固結性物質を電気泳動させた液状化対策工法の基礎的研究†

藤 平 雅 巳* 清 水 英 治** 小 西 武***
安 田 進**** 清 水 哲 治*****

The Fundamental Study on Soil Prevention Method of Liquefaction Using Electrophoresis of Fixative Materials

by

Masami FUJIHIRA*, Eiji SHIMIZU**, Takeshi KONISHI***

Susumu YASUDA**** and Tetuji SHIMIZU*****

This paper describes the effect of improvement against liquefaction by using electrophoresis of Fixative materials in model ground. As a result of being electrophoresis at some Fixative materials, it was found that the case of using solution before mixing Sodium silicate No.3 and Calcium chloride is the most effective of soil improvement. And the effective voltage radiant is 1.0V/cm, but the distance between electrodes is 100cm, the strength of improved ground is decreased at the center part. There is a possibility that temperature variation in ground under electric loading has an influence on strength of improved ground.

Key words : Liquefaction, Electrophoresis, Fixative materials, Voltage radiant, Sodium silicate

1 はじめに

物理化学的な現象である電気泳動とは、懸濁液に直流を通電することによって、懸濁液中の帯電しているコロイド粒子やイオンが、その電荷と反対符号の電極に向かって移動する現象である。著者らは、ベントナイトスラリー中のベントナイト粒子を砂地盤中に電気泳動させることで、土粒子の粘着力を増加させて、液状化に対する地盤の抵抗力が増加することをすでに報告した。¹⁾

本研究は、地盤を安定化させる物質である水ガラス系薬液を電気泳動によって砂地盤中に移動させることで、従来の地盤改良工法では適応できない、既設構造物の基礎地盤を安定化し、液状化に対する抵抗力を増加させることを目的とした室内試験を実施して、以下の項目について検討した。

- (1) 水ガラス系薬液の選定
- (2) 電気泳動による改良効果
- (3) 通電時の地盤中温度が地盤安定化に及ぼす影響

2 水ガラス系薬液の選定

2・1 試験概要

模型地盤は電極間距離 L を 20cm として、珪砂 6 号を空中落下法で充填した後に、蒸留水で飽和させて相対密度が 50% になるようにした。電極としてはステンレス製の網 (0.425mm) を使用し、電圧勾配 (電圧/改良幅) は 1.0V/cm とした。

まず、電気泳動させる水ガラス系薬液を選定するため

に、模型の砂地盤 (Fig. 1) に対して Table I の組合せで供試体の両側に薬液を配置して、水平方向に直流を 1 日通電し、通電後にベーンセン断試験を行って模型地盤の強度を比較した。また、この薬液選定試験における薬液の使用量は模型地盤体積と同程度の容量とした。

ケース I, II は薬液注入方法の組合せで、I は負に帯電していると考えられている²⁾ 水ガラス 3 号 (濃度 70%) を安定化材である塩化カルシウム (濃度 1%) と事前に混合し、ケース II はそれらを分離して配置した。ケース III は、水ガラス 3 号より比重が小さい水ガラス 4 号 (濃度 70%) を用いた。ケース IV は一般に LW 工法という超微粒子セメント (濃度 5%) 上澄み液を用いた薬液注入工法で使われる方法である。

なお、溶液の配置については溶液のもつ荷電の符号を考慮して決定した。

Fig. 1. Electrophoresis experimental apparatus.

† 原稿受理 平成 11 年 4 月 12 日 Received Apr. 12, 1999

* 正 会 員 千葉工業大学大学院土木工学専攻 〒275-0016 習志野市津田沼, Graduate School of Civil Eng., Chiba Inst. of Tech., Tsudanuma, Narashino, 275-0016

** 千葉工業大学工学部土木工学科 〒275-0016 習志野市津田沼, Dept. of Civil Eng., Chiba Inst. of Tech., Tsudanuma, Narashino, 275-0016

*** 三井不動産建設(株) 〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町, Mitsui Harbour and Urban Construction Co., Ltd., Chuou-ku, Tokyo, 103-0007

**** 東京電機大学理工学部建設工学科 〒350-0311 埼玉県比企郡鳩山町石坂, Dept. of Civil Eng., Tokyo Denki Univ., Hiki-gun, Saitama, 350-0311

***** サカティンクス(株) 〒175-0081 東京都板橋区新河岸, Sakata Ink Corp., Itabashi-ku, Tokyo 175-0081

Table I. Experimental case.

Case	Anode side	Cathode side
I	Sodium silicate No.3 + Calcium chloride	Sodium silicate No.3 + Calcium chloride
II	Calcium chloride	Sodium silicate No.3
III	Sodium silicate No.4 + Calcium chloride	Sodium silicate No.4 + Calcium chloride
IV	Microfine cement suspension	Sodium silicate No.3

2・2 試験結果および考察

Fig. 2 は、薬液による模型地盤のせん断抵抗値の比較を示したものである。ケースⅡは、陽極付近で模型地盤の強度はかなり増加したが、中央部から陰極側にかけては、ほとんど強度の変化が見られなかった。ケースⅠは初期値（無改良地盤の強度）に比べて、約5倍の強度増加がほぼ均一に見られたが、ケースⅢではケースⅠほど強度が増加しなかった。また、ケースⅣは強度発現はほとんど見られなかった。

以上から

① 水ガラス3号と、塩化カルシウムを事前に混合したものを、陽極側と陰極側に配置して通電した時には、地盤が均一に改良される。

② 陽極側に塩化カルシウム、陰極側に水ガラス3号を分離して配置した時には、部分的に強度が最も増加することがわかった。

Fig. 2. Vane shear resistance of ground improved in relation to fixative materials.

