

固化改良体による地中構造物の耐震補強効果に関する検討

浦野和彦^{*1}・西村 毅^{*1}・足立有史^{*2}・河呂 眞^{*3}

近年では地中構造物の耐震補強として、構造物周辺地盤を固化改良する方法が検討されている。しかし、固化改良体を設計する場合には通常弾性体として取り扱っており、レベル2地震動を想定した場合には、引張応力による損傷などを考慮した方が合理的な設計が可能である。そのため、改良土の強度が小さい粘性土地盤を対象とした土槽载荷試験を実施し、地盤との相互作用を考慮した場合の改良体の補強効果や破壊挙動について明らかにした。また、固化改良体の引張軟化特性を考慮した弾塑性FEM解析により、土槽载荷試験における地盤、改良体および構造物の変形挙動を再現できることを示し、より合理的な設計を行うための解析手法を示した。

キーワード：地中構造物，耐震補強，地盤改良，引張軟化特性

1. はじめに

既設の地中構造物の耐震補強においては、構造物が地盤中に埋設されているため、従来は構造物の内側からの補強が実施されていた。構造物の内部に十分なスペースが確保できる場合には、内側から削孔してせん断補強鉄筋を挿入してせん断補強する工法¹⁾が用いられる場合もある。しかし、内側からの片面だけでは曲げ補強は難しく、また、通常地中構造物では内部は狭い作業スペースしか確保できないなど施工上の制約が大きい。そのため、近年では地中構造物の周辺地盤を地盤改良することによる地中構造物の耐震補強が検討されており²⁾、実際に発電所施設の重要土木構造物に適用されている³⁾。

筆者らは杭基礎構造物の高圧噴射攪拌工法による固化改良体を用いた新しい耐震補強工法を提案し、実規模杭基礎模型を用いた水平载荷試験⁴⁾およびその数値シミュレーション⁵⁾により本工法の耐震補強効果を確認している。地中構造物に対しても、図-1に示すような固化改良体による耐震補強工法の適用検討を行っている⁶⁾。しかし、設計法の確立など地中構造物への適用検討をさらに進めていくためには、载荷試験などにより固化改良体による補強効果や固化改良体の破壊挙動などを実際に確認する必要がある。

本論文では、矩形断面の地中構造物を対象として土槽载荷試験を実施し、地中構造物模型および粘性土固化改良体模型の変形、破壊挙動を調べた結果を示す。

また、粘性土固化改良体の引張軟化特性を考慮した弾塑性FEMモデルによる土槽载荷試験の数値シミュレーションを行い、土槽载荷試験の結果をより詳細に検討した結果を示す。

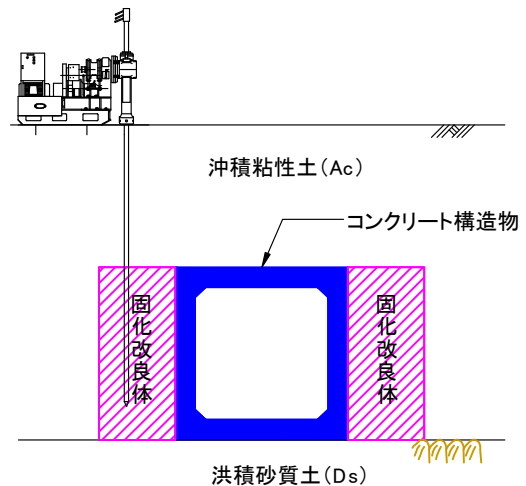


図-1 地中構造物の耐震補強の概念図

2. 土槽载荷試験

2.1 試験条件と試験方法

(1) 試験条件

図-2、写真-1に地中構造物の土槽载荷試験の概要を示す。試験に用いた土槽の大きさは幅3.0m×高さ2.2m×奥行き1.0mで、土槽内に構造物模型を設置し、乾燥砂により模型地盤を作成した。土槽の左右の载荷版は鋼製で、载荷版の下端はヒンジ構造となっている。

構造物模型は、図-1に示した実構造物の1/3縮尺モデルを想定しており、壁厚0.1m、幅1.0m×高さ1.0mの単ボックスカルバートとした。ここで、十分な支持性能を持つ地盤または岩盤に設置された実構造物を想定しており、試験体の底面はPC鋼棒で反力床に固定した。試験体の材料物性を表-1に示す。

