

重力場と遠心場における動的模型実験の相似則について

林 健太郎

* 中井 潤一

** 村松 伴博

要 旨

近年のメカトロニクス技術の進歩により、遠心力載荷装置に小型の振動台を取付け、遠心場において加震実験を行うことが可能となった。これにより、非常に規模の小さい数十センチメートルの模型を用いて、実物に換算すると数十メートルの地盤の地震時挙動を容易に実験的に検証する事が可能となった。しかしながら、遠心場における振動実験はようやく実験が可能になったばかりであり、信頼性に関しては不明な点も多い。このため、従来行われてきた大型振動台実験とスケールの異なる相似な模型振動実験を行い、結果を比較検討することにより、遠心場の振動実験の信頼性に関して検討を行った。この結果、模型地盤の動的な挙動に関しては大型振動台実験とほぼ同様な結果が得られた。

1. はじめに

構造物の挙動が解析的な検討だけでは十分でない場合、しばしば模型を使った実験が行われる。模型を使用して、実物の挙動を推測する場合、模型の挙動と実物の挙動を関連付けるために、相似則が用いられる。地盤を含む構造物の模型実験では、応力状態によって地盤の物性等が変化するために、形状は相似にしても模型の挙動は相似とはならず、模型のサイズによって異なる挙動を示す場合が多い。このため、これらの縮尺率と模型の挙動を関連づけるために2つの解決策が用いられる。

その一つは、模型の縮尺に見合った重力を作用させることにより、強制的に模型内の応力状態を実物と相似にする遠心載荷模型実験であり、もう一方は、応力と歪みの非線形性を考慮した相似則を用いることにより、縮尺率と模型の挙動を関連づける手法である。前者に関しては、遠心載荷実験装置にも加震装置が取り付けられ、遠心場における動的実験が行われるようになった。後者は一般に大型振動台実験などに適用される場合が多い。本文ではこれらの2つの手法を用いて、一つの盛土構造物に関する模型振動実験を行い、上記の実験手法の検証を試みている。

2. 相似則について

遠心載荷実験と重力場における模型実験とは模型内部に作用する物体力が異なるため、通常、全く異なる相似則が適用される。ここでは、それぞれの模型実験に使用される相似則について整理を行い、若干の考察を加えた。今回の一連の実験で使用した遠心力場と重力場における相似則を表-1に示す。

表-1 実験に使用した相似則一覧表

単 位	重力場	遠心力場
長 さ	$1/n$	$1/n$
単位体積重量	1	$1/n$
時 間	$1/n^{0.75}$	$1/n$
応 力	$1/n$	1
間隙水圧	$1/n$	1
変 位	$1/n^{1.5}$	$1/n$
速 度	$1/n^{0.75}$	1
加速度	1	n

長さの縮尺比: n

2. 1 遠心力場の振動実験に関する相似則

重力場において幾何学的形状の相似な n 分の 1 の模型実験を行う場合、同じ材料を用いれば図-1に示すように模型地盤に発生する応力は実物の応力の $1/n$ となる。土の応力と歪みの関係は非線形的であるため、拘束圧が異なると応力と歪みの関係は幾何学的な縮尺率とリニアな関係ではなくなる。このため、遠心載荷実験では、模型内部に幾何学的な縮尺率 ($1/n$) に見合った n 倍の遠心力を模型に作用することにより、応力状態も含めて模型地盤と実物とで相似な関係を満足させている。

動的問題を含まない遠心載荷実験では、透水条件に関する連続の式から、時間軸に関する相似則は $1/n^2$ に縮尺される。しかしながら、振動台実験などの動的実験では、変位に関する振動特性式 ($y = A \cdot \sin \omega t$) から時間軸は $1/n$ と規定されるため、上記の連続の式による時間軸の縮尺率と矛盾してしまう。

これらの矛盾をなくすために、遠心場の実験では模

* 東京支店 ** 中国支店

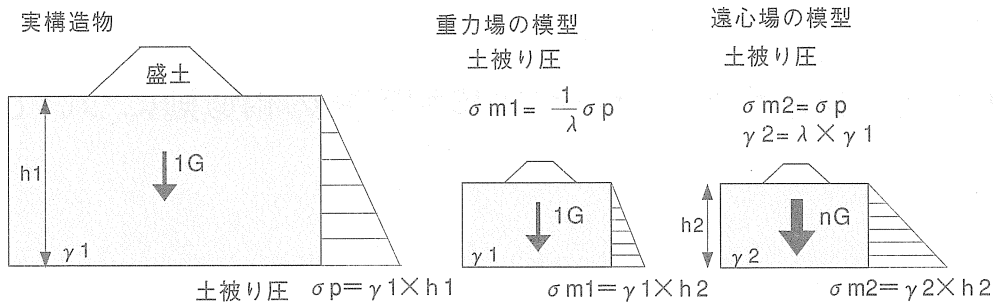


図-1 実物と模型の地盤内応力の比較

型地盤の透水係数の調整を行っている。模型地盤内の間隙水にグリセリン溶液などの粘性の高い材料を使用することにより、模型地盤の透水係数を $1/n$ に下げて、時間軸に関する相似則は $1/n$ とし、前述の振動特性式からの相似則との矛盾を無くしている。

2. 2 応力の非線形性を考慮した重力場の相似則について

土の応力の非線形性を考慮した重力場における振動実験の相似則は、1978年に香川³⁾が提案している。さらに一連の支配方程式が模型と実物で満足するようにして相似則を決定する手法を、井合⁴⁾が提案している。井合の相似則では、水による飽和地盤や矢板などの構造物などを対象として拡張されており、重力場における一連の模型実験には、この相似則を使用した。

重力場における実験では図-1にもあるように地盤内部の応力は実物の $1/n$ となる。また、地盤の剛性 G は各種の要素試験より、拘束圧 σ に対して $G \propto \sigma^{0.5}$ の関係が認められている。また、 G と体積圧縮係数 mv には以下の関係がある。

このため、形状的に相似な模型と実物の歪み量 ϵ を算定すると以下のように表される。

$$\frac{1}{mv} = \frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)} G$$

実物 $\epsilon_p = mv_p \cdot \Delta P_p$

模型 $\epsilon_m = mv_m \cdot \Delta P_m$

ここに、 ϵ_p : 実物の歪み量、 mv_p : 実物の圧縮係数、 ΔP_p : 実物の応力増分、 ϵ_m : 模型の歪み量、 mv_m : 模型の圧縮係数、 ΔP_m : 模型の応力増分

上記の関係から mv や ΔP に関して以下のような関係が認められる。

$$\frac{mv_m}{mv_p} = \frac{1/\sqrt{\sigma_m}}{1/\sqrt{\sigma_p}} = \sqrt{n}, \quad \frac{\Delta P_m}{\Delta P_p} = \frac{1}{n}$$

よって歪みの相似関係は以下のように表される。

$$\frac{\epsilon_m}{\epsilon_p} = \frac{mv_m}{mv_p} \frac{\Delta P_m}{\Delta P_p} = \frac{1}{n^2}$$

この関係によって、重力場における模型振動実験の挙動から、拘束圧が高く剛性の高い実地盤の挙動を予測可能なことがわかる。

また、時間軸に関する相似則は振動特性式などから $1/n^{0.75}$ と導かれる。模型の地盤や間隙水に実物と同じ材料を用いれば、遠心載荷の場合と同様に透水条件に関する連続の式から時間軸に関する相似則は $1/n^2$ となる。このままでは、時間軸に関する相似則に矛盾が生じるため、井合は地盤の透水係数に関する相似則を別途設け、模型の材料を変えるなどして模型地盤の透水係数を $1/n^{0.75}$ に小さくすることでこれらの矛盾を回避している。

この透水係数に関する相似則は、通常の振動実験では加震時の挙動に与える影響が小さいとして無視し、模型でも実物と同じ材料を用いる場合が多い。しかしながら、この透水係数に関する相似則に従えば、 $1/20$ 程度の模型では地盤の透水係数を実物の $1/10$ に下げなくてはならない。縮尺率 (n) が大きくなるに従い、透水係数の縮尺率も大きくなるため、実物と同じ材料を用いた実験では実験結果に与える影響は大きくなると考えられる。

3. 実験内容

上記の二つの相似則に関して検証するために、今回は一つの実地盤上の盛土構造物を想定して、重力場と遠心力場において幾何学的に相似な模型振動実験を行った。これらの一連の実験では $1/3$ から $1/20$ までの3つのサイズの模型を使用して加震中、加震後の地盤内加速度、間隙水圧分布、盛土天端の沈下などを測定し、適用する相似則の異なるケースについて比較検討した。

3. 1 実験内容および検討ケース

想定した盛土構造物は、厚さ4.5mの地盤上の天端幅1.0m高さ1.0mの盛土構造物である。実験のケースを表-2に示す。表に示すように重力場の実験では $1/3$

表-2 実験ケース一覧表

CASE	実構造物	1	2	3	4
縮尺率	1	1/3	1/5	1/20	
地盤深さ	4.5m	1.5m	0.9m	0.225m	
地盤幅	—	2.8m	1.8m	0.6m	
実験場	重力場			遠心場	
鉛直方向 加速度	1G			20G	
透水係数	8.1×10^{-2} cm/sec	2.7×10^{-2} cm/sec	2.7×10^{-2} cm/sec	3.9×10^{-3} cm/sec	5.2×10^{-3} cm/sec

と1/5の二つのスケールの比較的大きな模型振動実験を行った。また、遠心載荷実験ではこれらの模型と幾何学的に相似な1/20のサイズの模型を作成し、20Gの遠心場にて振動実験を行った。

各実験で使用した模型を図-2に示す。同図よりわかるように、地盤厚さは実物の4.5mに対し、1/3モデルでは1.5m、1/5モデルでは0.9m、遠心場の1/20モデルでは0.225mとしている。なお、地盤の水平長さに関しては土層のサイズによる制限もあるため、水平長/深度の比で表すと1/3モデルで1.67、1/5モデルで2.00、1/20モデルで2.67、程度のばらつきがある。

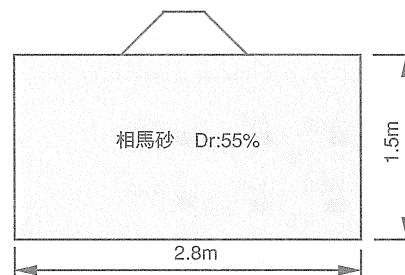
また、重力場の実験では、実物と同じ砂を使用し、間隙水に水を使用しているため、厳密には透水係数に関する相似則を満足していない。このため、重力場の振動台実験に合わせて、実物の地盤の透水係数が $n^{0.75}$ 倍であると仮定して、遠心模型の透水係数を算定した。

遠心実験での透水係数の算定にあたって、地盤の透水係数と粘性の関係を調べるために、模型地盤と同じ $Dr=55\%$ の相馬砂とグリセリン水溶液を使用して定水位透水試験を行った。試験より得られた水での透水係数とグリセリン水溶液での透水係数との比と粘性との関係を図-3に示す。間隙水の粘性と地盤の透水係数に関しては一般に反比例の関係があると言われているが、実験結果から反比例の関係は得られなかった。

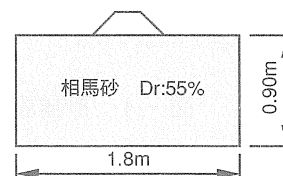
相似則から20Gの遠心場では、水を用いた場合の1/20の透水係数にすることが必要であるため、同図から約 $27 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ の粘性の溶液が必要であることがわかる。よって、重力場の実験の相似則と合わせると、 $27 \times 10^{-3} Pa \cdot s \times (1/5^{0.75} \sim 1/3^{0.75}) = 8.25 \sim 12.09 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ の粘性が必要である。ケース4では、平均をとって $10 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ のグリセリン水溶液を使用した。比較のためにケース3では、従来の反比例の関係から粘性を決定し、 $6.7 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ のグリセリン水溶液を使用した。

なお、重力場の実験では剛な土層を、遠心場の実験ではせん断土層を使用している。

1/3 模型地盤 重力場振動実験



1/5 模型地盤 重力場振動実験



1/20 模型地盤 遠心場振動実験

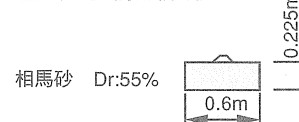


図-2 模型実験のスケール比較図

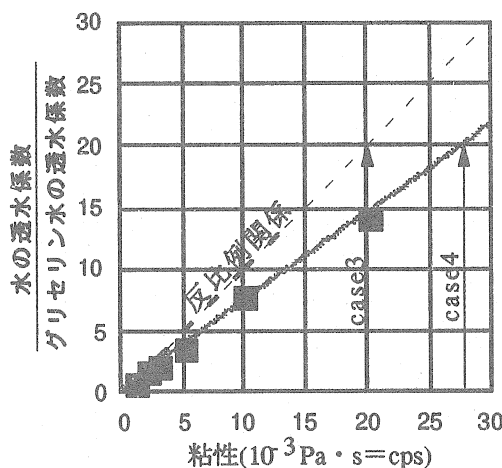


図-3 間隙水の粘性と透水係数比の関係

3.2 模型地盤の作成方法

模型地盤は水中落下法により相対密度 $Dr=55\%$ の飽和砂地盤を作製し、地盤の上に乾燥砂による盛土構造物を設置して作製した。重力場の模型は、落下高さとして地盤密度の関係を実験より求め、落下高さ90cm、水位15cmを保ちながら、砂を均一に落下させて飽和地盤を作製した。遠心場における模型は、間隙水に粘度の高いグリセリン水溶液を使用するため、80℃以上に温度を高めることによりグリセリン水溶液の粘度を下げ、液面の高さを2cmと一定にして水中落下法により飽和地盤を作製した。

実験時の計測項目は地盤内部の間隙水圧、加速度、及び盛土天端の沈下量の時刻歴および加震前後の地表面の変位量である。実地盤に換算した各種計測装置の設置

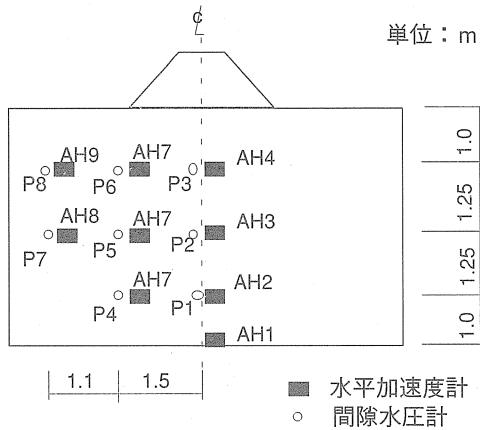


図-4 計器設置位置図

位置を図-4に示す。今回、実験で使用した砂は福島県相馬郡産の相馬砂である。相馬砂の物理特性を表-3に示す。

3.2 入力波形

実験で使用した波形は、入力波の時間軸は前章の相似則に従い、模型の縮尺率と実験の条件によって変更した。表-4に各ケースの入力波形条件を示す。入力波は最大加速度150galの正弦波60波とした。

3.3 実験結果

図-5に各ケースの土槽底板の応答加速度を示す。土槽底板の応答加速度をみると、ケース2の応答加速度の最大値が200gal程度と若干大きくなっているが、波形自体はすべてのケースでほぼ均一な正弦波であった。これより、設定した条件に近い入力波が模型に作用していることがわかる。

図-6に各ケースの盛土法尻位置での深度毎の応答加速度の時刻歴を示す。ケース2の最大値が若干大きい、全体的には4つのケースの応答加速度は非常に良く似た傾向を示している。法尻の直下の地表面に近いA7Hでは、加振直後に応答加速度が減衰していることから、地盤剛性が低下し、液状化状態にあることが分かる。また、中間のA6Hでは、ケース3を除いて一端剛性が低下した後剛性が回復している。最も深いA5Hでは、各ケースのパターンに多少の相違はあるが、いずれのケースも加速度の減衰は認められず、剛性が低下しておらず液状化が生じていないことがわかる。

図-7(1)、図-7(2)に重力場の2つのケースと遠心力場のケース3における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。時刻歴の時間軸は、各相似則を用いて実物の時間軸に換算しており、過剰間隙水圧比は過剰間隙水圧/弾性FEM解析による鉛直有効応力で算定し

表-3 相馬砂の物理特性

土粒子密度 ρ_s	2.61
最大間隙比 e_{max}	1.096
最小間隙比 e_{min}	0.653
相対密度 D_r (%)	55
間隙比 e	0.852
単位体積重量 γ_d (g/cm^3)	1.409
透水係数 k (cm/sec)	4.3×10^{-2}
均等係数 U_c	1.454

表-4 入力波形条件一覧表

CASE	実構造物	1	2	3, 4
縮尺率	1	1/3	1/5	1/20
振動波形	SIN波, 60波			
周波数	5Hz	11Hz	16.7Hz	100Hz
最大加速度	147gal		2940gal	
継続時間	12sec	5.45sec	3.59sec	0.6sec

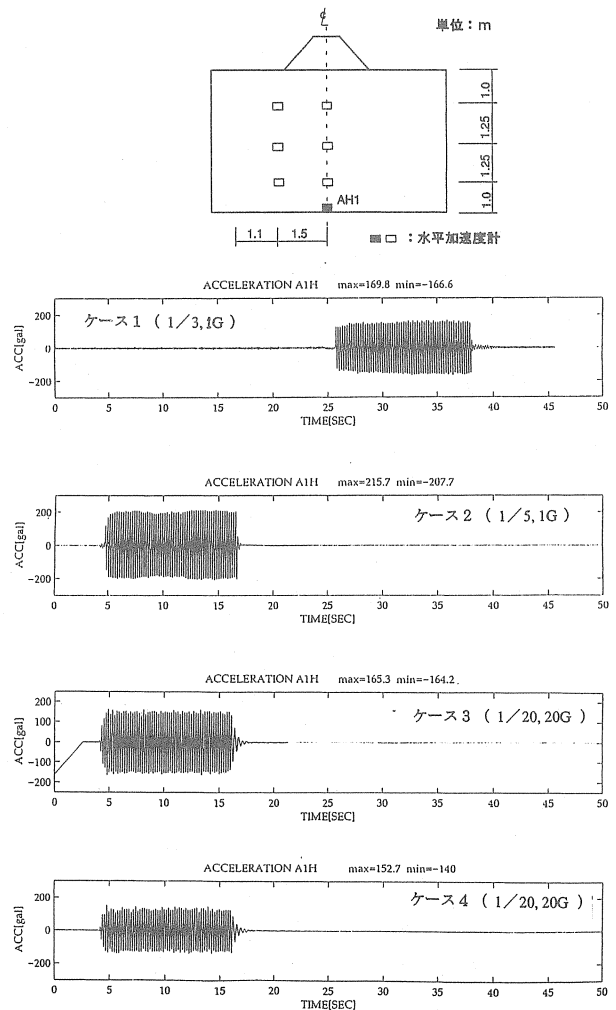


図-5 土槽底板の応答加速度時刻歴

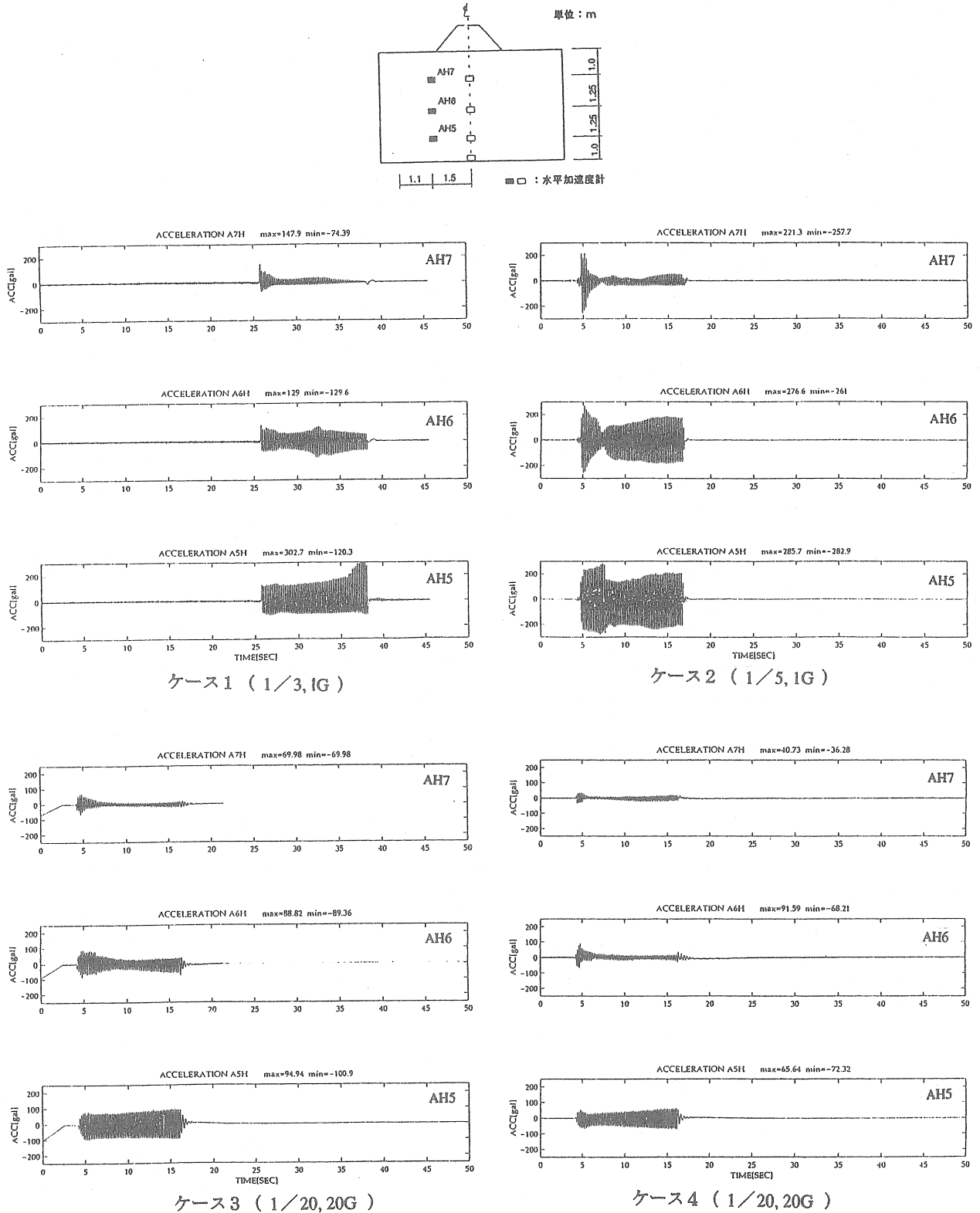
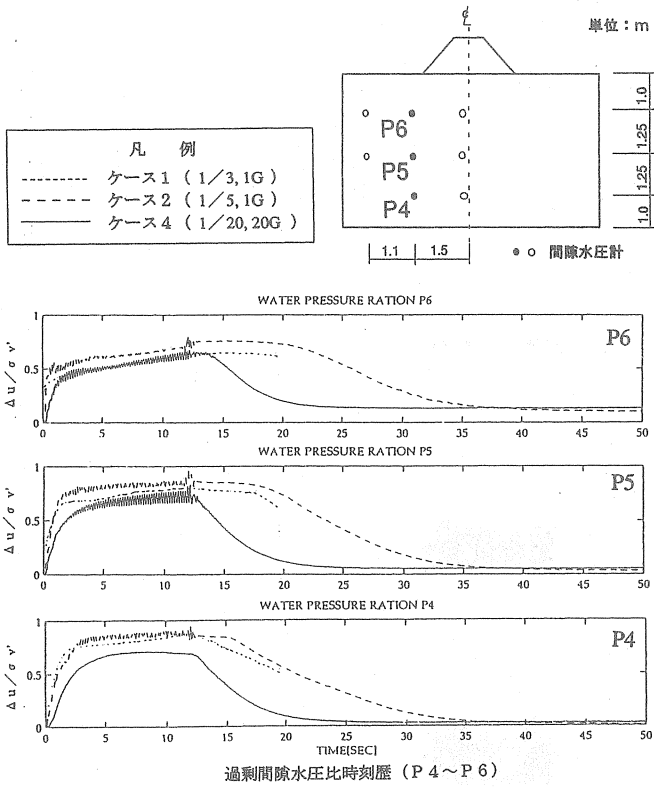


図-6 応答加速度の時刻歴（盛土法尻位置）

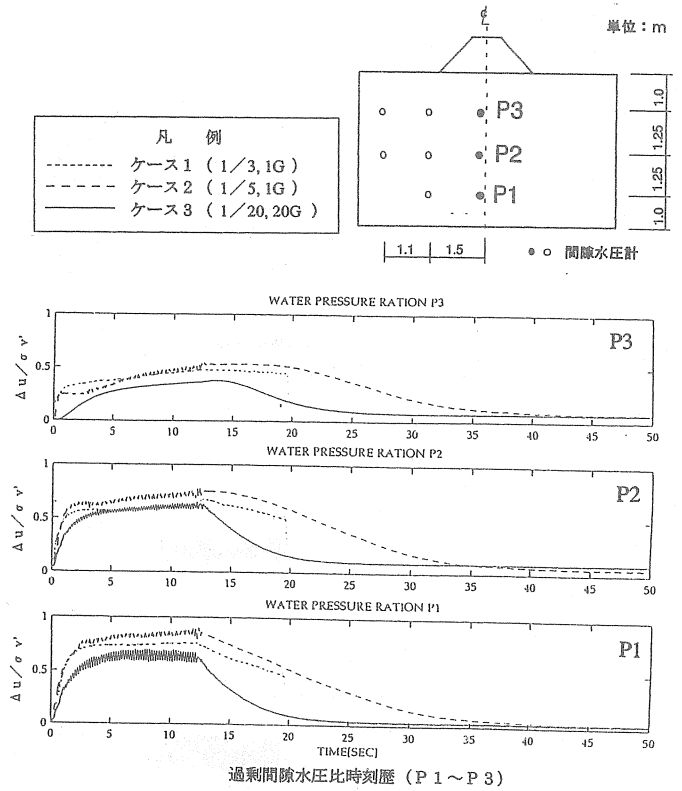
ている。重力場での2ケースの結果では縮尺スケールの違いによらず、過剰間隙水圧の上昇から消散までの過程がかなり一致している。重力場の2ケースと遠心場のケース3を比較すると、加震による上昇時の挙動は良く一致しているが、消散時が重力場ケースに較べかなり速

くなっている。

図-8(1)、図-8(2)に重力場の2つのケースと遠心力場のケース4における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。ケース4では透水実験から間隙水の粘性を決定しており、ケース3に比べ粘性の高いグリセリン水溶液を使

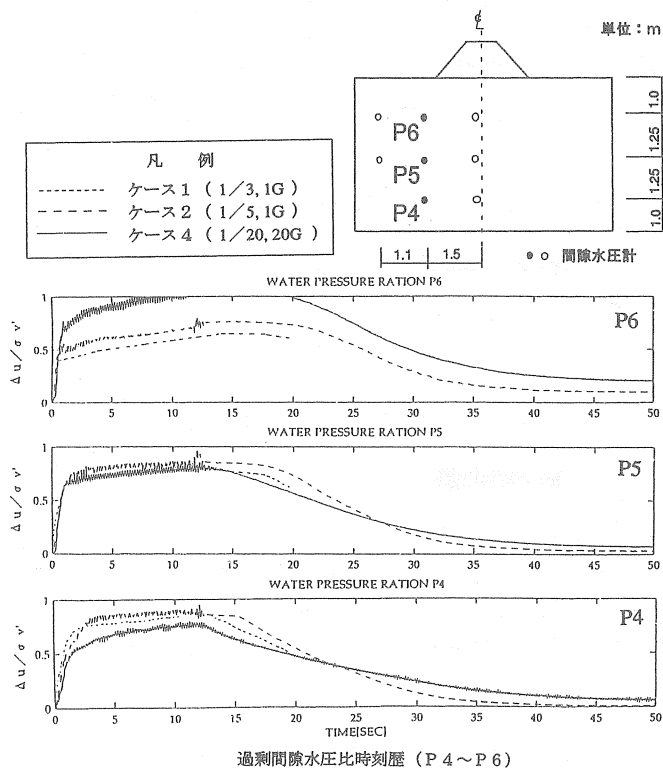


(1) 盛土法尻直下

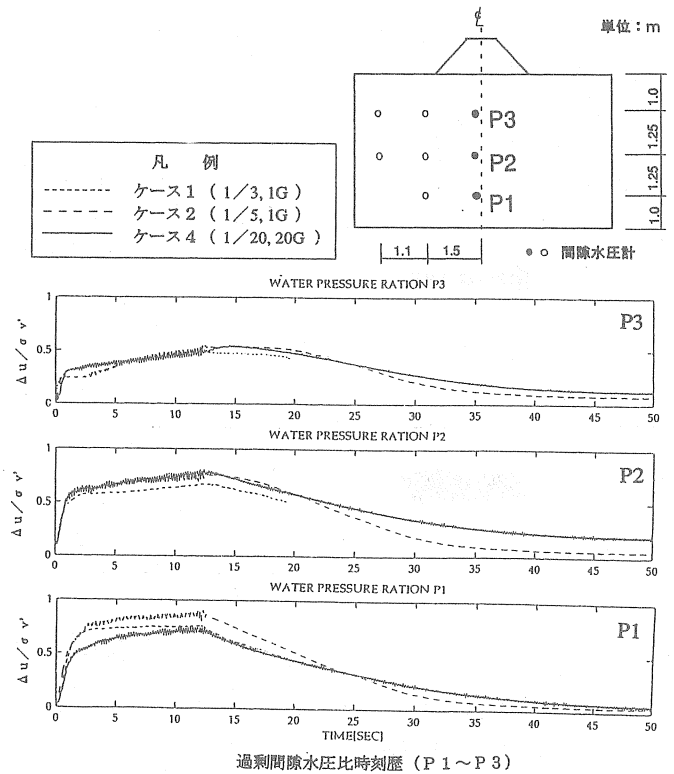


(2) 盛土中央部直下

図一七 重力場と遠心場の過剰間隙水圧比の比較 (ケース1、2およびケース3)



(1) 盛土法尻直下



(2) 盛土中央部直下

図一八 重力場と遠心場の過剰間隙水圧比の比較 (ケース1、2およびケース4)

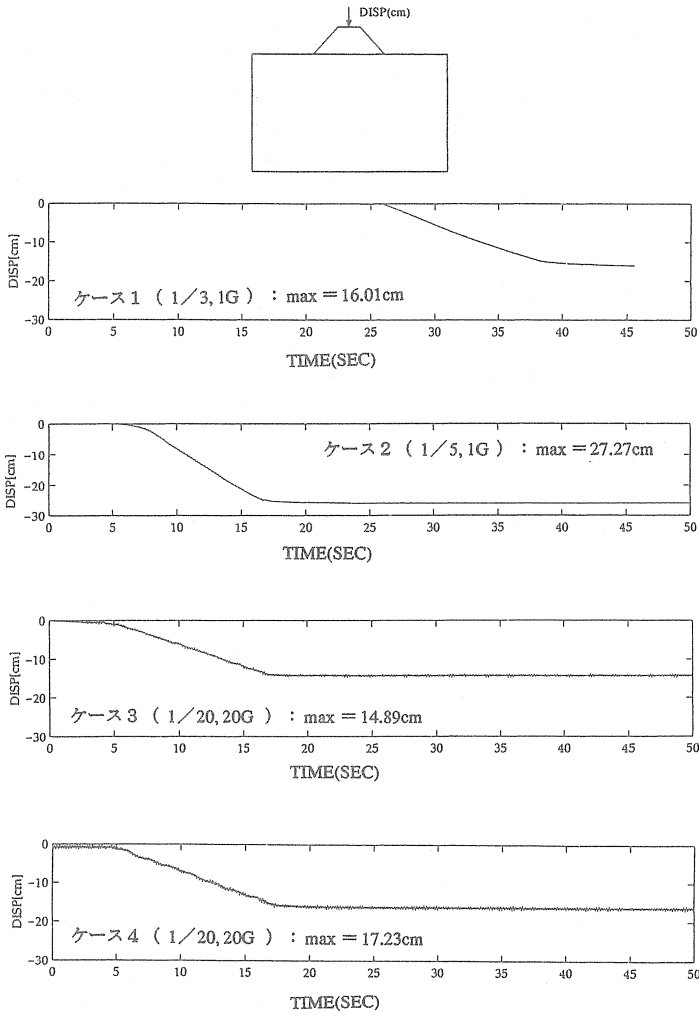


図-9 盛土天端の沈下量の時刻歴

用している。このため、ケース3に比べ過剰間隙水圧の消散は遅くなっており、過剰間隙水圧の上昇から消散まで重力場と遠心場の実験で非常によく一致していることが分かる。

個々の水圧計の挙動を見ると法尻直下のP4の位置では、加速度計の挙動から液状化が認められなかったが、過剰間隙水圧比は1.0に近い値となった。また、反対に

盛土直下のP3では、すべてのケースで過剰間隙水圧比は0.5程度であるのに対し、応答加速度は明らかに減衰しており液状化状態であることがわかった。全てのケースを通じて、このように応答加速度と水圧比の挙動が異なる点が共通して認められた。明らかに軟化しているにも係わらず水圧比が低い点や水圧比は1.0近いのに地盤の剛性の低下は認められない点では、水圧比の算定で使用した鉛直有効応力が過大、あるいは過小であったと考える。この原因として、液状化に伴い地盤のポアソン比が0.33から0.50に変化したことが考えられたため、2次元の弾性FEM計算を行ったが、鉛直有効応力の変化は小さく、応答加速度と水圧比の異なる挙動を表現できなかった。しかしながら、すべてのケースでこのような差異が認められたことから、何等かの原因により加震中に応力の再配分が生じ、鉛直有効応力が変化していると考えられる。

図-9に各ケースの盛土天端の鉛直変位の時刻歴を示す。すべてのケースで、盛土の沈下はほとんどが加振中に生じていることが分かる。加速度時刻歴において、一旦減衰した加速度が再び増加する傾向が見られたが、この原因として上記の加震中の圧密変形によって地盤の剛性が回復したことが考えられる。また、盛土の直下では加震終了時に過剰間隙水圧比は1.0程度であるにもかかわらず、それ以後の圧密沈下は微小であった。

図-10に地表面沈下量の結果を示す。盛土直下の沈下量を見ると、入力加速度の大きいケース

2で約30cmと若干大きくなったが、その他のケースでは15cm~20cm程度とほぼ同様な値を示した。ただし、盛土の周辺部では、重力場のケース1、2と遠心場のケース3、4で大きく傾向が異なった。重力場のケース1、2では、非排水的な変形が主体となり、盛土の下は沈下し、盛土のない周辺部は隆起している。一方、遠心力場のケース3および4では、盛土直下の沈下量は重力

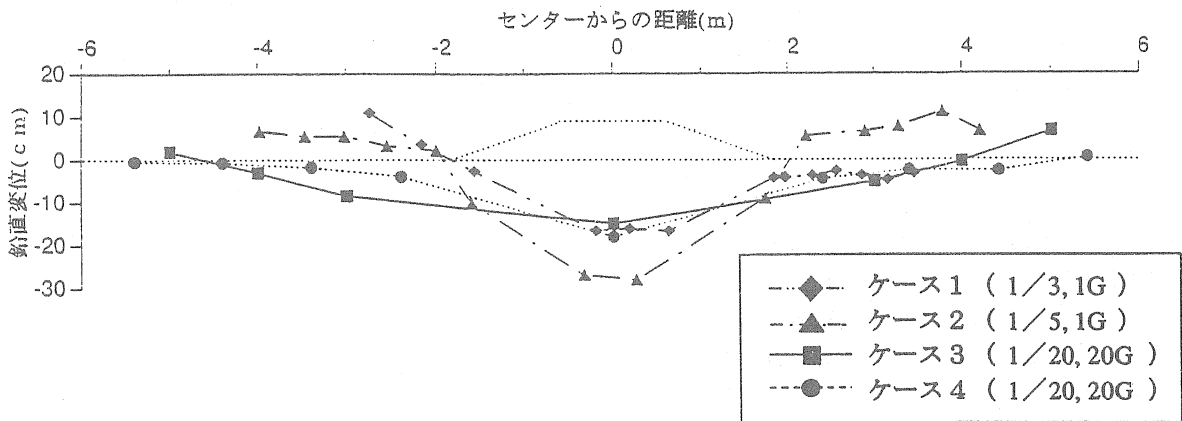


図-10 実験終了後の地表面変位形状

場のケース1とほぼ同じであったが、側方の地表面を含む地盤面全体で沈下が生じた。これらの理由として、遠心力場の模型では振動台の都合から、回転半径の影響を考慮せずに、模型では振動面にフラットな地表面を使用していることが考えられる。

4. まとめ

今回の一連の実験より以下の所見を得た。

(1) 今回の重力場と遠心場における実験を比較すると、地盤の透水係数を含めて厳密に実験の条件を満足させた場合、地盤内加速度や過剰間隙水圧の挙動は非常に良く一致した。この結果より、過剰間隙水圧や応答加速度などの地盤の動的挙動に関しては、遠心場における振動実験は、重力場の大型振動実験と同様な結果が得られる。

(2) ただし、液状化後の変形量に関しては、沈下の最大値はほぼ一致したが、実験終了後の地表面の形状は重力場では隆起し、遠心場の実験では沈下するなど異なる傾向を示した。この変形の違いは、遠心模型のスケールが小さいこと、および回転半径方向と振動の方向に若干のずれがあるためではないかと考える。

(3) 今回重力場で行った1/3と1/5の模型の動的な挙動が良く一致したことから、これらの縮尺スケールでは、応力の非線形性を考慮した相似則を用いることにより模型のスケールに関係なく実物の挙動を適切に表すことができることが判明した。

(4) 遠心場で行った地盤の透水係数を1.5倍程度変えた2つの模型実験では、加震中の挙動には大きな差は認められなかったが、加震後の水圧の消散時の挙動が大きく異なった。このことから、過剰間隙水圧の消散を取り扱う問題では、地盤の透水係数に影響を与える間隙水の粘性や水温の影響を管理して実験を行う必要があると考えられる。

(5) 実験を行った全てのケースにおいて共通した位置で、明らかに軟化しているにも関わらず水圧比が低い点や水圧比は1.0近いのに地盤の剛性の低下は認められない点が生じた。この原因としては、2次元構造物では加震中に地盤内部で応力の再配分により応力状態が変化していることが考えられる。

謝辞

本実験は、1995年度に中央大学工学部基礎研究室の遠心載荷装置を使用して行ったものです。藤井教授、北条氏ならびに研究室の方々には、実験装置の御指導や実験の手伝いなどの多大な援助を頂きました。紙面を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1)香川宗章：土構造物の模型振動実験における相似則、土木学会論文報告集、第275号、1978年7月、pp69~77
- 2)井合進：1G場での地盤・構造物系の模型振動実験の相似則について、地震工学研究発表会講演概要集、