

山留め壁の影響を考慮した液状化地盤における杭基礎の地震応答解析

渡辺 和博 西山 高士
佐原 守 山本 彰

Seismic Response Analysis of Pile Foundation during Soil Liquefaction Considering Influence of Earth Retaining Walls

Kazuhiro Watanabe Takashi Nishiyama
Mamoru Sahara Akira Yamamoto

Abstract

This paper discusses the results of a numerical study about influence of earth retaining walls on the soil liquefaction behavior of the ground and the seismic response of a pile foundation. First, a numerical calculation that includes the ground, pile foundations and earth retaining walls is modeled using a two-dimensional effective stress finite element method. The model is verified by comparing the calculation results with centrifuge model test results. Next, this paper shows that utilizing an earth retaining wall can improve the safety of a building during an earth quake based on the results of a numerical study, which focus on the earth retaining walls or degree of connection between the walls and foundation.

概要

本研究では、山留め壁が地震時の地盤の液状化挙動と杭基礎の地震応答に与える影響を解析的に検討した。始めに、山留め壁や杭を含む2次元有効応力解析のモデル化手法について検討し、遠心模型実験結果と解析結果の比較を行ってその妥当性を確認した。続いて、山留め壁の有無および山留め壁と基礎の結合度に着目した解析的検討を行い、従来は設計上無視されてきた山留め壁を有効に活用することで、地震に対する安全性の向上が期待できることを示した。

1. はじめに

地震により建物周辺の地盤に想定を超える液状化が生じると、建物にも被害が及ぶ恐れが生じる。特に、建物の基礎が損傷を受けた場合、事後の復旧は容易ではない。地盤の液状化予測と、液状化による建物への影響評価は、建物の安全性、地震を受けた後の居住性や事業継続性などの要求を満たすための、重要な技術であるといえる。

地下掘削工事に伴って構築される山留め壁は竣工後も地中に残置されており、壁に囲まれた地盤の液状化挙動や、そこに建つ建物の地震時応答にも影響を及ぼしていると考えられる¹⁾。しかし、仮設構造物である山留め壁の存在は設計的には無視されるため、液状化する地盤において山留め壁が建物の応答に与える影響は十分に検討されていない。

本研究は、山留め壁が地盤の液状化挙動および杭基礎の地震応答に与える影響について、有限要素法による有効応力解析を用いて検討したものである。

2. 有効応力解析モデル

筆者らはまず、山留め壁や杭を含む液状化地盤の2次元有限要素モデルを作成し、解析結果を既往の遠心模型実験^{2), 3)}の結果と比較することでその妥当性を検証した。

2.1 模型実験概要

模型実験の概要を Fig. 1 に示す。実験は遠心重力 40G、縮尺 1/40 の遠心模型実験で、山留め壁や杭の存在が地盤の液状化挙動に与える影響を壁の間隔を変えて調べたものである。なお本論文では、実験に関連する数値は全て 1G 換算値にて示す。

実験は 2 回に分けて実施され、実験 1 は地盤に山留め壁のみを設置した条件、実験 2 は山留め壁の内側に杭を設置した条件となっている。

実験では Fig. 1 に示すように、山留め壁の外側 (A 点)、24m 角の山留め壁に囲われた中央部 (B 点)、12m 角の山留め壁に囲われた中央部 (C 点) の 3 か所で、間隙水圧と地表面加速度を計測している。また、実験 2 ではこれに加えて杭頭部の加速度と杭体の歪み (6 深度) も計測している。

土槽はアルミニウム製の剛土槽を用いている。砂地盤は厚さ 10m、地下水位は G.L. -1m であり、山留め壁は壁厚 500mm 程度のソイルセメント壁を想定している。山留め壁の先端は G.L. -13m で、一軸圧縮強度 600kN/m² 程度のソイルセメント製の硬質地盤に根入れしている。砂の室内土質試験結果を Table 1 に示す。砂は珪砂 7 号で、相対密度は 50% 程度である。

