

# 重力場と遠心力場における動的模型実験の 相似則の比較

林 健太郎<sup>1</sup>・藤井 斉昭<sup>2</sup>・村松 伴博<sup>3</sup>・北條 一男<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設株式会社技術研究所課長代理 (〒329-27 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 中央大学理工学部土木工学科教授 (〒112 東京都文京区春日1-13-29)

<sup>3</sup>正会員 五洋建設株式会社中国支店広島港工事事務所 (〒734 広島市南区宇品西3-4-27)

<sup>4</sup>正会員 株式会社竹中土木 (〒277 千葉県柏市柏911-1)

近年のメカトロニクス技術の進歩により、遠心模型実験装置に小型の振動台を取付け、遠心力場において振動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、遠心力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<sup>1,2)</sup>。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、飽和砂地盤の液状化現象に着目して実験結果を比較検討することにより、遠心力場の振動実験の信頼性に関して検討を行った。この結果、模型地盤の液状化現象を中心とした動的な挙動は大型振動台実験と比べ定性的にほぼ同様な結果が得られた。

**Key Words** : *liquefaction, model test, centrifuge, similitude, sand, permeability*

## 1. まえがき

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力学特性が変化するために、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同等にする遠心模型実験であり、もう一方は、地盤物性の応力依存特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。動的な実験に関しては、前者の遠心模型実験装置にも加振装置が取り付けられ、遠心力場における動的実験が行われるようになり、後者は一般に大型振動台実験などに適用されている。

これらの2つの相似則の比較に関しては、Koseki et.al(1995)<sup>3)</sup>が地中埋設構造物の液状化時の挙動に関

する比較実験を行っている。実験結果によると液状化時の揚圧力による破壊メカニズムなどは定性的に再現されたが、過剰間隙水圧の消散過程は遠心場の模型の方が速くなったことが報告されている。本研究では地中構造物に比べ偏荷重の大きい盛土構造物模型を用いて遠心力場と重力場の模型振動実験を行い、飽和砂地盤の液状化現象に着目して、これら2つの実験手法に関して比較検討を行っている。

## 2. 相似則について

遠心模型実験と重力場における模型実験とでは模型内部に作用する物体力が異なるため、それぞれに応じた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。

### (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、同じ地盤材料を用いれば図-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

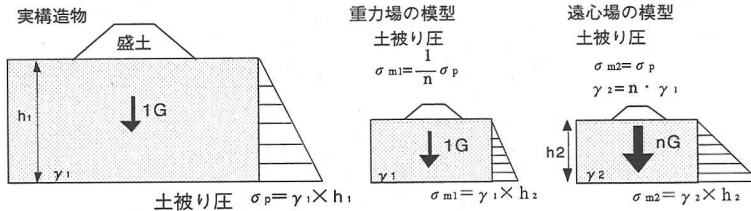


図-1 実物と模型の地盤内応力の比較

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 <sup>0.75</sup>	1/n
応力	1/n	1
間隙水圧	1/n	1
変位	1/n <sup>1.5</sup>	1/n
加速度	1	n
地盤の透水係数	1/n <sup>0.75</sup>	1

長さの縮尺比: n

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線形的な関係ではなくなる。このため、遠心模型実験では、模型内部に幾何学的な縮尺率 (1/n) に見合った n 倍の遠心加速度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<sup>4)</sup>。

圧密現象などの間隙水の移動を取り扱う遠心模型実験では、長さの縮尺比を 1/n とすると、透水条件に関する連続の式から時間軸に関する相似則には 1/n<sup>2</sup> が用いられる。しかしながら、動の実験では、入力地震動を正弦波に置き換えて、鉛直・水平方向の加速度と変位の縮尺を一致させると時間軸の縮尺率は 1/n となるため、上記の連続の式によるものと矛盾してしまう。

これらの矛盾をなくすために、遠心力場の実験では模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) 応力依存特性を考慮した重力場の相似則について

重力場における振動実験の相似則に関しては、いくつかの提案がなされている。特に、地盤の剛性の応力依存特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<sup>5)</sup>によって提案されている。また、国生らは飽和砂地盤の振動実験を行い、地盤の振動応答の非線形性な変化に着目した相似則

を提案している<sup>6)</sup>。

さらに、水-地盤-構造物の連性系については、現象を支配する一連の方程式を模型と実物とで満足させることにより相似則を決定する手法を、井合<sup>7)</sup>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含む系を対象として拡張されており、本研究では重力場における一連の模型実験に対し、この相似則を使用した。

これらの一連の相似則では、地盤の剛性 (G) が土被り圧 (σ) の平方に比例すると仮定しており、長さの縮尺比を 1/n とすると、応力や水圧の縮尺比は 1/n、歪みに関しては 1/n<sup>0.5</sup>、時間軸に関しては 1/n<sup>0.75</sup> で与えられる。

模型の地盤や間隙水に実物と同じ材料を用いれば、遠心载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<sup>2</sup> となる。このため、井合の相似則では、地盤の透水係数に関して模型と実物との間に相似則を設けており、模型地盤の透水係数を 1/n<sup>0.75</sup> に小さくする必要がある。

これらの条件より、圧密排水に関する時間係数 (T<sub>v</sub>) を算定する。せん断剛性率 G は、土被り圧の平方に比例しているため、G と逆比例関係にある体積圧縮係数 m<sub>v</sub> は模型と実物とで以下のように表される。

$$m_{vm} = n^{0.5} \times m_{vp}$$

ここに m<sub>vm</sub>, m<sub>vp</sub>: 模型と実物の体積圧縮係数

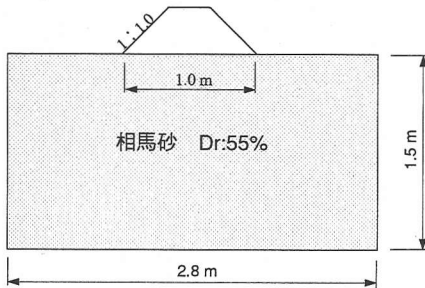
排水距離 h, 透水係数 k および体積圧縮係数 m<sub>v</sub> に上記の関係を用いて時間係数 T<sub>v</sub> を算定すると、実物と模型とで T<sub>v</sub> は一致することがわかる。

この透水係数に関する相似則は、通常の振動実験では加振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透水係数の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。今回は、透水係数に関する相似則を考慮して一連の実験を行い、これらが加振時の挙動に与える影響について検討を加えている。

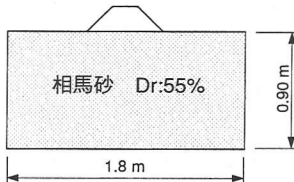
表-2 実験ケース一覧表

実験名	想定構造物	G-3	G-5	G-10	C-20-1	C-20-2
縮尺率	1	1/3	1/5	1/10	1/20	
地盤深さ	4.5m	1.5m	0.9m	0.45m	0.225m	
地盤幅	—	2.8m	1.8m	1.0m	0.60m	
地盤奥行	—	2.8m	1.8m	1.0m	0.25m	
実験場		重力場			遠心力場	
鉛直方向 加速度		1G			20G	
透水係数		$1.21 \times 10^{-1}$ cm/s	$4.3 \times 10^{-2}$ cm/s	$4.3 \times 10^{-2}$ cm/s	$2.2 \times 10^{-2}$ cm/s	$8.0 \times 10^{-3}$ cm/s
					$5.6 \times 10^{-3}$ cm/s	$5.6 \times 10^{-3}$ cm/s

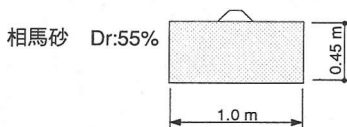
G-3 : 1/3 模型地盤 重力場



G-5 : 1/5 模型地盤 重力場



G-10 : 1/10 模型地盤 重力場



C-20-1, 2 :  
1/20 模型地盤 遠心力場

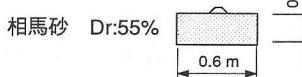


図-2 模型実験のスケール比較図

### 3. 実験内容

上記遠心力場と重力場における二つの相似則を統一的に検証するため、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。これら一連の実験では縮尺が1/3から1/20までの4つのサイズの

模型を使用して加振中、加振後の地盤内応答加速度、間隙水圧分布、盛土天端の沈下などを測定した。実験の結果はそれぞれの相似則に従い、想定した実物に換算して直接、比較検討を行った。

盛土構造物の液状化に関する模型実験はこれまでもいくつかあり、古賀ら(1992)<sup>8)</sup>は模型の縮尺や加振波形を変えた遠心模型実験を行い、地盤の挙動や盛土の沈下特性について報告している。風間ら(1996)<sup>9)</sup>の研究では、主に液状化後の残留変形量と円弧すべりなどの関係について報告されている。本実験は、これらの研究と実験手法的にはほぼ同じであるが、重力場と遠心力場における液状化現象を中心とした動的挙動の比較に着目している。

#### (1) 実験内容および検討ケース

想定した土構造物は、厚さ4.5mの砂地盤に載せられた天端幅1.0m高さ1.0mの盛土構造物である。今回の実験のケースは、表-2に示すように、重力場の実験では1/3と1/5、1/10の三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、遠心模型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の遠心力場にて振動実験を行った。遠心模型実験では、中央大学理工学部の遠心力載荷装置を使用した。本載荷装置の有効半径は3.05mであり、振動台の加振方向は回転方向に対し接線方向である。

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、G-3では1.5m、G-5では0.9m、G-10では0.45m、遠心力場のC-20-1および2では0.225mとしている。なお、地盤の水平長さに関しては土槽のサイズによる制限もあるため、水平長/深度の比で表すと最小がG-3で1.67~最大がC-20で2.67程度のばらつきがある。実験土槽は、G-5以外ではすべてせん断土槽を使用している。

表-2に示す重力場のG-3およびG-5では、飽和地盤を作成するのに大量の間隙水を必要とすること

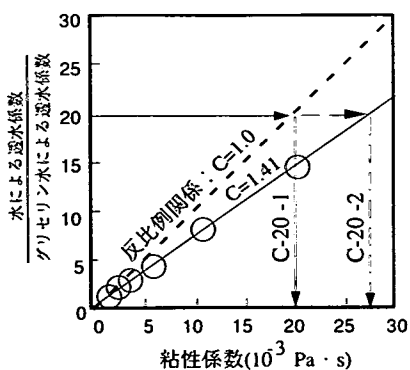


図-3 間隙水の粘性と透水係数比の関係

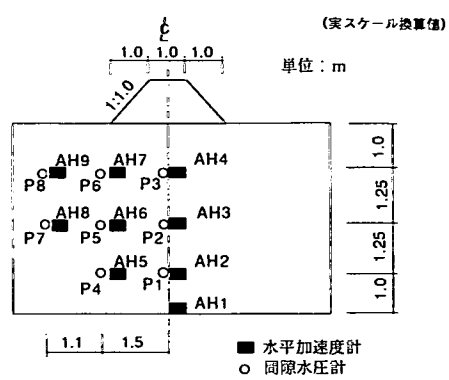


図-4 計器設置位置図

から、間隙水に水道水を使用し、その他の実験では、粘性を調整したグリセリン水溶液を用いた。このため、想定した実物地盤の透水係数は、G-3およびG-5の地盤に比べ $n^{0.75}$ 倍程大きいものと仮定して、他ケースの見かけの透水係数をG-3,G-5の透水係数と対比できるように粘性を調整した。

遠心模型実験では地盤の透水係数を調整するために、シリコンオイルなどの粘度の高い材料が使用される<sup>10)</sup>が、本実験では同様な性状を持つグリセリン水溶液を使用した。

地盤中の間隙水の流れがダルシー則に従うとすると、地盤の透水係数は以下の式で表される。

$$k = C \cdot \frac{n \cdot \gamma_w \cdot a^2}{8 \cdot \eta}$$

- ここに  $n$  : 地盤の空隙率
- $\gamma_w$  : 水の単位体積重量
- $a$  : 空隙の平均半径
- $\eta$  : 水の粘性係数
- $C$  : 比例定数

Sakemi et al.<sup>11), 12)</sup>は10G~50Gの遠心力場で透水実験を行い、遠心力場で上記のダルシー則が成立することを報告している。一方、遠心模型実験と重力場の実験を比較したKoseki et al.<sup>13)</sup>は、ダルシー則に従って地盤の粘性を調整すると遠心場の過剰間隙水圧の消散が重力場に比べて速くなることを報告している。著者らは間隙水の粘性と透水係数の関係を求め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。間隙水の粘性と、間隙水に水、グリセリン水溶液を使用した場合の透水係数の比との関係を図-3に示す。この結果、間隙水の粘性係数と地盤の透水係数の間には完全な反比例の関係( $C=1.0$ )は認められないが、上式の比例定数を $C=1.41$ と経験的に設定するこ

表-3 相馬砂の物理特性

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	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 $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.409
透水係数 $k$ (cm/s)	$4.3 \times 10^{-2}$
均等係数 $U_c$	1.454

とにより透水試験結果がうまく説明できる。今回の実験では、図-3の関係をを用いて模型の間隙水の粘性を調整した。

相似則から20Gの遠心力場では、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 $27 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ の粘性の溶液が必要であることがわかる。よって、G-3、G-5の重力場実験の相似則と合わせると、 $27 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s} \times (1/5^{0.75} \sim 1/3^{0.75}) = 8.25 \sim 12.09 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ の粘性が必要である。C-20-2では、平均をとって $10 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ のグリセリン水溶液を使用した。比較のためにC-20-1では、従来の反比例の関係から粘性を決定し、 $20 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s} \times (1/5^{0.75} \sim 1/3^{0.75}) = 6.7 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ のグリセリン水溶液を使用した。また、重力場の実験であるG-10についても、図-3の関係から地盤の間隙水に $2.0 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ のグリセリン水を使用した。

## (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 $90 \text{cm}$ と地盤密度の関係を予め実験より求め、落下高さ $90 \text{cm}$ 、水位 $15 \text{cm}$ 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。遠心力場における模型は、間隙水に粘度の高いグリセリン水溶液を使用す

表-4 入力波形条件一覧表

実験名	実構造物	G-3	G-5	G-10	C-20-1	C-20-2
縮尺率	1	1/3	1/5	1/10	1/20	
振動波形	正弦波, 60波					
周波数	5Hz	11Hz	16.7Hz	28.1Hz	100Hz	
最大加速度	目標値 147gal	実測値 170gal	実測値 215gal	実測値 162gal	実測値 3300gal	実測値 3040gal
継続時間	12s	5.45s	3.59s	2.13s	0.6s	

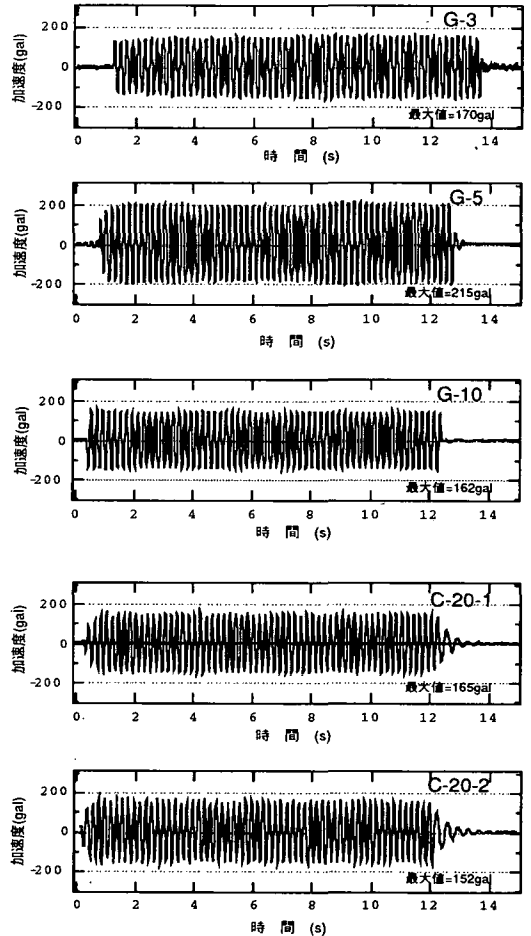
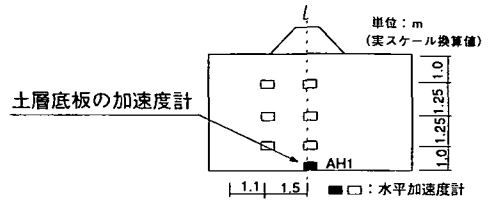


図-5 土槽底板の入力加速度時刻歴

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。

盛土部分についても地盤部と同様に相対密度 $D_r = 55\%$ の相馬砂を用いて作成した。今回の実験では盛土部分には木製の枠を用いているため、風間らの盛土の振動実験で見られたような盛土部分の崩壊は生じず、上載荷重としてだけ機能している。なお、盛土の作成時にはサクシオンにより、若干の地盤内の水の吸い上げが生じた。飽和砂地盤の水位は加振前に地盤面とほぼ一致するように調整した。

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振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) 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に各実験の入力波形条件を示す。入力波は仮想した実構造物に対し、最大加速度147galの正弦波60波とした。

### (4) 実験結果

図-5に各実験の土槽底板の入力加速度を示す。なお、これらの時刻歴図の時間軸は、各相似則を用いて実物の時間軸に、加速度も実物のものにそれぞれ換算している。土槽底板の入力加速度をみると、すべてのケースで設定した加速度より10%程度大きい値となった。特にG-5では入力加速度の最大値が210gal程度と大きくなっている。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G-3, G-5, G-10, C-20-1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。剛な土槽を使用したG-5では、入力加速度に比べ地盤内

部の応答加速度の方が大きくなっている。しかしながら、せん断土槽を使用した他の実験では、入力加速度に比べ地表面に近くなるにつれ応答加速度の最大値は小さくなっている。

各実験の応答波形は定量的にはかなりばらついた結果となったが、定性的には次のような傾向のあることがうかがえた。すなわち、法尻の直下の地表面に近いAH7では、加振直後に応答加速度が減衰しており、地盤剛性が低下している。一方、深い位置のAH5では、各実験のパターンに多少の相違はあるが、いずれも応答加速度の減衰は他の位置に比べ小さく、初期の剛性を維持している。

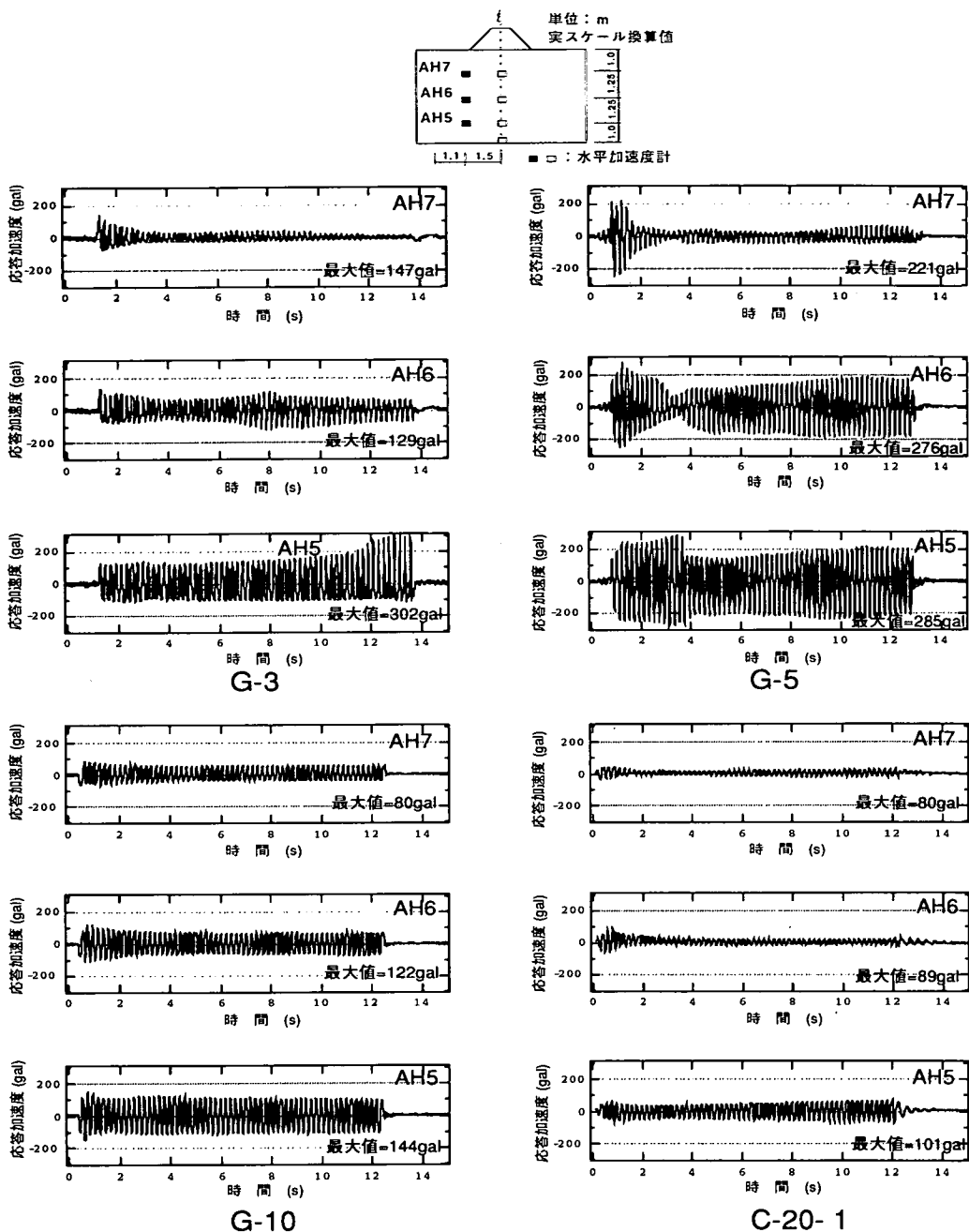
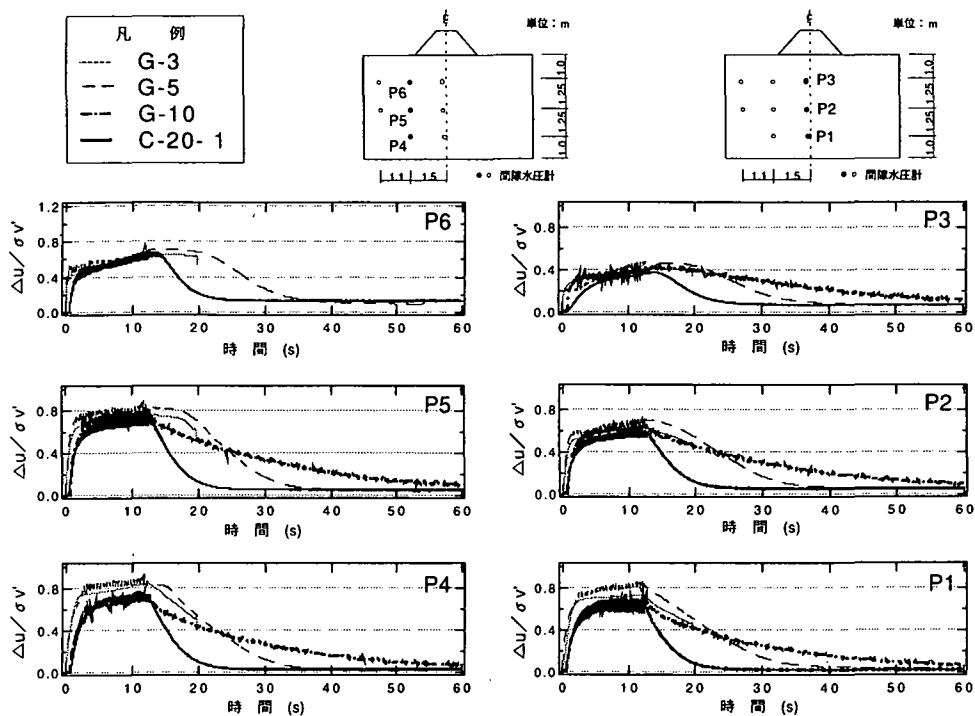


図-6 応答加速度の時刻歴（盛土法尻位置）

図-7(1)、図-7(2)に重力場の3つの実験と遠心力場のC-20-1における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。過剰間隙水圧比を求める際の地盤内の初期鉛直有効応力はポアソン比を0.333として弾性FEM解析で算定している。なお、G-3では、加振より20秒でデータ計測が終了している。また計器の故障から、G-10ではP6、C-20-2ではP4の水圧計が欠測した。

重力場での実験では各ケースの過剰間隙水圧比の相違は最大でも、20%以内に収まり、設置位置毎に良く似た挙動を示した。消散過程ではすべての水圧計でG-3、G-5に比べG-10が遅くなった。

なお、G-3とG-5では、同じ相対密度の状態でも、間隙水として水を用いているため、縮尺比の違いからG-5の方が $(5/3)^{0.75}=1.47$ 倍ほど透水係数が大きくなっている。消散過程をみるとG-3では、消散過程



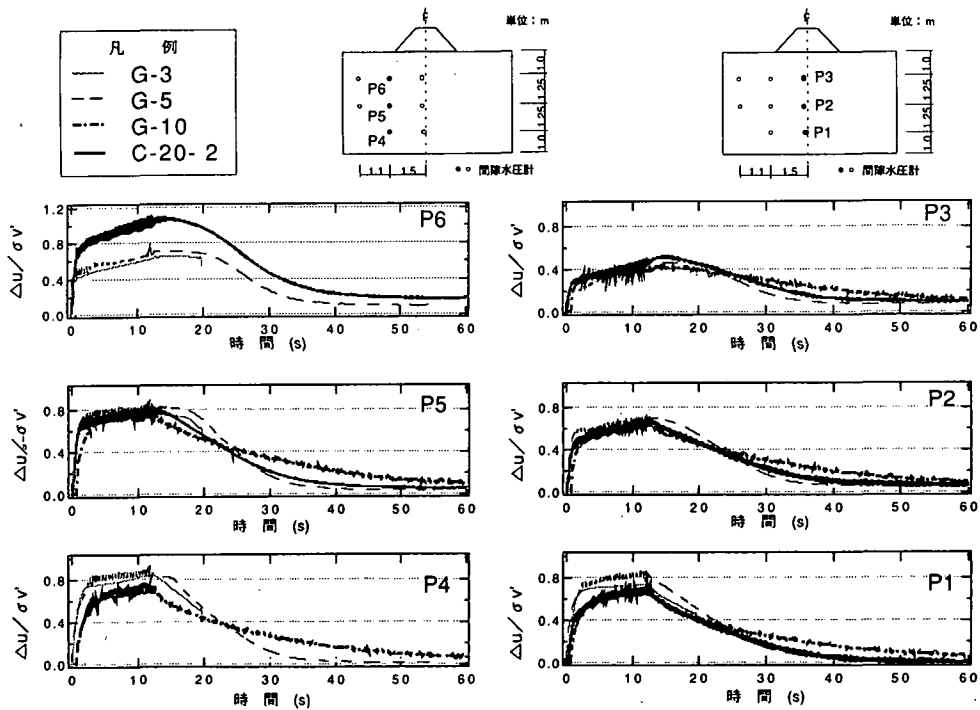
過剰間隙水圧比時刻歴 (P 4 ~ P 6)

(1) 盛土法尻直下

過剰間隙水圧比時刻歴 (P 1 ~ P 3)

(2) 盛土中央部直下

図-7 重力場と遠心場の過剰間隙水圧比の比較 (G-3,G-5,G-10 および C-20-1)



過剰間隙水圧比時刻歴 (P 4 ~ P 6)

(1) 盛土法尻直下

過剰間隙水圧比時刻歴 (P 1 ~ P 3)

(2) 盛土中央部直下

図-8 重力場と遠心場の過剰間隙水圧比の比較 (G-3,G-5,G-10 および C-20-2)

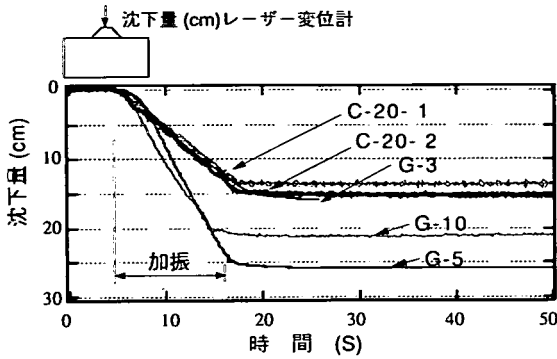


図-9 盛土天端の沈下量の時刻歴

の初期までしか計測値はないが、この間ではG-5と比べ消散速度に差は見られず、今回の実験ではこの原因について明らかにすることはできなかった。

C-20-1は、通常の遠心振動実験で用いられるように長さの縮尺率 $1/n$ の逆数に等しい粘性係数の間隙水を使用したものである。重力場の各実験と遠心力場のC-20-1を比較すると、加振による上昇時の挙動は両者でほぼ一致しているが、Koseki et al.<sup>3)</sup>の報告と同様に水圧の消散が重力場の実験に較べかなり速くなっていることがわかった。

これに対し、図-8(1)、図-8(2)は重力場の各実験と遠心力場のC-20-2における各点の過剰間隙水圧比の時刻歴を示したものである。C-20-2は先に述べたように透水実験により実測された間隙水の粘性と地盤の透水係数の関係を用いて間隙水の粘性を決定しており、C-20-1に比べ50%程度粘性の高いグリセリン水溶液を使用している。このため、C-20-1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、水圧比の最大値も含めて重力場の各ケースと良い一致が認められた。

これらの結果より、過剰間隙水圧の上昇はほぼ非排水状態で生じることから、間隙水の粘性の相違による影響は小さいが、消散速度には粘性が大きく影響を与えることがわかる。また、地盤の透水係数に関する相似則を一致させることで、遠心力場と重力場における模型の過剰間隙水圧の消散挙動はある程度一致することがわかった。

水圧計の挙動を見ると、すべての過剰間隙水圧は加振後の数波で急激に上昇し、その後暫増している。また、盛土直下では、法尻位置の水圧計に比べ、初期鉛直荷重が大きいため、過剰間隙水圧比は小さくなっている。過剰間隙水圧比の消散過程を見ると、各ケースとも、表面に近い位置の水圧計ほど消散時間が遅くなっており、このことは風間らが行った盛土の遠心模型実験の水圧計の傾向と同じであった<sup>9)</sup>。

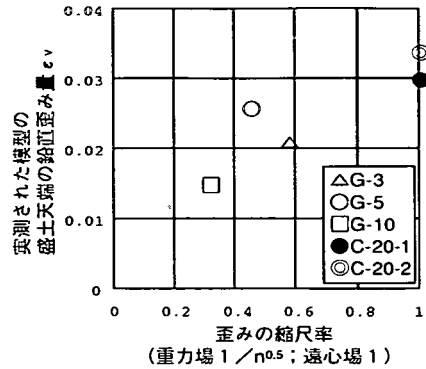


図-10 歪みに関する縮尺率と模型の歪み量の関係

一方、図示は省略したが、周辺地盤位置における過剰間隙水圧比(P7, P8)はすべての実験で1.0に近い値となり、周辺の地盤は完全液状化状態となった。

図-9に各実験の盛土天端の鉛直変位の時刻歴を示す。すべての実験で、盛土の沈下はほとんどが加振中に生じ、加振中は加振時間にほぼ比例して沈下が生じている。この結果は、古賀らが行った盛土の振動実験<sup>8)</sup>とほぼ同様であった。今回の実験では地盤の透水係数が比較的大きかったために、加振中に排水が生じ、沈下が発生したことが考えられる。しかしながら、盛土の直下では加振終了時に過剰間隙水圧比は0.5~0.8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ことから推定すると、盛土のような偏った荷重の構造物では、液状化に伴う過剰間隙水圧の消散による圧密沈下よりも、加振中の地盤の剛性の低下によって生ずるせん断変形に起因する沈下の方が大きいと思われる。

また、盛土天端の沈下量は入力加速度の大きいG-5で約30cmと若干大きくなった。図-10に各ケースの歪みに関する縮尺率と実測された模型の鉛直歪み量との関係を示す。井合の重力場の相似則では、歪みの縮尺率は実モデルの $1/n^{0.5}$ であり、遠心力場では1対1の関係がある。同図を見ると入力加速度の大きかったG-5を除くと、その他のケースで実測された模型の鉛直歪み量と歪みの縮尺率はほぼ比例関係にあった。液状化時の地盤の変形量には、圧密沈下やせん断変形による沈下を含むため、今回の実験だけでは、沈下量に関する相似則の適合を判断することはできないが、図-10の実験結果では、重力場と遠心場の異なった2つの歪みに関する相似則の適用結果はほぼ一致した。

図-11に加振終了後に測定した地表面沈下量を示す。なお、G-10の地表面沈下量に関しては、加振終了後に地表面の沈下板が間隙水により浮き上が



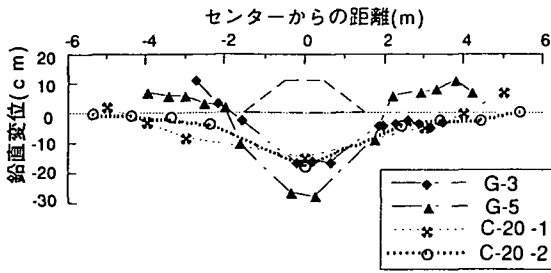


図-1-1 各ケースの地表面沈下量

ったため、測定できなかった。盛土天端の沈下量の差違は、各ケースで40%程度に収まったが、盛土の周辺部では、重力場のG-3、G-5と遠心力場のC-20-1、C-20-2で異なる沈下の傾向となった。G-3およびG-5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若干隆起している。一方、C-20-1およびC-20-2では、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、重力場の模型では遠心力場に比べ、地盤内部の拘束圧力が小さいためダイレイタンシーが大きくなったことなどが考えられるが、この点について今回の実験だけで判断することは難しく今後検討を要すると考える。

#### 4. 結論

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力場における実験を比較すると、地盤内の応答加速度に関しては、模型の縮尺率や土槽の形状によって微妙に影響を受けるため、定量的な取り扱いには難しいことがわかった。ただし、定性的には加速度の減衰や回復について加速度計の設置位置毎に良く似た傾向を示した。

(2) 過剰間隙水圧については、重力場の実験と遠心力場の実験で、加振による水圧の上昇時の挙動は定量的にも概ね一致した。消散過程に関しては、間隙水の粘性と地盤の透水係数の実測値によって間隙水の粘性を調整することにより、重力場と遠心場の実験結果は同様な挙動を示した。

(3) 盛土天端の変形の経時的な変化は、すべての実験で、加振中に変形が進行し、加振の終了とともに変形の進行が終了した。また、沈下の歪み量については、入力加速度の大きかったG-5を除くと、実測された模型の歪み量と歪みの縮尺率には、比例的な関係が認められ、重力場と遠心場の2つの歪みに関する相似則の適用結果はほぼ一致した。

(4) 地盤の透水係数を1.5倍程度変えた2つの遠

心力場の模型実験では、加振時の挙動には大きな差は認められなかったが、加振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あるいは粘性に影響を与える間隙水の水温を管理して実験を行う必要があると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、遠心模型実験に関して協力を頂いた中央大学理工学部土木工学科土質基礎工学研究室の皆様へ感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Ko, H.Y.: Modeling seismic problems in centrifuges, CENTIFUGE94, pp. 3-12, 1994.
- 2) Arulanandan, M., Manzari, M., Zeng, X., Fagan, M., Scott, R.F. & Tan, T.S.: What the VELACS project has revealed., CENTIFUGE94, pp. 25-32, 1994.
- 3) Koseki, J.: Comparison of centrifuge and shaking table tests on liquefaction induced damage, Proc. of First International conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol.2, pp.729-734, 1995.
- 4) 高田直俊, 日下部治: 講座「遠心模型実験3.原理」, 土と基礎, Vol35-12, pp. 89-93, 1987.
- 5) 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, pp. 69-77, 1978年7月.
- 6) 国生, 岩楯: 軟弱地盤の非線形振動特性についての模型振動実験と解析, 土木学会論文報告集, 第285号, pp.57-67, 1979.
- 7) 井合進: 1 G場での地盤・構造物系の模型振動実験の相似則について, 第19回地震工学研究発表会講演概要集, pp. 341-344, 1987年.
- 8) 古賀泰之, 古関潤一, 高橋晃浩: 飽和砂地盤と盛土の地震時挙動に関する動的遠心模型実験, 土と基礎, Vol. 412, pp. 17-22, 1992.
- 9) 風間基樹, 稲富隆昌, 飯塚栄寿, 永吉貴行: 飽和砂地盤上の盛土の地震時安定性に関する遠心力模型振動実験, 土木学会論文報告集, 第547号/III-36, pp.107-116, 1996.9.
- 10) 廣岡明彦, 酒見卓也, 川崎宏二, 山本陽一, 竹村次朗: 遠心模型振動実験手法の現状と課題「時間に関する相似則と試料容器境界の影響に関する考察」, 東工大土木工学研究報告No.53, 1996.3.
- 11) 田中 満, 樋口雄一, 酒見卓也, 川崎宏二, 名倉克博: 遠心載荷装置による液状化模型実験手法の基礎的研究(その1 遠心場に於ける間隙流体の透水特性), 大成建設技術研究所法 第27号, pp.419-424, 1994年.
- 12) Sakemi, T., Tanaka, M., Higuchi, Y., Kawasaki, K. and Nagura, K.: Permeability of Pore Fluids in the Centrifugal Field, Proc. 10th. ARCSMFE, pp.481-484, 1995.

(1997. 6. 5 受付)

# DIRECT COMPARISON OF GRAVITY MODEL AND CENTRIFUGE MODEL FOR THE SEISMIC PROBLEM

Kentaro HAYASHI , Nariaki FUJII , Tomohiro MURAMATSU  
and Kazuo HOUJYOU

According to the both development of mechanics and electronics, the earthquake simulators for geotechnical model are used in centrifuge to take the place of that in the gravity field. But the similarity rule of a seismic behavior has been rarely investigated. This paper describes a series of shaking table tests carried out to compare the different scale model which is an embankment on a loose saturated sand. The sizes of reduced scale were the 1/3,1/5,1/10 in the gravity field and the 1/20 in the centrifuge. A good agreement was obtained in the dynamic behavior of excess pore pressures, acceleration response and surface settlement following the similarity rule respectively.