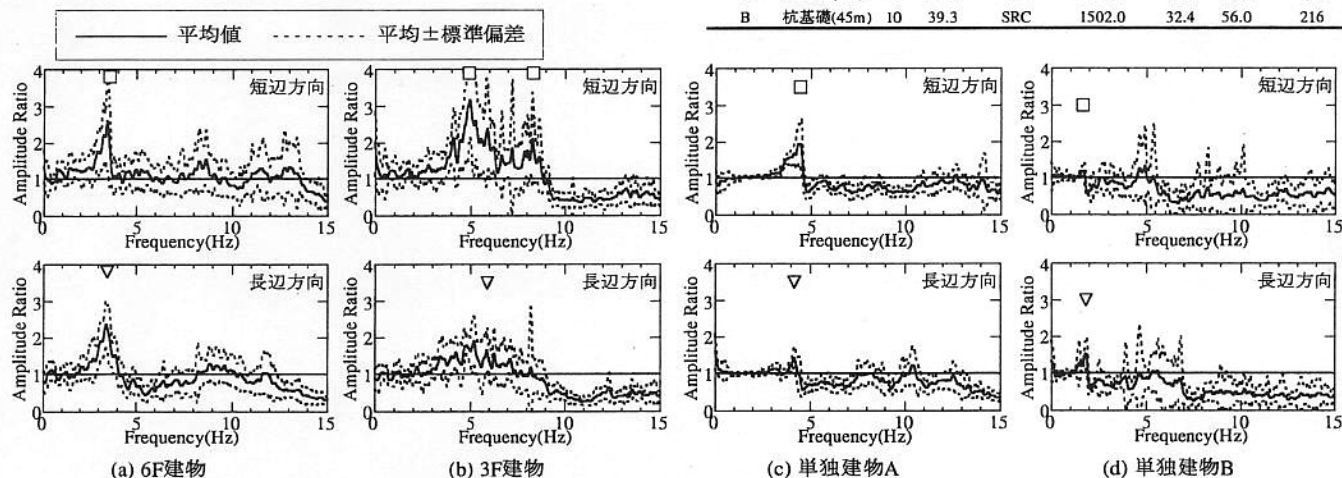


図8 強震時のGL-1mに対する1Fのフーリエスペクトル比の平均値と標準偏差（上段から短辺方向，長辺方向）

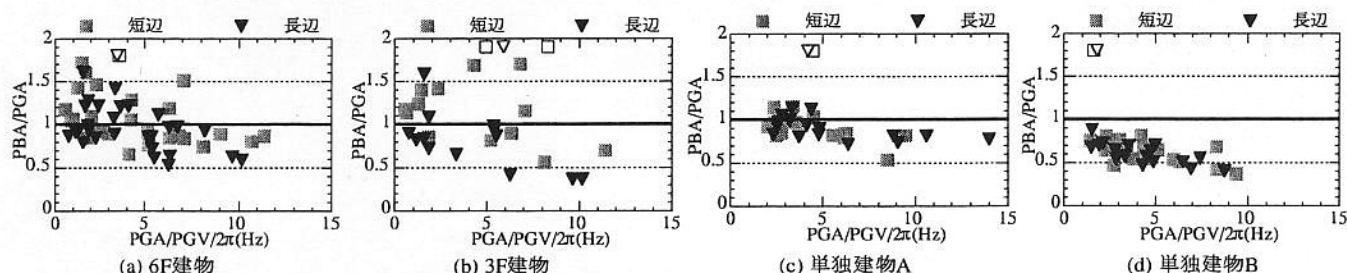


図9 地震動の卓越振動数と基礎有効入力動（加速度比）の関係

5. 有効入力動

対象建物は、隣接した2棟の中低層建物であり、その振動特性は建物と地盤との動的相互作用の影響と隣接建物間相互作用の2つの影響を受けている。そこで、対象建物及び同キャンパス内で強震観測を行っている単独建物2棟の強震観測結果と合わせて入力動の低減効果を検討し、基礎有効入力動に及ぼす隣接建物間相互作用の影響について考察する。なお、基礎有効入力動は建物基礎と自由地盤地表面の動きとの比で定義した⁶⁾。単独建物2棟は、対象とする隣接建物の約240m南に位置するA（名古屋大学工学部4号館）と約300m西に位置するB（同工学部新1号館増築前）である。建物の概要¹³⁾を表1に示す。表中の平均 V_s (m/s)は、地盤のN値から推定した深さ10mまでの平均 V_s である¹⁴⁾。