実験 2 の模型杭は、杭径 1m の場所打ちコンクリート杭を想定している。上部構造は中低層の RC 建物を想定

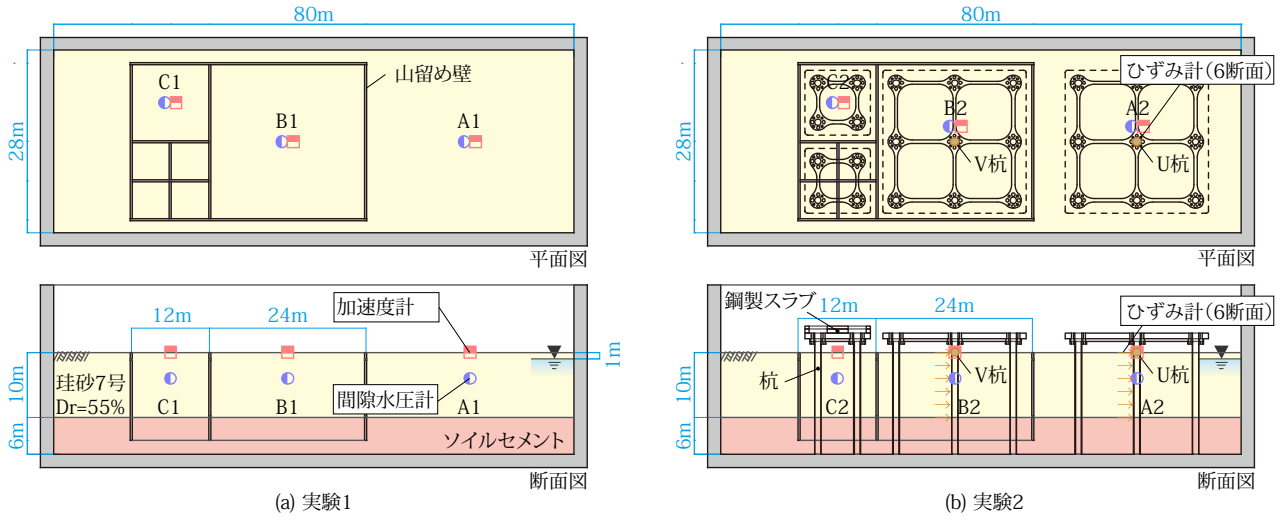


Fig. 1 遠心模型実験 (寸法は1G換算値)
Configuration of Centrifuge Model Test

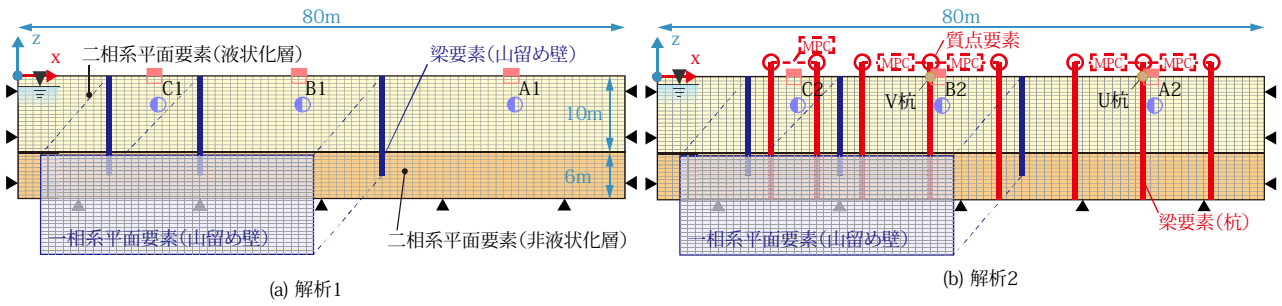


Fig. 2 解析モデル

Finite Element Model for Analysis

Table 1 砂の室内土質試験結果
Material Constant of Sand

土粒子密度	2.652 g/cm ³	液状化強さ (R _{L20})	0.2
粘着力	6.9 kN/m ²	初期せん断剛性	31.8 MN/m ²
内部摩擦角	32.1 deg	(σ' ₀ = 40 kPa)	

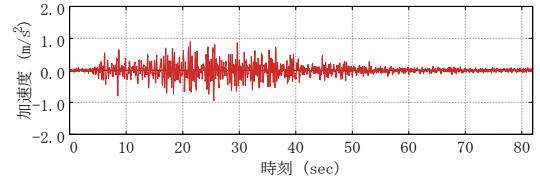


Fig. 3 入力地震波
Input Ground Acceleration

し、Fig. 1 中の鋼製スラブにてその質量を考慮している。4本杭模型、9本杭模型とも杭1本あたりの荷重はおよそ3000kNである。杭頭部は剛な鋼製スラブに固定されている。鋼製スラブと山留め壁は離間しており、加振中も接触しない。

