# 神戸ポートアイランド埋立まさ土層の遠心振動実験

風間基樹[1]・田村展明[2]・豊田浩史[3]・菅野高弘[4]・北詰昌樹[4]

[1]正会員　工博　東北大学助教授　大学院工学研究科土木工学専攻（〒980－8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06）
[2]学生員　東北大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒980－8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06）
[3]正会員　工博　長岡技術科学大学建設系(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
[4]正会員　工博　運輸省港湾技術研究所（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

本研究では，1995年兵庫県南部地震において液状化した神戸ポートアイランドの埋立まさ土層を対象として，40Gの遠心場において１次元の模型振動実験を行った．用いた入力地震動はポートアイランドの強震アレーで観測されたK.P.-12mにおける本震のNS成分である．また，実験に用いたまさ土はポートアイランドから採取した(1)30mm underのまさ土（2）2mm underの砂分以下のまさ土（3）2mm-30mmの水洗いしたまさ土のレキ分のみの３種類とした．実験においては加速度・間隙水圧，地表面沈下量を計測し，実際の沈下量や地表面加速度応答と比較した．まさ土の液状化過程や地震応答は粒度の影響を大きく受けること，比較的透水性の高い地盤では振動中の排水性を考慮する必要性を示した．

***Key Words:*** *1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Kobe Port Island, liquefaction, Masado, array observation, centrifuge model test, gravelly content, ground settlements*

## 1. 研究の目的

1995年兵庫県南部地震において，神戸ポートアイランド（以降PIと称す）では人工島の埋立に使用されたまさ土が液状化した．このまさ土は，細粒分からレキ分まで広範な粒度分布を持つ土であり，今までは液状化しにくいとされる範疇にある土であった．Kazama et al. は，定ひずみ繰返し三軸試験を用いて，まさ土の液状化抵抗の特殊性を明らかにした[1]．

本研究は，神戸PIのまさ土を用いた40G遠心力振動実験によりアレー観測記録の再現を試みるとともに，埋立まさ土の液状化過程や液状化に伴う沈下量を検討したものである．

## 2. 遠心振動実験の概要

図-1は，遠心振動実験に用いた模型地盤とセンサーの配置を示したものである．模型地盤は，地表(K.P.+4.5m)から地中（K.P.-12m）までの約16mの層厚の埋立地盤を1/40の寸法スケールで縮小したものである．振動実験は，模型重心位置において40Gの遠心力場で実施した．模型地盤材料は，神戸PIから採取したまさ土であり，表-1に示すように，粒度調整した３種類の試料を使用している．すなわち，(1) 30mm underのまさ土，(2) 2mm underの砂分以下のまさ土，(3) 2-30mmの水洗いしたまさ土のレキ分のみの3種類とした．図-2に模型試料の粒度分布を示す．こ

表-1 遠心実験に用いた模型地盤の諸元

| 模型地盤名称 | 間隙比（水面下） | 間隙比（水面上） | 1-40G沈下量 | 透水係数[2]（cm/s） |
|---|---|---|---|---|
| 30mm-under | 0.540 | 0.884 | 18.3mm | $5.22\times10^{-4}$ |
| 2-30mm-washed | 0.621 | 1.173 | 4.9mm | $1.78\times10^{0}$ |
| 2mm-under | 0.756 | 1.038 | 28.2mm | $1.43\times10^{-4}$ |

注）間隙比は40G場における初回加振直前の値
透水係数は締固め5回水浸30分の透水試験による

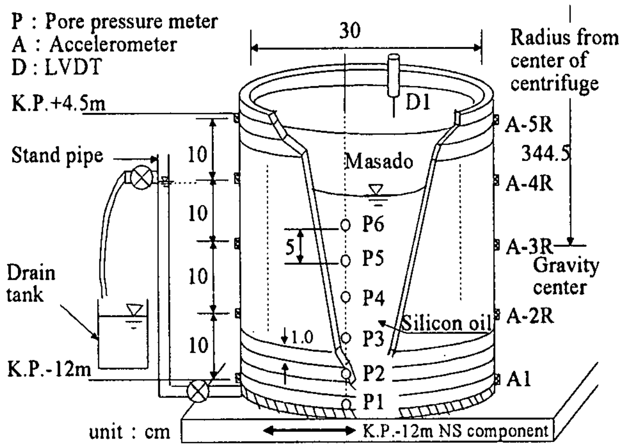


図-1 遠心実験に用いた模型地盤およびセンサーの配置

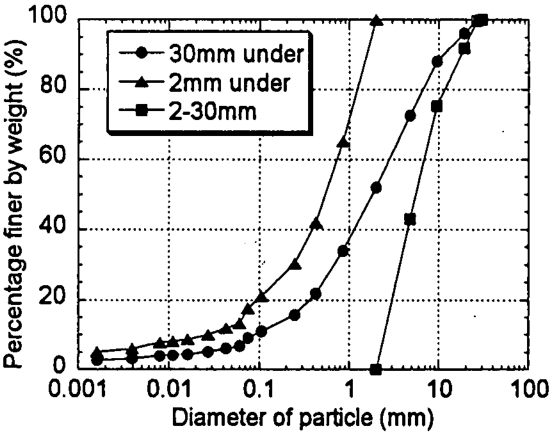


図-2 遠心実験に用いたまさ土の粒度分布

れら実験は，まさ土の粒度，すなわち間隙比や透水係数，ダイレイタンシー特性によって地盤の加速度応答，過剰間隙水圧の蓄積過程や沈下量がどのように異なるかを検討するためのものである．

### (1) 模型の作成方法

まず，40csシリコン油中にフルイにより粒度調整したまさ土を上部から約10cmの高さまでまき出した．この状態でせん断リングごと脱気槽の中に入れ，数時間脱気した．この操作を3回繰返し水面下の地盤を作成した．この際，間隙水圧センサーは，所定の高さの位置に静置した．一方，加速度計は1cm厚のテフロン加工したせん断リング側面に接着剤で取り付けた．また，地表面の沈下量は静的に計測した．

### (2) 圧密および加振の手順

まさ土は，風化残積土であり，粒度が良く，締まりやすいことで知られている．そこで，遠心場で振動実験をする前に，1G場から40Gの遠心力場に至るまでの自重圧密過程を設けた．この予圧密過程では，図-1の左側に示した排水コックを開いた状態のまま40G遠心場まで載荷し，水位を一定に保ちながら，沈下量を計測した．図-3は，この予圧密過程および振動実験前の遠心力増加過程における地表面沈下量を示したものである．なお，予圧密過程において沈下した分は，再度1G場に戻して所定の高さまでまさ土を補充しているが，図中では予圧密時の最終沈下量に続けて描いている．これを見ると，1Gから40Gの自重圧密によって，約5mm～30mm（実物換算で20cm～120cm）ほども沈下し，しかもその沈下量は細粒の粒子を多く含む地盤ほど大きいことがわかる．

加振は，神戸ポートアイランドの本震アレー観測記録のK.P.-12mのNS成分を用いた．予備実験によりここで使用している油圧式振動台の最大許容振幅レベルで加振すると，アレー記録と同等もしくはそれを若干下回る加振が可能であることがわかったため，

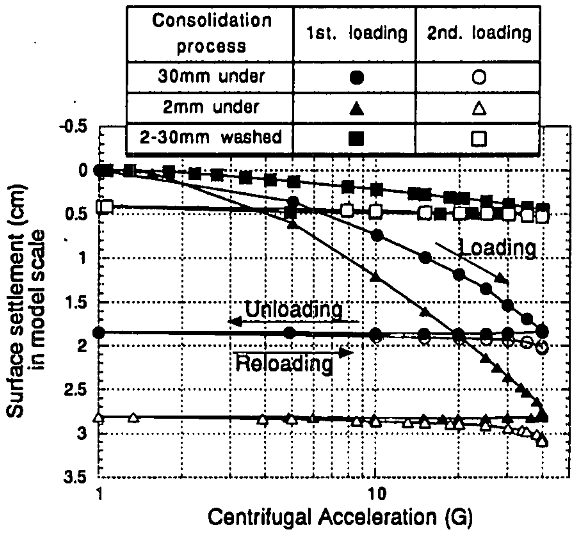


図-3 自重圧密過程の沈下特性

加振能力の限界で加振を行った．なお，再液状化特性を議論するため，初回の処女振動載荷のあと，過剰間隙水圧の逸散を待って，同じ波形によるさらに数回の振動実験を実施したが，本文では初回の加振による結果のみを示す．また，動的な振動データは5000Hzでサンプリングした．

### (3) 間隙水圧センサーの位置・間隙比の把握方法

間隙水圧計は，地盤中に放置したので，最下部のセンサー以外は液状化に伴い沈下する．また，加振により上部の乾燥したまさ土が揺り込まれると，付随的に水位上昇がおこる（加振段階では下部のドレーン用コックは閉じてある）．これらの現象は水圧計の値をモニタリングすることでチェックし，加振前後でのセンサーの位置や間隙比を把握した．

## 3．実験結果および考察

### (1) 加速度応答

図-4は，初回の加振実験で得られた深さ方向の加速度応答の時刻歴を示したものである．30mm underのケースの図面に，アレー観測記録のデータも重ねて描いてある．図から，K.P.-12mの入力地震動は，ゆるいまさ土地盤中で振幅が小さくなるが，その減衰の仕方は，細粒分を多く含む地盤ほど大きいことがわかる．また，いずれのケースでも地下水面付近から地表までの間に若干の増幅が認められる．しかしながら，最大地表面応答実験値はアレー記録よりかなり小さい値になっている．実験の地表応答を詳しく見れば，ちょうどある振幅レベルより大きな加速度が作用していないように見える．このことは，地盤のせん断強度が最大応答に大きく関係しているこ

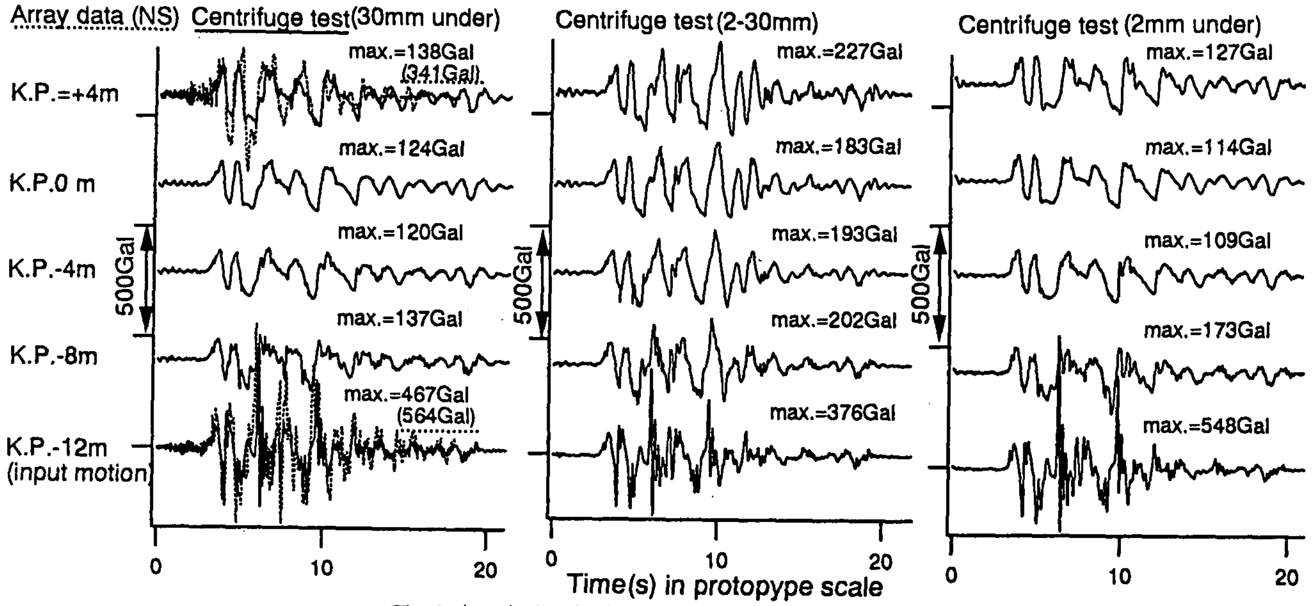


図-4 遠心実験の加速度応答とアレー記録の比較

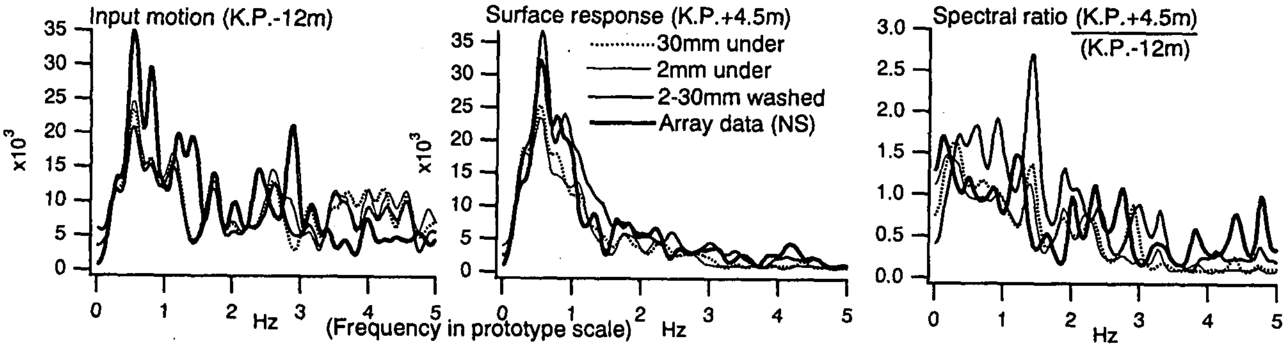


図-5 K. P. -12 mと地表面応答の振幅スペクトルと伝達関数の比較

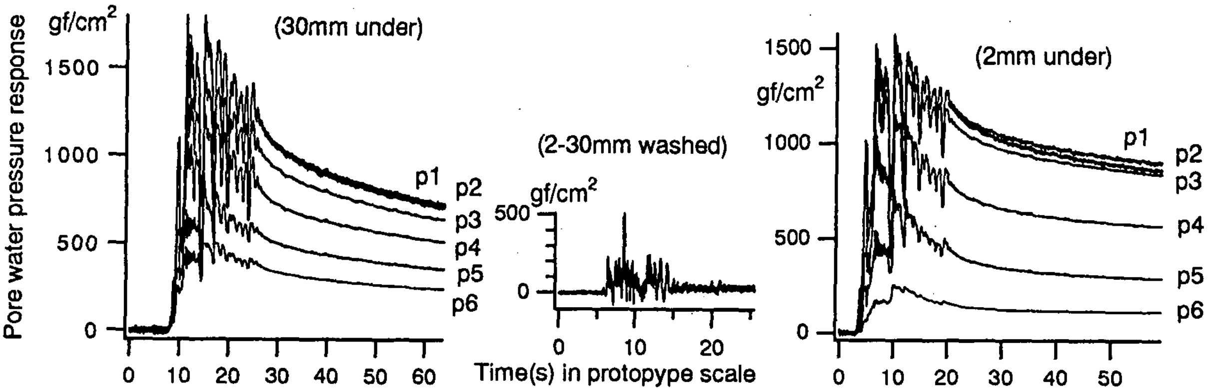


図-6 遠心実験の過剰間隙水圧応答の比較

とを示唆するものである．このことから，静的に単に鉛直一次元圧密されたまさ土は，現位置のまさ土より小さなせん断強度となったことが推測される．

図-5は，地表と地中（K.P.-12m）の記録を周波数領域で比較したものである．実験では0.5-1.5Hzの周期帯域の入力成分が少なくなっているが，地表応答の周期特性は実験ケースによらずアレー記録と類似している．一方，応答性状を表す振幅比は，レキのみの地盤より，細粒分を多く含む地盤の方がアレー記録との対応が良い．しかしアレーの記録の方が増幅特性が若干長周期側にシフトしている．

(2) 過剰間隙水圧応答

図-6は，同じく初回の加振実験における過剰間隙水圧応答を示したものである．明らかに，レキ分のみの地盤の過剰間隙水圧応答は，砂分以下を含む地盤の場合と大きく異なっている．すなわち，レキ分のみのような透水性の高い地盤では，過剰間隙水圧が蓄積保持されないことを如実に示すものである．なお，レキ分のみの地盤でも正の過剰間隙水圧応答が卓越しており，レキそのものは負のダイレイタンシー特性を有していたことがわかる．しかし，加速度応答振幅が小さくなる傾向は同じであり，液状化

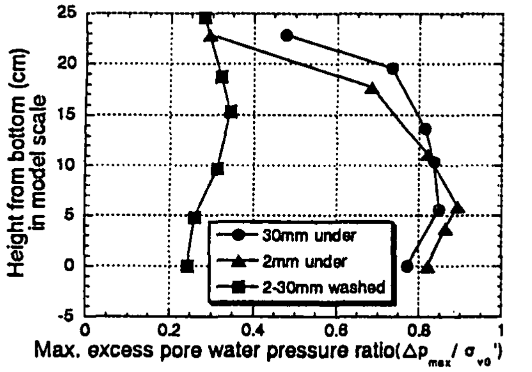

図-7 過剰間隙水圧比の深さ方向分布

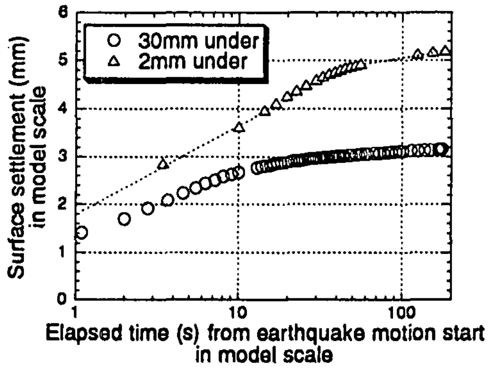

図-8 地表面沈下量の経時変化

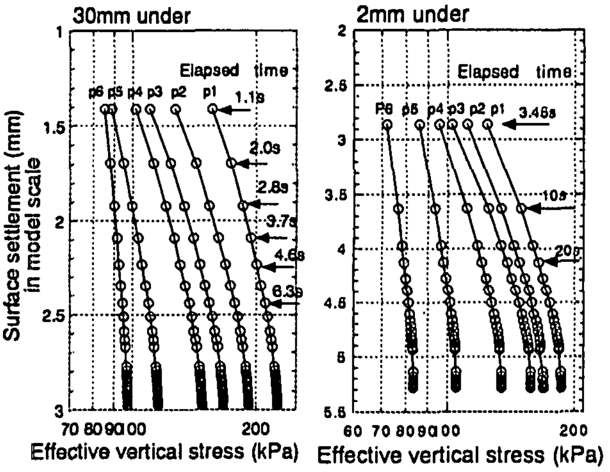

図-9 水圧逸散時における沈下量と有効鉛直応力の関係

によらなくても，レキの剛性低下によって応答が小さくなることもわかる．また，下端の最大過剰間隙水圧がその10%程度まで小さくなるのに30mm underの地盤で約6秒（実物換算で約4分），2mm underの地盤で約25秒（同約16分）かかったことがわかった．すなわち，2mm underのまさ土地盤の透水係数は30mm underのまさ土地盤の約1/4であり，この値は別途実施した透水試験結果[2)]（表-1参照）とほぼ整合する．

図-7は，各実験の最大過剰間隙水圧分布を示したものである．図から過剰間隙水圧比は1まで達していないことがわかる．また，この水圧分布は地中応力比の分布と関連性が高い[3)]．

### (3) 地表面沈下量

図-8は，過剰間隙水圧の逸散過程における沈下量の経時変化を示したものである．総沈下量（体積圧縮量）は，30mm underの地盤で約3mm（実物換算12cm）レキ分のみの地盤で約0.5mm（同2cm）と2mm underの地盤で約5mm（同20cm）となった．この値は，実際にポートアイランドで測量された結果よりかなり小さなめの値となった．室内試験において，まさ土の非排水せん断後の排水量から求めたまさ土（2mm under）の体積ひずみは3%以上になるので，実験の沈下量はこの値よりも小さくなっている．この原因は，①3方向加振と1方向加振による液状化の程度の違い，②30mm以上のレキの影響，③地盤の沈下計測の誤差などが考えられるが，現時点では①の原因が大きいものと推測している．これは，多方向せん断時の体積収縮特性や上下動を加味した実験との比較から議論すべき問題となる．また，図-8から地表面の沈下量のうち約1/3は加振直後1秒以内に発生しており，加振中の排水量も大きかったことを示している．

図-9は，水圧逸散過程の地盤の有効鉛直応力－沈下量の関係を示している．図から液状化後の圧縮指数を読み取り，図-3から得られる値と比較してみると，従来から言われているように，液状化後の値は正規圧密時の値と同等もしくはそれ以上となる．

## 4．結論

本研究では，1995年兵庫県南部地震の際の神戸ポートアイランドのアレー観測地点を対象として，原位置のまさ土を用いた遠心力振動実験結果を報告した．実験結果は，最も再現性の高いと考えられる模型実験手法を用いても，現位置の地盤の再現性を含め実現象の再現には難しい点があること示すものとなった．しかしながら，地盤材料のせん断強度を超えるような強震動を受けることによって，地表の最大地震応答が低下すること，地盤材料の透水性によって液状化特性が大きく異なること，体積ひずみが粒度によって大きく異なることなど，新たな知見を得ることができた．

### 参考文献

1) Kazama, M. et al.: Liquefaction characteristics of decomposed granite soil at Kobe artificial island, Proc. of the Int. Symposium on problematic soil, pp.411-415, 1998.
2) 田村展明他：レキ地盤の液状化に関する一考察，第34回地盤工学研究発表会，発表予定，1999. 7.
3)風間基樹：地震時の地中せん断応力比の再考察，第34回地盤工学研究発表会，発表予定，1999. 7.