

波による地盤内間隙水圧の蓄積に関する模型実験の現地との相似性

東洋建設 正会員 ○宮本 順司
 港湾空港技術研究所 正会員 佐々 真志
 豊橋技術科学大学 正会員 松田 達也

1. はじめに

波の作用による海底地盤内の残留間隙水圧の蓄積は、地盤の有効応力の減少をもたらすため、構造物の安定性に影響を及ぼす。さらに、液状化に至ると完全に粒子間応力が喪失するため、流れによって大量の土砂移動をもたらされる可能性があり漂砂や構造物周りの侵食・洗堀を検討するうえで大きなリスクとなる。模型実験で波による残留間隙水圧の蓄積、液状化を評価する方法として遠心力場の波浪実験法¹⁾がある。これは、現地地盤の応力状態を縮尺模型で再現するだけでなく、波浪伝播に関する Froude 則の時間と地盤内間隙水圧の上昇・消散の時間とを、現地と同一地盤材料を用いながら容易に一致させられる点が大きなメリットである。

Sumer(2014)²⁾は、波による残留間隙水圧の蓄積や液状化の問題には遠心模型実験が有効であることを示しつつ、1g 場波浪実験(縮尺模型)でこれを再現し遠心模型実験と結果を比較している(図-1)。ここで、1g 場実験は遠心模型実験に概ね一致していることから、1g 場実験もこの問題にある程度は有効であると主張している。しかし、図-1に示す 1g 場実験で用いられている地盤材料の透水係数は、比較対象の遠心模型実験の地盤材料のものより 10^{-2} オーダー程度小さく、実験結果の現地への対応が難しくなる。本論文では、波浪作用下における残留間隙水圧の蓄積と液状化に関して模型実験の現地との相似性を考察する。具体的には、波による過剰間隙水圧の蓄積を支配する貯留方程式を、遠心力場の波浪実験の条件と 1g 場実験の条件で数値モデルを用いて解き、用いる地盤材料の違いがそれぞれの液状化発生深度に及ぼす影響を比較する。

2. 波による残留間隙水圧蓄積の支配式と相似率の検討

波浪作用など繰返しせん断応力下の地盤内の残留間隙水圧の蓄積、消散は次の貯留方程式で支配される¹⁾。

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = \frac{k \cdot M}{\gamma_f} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} + M \frac{\partial v^p}{\partial t} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 u_e ：過剰間隙水圧の残留成分、 v^p ：繰返しせん断に基づく砂の塑性体積ひずみ、 γ_f ：間隙水の単位体積重量、 k ：地盤の透水係数、 M ：地盤の体積剛性率(=1/ m_v 、 m_v ：体積圧縮係数)である。左辺から右辺第一項までが通常の圧密方程式と同形式であり、右辺第二項が繰返しせん断に基づく過剰間隙水圧の発生項である。上式(1)から実験に用いる地盤材料の透水係数の相似率を検討すると表-1のようになる。実験で用いる地盤材料の絶対透水係数の相似率は、Froude 則から要請される時間に地盤の透水時間を整合させるための条

キーワード 遠心模型実験、残留間隙水圧、液状化

連絡先 〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 1-25-1 東洋建設(株) 鳴尾研究所 TEL 0798-43-5903

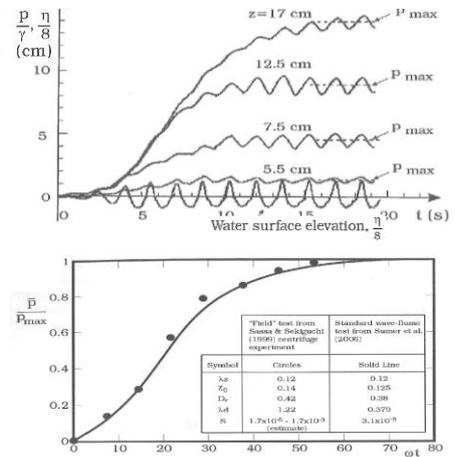


図-1 1g場の波浪実験における地盤内の残留間隙水圧の蓄積(上)と蓄積過程の遠心模型実験との比較(下)(文献2)のFig. 3.2と3.37より)

表-1 貯留方程式 式(1)に基づく遠心模型と1g模型の相似率

		現地	遠心模型	1g模型
与 条 件	重力加速度	g	1	N
	長さ	z	1	1/N
	密度	ρ	1	1
	ひずみ	v	1	1
	時間 (Froude則より)	t	1	1/N
間隙水圧, 有効応力	u_e, σ	1	1	1/N
間隙水単位体積重量	γ_f	1	N	1
地盤剛性	M	1	1	1/N
絶対透水係数	K	1	1	1/N ^{0.5} *1
(透水係数($K \cdot \gamma_f / \mu$))	k	1	1	1/N ^{0.5} *2

*1: Froude則の時間に圧密時間を対応させるために模型実験で用いるべき地盤の透水係数を表す。

*2: 遠心模型では粘性流体(N倍)を用いた場合。

件である。すなわち、遠心模型実験では現地と同一に対し $1g$ 実験では現地の $1/N^{0.5}$ の透水係数の地盤材料を用いる必要がある。これは、現地とは異なる地盤材料で実験しなければいけないことを表している。ここで透水係数を対応させるべく地盤材料を変化させると剛性 M も変化するため、式(1)を現地と整合させることは難しい。次章以降では $1g$ 実験で現地と同一の地盤を用いた場合に、どの程度結果に影響を及ぼすのかを式(1)を解析モデルに組み込んで間隙水圧応答を求めることで調べる。

3. 解析モデルの検証

貯留方程式(1)を地表面波圧(液状化発生後は液状化土による液圧も含む)を境界条件として鉛直1次元差分で解くことにより地盤内の過剰間隙水圧応答を求める³⁾⁴⁾。遠心模型実験による波による液状化過程⁵⁾を再現した例を図-2に示す。残留間隙水圧の蓄積と液状化の発生および深度方向への液状化の拡大が再現されており、式(1)および解析モデルの妥当性が検証された。

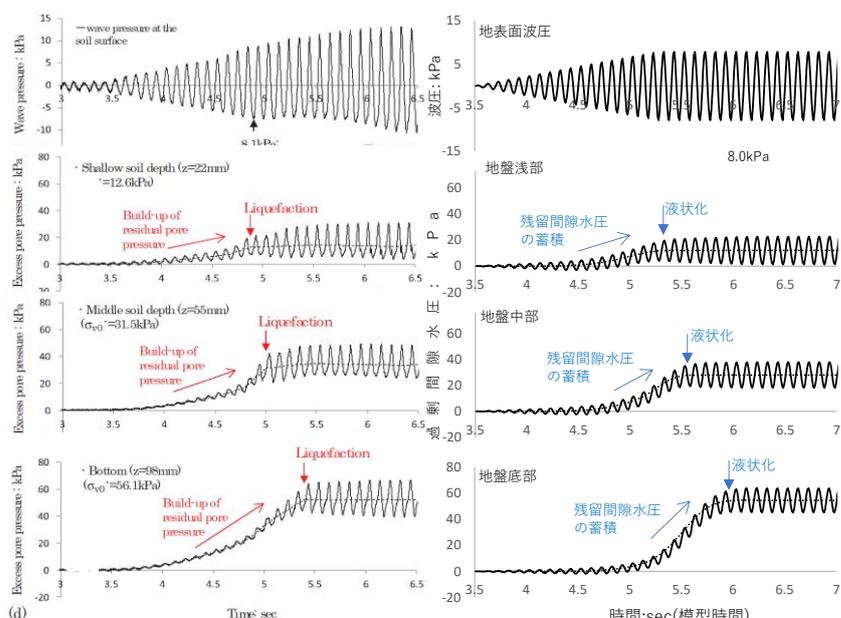
4. 実験で用いる地盤材料の透水係数が $1g$ 場実験に及ぼす影響

上記の解析モデルを用いて、ある現地条件(水深7m, 地盤層厚7m, 周期9秒, 波高2m)を想定して、 $1g$ 場と $70g$ 場で $1/70$ 縮尺模型実験に対応する解析を実施した。なお、地盤は緩い状態を想定し、図-2で示した遠心模型実験を再現したパラメータ(繰返しせん断に基づく塑性体積ひずみ発生に関わる)を用いている。

地盤の透水係数を変化させた場合の、液状化領域の変化を図-3に示す。同じ透水係数の砂を用いると $1g$ 実験と遠心模型実験で結果が異なることがわかる。例えば、現地の透水係数が $1.0E-5m/s$ の時(図中*1), 液状化は無次元深さ0.55まで発生するが、同じ砂を用いて $1g$ 実験を行うと、液状化深さはずっと浅い。一方で現地の砂が中程度に粗く透水係数が $1.0E-4m/s$ と大きい時(図中*2)は、遠心模型でも $1g$ 実験でも液状化がほとんど起こらず両者の差は小さい。また、現地がシルトに近い微細砂で透水係数が $1.0E-6m/s$ と小さい時(図中*3)は両者とも液状化深度が大きく結果の差が小さい。以上より、透水係数の一定の範囲では、遠心実験と $1g$ 実験の結果で大きな差があること、またその範囲が一般の細砂~中砂相当の透水係数に対応することは重要であり、 $1g$ 実験で残留間隙水圧の蓄積、液状化を再現する際は注意を要する。

参考文献

- 1) Sassa, S., Sekiguchi, H., 1999, Géotechnique 49 (5), 621-638.
- 2) Sumer, B.M. 2014. Liquefaction around marine structures. Advanced Ser. Ocean Eng., Vol. 39, World Scientific.
- 3) Sassa, S., Sekiguchi, H., Miyamoto, J., 2001, Géotechnique 51(10), 847-857.
- 4) 宮本順司, 佐々真志, 2020, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 76-2, I_462-467.
- 5) Miyamoto, J., Sassa, S., Tsurugasaki, K., Sumida, H., 2020., Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. 146(2), 04019039.



(a) 遠心模型実験(文献5)のFig. 4より

(b) 準一次元解析

図-2 式(1)に基づいた準一次元解析による波浪作用下の過剰間隙水圧応答予測の検証

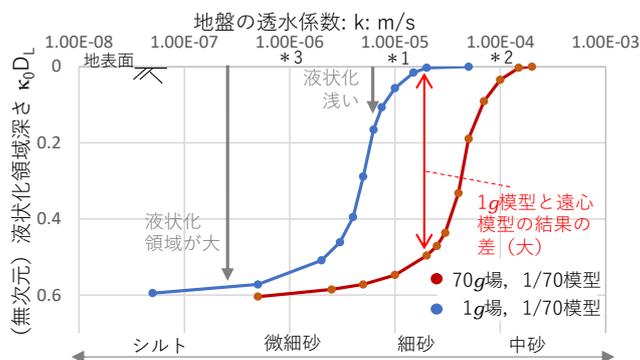


図-3 $1g$ 模型実験で使用する地盤材料の透水係数による遠心模型実験結果との比較