用いた強震記録は6F建物が28記録、3F建物が13記録、単独建物Aが18記録、単独建物Bが17記録である。それぞれGL-1mで1Gal以上の記録である。各記録をアンサンブル平均して求めたGL-1mに対する1階（1F）のスペクトル比の平均値と平均値士標準偏差を図8に示す。各記録とも建物—地盤連成系固有振動数（図中□、▽）付近で増幅が見られる。しかし、3F建物のみ振動特性が異なっており、短辺方向は5Hzと8Hz付近で卓越しスペクトル比のばらつきが大きく、9Hz以降で基礎有効入力動の低減が見られる。

地震動の周期特性と基礎有効入力動について考察する。GL-1mの観測最大加速度（PGA）と観測最大速度（PGV）から等価卓越振動数 $PGA/PGV/2\pi$ を求めた。PGAと建物1Fの観測最大加速度（PBA）の比

表1 建物概要

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 V_s (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
A	杭基礎(6m)	4	17.9	RC	1155.0	15.4	75.0	244
B	杭基礎(45m)	10	39.3	SRC	1502.0	32.4	56.0	216

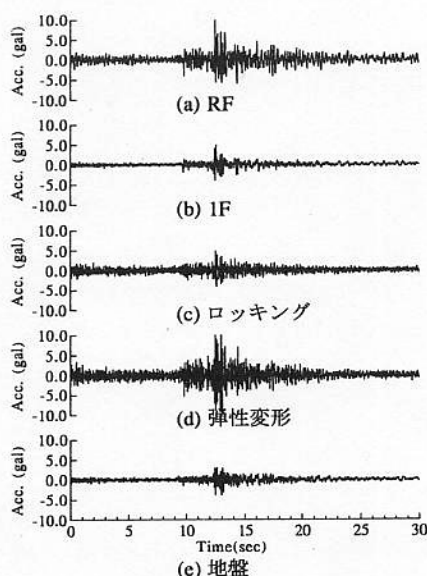


図10 強震記録の6F建物の観測加速度波形 短辺方向

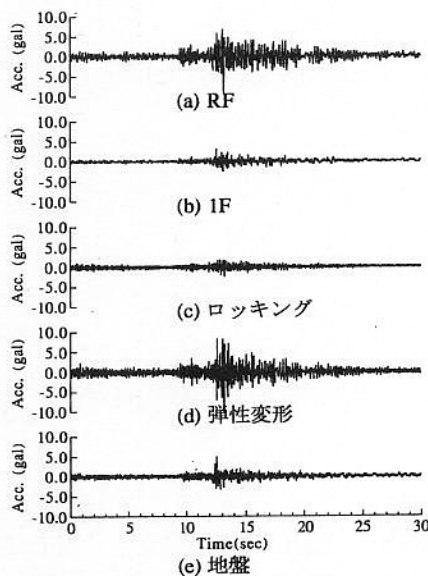


図11 強震記録の6F建物の観測加速度波形 長辺方向

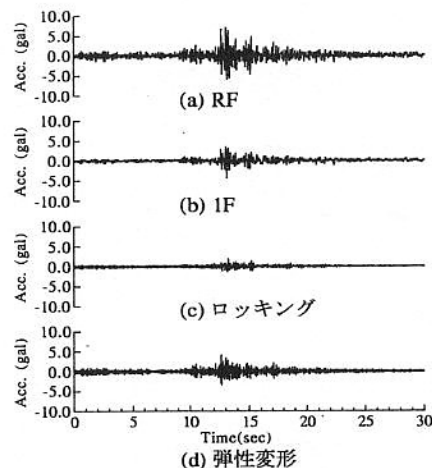


図12 強震記録の3F建物の観測加速度波形 長辺方向

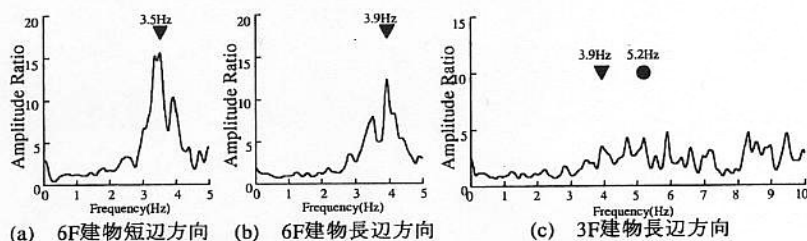


図13 強震記録のフーリエスペクトル比 (RF/GL)