構造物の補強として、固化改良体(幅0.5m×高さ0.9m×奥行き1m)を構造物模型の両側に設置した。本载荷試

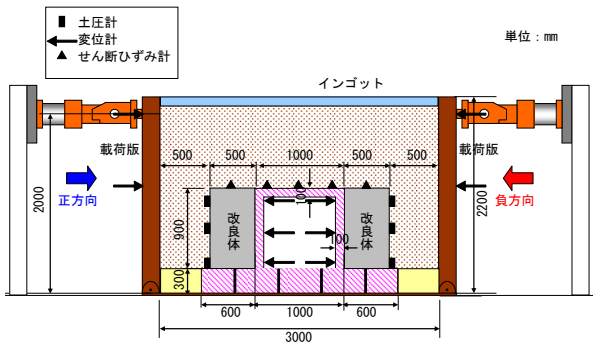


図-2 土槽載荷試験概要



写真-1 載荷試験状況

験では高圧噴射攪拌工法により造成される粘性土地盤の固化改良体を想定しており、セメントミルク（高炉セメントB種）に粘性土（ジョージアカオリン）を添加し作製した⁷⁾。

(2) 模型地盤

模型地盤は、表-2に示す気乾状態の東北珪砂5号を用いて、相対密度90%（単位体積重量 17kN/m^3 ）を目標に厚さ100mm毎に締固め管理を行い作成した。

また、構造物模型に対する地盤による上載荷重は土被り2m相当（ 34kN/m^2 ）を想定したため、不足分については鋼製インゴットによる拘束圧を作用させた。

(3) 試験方法

載荷試験では地震によるせん断変形を模擬するため、載荷版上部に油圧ジャッキ先端を固定して水平方向に変位させた。ここで、土槽内の地盤にせん断変形を生じさせるため、左右のジャッキを同一方向に同一変位とした載荷を行った。

載荷方法は、土槽の変形角を基準とした変位制御による正負交番載荷とし、図-3に示すように60mm（変形角3%）まで実施した。

計測項目は、ジャッキ荷重、土槽および試験体変位のほかに、図-2に示すように、試験体に作用する側方土圧および頂版位置における地盤のせん断ひずみとした。また、図-4に示すように、試験体および鉄筋のひずみも計測した。

表-1 構造物模型と改良体の材料物性

鉄筋	コンクリート	固化改良体	
降伏強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
314.5	26.8	1.85	0.21

表-2 東北珪砂5号の物性

土粒子密度 Gs (g/cm ³)	最大密度 ρ_{max} (g/cm ³)	最小密度 ρ_{min} (g/cm ³)	平均粒径 D ₅₀ (mm)	均等係数 U _c (mm)
2.645	1.735	1.453	0.52	1.8

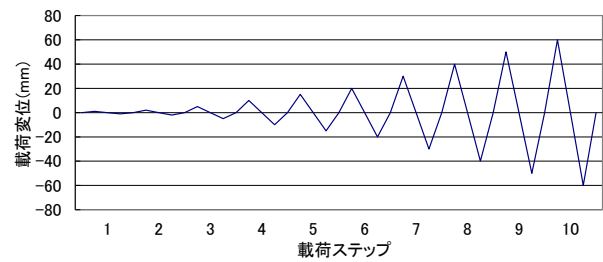


図-3 載荷サイクル

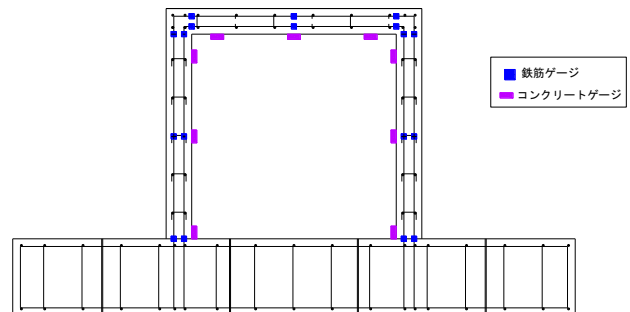


図-4 ひずみ計測位置

2.2 載荷試験結果

(1) 荷重-変位関係

図-5にジャッキ荷重-変位曲線を示す。構造物模型の鉄筋降伏は、改良体がない場合には載荷変位が約15mm、改良体がある場合には約20mm載荷時に側壁下端部で発生した。鉄筋降伏時の構造物模型の側壁上端部の変位は3mm程度であった。

