

構造物と地盤の動的相互作用に関する研究 —各種要因が動的相互作用に及ぼす影響と実建物の解析事例—

名古屋大学 工学部 社会環境工学科
建築学コース 福和研究室 岩城梨佳

1. 研究の背景と目的

日本では沖積平野や埋立地などの比較的軟弱な地盤上に都市が発達してきた。都市部では中低層建物が数多く建設されており、そうした建物は地盤に対して相対的に硬いため、構造物と地盤との動的相互作用の影響を強く受ける。すなわち、動的相互作用によって生じる地下逸散減衰や基礎入力動の変化は建物の応答に大きく影響する。したがって、建物の耐震性を正確に評価するためには動的相互作用の影響を適切に考慮する必要がある。

本研究では、容積法を用いた動的サブストラクチャー法によって薄層要素法と有限要素法を結合した動的相互作用解析手法を用いて、地盤性状・基礎形状・基礎形式、群杭が、それぞれ直接基礎、杭基礎の動的相互作用効果に及ぼす影響を考察する。さらに、実建物の地震観測記録を用いたシミュレーション解析を実施し、結果を地震観測記録と比較して、モデル化に関して考察する。

2. 各種要因が動的相互作用に及ぼす影響

直接基礎、杭基礎のインピーダンスと基礎入力動についての検討内容を図1、2、表1に示す。基本となる解析パラメータを表1示し、その他の値を用いる場合は図1、2中に合わせて記す。ここで、入射波は鉛直下方S波とする。なお、図3以降に示すインピーダンスの縦軸は水平(K_{HH})、回転(K_{RR})成分の値で実部と虚部を示す。また、基礎入力動の縦軸は、自由地盤の応答(U_g)に対する基礎底面での水平(U_H)、回転応($\theta \cdot b$) 応答の伝達関数を示している。

2.1 直接基礎の場合

①～③地盤条件：S波速度が速いほど、地盤のせん断剛性

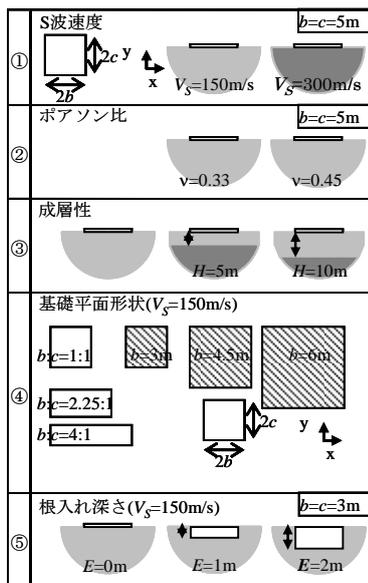


図1 直接基礎の検討内容

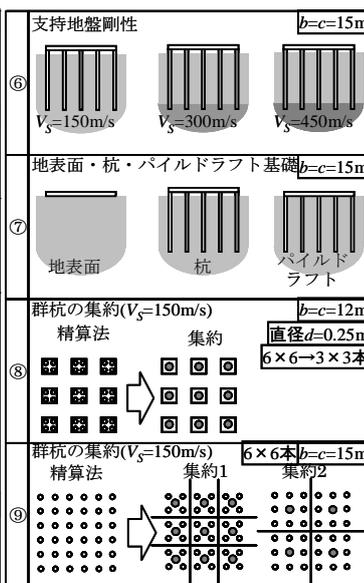


図2 杭基礎の検討内容

表1 基本解析パラメータ

地盤のデータ(共通: $\nu=0.45, h=0.03$)		杭のデータ
$V_s=150\text{m/s}, \rho=1.5\text{t/m}^3$	$V_s=300\text{m/s}, \rho=1.8\text{t/m}^3$	5×5本、直径 $d=1.5\text{m}$ 、杭長 $L=20\text{m}$ 、 $E_p=2.1 \times 10^7$ 、 $\nu_p=1/6$ 、 $\rho_p=2.4\text{t/m}^3$ 、 $h_p=0.03$ kN/m^2
$V_s=450\text{m/s}, \rho=2.0\text{t/m}^3$		

が大きくなるためインピーダンスは大きくなる。ポアソン比は、地盤の伸縮に関係するため、水平方向よりも上下・回転方向のインピーダンスに与える影響が大きくなる。成層地盤では、表層地盤の固有振動数付近で地盤が共振して変位が大きくなり、インピーダンス実部が減少する傾向が見られる。