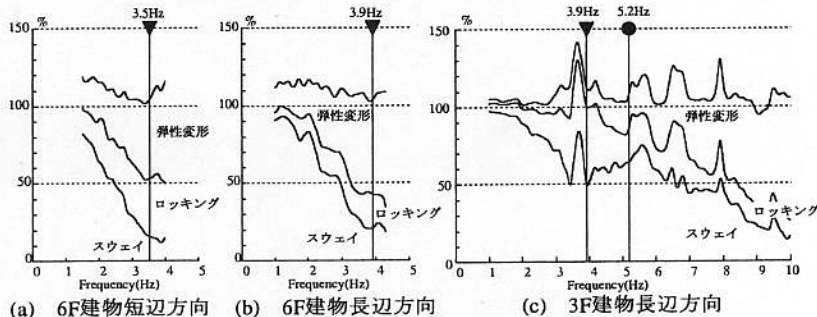


図14 強震記録のフーリエスペクトル振幅から求めた スウェイ・ロッキング・弾性変形率

から求めた基礎有効入力動PBA/PGAとPGA/PGV/2 π の関係を図9に示す。隣接建物では両棟とも有効入力動が増幅している記録が多く、特に3F建物で顕著で、両棟の固有振動数付近で乱れが大きい。これに対して、単独建物A、Bでは建物の固有振動数を超えると入力損失効果が見られ、より規模が大きく地盤が軟弱な建物Bで入力損失効果が大い。

以上、単独建物では、建物と地盤との動的相互作用による入力動の低減効果が明確に認められるが、隣接建物が存在する場合には、隣接建物間で相互に影響を及ぼし、低減効果を明瞭に見込みにくい結果となった。特に、地震動の等価卓越振動数と建物の固有振動数が近接するときに変動が大きくなっている。この結果は、隣接して建物が存在する場合が多い都市部では、耐震設計において、安易に入力損失効果を見込むことの危険性を示唆している。

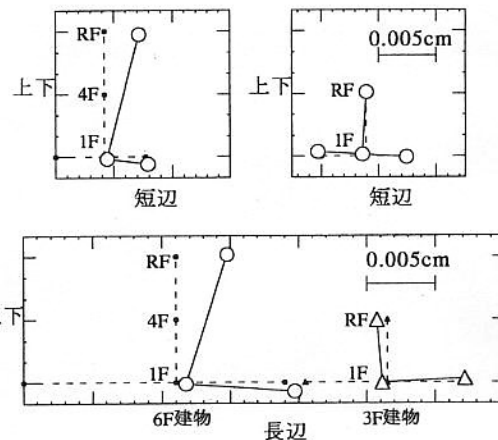


図15 強震時の時刻歴波形から求めた 6F建物屋上最大応答値発生時刻のモード形

6. 建物応答の並進・ロッキング・弾性変形の割合

並進・ロッキング・弾性変形を分離できる観測体制となった以降に記録された2000年6月5日福井県嶺南地方地震 (M4.7, D10km, Δ 105km) の記録を用いてモード形の検討を行う。前述のように3F建物の短辺方向では複数入力システムの影響が顕著に認められたため、6F建物2方向と3F建物長辺方向のモード形の検討を行う。分析にあたり、スウェイ成分は地動も含む1F成分とし、ロッキング成分は1Fのロッキング角 $\times$ 建物高さ (ロッキングによる屋上位置での水平成分) とした。6F建物の短辺方向と長辺方向、3F建物の長辺方向のRF・1F・ロッキング・弾性変形・地盤の観測加速度波形を図10、図11、図12に示す。波形から、6F建物では両方向とも弾性変形の占める割合が大きいことがわかる。また、長辺方向と比べて短辺方向でロッキングが励起されている。

図13にRFとGLのフーリエスペクトル比を示す。図14にスウェイ率・ロッキング率・弾性変形率を各振動数毎に累積で示す。これらは、屋上における加速度時刻歴を基礎のスウェイ・ロッキング成分と

