

3.2.5 超高層建物の強震観測による損傷評価を視野に入れたモニタリング技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

南海トラフの巨大地震などにより、首都圏・大阪・名古屋等の大規模堆積平野上では長周期成分が卓越した地震動が予想される。この際に多大な影響を受けることが想定される高層建物の耐震性能評価および被害軽減を目指して、本課題では、地震後における構造安全性や補修の可否などを適切に判断するための構造躯体の損傷モニタリング技術に関する基礎的検討を目的とする。具体的には、高層建物に一般的に設置されている強震計等の観測機材を利用し、加速度記録による構造躯体の損傷評価手法の提案、および強震計を用いた構造モニタリングの可能性などの検討を行う。

(b) 平成 23 年度業務目的

平成 23 年度に実施する E-ディフェンス実規模実験などにおいて、一般的な強震計等の観測機器による高層建物の強震応答モニタリング、損傷モニタリングの基礎技術を開発する。また、微動計による長期の比較観測などにより実際のシステムの技術的課題も取りまとめる。具体的な検討項目と達成目標は以下の通りである。

- 1) E-ディフェンス RC・PC 試験体に設置した強震計の加速度記録から、基本的な応答特性、固有振動特性、層間変形、層の履歴特性や構造損傷評価法の有効性を検証する。
- 2) E-ディフェンス高層建物室内被災の試験体について同様の検証を行う。
- 3) 強震計を用いた長期構造モニタリングと損傷評価について、微動計との比較、光ファイバセンサの併用なども含めて業務期間全体の成果を集約し、実際の観測システムの技術課題を取りまとめて実用化の資料とする。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻	教授	福和伸夫
名古屋大学 災害対策室	教授	飛田 潤
名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻	准教授	護 雅史

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 22 年度に実施した E-ディフェンスの RC・PC 試験体振動実験について、多数の強震計を設置して観測したデータの分析を進めた。特に、これまで S 造高層建物試験体で検証してきた建物応答特性、層の弾塑性履歴特性、繰り返し加振による損傷の評価などの技術を適用し、その有効性を確認した。また今年度を実施した高層建物の室内状況試験体において強震計による観測を行い、上記と同様の技術の検証を行った。最後に、5 年間の業務期間全体で得られた観測体制・分析技術の知見を簡潔にまとめ、強震計を中心に常時微動計や光ファイバセンサなどを併用した実際の観測・モニタリング体制の到達点と技術的課題を整理して、実用化の資料とした。

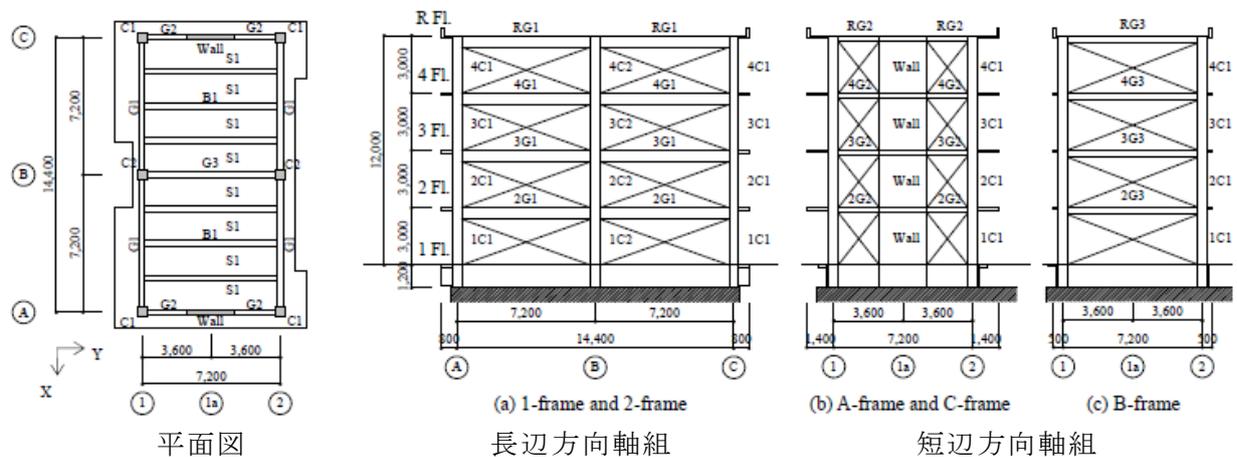
(b) 業務の成果

1) コンクリート系構造物の強震観測と損傷評価

a) 実験と計測の目的と概要

本業務では、これまでに S 造高層建物試験体を対象とした 2 回の E-ディフェンス実験において、加速度計による観測・損傷評価の検討を進めてきた。結果として、固有振動特性の評価による構造全体のモニタリングと、層の弾塑性挙動の評価による特定層の損傷評価の両面で実用的な成果を得ている。また昨年度には、実在の中層 PC 造建物について、小地震の記録から同様の評価の可能性を検討した。これらの成果を受けて、本項では、RC 造および PC 造試験体が著しい構造損傷を受ける場合に、S 造と同様の強震観測体制でどの程度のモニタリングや損傷評価を行いうるか検証する。

対象は、平成 22 年度に実施された 4 階建 RC 試験体と PC 試験体の同時加振実験である。試験体の写真及び概要を図 1 に示す。この実験の本来の目的、試験体の詳細などは文献 1) に譲る。



RC 試験体と PC 試験体の外形はほぼ同一
 長辺方向：純ラーメン、7.2m×2 スパン
 短辺方向：耐震壁付ラーメン、7.2m×1 スパン
 階高 3.0m、軒高 12m



図 1 試験体概要¹⁾

本業務は強震計によるモニタリングを目的としているため、独自の強震計を多数設置した。強震計の配置を図 2 に示す。用いた強震計はこれまでに本業務で使用し、性能や特徴を十分把握しているもので、スタンドアロン型が 2 種 (Kinematics ETNA、K-NET95)、ネットワーク接続型が 1 種 (SU102) である。

表 1 に加振スケジュールを示す。加振 No.1~7 が初日、8~10 が 2 日目、11~15 が 3 日目に当たる。JMA 神戸波を徐々にレベルを上げて入力しており、その前後にホワイトノイズ加振で試験体の振動特性の変化を確認している。3 日目は損傷状況を確認の上で JR 鷹取波に変更している。入力波の加速度波形と応答スペクトルを図 3 に示す。

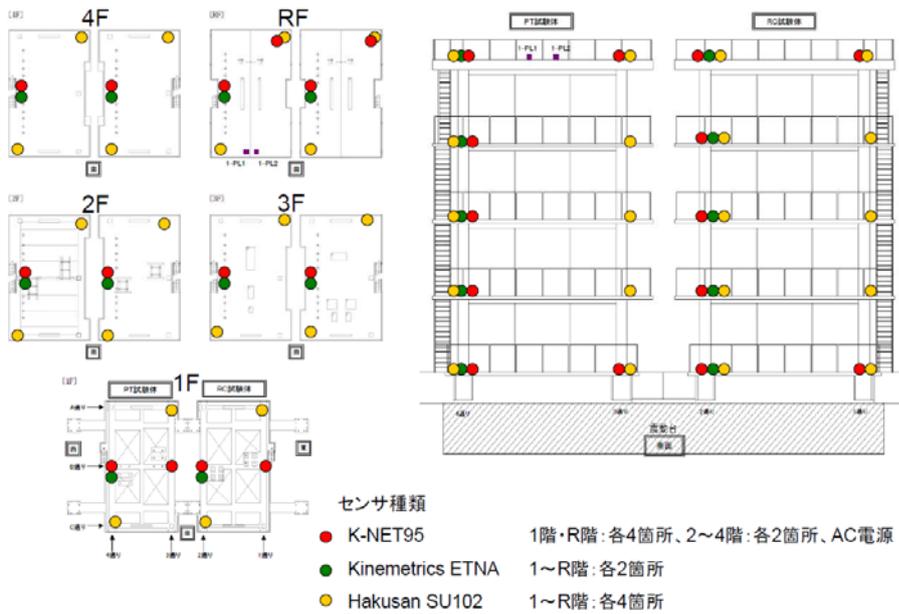


図2 強震計の配置

表1 加振波

No.	Input Wave
1	ホワイトノイズ
2	JMA神戸波 10%
3	ホワイトノイズ
4	JMA神戸波 25%
5	ホワイトノイズ
6	JMA神戸波 50%
7	ホワイトノイズ
8	ホワイトノイズ
9	JMA神戸波 100%
10	ホワイトノイズ
11	ホワイトノイズ
12	JR鷹取波 40%
13	ホワイトノイズ
14	JR鷹取波 60%
15	ホワイトノイズ

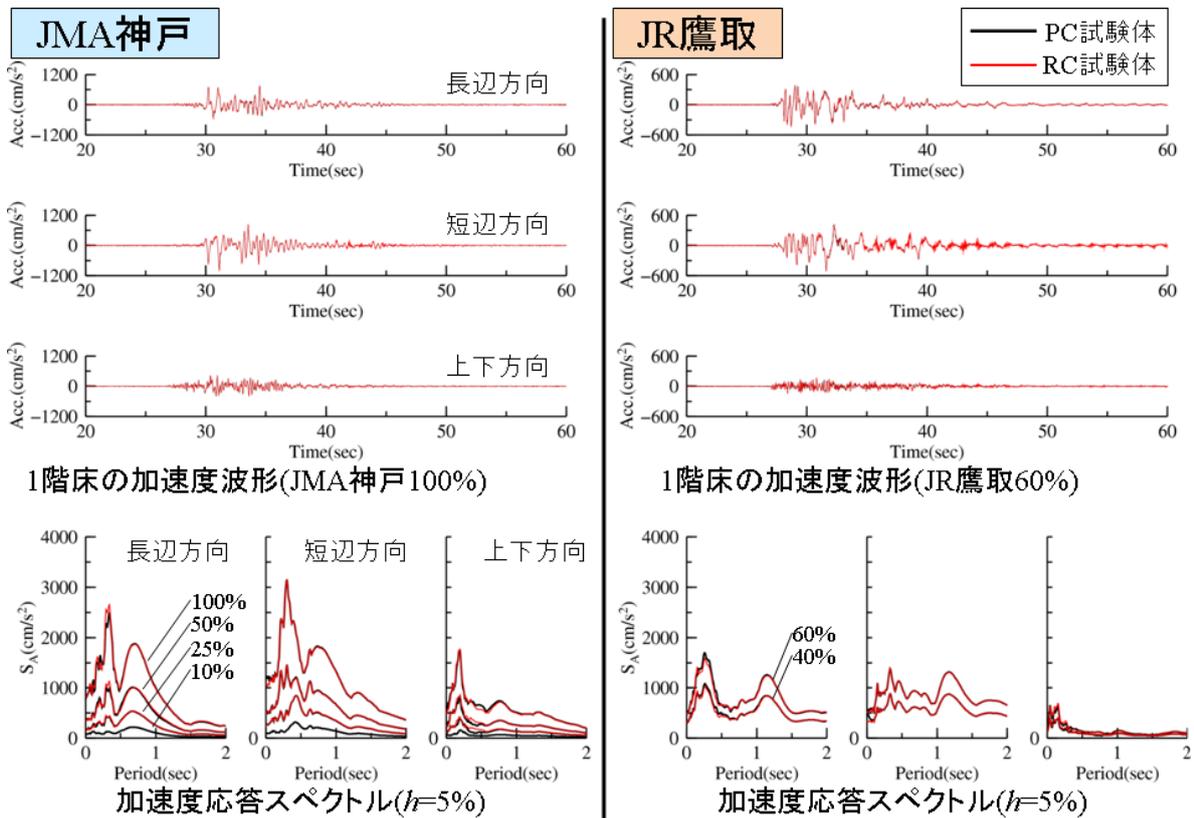


図3 入力波の加速度波形と応答スペクトル

図4に加振終了後の試験体の状況を示す。どちらの試験体も構造躯体に顕著な損傷が見られており、柱脚や壁脚のコンクリート圧壊、主筋座屈や破断、柱頭のせん断破壊のほか多数のクラックが見られる(被害の詳細は文献1)参照)。RC試験体の長辺方向では、過大な層間変形による倒壊を防止するために約15cmの間隔で設けられた鋼製のフレームが、加振時に接触して変形した形跡が見られた。