ジャッキによる載荷荷重は、固化改良体ありの方が改良体なしと比較して大きな荷重となっており、土槽載荷試験において固化改良体による補強効果が確認された。また、改良体がある場合には変位の増加とともに改良体の損傷も大きくなり、改良体の損傷が大きくなる載荷変位30mm以降は損傷発生前と比較して荷重があまり増加しなくなっている。しかし、改良体の損傷により荷重が低下することではなく、徐々に増加している。改良体がない場合でも変位の増加に伴い荷重は増加しており、これは地盤の受働抵抗力の増加によるものであると考えられる。

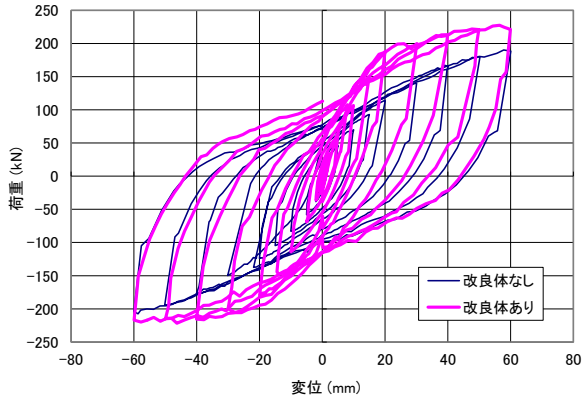


図-5 荷重-土槽変位曲線

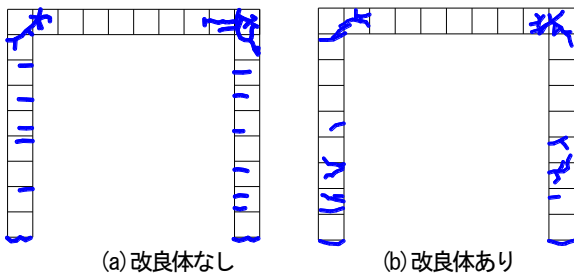


図-6 構造物模型のひびわれ図



写真-2 試験体および改良体の損傷状況

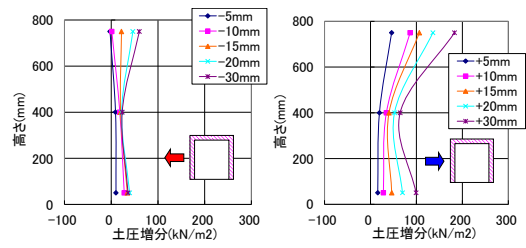
(2) 損傷状況

図-6に構造物模型のひびわれ図を示す。改良体がない場合のひびわれは側壁の上から下までまんべんなく発生しており、これは側壁に土圧による分布荷重が作用しているためであると考えられる。一方、改良体がある場合には、側壁端部以外に側壁中央部より下部にもひびわれが発生しており、これは改良体の損傷による影響であると考えられる。

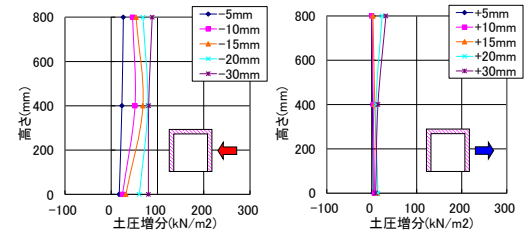
写真-2に示すように、改良体にはせん断による斜めひびわれが発生しており、改良体の下端には引張によるひびわれが発生していた。

(3) 地盤挙動

図-7に改良体がない場合、図-8に改良体がある場合の試験体の側壁部に作用している載荷時土圧増分を示す。図の凡例の値は載荷変位である。載荷版が押してくる正方向載荷時の左側壁および負方向載荷時の右側壁では最

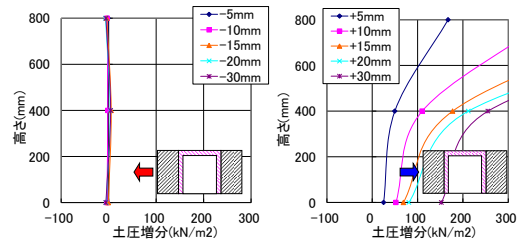


(a) 左側壁

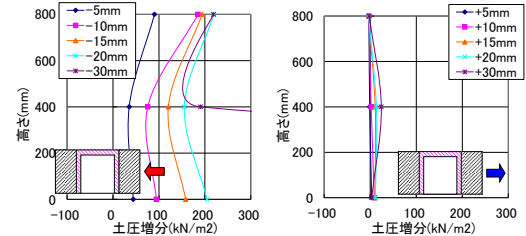


(b) 右側壁

図-7 側壁の土圧分布 (改良体なし)



