

表-2 実験ケース(正弦波入力)

実験ケース	入力波形	目標加速度 $A(m/sec^2)$	加振振動数 f_0 (Hz)
CaseS-1	正弦波 スイープ	0.0~2.0	2
CaseS-2		0.0~2.0	14
CaseS-3		0.0~3.0	6
CaseS-4	正弦波	1.0	6

表-3 実験ケース(地震波入力)

実験ケース	入力波形	目標加速度 $A(m/sec^2)$	時間軸 圧縮
CaseI2	板島橋	0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5	1/2
CaseI4		0.25, 0.4, 0.5, 0.8, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5	1/4
CaseI6		0.4, 0.5, 0.8, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5	1/6
CaseK2	神戸海洋 気象台	0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5	1/2
CaseK4		0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5	1/4
CaseK6		0.45, 0.5, 0.8, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5	1/6

実験では、4種類の波形を用い、表-2,3に示すケースで加振を行った。ここで、地震波については、プレート境界型地震及び内陸直下型地震で観測された板島橋(TR)及び神戸海洋気象台(NS)の加速度波形を用いた。また、地震波の卓越振動数が杭基礎構造物の共振的な現象に及ぼす影響を検討するために、それぞれの波形において時間軸を1/2,1/4,1/6に圧縮し卓越振動数が異なる波形を設定した。また、異なる液状化した地盤状態を再現するために、設定した6種類の地震波形において加速度の最大値を8~9段階に変化させた。

3. 正弦波加振実験

液状化の進行過程における共振的な現象を把握するため行った正弦波スイープ加振実験について、入力波の加振振動数 f_0 が $f_0 < f_1$ (f_1 :杭基礎(地盤無)の固有振動数)の実験ケースとしてCaseS-1、 $f_1 < f_0 < f_0$ (f_0 :杭基礎(地盤有)の固有振動数)の実験ケースとしてCaseS-2,CaseS-3における入力波及びフーチングの加速度の時刻歴、並びに過剰間隙水圧比、卓越振動数の時間変化をそれぞれ図-2,3,4に示す。ここで、フーチングの卓越振動数は、液状化した地盤の状態を過剰間隙水圧比 Lu が $Lu=0.4$ となる深度で代表し、ランダム波加振実験²⁾の結果より求めた回帰式により算出した(以下においても同様に算出)。

図-3,4に示した $f_1 < f_0 < f_0$ の実験ケースでは、いずれの実験ケースも液状化の進行過程においてフーチングの加速度が入力波の加速度に対して増幅した後、液状化の進行に伴い減衰しており、共振的な現象が発生したが、図-2に示した $f_0 < f_1$ の実験ケースでは、液状化の進行過程においてフーチングの加速度は入力波の加速度とほぼ同程度の振幅を示しており、共振的な現象は発生しなかった。また、共振的な現象が発生した $f_1 < f_0 < f_0$ の実験ケースでは、図-3,4に示したようにフーチング加速度が最大となった付近において、入力波とフーチングの卓越振動数が概ね一致したが、共振的な現象が発生しなかった $f_0 < f_1$ の実験

ケースでは、図-2に示したように加振の継続時間中において入力波とフーチングの卓越振動数は一致しなかった。さらに、共振的な現象が発生したCaseS-2とCaseS-3を比較すると、共振的な現象が発生した時の地盤の状態に差異が認められ、入力波の加振振動数が高いCaseS-2では表層付近のみが液状化した状態、入力波の加振振動数が低いCaseS-3では深い深度まで液状化した状態であった。この入力波の加振振動数と液状化した深度の関係には、正弦波スイープ加振実験においてもランダム波加振実験²⁾の結果と同様な傾向が認められる。