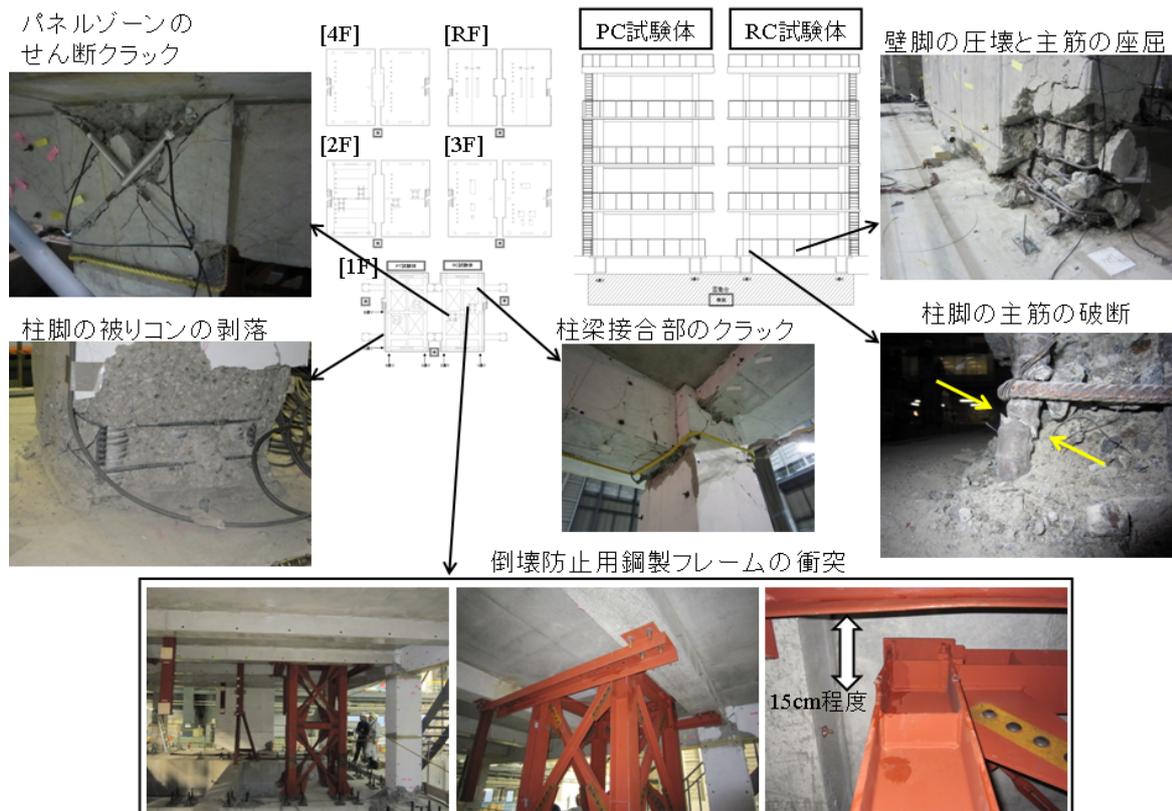


図4 加振終了後の試験体の状況

b) 試験体の振動特性の評価

ここでは普及型の強震計（Kinematics ETNA）で観測した結果を用いる。これまでの本業務で詳細に検討してきたように、スタンドアロン型地震計で観測された記録の時刻あわせを考慮した振動分析手法を用いている。この点が、一般的な強震計による簡易な計測体制を前提とした本業務の方法の特徴である。なお、図2に示す他の強震計や、防災科研の加速度計の記録でもほぼ同様の結果が得られることを確認している。

図5に、RC・PC試験体のホワイトノイズ加振の伝達関数の変化を示す。これより、どちらの試験体も地震波の加振を繰り返し受けることにより、その前後で固有振動数が大きく低下することが分かる。これらのホワイトノイズ加振記録から、水平2方向の連成を考慮したシステム同定手法^{2),3)}により推定した1次固有振動数と減衰定数の変化を図6に示す。伝達関数から読み取れる傾向と同様に、地震波加振を繰り返し受けて固有振動数が低下しており、加振前に比べてRC試験体では約50%前後、PC試験体でも60%前後となっている。減衰定数はばらつきが大きいですが、RCでは損傷が進むと減衰も増加傾向にある。ホワイトノイズ加振のレベルはほぼ一定であるので、試験体が損傷を受けることによる剛性や減衰の変化を捉えていると考えられる。これまで本業務で扱ってきた鉄骨造高層建物試験体に比べ、損傷による固有振動特性の変化が顕著である。なお、地震波加振時の波形でも同様の手法により分析できるが、構造躯体の顕著な非線形性を含むため、より変動の大きい結果となる（図は省略する）。

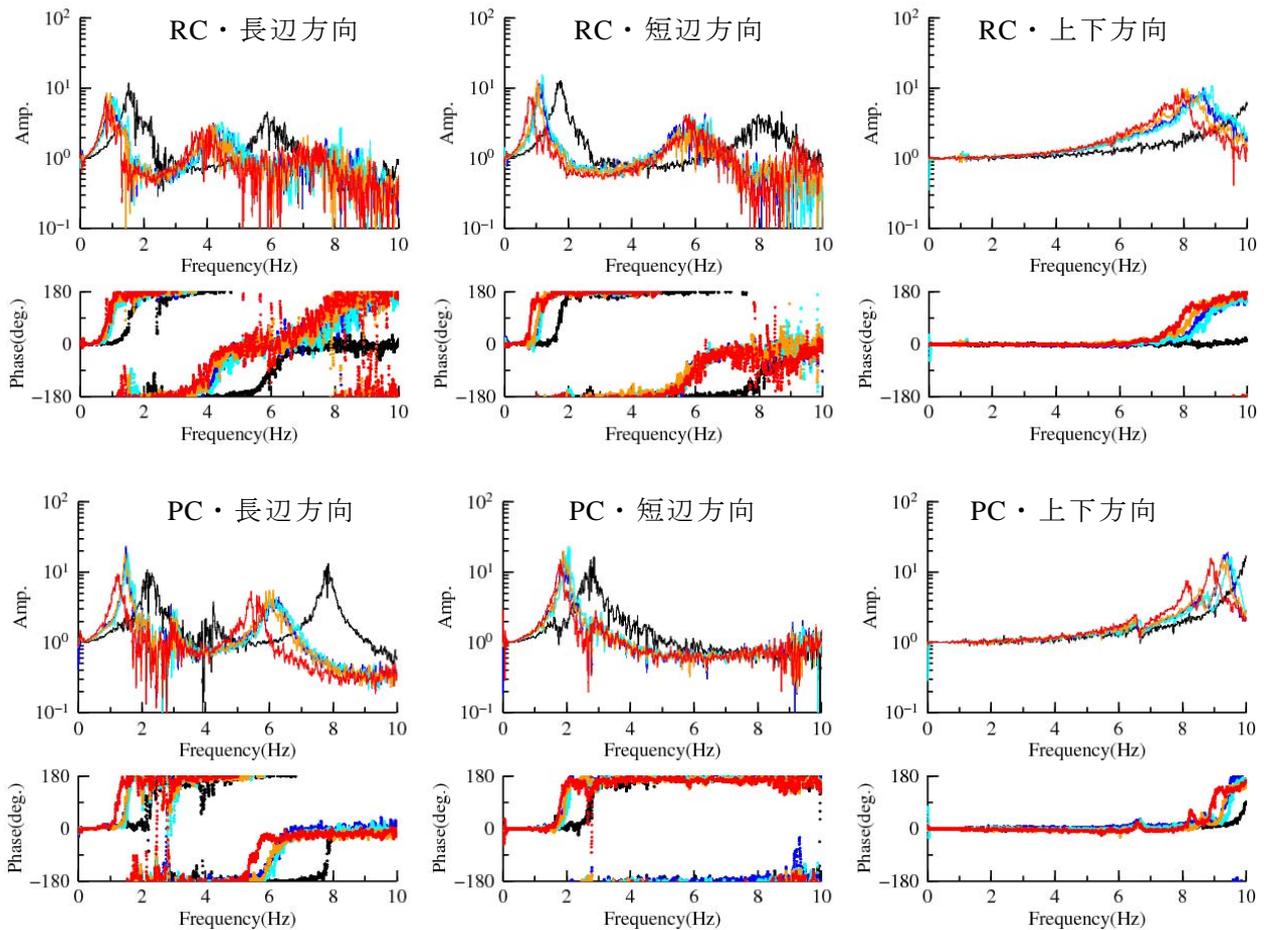


図5 繰り返し加振を受ける試験体の伝達関数の変化
3回の大振幅地震波加振の前後の小振幅ホワイトノイズ加振の結果

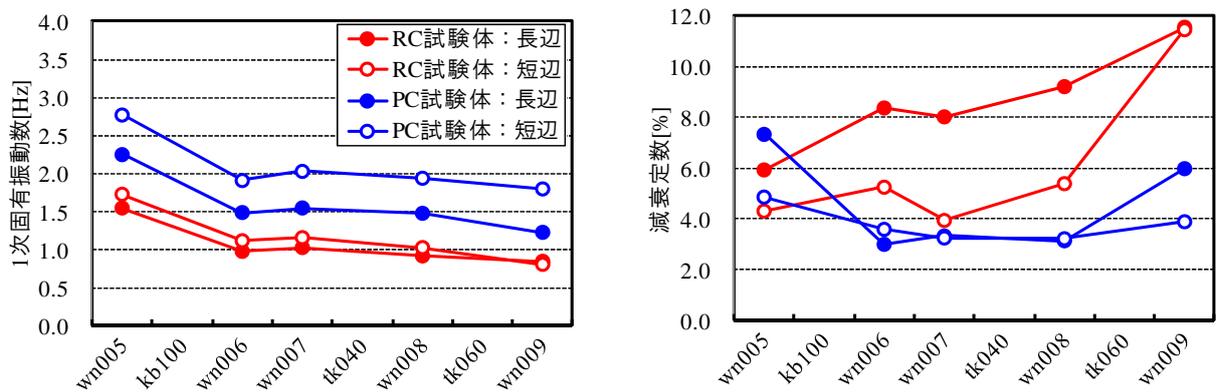
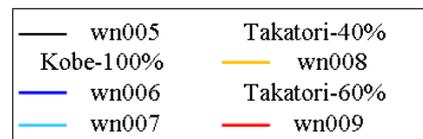


図6 繰り返し加振を受ける試験体の固有振動数と減衰定数の変化
3回の大振幅地震波加振の前後の小振幅ホワイトノイズ加振の結果

c) 試験体の層間変形と層復元力特性の評価

前項で扱った固有振動特性は構造全体の特性を反映したものであり、より詳細に損傷位置や程度を把握するためには層間変形や層復元力特性を評価することが有効である。本業務では時刻同期されていない強震計による簡易な観測体制の加速度記録から、時刻あわせと2回積分により絶対変位応答と層間変形を精度よく推定する手法を開発してきた。今回の試験体について各加振ケースの最大層間変形角を求めた結果を図7に示す。相対変位計による計測結果と比較して、加速度記録の積分による方法は十分な精度であることが分かる。ただし、特にRC試験体で、変形が大きくなった場合に加速度計のほう若干小さい値となる傾向があり、追加検討を要する。

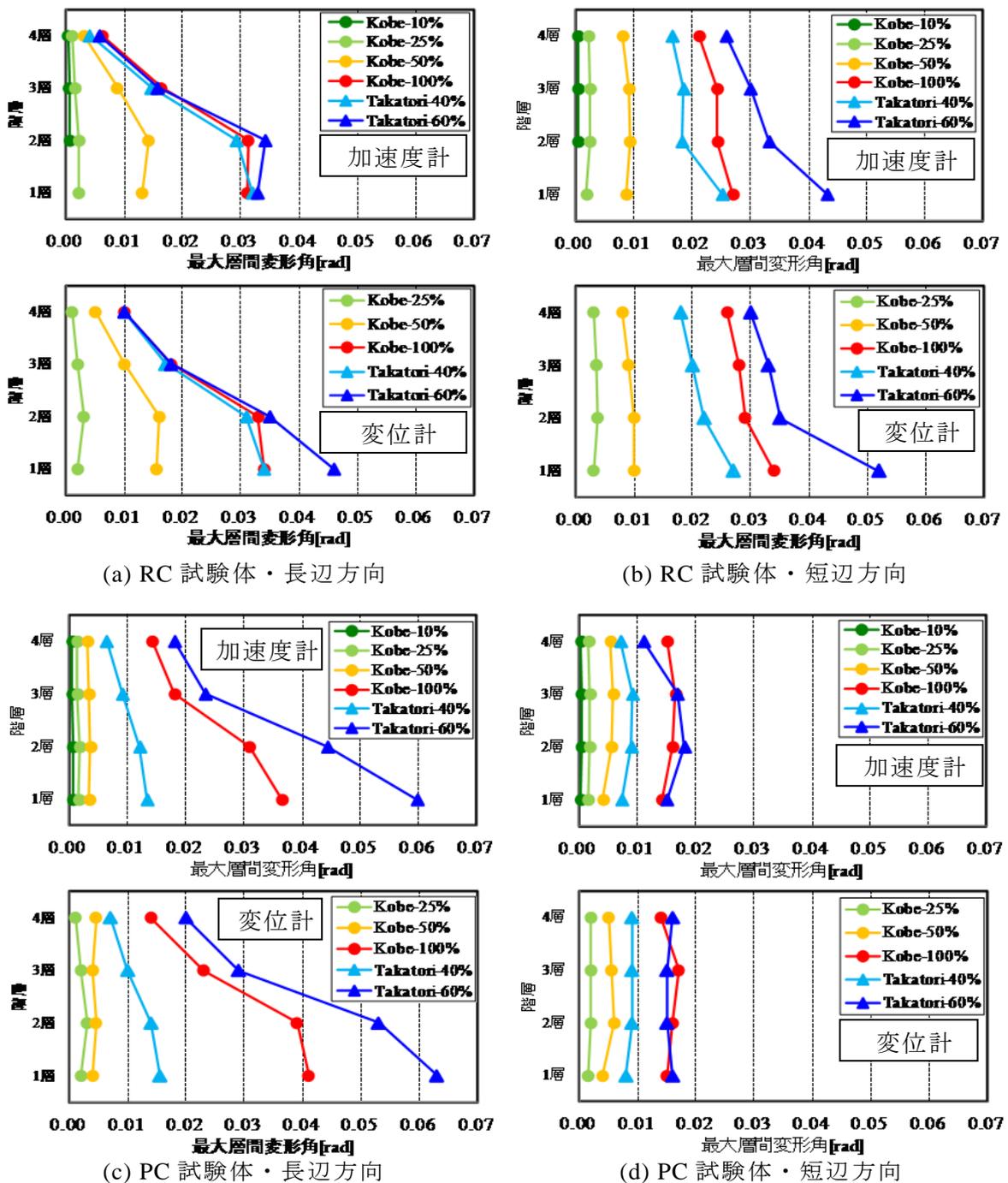
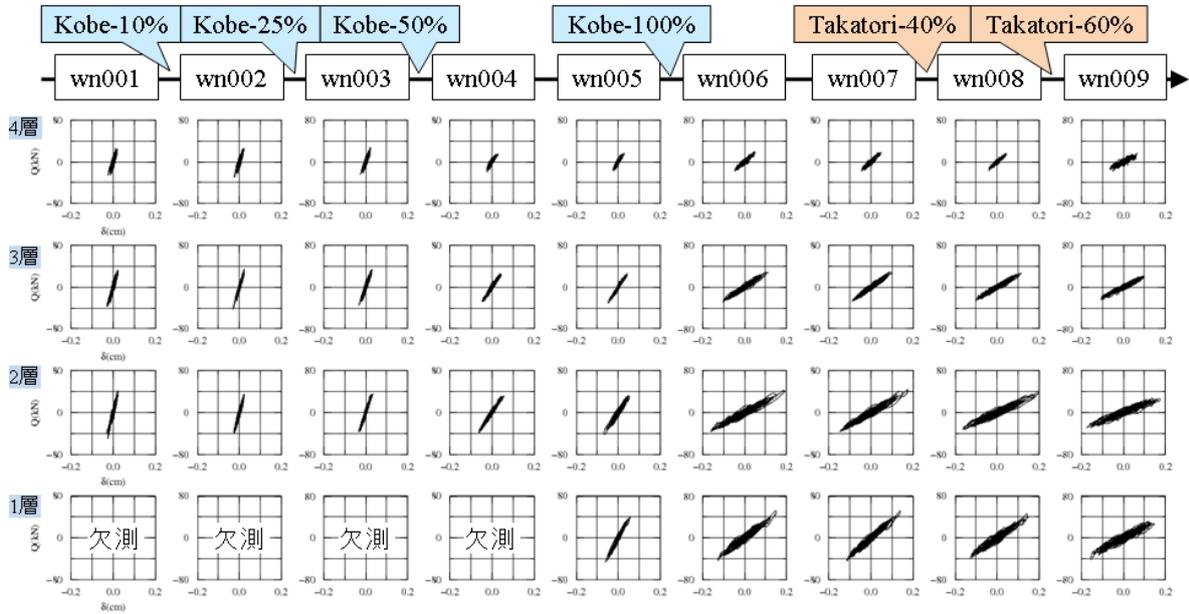
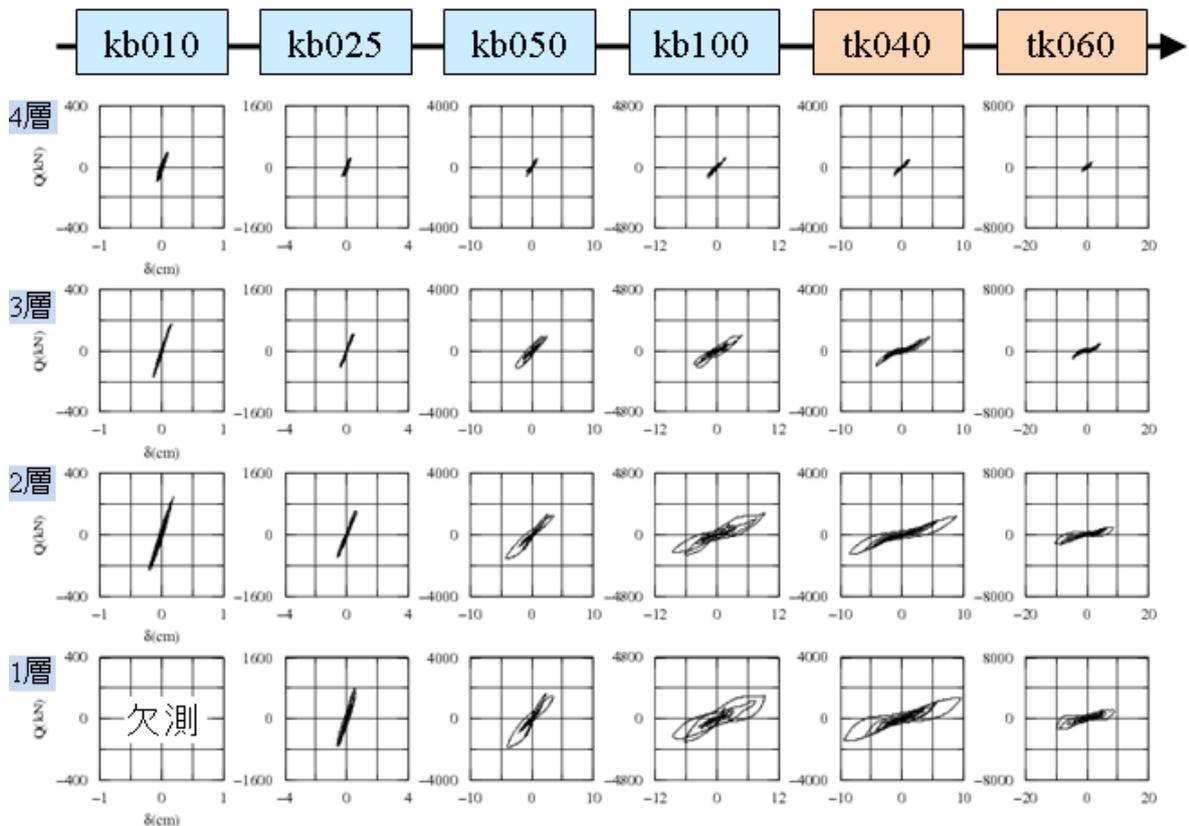