建物の弾性変形成分に分けて、屋上のフーリエスペクトル振幅 (Parzen ウィンドウ 0.3Hz) に対するスウェイ・ロッキング・弾性変形の各フーリエスペクトル振幅の比から求めている。1Hz以下では地盤の動きに十分な振動成分がなく、分解能が不足しているため、1Hz以降で各部がほぼ同位相となる振動数範囲で結果を示す。ただし、各成分間は若干の位相差があるために和が100%を越えている。図中にRF/GLの卓越振動数を6F建物▼、3F建物●で示す。両方向ともに、6F建物の卓越振動数より長周期域ではスウェイが支配的であり、卓越振動数に近づくにつれ、スウェイの割合が減少し、弾性変形の割合が増加する。長辺方向に比べ短辺方向でロッキングの割合が大きいのは、平面形状によるロッキング抵抗の差のためと考えられる。また、6F建物と比べて3F建物の方がスウェイの占める割合が大きい。低層の3F建物では6F建物と比べて弾性変形率が小さく、剛体的に挙動している。

6F建物の卓越振動数 (短辺方向3.5Hz、長辺方向3.9Hz) を中心とするバンドパスフィルター (幅0.5Hz) をかけた変位波形から6F建物屋上が最大応答値となる時刻のモード形を図15に示す。短辺方向では両建物で多少位相差があるものの同位相でロッキングしているが、長辺方向ではロッキングが逆位相で生じ、両建物がおじぎをするモードが認められる。これらの結果は、規模の小さい3F建物が6F建物の影響を受けていることを示している。

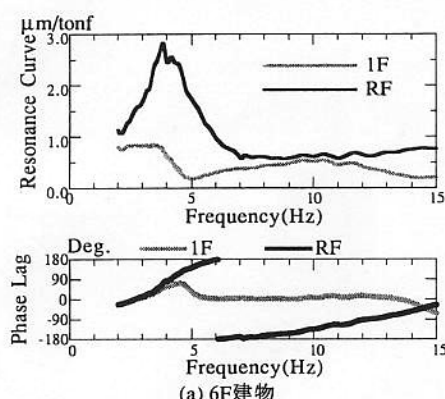
7. 強制振動実験記録の分析

6F建物1Fの振動台を長辺方向 (隣接方向) に加振した強制振動実験から、6F建物の固有振動特性と、6F建物が3F建物に及ぼす影響について検討する。図16に長辺方向の共振曲線と位相遅れを示す。6F建物RFでは4Hz付近にピークが認められる。この振動数では3F建物には明

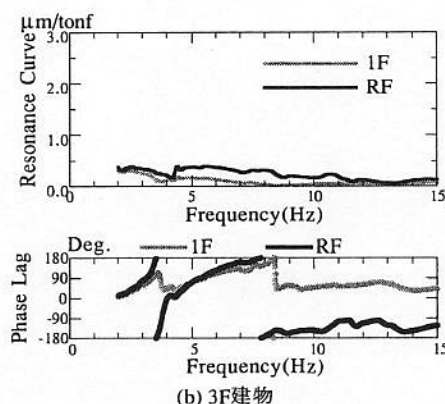
瞭なピークは認められないが、位相は大きく変動しており、6F建物の影響が3F建物に及んでいる。図17に短辺方向の1F並進と1F・RFねじれの共振・位相曲線を示す。ここで、ねじれはねじれ角×長辺方向の基礎半幅から求めている。6F建物の短辺方向1F並進と1Fねじれの応答振幅はほぼ同レベルであることが分かる。6F建物のRFねじれは4-5Hz付近にピークが認められる。これは、並進に伴い生じたねじれ動の卓越と考えられる。6F建物のRFねじれの卓越振動数は、図4(c)に生じた3F建物短辺方向RF/GLの5Hzの卓越振動数と対応する。図18に1F上下動と短辺軸まわりの屋上位置でのロッキングの共振・位相曲線を示す。6F建物のロッキングは長辺方向並進応答のピーク振動数とほぼ同じ3.9Hz付近で卓越しており、長辺方向並進成分と連成している。3F建物では3.5Hz付近に小さなピークを持つ。長辺方向加振にもかかわらず短辺方向1F並進と1F上下動が励起される原因として、加振位置が偏心していること、南側が崖であること、隣接建物の影響で基礎のねじれ中心やロッキング中心が単独建物の場合よりずれたことなどが考えられる。

図19に長辺方向のフーリエスペクトル振幅から求めたスウェイ率・ロッキング率と弾性変形率を示す。加振振動数の2Hz以降で各部の位相が同位相の範囲で示す。ここでは、1F成分をスウェイ成分としており、前述の強震記録のスウェイ率・ロッキング率・弾性変形率とは厳密には対応していない。共振曲線の卓越振動数3.9Hzを▼、RF/1F卓越振動数の6F建物4.9Hzを●で図中に示す。強震記録 (図14(b)) とよく対応した変形率を示しており、振動数の増加と共にスウェイが減少し弾性変形が増加する。3.9Hzで弾性変形が5割を占め、スウェイ・ロッキング率はほぼ同じ割合となっている。

