

波による液状化とパイプ浮上・露出対策に関するドラム遠心実験

東洋建設（株）	正会員	宮本 順司
港湾空港技術研究所	正会員	佐々 真志
東洋建設（株）	正会員	鶴ヶ崎 和博
同上	正会員	○角田 絃子

1. はじめに

波による地盤の液状化により海底のパイプラインが浮き上がる事例が報告されている¹⁾。筆者らは、遠心模型実験により、波による残留水压の蓄積による液状化とパイプ浮上との関わりを定量的に調べてきた²⁾。今後の海洋進出に伴い海底地盤にパイプが埋設されることが増加すると予想され、パイプの浮上や露出への対策が重要となる。本研究の目的は、ドラム型遠心載荷装置の水路(図-1)を用いて、砂地盤-パイプ-礫層(対策工)系の波浪実験を行い、液状化によるパイプ浮上に対する礫層の効果を調べることである。

2. 実験概要

遠心力場 70G の水路内で波浪実験を行った。実験断面を図-2に示す。緩い砂層(Dr45%)の中にパイプを埋設し表層に対策工を施している。対策工は、地盤層厚 10cm(実地盤 7m)のうち、表層 1.5cm(実地盤 1m相当)を礫層で置換する工法である。無対策の場合の実験と対策工の実験を行い、後者はパイプ位置から 60° の範囲の地表を礫層で置換したケース(Case60)とパイプ位置から 30° の範囲を同様に対策したケース(Case30)の2種類を行い、効果のある対策範囲の検討につなげた。地盤材料には、ケイ砂7号($G_s=2.656$, $D_{50}=0.15\text{mm}$, $e_{\max}=1.158$, $e_{\min}=0.695$)を使用し、礫層(対策工)には平均粒径 3mm の細礫材を使用した。パイプ模型は既往実験²⁾と同様のものを使用しており比重は 1.35 である。間隙流体には粘性スケーリングの導入のために 70 倍の粘性流体を用いている³⁾。入力波浪は、周波数 10Hz(原位置周期 7 秒)の振幅が漸増する正弦波である。

3. 実験結果

礫層による対策効果として、1)液状化抵抗の増加と 2)パイプの浮上と露出の抑制の2点を見出した。

1) 礫層置換による液状化抵抗の増加 地盤表層の所定の範囲を礫層置換したことによる地盤浅部の間隙水压挙動の違いを無対策の場合と比較して図-3に示す。はじめに無対策のケース(青色)をみる。地表面波圧の増大により、地盤内の過剰間隙圧が上昇し液状化に至っている。ここで、地盤液状化とは、残留過剰間隙圧 u_e が地盤の初期有効土被圧レベル (σ_{v0}') まで上昇し、地盤の有効応力がゼロとなった状態を指す。これと比較しながら、次に地表面を礫層置換した Case60 の挙動(赤色)をみる。無対策の場合に比べて過剰間隙圧の上昇が抑えられており液状化が発生しにくくなっており液状化抵抗が増加していることがわかる。このような液状化抵抗の増加を図-4に定量的に示す。同図の横軸は地盤にとっての波の厳しさを表す繰返し応力比 χ_0 である。縦軸は、残留過剰間隙水压比 (u_e/σ_{v0}') であり、この値が 1.0 の時が液状化発生を表す。液状化発生時

キーワード 波浪, 液状化, パイプライン, 遠心模型実験

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 TEL0798-43-5903

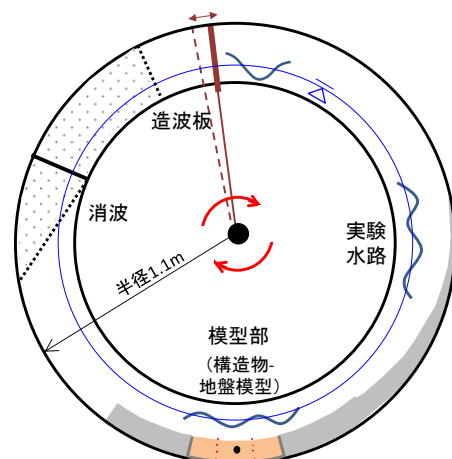


図-1 ドラム遠心模型実験の水路

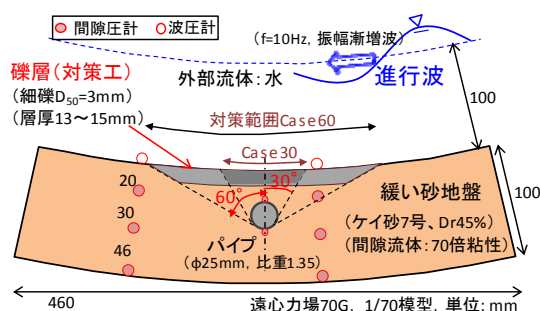


図-2 実験模型の断面

$(u_e/\sigma_{v0}'=1)$ の χ_0 の値がその地盤の液状化抵抗を表す. 同図より, 礫層で 60° の範囲を置換する Case60 は, 液状化発生時の χ_0 が 0.05 増加

しており, 本実験条件では, 実海域の波高が 1m 増加することに対応する. 対策範囲を 30° の置換にとどめた Case30 では, 無対策の液状化抵抗と同程度であり効果がほとんどないことがわかる.

2) パイプ浮上と露出の抑制効果 礫層置換した 2 ケースの液状化後のパイプや礫層の状態を図-5 に示す. 礫層で 60° の範囲を置換した Case60 は液状化によりパイプは浮上するが, 地表に達する前にパイプ上端が礫層に抑えられ露出を免れる (図(a)-2). 一方, 礫層による対策範囲を 30° にとどめた Case30 では, 液状化後, パイプは上昇するとともに礫層は徐々に沈み込み, 上昇を抑えることができず露出した (図(b)-2). Case30 のパイプの上昇軌道を対策範囲に重ねて図-6 に示してみると, 対策範囲 30° の場合, 対策工の端部をパイプが通過するためパイプの動きを抑えきれないことが良くわかる. 液状化に伴うパイプの上昇過程を図-7 に示す. 同図には参考として Case60 の一連の地表面波圧変動を示している. 無対策の場合と Case30 は液状化発生とともにパイプが上昇し始め, 地盤全層が液状化すると, パイプは流動化した地盤とともに大きく揺れながら上昇を続け, やがて露出する. Case60 は全層が液状化に至るものの上昇速度が大幅に抑制されていることがわかる.

4. まとめ

遠心力場で, 液状化に伴うパイプの浮上・露出対策として礫層の効果を調べた. 礫層で 60° の範囲を置換すると液状化抵抗が増加すること, パイプの上昇を効果的に抑制することを確認した. 一方, 対策範囲を 30° に留めると無対策の場合と同様の過程で地表に露出することが得られた.

参考文献: 1) Damgaard, J.S., Summer, B.M., Teh, T.C., Palmer, A.C., Foray, P. and Osorio, D., Guidelines for pipeline on-bottom stability on liquefied noncohesive seabeds, J. Water, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 132-4, pp. 300-309, 2006. 2) 宮本ら, 波による地盤の液状化とパイプラインの浮上, 土木学会論文集 B2, 73-2, I_1135-1140, 2017. 3) Sassa, S. & Sekiguchi, H., Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, Géotechnique, 49-5, 621-638, 1999.

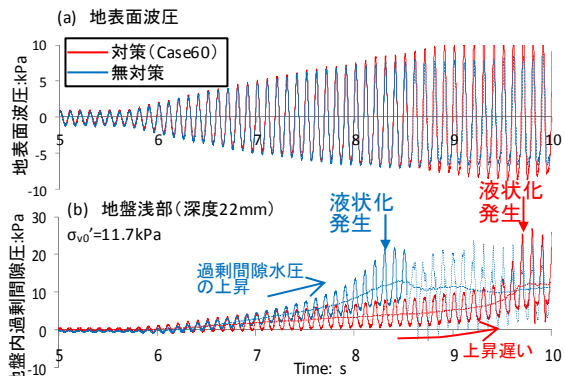


図-3 礫層置換の場合と無対策の場合との地盤浅部の間隙水圧変動の比較

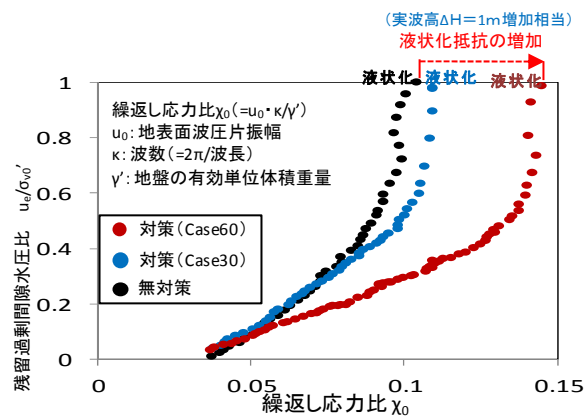


図-4 礫層置換による地盤の液状化抵抗増加

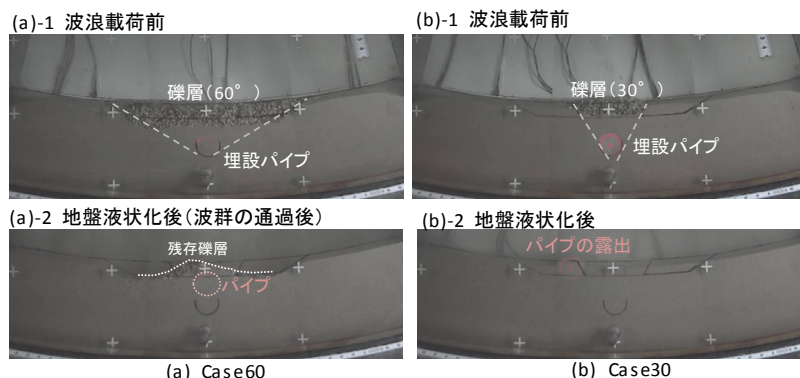


図-5 礫層置換によるパイプ浮上・露出抑制の効果がある場合(a)と無い場合(b)の地盤変状

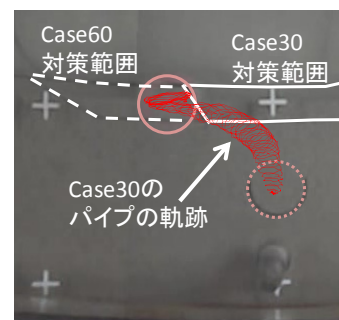


図-6 パイプの軌跡と対策範囲の関係

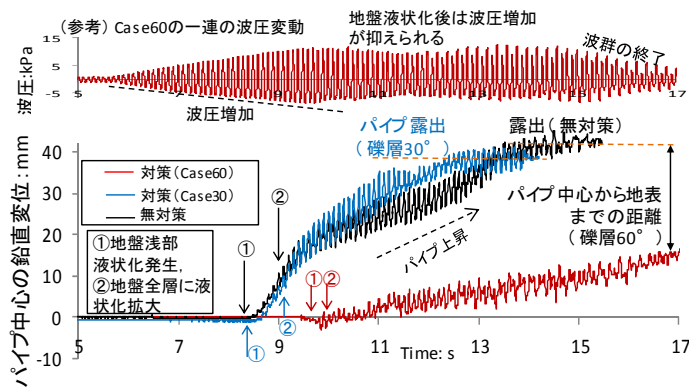


図-7 パイプの浮上過程: 地盤液状化との関わりおよび礫層置換の効果