図7 最大層間変形角の推定値（加速度記録の積分による方法と変位計の比較）

次に、加速度記録と各階の重量から層せん断力を求め、各層の弾塑性復元力特性を求めた結果を図8に示す。上段のホワイトノイズ加振からは、特に神戸100%の前後で大きく層剛性が低下し、低下幅は1~3層が大きいことが読み取れる。下段の地震波加振では、入力レベルに応じてループが明確に捕らえられていることも分かる。



(a) ホワイトノイズ



(b) 地震波入力

図8 加速度計の記録から求めた各層の弾塑性復元力特性 (RC 試験体長辺方向)

図 9 に RC 試験体の短辺方向について同様に示す。神戸 100%加振の際に片側に寄った特徴的なループが見られる。なお、ホワイトノイズの wn001～wn004 および神戸 10%で 1 層が欠測となっているのは、1 階の加速度に比べて強震計のトリガ設定が高く、起動しなかったためであり、本観測システムのトリガ設定の重要性がわかる。

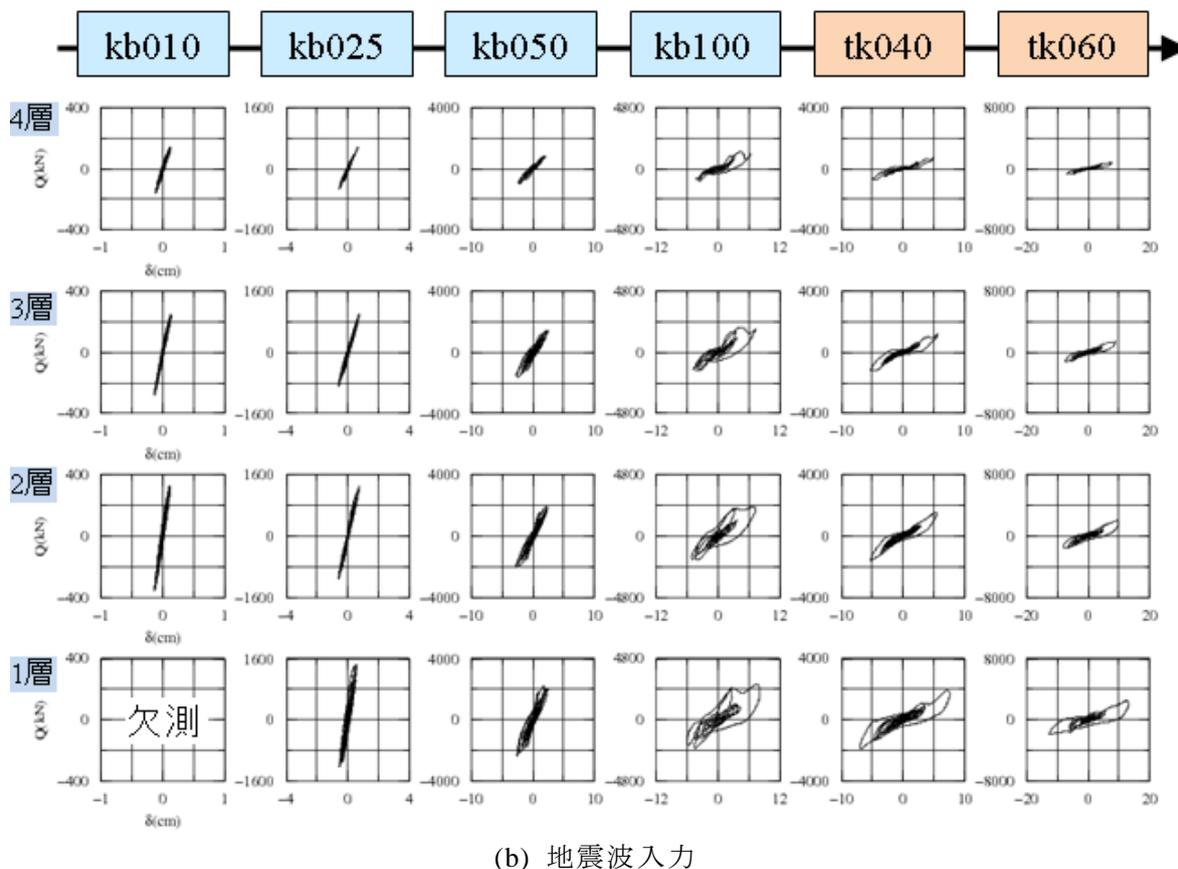
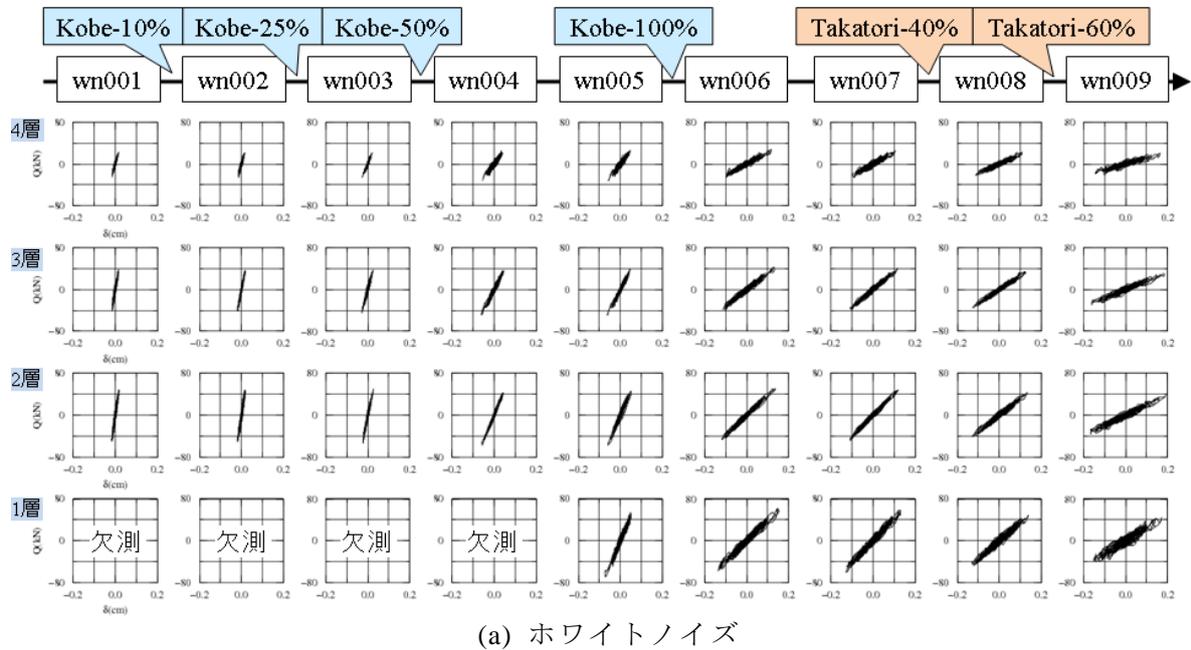
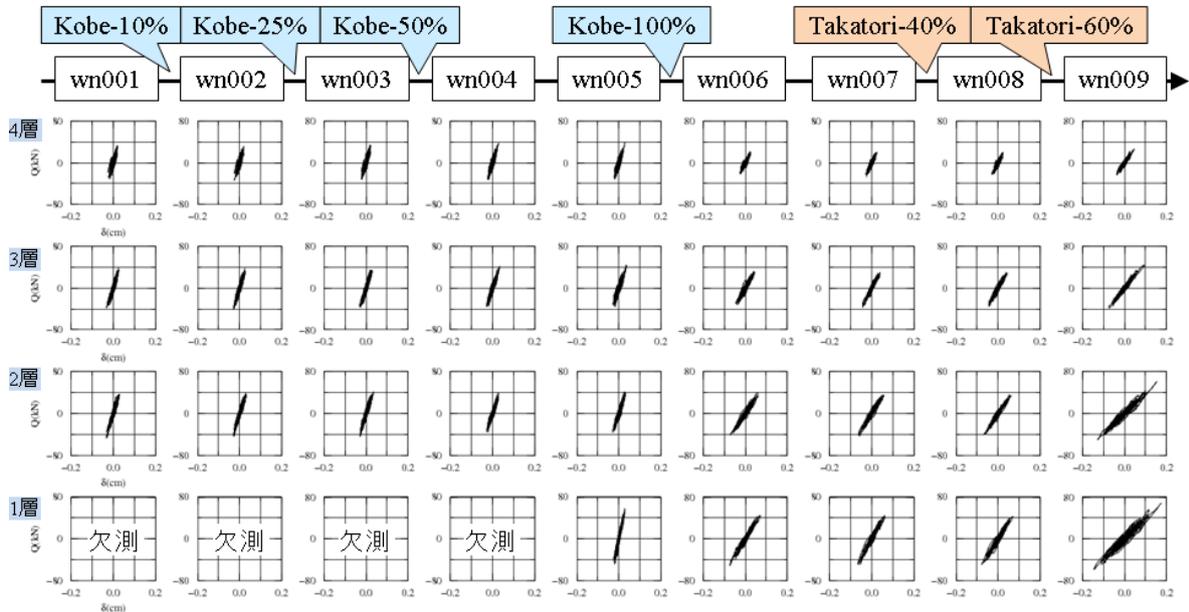
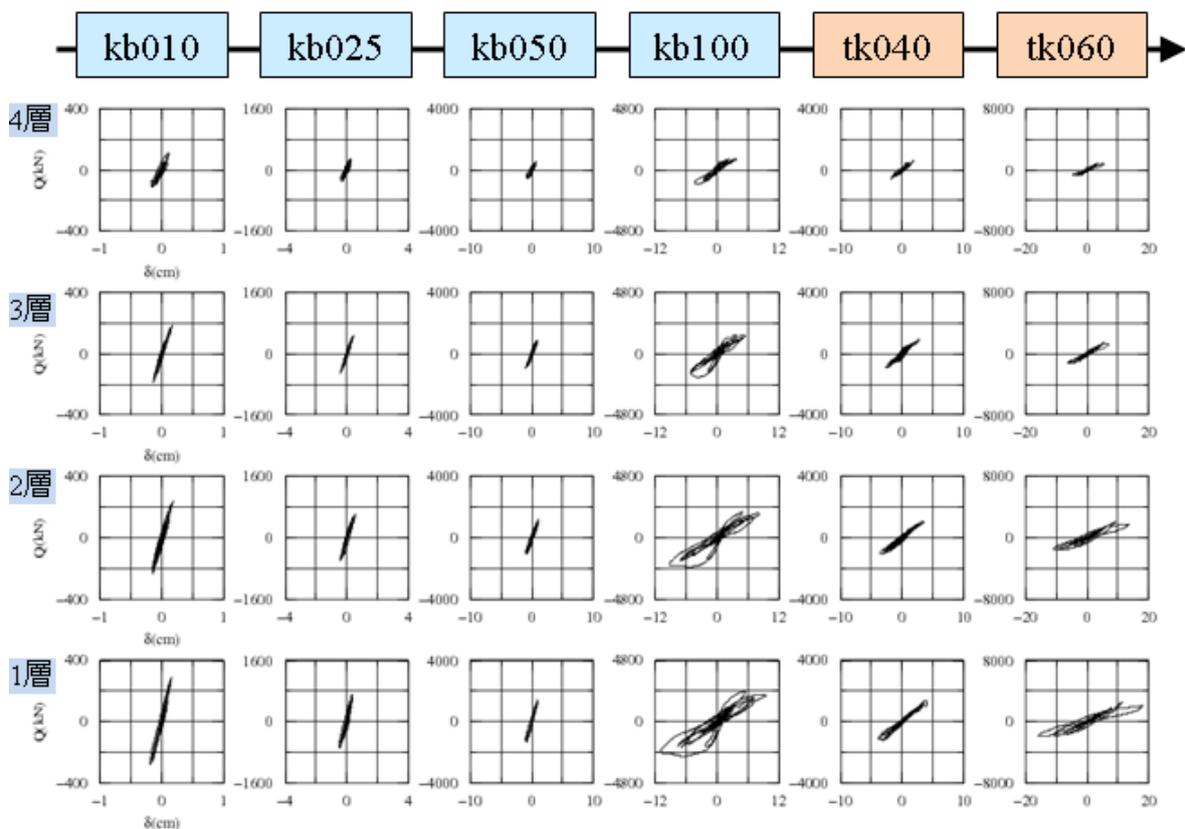


図 9 加速度計の記録から求めた各層の弾塑性復元力特性 (RC 試験体、短辺方向)

図 10 に PC 試験体の長辺方向の結果を示す。図 7(c)から地震時の層間変形角は鷹取 60%や神戸 100%の下層でかなり大きくなっており、その特徴は下段のループからも読み取れる。特に神戸 100%では、地震波の特定の時刻（特定の 1 周期）で大きくループを描き、その前後でループの傾きが変化して、剛性が急激に低下したことが分かる。



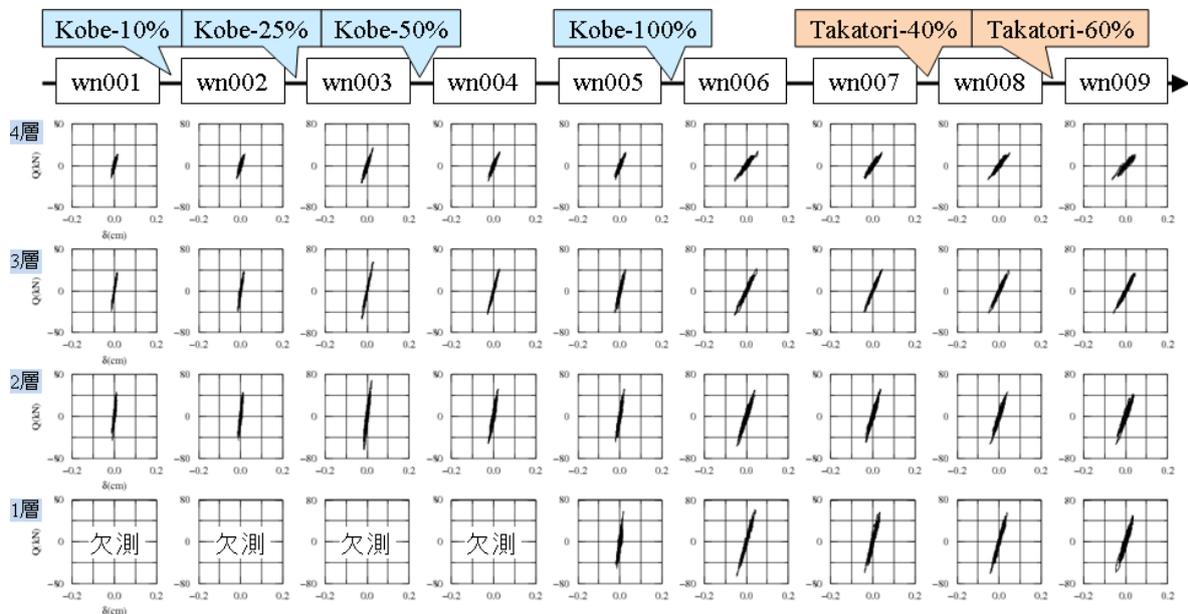
(a) ホワイトノイズ



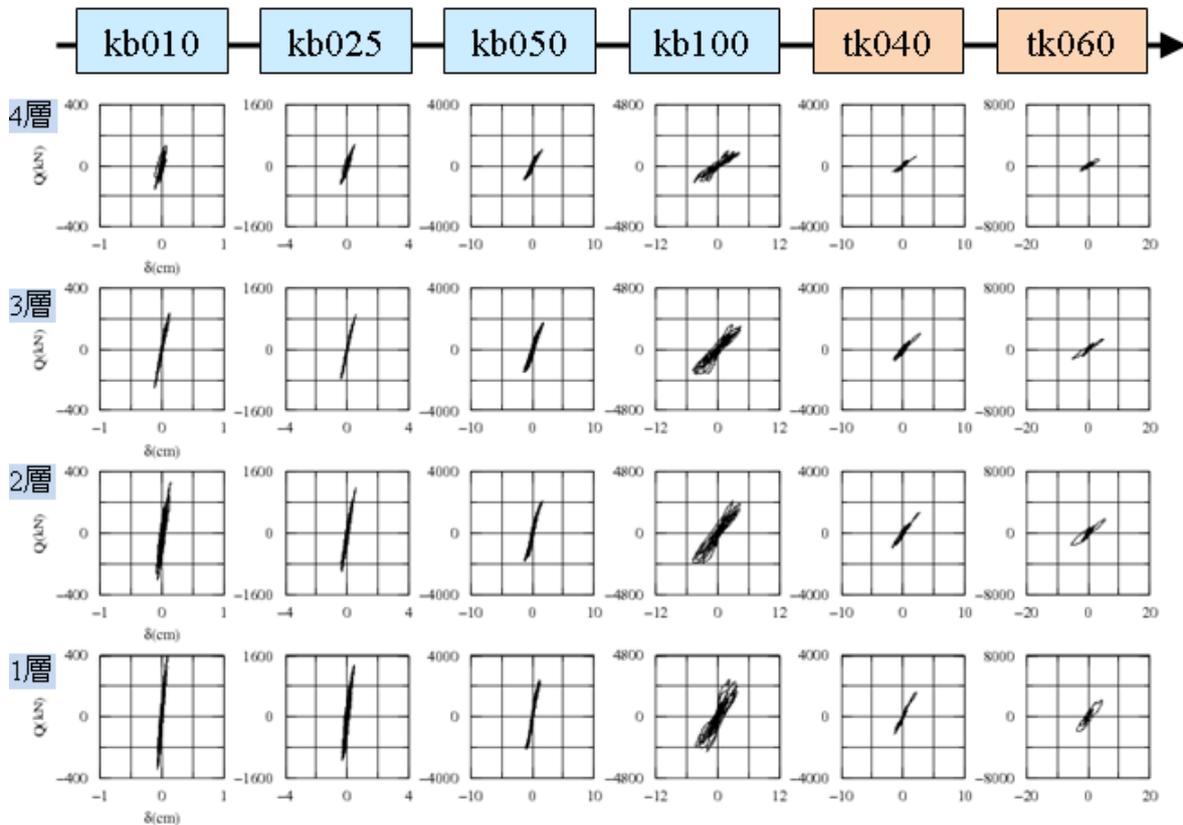
(b) 地震波入力

図 10 加速度計の記録から求めた各層の弾塑性復元力特性 (PC 試験体、長辺方向)

図 11 に PC 試験体の短辺方向の結果を示す。図 6 から PC・短辺は固有振動数は最も高く、減衰定数は安定して小さく、また図 7(d)から地震時の層間変形は特に小さい。すなわち最も線形的に挙動しており、その傾向は下図でも読み取ることができる。これは PC の構造上の特性と考えられ、損傷状況とも対応している。



(a) ホワイトノイズ



(b) 地震波入力

図 11 加速度計の記録から求めた各層の弾塑性復元力特性 (PC 試験体、短辺方向)

なお、図 8～11 のループ形状は、変位計から求めた場合¹⁾とよく一致している。以上の結果と、昨年度に実施した PC 実建物の小地震時の応答評価（構造物と地盤の動的相互作用を含む）もあわせて、本業務で開発してきた強震計によるモニタリング技術が、コンクリート系の構造が大きく損傷する場合においても十分に安定して適用できることを示した。

2) 高層建物の室内被害実験試験体の強震観測と損傷評価

a) 実験と計測の目的と概要

高層建物の室内被害を検証する目的で行われた E-ディフェンス実験（平成 23 年度実施）において、試験体は高層建物の周期や床応答を表現するために積層ゴムなどを用いて設計されている。したがってこの試験体の構造被害は実構造とは異なるが、ここでは本業務による手法を適用することでどの程度の損傷評価が可能かを検討する。

図 12 に試験体の概要と強震計の配置を示す。試験の後半では縮約層の積層ゴムの変形を拘束する部材を追加し、低層モデルとしての実験も行っている。

計測に用いた地震計はこれまでの実験と同じスタンドアロン型（Kinematics ETNA）であるが、数が不足する場所について同じ加速度センサを配置し、ロガーを接続して記録を収録した。本節の検討では図の左側に示されたスタンドアロン型強震計の加速度記録のみを用いる。