次に、一定振幅の正弦波加振実験についても正弦波スイープ加振実験と同様に共振的な現象が発生するか確認した。正弦波スイープ加振試験において共振的な現象が発生したケースと同様の地盤状態を作るために、入力波の最大加速度を調整した。CaseS-4における入力波及びフーチングの加速度の時刻歴、並びに過剰間隙水圧比及び卓越振動数の時間変化を図-5に示す。フーチングの加速度は、入力波の加速度に対して増幅する傾向を示しており、一定振幅の正弦波加振実験においても正弦波スイープ加振試験と同様に共振的な現象を確認することができた。また、フーチング加速度が増幅している時は、入力波とフーチングの卓越振動数は概ね一致していた。

4. 地震波加振実験

地震波加振による実験ケースについて、加振中に液状化がほとんど進行しなかったCaseI4-1(目標加速度 $A=0.25m/sec^2$)、地表面付近のみが液状化したCaseI4-2($A=0.4m/sec^2$)、土槽中央付近までがほぼ液状化したCaseI4-4($A=0.8m/sec^2$)、土槽全体がほぼ液状化したCaseI4-9($A=2.5m/sec^2$)における入力波及びフーチングの加速度の時刻歴、並びに卓越振動数の時間変化をそれぞれ図-6,7,8,9に示す。この4ケースは同じ地震波形で加振を行っているにもかかわらず、フーチングの加速度には、液状化の影響により生じたと考えられる差異が認められる。

CaseI4-1におけるフーチングの加速度は、全加振時間中において入力波の加速度に対して大きくなった。また、液状化がほとんど進行していないため地盤の剛性が大きく、フーチングの卓越振動数は加振継続中一定であった。CaseI4-2, CaseI4-4におけるフーチングの加速度は、加振とともに大きくなるが、CaseI4-2では3.2sec付近、CaseI4-4では2sec付近で最大となっている。このように、CaseI4-2とCaseI4-4を比較すると、フーチングの加速度が最大となる時刻は異なっている。この理由としては、図-7,8に示すように液状化の進行に伴い低下するフーチングの卓越振動数と入力波の卓越振動数が一致する時刻がCaseI4-2とCaseI4-4で異なるためと考えられる。なお、

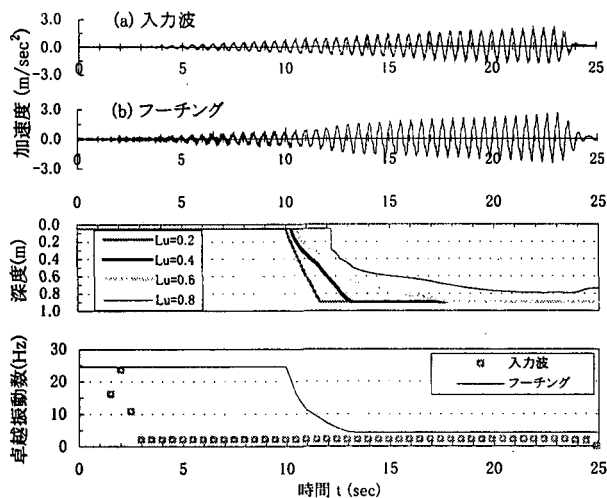


図-2 加速度の時刻歴及び過剰間隙水圧比、卓越振動数の時間変化(CaseS-1)

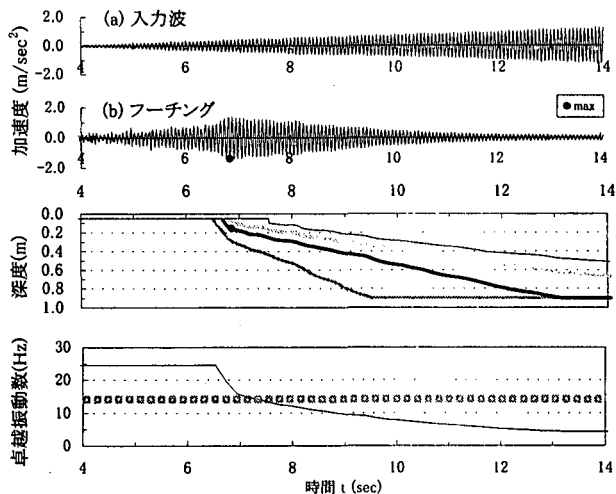


図-3 加速度の時刻歴及び過剰間隙水圧比、卓越振動数の時間変化(CaseS-2)

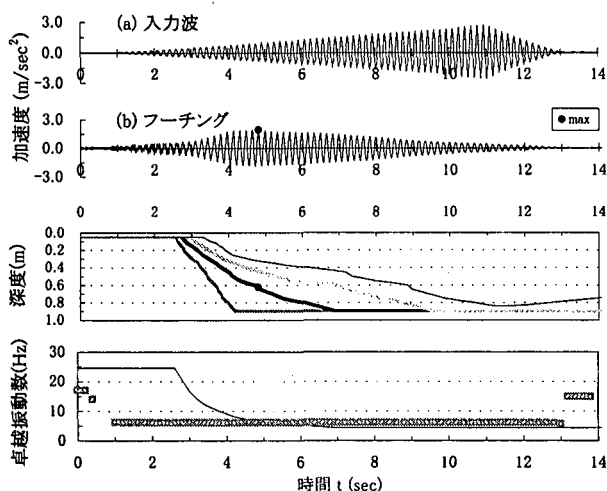


図-4 加速度の時刻歴及び過剰間隙水圧比、卓越振動数の時間変化(CaseS-3)

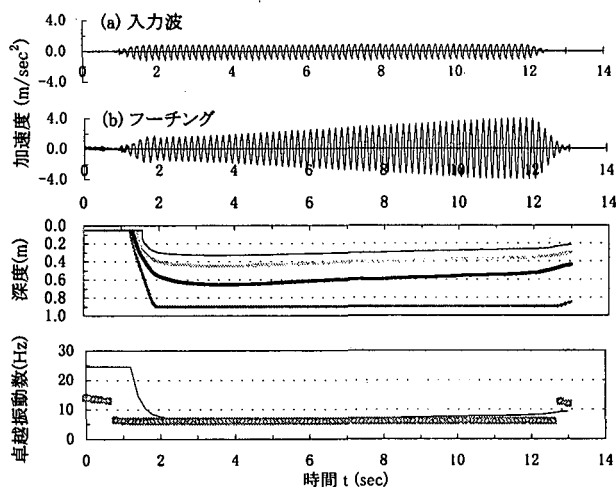


図-5 加速度の時刻歴及び過剰間隙水圧比、卓越振動数の時間変化(CaseS-4)

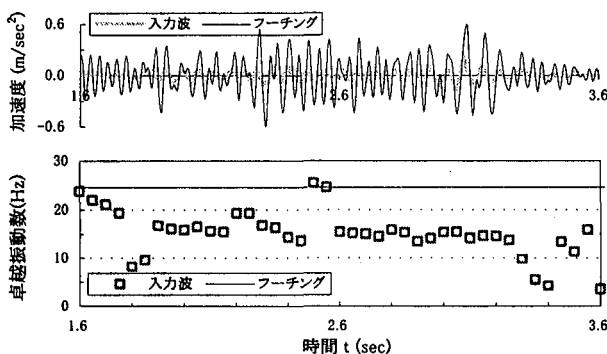


図-6 加速度の時刻歴及び卓越振動数の時間変化(CaseI4-1)

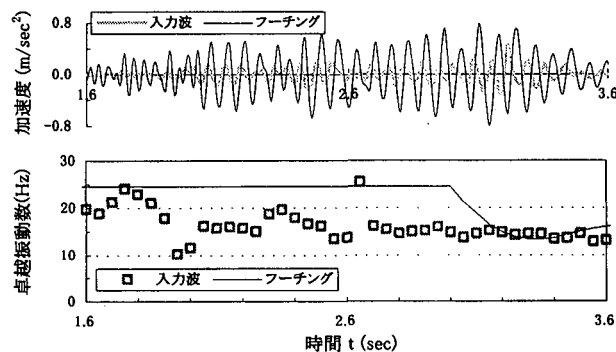


図-7 加速度の時刻歴及び卓越振動数の時間変化(CaseI4-2)

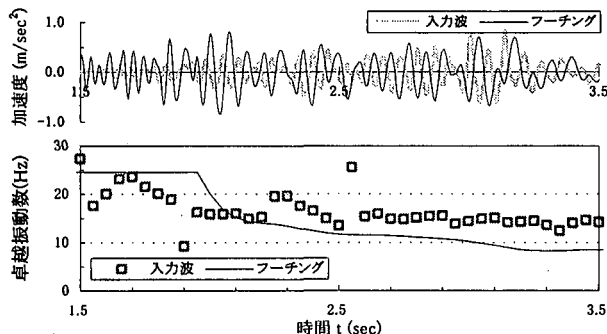


図-8 加速度の時刻歴及び卓越振動数の時間変化(CaseI4-4)

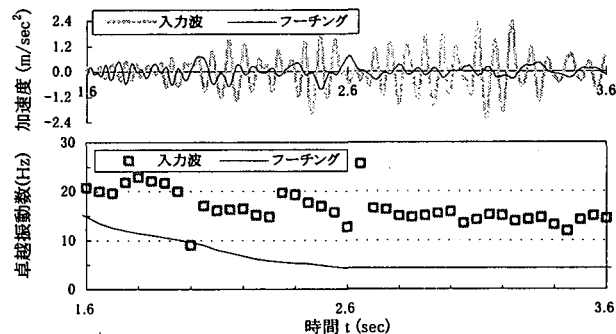
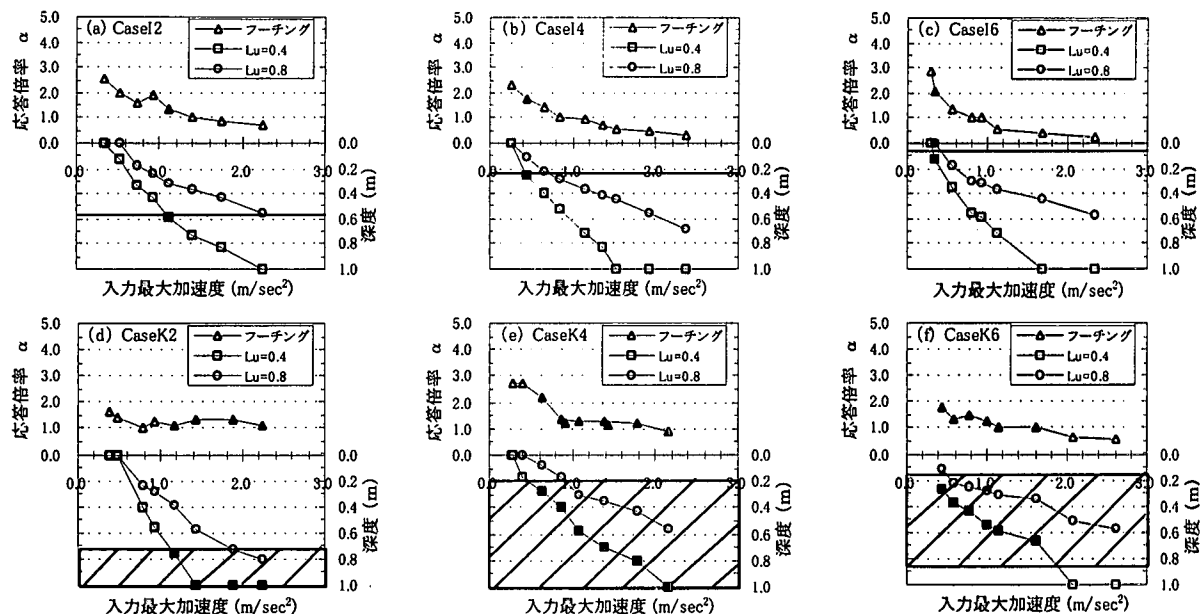


図-9 加速度の時刻歴及び卓越振動数の時間変化(CaseI4-9)



注) —, は、入力波の卓越振動数から推定した共振的な現象が想定される地盤の範囲を示す。
また、—, の範囲に該当するケースの応答倍率及び $Lu=0.4$ を黒塗りで示す。

図-10 入力波の最大加速度と応答倍率及び過剰間隙水圧比の深度分布の関係

フーチングの加速度が最大となる時刻は、フーチングと入力波の卓越振動数が概ね一致する時刻であった。Case4-9 におけるフーチングの加速度は、ほとんど増幅せず主要動が始まった付近以降は入力波の加速度に対して小さくなった。これは、他の実験ケースに比べ入力した加速度が大きく加振初期の段階で深い深度まで液状化が進行したため、フーチングの加速度は増幅せず、液状化に伴い減衰したものと推測される。また、Case4-9 におけるフーチング加速度の時刻歴には、液状化の進行に伴う長周期化が認められた。

次に、各実験ケースにおける入力波の最大加速度と、入力波の最大加速度に対するフーチングの最大加速度の応答倍率及び過剰間隙水圧比(Lu)の深度分布の関係を図-10 に示す。ここで、図中に参考を示した共振的な現象が想定される地盤の範囲は、板島橋の波形はある特定の振動数が卓越しているため1本線で示し、神戸海洋気象台の波形では卓越した振動数がある一定の幅を有しているため、その範囲を示した。どのタイプにおいても入力波の最大加速度にほぼ比例して液状化深さが深くなっており、その傾向は概ね同じである。入力加速度が小さく全層において液状化が見られないケースについては、すべてのタイプで応答倍率が大きくなった。これは、加速度のレベルが小さいため振動台のノイズが影響すること、また、液状化前の地盤においては、地盤内の加速度が地表に向かって増幅することが主な原因と考えられ、液状化の進行過程における共振的な現象とは別の現象で増幅したものと推測される。 $Lu=0.4$ の深度が、図中に示した共振的な現象が想定される範囲付近に該当するケースでは、ほとんどのケースにおいて応答倍率が1以上となっており、液状化の進行過程においてフーチングの加速度

が増幅していることがわかる。また、その応答倍率を入力した地震波形のタイプ別で見ると、板島橋のケースでは概ね1.8倍程度、神戸海洋気象台のケースでは概ね1.3倍程度であり、波形の繰り返し回数が多い板島橋を入力したケースの方が応答倍率が大きいという傾向を示している。このことから、入力した地震波形の繰り返し回数多いほど応答倍率が大きくなる傾向があるものと推測できる。

5. まとめ

模型振動実験により、液状化の進行過程における杭基礎構造物の共振的な振動挙動について検討した。

実験結果より、正弦波及び地震波入力の際のいずれの場合も、入力波と杭基礎構造物の卓越振動数が一致する付近で共振的な現象が発生し、フーチングの加速度が増幅することがわかった。さらに、地震波を入力した場合、液状化の進行程度によりフーチングの加速度が最大となる時刻が異なること、並びに入力波形の繰返し特性の違いにより入力波加速度に対するフーチング加速度の応答倍率が異なることがわかった。

参考文献

- 1) 澤田, 西村: 液状化地盤中の基礎構造物の挙動に関する実験的研究, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.597~600, 1997
- 2) 佐藤, 田村, 東, 小林: 液状化の進行過程における杭基礎の地震時挙動に関する模型振動実験, 第56回年次学術講演会, 2001 (投稿中)