ベントナイトを電気泳動させた地盤改良工法の基礎的研究†

藤 平 雅 巳* 小 西 武** 清 水 英 治***
安 田 進**** 永 瀬 英 生*****

Fundamental Study on Soil Improvement Method Using Electrophoresis of Bentonite

by

Masami FUJIHIRA*, Takeshi KONISHI**, Eiji SHIMIZU***
Susumu YASUDA**** and Hideo NAGASE*****

This paper indicates the possibility of prevention against liquefaction by mixing bentonite in sandy ground with the aid of electrophoresis. If this method is effective, it is useful to improve the subsoil condition of the existing structures by electrically transferring bentonite particles from the outside to the subsoil ground. Experiments were carried out in the laboratory to confirm the effect of soil improvement.

The following results were obtained from the experiments.

- (1) Soil improvement using electrophoresis is effective in preventing sandy ground from being liquefied. (Fig. 3, 5, 6)
- (2) The effect of improvement increased more by using dispersant or flocculant. (Fig. 9)

Key words : Soil improvement, Liquefaction, Electrophoresis, Bentonite, Dispersant, Flocculant

1 はじめに

ベントナイト懸濁液に直流を通電すると、負に帯電しているベントナイト粒子は陽極側に移動する。これを電気泳動現象¹⁾という。この現象を利用して、ベントナイトを砂地盤中に移動させ、砂粒子に付着させることで、砂地盤の粘着力が増加し、液状化に対する抵抗力が増加すると考えられる。

この工法が実現すれば、従来の液状化対策では対応できない既設構造物の基礎地盤についても、その側面からベントナイト粒子を移動させることによって、地盤改良が可能になると考えられる。

本文では、上記の地盤改良工法の開発のために、以下の項目について、室内試験によって検討した。

- (1) 電気泳動による砂地盤の改良効果
- (2) 改良効果に及ぼす分散剤および凝集剤の効果

2 電気泳動による砂地盤の改良効果

2・1 ベントナイト混入方法の相違による液状化強度比の比較

2・1・1 試験概要 ベントナイトの混入方法が、砂供試体の液状化強度比（軸ひずみ両振幅： $DA=5\%$ 、繰返し載荷回数： $N_c=20$ の時の応力比）に及ぼす影響を検討するため、繰返し非排水三軸試験を実施した。供試体は豊浦標準砂（粒度を $75\mu\text{m}$ 以上に調整）を用い、ベントナイト（粒度を $75\mu\text{m}$ 以下に調整）は Table I

に示す物性をもつ浅間産のものを使用した。なお、試験要因は以下の通りである。

- 砂供試体の相対密度
- ベントナイト混入方法
- ベントナイト混入率（試験後の供試体を、 $75\mu\text{m}$ ふるいで水洗いをして、ふるいに残留した砂に対するふるい通過分のベントナイトの乾燥重量の割合を示す）

ベントナイトの混入方法は以下の3種類とし、比較のため、基準試験として豊浦標準砂のみの試験も実施した。

(a) 粉体混入法

絶乾したベントナイトと標準砂を事前に混合し、供試体を作製した。ベントナイトの混入率は2, 4%とした。

(b) スラリー混入法

ベントナイトスラリーを通水して浸透させた。スラリー

Table I. Physical property of bentonite.

Water content	w	(%)	10.45
Density of soil particle	ρ_s	(g/cm ³)	2.578
Liquid limit	w_L	(%)	356.5
Plastic limit	w_p	(%)	44.5
Plasticity index	I_p	(%)	312.0
pH			9.9
Organic matter content		(%)	6.55

† 原稿受理 平成6年10月24日 Received Oct. 24, 1994

* 正 会 員 三井不動産建設(株) 〒261 千葉市美浜区幸町, Mitsui Harbour and Urban Construction Co., Ltd., Mihama-ku, Chiba, 261

