

強震観測記録に基づく PCaPC 造建物の上部構造及び基礎-地盤系の複素剛性評価
Evaluation for Complex Stiffness of Superstructure and Soil-foundation of a PCaPC Building
Based on Earthquake Response Observation

2. 構造 - 2. 振動

強震観測 伝達関数 建物と地盤の動的相互作用
複素剛性 層剛性 地盤ばね

正会員 ○海野 元伸* UMINO Motonobu
正会員 飛田 潤** TOBITA Jun
正会員 福和 伸夫*** FUKUWA Nobuo

1. はじめに

筆者らはこれまでに、加速度計を主とする高密度な強震観測を行っている建物を対象に、振動実験や強震観測記録から、上部構造の層及び基礎-地盤系の応答性状を推定し、層剛性と水平・回転地盤ばね剛性の同定を実施してきた¹⁾²⁾³⁾。本論では新たに、振動数に依存する地盤ばねなどを複素剛性として評価する同定手法を試み、得られた結果について、上部構造や基礎-地盤系モデルの数値解析結果との比較をしながら、定量的な評価を実施する。

2. 対象建物と観測概要

対象建物は、プレキャストプレストレストコンクリ

ート造(以下 PCaPC 造)7 階建ての大学施設¹⁾である。

図 1 に建物形状及び観測点を、図 2 に杭伏図を、図 3 に地盤の N 値を示し、表 1 に地盤の諸元を、表 2 に杭の諸元を示す。当該建物の強震観測は、既設地震計(15 点)・追加地震計(5 点)にて行っており、上部構造の全ての層の挙動と、地盤の震動性状を捉えられる体制となっている。本論においては、2011/3/11 東北地方太平洋沖地震(本震)の記録²⁾を分析に用いた。

3. 基本的な振動性状

当該建物の基本的な振動性状に関する考察は、既往の研究¹⁾²⁾³⁾にてなされている。ここでは新たに観測された本震の地震記録に基づく結果について簡潔に述べ

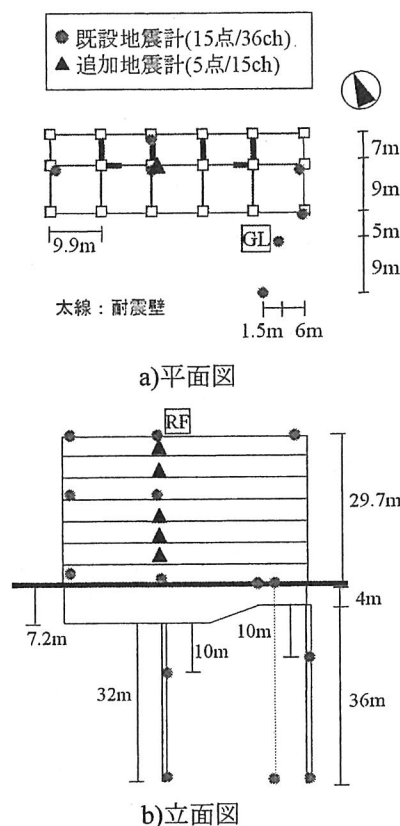


図 1 建物形状と観測点

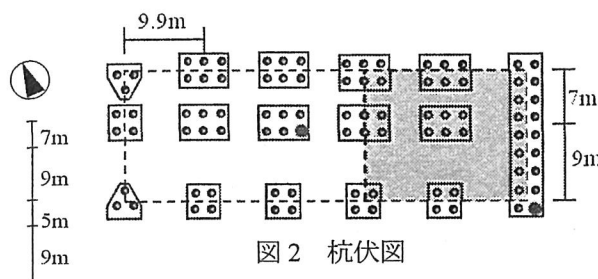


図 2 杭伏図

表 1 地盤の諸元

上端深度 (m)	層厚 (m)	質量密度 (t/m^3)	S波速度 V_s (m/s)	ポアソン比 ν	減衰 h (%)
0.0	5.3	1.9	330	0.48	3.0
-5.3	4.3	1.9	220	0.48	5.0
-9.6	5.4	1.9	260	0.48	4.0
-15.0	13.3	1.8	260	0.48	4.0
-28.3	7.2	1.8	320	0.48	3.0
-35.5	-	1.9	400	0.48	3.0

表 2 杭の諸元

ヤング係数 E (kN/m^2)	3.92×10^7
ポアソン比 ν	0.2
断面積 A_p (m^2)	0.2765
せん断断面積 A_s (m^2)	0.1382
断面二次モーメント I_p (m^4)	0.02212
杭径 D (m)	0.8
杭長 l (m)	32.7 / 35.9

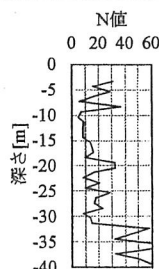
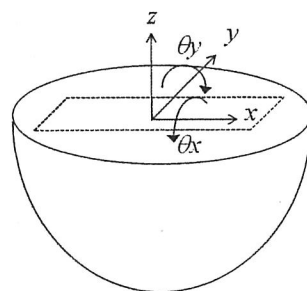
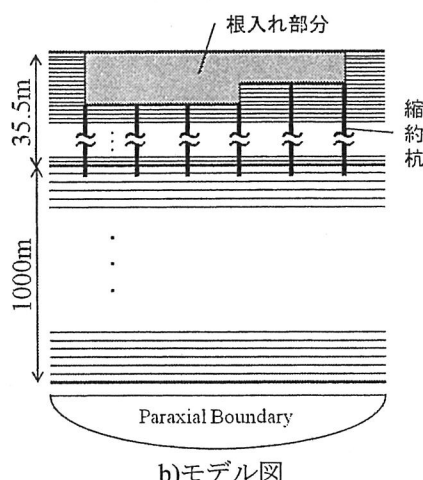


図 3 N 値



a)空間座標図



b)モデル図

図 4 基礎-地盤系の解析モデル図

* 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生
** 名古屋大学災害対策室 教授・工博
*** 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
Prof., Disaster Management Office, Nagoya University, Dr. Eng.
Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

る²⁾。この地震の最大加速度は、地盤地表(GL)で約 20cm/s^2 、建物屋上(RF)で約 36cm/s^2 である。地震時の伝達関数に対して、カーブフィット法で推定した地盤-建物連成系の1次固有振動数・減衰定数は、張間方向で 2.06Hz 、 1.9% であり、桁行方向で 2.47Hz 、 3.0% であった。また、この地震における当該建物のロッキング率・スウェイ率は張間方向で 21% 、 10% であり、桁行方向で 7% 、 15% であった。このことから、当該建物は観測・実験結果において、相互作用特性が比較的明確に得られていると言える。

4. 解析内容及び手法

4.1 上部構造モデル

上部構造の各層剛性については、水平方向のフレームモデルによる静的荷重増分解析により得られた結果を用いた³⁾。このモデルは、基礎固定系で等価せん断型とした上部構造モデルであり、逆梁工法による梁のレベルのくい違いや、直交方向の梁せいを考慮した柱の剛域長の設定、設計用積載荷重の再評価、コンクリート強度、スラブ効果などの補正により、当該建物の実測結果を考慮できるよう構築されている。

4.2 基礎-地盤系モデル

水平・回転地盤ばねについては、図1、図2、表1、表2をもとに、地盤・杭・根入れ部分を考慮してモデル化を行い、薄層要素法と有限要素法をフレキシブルボリューム法で組み合わせた方法⁴⁾によって、桁行・張間方向の水平・回転地盤ばねの値を求めた。図4に解析モデル図を示す。

座標は図4a)のようにとり、 x 方向が桁行水平方向、 y 方向が張間水平方向、 θ_x 方向が桁行回転方向、 θ_y 方向が張間回転方向に対応している。地盤の薄層モデルは図4b)のように構築し、底面境界はパラキシャル境界を適用した。根入れ部分は剛体として3次元のアイソパラメトリック要素でモデル化し、当該建物の基礎の不整形な段差と、それによる杭の取りつく位置の差を考慮した。なお、基礎底面は支持地盤と密着しているものとした。杭は表2の諸元を用いてビーム要素でモデル化を行うが、計算の利便上、それぞれのフーチング毎に1本の杭に縮約した⁵⁾。杭の回転に関する材端条件は、両端固定とした。各要素分割は、対象振動数範囲での波長の変化を表現し、かつ十分な解析精度を保持するために、地盤・杭は $0.5\sim 1.0\text{m}$ (35.5m 以深は 20m)、根入れ部分は $0.5\sim 2.5\text{m}$ 程度に設定した。

5. 上部構造及び基礎-地盤系の複素剛性の推定

5.1 伝達関数による算定法

層剛性と地盤ばね剛性の推定については、実建物を

SR(スウェイ・ロッキング)モデルと仮定し、各階と地盤地表の加速度応答を用いて、層と基礎-地盤系(水平・回転)の履歴ループを求めることにより、時間領域での評価を行ってきた¹²⁾。本論では新たに、伝達関数を用いた振動数領域での複素剛性評価を試みる。ここでは、上部構造の各層及び基礎-地盤系(水平)に作用する水平力 Q と層間変形 δ の伝達関数と、基礎-地盤系(回転)に作用する転倒モーメント M と基礎部の回転角 θ の伝達関数を求め、その実部(K_{Re})及び虚部(K_{Im})についてそれぞれの解析値との比較もしながら、手法の妥当性を確認する目的も含めて検討を行った。

5.2 複素剛性の推定と解析値との比較

図5、図6に地震記録を用いた伝達関数による実測値(点線)と解析値(実線)を併せて示す。図5には実部を、図6には虚部を示している。また、図5には固有振動数 $\pm 0.25\text{Hz}$ のフィルタ波を用いた履歴ループ²⁾による実測値(黒丸)も示している。なお、伝達関数は parzen window(ウィンドウ幅 0.14Hz)により、可能な範囲で平滑化した。さらに、各図には地震記録における地盤-建物連成系の固有振動数の位置を逆三角点で示した。

図5において、上部構造の各層で実測値と解析値を比較すると、5層から7層の低振動数域では、全体的に実測値が解析値より小さめの値をとっているが、固有振動数以上の帯域では、良い精度で対応していることが分かる。1層から4層にかけては、 4Hz 以降で乱れが見られるものもあるが、比較的良く推定されており、解析値とも良い対応を示している。なお、図5より、伝達関数の実部の値と、履歴ループから求めた値²⁾は、それぞれ良く対応していることが確認された。

図5の地盤ばねの解析値に着目すると、各水平成分では、桁行方向の方が振動数帯域でやや小さめの値をとっている。一方、回転成分では、桁行に比べて張間が $1/4$ 倍程度小さく、ロッキングばねの影響が大きいことが分かる。この解析値と比べて、実測値は全体的に小さめの傾向を示しており、その挙動にも乱れが見られる。この現象に関して、解析については、基礎と地盤の間の側面・底面の緩みや隙間などを考慮した場合、上部構造の慣性力などを考慮した場合について、更に綿密なパラメトリックスタディを行う必要があると考えられる。また、実測については、構造物の慣性力と基礎-地盤系に作用する力のつり合い関係が保たれているかどうかや、基礎部と地盤の相対変形の精度などが原因である可能性が考えられ、さらに他の地震記録でも検討を進める予定である。

図6を見ると、上部構造の伝達関数の虚部は振動数

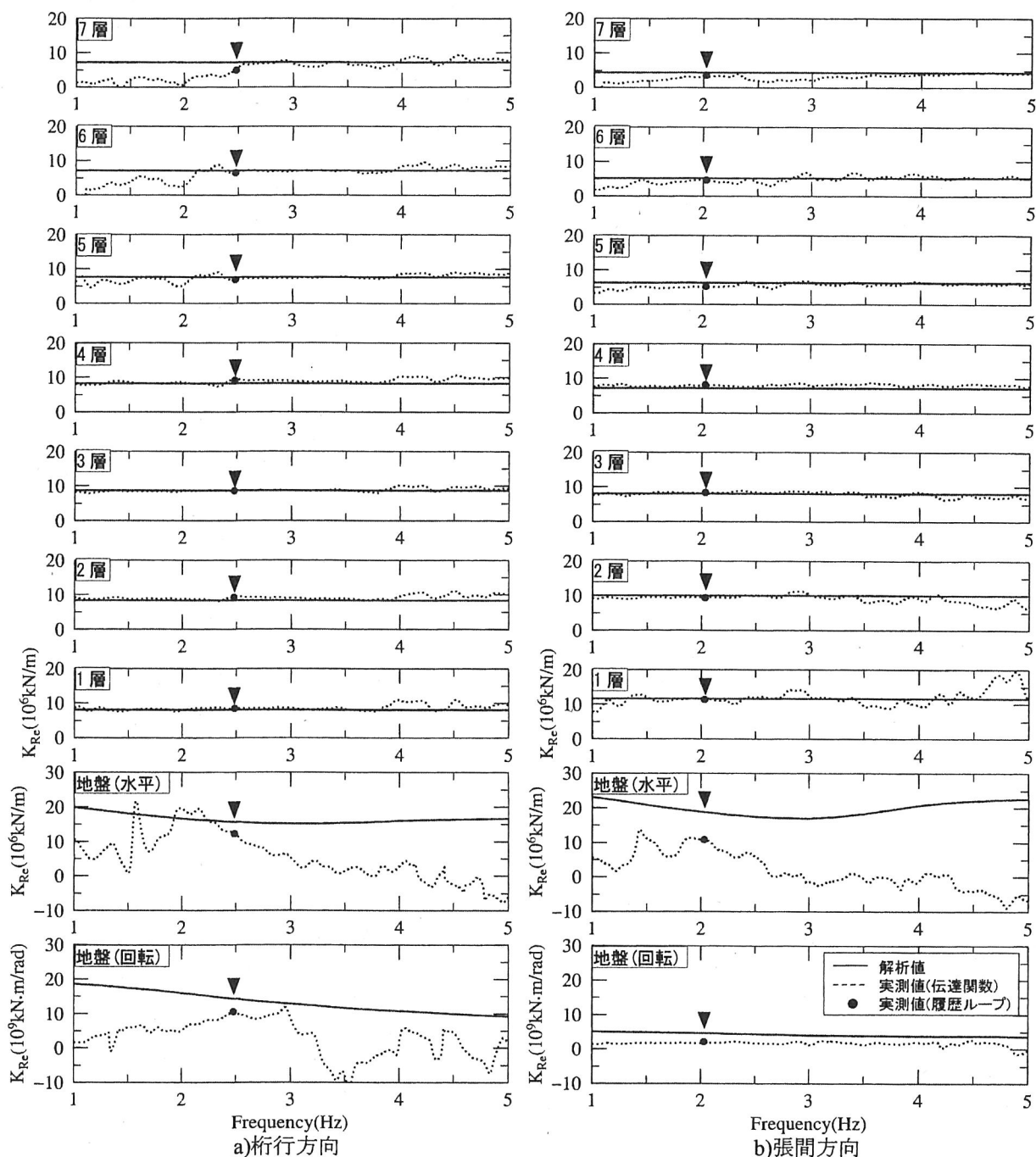


図5 伝達関数より求めた実測値と解析値による複素剛性(実部)の比較

帯域で比較的一定であり、0に近い小さな値を示している。これは、振動数にあまり依存しないとされる構造減衰の特性⁶⁾が表れていることを意味し、その値は当該地震の応答振幅レベルにおいて微小であると推定される。地盤ばねに関しては、実部と同様で全体的に解析より小さい値を示しており、乱れが見られる。現状では伝達関数で得られた結果を直接示したが、これは表層地盤の地震応答時の減衰性状において、特に地下逸散減衰の作用が適切に考慮されているかに着目し

て、検討する必要がある。

6. まとめ

本論では、強震観測記録から求めた建物の層及び基礎-地盤系の力-変形関係の伝達関数によって複素剛性を推定し、解析結果との比較により定量的評価が可能であることを示した。今後の課題は、特に相互作用特性に関して解析値より実測値が小さく評価された結果の追究と、それを説明可能な解析モデルの再構築が必要である。また、上部構造の剛性低下などによる損傷