(a) 左側壁



(b) 右側壁

図-8 側壁の土圧分布 (改良体あり)

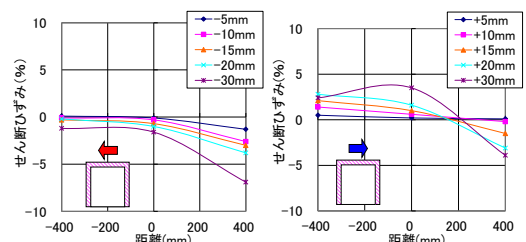


図-9 頂版のせん断ひずみ分布 (改良体なし)

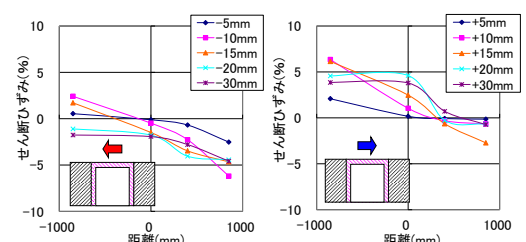


図-10 頂版のせん断ひずみ分布 (改良体あり)

大で 200kN/m^2 を超える増分土圧が作用している。改良体がある場合の方が大きな土圧を示しているが、側壁部の水平変位は逆に小さくなっている。これは、改良体が土圧を分担していることを示すものであり、構造物模型に作用する土圧は改良体がない場合より小さいと考えられる。

一方、荷重版が離れていく正方向荷重時の右側壁及び負方向荷重時の左側壁ではほとんど土圧増分は作用していない。改良体の有無にかかわらず、試験体の左右で作用する土圧が異なっているが、せん断土槽を用いた地中構造物の荷重試験⁸⁾においても土圧の左右非対称の傾向が計測されている。

図-9に改良体がない場合、図-10に改良体がある場合の構造物模型の頂版部に作用しているせん断ひずみを示す。正方向荷重の場合には正方向のせん断ひずみ、負方向の荷重の場合には負方向のせん断ひずみが発生している。改良体の有無にかかわらず、最大で5%程度のせん断ひずみが計測されており、構造物模型の頂版部に大きなせん断力が作用していることが確認された。

3. 荷重試験の数値シミュレーション

3.1 解析モデルと荷重条件

(1) 解析モデル

地中構造物の土槽荷重試験を対象に2次元FEM解析による数値シミュレーションを実施した。図-11に解析モデルを示すが、模型地盤、固化改良体、コンクリートベース、鋼製インゴットをソリッド要素、構造物模型、土槽荷重版を梁要素でモデル化した。また、境界条件としてコンクリートベース底面は完全固定とした。荷重版と模型地盤間にはジョイント要素を考慮したが、構造物模型と改良体、改良体底面とコンクリートベース間にはとくにジョイント要素などは考慮していない。

一軸圧縮試験などの要素試験をもとに設定した解析物性値を表-3に示す。模型地盤はモール・クーロンの破壊基準による弾塑性モデル⁹⁾でモデル化した。ここで、模型地盤の内部摩擦角 ϕ は、珪砂5号の三軸圧縮試験結果より 39.7 度とした。

また、粘性土固化改良体については、図-12に示すような改良体の引張軟化挙動や繰返し挙動を再現できる弾塑性モデル¹⁰⁾でモデル化した。この弾塑性モデルでは図-13に示すような形状をした降伏関数、および塑性ポテンシャル関数としてDrucker-Prager系の双曲線関数を用いており、粘性土固化改良体への適用の詳細については参考文献7)、11)を参照いただきたい。

梁要素でモデル化した構造物模型については、コンクリートのひびわれ、鉄筋降伏を考慮したトリリニアモデ

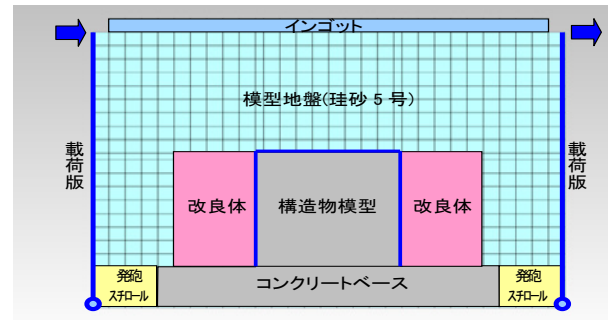


図-11 解析モデル (改良体あり)