図20に6F建物の共振曲線卓越振動数3.9Hz加振時の変位モード形を

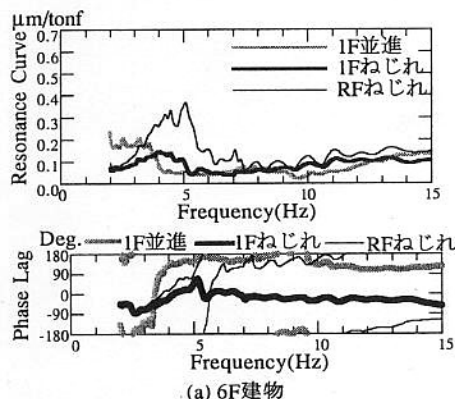


(a) 6F建物

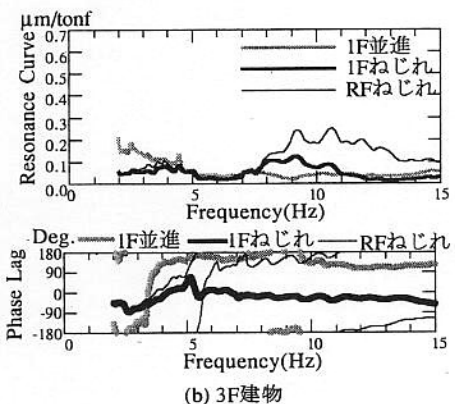


(b) 3F建物

図16 強制振動実験時の長辺方向の共振・位相曲線

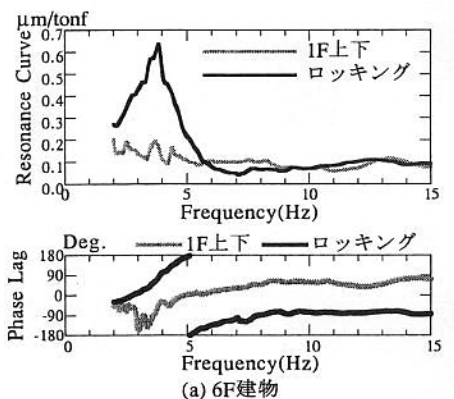


(a) 6F建物

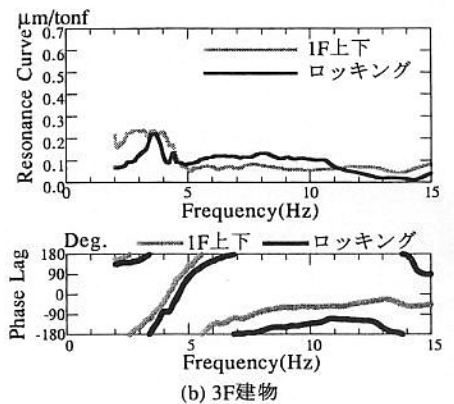


(b) 3F建物

図17 強制振動実験時の短辺方向1F並進と1F・RFねじれの共振・位相曲線



(a) 6F建物



(b) 3F建物

図18 強制振動実験時の1F上下とロッキング成分の共振・位相曲線

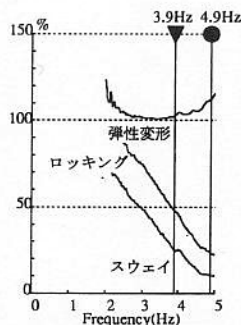


図19 強制振動実験の6F建物長辺方向
スウェイ・ロッキング・弾性変形率

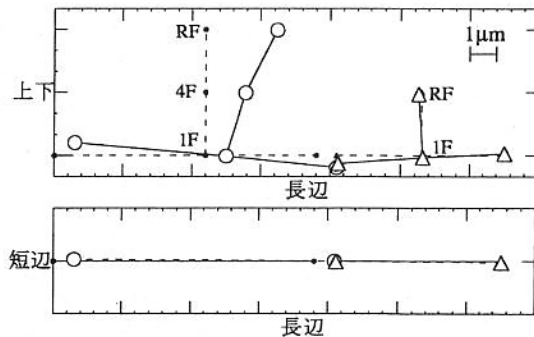


図20 強制振動実験の6F建物共振線卓越振動数 (3.9Hz) の変位モード形

示す。バンドパスフィルター（中心3.9Hz、幅0.5Hz）をかけた波形から変位を求めている。強震観測時（図15）と同様に、2棟のロッキングが逆位相で励起されており、上下方向は隣接位置で2棟が同方向に動いている。3F建物の平面形状が正方形に近いことも長辺方向のロッキングが励起されやすい因と考えられる。また、図20下の平面モード図から、基礎位置では平面的にねじれや並進が殆ど励起されていないことが分かる。以上の結果から、ロッキングによる6F建物から3F建物への力の伝達が考えられる。