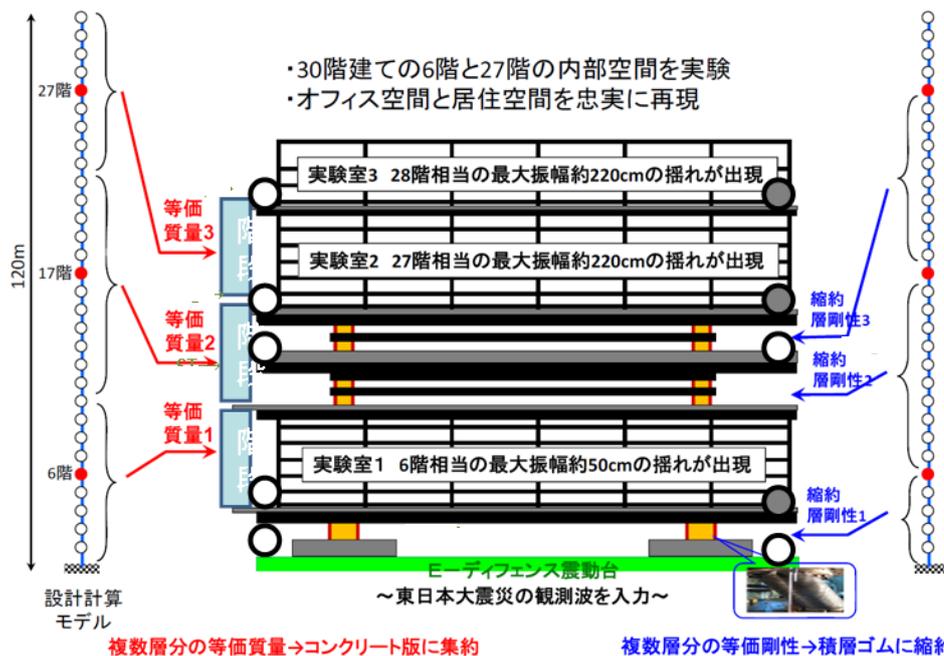


図 12 試験体概要とセンサ配置（防災科研資料に加筆、○Kinematics ETNA、●EpiSensor）

b) 試験体の振動特性の評価

加振波は西新宿における東日本大震災本震・余震、及び低層モデルに関しては JMA 神戸波である。図 13 に地表（振動台上）と 28 階相当（図 12 の実験室 3）の 2 方向の記録を示す。また、図 14 に伝達関数とシステム同定結果の比較の一例、表 2 に加振波とレベル、最大加速度・速度応答、観測記録から多自由度線形系のシステム同定²⁾により求めた固有振動数と減衰定数の一覧をまとめて示している。

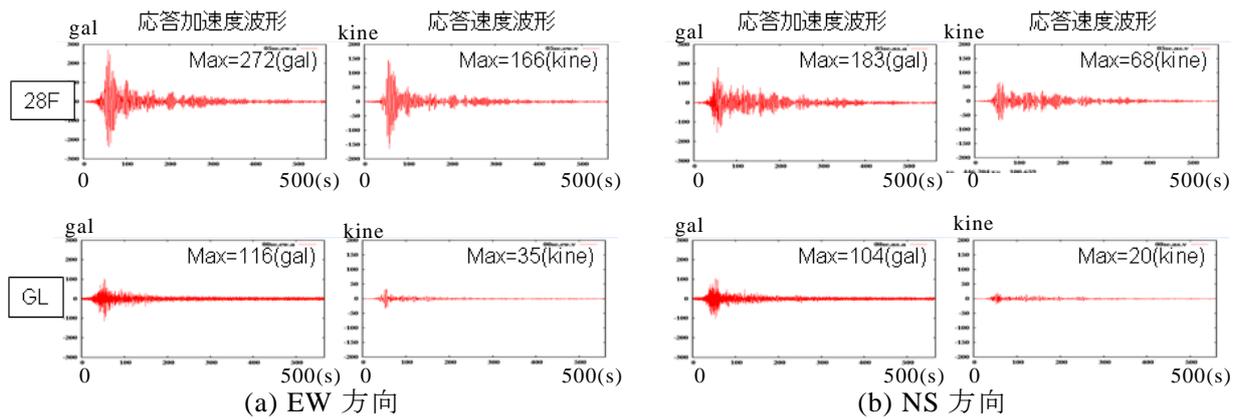


図 13 西新宿余震波 330%の応答加速度の観測記録 (0~550 秒)

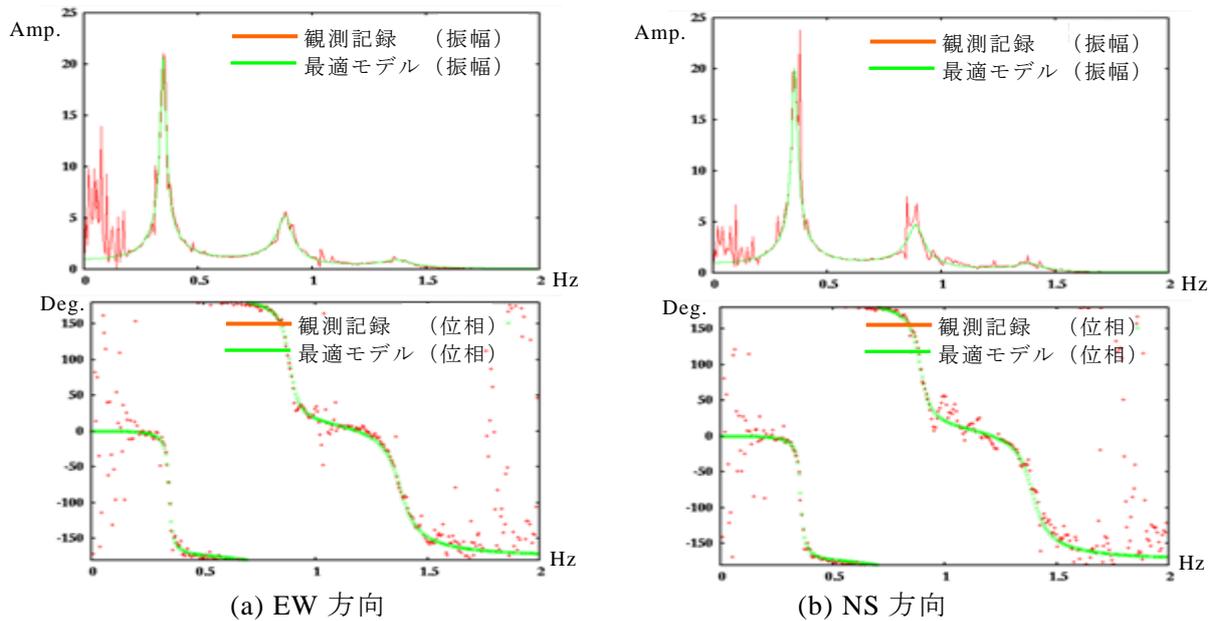


図 14 最初のホワイトノイズ加振時の伝達関数と最適モデルの伝達関数

図 13 より、東北地方太平洋沖地震の際の東京の揺れが極めて長く継続したことが分かる。地表に対する上階の応答の比は、最大加速度で 2 倍前後、最大速度で 3~5 倍程度であり、大きく増幅している。図 14 は最初のホワイトノイズ加振の記録から、地表と 28 階相当の伝達関数を求めたものである。なお、システム同定に基づく最適パラメータによる伝達関数もあわせて示した。なお、地震時の応答に関しても同様に推定されるが、観測波の伝達関数は非線形性や非定常性の影響により変動が大きくなる。

表 2 より、高層モデルの場合は、ホワイトノイズ加振から長辺・短辺ともに固有振動数がやや低下し、減衰は増大傾向であることが分かる。なお、1~3 次の減衰定数はほぼ同様の値であり、高次で増大する傾向は見られない。低層モデルは長辺で 1.8Hz、短辺は 2Hz 前後であり、繰り返し加振により固有振動数が低下していることが分かる。また地震波加振のレベルにより振幅依存性も見られる。

表 2 入力波と応答のシステム同定結果（加振実験の順）

(a) 固有振動数

高層モデル	長辺(EW)				短辺(NS)			
加振内容	Amax (gal)	1次	2次	3次	Vmax (kine)	1次	2次	3次
white noise	53	0.35(Hz)	0.88(Hz)	1.38(Hz)	41	0.36(Hz)	0.89(Hz)	1.39(Hz)
西新宿本震50%	62	0.33(Hz)	0.85(Hz)	1.35(Hz)	59	0.34(Hz)	0.86(Hz)	1.33(Hz)
西新宿本震100%	111	0.32(Hz)	0.83(Hz)	1.29(Hz)	118	0.32(Hz)	0.82(Hz)	1.30(Hz)
西新宿余震150%	136	0.32(Hz)	0.82(Hz)	1.26(Hz)	102	0.34(Hz)	0.85(Hz)	1.33(Hz)
white noise	61	0.34(Hz)	0.87(Hz)	1.35(Hz)	43	0.34(Hz)	0.87(Hz)	1.37(Hz)
white noise	48	0.34(Hz)	0.87(Hz)	1.35(Hz)	39	0.35(Hz)	0.88(Hz)	1.37(Hz)
西新宿余震75%	62	0.33(Hz)	0.85(Hz)	1.32(Hz)	50	0.34(Hz)	0.87(Hz)	1.34(Hz)
西新宿余震330%	277	0.28(Hz)	0.78(Hz)	1.30(Hz)	187	0.32(Hz)	0.81(Hz)	1.28(Hz)
white noise	51	0.33(Hz)	0.86(Hz)	1.33(Hz)	42	0.34(Hz)	0.86(Hz)	1.35(Hz)
低層モデル	長辺(EW)				短辺(NS)			
加振内容	Amax (gal)	1次	2次	3次	Vmax (kine)	1次	2次	3次
white noise	106	1.82(Hz)	6.06(Hz)		69	2.15(Hz)	5.51(Hz)	
JMA神戸25%	448	1.62(Hz)	5.98(Hz)		517	1.91(Hz)	5.20(Hz)	
JMA神戸50%	919	1.41(Hz)	5.06(Hz)		946	1.55(Hz)	4.31(Hz)	
JMA神戸75%	1273	1.20(Hz)			1304	1.35(Hz)		
white noise	73	1.62(Hz)	5.67(Hz)		58	1.98(Hz)	5.14(Hz)	