表-3 解析物性値

材料種別	模型地盤	構造物模型	固化改良体	コンクリートベース
要素	ソリッド要素	梁要素	ソリッド要素	ソリッド要素
特性	弾塑性モデル	トリリニアモデル	弾塑性モデル	弾性
単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	17.0	24.0	15.0	24.0
弾性係数 E (kN/m^2)	$2.6\text{E}+04$	$2.5\text{E}+07$	$1.0\text{E}+06$	$2.5\text{E}+07$
ポアソン比	0.33	0.2	0.35	0.2

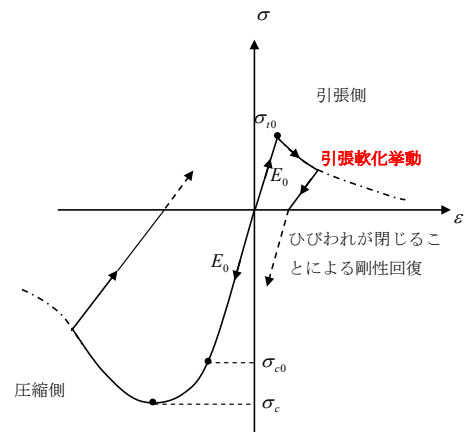


図-12 固化改良体の応力-ひずみ関係

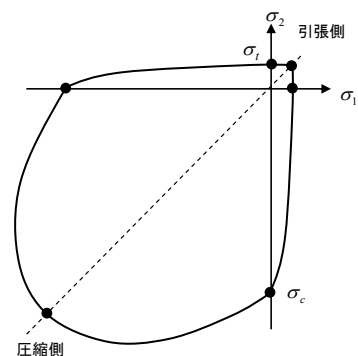


図-13 固化改良体の降伏関数の概要図

ル(曲げモーメント M -曲率 ϕ 関係)¹²⁾でモデル化した。

(2) 荷重条件

図-11に示すように、荷重試験と同様に土槽の両側の荷重版の上端位置に大きさと方向が同じ強制変位を作用させた。なお、今回の数値シミュレーションは最大荷重や

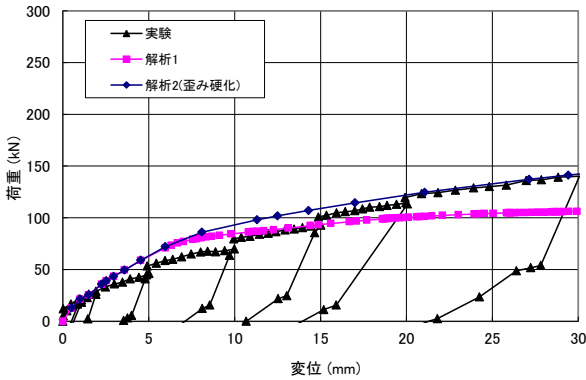


図-14 荷重-土槽変位曲線 (改良体なし)

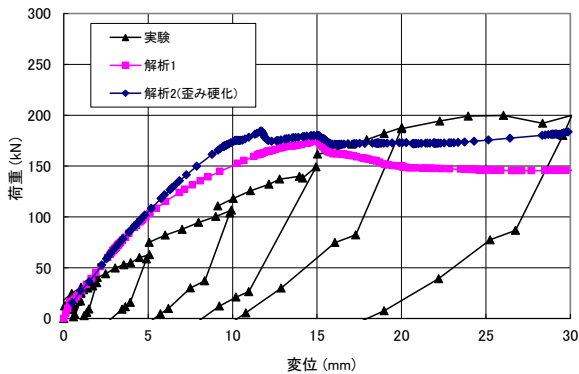


図-15 荷重-土槽変位曲線 (改良体あり)

地盤および構造物模型の挙動の再現を主目的としたため、解析での荷重は正負交番荷重ではなく正方向の単調荷重とした。ここで、荷重版と模型地盤の間には、荷重による引張力が作用しないようにジョイント要素を設置した。

なお、地盤の初期応力については、自重解析により別途算出し考慮した。

3.2 数値シミュレーション結果

(1) 荷重-変位関係

図-14, 15に荷重荷重-土槽変位曲線を示す。図中の解析1は地盤を弾完全塑性モデル、解析2は歪み硬化モデルとした解析結果を示す。ここで、歪み硬化モデルの硬化パラメータは改良体なしの試験結果を参考に設定した。

解析においても改良体がある方が大きな荷重を示しており、改良体による補強効果が解析でも確認された。

改良体がない場合の解析結果は、実験における変位の増加に伴う荷重の増加をほぼ再現している。しかし、変位が大きくなるにしたがって、実験では変位の増加に伴う荷重の増加が地盤の歪み硬化を考慮しない解析1と比較して大きくなっている。

構造物模型と荷重版の間の地盤には、変位が大きくなるにしたがって大きな拘束力が作用し、密な砂の正のダイレイタンスによる密度増加に伴う剛性の増加などが発生していると考えられる。

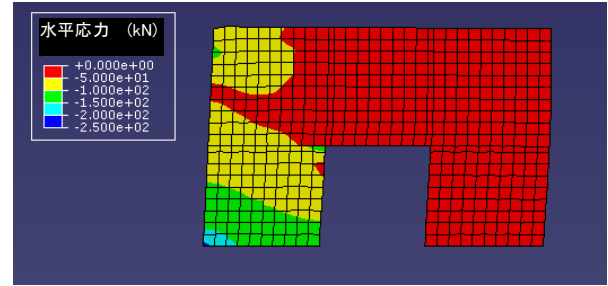


図-16 水平応力分布図 (改良体なし, 荷重変位 20mm)

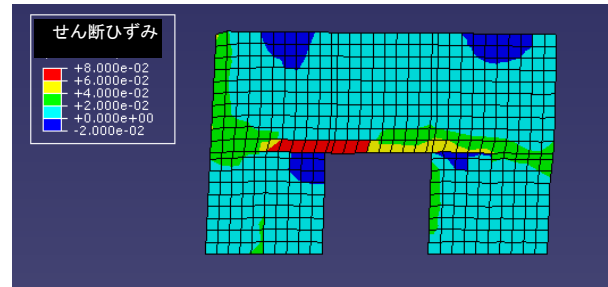


図-17 せん断ひずみ分布図 (改良体あり, 荷重変位 20mm)

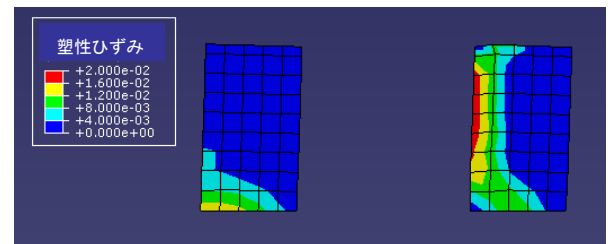


図-18 改良体の塑性ひずみ分布図 (荷重変位 20mm)

一方、改良体がある場合の解析結果は、改良体のひびわれ発生による損傷で荷重が増加しなくなる挙動を、引張軟化挙動を考慮することにより表現できている。しかし、特に解析1では損傷による剛性低下を過大に評価して荷重が減少した後一定の値となっているが、実験では荷重の低下は小さく減少することなく一定の値となっている。

実験では改良体は土圧により拘束されており、変位が大きくなり拘束圧が大きくなるにしたがい引張軟化挙動による剛性低下の勾配は緩やかになると考える。また、改良体がない場合と同様に、改良体と荷重版の間の地盤の密度増加に伴う剛性の増加なども、実験では荷重が減少しない原因であると考えられる。

(2) 地盤挙動と損傷状況

図-16に正方向 20mm 荷重時の改良体がない場合の水平応力分布図を示す。構造物模型から荷重版が離れていく構造物模型の右側は応力の小さい領域、荷重版が押してくる構造物模型の左側は応力の大きい領域となり、実験における土圧分布と同様な傾向である。また、構造物に作用する土圧は構造物模型の左側で 50 ~ 150kN/m²、右側で 0 ~ 50kN/m²であり、実験計測値と同程度であった。

図-17に正方向 20mm 載荷時の改良体がある場合のせん断ひずみ分布図を示すが、構造物模型の頂版部においてせん断ひずみが卓越している。この頂版部では4~7%のせん断ひずみが発生しており、実験計測値と同程度であった。

図-18に正方向 20mm 載荷時の改良体の塑性ひずみ分布図を示す。左側改良体の下部に引張によるひびわれ、右側改良体にはせん断による斜めひびわれに対応する塑性ひずみが見られ、実験における損傷状況と対応している。

4. まとめ

地中構造物の土槽を用いた模型載荷試験から、固化改良体による耐震補強効果に関して以下のことを確認した。

- (1) 地下構造物の土槽載荷試験において、地震により地盤に大きなせん断変形が生じた際の粘性土固化改良体の補強効果を確認することができた。特に、固化改良体に破壊が発生した状態での補強効果を明確にすることができた。
- (2) 地下構造物の土槽載荷試験において、地震により地盤に大きなせん断変形が生じた際に地下構造物に作用する外力（土圧、せん断力）の特性を明確にすることができた。
- (3) 固化改良体の引張軟化特性を考慮した弾塑性 FEM 解析により、土槽載荷試験における地盤、固化改良体及び構造物の挙動を明確にすることができた。また、粘性土固化改良体の損傷、破壊を考慮した設計に必要な解析手法を示すことができた。

今回の解析では設計への展開などを考え簡易な地盤モデルを用いたが、より複雑な地盤挙動を再現できる地盤モデルを用いた検討も今後は進めていく予定である。

参考文献

- 1) 奥平幸雄, 岩下正美, 小林亨, 清宮理: せん断補強鉄筋埋込工法(あと施工)による東京第二航路海底トンネルの側壁補強, 土木建設技術シンポジウム 2003 論文集, 土木学会, pp. 263-270, 2003.
- 2) 河村精一, 東川直樹, 龜谷泰久, 山崎宏晃, 鍋谷雅司: 地中構造物周囲の地盤改良による耐震補強効果, 第 40 回地盤工学研究発表会, 1048, 2005.
- 3) 大西義裕, 近藤睦, 服部和司: 浜岡原子力発電所耐震裕度向上工事における土木工事, 電力土木, No. 331, pp. 39-43, 2007.
- 4) 足立有史, 浦野和彦, 竹之下朋章, 丹澤宣彦, 河邑眞: 地盤固化工法を用いた杭基礎の耐震補強工法の実大実験, 土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 3, pp. 752-762, 2007.
- 5) 浦野和彦, 足立有史, 河邑眞: 地盤固化体を用いた杭基礎の耐震補強工法に関する 3 次元 FEM 解析, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 1075-1087, 2010.
- 6) 浦野和彦, 足立有史, 山田淳夫, 三反畑勇, 河邑眞: 繊維混合改良土による地下構造物の耐震補強効果の検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, III -471, pp. 941-942, 2010.
- 7) 浦野和彦, 足立有史, 三原正哉, 山田淳夫, 河邑眞: 杭基礎耐震補強に用いる粘性土改良体の引張軟化及び繰返し挙動に関する基礎的検討, 土木学会論文集 C, Vol. 67, No. 4, pp. 500-512, 2011.
- 8) 土木学会原子力土木委員会: 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル 資料編, pp. 185-224, 1992.
- 9) 地盤工学会: 弾塑性有限要素法がわかる, 2003.
- 10) Lee, J. and Fenves, G. L.: Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 124, No. 8, pp. 892-900, 1998.
- 11) 浦野和彦, 足立有史, 西村毅, 河邑眞: 粘性土改良体を用いた地下構造物耐震補強の効果に関する水平載荷試験による検討, 構造工学論文集, Vol. 58A, pp. 959-966, 2012.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp. 333-335, 2002.

A Study on the Effect of Earthquake-Resistant Reinforcement Using a Solidification Body for an Underground Structure

Kazuhiko URANO, Tsuyoshi NISHIMURA, Yuji ADACHI and Makoto KAWAMURA

The necessity of earthquake-resistant reinforcement for underground structures in large-scale earthquakes is rising. This paper shows a model test of the reinforcement method using a ground solidification body and its FEM analyses that were conducted to examine deformation characteristics of the reinforced underground structure and the effect of the reinforcement. The target underground structure is an RC one-box culvert, and loading tests were performed by using a 1/3-scale RC model. The reinforcement body made with cement and clay was situated on both sides of the structure. The effect of the reinforcement was confirmed by comparing the results of the experiments with the earthquake-resistant reinforcement and without it. Elasto-plastic FEM analyses could reproduce the behaviors of the underground structure in the loading test.