** 三井不動産建設(株) 〒261 千葉市美浜区幸町, Mitsui Harbour and Urban Construction Co., Ltd., Mihama-ku, Chiba, 261

*** 千葉工業大学工学部土木工学科 〒275 習志野市津田沼, Dept. of Civil Eng., Chiba Inst. of Tech., Tsudanuma, Narashino, 275

**** 東京電機大学理工学部建設工学科 〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂, Dept. of Civil Eng., Tokyo Denki Univ., Hiki-gun, Saitama, 350-03

***** 九州工業大学工学部設計生産工学科 〒804 北九州市戸畑区仙水町, Dept. of Civil Eng., Kyushu Inst. of Tech., Tobata-ku, Kitakyushu, 804

Fig. 1. Electrophoresis experimental apparatus for specimen used in cyclic triaxial test.

一の濃度は1, 5%とした。

(c) 電気泳動法

Fig. 1のように電極(ステンレス製)を設置し, 直流を鉛直方向に24時間通電してベントナイトを浸透させた。この時ベントナイト濃度は3%, 電圧は5Vとした。

2・1・2 試験結果および考察 Fig. 2はベントナイト混入方法の相違による液状化強度比と相対密度の関係を示したものである。液状化強度比は, 相対密度が高いほど大きい。混入方法と液状化強度比の関係をみると, 粉体混入法では基準試験と比べ大きな値を示しているが, スラリー混入法ではあまり増加していない。また, 電気泳動法では液状化強度比が増加した。

Fig. 3は, Fig. 2の結果を基に, 粉体混入法と電気泳動法での相対密度60%における液状化強度比とベントナイト混入率の関係を示したものである。ベントナイト混入率が大きくなるにつれ, 液状化強度比も増加した。また, 電気泳動法の液状化強度比は, ベントナイト混入率が1.4%と小さいにも関わらず, 粉体混入法の混入率4%と同程度になった。

以上から, 砂地盤の液状化強度比は, ベントナイト混

Fig. 2. Relation between strength ratio causing liquefaction and relative density of sand for different mixing methods.

Fig. 3. Relation between strength ratio causing liquefaction and mixing rate.

入率が大きくなるにつれ増加し, 電気泳動による混入方法が大きくなるのがわかった。

2・2 振動台実験による改良効果の確認

2・2・1 試験概要 電気泳動で改良した地盤が, 振動に対しどの程度の効果があるのか検討するため, 振動台実験で未改良地盤と比較した。測定項目は, 改良地盤と未改良地盤の表面および地中加速度と過剰間隙水圧の経時変化ならびに, 振動後の砂地盤の沈下量である。Fig. 4に試験装置および, 計測箇所の平面図と側面図を示す。

供試体は, 豊浦標準砂を水中落下法で充てんし, 飽和状態で, 相対密度が50%になるようにした。ベントナイト濃度は10%, 電圧勾配を2.0 V/cmとして, 24時間通電した。なお, 試験要因は以下の通りである。

- ・振動台加速度 (80, 100, 110, 120, 150 gal)

Fig. 4. Diagram of soil model for shaking table tests.

Fig. 5. Relation between excess pore water pressure ratio and shaking table acceleration.

・改良の有無

2・2・2 試験結果および考察 Fig. 5 は過剰間隙水圧比と振動台加速度の関係を示したものである。過剰間隙水圧比（過剰間隙水圧／鉛直有効応力）は、振動台加速度の増加にともない上昇しているが、振動台加速度が 110 gal 程度になると、改良部の過剰間隙水圧比は未改良部に比べて低くなっている。なお、通电後のベントナイトの移動分布は、若干陰極の方が大きくなっている。

Fig. 6 は沈下量と振動台加速度の関係を示したものである。砂地盤の沈下量は、振動台加速度の増加にともない大きくなっている。しかし、改良地盤は未改良地盤より沈下量が小さく、両者の差は振動台加速度が 110 gal を超えてから大きくなっている。

以上から、電気泳動で改良した地盤は、110 gal 程度の振動台加速度に対し、効果があることがわかった。さらに大きな振動台加速度にも対応するためには、改良効果をより高める必要がある。

Fig. 6. Relation between settlement and shaking table acceleration.

3 改良効果に及ぼす分散剤および凝集剤の効果

3・1 試験概要

改良効果を高めるためには、Fig. 3 の結果から、ベントナイトの混入量が高めることが有効と考えられる。そこでベントナイトに分散剤を添加すれば、ベントナイト粒子の持つ荷電量が増加するので、粒子が凝集せず泳動しやすくなると考えられる。また、いったん地盤内に泳動させたベントナイトを凝集させれば、改良効果が高まると考えられる。そこで、次の2項目について検討した。

(a) ベントナイト濃度と分散剤の有無がベントナイト粒子の移動に及ぼす影響

(b) 凝集剤の濃度が地盤強度に及ぼす影響³⁾

ここで、分散剤はヘキサメタリン酸ナトリウムを、凝集剤は塩化アルミニウムを使用した。なお、ベントナイトの移動量は泳動率（供試体に移動したベントナイトの乾燥重量／砂の乾燥重量）によって示す。

供試体は珪砂 6 号（粒度を 75 μm 以上に調整）を空中落下法で充てんした後、蒸留水で飽和させ相対密度が 50% になるようにした。また Fig. 7 に試験装置を示す。試験要因は次の通りである。

- ・ベントナイト濃度（3, 5, 7, 10%）
- ・分散剤の有無
- ・凝集剤の濃度（0, 2, 7%）

電気泳動は、以下の方法で実施し、電圧勾配を 1.0 V/cm とした。

(a) ベントナイト濃度と分散剤の有無がベントナイト粒子の移動に及ぼす影響

① <ベントナイト>泳動

試料の両側をベントナイト溶液のみで満たし、直流を水平方向に 24 時間通电した。

② <ベントナイト+分散剤>泳動

ベントナイト溶液に、ベントナイト乾燥重量の 10% に当たる分散剤を添加して通电した。

(b) 凝集剤の濃度が地盤強度に及ぼす影響

<ベントナイト+分散剤>泳動後<凝集剤>泳動

ベントナイト（分散剤添加）を 24 時間泳動させた後、両側のベントナイトスラリーを凝集剤に交換して、電極を反転し、48 時間通电した。

3・2 試験結果および考察

Fig. 8 は分散剤添加による泳動率とベントナイト濃度の関係を示したものである。分散剤を添加することによって泳動率のピークは、2 倍以上増加している。泳動率が最も大きくなるベントナイト濃度は分散剤無添加では 10%、分散剤添加の場合は 5% であった。

Fig. 7. Electrophoresis experimental apparatus.

Fig. 8. Relation between phoresis rate and concentration of bentonite slurry for adding dispersant.

Fig. 9 は凝集剤による地盤の改良強度を示したものである。ベントナイトを泳動させた後に、凝集剤を泳動させることによって、ベーンせん断抵抗値は増加し、凝集剤の濃度が高くなると、さらに抵抗値が増加している。

以上から、分散剤や凝集剤は砂地盤の改良効果に有効である。

4 ま と め

砂地盤にベントナイトを電気泳動させる地盤改良工法の開発のための室内試験を実施したところ、本実験の範囲内で以下の結果が得られた。

(1) 電気泳動による地盤改良は、液状化防止に対して有効である。より大きい振動台加速度に対応するために

Fig. 9. Vane shear resistance of ground improved by adding flocculant.

は、さらに改良効果を高める必要がある。

(2) 改良効果は、分散剤、凝集剤を利用することで増加する。

今後、さらに適切な泳動物質を利用した実験もおこなう予定である。

(平成 6 年 7 月 1 日 日本材料学会第 1 回地盤改良シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 萩原義一訳, “地盤改良法”, p. 37 (1968) 産業図書.
- 2) 安田 進, “液状化の調査から対策工まで”, p. 77 (1988) 鹿島出版会.
- 3) 平岡成明, “地中連続の安定液”, p. 83 (1991) 山海堂.