(b) 減衰定数

高層モデル	長辺(EW)				短辺(NS)			
加振内容	Amax (gal)	1次	2次	3次	Vmax (kine)	1次	2次	3次
white noise	53	3.1(%)	3.3(%)	4.2(%)	41	3.3(%)	3.7(%)	3.7(%)
西新宿本震50%	62	3.7(%)	3.2(%)	5.4(%)	59	4.0(%)	4.7(%)	4.2(%)
西新宿本震100%	111	3.7(%)	4.0(%)	5.4(%)	118	4.7(%)	4.8(%)	6.3(%)
西新宿余震150%	136	5.0(%)	6.4(%)	9.4(%)	102	4.6(%)	4.8(%)	4.7(%)
white noise	61	3.7(%)	3.4(%)	3.7(%)	43	4.1(%)	4.0(%)	3.9(%)
white noise	48	3.4(%)	3.2(%)	3.7(%)	39	3.6(%)	3.6(%)	3.7(%)
西新宿余震75%	62	4.0(%)	4.4(%)	6.3(%)	50	4.1(%)	3.7(%)	4.3(%)
西新宿余震330%	277	6.2(%)	6.6(%)	2.2(%)	187	4.8(%)	5.6(%)	4.3(%)
white noise	51	4.0(%)	3.5(%)	3.8(%)	42	4.3(%)	4.7(%)	4.1(%)
低層モデル	長辺(EW)				短辺(NS)			
加振内容	Amax (gal)	1次	2次	3次	Vmax (kine)	1次	2次	3次
white noise	106	4.1(%)	9.8(%)		69	6.1(%)	5.3(%)	
JMA神戸25%	448	9.9(%)	14.3(%)		517	12.0(%)	2.1(%)	
JMA神戸50%	919	17.8(%)	14.0(%)		946	20.8(%)	29.3(%)	
JMA神戸75%	1273	22.2(%)			1304	25.4(%)		
white noise	73	5.5(%)	9.8(%)		58	7.4(%)	3.0(%)	

c) 試験体の層間変形と層復元力特性の評価

図 15 に高層モデルのホワイトノイズ加振時の各層復元力特性を示す。いずれも加速度記録から計算されたものである。地震波加振の前後の計 3 回を重ねてプロットしているが、差は少なく、ループの傾きから剛性を算出すると 7~8% 程度の低下となっている。これは高層モデルの縮約層のばねが主に積層ゴムとダンパーで表現されており、加振により大きな損傷を受けていないことに対応する。

最上層（5 層）ではループが不明確で、EW 方向では左上がりの傾きとなっている。これは、高層モデルでこの部分の層変形が少なく、観測記録は上階のほうがむしろ小さくなる場合もあったためである。したがって、層間変形がごく小さい場合には精度に注意が必要なことがわかる。一方、変形の大きい積層ゴムのある層では、安定したループや剛性が問題なく得られている。モニタリングを必要とする層は、層間変形が大きい下層が主と考えられるため実際的には支障とならない。

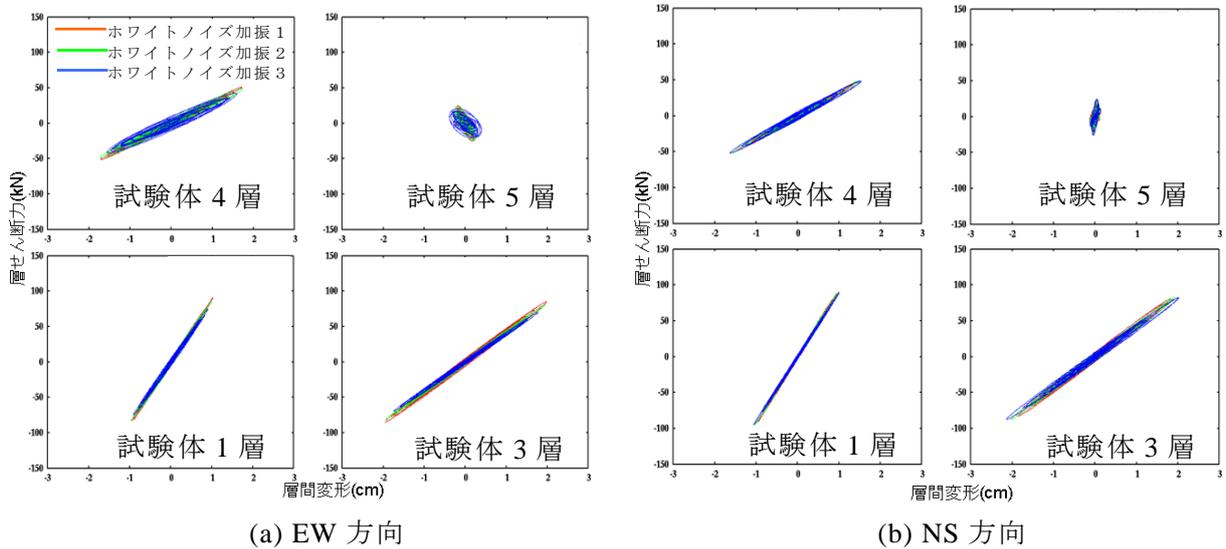


図 15 高層モデルのホワイトノイズ加振時の各層復元力特性（地震波加振前後）

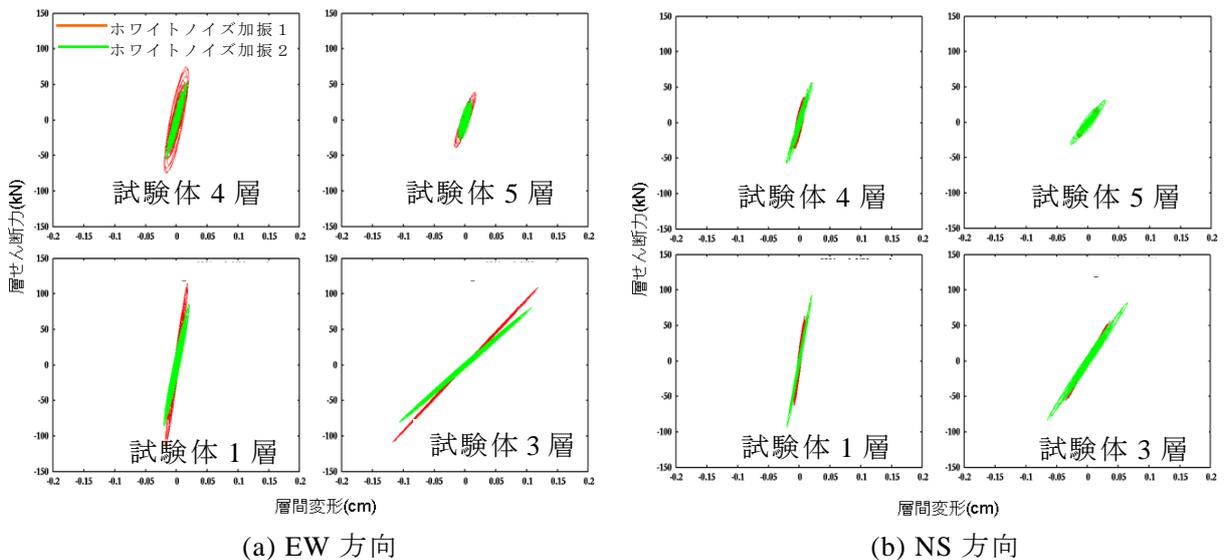


図 16 低層モデルのホワイトノイズ加振時の各層復元力特性（地震波加振前後）

同様に、低層モデルについて各層の復元力特性を検討した結果を図 16 に示す。低層モデルは、高層モデルの縮約層を鋼材でロックしたものである。図 16 では、地震波加振の前後のホワイトノイズ加振でのループを重ねて比較しており、これより各層の剛性低下がよみとれ、表 2 ととも整合する。また試験体を目視したところでは、積層ゴムの層をロックするために設置された鋼製プレートが、地震波加振により変形したところも見られた。

以上のように、高層建物を縮約した特殊な試験体であっても、一般的な強震計の設置により各層の層間変形や履歴特性を評価でき、モニタリングや損傷評価に用いることを示した。

3) 強震計による常時微動観測の検討

本業務で提示した強震計による高層建物の長期構造モニタリングについて、継続的なデータ蓄積による構造特性変化の抽出のためには、小地震記録のほかに、常時微動や強風時の振動計測の可否が重要となる。昨年度に強震計による常時微動計測の検討を行い、振動数ごとの S/N 比を確認することにより、建物の固有振動数評価などの目的には十分な精度が得られることを示している。ここでは実際に長期にわたり強震観測を実施している建物において、常時微動レベルでの計測状況や強風時のトリガ記録など、地震以外の記録の状況の例を挙げて有用性を示す。

a) タワーの常時微動計測

図 17 は、名古屋市内にある電波塔（高さ 180m）について、上部の展望台で計測した結果である⁴⁾。強震計の記録は冬季の季節風によるトリガであり、常時微動計は夏季の静穏時に計測した結果である。強震計のトリガは 1gal 程度に設定してあり、施設利用者的人為的な床振動のほか、台風時や冬季に比較的頻繁に起動している。強震計でも全周波数域で十分な S/N 比が得られていることを確認したうえで、加速度記録を積分して常時微動計の速度記録に合わせた。これより、振動レベルが 10 倍近く異なるものの、いずれにしても地震時よりはかなり低いレベルでの応答を捉え、固有振動数やピーク形状も強震計と常時微動計でほぼ一致する。なお強風時のみに見られる 4 番目のピークは純ねじれモードであることが分かっており、強震計が平面外周部、微動計は中央近くに設置されたことによる差である。

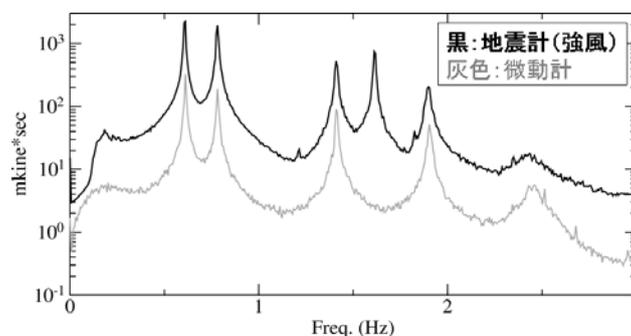


図 17 タワー構造物の展望台における微動記録

b) 高層建物の解体時の常時微動計測

図 18 は名古屋市にある高層建物の台風通過前後の応答を強震計で捉えた例である⁵⁾。接近前の弱風時と台風時で数十倍の振幅の差があるが、弱風時でもピーク付近は十分に S/N 比が確保されていることが分かる。このくらい大きく振幅が異なる場合は、振幅依存性も影響することも読み取れる。

図 19 は、同建物を解体する際に連続的に常時微動観測を行った結果である。強震計をなるべく上層階に設置して計測を行い、建物上部から順次解体が進むにつれて下へ移設していった。その過程で解体振動などによりトリガ起動した多数の常時微動記録を用いて、工事による衝撃的なノイズなどの区間を除き、S/N 比を確認して、スペクトルから固有振動数を推定している（したがって正確には建物-地盤連成系の周期である）。結果として建物高さの減少に対応して固有振動数が高くなる傾向が明確に得られている。このような工事現場等の状況では、スタンドアロン型で耐候性を備えた強震計による常時微動観測が適している。

