波による地盤の液状化に関する 堆積方向の異方性の影響

伊藤 輝¹・宮本 順司²・上田 恭平³

¹ 正会員 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 1 丁目 25 番 1 号)
E-mail: ito-hikaru@toyo-const.co.jp

² 正会員 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 1 丁目 25 番 1 号)

³ 正会員 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

堆積方向の異なる水平地盤を作成し、遠心力载荷装置内の水路で波浪载荷試験を行った。その結果、波の方向に対して反時計回りに 30 度傾斜した堆積方向を持つ地盤が比較的早く液状化に至った。また、0 度、150 度の堆積方向をもつ地盤は同程度の過剰間隙水圧蓄積速度となった。次に、初期構造異方性を考慮したひずみ空間多重せん断モデルを用いて解析し、30 度の堆積方向をもつ地盤が液状化しやすいといった実験結果を再現した。本研究では、再現解析結果を詳しく分析し、堆積方向の異なる地盤の液状化特性の違いを考察した。

Key Words : *initial structural anisotropy, drum centrifuge model experiment, FEM analysis, wave-induced liquefaction, principal stress direction*

1. まえがき

近年、海底パイプラインの浮上や地滑りによるケーブルの破断など、海底地盤の波浪による液状化の影響が強く疑われる被災事例が報告されている。また、海洋構造物の需要が増大する中で、海底地盤の安定性が重要であり、ケーソンや消波ブロックの沈下などの被災事例を対象に種々の実験解析が行われている^{1,2)}。また、近海の海底地盤はその堆積過程より異方性をもって堆積することが知られており³⁾、実地での試験が行われている⁴⁾。しかしながら、地盤の波浪による液状化について調べられた例の多くは水平成層地盤を対象としており、初期構造や堆積の異方性を考慮した研究は要素試験に限られており、また、異方性の影響は無視できない結果となっている⁵⁾。

従来、これらの被災事例を再現するにあたって水理模型実験などが行われてきた。しかしながら、波浪によって地盤内の有効応力が減少して構造物の被災につながる例は1g重力場では再現が困難であり、最近では遠心力模型実験による研究が進められている⁶⁾。また、最近、初期構造異方性を考慮したひずみ空間多重せん断モデルが提案され^{7,8)}、堆積方向や主応力方向角の異なる要素試験の再現解析等が行われている。

これらの背景から、本研究ではドラム型遠心载荷装置内の水路を用いて、堆積方向の異なる地盤に波浪を载荷

し、液状化過程の違いを調べた。また、初期構造異方性を考慮したベータ版FLIP7.2.3_Anisoを用いて実験結果を再現し、詳しい応答を調べた。

2. 遠心模型実験

図-1に実験概要図を示す。ケース0(図-1(a)参照)は水平に堆積した地盤とし、水中落下法で目標 $Dr=50\%$ となるよう作成した。波圧計及び間隙水圧計は模型中心部分に設置した。間隙水圧計はそれぞれ、海底面から地下2cm(実規模1.4m)、5cm(実規模3.5m)、8cm(実規模5.6m)、10cm(実規模7m)の位置に設置した。次にケース30(図-1(b)参照)は鉛直軸から時計回りに30度、ケース150(図-1(c)参照)は対称に時計回りに150度傾斜して堆積した地盤とした。これらの地盤の作成方法として、砂を水中落下させると約15度の斜面で安定し地盤を作成できることから模型土槽を15度傾けて地盤作成後、土槽の角度を元に戻して30度の堆積方向地盤を作成した。堆積角度は、図-2に示すように堆積面に沿って形成される模様を模型中心部分で計測した。計測方法として、地盤を正面から撮影し、模型土槽のアクリル板に設置された不動点2つを結んだ線からの傾きを画像計測した。

図-1 実験概要図

地盤材料は東北珪砂6号を使用した。間隙水は70倍の粘性を持つ流体で作成し、過剰間隙水圧の消散速度を実規模のものと相似させた。また、地盤外部の流体は通常の水を使用している。

波浪載荷実験は遠心力場 70G の水路で行った。地盤に作用させた波浪は周期 0.1 秒 (実規模周期 7 秒) の波浪振幅が徐々に大きくなる正弦波であり、継続時間は地盤全体の液状化を十分に確認するまでとした。図-3 にそれぞれのケースに作用した地表面波圧を示す。すべてのケースで同程度の波浪が載荷された。最大波圧は約 14kPa であり、微小振幅波理論を適用すると実規模で水深 7m において波高 3m 程度の波浪を載荷している。

各ケースのPWP1の過剰間隙水圧応答時刻歴を図-4に示す。すべてのケースにおいて、過剰間隙水圧が蓄積し液状化が発生した。しかし、液状化に至るまでの速度を比較すると、ケース30が比較的早く液状化に至っている。ケース30と軸対称の堆積方向を持つケース150については、ケース0とほぼ同じ蓄積速度であった。

以上の実験の結果、堆積方向の異なる地盤では液状化特性が大きく異なり、その差は過剰間隙水圧蓄積速度となって現れることが分かった。詳しく見ると、水平に堆積したケース0と比較して、海底面から造波方向に30°傾いたケース150では過剰間隙水圧蓄積速度は同等なもの、海底面から反時計回りに30°傾いたケース30では

図-2 堆積角度計測方法

図-3 地表面波圧 (実験)

図-4 過剰間隙水圧時刻歴 (実験)

過剰間隙水圧の蓄積速度が速く、少ない波浪で液状化することが分かった。

3. 数値解析概要

(1) 再現解析

前実験結果を分析するため、初期構造異方性を考慮したひずみ空間多重せん断モデルを使用して再現解析を行った。解析ソフトはFLIP723 Aniso_beta6を用いた。

解析断面図を図-5に示す。解析断面は検討要素に境界の影響が及ばないよう 50m×20m とした。使用したパラメータを表-1に示す。液状化パラメータは東北珪砂6号の各種試験結果に対し要素シミュレーションを行い決定した。堆積方向を表す異方性パラメータ ω_0 (堆積面の法線方向と図-2の左側x軸のなす角の2倍)は実験の堆積条件を示すよう、ケース0では $\omega_0=180^\circ$ 、ケース30では $\omega_0=120^\circ$ 、ケース150では $\omega_0=240^\circ$ とした。異方性の程度を表す a_1 及び a_2 は、実験結果を再現するようパラメトリックスタディを行い決定した。

入力波浪は実験をもとに波長 52m, 周期 7 秒, 25 波の sin 波とし、波浪振幅を 4kPa~13kPa の 11 種類とした。

表-1 解析パラメータ

液状化に関するパラメータ															初期構造異方性パラメータ		
ϕ_f^{iso}	ϕ_p	$-\varepsilon_d^{cm}$	$r\varepsilon_{dc}$	$r\varepsilon_d$	r_K''	q_1	q_2	l_K	S_l	c_l	q_4	r_g	r_{nimp}	q_{us}	a_1	a_2	ω_0
40.0	28.0	0.40	1.25	0.6	2.0	7.5	0.25	0.3	0.005	1.90	1.0	0.1	0.5	0.0	0.3	0.5	180,120,240

図-5 解析断面

図-6 過剰間隙水圧時刻歴(解析)

図-7 過剰間隙水圧比時刻歴

解析手順は、異方性パラメータを適用して自重解析を行った後、波浪を載荷する動的解析を行った。

(2) 様々な堆積方向の解析

実験結果及び解析結果を踏まえ、様々な堆積方向角を持つ地盤で波浪応答解析を行った。解析断面及びパラメータは再現解析と同一のものを使用した。

4. 数値解析結果

(1) 再現解析結果

図-6 に各ケースの着目要素(海底面下 1.5m)の過剰間隙水圧時刻歴を示す。解析結果は実験をよく再現し、ケース 30 の過剰間隙水圧が比較的早く上昇する結果となった。続いて、図-7 に過剰間隙水圧比時刻歴を示す。過剰間隙水圧比はFLIP の機能により式(1)によって示される。

$$PEX1 = 1 - \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \quad (1)$$

ここに、PEX1:過剰間隙水圧比、 σ'_m :有効上載圧、 σ'_{m0} :初期有効上載圧である。

図-8 に実験時及び解析時の繰返し応力比 χ_0 を示す。 χ_0 は式(2)で表される。

$$\chi_0 = \frac{u_0 \kappa}{\gamma'} \quad (2)$$

ここに、 u_0 :波圧振幅、 κ :波数($2\pi/L$)、 γ' :地盤の水の中単位体積重量である。実験時の過剰間隙水圧比は、徐々に大きくなる波を載荷したため、1 波毎の波圧振幅と過剰間隙水圧比の値を使用した。再現解析は各波浪振幅 4kPa-13kPa において 2 波載荷した時刻での過剰間隙水圧比を使用した。図-8 を詳しく見ると、解析結果は実験結果と同じくケース 30 の過剰間隙水圧が比較的早く上昇した。しかしながら実験結果について $\chi_0 = 0.05$ 付近で

図-8 繰返し応力比 χ_0

図-9 各応力の時刻歴

図-10 各ひずみの時刻歴

図-11 各ひずみの詳細な時刻歴(Δε)

前述の傾向がみられることに対して、解析結果では $\chi_0 = 0.1$ 付近からケース 30 が卓越するなどの差が見られた。これは実験では徐々に大きくなる波浪を载荷したため、履歴の影響によって比較的小さい繰返し応力比で高い過剰間隙水圧比が得られたと考えられる。また、解析では高い繰返し応力比の波が载荷されると 2 波程度で液状化に至るケースもみられた。

以上の解析結果から、ケース30が比較的早く液状化し、ケース0とケース150が同程度の過剰間隙水圧蓄積速度となる結果を再現できた。以上の結果より、波浪振幅8kPa時の解析結果を詳しく調べた。

a) 軸応力, せん断応力

図-9 に各応力の時刻歴を示す。図-9(a)の水平応力時刻歴を見ると、ケース 30, ケース 150 では初期構造異方性を考慮して自重解析を行ったため、ケース 0 に比べて倍近い初期水平応力がみられる。波浪が载荷されるとケース 150, ケース 0 は同じ速度で応力が低減していき、10 波程度で急減して液状化に至る。しかし、ケース 30 ではほかのケースに比べて応力の減少速度が僅かに早いというに、少ない波数で急減した。図-9(b)の鉛直応力について

は、初期の値はすべてのケースで同程度である。ケース 30 が比較的早く減少する点は水平応力と同じ傾向ではある。3 波目までの振動成分を詳しく見ると、ケース 0 が最も大きく、ケース 150 とケース 30 が同程度となった。

図-9(c)にせん断応力時刻歴を示す。水平に堆積したケース 0 の初期値はゼロであるが、ほかのケースは±0.5kPa 程度せん断応力が発生した。波浪による振動成分を比較すると、ケース 30 では負のせん断応が他のケースに比べて大きくなっている。

b) 軸ひずみ, せん断ひずみ

図-10 に各ひずみ時刻歴を示す。図-10(a)の水平ひずみ時刻歴を見ると、ケース 0 は圧縮と引張どちら側にも発生しているのに対して、ケース 30, 150 では圧縮方向にのみひずみが発生している。この傾向は鉛直ひずみ(図-10(b)参照)にも表れており、ケース 30, 150 では引張側にひずみが発生している。ただし鉛直ひずみの場合は繰返し波浪を受けることで残留成分は圧縮側に近づいている。図-10(c)にせん断ひずみ時刻歴を示す。ケース 30 の残留せん断ひずみは正の方向に変化していき、逆にケース 150 では負の方向に変化していった。ケース 0 につい

図-12 せん断応力-軸差応力

図-13 有効応力経路図

図-14 過剰間隙水圧と堆積方向角の関係

ては両側にせん断ひずみが発生したが、残留成分は徐々に負側に遷移した。0秒から10秒までの各ひずみの時刻歴(Δε)を図-11に示す。波浪が対象要素の直上に進行してくるまでに3.2秒ほど要しているため、0から3.2秒は波浪による応力が地盤によって伝達された際の応答である。波浪到達前の水平ひずみはケース30が大きく発生し、ケース0, 150では同程度発生する結果となった。鉛直ひずみについてもケース30が引張側に最も発生し、ケース0, 150は同程度となっている。せん断ひずみについては波浪到達まではすべてのケースで同程度だった。波浪到達後ケース30, 150は同程度の振幅で変化し、ケース0は正負両側に大きく変化した。

c) せん断応力-軸差応力

図-12にせん断応力-軸差応力図を示す。波浪载荷前の初期位置は緑点で、波浪が着目要素の直上に到達する前後の動きを矢印で示した。波浪が到達するとせん断応力が大きく発生し、せん断応力-軸差応力図は円を描くように変化している。ケース0の場合を見ると、堆積方向が水平なため、自重解析で水平応力が比較的大増せず、せん断応力も発生しなかったため初期位置はx軸上にある。反対にケース30, 150では軸差応力、せん断応力ともに発生した。また、波浪到達前後にすべてのケースで不安定な挙動がみられるが、これは波浪を地表面要素に载荷される分布荷重へ分解したために発生した。波浪による応力が伝播してくると、すべてのケースで軸差応力が減少した。ケース30については大きく減少し、波浪が到達すると軸差応力は負となりせん断応力についても負となった。波浪の先頭が着目要素の直上を通過するとグラフは円を描くように大きく変化した。

d) 有効応力経路図

図-13に有効応力経路図を示す。図中の緑線は変相線であり、変相角は各ケース共通で28度である。ケース0ではケース30, 150と比較して偏差応力が低く平均有効応力が低い位置から始まる。波浪を载荷すると偏差応力は大きく変化し、1波毎に偏差応力が増えるにつれて有効応力が増加しているものの、有効応力が5kPaを下回ると急速に減少し液状化した。次にケース30を見ると、初期位置は偏差応力が低く有効応力は高い位置にある。波浪を载荷すると平均有効応力は継続的に減少したが、偏差応力は漸減しなかった。しかし、変相線に達すると偏差応力が大きく減少し液状化した。ケース150は初期位置がケース30と同様であるが、平均有効応力11kPa～8kPaにかけて平均有効応力の減少量が小さかった。

(2) 様々な堆積方向の解析

前項で使用した解析パラメータのうち、堆積角度 ω_0 を様々に変化させて振幅8kPaの波浪を载荷し、図-14に2波目、5波目、10波目、20波目の過剰間隙水圧比と堆積方向角の関係を示す。2波目では各堆積角度で過剰間隙水圧比0.2程度であるが、5波からは堆積角度120度の場合が突出して液状化が進む傾向にある。10波目では、 $\omega_0=100\sim160$ の場合は液状化に達しているが、 $\omega_0=200\sim260$ においては過剰間隙水圧が大きく上昇するものの液状化には達していない。これは波浪が1方向から载荷されたためと考えられる。 $\omega_0=180$ のケースは比較的液状化しづらかった。20波目が载荷される時刻では $\omega_0=100\sim260$ のケースすべて液状化に達しているが、これらのケース以外は過剰間隙水圧比がほとんど上昇しなかった。

また、各堆積角度のせん断応力-軸差応力図は堆積角度 180 度を境に楕円の軸が傾き、20 波目で液状化しないケースでは 180 度の場合と同じように真円に変化した。 $\omega_0=100\sim 260$ 以外の堆積角度では過剰間隙水圧が蓄積しないが、実際の海底地盤では液状化の可能性のある緩い地盤が 30 度以上傾斜して堆積することは考えにくく、構造物等からの反射波を考慮すると水平堆積以外の地盤では過剰間隙水圧蓄積速度が大になるものと思われる。

5. 結論

本研究では、ドラム型遠心载荷装置を用いて堆積方向の異なる地盤に波浪载荷試験を行い、液状化特性の違いを明らかにした。また、初期構造異方性を考慮したひずみ空間多重せん断モデルを用いて実験結果を再現し、詳しい応答を調べた。その結果、以下の結論が得られた。

- ①堆積方向角を 0, 30, 150 度に変化させて波浪を载荷した際、30 度の堆積方向を持った地盤が比較的早く液状化に至り、0 度、150 度の堆積角度の地盤では過剰間隙水圧の蓄積速度が同程度であることを確認した。
- ②初期構造異方性を考慮したひずみ空間多重せん断モデルを用いることで上記の傾向を再現することが可能であることを示した。
- ③再現解析結果を詳しく分析し、30 度の堆積角度を持ったケースにおいて比較的早く応力が減少することを確認し、有効応力経路図を用いて 150 度の堆積角度をもつ地盤が平均有効応力 11kPa $\sim$ 8kPa にかけて比較的平均有効応力が減少しづらい傾向を確認した。
- ④様々な堆積方向を持つ地盤に波浪を载荷させる数値解析を行い、主に堆積角度が 45 度 $\sim$ 135 度以内で液状化が発生することを確認し、堆積角度によって過剰間隙水圧蓄積速度に違いがあることを示した。

今後の課題として、解析の異方性パラメータは感度が高く結果に影響しやすいため、実際の設計施工に使用す

る際の設定方法を検討する必要がある。また、実海域では構造物などからの反射波の影響から多方向の進行波や重複波が地盤に载荷されると考えられ、液状化挙動のさらなる検討が必要である。

謝辞: 本研究は一般社団法人 FLIP コンソーシアム初期構造異方性 WG の活動の一環として実施されたものである。

参考文献

- 1) 富裕一郎, 善功企, 陳光斉, 笠間清伸, 梁順普: 相対密度に着目した防波堤周辺地盤の波浪による液状化に関する水路模型実験, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.303-308, 2008.
- 2) 関口宏二, 大石博: 海底パイプラインの液状化対策工法に関する一考察, 土木学会論文集 No.380/ I -7, pp.467-473, 1987.
- 3) 宮本順司, 佐々真志, 徳山領一, 関口秀雄: 水中堆積物の重力流れと凝固・堆積過程の観察, 海岸工学論文集 No.51, pp.401-405, 2004.
- 4) 谷本喜一, 野田耕, 不動亮, 野口秀喜: 砂の力学的性質測定のための簡易原位置試験, 第 9 回土質工学研究発表会発表講演集, pp.29-32, 1974.
- 5) 松岡元, 平尾淳一, 福武毅芳: 異方性を考慮した砂の変形・強度論, 土と基礎, Vol.32, No.11, pp.31-36, 1984.
- 6) Sassa, S. and Sekiguchi, H.: Analysis of wave-induced liquefaction of sand beds, *Geotechnique*, Vol.51, No.2, pp.115-126, 2001.
- 7) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.35, No.3, pp.360-392, 2011.
- 8) Ueda, K. and Iai, S.: Constitutive modeling of fabric anisotropy in a strain space multiple mechanism model for granular materials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.43, No.3, pp.708-737, 2019.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

EFFECTS OF ANISOTROPY CAUSED BY SEDIMENTATION DIRECTION ON WAVE-INDUCED LIQUEFACTION OF SANDBEDS

Hikaru ITO, Junji MIYAMOTO and Kyohei UEDA

Horizontal ground with different deposition directions were prepared and wave loading tests were carried out in a channel in a centrifugal loading device. As a result, the ground with a 30° deposition angle to the wave direction led to liquefaction relatively quickly. Soils with 0° and 150° sedimentation directions showed similar excess pore pressure accumulation rates. Next, the experimental results were simulated by using a strain space multiple mechanism model accounting for initial structural anisotropy. In this study, the results of the analysis were investigated in detail, and the differences in liquefaction properties of the ground with different sedimentation directions were discussed.