入力地震波をFig. 3に示す。入力地震波は、国土交通省告示⁴⁾で定める「稀に発生する地震動」に相当する人工地震波を用いている。

実験の結果は、次に説明する解析の結果と合わせて2.3 実験結果と解析結果の比較にて示す。

2.2 解析モデル

解析は、Biotの多次元圧密式を基礎とし、骨格と間隙水の連成解析が可能な、動的有効応力解析プログラムO-EFFECT⁵⁾を用いた2次元有効応力解析とした。Fig. 2に解析モデルを示す。

2.2.1 地盤物性 液状化対象層の地盤には、松岡の構成則⁶⁾に繰り返し載荷の影響を考慮する変数を導入した材料モデルを用いた。解析地盤の液状化強さは、マグニチュード8相当の地震と等価な繰り返し回数⁷⁾である20回繰り返し強度 (R_{L20}) がTable 1で示した実験値と一致するように設定した。両振幅軸ひずみ (DA) 5%と過剰間隙水圧比 (u) 95%の液状化強度曲線をFig. 4に示す。

非液状化層には弾性体モデルを用い、実験と同じソイルセメントに相当する物性値を与えた。

2.2.2 有限要素メッシュの構成 解析領域はFig. 2に示すように、遠心模型実験の模型寸法と同じ、幅80m、深さ16mの領域をモデル化した。

地盤には平面ひずみ要素を用いた。山留め壁は面内要素と面外要素に分けてモデル化し、面外壁には梁要素を、面内壁には平面ひずみ要素を用いた。面内壁の節点は地盤の節点とは独立して設け、面外壁とのみ節点を共有さ

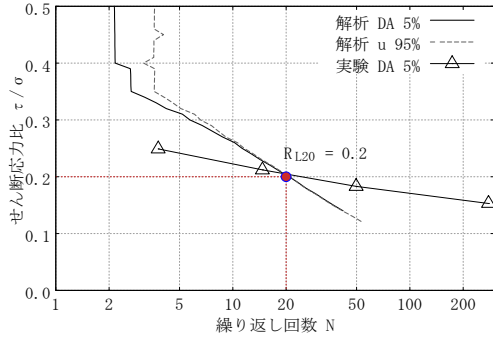


Fig. 4 液状化強度曲線
Liquefaction Strength Curve

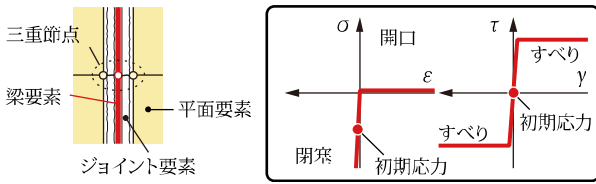


Fig. 5 ジョイント要素

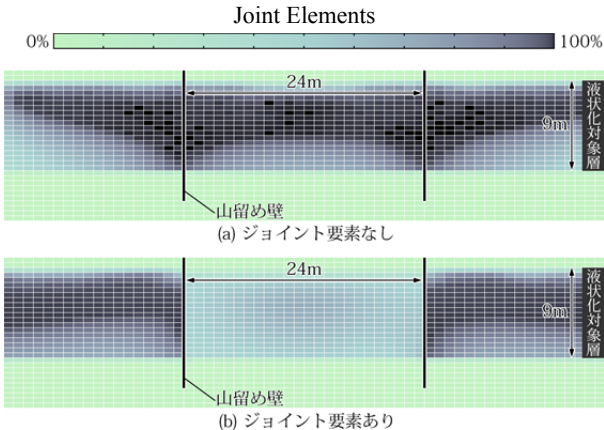


Fig. 6 ジョイント要素の影響 (過剰間隙水圧比 $\Delta p/\sigma'_{v0}$)
Influence of Existence of Joint Elements

せた。壁は不透水とした。杭は梁要素とし、杭頭の回転拘束条件は固定、同じ基礎スラブで連結された杭は杭頭鉛直水平変位が等しくなるように節点変位を拘束した。鋼製スラブに相当する質量は杭頭に質点要素として与えた。杭および山留め壁はすべて弾性とした。

入力地震波は、実験に用いた国交省告示波とし、モデル底面に加速度入力として与えた。

2.2.3 地盤と地中構造物の境界面のモデル化 有限要素法による液状化の数値シミュレーションでは、地盤が硬い構造物と接触している部分で、地盤要素に大きなせん断応力や引張り応力が生じやすく、接触部分のモデル化の違いが解析結果に影響を与えると考えられる。