8. 基礎固定系の振動特性

強震記録、強制振動実験と常時微動記録の振動特性の差異について検討する。

図21、図22に福井県嶺南地方地震、強制振動実験と常時微動記録の長辺方向のRF/1F、RF/(1F+H0)、H0/1F、RF/GL（強制振動実験除く）の伝達関数推定結果を示す。水平入力を仮定すると、RF/1Fはスウェイのみ拘束した系、RF/(1F+H0)はスウェイとロッキングを拘束した

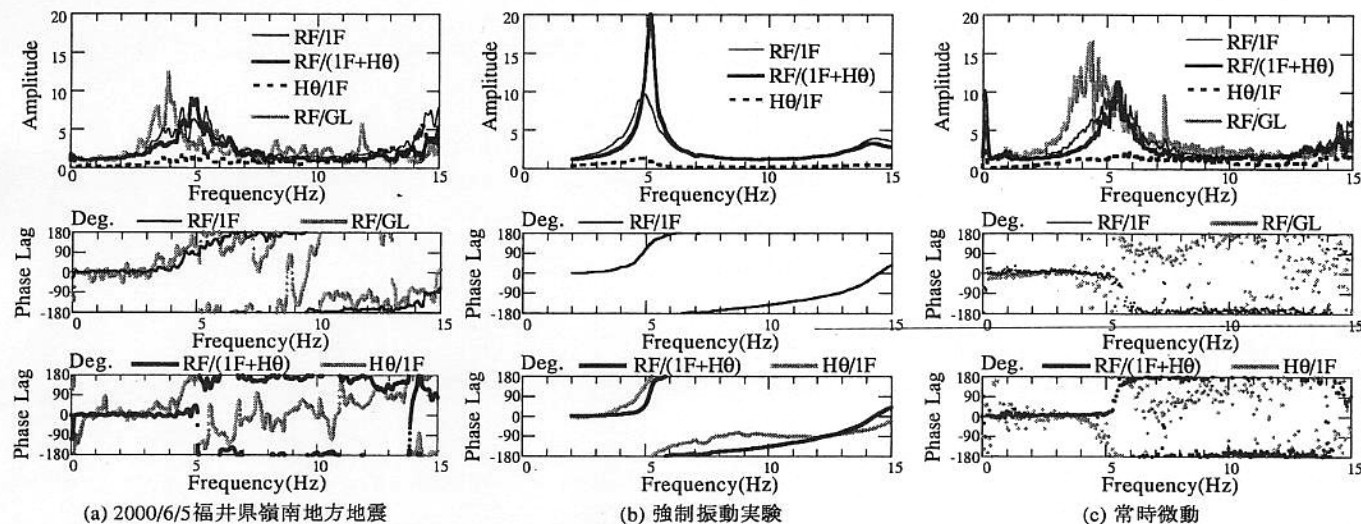


図21 強震記録、強制振動実験、常時微動記録の6F建物長辺方向の伝達関数（上から振幅・位相）

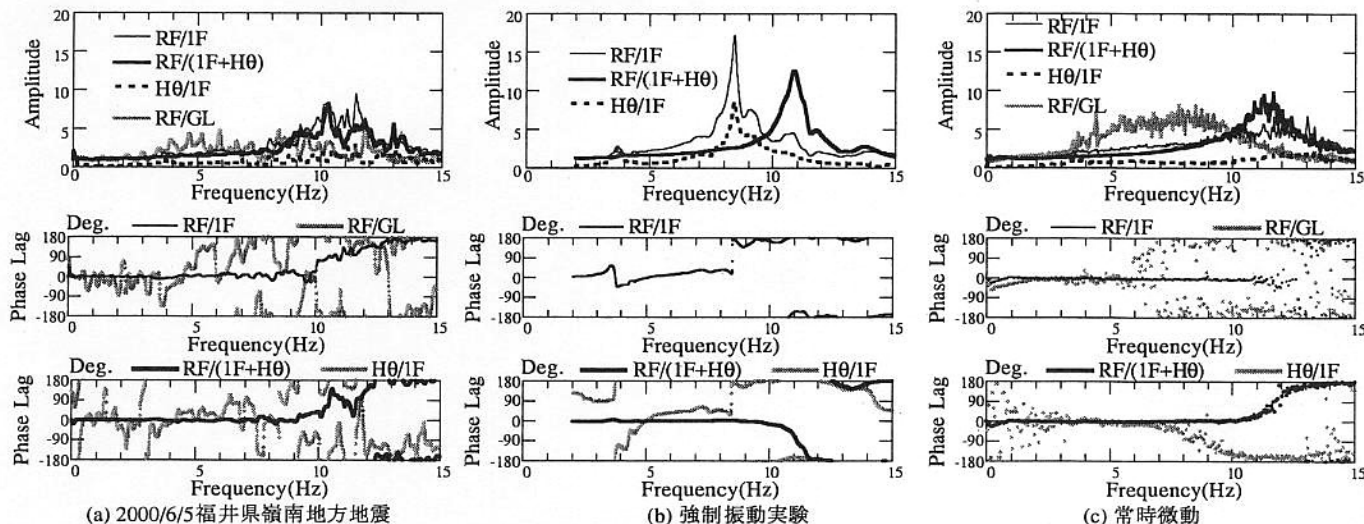


図22 強震記録、強制振動実験、常時微動記録の3F建物長辺方向の伝達関数（上から振幅・位相）

1次の基礎固定系に対応する。なお、Hは逆三角形の1次モードから求めた等価高さであり、基礎の転倒モーメントを等価にして求めている(6F、3F建物の各Hは全高さの7/9、13/18)。

まず、6F建物については、RF/1Fでは強制振動実験、常時微動と強震観測いずれの記録も振幅は5Hz付近にピークを持つ。しかし、常時微動のみ位相が逆になっている。これに対し、ロッキングも拘束したRF/(1F+H0)では3つの記録ともピーク振動数がやや上昇し、常時微動でも位相が他と同じ向きになる。通常、伝達関数推定では振動システムの入力を水平成分のみであると仮定する。しかし、常時微動では、レーリー波のように平面的に位相差のある上下動が卓越する。八木ら¹⁵⁾が指摘しているように、常時微動を用いた伝達関数推定は、レーリー波に伴う回転入力動が支配的であるために容易ではない。回転応答に伴う水平応答と水平入力動に伴う水平応答の位相が異なるため、回転動が卓越する常時微動時に、回転動の考慮の有無により伝達関数の位相の差が顕著となる。