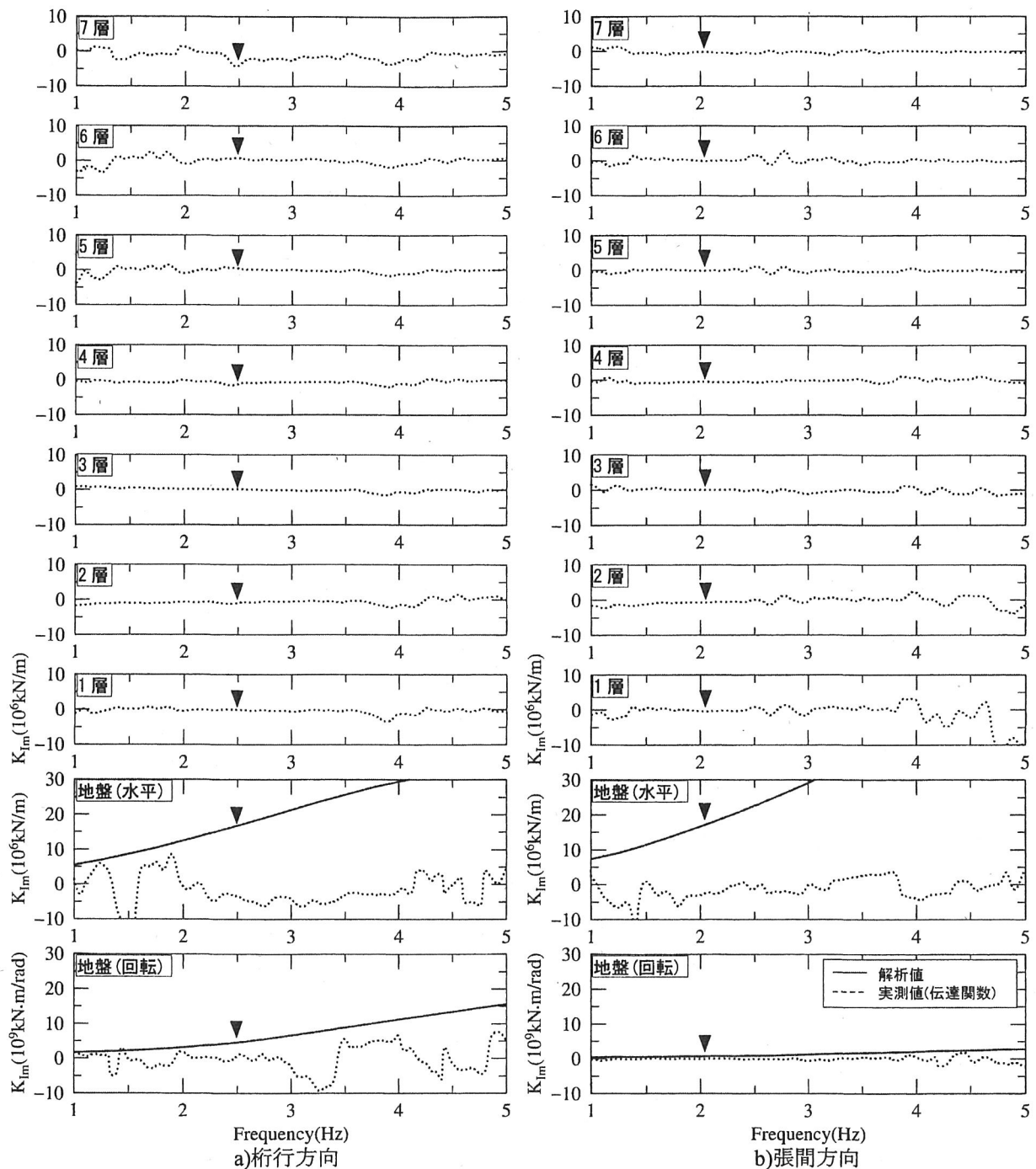


図6 伝達関数より求めた実測値と解析値による複素剛性(虚部)の比較

の検知と評価について、新たに検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 海野元伸、福和伸夫、飛田潤：高密度観測・強制加振実験に基づく地盤-建物連成系の立体振動性状及び履歴特性評価、構造工学論文集 Vol.57B、pp239-248、2011.3
- 2) 海野元伸、福和伸夫、飛田潤：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、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp361-362、2011.8
- 3) 榊原啓太、福和伸夫、飛田潤、小島宏章：観測された動特性を説明可能な構造物の振動解析モデルの構築、日本建築学会技術報告集、第13巻、第25号、pp65-68、2007.3

- 4) 文学章：地盤と構造物との動的相互作用における基礎形式・基礎形状・隣接建物の影響に関する解析的研究、名古屋大学学位論文、2006.3
- 5) 文学章、福和伸夫、小島宏章、酒井理恵子：大規模群杭の効率的な動的相互作用解析法、日本建築学会構造系論文集、第607号、pp109-116、2006.9
- 6) 柴田明徳：最新耐震構造解析(第2版)、森北出版、2007