本検討では、地盤と山留め壁、地盤と杭および地盤と土槽の境界に、接触面におけるすべりと剥離を考慮したジョイント要素を用いた。要素の概念図を Fig. 5 に示す。

Fig. 6 には、壁と地盤のすべりと剥離を考慮しなかった場合と、考慮した場合の2次元有効応力解析結果の一例として、矩形の壁に囲われた地盤の最大過剰間隙水圧比のコンター図を示した。すべりと剥離を考慮しない解

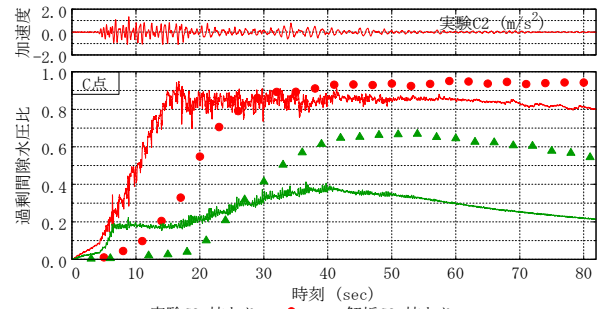
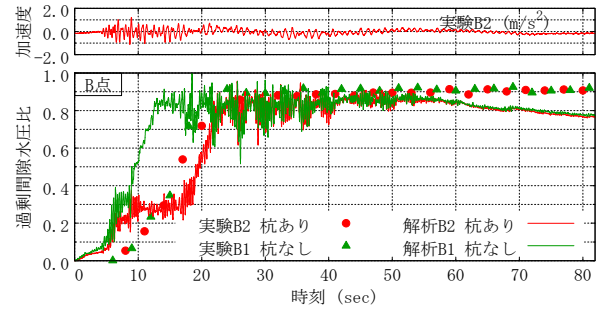
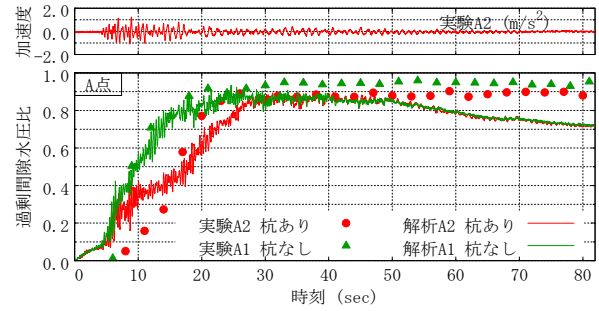


Fig. 7 過剰間隙水圧比の時刻歴

Time History of Excess Pore Water Pressure Ratio

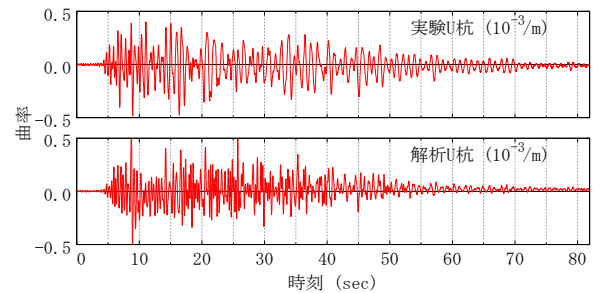


Fig. 8 杭頭の曲率時刻歴

Time History of Curvature

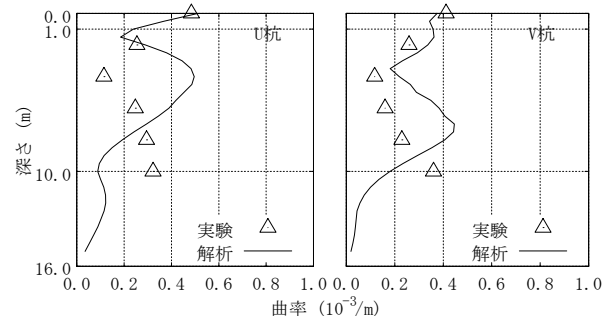


Fig. 9 杭の最大曲率分布

析モデルでは、壁の近傍で液状化が発生し、壁に囲われた内側の地盤の液状化が進行する結果となる。これは、壁と接触する要素に実際より大きなせん断応力、引張り応力が作用した結果と考えられる。

以上より、地中構造物を含む有効応力解析では、地盤と構造物の境界面に生じるすべりと剥離の影響が大きいことが確認できる。

2.3 実験結果と解析結果の比較

2.3.1 過剰間隙水圧の発生状況 Fig. 7に、実験および解析で得られた深さ4m（地下水面下3m）の点A、B、Cにおける過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。各図には参考値として、各点の地表面加速度の時刻歴も示した。Fig. 7の実験結果から、過剰間隙水圧の上昇スピードに差があるものの、壁間隔が最も狭く杭の無いC1を除いて、いずれのケースもほぼ液状化している様子がわかる。次に、各ケースについて実験結果と解析結果を比較する。

Fig. 7上段に示すA点は山留め壁外の自由地盤にある点である。実験値は杭がないA1と、杭があるA2のどちらも液状化に達したが、A2の方が水圧の上昇が緩やかであった。これは杭の剛性の影響で、地盤のせん断変形が僅かに抑制されたためと考えられ、解析値においても同様の傾向が見られた。過剰間隙水圧比がほぼ1に達する時刻も、実験値と解析値はよく一致した。

Fig. 7中段に示すB点は壁間隔24mの山留め壁内側の中央にある点である。この点の実験値も、杭がないB1、杭があるB2とも液状化に達した。解析値においても結果は同じで、B1とB2とも液状化に達した。水圧上昇の速さは、実験・解析とも杭がないB1が、杭のあるB2よりも速く上昇した。ただし、解析値の方が杭の有無による差が大きく現れた。

Fig. 7下段に示すC点は壁間隔12mの山留め壁内側の中央にある点である。実験値は、杭がないC1では液状化に達しなかったが、杭があるC2では液状化に達した。山留め壁による液状化抑制効果が強く働くC点では上部構造の振動が杭を通じて地盤に入力し、杭の近傍地盤から液状化を生じたと考えられる。特に本実験のケースでは、山留め壁と杭が離間しているため、杭の振動による影響が顕著に表れたものと推察する。解析でも、C1

では液状化せず、C2は液状化する結果となっている。ただし、液状化に達する時刻、水圧の最大値等の定量的な評価では実験値との一致はあまり良くなかった。これは、Fig. 4の液状化強度曲線に示すように、解析で用いた地盤は、せん断応力比0.2以下では実験より液状化しやすい条件であったことが結果に表れたと考えられる。

2.3.2 杭基礎の応答 Fig. 8に、山留め壁の外にある杭（U杭）における杭頭部の曲率の時刻歴を示す。実験値の時刻歴波形を見ると、 $t=10$ 秒以降の周期が顕著に伸びており、杭の近傍で地盤の液状化を生じていることが伺える。実験値と解析値を比較すると、応答の振幅は概ね一致している。ただし、解析値は実験値と比べて高周波の成分が多く残っている点や、本震が去った $t=50$ 秒以降の振動では、実験値の振幅に対して解析値は小さくなっており、減衰の傾向に若干の違いも見られた。

Fig. 9に、山留め壁の外にある杭（U杭）と壁間隔24mの中央杭（V杭）の深さ方向の最大曲率分布を示す。U杭とV杭を比較すると、山留め壁の内側の杭は、外側の杭より杭頭部の最大曲げモーメントが僅かに小さくなっているがその差は小さい。

実験値と解析値を比較すると、杭頭付近の曲率はいずれの点も実験値と解析値は一致している。地中部の曲率分布に着目すると、曲率の深度分布の再現は十分でないが、杭体の最大曲率は同程度である。

以上、地盤の過剰間隙水圧や杭に発生する最大曲率は解析値と実験値とで概ね対応することから、本研究で用いるモデル化手法で液状化地盤における山留め壁や杭の地震時挙動を表現できることを確認した。

3. 山留め壁と杭基礎の地震応答解析

山留め壁が杭基礎の地震時応答に与える影響を、前述のモデル化手法を用いて解析的に検討した。

3.1 解析条件

Fig. 10に、検討に用いる解析ケースを示す。ここでは

- ケースP：杭のみ
- ケースQ：杭基礎と山留め壁（杭基礎と山留めは離間）
- ケースR：杭基礎と山留め壁（杭基礎と山留めを剛結）

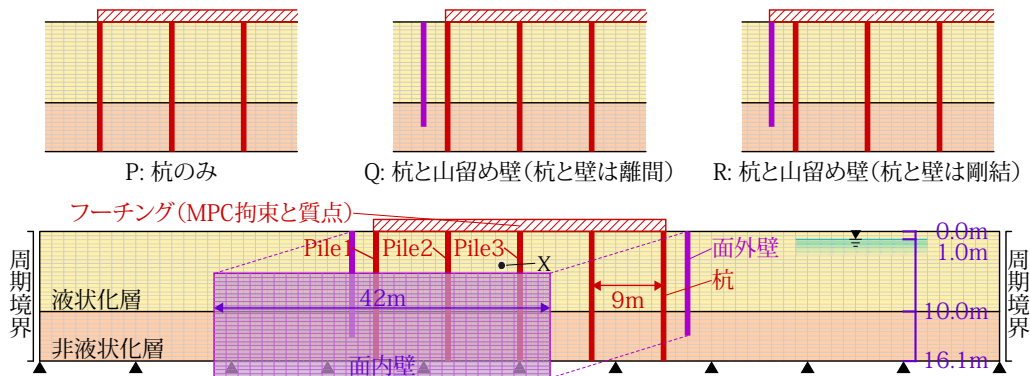


Fig. 10 解析モデル
Finite Element Mesh

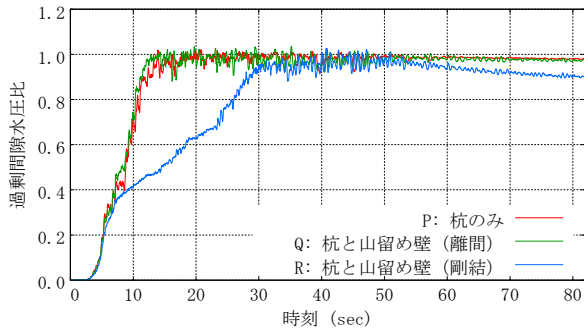


Fig. 11 過剰間隙水圧比の時刻歴
Time History of Excess Pore Water Pressure Ratio

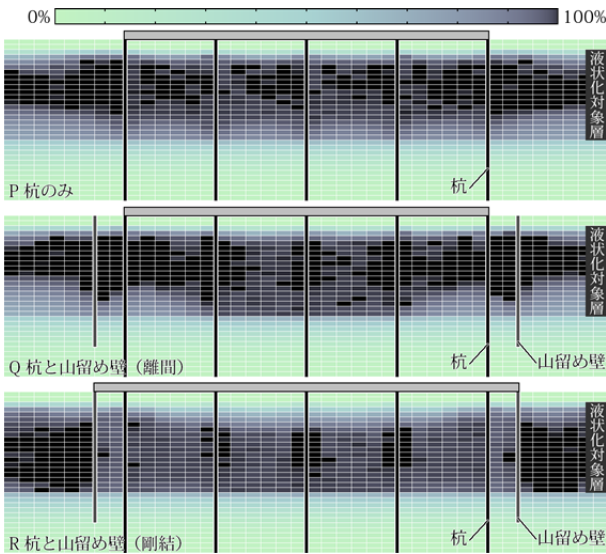


Fig. 12 過剰間隙水圧比分布
Maximum Excess Pore Water Pressure Ratio

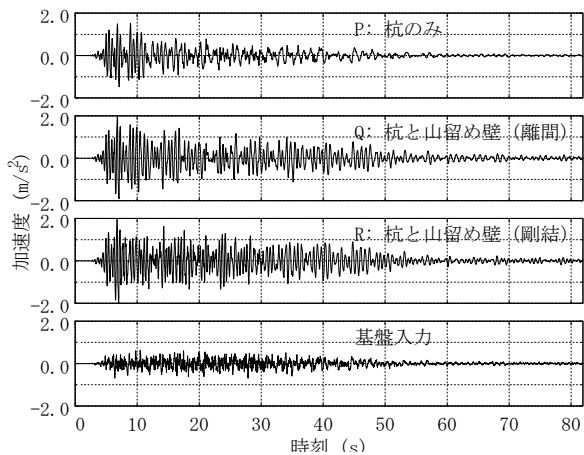


Fig. 13 基礎スラブの加速度
Acceleration of Slab

の3種類の解析ケースを設定した。

この検討には、山留めの有無のほか、山留め壁と建物の結合条件が応答に与える影響を調べるため、山留め壁と基礎スラブを剛結したモデルを追加した。

設定した解析モデルは、実大規模を想定して、山留め壁の間隔を42mとし、杭本数を増やした点と、端部の境

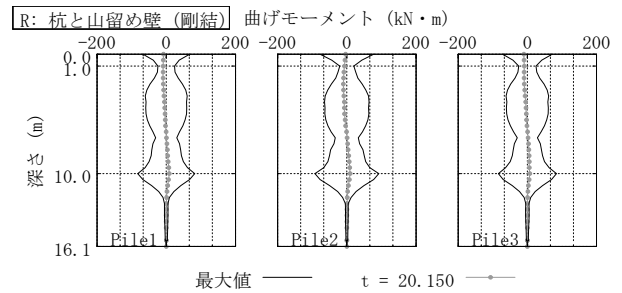
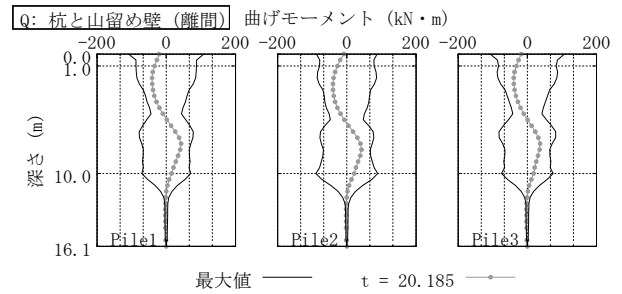
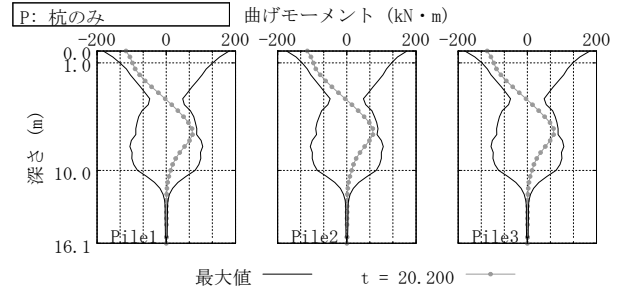


Fig. 14 杭体の最大曲げモーメント分布
Maximum Bending Moment of Piles

界条件を固定境界から周期境界に変更した点の他は、先の実験値との比較を行った解析モデルと同じ条件である。

3.2 解析結果

3.2.1 過剰間隙水圧比 Fig. 11 に基礎中央の深さ4mの点Xにおける過剰間隙水圧比の時刻歴を、Fig. 12には最大過剰間隙水圧比のコンターをそれぞれ示す。

Fig. 11を見ると、杭のみのPは $t = 10$ 秒付近で過剰間隙水圧比が1に達し液状化した。基礎スラブと山留め壁が離間しているQも、杭のみのPとほぼ同じ動きをしており、山留め壁の有無による液状化抑制効果は見られなかった。一方で、基礎スラブと山留め壁を剛結したRでは、最終的には液状化に達するものの、他の2ケースと比べて過剰間隙水圧の上昇が緩やかであった。これは、山留め壁と基礎とが剛結されると拘束力が増し、壁の間隔が広い条件でも壁の液状化抑制効果が期待できることを示している。

Fig. 12の最大過剰間隙水圧比コンターを見ると、杭のみのPは、建物下の地盤も遠方の自由地盤と同程度の液状化を生じている。基礎スラブと山留め壁が離間しているQも、全域で液状化を生じた。山留め壁の影響はわずかであるが、Pと比べて壁の近傍で水圧が抑えられる効

果が見られる。基礎スラブと山留め壁を剛結した R においても水圧比が 1 近くまで上昇しているが、P、Q と比較すると水圧比はやや低く抑えられており、山留め内の地盤に対しては液状化の抑制効果が最も強く働いている。

3.2.2 基礎スラブの応答加速度 Fig. 13 に、基礎スラブにおける加速度の時刻歴を示す。杭のみの P では、 $t = 10$ 秒以降で振幅が減少し、周期が延びるなど地盤が液状化したことを示す応答が見られる。これは、Fig. 11 で、地盤の過剰間隙水圧比が 1 に達した時刻とも一致する。基礎スラブと山留め壁が離間している Q でも、 $t = 10$ 秒以降で振幅の減少が見られるが、P と比べて振幅が大きく高周波の成分も多く残っており、地盤反力を完全には失っていないと見られる。基礎スラブと山留め壁を剛結した R では、P や Q と同様に振幅は若干減少しているが P、Q と比べると振幅は大きく地盤の液状化の発生をうかがわせる挙動は見られない。

