

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760319
 研究課題名（和文） 液状化対策工の設計合理化に向けた固化改良体の変形性能を考慮したモデル化
 研究課題名（英文） Modelling of ductile behaviour of cement-treated sand blocks in grid pattern as remedial measure against liquefaction
 研究代表者
 高橋 章浩 (TAKAHASHI AKIHIRO)
 東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
 研究者番号：40293047

研究成果の概要（和文）：

液状化対策として堤防の基礎地盤を構成する砂質土の一部をセメント固化改良したときの耐震性能照査法の合理化に必要な、固化改良体の変形性能（靱性）を明らかにすることを目的として、有限要素解析および載荷試験による固化改良体の破壊モード・強度特性の把握、セメント改良土の変形・強度特性における加圧養生効果の解明を行った。

研究成果の概要（英文）：

To mitigate liquefaction-induced settlement of levees, improvement of liquefiable foundation ground by cement is often adopted. In this study, mechanical properties and failure mode of sand improved by cement in grid pattern were examined by simple shear tests and finite element analysis. Effects of curing pressure on strength of the cement-treated sand were also examined by a series of undrained triaxial compression tests.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：固化改良体，液状化，変形性能

1. 研究開始当初の背景

地震における河川堤防の大規模な変状は、ほとんどと言ってよいほど基礎地盤の液状化が原因となっている。基礎地盤が液状化すると、堤体荷重により液状化した砂質土層は側方に押し出されるように変形し、これに伴

い堤体が沈下するため、このような変形を抑制するために堤防法尻部に対策工を設ける、ということがよく行われている。対策工としてよく用いられる固化改良工の設計では、固化改良体の外部安定性の照査に加えて、固化体自体の安定性（内部安定性）の照査が行わ

れるが、セメント改良土のような固化体は、脆性的な材料であるとの考え方から、現行の設計法では、固化体に損傷が生じないことを照査している。

液状化対策としての固化改良体の損傷と、それによる構造物の地震時応答の変化に関する研究は、数値解析によるものについては幾つか例があるものの、観測事例や模型実験によるものはほとんどない。数少ない実験的研究の一つとして、代表者らの成果がある。その研究では、格子状固化改良（部分改良パターンの一つで、上から見た時、改良部が格子状に構築されているもの）により地盤改良された液状化地盤上の河川堤防に関する動的遠心模型実験を行い、レベル2地震動に対する改良体の破壊形態とそれによる堤防の沈下について調べており、固化体の損傷は堤防の側方変形方向に平行な格子壁の鉛直せん断が支配的であること、固化体に損傷が生じた時の堤防の沈下量は固化体の内部破壊が生じないケースと比べて遜色ないことを示している。

このように液状化対策としての固化改良体に損傷が生じたとしても、所定の耐震性能が満足され得ること、固化体の部分的な損傷が全体の破壊に必ずしも直結しないことが既往の研究で示されている。これは、気中のコンクリート構造物と異なり固化体は土で囲まれているため、例えば周辺土が液状化したとしても、損傷による固化体の大崩壊やそれに起因する構造物の大崩壊に直結しないこと、特に格子状固化改良体のように部分改良が行われている場合には、セメント改良土と未改良土の複合体である固化体は、その冗長性から、ピーク強度後においても比較的靱性を有することなどが、その理由と考えられる。このような固化改良体の変形性能（靱性）の把握は、性能規程に基づく構造物の設計に向けた、固化体の損傷を許容した液状化対策工の設計合理化に、必要不可欠である。

また、平成18年度末に国土交通省河川局治水課において河川構造物の耐震性能照査指針（案）が策定され、平成19年度より、堤防を含めた河川構造物のいわゆるレベル2地震動に対する耐震点検が始まっている。その際、従前対象としていたレベル1地震動相当の地震を想定して耐震対策が施された区間についても再点検する必要があるが、その耐震性能を合理的に評価する上でも、固化体の損傷を許容した耐震性能照査法の確立が不可欠であり、固化改良体の変形性能（靱性）の把握は、そのための重要な要素であるといえる。

2. 研究の目的

本研究は、液状化対策として堤防の基礎地盤を構成する砂質土の一部をセメント固化

改良したときの耐震性能照査法（堤防の耐震設計）の合理化を目標とし、そのための最も重要な要素である、固化改良体の変形性能（靱性）を明らかにすることを目的とした。

堤防の応答計算に有限要素法を用いて、固化改良体をセメント改良土と未改良土に分けて固体要素でモデル化することを前提とすれば、固化改良体のモデル化では、固化改良体を構成するセメント改良土部分の変形特性の把握と、それに基づく構成モデルの構築が重要となる。しかし、セメント改良土と未改良土の特徴を捉えた構成モデルを用いたとしても、セメント改良土と未改良土の相互作用に伴う固化体の変形特性は、必ずしも自然と考慮されるとは限らないため、想定しうる構造物と対策工の変形モード（破壊モード）を特定した上で固化改良体のモデル化を行うのが望ましい。即ち、セメント改良土と未改良土の3次元の相互作用などにより決まる固化改良体全体の変形性能を調べ、これに基づきマクロに見た固化改良体の応答の把握が必要となる。

そこで本研究では、堤防の液状化対策として固化改良工法を適用した場合に想定される固化改良体の損傷発生箇所・損傷モードを把握し、マクロに見た固化改良体の変形特性を把握することを具体的な目的とした。また、固化改良体の変形特性を左右する、セメント改良土の変形・強度特性における加圧養生の効果の把握についても目的の一つとした。なお、ここでは固化改良工として、格子状改良のように部分改良が砂質土地盤に施されるもので、かつ、セメント改良土の強度がそれほど大きくないもの（一軸強度にして1MPa以下）を主に想定した。

3. 研究の方法

堤防の液状化対策を目的とした固化改良工の改良仕様、設計条件等を参考に、3次元有限要素解析によるパラメータスタディを行い、固化体の損傷発生箇所・損傷モードの同定を行った。また、セメント固化改良土と未改良土の複合体である固化体の載荷試験も行い、マクロに見た固化改良体の変形特性を把握も行った。更に、固化改良体の変形特性を左右する、セメント改良土の変形・強度特性における加圧養生の効果については、非排水三軸圧縮試験により検討した。

4. 研究成果

(1) 固化改良体の損傷モードについて

深層混合処理による地盤改良を対象とし、地震による固化改良体の損傷モードに着目した実験的研究、並びに、解析的研究のレビューを行い、これまでに報告されている損傷モード等について整理した。その後、堤防の液状化対策を目的とした固化改良工の改良

仕様、設計条件等を参考に、3次元有限要素解析によるパラメータスタディを行い、固化体の損傷発生箇所・損傷モードの同定を行った。また、セメント固化改良土と未改良土の複合体である固化体の载荷試験も行った。その結果、以下の事項が明らかとなった：

- ① 堤防の液状化による沈下対策を目的として、深層混合処理による地盤改良を行った場合、周囲の地盤の液状化によって改良体に水平応力が作用し、その結果、外部破壊の一つである転倒モードが顕著に表れる。
- ② 固化改良体を格子状に配して、その内部にある未改良土が液状化する場合としない場合を想定し、これが改良体の破壊モードに与える影響を数値解析にて検討した。その結果、未改良土が液状化しないときはセメント改良土の内部破壊は発生しないこと、未改良土が液状化するときは堤防軸方向に直交な改良壁内に鉛直せん断破壊が発生することがわかった（図1は、(a)未改良土が液状化しない場合、(b)未改良土が液状化した場合の局所的な安全率の逆数（1に近いものほど破壊に近い）の分布を示したもので、上述の様子が見て取れる）。

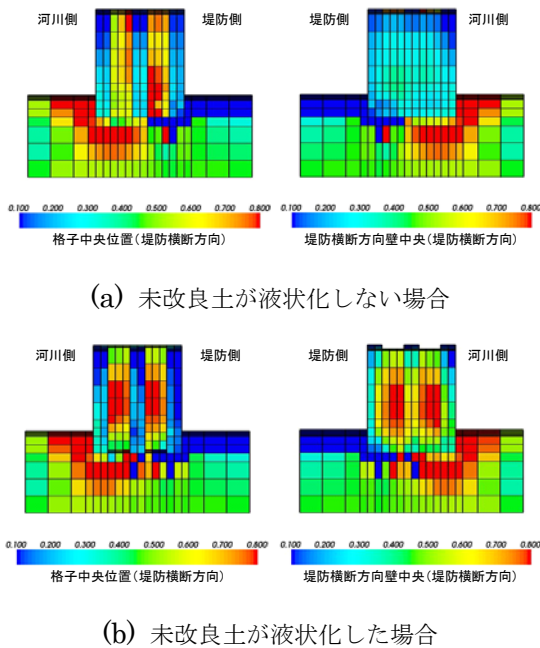


図1：堤防基礎地盤が液状化したときの改良体およびその基礎地盤内の安全率の逆数の分布（赤い部分で塑性変形が発生）

- ③ 固化改良土と未改良土の複合体である固化体の载荷試験（図2に示すような供試体に対して、表1に示すような条件の下、単純せん断試験を実施）の結果、数値解析と同様の破壊モードが確認された。ま

た、未改良土が液状化する、即ち格子内の土のせん断抵抗が期待できない場合は、数%のせん断ひずみで固化体のせん断抵抗はピークを迎え、その後軟化するのに対し、未改良土が液状化せずそのせん断抵抗が期待できる場合は、応力-ひずみ関係は軟化傾向を示さず、塑性硬化することが確認された（図3は正規化せん断応力-せん断ひずみの関係を示したもので、上述の様子が見て取れる）。

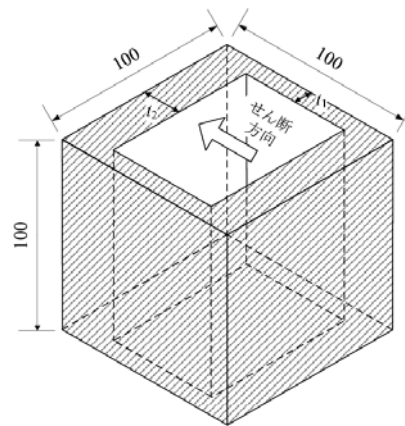


図2：格子状改良体の形状（寸法単位：mm）

表1：実験条件

Case	セメント添加率, C	中詰め砂	改良率, a_c	t_1	t_2
01	6%	なし	52%	10mm	20mm
02	6%	あり	52%	10mm	20mm
03	12%	なし	52%	10mm	20mm
04	12%	あり	52%	10mm	20mm
05	12%	ダミー ^{*1}	52%	10mm	20mm
06	12%	なし	64%	20mm	20mm
07	12%	あり	64%	20mm	20mm
08	0%	あり ^{*2}	0%	0mm	0mm
09	6%	なし ^{*3}	100%	50mm	50mm
10	12%	なし ^{*3}	100%	50mm	50mm

*1: 砂の代わりにせん断変形を阻害しないダミーブロックを使用。
*2: 未改良砂のみ。
*3: セメント改良砂のみ。

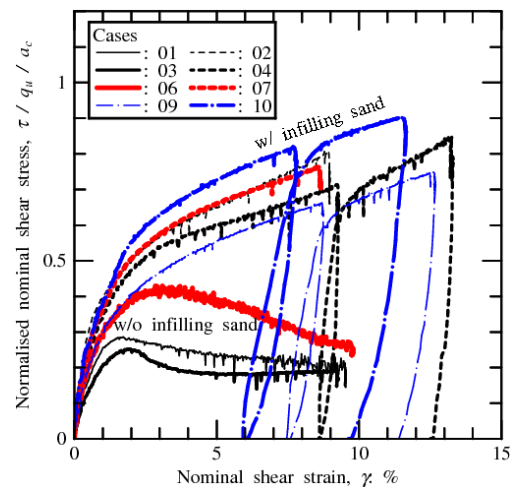


図3：改良固化体の正規化せん断応力-せん断ひずみの関係

(2)改良土の変形・強度特性

上述のような破壊モードを呈するときの改良土の応力-ひずみ関係を詳細に検討するため、改良土の非排水三軸試験を実施した。その結果、以下の事項が明らかとなった：

- ① 未改良の場合、非排水せん断によりひずみ軟化傾向を示し、液状化するような土であっても、わずかなセメント（5%）を添加することにより、ひずみ硬化を示すような安定した地盤材料に改良することが可能である（図4参照）。

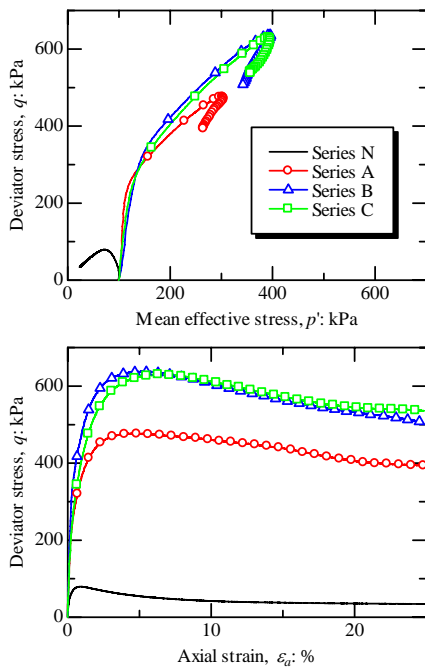


図4：応力経路（上）と応力-ひずみ関係の例（セメント添加率5%、N：未改良土、A：未加圧養生、B：加圧養生、C：未加圧養生だが土の密度は加圧養生と同じ）

- ② セメント添加後、通常の配合試験のように養生時の拘束圧が非常に小さい場合、その強度はせん断時の拘束圧に比例せず、ほぼ一定値を示すのに対し、実際の改良地盤のようにある程度の拘束圧が養生時に作用している場合（加圧養生の場合）、その強度は拘束圧が大きいものほど大きくなる（図5参照）。
- ③ 養生時の拘束圧が非常に小さくても、その密度が加圧養生時のそれと等しい場合、剛性は加圧養生のもの比べて小さいものの、強度は加圧養生したものとほぼ同じであった。即ち、養生時の加圧による密度増加を別途評価できれば、通常行われているような低拘束圧下の養生であっても、加圧養生時の強度が推定可能である（図5参照）。

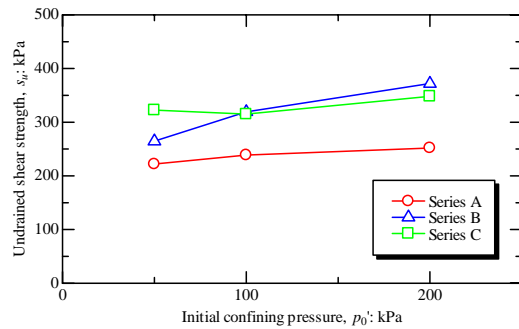


図5：拘束圧と非排水せん断強度の関係（セメント添加率5%）

以上より、堤防の液状化対策として固化改良工法を適用した場合に想定される固化改良体の損傷発生箇所・損傷モードが同定できた。また、セメント改良土はせん断時にひずみ硬化を示すことから、特殊な構成モデルを用いなくても、ある程度その応力-ひずみ関係を表現可能であること、未改良土の圧縮特性が把握できれば、加圧養生による試験を実施しなくても加圧養生効果を踏まえた強度評価が可能であることがわかった。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① 田村準, 高橋章浩, 液状化による地盤沈下対策としての固化改良体の破壊メカニズム, 第44回地盤工学研究発表会講演集, Paper No. 709, 1417-1418, 2009. 8.
- ② Takahashi, A. & Sugita, H., Behaviour of SCP-improved levee during 2003 Miyagiken-Hokubu Earthquake, Earthquake Geotechnical Case Histories for Performance-Based Design, T. Kokusho ed., Taylor & Francis, Netherlands, 177-184, 2009. 6.
- ③ Takahashi, A., Tanimoto, S. & Sugita, H., Curing pressure dependency of compressive strength of cement-treated sand, Proceedings of 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 471-474, 2009. 3.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 章浩 (TAKAHASHI AKIHIRO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：40293047

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし