

三次元静的流動解析法を用いた 側方流動変位量の評価に関する検討

加藤 一紀¹・米川 太²・樋口 俊一³

¹正会員 株式会社大林組 技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640）

E-mail: kato.ikki@obayashi.co.jp

²非会員 出光興産株式会社 生産技術センター（〒261-7134 千葉県美浜区中瀬 2-6-1WBG イースト 34F）

E-mail: futoshi.yonekawa.3650@idemitsu.com

³正会員 株式会社大林組 技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640）

E-mail: higuchi.shunichi@obayashi.co.jp (Corresponding Author)

臨海部に多数建設されている産業基盤施設においては、地震時の液状化に伴う側方流動被害が懸念されている。被害軽減のための事前検討では、対策工法の効果について数値解析等が実施される。しかしながら、対象地盤のモデル化や入力地震動の設定、結果の妥当性の確認等、対策工法の有効性を判断するまでには時間を要する。本研究では、三次元静的流動解析法による護岸背後地盤の変位量の評価、ならびに液状化地盤の側方流動対策工法として抑止杭工法を用いた場合の、地盤変位の抑制効果に関する簡易の評価手法を提案した。

Key Words: FEM, liquefaction, ground flow, seismic retrofit

1. はじめに

東京湾臨海部をはじめとする大都市圏の埋立地盤には数多くの産業基盤施設が建設されている。これらの埋立地盤には工学的に液状化現象が認識されるようになった1964年新潟地震以前に埋め立てられたものもあり、液状化対策が施工されていないと考えられる。

1995年兵庫県南部地震では、護岸背後地盤が液状化に起因する側方流動によって、タンクや配管、物流施設等への被害、およびこれに伴う経済的な被害が発生した¹⁾。同様の被害は三大都市圏の臨海部においても懸念されている。

臨海部の産業基盤施設を有する事業者が、対策を検討する場合、数値解析手法を用いた各種対策工法の定量的評価が行われる。対策工法としては地盤改良の他に、護岸背後に護岸線と並行に鋼矢板で連続的に壁を構築する方法、杭を一定の間隔で打設する方法²⁾（以降、抑止杭工法と呼ぶ）などが提案されている。

しかしながら、これらの対策工法が許容できるリスク（変位等）と比較して、有効であることを確認するためには、事前検討において詳細な数値解析の実施とそのための費用・時間を要する。詳細検討あるいは対策の実施

判断を迅速かつ容易にするためには、より簡易で廉価な評価手法が必要である。

本研究では、盛土地盤等の液状化変形等の評価に実績のある静的流動解析法の、本工法の地盤変位量抑止効果確認への適用を念頭に、

1) 遠心模型実験のシミュレーションによる、抑止杭工法への再現性の検証

2) 実地盤に対する流動量評価、および抑止杭を用いた場合の流動抑制効果の簡易評価法の提案

を試みた。

本検討は解析コード ABAQUS による有限変形解析である。

2. 実験の概要

本研究で比較対象とした遠心実験について概要を示す。図-1に、50Gの遠心力載荷場での実験模型（縮尺 N=1/50）の概要（抑止杭工法断面の例）を、実物換算値と模型寸法を併記して示す。地盤模型は剛土槽に作製されている。地表面には変位計測用ターゲットが一定間隔で設置されており、実験前後の水平、鉛直変位が計測されている。

抑止杭工法は、護岸背後地盤に杭を千鳥状に打設して地盤の流動変位を抑制するものである（写真-1）。これは、液状化した砂が杭間をすり抜けるときに杭との相互作用により力を受け、移動が抑止される効果を利用している。

遠心载荷実験では加速度振幅 300cm/s^2 、周波数 1.2Hz の正弦波で 12 秒間加振し、その後、流動を継続させるため加速度振幅 100cm/s^2 で約 25 秒間加振した。振動台加速度を図-2 に示す。

図-3 に代表的な模型地盤の地表面変位および既設護岸と側方流動抑止杭の変形状況を示す。既設護岸は無対策ケース、抑止杭ケースとも鋼矢板下部を中心とする反時計回りの回転変位を生じている。しかしながらその変形量は抑止杭ケースの方が小さく、特に抑止杭設置位置よりも陸側地盤の変形が抑止されている。

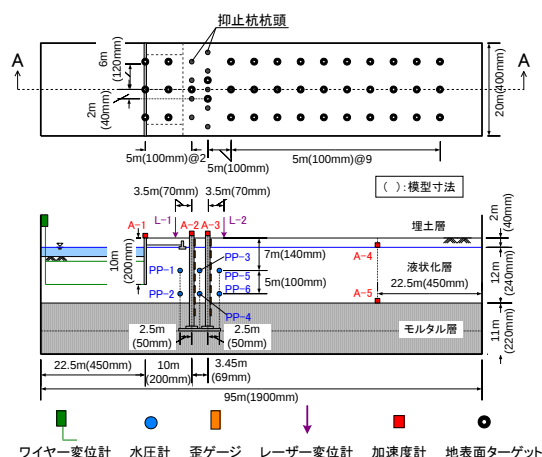


図-1 遠心実験断面²⁾

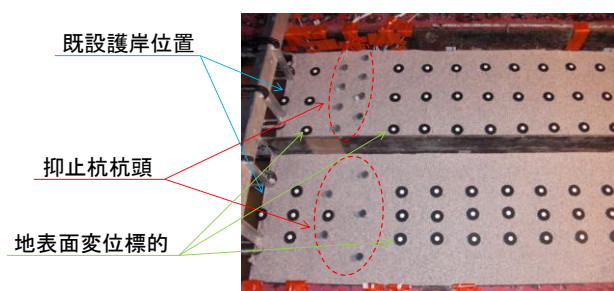


写真-1 抑止杭の設置状況²⁾

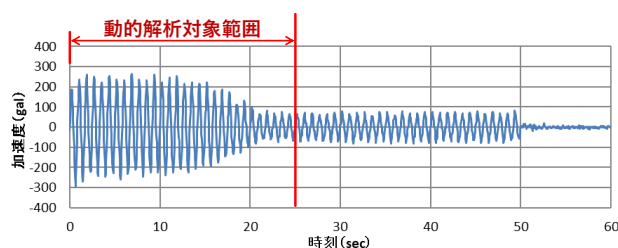
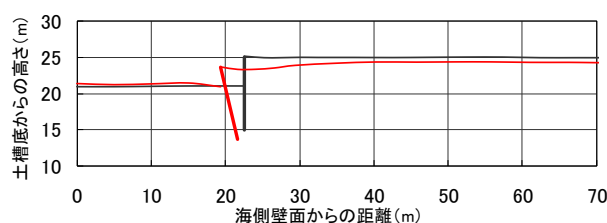
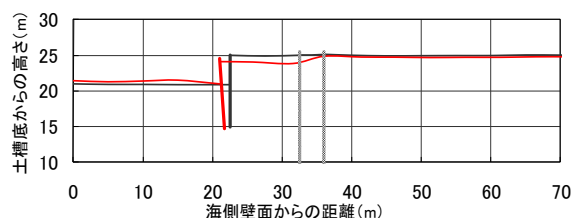


図-2 入力加速度²⁾に加振



(a) 無対策



(b) 抑止杭

図-3 護岸背後地盤の変形図²⁾

3. 解析方法

(1) 解析モデル

解析モデルは、遠心模型実験断面について、寸法を実物換算して作製した。図-4 に解析モデルを示す。

抑止杭工法を杭間隔 $4D$ 、すなわち杭径の 4 倍の間隔で護岸背後 10m 位置に施工した場合を示している。解析モデルは護岸側・陸側杭のそれぞれ半分と杭間地盤を取り出して、これが奥行 (Y) 方向に連続すると仮定した (図-4(c))。杭は模型杭相当の曲げ剛性を有するが、護岸は単純化のため剛体とした。

図-5 にメッシュ分割図を示す。奥行 (Y) 方向は 6 要素 (要素幅 0.5m) であり、 6 面体要素数は約 $20,000$ 要素で構成される。有効応力の観点からは地盤の応力状態の評価には影響がないため、海水部分はモデル化しなかった。

(2) 地盤モデル

解析は 2 段階で実施した。STEP1 は初期応力を求めるステップ、STEP2 が剛性低減により液状化時の変形を求めるステップである。STEP1 の地盤条件を表-1 に示す。

地盤剛性は深度方向 2m ピッチに各層の中間深度で設定した。STEP2 で過剰間隙水圧の上昇を反映し、液状化層における地盤剛性を低減する。図-6 に地盤剛性の設定方法の概要を示す。剛性低減率 n は護岸変位が無対策ケース (遠心実験) と一致するように試行錯誤で決定した。本検討では剛性低減率 n を初期剛性 G_0 の $1/2,000$ とすることで、無対策時の護岸変位を再現することが出来た。これは、既往の研究結果³⁾とも整合するものである。

一方、上記段階解析においては、地盤の体積弾性係数

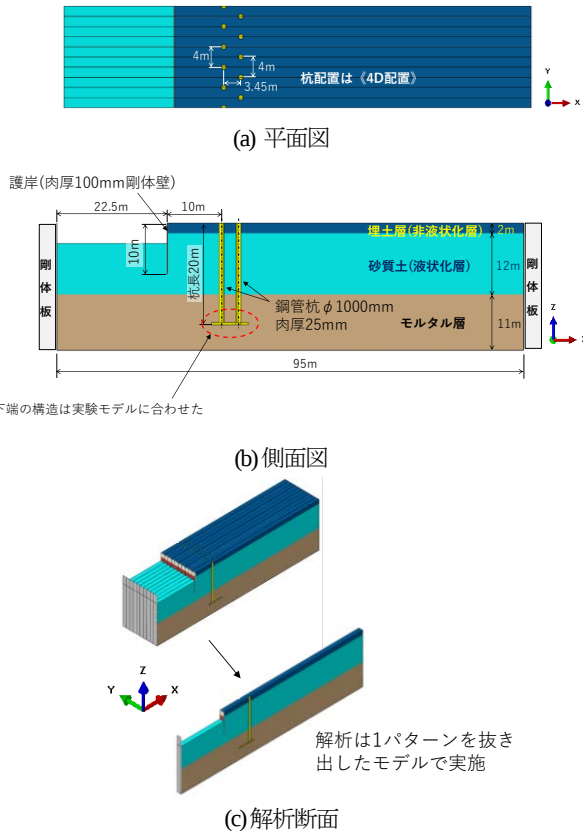


図-4 解析モデルの概要

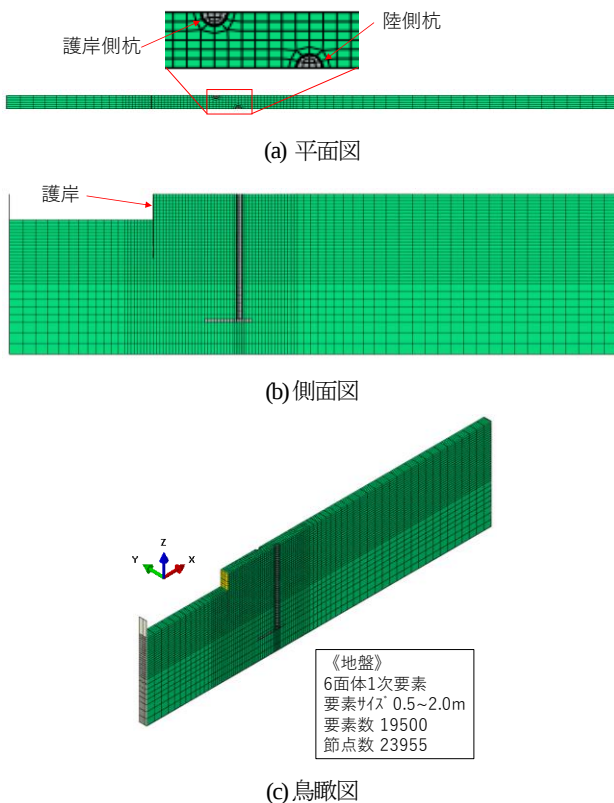


図-5 メッシュ分割図

表-1 地盤物性

地層構成			地盤物性										
土層区分	層厚	深度	単位体積重量 γ ₁ (g/cm^3)	ポアソン比 ν ₁	有効土圧 σ ₁ (g/cm^2)	層中心平均有効土圧 σ ₂ (g/cm^2)	初期せん断弾性係数 G ₁ (g/cm^2)	初期伸び弾性係数 E ₁ (g/cm^2)	体積弾性係数 K ₁ (g/cm^2)	せん断強度 τ ₁ (g/cm^2)			
	(m)	(m)											
埋土層	1地下水位	2.00	0.00	~	2.00	12.70	0.4500	12.70	8.47	20000	58000	193000	7.10
		2.00	2.00	~	4.00	0.4934	34.20	22.80	23146	69131	1738000	19.13	
		2.00	4.00	~	6.00	0.4918	51.80	34.53	28486	84994	1738000	28.98	
		2.00	6.00	~	8.00	0.4906	69.40	46.27	32972	98294	1738000	38.82	
砂質土層		0.00	8.00	~	8.00	8.80	0.4900	78.20	52.13	35000	104300	1738000	43.75
		2.00	8.00	~	10.00	0.4895	87.00	58.00	36917	109972	1738000	48.67	
		2.00	10.00	~	12.00	0.4884	104.60	69.73	40479	120501	1738000	58.51	
		2.00	12.00	~	14.00	0.4875	122.20	81.47	43752	130164	1738000	68.36	

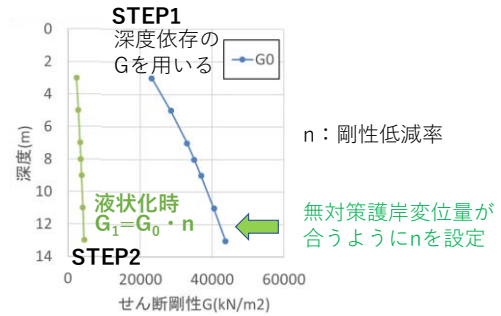


図-6 液状化層におけるせん断剛性

一定を仮定したが、このときポアソン比は初期剛性において $\nu=0.49$ とした。

抑止杭工法ケースにおける剛性低下率は、無対策ケースで設定した値を用いた。

表層地盤（非液状化層）は非線形性を考慮し、せん断降伏を仮定した HD モデルとした。

4. 自重法

(1) 地盤の水平変位量の比較

図-7(a), (b)に地盤の水平変位分布と変形図を示す。

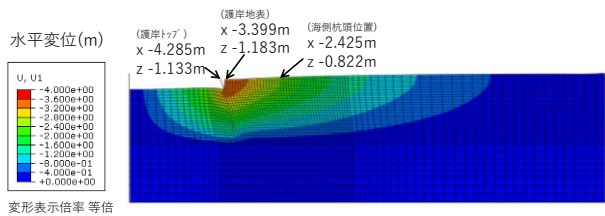
いずれのケースも側方開放面である護岸付近で水平変位が大きく、鉛直方向については地表面付近の水平変位が大きい。抑止杭のケースでは、杭背後地盤において水平変位はほとんど生じていない。

無対策と比較して、流動直角方向の杭（図-5(a)）が、剛性低下した状態であっても地盤の護岸方向への流動に対して抵抗となったことが考えられる。

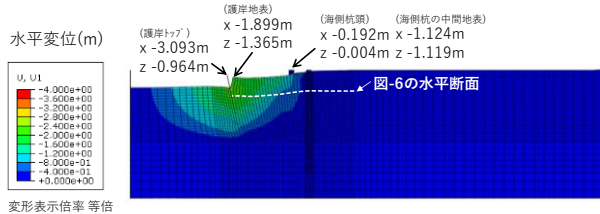
図-8 に護岸背後地表面の水平変位分布を遠心模型実験結果と比較して示す。ここで自重法による解析値の地盤変位は STEP2 と STEP1 の差分としている。

自重法による解析結果は遠心実験結果と同様、抑止杭による地盤の水平変位量の抑止効果を再現している。

無対策の場合において、護岸からの離間距離が 20m 以上の地点で水平変位量が実験値を下回っている。これは、実験では液状化後も加振が継続しており、護岸から離れた地点においても、護岸方向の加速度によって変位が増大したためと考えられる。



(a) 無対策



(b) 4D 抑止杭工法

図-7 水平変位分布と変形図

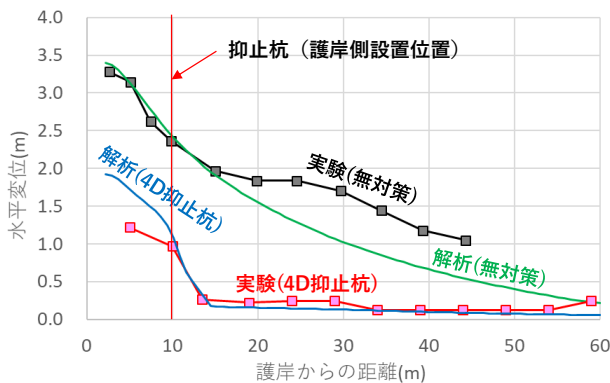


図-8 地表面水平変位分布の比較

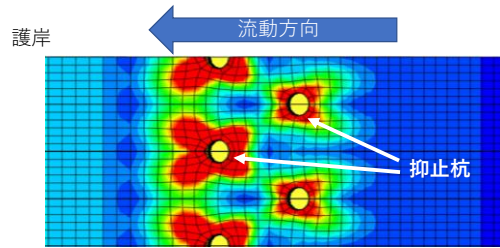
一方、抑止杭の場合では杭よりも陸側の地盤において変位量は実験結果と良好な一致を示している。

(2) せん断ひずみ分布

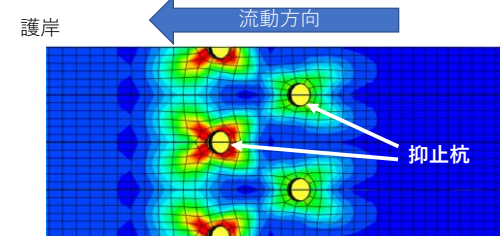
図-9(a), (b)に深度 4m における抑止杭近傍地盤のせん断ひずみ分布を解析断面を流動直角方向につなげて示す。ここでせん断ひずみは、3 方向成分の二乗和平方根を表す。図-9(a)はカラーマップの最大値を 20%，図-9(b)は 40%とした場合を示している。

地盤の水平変位が大きい護岸側杭の近傍で約 40%のせん断ひずみが生じている。また図-9(a)より、せん断ひずみが 10%を超える領域（図中緑色）は、流動直角方向に連続している。すなわち、地盤剛性が常時の 1/2,000 に低減し、杭周辺に側方流動状態が発生する場合には、杭周辺地盤に大きなせん断ひずみが発生することがわかった。

これに対して、遠心模型実験による考察²⁾によれば、抑止杭工法のメカニズムとして、杭の流下方向（海側）では流動に伴う地盤のせん断ひずみの増大と体積膨張に



(a) カラーマップ 0~20%



(b) カラーマップ 0~40%

図-9 深度 4m におけるせん断ひずみ分布図

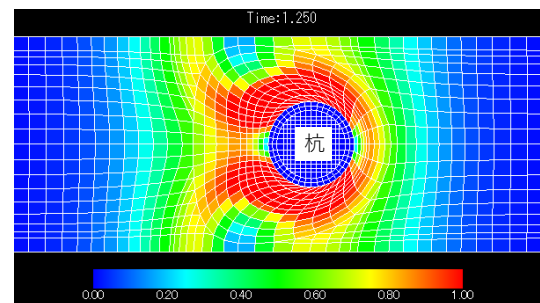


図-10 FLIP による液状化地盤中の杭に繰り返し荷重を作用させた場合のせん断ひずみ分布図

より過剰間隙水圧が低下し、剛性が回復することにより流動変位の抑制効果が発揮されると推定している。

本解析結果から、杭の海側地盤だけでなく、杭周辺地盤においてもせん断ひずみの増加による剛性回復が期待できる。すなわち剛性回復領域が広く存在している可能性が示唆される。

このメカニズムについて、筆者らは別途有効応力プログラム FLIP を用いて杭とその周辺の液状化地盤に相対変位が生じた場合のせん断ひずみ分布を分析した。

既往の検討結果⁴⁾を参考とし、遠心実験で用いた土質試料の液状化強度から地盤パラメーターを設定し、過剰間隙水圧比 0.995 の状態において、杭に繰返し荷重を作用させた。

解析結果の一例として、図-10 にせん断ひずみ分布（境界と杭との相対変位が杭径の 0.85 倍変位した状態）を示す。相対変位が生じることによる杭周辺地盤のせん断ひずみ分布は、図-9 と同様であり、FLIP による解析結果と、ABAQUS による本検討結果は整合している。

5. 簡易に液状化状態を考慮した動的解析

(1) 地盤モデル

動的作用による護岸から離れた地盤の変位量の再現性を検討するために、簡易に液状化を考慮した動的解析を実施した。

地盤条件は表-1 と同様である。本検討での動的解析では、液状化層において過剰間隙水圧が上昇した状態、すなわち地盤剛性、およびせん断強度を過剰間隙水圧比 0.9 として低減した状態を初期状態として、図-2 で示した加速度を入力した。地盤の構成則は移動硬化モデルである。

動的解析においては浮力の影響を考慮するため、深度方向に鉛直下向きの重力加速度を低減することで有効応力状態を再現した。

(2) 地盤の水平変位量の比較

動的解析による水平分布を、護岸位置の変位で正規化して図-11 に示す。同図には前章の自重法による静的解

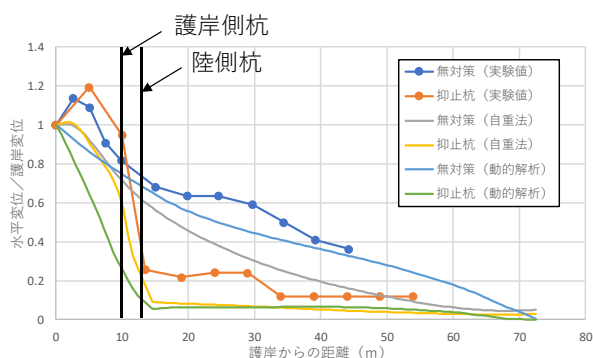


図-11 護岸変位で正規化した地表面水平変位分布の比較

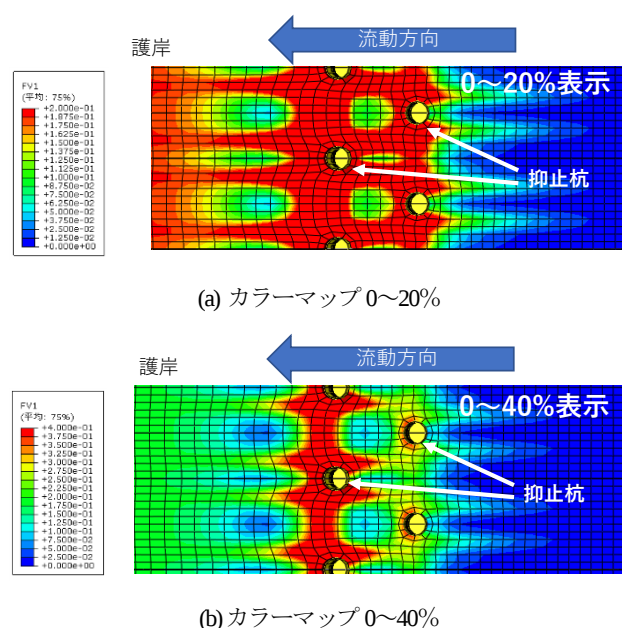


図-12 深度 4m におけるせん断ひずみ分布図

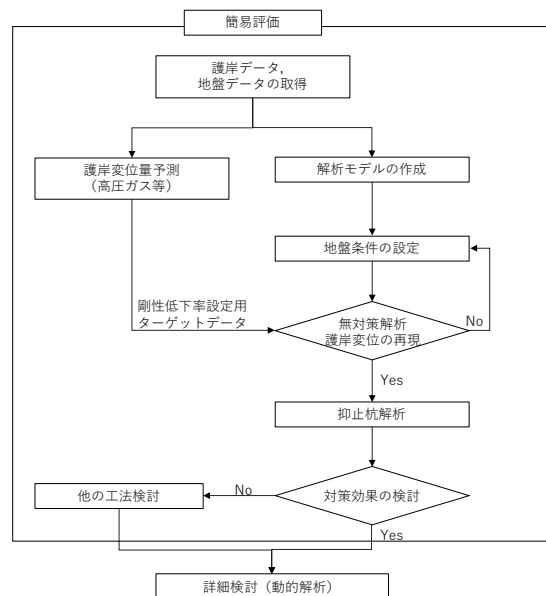


図-13 自重法による流動量の評価フロー

析、および遠心実験の水平変位分布も併記した。

無対策の場合に着目すると、自重解析では護岸から遠い地点において、遠心実験と比較して地盤変位が小さく評価されているが、液状化状態を簡易に評価した動的解析では、護岸から遠い地盤においても変位が出ており、遠心実験の変位分布を再現している。このことは、自重解析と遠心実験結果との差を液状化後の加振に起因するとした先述の考えを支持する結果と考えられる。

抑止杭を施工した場合の変位量に着目すると、静的解析と同様に動的解析においても遠心実験と同様に、杭設置位置よりも陸側の地盤変位を抑止していることがわかる。

(3) せん断ひずみ分布

図-12 に深度 4m におけるせん断ひずみ分布を静的解析の場合と同様にして示す。

動的解析においても杭周辺の地盤でひずみが生じており、せん断ひずみによる地盤の剛性回復によって抑止杭より陸側地盤の流動を抑止しうること示している。

ただし実地盤においては、地盤に入力される加速度によって土骨格が時々刻々と変化することが考えられるため、せん断変形に伴う（ダイレイタンス挙動による）剛性回復については、有効応力解析などによって詳細に検討する必要がある。

6. 簡易評価手法

自重法により、護岸背後の液状化地盤の流動変位量の評価および対策工法として抑止杭を用いた場合の場合の

変位量の抑制効果を評価できることが示された。

実地盤を対象とした検討においては図-13 に示す手順での評価が考えられる。

自重法による静的解析における剛性低下率は、護岸変位が基準となる。

護岸変位の設定については、既往の護岸変位の予測手法を用いる。これにより、無対策の場合の背後地盤の変位量、および抑止杭工法を用いた場合の変位量の低減効果を評価することが可能である。

護岸変位の予測手法としては例えば高圧ガス指針⁵⁾で採用されている井合らの方法⁶⁾が適用できる。

7. まとめ

三次元静的流動解析法による検討結果より以下のことが示された。

- ・自重法によって既往の遠心模型実験結果の変位分布を再現することができた
- ・抑止杭工法の流動抑制メカニズムである剛性回復領域は、せん断ひずみ分布図より実験で考えられていた領域よりも広く分布している可能性が示された。
- ・自重法による実地盤での対策法検討に当たって簡易評価手法を提案した。

謝辞：本論文の作成に当たり、濱田政則早稲田大学名誉教授のご指導をいただきました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) Masanori Hamada and Kazue Wakamatsu: Liquefaction, Ground Deformation and their Caused Damage to Structures, The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake-Investigation into Damage to Civil Engineering structures-, Japan Society of Civil Engineers, pp.45-91, 1996.
- 2) 濱田政則, 樋口俊一: 液状化地盤の流動抑制工法に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1, Vol.66, No.1, pp.84-94, 2010.
- 3) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.71-89, 1999.12
- 4) 第2期 FLIP 研究会杭基礎作業部会: 杭基礎のモデル化方法の検討 平成14年度成果報告書, 平成15年.
- 5) 高圧ガス保安協会: 高圧ガス設備等耐震設計指針, 2000.
- 6) 井合進, 一井康二, 森田年一, 佐藤幸博: 既往の地震事例に見られる液状化時の護岸変形量について, 第2回阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集, vol.2, pp.259-264, 1997

(Received XX xx, 2020)

(Accepted XX xx, 2020)

STUDY ON EVALUATION OF LATERAL GROUND FLOW INDUCED BY LIQUEFACTION USING 3D STATIC FLOW ANALYSIS METHOD

Ikki KATO, Hutoshi YONEKAWA, Shunichi HIGUCHI

In many industrial infrastructure facilities constructed in coastal areas of Japan along the Pacific ocean, the damage generated by major liquefaction, induced by the expected earthquake, and consequent lateral ground flow is a concern. In the preliminary study for reducing the damage, numerical analysis will be carried out on the effect of the applicable countermeasure methods; the sheet pile wall method, the ground compaction method and the deterrent pile method, to the site. However, before the effectiveness of the countermeasures is decided, it takes time to consider the validity of, such as, modeling the target ground, setting the input seismic ground motion, and the results.

In this study, an evaluation method using a three-dimensional static flow analysis was proposed to help make decision the effectiveness of the countermeasures against lateral ground flow. By this method, it is possible to evaluate the amount of displacement of the ground behind the quaywalls due to liquefaction and the effectiveness of suppressing the ground displacement when the deterrent pile method is adopted.