3.2.3 杭の最大曲げモーメント分布 次に、各解析モデルの Pile 1～3 それぞれの杭の最大曲げモーメントの分布を Fig. 14 に示す。Fig. 14 には地震波の本震部分である $t = 20$ 秒付近で、フーチング加速度が最大となる時刻の曲げモーメント分布も参考として示した。各ケースを比較すると、杭に発生する曲げモーメントは杭のみの P が最も大きく、基礎スラブと山留め壁を剛結した R が最も小さい。これは山留め壁により地盤のせん断変形が拘束された影響と、建物慣性力の一部を山留め壁が負担することで杭の負担せん断力が減少した影響であると考えられる。

各ケースについて応力分布の特徴を詳しく見ると、杭のみの P では、辺部の杭 Pile 1 と、中央部の杭 Pile 3 との差はあまり見られず、全ての杭が同じような挙動を示した。曲げモーメントの最大値は杭頭位置にあり、地中部ピークは地中深く G.L. -7m 付近に現れている。曲げモーメント分布からは、周辺地盤が完全に液状化していることがうかがえる。

基礎スラブと山留め壁が離間している Q でも、杭の平面位置による違いはあまり見られない。曲げモーメントの分布は、杭頭部と地中部で同程度であった。曲げモーメントの最大値は P と比較して 6 割程度にとどまった。

基礎スラブと山留め壁を剛結した R も、杭の位置による違いは殆ど見られなかった。杭頭の曲げモーメントは地中部のピークと同じか、地中部が僅かに大きい。また、曲げモーメントの地中部ピークが G.L. -5m 付近の比較的浅いところに現れており、液状化の影響は最も少なかったと見られる。曲げモーメントの絶対値は Q と比べてさらに低く杭のみの P と比較して 3 割程度であった。

これらの違いは山留め壁の有無、および山留め壁と基礎スラブとの結合度合いによるものである。特に基礎スラブと山留め壁を剛結した R の結果に着目すると、山留め壁と基礎スラブの接続が剛であれば、山留め壁が建物慣性力の一部を負担することで、杭の曲げモーメントが低減される影響が現れている。

4. まとめ

本研究では、液状化地盤中の山留め壁が地盤の液状化挙動や杭基礎の地震応答に及ぼす影響について、有効応力解析による検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 地中構造物を含む液状化解析においては、構造物と地盤の境界部でのすべりと剥離を考慮したモデル化が重要である。
- 2) 山留め壁の影響を考慮した 2 次元有効応力解析の結果は、地盤の液状化挙動および杭の応答の最大値が模型実験の結果と概ね一致する。
- 3) 本研究で想定した 42m の壁間隔では、建物外周に存在する山留め壁は、液状化を完全に抑止するほどの効果はない。ただし、基礎スラブと山留め壁を剛結すれば、液状化の発生を遅延させる程度の効果を期待できる。
- 4) 基礎スラブと山留め壁を剛結することで、液状化が発生しても、杭頭の負担せん断力や、杭に生じる曲げモーメントを低減する効果を期待できる。ただしこの場合は山留め壁に発生する応力や変形が許容値に収まるかどうかについて別途検討する必要がある。これらの検討は今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 藤川智, 福武毅芳, 大槻明, 吉見吉昭, 中村康一: 三次元液状化解析を用いたソイルセメント壁による杭の曲げモーメント低減効果の検討, 1994年度大会(東海) 学術講演梗概集 構造 I, 日本建築学会, p. 1457, 1994.7
- 2) 西山高士, 渡辺和博: 山留め壁で囲まれた地盤の液状化挙動 - その 1. 壁との位置関係による影響 -, 第 50 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp. 1777-1778, 2015.9
- 3) 渡辺和博, 西山高士: 山留め壁で囲まれた地盤の液状化挙動 - その 2. 杭の存在による影響 -, 第 50 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp. 1779-1780, 2015.9
- 4) 国土交通省: 国土交通省告示 1461 号, 2000.5
- 5) 伊藤浩二: 動的有効応力解析プログラム「EFECT」(その 1), 大林組技術研究所報, No.51, pp. 7-14, 1995.8
- 6) Matsuoka H. and Sakakibara K.: A Constitutive model for sands and clays evaluating principal stress rotation, Soils and Foundations, Vol.27, No.4, pp. 73-88, 1987.12
- 7) H. Bolton Seed, K. Tokimatsu, L. F. Harder and Riley M. Chung: Influence of SPT Procedure in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, Journal of Geotech. Eng., Vol. 111, No. 12, pp. 1425-1445, 1986.12