図22の3F建物では、強制振動実験の場合のみRF/1Fで8.4Hzに鋭いピークが見られる。同じ振動数でH0/1Fがピークを持っていることから、ロッキングにより励起されたモードと判断した。表面波が卓越すると考えられる常時微動でもロッキング動を考慮することにより、強震観測とよく対応した基礎固定系の伝達関数が得られており、上部構造の振動システムの推定が可能となった。従って、常時微動観測における基礎のロッキング動の重要性が分かる。なお、強制振動実験の3F建物では位相特性が異なる結果となったが、6F建物に振源があり入力機構が複雑になったためと考えられる。この点については今後より詳細な検討が必要と考えている。RF/GLの伝達関数は、隣接建物の卓越振動数で変動している。一方、3種類の記録ともスウェイとロッキングを拘束した基礎固定系の伝達関数では、隣の建物の卓越振動数で変動しておらず、上部構造間で直接的に隣接建物の影響を受けていないことが示唆される。

9. まとめ

強震観測、強制振動実験と常時微動計測に基づき隣接する中低層建物の振動特性について考察した。強震観測記録の分析では、地動が3Gal以上の地震動記録から求めた平均的な特性を伝達関数から検討した。さらに、入力地震動の周期特性により低層の3F建物の振動システムが異なることを、隣接建物の存在と複数入力の考察から説明した。次に、得られた全強震記録から地震動の卓越振動数と基礎有効入力動の関係について検討した。また、並進・ロッキング・弾性変形を分離した分析も行った。強制振動実験では、共振曲線・モード形の検討をし、強震観測結果との比較を行った。さらに、基礎固定系の振動特性について、強震、強制振動実験と常時微動の3種類の推定結果の比較検討をした。得られた知見を以下に示す。

1) 建物-地盤連成系では、6F建物は明瞭な卓越振動数を示すが、3F建物は短辺方向で地震動の周期特性によって伝達関数に変化し、長辺方向は明瞭な卓越を示さなかった。

2) 3F建物短辺方向の伝達関数が地震動の卓越振動数によって変化する原因として、南側の崖が長辺方向の地盤震動の差を生み出し、その結果生じたねじれ動入力が6F建物のねじれ応答を励起し、さらに地盤を介して3F建物短辺方向の応答に影響を与えていると考察され、隣接建物を介した複数入力の存在が示唆される。

3) 単独建物では、建物と地盤との動的相互作用による基礎有効入力動の低減効果が認められるが、隣接建物が存在すると、隣接建物間で相互に影響を及ぼすために、入力地震動の周期特性により、入力の低減効果が変動する。特に地震動の等価卓越振動数と建物の固有振動数が近接するときに変動が大きくなった。

4) 強震観測と強制振動実験の6F建物長辺方向の卓越振動数でのモード形から、両建物の長辺方向(隣接する方向)のロッキングがほぼ逆位相で励起されること、強制振動実験から隣接位置で両建物の上下動は同じ動きをすることが確認された。ロッキングによる6F建物から3F建物への力の伝達が考えられる。

5) スウェイ・ロッキングを考慮して基礎固定時の上部構造の振動特性を推定することにより、強震観測・強制振動実験・常時微動の3種類の記録でよく対応した振動システムを推定することができた。3種類の記録ともに基礎固定系では隣接建物の影響が認められないことから、上部構造を介した力の伝達はないと考えている。

謝辞

本論文で用いた強制振動実験、常時微動計測に当たり、名古屋大学・中野優助手、名古屋大学・美原義正技官、叶健氏(現:千代田設計)、片山貴裕氏(現:NTTファシリティーズ)、八木茂治氏(現:飯島建築事務所)、名古屋大学工学研究科建築学専攻構造設計工学講座の学生諸氏にご協力を頂きました。ここに、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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, 大阪大学学位論文, 1983
- 2) 林田敏弘: 建築物を支持する杭の地震時の応力ならびに力の伝達機構に関する実証的研究, 東北大学学位論文, 1988
- 3) 北田義夫, 廣谷勉, 井口道雄: 複数建屋の隣接効果に関するモデル試験, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 2415-2420, 1998
- 4) 鈴木篤, 北田義夫, 井口道雄, 谷野達夫, 内藤幸雄: 地震観測に基づく構造物の隣接効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 337-338, 2000
- 5) 大場新太郎, 矢島啓利: 入力加振による隣接建物の動的相互作用, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. 1405-1410, 1994
- 6) 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考察, 日本建築学会構造系論文集, 第512号, pp. 111-118, 1998.10
- 7) 中井正一, 福和伸夫: 埋込み剛基礎の動特性に基づく動的擬似3次元効果の考察 境界要素法による動的擬似3次元効果に関する研究(その2), 日本建築学会構造系論文集, 第380号, pp. 56-66, 1987.10
- 8) 吉田一博, 川瀬博: 埋設された剛構造物相互の連成振動, 第7回日本地震工学シンポジウム, pp. 1045-1050, 1986
- 9) 今村晃, 羽場崎淳, 石崎萬平, 渡辺孝英, 源栄正人: 埋込みを有する複数建屋の地震応答性に関する研究(その2) 建屋連成埋込み効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 463-464, 1990
- 10) 叶健, 八木茂治, 飛田潤, 福和伸夫: 隣接する6階建・3階建RC造建物の地震応答特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 341-342, 1999
- 11) 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隣接中低層建物の強制振動実験, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第38号, pp. 173-176, 2000
- 12) 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, B-2, pp. 339-340, 2000
- 13) 福和伸夫他: オンライン強震観測・地震被害想定・振動実験システムの構築, 日本建築学会技術報告集, 第3号, pp. 41-47, 1996
- 14) 福和伸夫, 荒川政知, 小出栄治, 石田栄介: GISを用いた既存地盤資料を活用した都市域の動的な地盤モデル構築, 日本建築学会技術報告集, 第9号, pp. 249-254, 1999
- 15) 八木茂治, 飛田潤, 福和伸夫: 常時微動計測による低層RC造建物の伝達関数に地盤・建物動的相互作用が及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.435-444, 2000

(2000年10月10日原稿受理, 2001年2月27日採用決定)