なお、図中には光ファイバセンサによる固有周期計測の結果も示した。具体的には建物下層階の柱に動的軸変形を計測可能な光ファイバセンサを設置し、その波形のスペクトルから求めたものである。高層建物の下層階における柱軸変形は、上層階の水平応答による成分を反映しており、十分な精度で固有周期を評価できることが分かる。この光ファイバセンサは静的・動的計測の両方に対応しており、静的な計測による建物重量の長期追跡については昨年度の報告書で詳述した。同一のセンサで建物重量と固有周期が特定できることになり、建物の構造ヘルスマニタリング（剛性変化のモニタリング）に極めて有用であることが確認された。

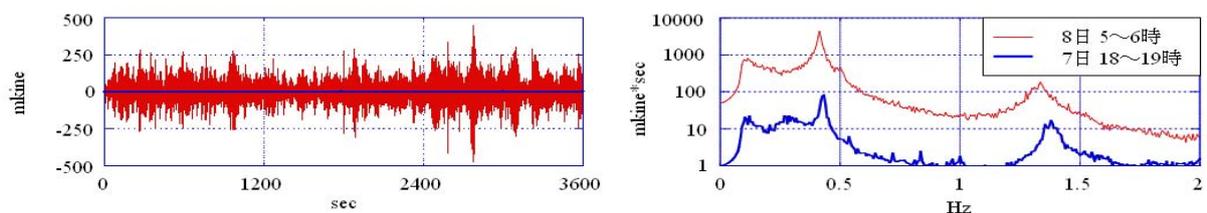


図 18 台風時と弱風時の高層建物の速度応答波形とフーリエスペクトル

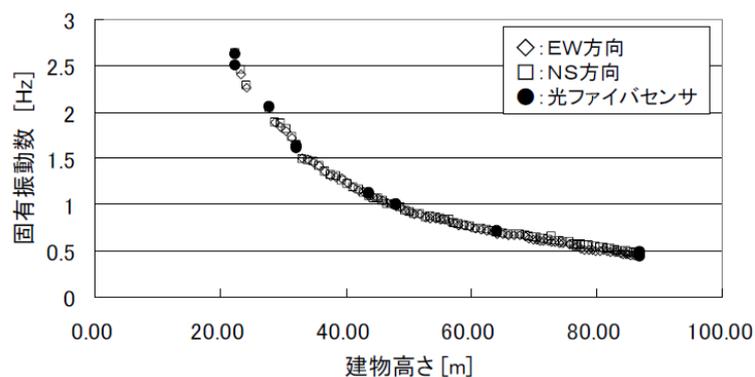


図 19 高層建物の解体過程における建物高さとの固有振動数の関係

4) 強震観測による構造モニタリングと損傷評価の可能性と問題点

本節では、強震計による高層建物の応答観測、構造モニタリングと損傷評価について、本業務の検討を通じて得られた知見と技術的課題をまとめて述べる。

a) 強震計による既存建物の応答特性評価

- ・ 既存建物の観測を行うに当たり、簡易で現実的な方法として、スタンドアロン普及型強震計とネットワーク接続小型強震計を用いた計測方法を提示・検証した。また、Eーディフェンス実験により大振幅入力を受けて顕著な構造損傷を受けるケースを想定した検証を行った。
- ・ 建物内の複数個所の観測記録により、システム同定手法から、固有振動数、減衰定数、モードなどを求めうることを示した。その際に、スタンドアロン型で時刻同期やトリガ同期もされていない場合でも、観測記録のみに基づく時刻合わせを行い、あるいは時刻ずれを考慮したシステム同定手法等により十分な精度が得られることを示した。
- ・ 加速度記録を長周期成分に配慮して2回積分することで、十分な精度で変位応答を求めうることを示した。また時刻合わせも行って上下階の変位の差を求めることで層間変位を、また各階の加速度応答から層せん断力を評価することにより、簡易な加速度観測のみで各層の弾塑性履歴特性を十分評価可能であることを示した。
- ・ 複数の強震計・加速度計を比較することにより、センサの特性や精度が上記評価に及ぼす影響を検討した。特に、安価で小型の半導体センサなどでも長周期構造物の変位特性を十分に評価できることを確認した。位相特性の差などの影響は未検証だが、同種のセンサで使用する限り性能の制約やばらつき等があっても十分な評価ができる可能性が高い。
- ・ 強震計による常時微動計測について、常時微動計との比較計測などにより検証した。センサの周波数特性とデジタル化の量子化誤差に依存する周波数領域でのS/N比に留意すれば十分実用となる。

b) S造高層建物のEーディフェンス実験による応答特性と損傷の評価

- ・ 長周期地震動を受けるS造高層建物の実験から、強震観測による顕著な構造損傷の検出可能性を検討した。
- ・ 固有振動数、減衰定数、モードが局所的な損傷により変化する状況を計測により示した。固有振動数やモードの変化は損傷程度と明確に対応するが、S造の場合は損傷程度に比して観測値の変化は必ずしも大きくなく、また局所的な損傷の位置の特定も容易ではない。
- ・ 各層の履歴特性を求めることで、層剛性の正確な評価と損傷による変化の検出が可能であることを示した。このためには全階にセンサが必要となるが、実際には事前解析に基づいて損傷可能性の高い層に配置すれば、十分な検出精度が得られる。
- ・ 高層建物の補強にむけて異なるダンパー等を設置した実験について、層の履歴特性からダンパーの特徴を明確に評価できることを確認した。モニタリングの一環として補強効果の検証にも活用しうる。

c) その他の構造物に関する応答特性と損傷の評価

- ・ S 造高層建物、タワーなど実際の長周期建物において強震観測、振動実験、柱軸歪み計測などを行い、手法の検証と実データ蓄積を行った。また、建設中・解体中の建物の連続計測により、実際の建物の振動特性に関するデータを蓄積した。
- ・ RC 系構造物（RC 造、PC 造）について、顕著な損傷を伴う Eーディフェンス実験で、提案する手法が有効であることを示した。また実構造物で動的相互作用の評価も含めて検証を行った。
- ・ 以上から、高層建物 Eーディフェンス実験で開発・検証した一連のシステム・分析手法が一般的な建物でも有効であることを示した。

d) 今後の利用に関する知見

- ・ ネットワーク接続型の小型強震計を活用することで、立体振動モードの時刻暦評価など細やかな損傷評価につながる可能性がある。
- ・ 本報告書 3.2.4 に示した映像と振動が連動した収録装置の開発により、被災状況の確認も含めて記録し、対応に活かす可能性がある。
- ・ 光ファイバセンサによる静的・動的柱軸変形の計測を実施し、構造モニタリングに当たって建物重量と固有周期の両方を評価可能な利点を示した。設置ジグや温度補正の影響が大きいことを示し、適切な計測のための技術開発を行った。

(c) 結論ならびに今後の課題

一般的な強震計の加速度記録による高層建物の応答と損傷の評価に向けて、Eーディフェンスで行われた RC 系構造物、高層建物室内被災などの実験で強震計等による観測を行い、詳細な分析を行った。また実建物における観測に基づき、実際的な条件での観測・分析・評価の可能性を検討した。今年度の具体的な成果は以下のとおりである。

平成 22 年度に Eーディフェンスで実施された RC・PC 構造物の同時加振実験で強震計により得られた観測データを分析し、大振幅加振による固有振動特性や層剛性の変化、層の履歴特性の特徴などから損傷評価の可能性を検討した。また平成 23 年度の構造建物室内被災状況実験において、高層建物の床応答を再現するべく設計された構造躯体に強震計を設置し、得られた観測記録から被災状況を考察した。以上の結果として、コンクリート系構造物や積層ゴムなどを含む構造でも、高層建物とほぼ同様の方法により損傷評価を行う目処を得た。

テレビ塔や解体中の高層建物などで強震計による長期微動観測を実施し、その記録の分析から、常時微動による評価の精度について検討した。また、静的・動的な柱軸歪みを計測しうる光ファイバセンサなどにより、加速度記録の活用に当たって並列となる重要な特性の可能性を示した。

最後に業務期間全体の検討結果を踏まえて、強震計による長期構造モニタリングと被災時の損傷評価について成果を取りまとめ、今後の課題を整理した。現状では実用化可能な段階であるが、より効率的・実際的なシステムや体制を目指し、建物の基礎資料収集も含めて進める必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 長江拓也、田原健一、福山國夫、松森泰造、塩原等、壁谷澤寿海、河野進、西山峰広、西山功：4階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験、日本建築学会構造系論文集、Vol.76、No.669、pp.1961-1970、2011.11
- 2) 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.
- 3) 飛田潤、福和伸夫、平田悠貴、長江拓也：普及型強震計による高層建物の応答特性と損傷のモニタリング、構造工学論文集、Vol.56B、pp.229-236、2010.3
- 4) 豊部立、福和伸夫、飛田潤：常時微動計測・人力加振実験に基づく名古屋テレビ塔の振動特性の推定、日本建築学会学術講演梗概集、Vol.B2、pp.373-374、2011.8
- 5) 今枝賢志朗、飛田潤、福和伸夫、矢代晴実：解体時の継続的観測に基づく高層建物の振動特性、第13回日本地震工学シンポジウム論文集、GO9-Sat-AM(CD-ROM)、2010.11

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
高密度強震観測・振動実験に基づく PCaPC 造建物の層及び基礎-地盤系の復元力特性評価、口頭発表	海野元伸 福和伸夫 飛田潤	日本建築学会学術講演梗概集、 Vol.B2、pp.361-362	2011.8	国内
光ファイバセンサによる高層建物解体時の柱軸変形の計測、口頭発表	今枝賢志朗 飛田潤 福和伸夫 矢代晴実	日本建築学会学術講演梗概集、 Vol.B2、pp.371-372	2011.8	国内
常時微動計測・人力加振実験に基づく名古屋テレビ塔の振動特性の推定、口頭発表	豊部立 福和伸夫 飛田潤	日本建築学会学術講演梗概集、 Vol.B2、pp.373-374	2011.8	国内
ネットワーク接続小型地震計の多点同時観測による高層建物試験体の損傷検出、口頭発表	平山義治 飛田潤 長江拓也 福和伸夫	日本建築学会学術講演梗概集、 Vol.B2、pp.439-440	2011.8	国内
構造性能把握のためのライフタイムモニタリングの提案、口頭発表	西澤崇雄 大野富男 飛田潤 福和伸夫	日本建築学会学術講演梗概集、 Vol.B2、pp.841-842	2011.8	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
振動実験・強震観測に基づく名古屋テレビ塔の振動特性	豊部立 飛田潤 福和伸夫 西澤崇雄	構造工学論文集、 Vol.58B（掲載決定）	2012.3	国内
光ファイバセンサによる高層建物解体時の柱軸変形の計測	今枝賢志朗 飛田潤 福和伸夫 矢代晴実 曾我裕	構造工学論文集、 Vol.58B（掲載決定）	2012.3	国内

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし