

液状化過程における杭-地盤系の剛性と減衰

水野二十一¹・平出 務²

¹ 社団法人 建築研究振興協会 建築住宅研究所 研究専門役 (〒108-0014 港区芝五丁目 26-20)

² 独立行政法人 建築研究所 建築生産研究グループ 主任研究員 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

The paper examines stiffness and damping of piles in liquefaction process. During shaking table harmonic excitation at the frequency 3Hz, an actuator applied harmonic displacements of constant amplitudes at the frequency 1Hz on the rising stage of excess pore water pressure. Based on the test results, stiffness and damping at pile head in liquefaction process are evaluated and considered. Damping of pile is affected by displacements of pile and excess pore pressure distribution. Damping ratios are evaluated at least from 20 to 40 percents in liquefaction process.

Key Word: Liquefaction, Shaking Table, Oil Hydraulic Actuator, Stiffness, Damping, Pile, Saturated Soil

1. はじめに

地震動による初期液状化から完全液状化に至る過程においては、地盤の物性（特に剛性）が液状化の程度に応じて変化していく。杭基礎を用いた構造物においては、杭基礎に作用する力・変位が変化することとなり、その変化状況を把握することは、杭基礎の耐震性を評価する上で重要である。これまで、大型せん断土槽を用いた杭基礎-地盤系の液状化実験において、液状化後の過剰間隙水圧消散過程での起振機実験を実施し、液状化地盤の挙動として過剰間隙水圧消散とともに地盤剛性が下層より回復してゆくことが確認された。また、起振機実験における杭基礎の変位共振曲線から過剰間隙水圧消散過程での杭基礎全体としてのインピーダンス（剛性と減衰）を得て来た。

本報告では、液状化過程における剛性と減衰の評価のため行った、振動台実験とアクチュエータ载荷（加振）を組み合わせた実験結果と考察について報告する。地盤-杭基礎系モデルを振動台加振し、過剰間隙水圧が上昇する過程で、杭基礎モデルの杭頭に強制水平変位をアクチュエータにより加えるものである。杭頭変位と杭頭荷重の関係から杭基礎に作用する外力及び液状化過程における剛性と減衰を評価

する試みである。

2. 実験概要

(1) 試験体概要

実験には、独立行政法人建築研究所の中型振動台を使用した。用いたせん断土槽の内法寸法は、長さ（振動方向）3.5m、奥行0.8m、高さ1.0mで、アルミ角パイプ製の土槽フレームを18段積み重ねたものである。土槽内側には止水用に厚さ1.0mmのゴムメンブレンを取り付けている。杭模型は、幅8cm、厚さ4.5mmの鋼材を使用した。杭模型の境界条件は、杭頭部分は固定、杭先端部分はピンである。基礎模型は、鋼板による幅50cm、奥行25cm、高さ10cmの箱型とした。地盤作製後に基礎模型を杭頭に設置し固定する方法で試験体を作製した。

(2) 地盤作製方法

模型地盤材料には日光珪砂砂5号を用いた。図1に粒径加積曲線を、表1に物理試験結果を示す。せん断土層内に杭模型を設置・固定し、水深30cmの状態で砂を落下させる水中落下法で模型地盤を作製した。

(3) 計測概要

実験計測概要を図2に示す。地盤の計測線 G-1, G-2 には加速度計と過剰間隙水圧計を、地盤計測線 G-3 には過剰間隙水圧計をそれぞれグリッドに設置した。杭(P-1)の外側面(振動方向の前面側)には、加速度計、過剰間隙水圧計を、振動方向の前後面に圧力センサーを設置した。杭(P-2)の表面(振動方向の前後面)にはひずみゲージを貼付した。これらの計測とは別に、模型地盤の変位計測用に光ファイバーセンサーを地盤中に設置して、模型地盤変位の直接計測を試みている。なお、振動台と基礎模型、計測線 G-1 の地表面及び光ファイバーセンサーの地表面との相対変位計測用にレーザー変位計を使用している。

(4) 加振・加力方法

加力は、振動台加振中に基礎模型に設置したアクチュエータから杭頭強制変位を与える方法で行った。アクチュエータ先端と基礎模型の間をピン治具で接

続し、アクチュエータ変位を直接基礎模型に与えることとした。実験の加振・加力は、次の様な手順で行った。振動台加振前の杭頭アクチュエータ変位をゼロとし、模型地盤内の過剰間隙水圧値をモニターしながら、3Hz の SIN 波を振動台に入力し、目標最大加速度まで入力加速度を増加させる。このとき、モニターした過剰間隙水圧値の上昇とともにアクチュエータを 1Hz の変位制御で目標変位まで加力する。過剰間隙水圧値の消散状況を確認してアクチュエータの加力を終了し、振動台加振を終了する。

(5) 実験ケース

表2に実験ケース一覧を示した。投入した砂の全重量と作製した地盤の体積から求めた初期の地盤相対密度は、20~27%とゆるい状態であった。各実験ケースとも振動台加振の前に、アクチュエータにより目標変位 1mm の静的な杭頭載荷を行い、初期地盤状態を確認した。また、一度加振を終了した後に、振動台の入力加速度を大きくして、地盤を再度液状

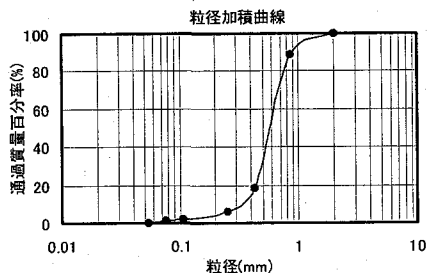


図1 粒径加積曲線

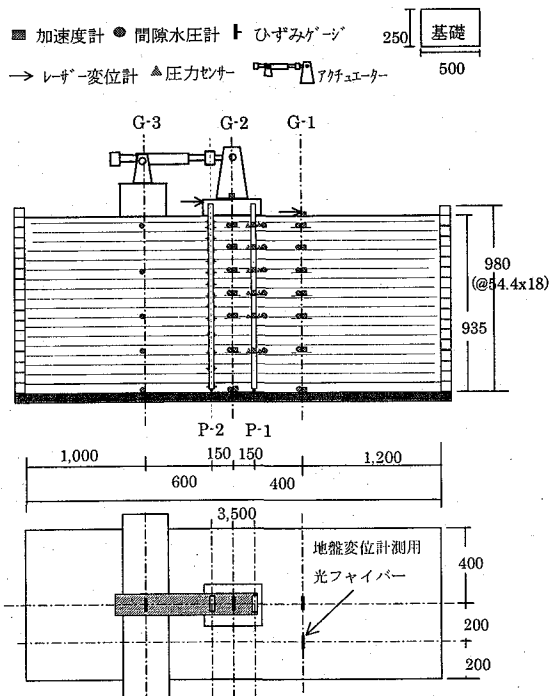


図2 実験計測概要

表1 物理試験結果一覧

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.699
粗砂分 0.425~1mm (%)	80.2
細砂分 75 μ m~0.425mm (%)	18.2
シルト分 5~75 μ m (%)	1.6
均等係数 U_c	1.76
曲率係数 U_c	1.07
D50 (mm)	0.575
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.626
最小乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.304
最小間隙比 e_{min}	0.66
最大間隙比 e_{max}	1.07

表2 実験ケース一覧

実験 Case	地盤密度 (g/cm ³)	相対密度 (%)	初期面よりの平均沈下量(mm)	振動台加振条件	杭頭アクチュエータ加力(1Hz)
Case1	-1	1.372	25.0		静的変位 1mm
	-2	1.372	25.0	35.4 Sin 3Hz 液状化 最大加速度100gal	目標変位 10mm
	-3	1.426	43.2	110.9 Sin 3Hz 再液状化 最大加速度300gal	目標変位 5mm
Case2	-1	1.379	27.3		静的変位 1mm
	-2	1.379	27.3	64.9 Sin 3Hz 液状化 最大加速度100gal	目標変位 10mm
	-3	1.481	60.5	112.5 Sin 3Hz 再液状化 最大加速度300gal	目標変位 3~5~3mm
Case3	-1	1.376	26.3		静的変位 1mm
	-2	1.376	26.3	74.9 Sin 3Hz 液状化 最大加速度100gal	目標変位 18mm
	-3	1.496	64.7	115.2 Sin 3Hz 再液状化 最大加速度300gal	目標変位 0~5mm
Case4	-1	1.358	20.0		静的変位 1mm
	-2	1.358	20.0	86.9 Sin 3Hz 液状化 最大加速度100gal	目標変位 25mm
	-3	1.497	65.0	143.6 Sin 3Hz 再液状化 最大加速度300gal	目標変位 10mm

*アクチュエータのデータ(変位と反力)を計測できず。

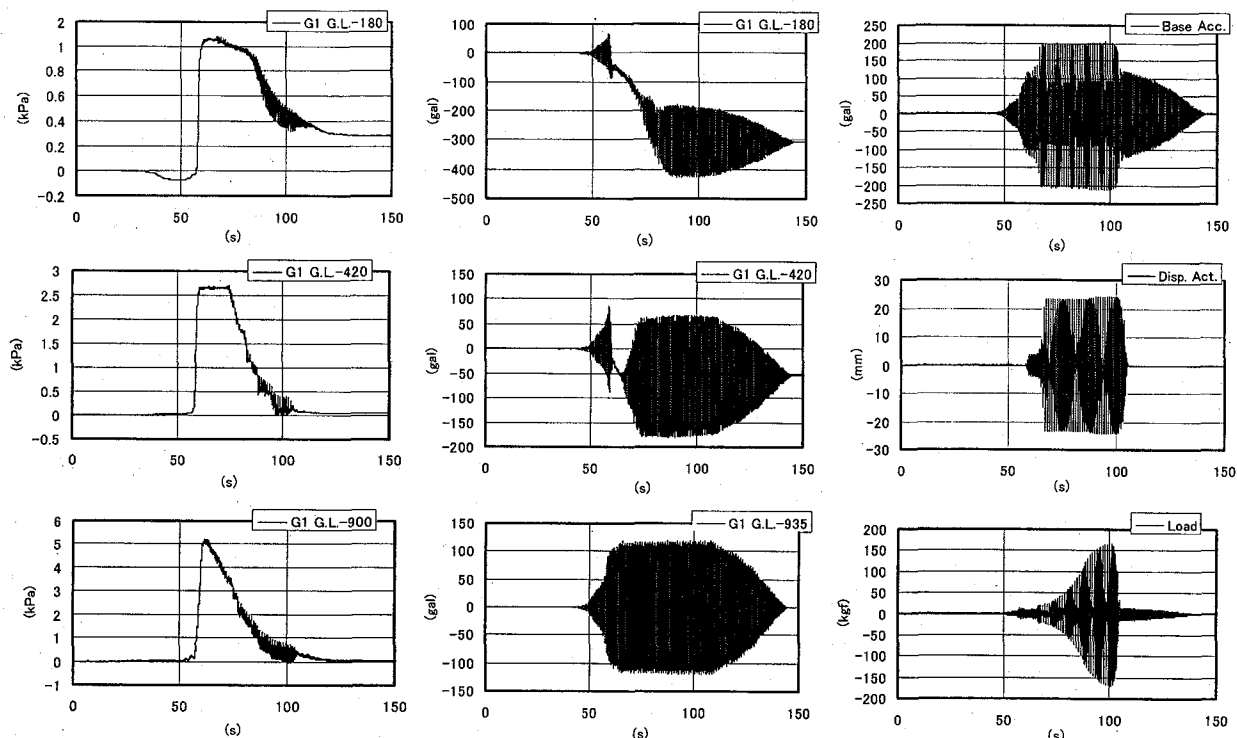


図3 実験計測概要 (Case4-2)

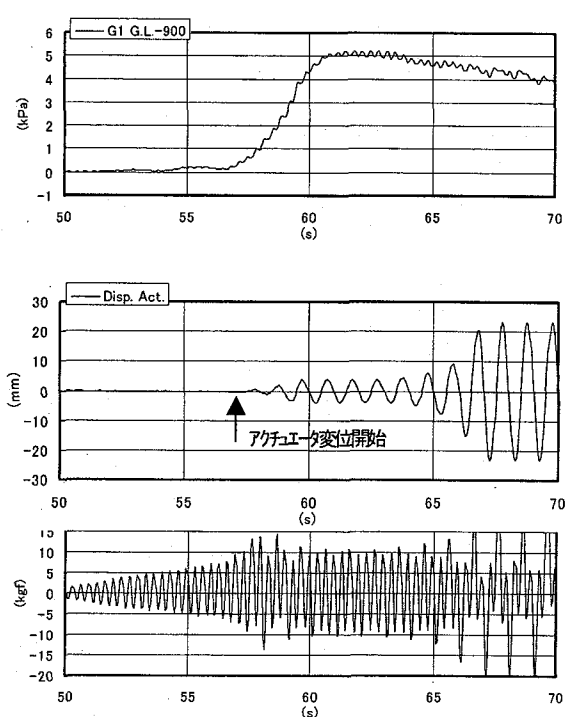


図4 過剰間隙水圧の上昇状況とアクチュエータの強制変位と荷重の関係 (Case4-2)

化させる加振も行った。

3. 実験結果の概要

実験結果の一例として、Case4-2における計測線

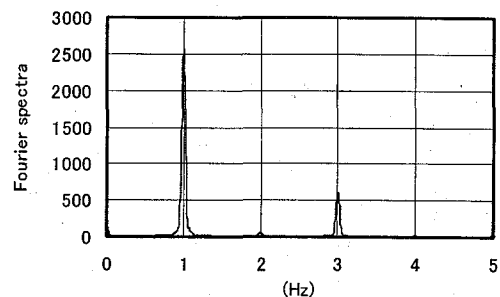


図5 アクチュエータ荷重のフーリエスペクトル (Case4-2)

G-1 の過剰間隙水圧の変化状況と加速度計記録、基礎の加速度計記録、基礎に取り付けたアクチュエータの変位と荷重の変化状況を図3に示す。また、過剰間隙水圧の上昇状況とアクチュエータの変位と荷重の時刻歴関係を図4に示す。この実験ケースCase4-2では、計測開始から約44秒後から振動台に3HzのSIN波（最大加速度100gal）を入力し、過剰間隙水圧の上昇を確認した約57秒から約105秒まで間で杭頭アクチュエータに強制変位を与えた。ただし、当初変位は0.4cmで、64秒付近から約2cmにあげている。

地盤の加速度記録には、過剰間隙水圧値の上昇に伴って地盤が液状化し、加速度値が小さくなる現象と基線のシフトが見られる。基線のシフトは、液状化により加速度計が傾斜したことによる。

振動台が加振状態でアクチュエータの変位が0

の状態 (57 秒以前) は、液状化により杭に作用する荷重が徐々に増加していることがわかる。これは、振動台加振により地盤が杭を押し引きした結果と考えられる。アクチュエータに強制変位を与え始めた時点では、荷重が一時的に大きくなるが、同時に過剰間隙水圧が上昇中で、その後荷重は一定の値となる (64 秒まで)。全時間のアクチュエータ荷重値のフーリエスペクトルは、図 5 に示すように、アクチュエータの強制変位による影響と振動台加振による地盤の影響が現れている。

4. アクチュエータの強制変位と荷重の関係

アクチュエータを強制変位させた時に得られているアクチュエータ荷重は、過剰間隙水圧が上昇して地盤の特性が変化していく中で、杭を強制変位させたことにより杭に作用する外力のトータル値と考えられる。ここではアクチュエータによる強制変位による 1Hz 成分と振動台加振による 3Hz 成分を分離し、1Hz 成分のみを取り出し、このデータから過剰間隙水圧上昇過程における杭頭剛性と減衰の評価を実験 Case2-2 と Case4-2 について試みる。

(1) Case2-2 の場合

Case2-2 における過剰間隙水圧の上昇状況とアクチュエータの変位と荷重の時刻歴関係については図 6 に示す。1Hz 成分によるアクチュエータの強制変位と荷重の関係を図 7 に示す。図 8、図 9、図 10 には各々杭の曲げモーメント分布、過剰間隙水圧分布

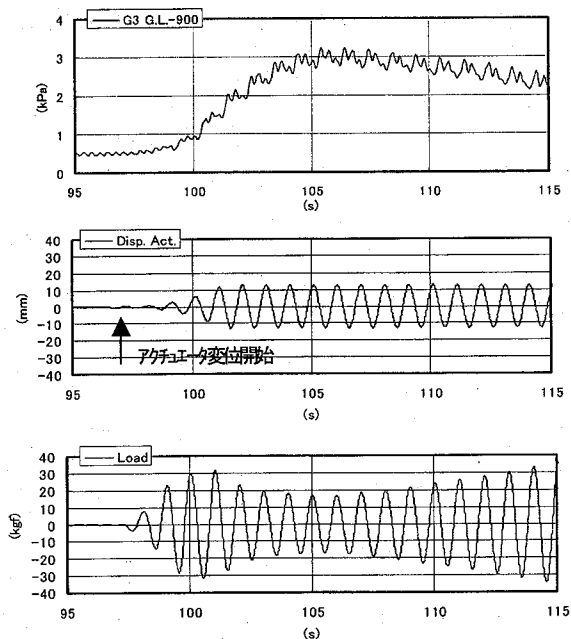


図 6 過剰間隙水圧の上昇状況とアクチュエータの強制変位と荷重の関係 (Case2-2)

布、過剰間隙水圧比分布を示す。

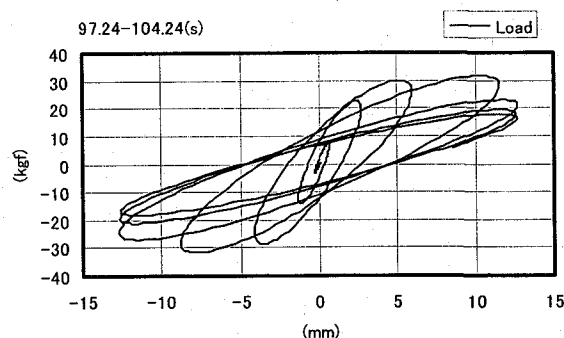


図 7 アクチュエータの変位と荷重の関係 (Case2-2)

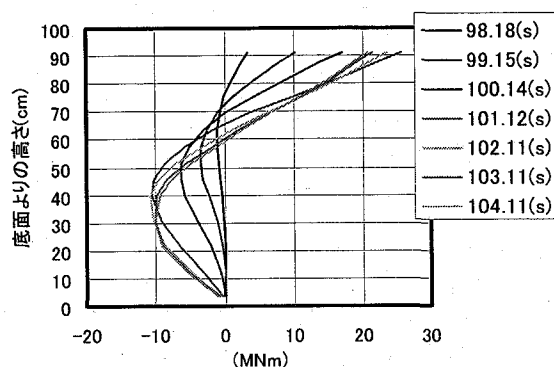


図 8 杭の曲げモーメント分布 (Case2-2)

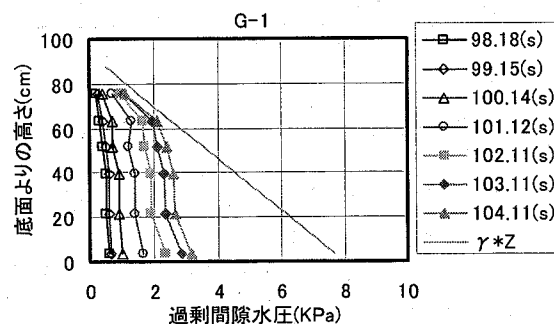


図 9 過剰間隙水圧分布 (Case2-2)

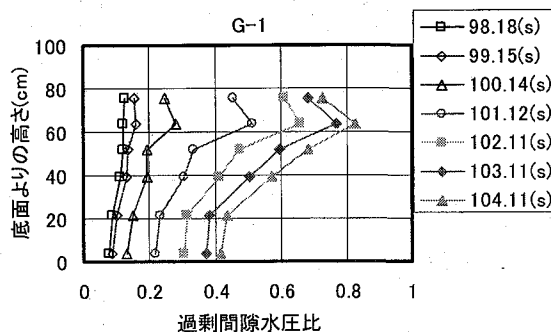


図 10 過剰間隙水圧比分布 (Case2-2)

(2) Case 4-2 の場合

1Hz 成分によるアクチュエータの強制変位と荷重の関係を図 1 1 に示す。扱っている変位は、0.4cm の小変位の範囲である。図 1 2、図 1 3、図 1 4 には各々杭の曲げモーメント分布、過剰間隙水圧分布、過剰間隙水圧比分布を示す。

(3) 杭の曲げモーメント分布

過剰間隙水圧が上昇する過程（約 5-6 秒間）における杭の曲げモーメントは、両ケースとも時間の経過とともに、地中曲げモーメントゼロ点、最大点とも液状化による地盤剛性の低下により下方に移動する（図 9 と図 1 2）。液状化の程度がより穏やかな Case2-2 では、曲げモーメント最大値が、Case4-2 の約 2 倍と大きな値となっている。

(4) 過剰間隙水圧の分布

両ケースとも、過剰間隙水圧比の最大値は約 0.8 であるが、Case2-2 では、地盤高さ 80cm の地点のみで、土槽底面近傍では、0.4 程度にとどまっている。一方、Case4-2 では全層にわたり 0.7-0.8 となっている。Case4-2 の方では液状化が短時間に生じており、Case2-2 ではそれに比べ緩やかである。

(5) 剛性と減衰の評価

Case2-2 と Case4-2 のアクチュエータ強制変位の正負ピーク時における杭頭荷重-変位関係、杭頭剛性-変位関係、杭頭荷重-平均過剰間隙水圧比関係、杭頭剛性-平均過剰間隙水圧比関係を、まとめて図 1 5 に示す。なお、データは過剰間隙水圧の上昇過程で平均過剰間隙水圧比の高いアクチュエータ強制変位の開始から 8 サイクルまでを示している。Case4-2 の杭頭荷重-変位関係については、液状化により杭頭変位 0.4cm の位置で杭頭荷重が 0 に近くなっている。その後、アクチュエータ変位をあげた時点以降、杭頭荷重は回復している。一方、杭頭剛性-変位関係、杭頭剛性-平均過剰間隙水圧比関係は、共に単調減少の傾向である。

減衰の評価方法は、変位ゼロ点間の半サイクルの面積を半サイクルのエネルギー損失とし、ループの変位最大点、変位最大点から X 軸への垂線、原点の三点で囲まれた三角形面積を 1 サイクルのエネルギーとした。非線形のエネルギー評価についてはいくつかの考え方・方法があるが、最初のステップとして線型材料に適用可能な最も単純な方法によった。

図 1 6 に、両ケースの減衰率-杭頭変位関係、減衰率-平均過剰間隙水圧比関係を示す。なお、Case4-2 では変位 0.4cm の位置で、減衰率が非常に大きくなっ

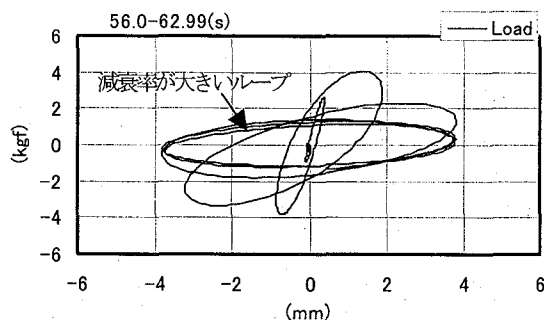


図 1 1 アクチュエータの変位と荷重の関係 (Case4-2)

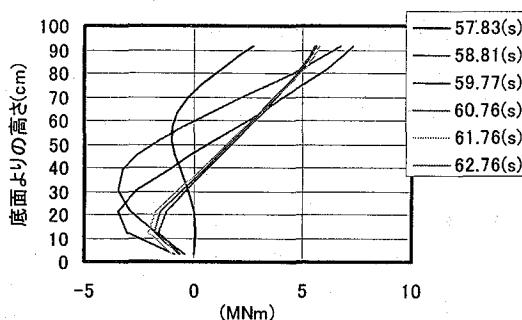


図 1 2 杭の曲げモーメント分布 (Case4-2)

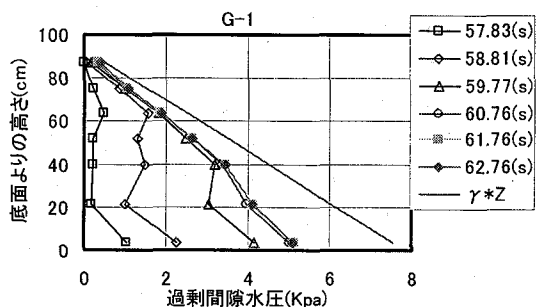


図 1 3 過剰間隙水圧分布 (Case4-2)

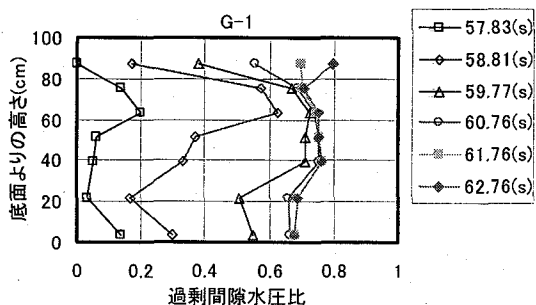


図 1 4 過剰間隙水圧比分布 (Case4-2)

ているが、この時点での変位-荷重関係のサイクルのループ（図 1 1）はほぼ水平に傾いており、本評価法の限界である可能性もあり、今後の検討としたい。Case2-2 では、過剰間隙水圧比で 0.7 程度まで、杭頭変位で 1.3cm 程度までの範囲で、減衰率 20-30% である。Case4-2 では、杭頭変位 0.4cm までの範囲、過剰間隙水圧比 0.5 までの範囲で、減衰率 20-40% である。

5. まとめ

液状化振動台実験とアクチュエータ載荷（加振）を組み合わせた実験により、杭頭における剛性と減衰を評価した。減衰の評価法は最も簡単なものを採用した。杭頭における減衰率は地盤中の過剰間隙水圧の影響を受け、その分布により大きさが異なる。減衰率は、平均過剰間隙水圧比が0.7程度までの範囲で、20～30%程度以上はあると考えられる。

参考文献

- 1) 水野二十一, 平出務, 飯場正紀: 液状化過程における杭基礎の挙動—起振機実験による動特性把握—, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.253-258, 土木学会, 2002年3月
- 2) Hatsukazu MIZUNO and Tsutomu HIRADE: Stiffness and Damping of Soil-Pile System in Liquefaction Process, Proceedings of Eighth U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and countermeasures Against Liquefaction, Technical Report MCEER-03-0003, pp.559-570, June 30, 2003

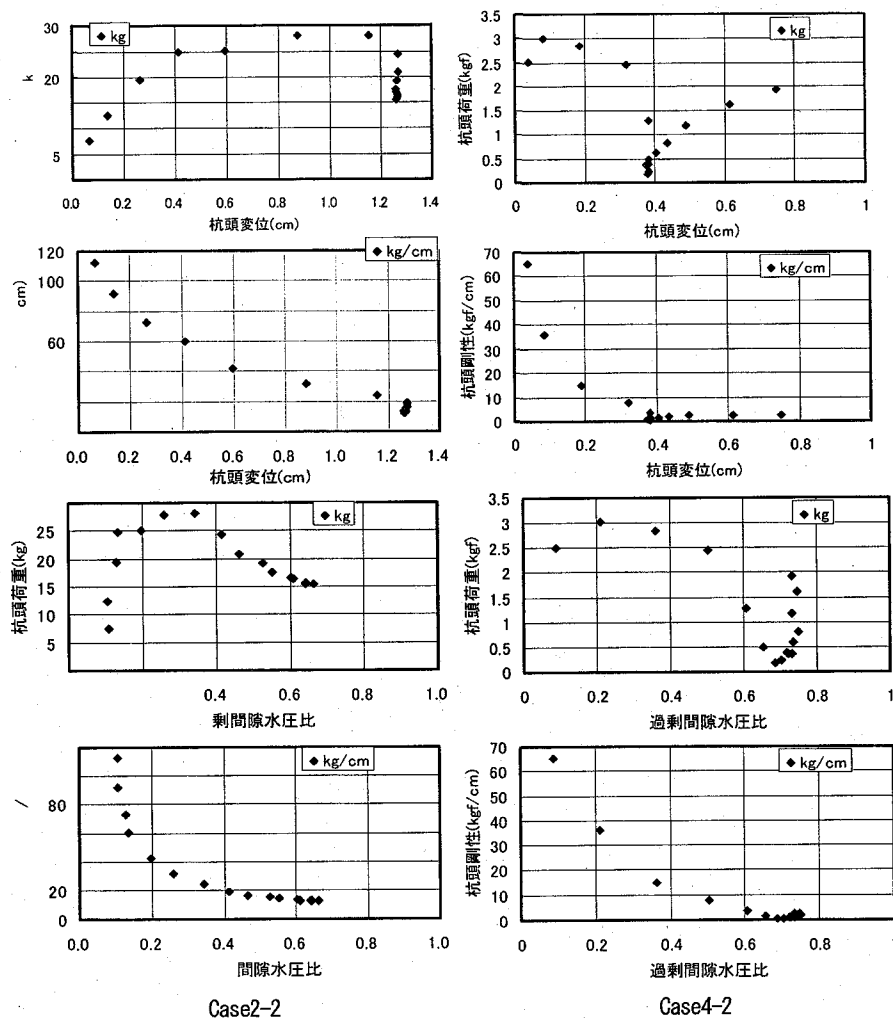


図15 杭頭荷重-変位関係, 杭頭剛性-変位関係, 杭頭荷重-過剰間隙水圧関係, 杭頭剛性-過剰間隙水圧関係

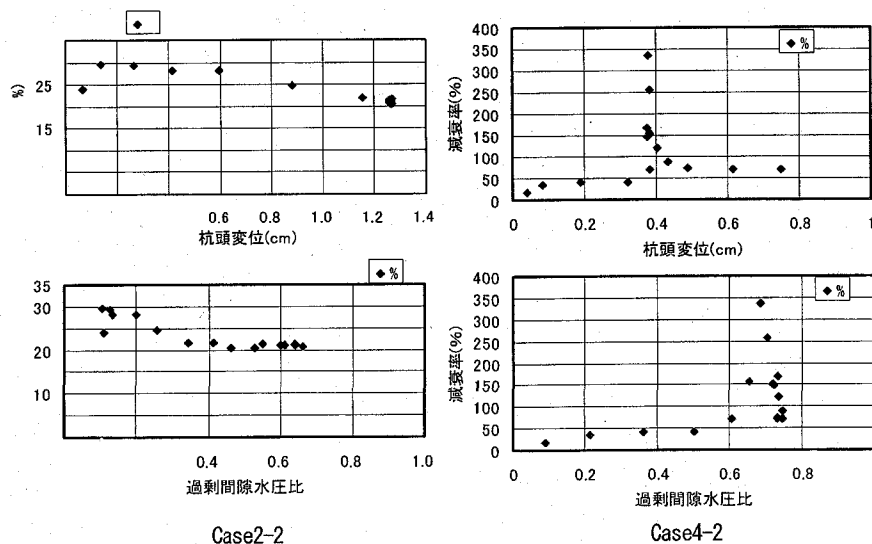


図16 減衰率-杭頭変位関係, 減衰率-過剰間隙水圧関係