④基礎形状：インピーダンスの水平成分は力を受ける方向の基礎幅が大きいほど、回転成分は回転軸と直交方向の基礎幅が大きいほど大きくなる傾向が見られる。

⑤根入れ深さ(図3)：インピーダンス実部は低振動数域では根入れが深いほど大きくなるが、基礎とともに動く周辺地盤の付加質量の効果により、より振動数が高くなるにつれて減少する。インピーダンス虚部は根入れが深くなるほど、基礎と地盤の接触面積が増えるため、逸散減衰が増加する効果により大きくなる。基礎入力動の水平成分は、根入れが深いほど高振動側の低減効果が大きく、回転成分は増加の程度が大きい。これは、根入れ側面の深さによる位相差の影響と考えられる。

2.2 杭基礎の場合

⑥支持地盤の剛性：支持地盤の剛性が増加するほど低振動

数域でのインピーダンス実部が大きくなるが、この影響は水平よりも上下・回転成分で大きい。

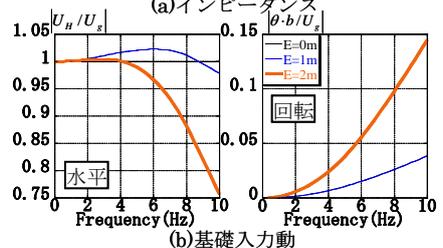
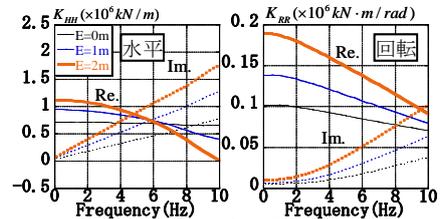


図3 根入れ深さの影響

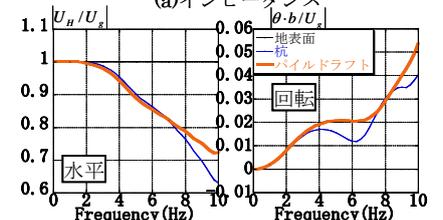
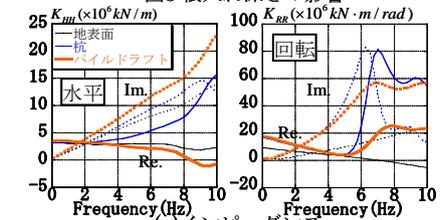


図4 地表面・杭・パイルドRAFT基礎の比較

これは、杭の曲げ剛性に比べて軸剛性が大きく、支持地盤の剛性増加が上下・回転成分に直接的に影響するためである。また、インピーダンス・基礎入力動ともに、支持地盤の剛性が増加すると、表層地盤の固有振動数の影響が明確になり、周波数により波打つように変動する傾向がある。

⑦地表面直接基礎・杭・パイルドラフト基礎（図4）：インピーダンス水平成分は、低振動数域で三者が良く対応し、高振動数域ではパイルドラフト基礎は杭基礎よりも地表面基礎の傾向に近い。回転インピーダンスと水平・回転基礎入力動の低振動数域では、杭基礎とパイルドラフト基礎がほぼ一致する。すなわち、基礎底面の水平摩擦と杭の軸剛性の影響が大きいことがわかる。

⑧～⑨群杭の集約：一つのパイルキャップの下に多数の既成杭を設置する場合や、火力発電所のような大規模な建物の場合には、解析自由度が大きくなり、数値計算が困難になるため、群杭を集約して解析する簡易評価法が提案されている。これを用いて、パイルキャップを有する群杭を検討したところ、精算解と群杭をパイルキャップ毎に集約した簡易解はよく対応することが確かめられた。次に、大規模な群杭を集約範囲の大きさを変えて比較した。インピーダンスの水平成分では集約範囲の影響は小さいが、上下・回転成分では、集約範囲を大きくすると、誤差が大きくなることがわかった。これは集約時に杭の回転剛性を無視しているためと考えられる。

3. 実建物の解析事例

動的相互作用を適切に考慮した構造物の耐震性評価を可能にするためには、まず、動的相互作用を正確に表現できる構造物の解析モデルが必要である。本章では、2章で考察した様々な条件の影響も考慮して、多点強震観測が行われている SRC 造 10 階建建物を対象とした動的相互作用を考慮した解析を行い、解析結果と観測記録を比較してモデル化の妥当性を検討する。表 2 に建物概要、表 3 に地盤の物性、図 5 に基礎・杭伏図、図 6 に強震観測点位置を示す。

モデル化に際して、上部構造は一本棒の多質点系せん断型モデルに置換する。基礎構造は、根入れ部分を深さ 3.1m の剛体とし、杭を各柱位置（一部地下 1 階部分は直近の節点位置）でそれぞれ 1 本に集約する。また、基礎入力動の入射波は鉛直下方 S 波とする。比較に用いる観測記録は能登半島地震(2007年3月25日9:41、*Mj*6.9、震源距離約230km)におけるデータである。

解析結果のインピーダンス・基礎入力動を図 7 に示す。先に単純なモデルで検討した根入れ基礎・杭基礎の特徴が同様に現れていることがわかる。図 8 に、地盤と建物応答の伝達関数 (RF/GL-1m) の解析結果を、観測記録から求めた結果との比較で示す。y 方向は解析と観測がよく対応しているが、x 方向では差異が見られる。

建物付近に地震計が設置されている場合、その観測記録が建物応答の影響を受けることが既往の研究で明らかにされている。その影響を確認するために、建物に隣接した実際の地盤観測点位置(建物からの距離 7.8m、GL-1m)の応答

表2 建物概要

延床面積	15725 ²
階数	地上10階、一部地下1階
高さ	42.30m
軒高	39.30m
構造種別	SRC造
骨組形式	耐震壁付ラーメン構造
基礎種別	杭基礎(PRC+PHC杭)

表3 地盤の物性

上端深度 (m)	質量密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	ポアソン比	減衰定数
0	1.7	200	0.48	0.02
-4.6	1.7	250	0.48	0.02
-17.8	1.7	275	0.48	0.02
-28.8	1.7	380	0.48	0.02
-35.8	1.8	290	0.48	0.02
-44.8	1.8	500	0.48	0.02
-47.8	2	570	0.481	0.02

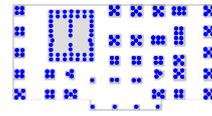


図5 基礎・杭伏図

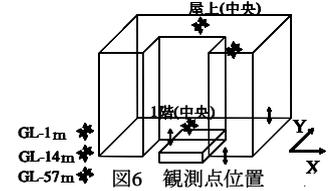
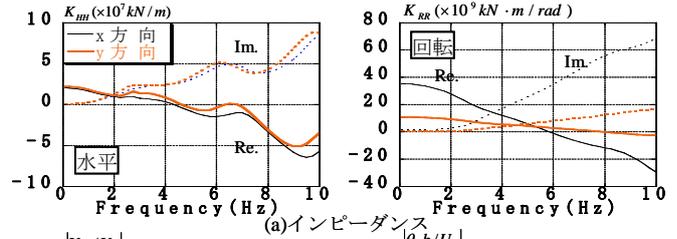
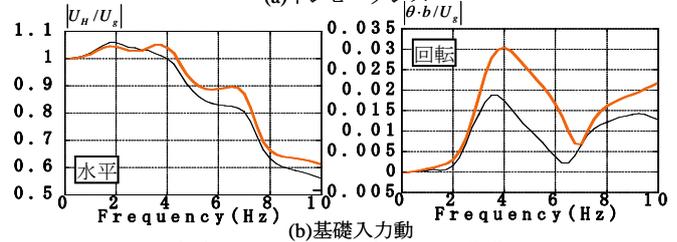


図6 観測点位置



(a)インピーダンス



(b)基礎入力動

図7 対象建物の(a)インピーダンス、(b)基礎入力動

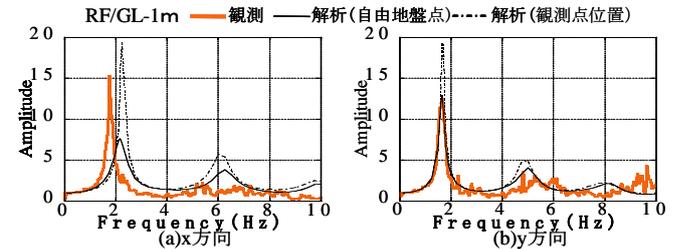


図8 建物の伝達関数

に対する屋上の応答の伝達関数を求め、図 8 に「解析（観測点位置）」として示した。結果として、自由地盤よりも、観測点位置の応答に対する伝達関数の方が、固有振動数付近での値が大きいことがわかる。

建物と地盤の動的相互作用を適切に評価するためには、本論での検討内容に加えて、埋め戻し土などの周辺地盤状況、隣接建物の影響、根入れ部分の変形、上部構造のねじれ・面内変形などの振動性状を考慮したモデル化を行うことが必要であると考えられる。

5. まとめ

本論では、構造物と地盤の動的相互作用特性について、地盤性状・基礎形状・基礎形式、群杭の各種要因が、それぞれ直接基礎及び杭基礎のインピーダンス・基礎入力動に及ぼす影響を検討し、まとめた。さらに、多点強震観測が行われている SRC 造 10 階建建物の解析を行い、解析結果と観測記録を比較した結果、両者には差異が見られた。より実情に則した解析を可能とするためには、周辺地盤状況や周辺建物の影響、構造物のより詳細な振動性状などの考慮が今後の課題である。