3 電気泳動による改良効果

電気泳動の改良効果を検討するために、水ガラス系薬液選定試験の結果から、ケースⅠの水ガラス3号と塩化カルシウムの混合溶液を薬液に使用し、繰返し非排水三軸試験による液状化強度比と、電圧勾配および改良範囲の検討を行った。

3・1 繰返し非排水三軸試験による液状化強度

3・1・1 試験概要 水ガラス3号と塩化カルシウム

の混合溶液を、砂供試体に電気泳動させた場合の、液状化強度比（軸ひずみ $DA = 5\%$ 、回数 $N_c = 20$ ）を検討するため、繰返し非排水三軸試験を実施した。Fig. 3 に試験装置を示す。なお、この装置は、通常の三軸試験供試体に薬液を電気泳動させるためのものである。

供試体は豊浦標準砂を使用した。そして砂を充填したモールドにタンクを設置して供試体を飽和した後、水ガラス3号と塩化カルシウムの混合溶液を入れて、負電極（ステンレス製網：0.425mm）をタンク内に浮かべ、直流を鉛直方向に1日通電（電圧5V）して供試体に薬液を電気泳動させた。通電後、負電極とタンクをはずしてキャップを取り付け、負圧をかけてモールドをはずし、セルをセットして繰返し非排水三軸試験を行った。

なお、改良効果を高めるために、通電後に装置の排水口を開いて供試体中の水を脱水（強制脱水）し、再飽和させた場合についても同様の試験を行った。以下に試験要因を示す。

- 砂供試体の相対密度
- 強制脱水の有無

Fig. 3. Electrophoresis experimental apparatus for specimen used in cyclic triaxial test.

Fig. 4. Relation between strength ratio causing liquefaction and relative density of sand by using electrophoresis.

3・1・2 試験結果および考察 Fig. 4 は、液状化強度比と相対密度の関係を示したものである。無通電と通電した場合を比較すると、液状化強度比は同じ値を示したが、通電した供試体の相対密度が低いことから、薬液を通電することによる改良効果があると考えられる。さらに、供試体を脱水させることで、供試体の液状化強度比が基準試験（無改良：豊浦標準砂のみ）に比べて2倍程度増加することがわかった。

3・2 電圧勾配および改良範囲の検討

3・2・1 試験概要 水ガラス3号と塩化カルシウムの混合溶液を配置した場合について、以下の要因について水平方向に直流を1日通電し、通電後にベーンせん断試験を行った。模型地盤作成方法等については薬液の選定試験と同様である。

- 電圧勾配 (0, 0.5, 1.0, 2.0V/cm)
- 電極間距離 L (50cm, 100cm)

3・2・2 試験結果および考察 Fig. 5 は、電極間距

Fig. 5. Vane shear resistance of ground improved in relation to voltage gradient at the distance of 50cm between electrodes.

Fig. 6. Vane shear resistance of ground improved in relation to voltage gradient at the distance of 100cm between electrodes.

Fig. 7. Vane shear resistance of ground improved in relation to the distance between electrodes.

離 50cm における電圧勾配の相違によるベーンせん断抵抗値の比較を示したものである。電圧勾配が 1.0V/cm の時、最も模型地盤のせん断強度が高くなっており、初期値に対して、約 3 倍粘着強度が増加していることがわかった。

Fig. 6 は、電極間距離 100cm での電圧勾配の相違によるベーンせん断抵抗値の比較を示している。電極間距離 50cm と同様に電圧勾配が 1.0V/cm の時、せん断強度が高く、初期値の約 2 倍の粘着強度の増加が見られた。

以上のことから、水ガラス 3 号と塩化カルシウムを混合配置した場合の電極間距離 50cm, 100cm について、砂地盤を安定化させるための最適な電圧勾配は、1.0V/cm であることがわかった。なお電圧勾配が、2.0V/cm の時に強度が高くないのは、電圧が高くなると、電極付近で固結反応が強まり、電極付近に遮水壁のような固結体が形成されるため、薬液が試料中心部まで電気泳動しにくくなったものと考えられる。

Fig. 7 は、電圧勾配 1.0V/cm についての電極間距離の相違によるベーンせん断抵抗値の比較を示したものである。また電極間距離 20cm（選定試験）の結果もプロットした。せん断強度のばらつきは、電極間距離が大きくなるにつれて大きくなり、100cm での模型地盤の中央部では、強度が電極間距離 20cm のときに比べて半分近くまで低下した。今後、電極間距離と強度のばらつきについての検討が必要と考えられる。

4 通電時の地盤中温度が固化作用に及ぼす影響

通電実験中、模型地盤の温度が上昇することが確認された。そこで、通電時の地盤の温度変化を測定し、地盤の安定性との関係を検討した。

4・1 試験概要

水ガラス 3 号と、塩化カルシウムを事前に混合したものを陽極側と陰極側にそれぞれ配置した。そして、模型地盤中に熱電対を設置して水平方向に電圧勾配 1.0V/cm で直流を通電し、供試体温度の経時変化を測定した。熱電対の設置箇所は、試料幅に対する陽極からの距離の割

Fig. 8. Temperature variation in ground under electric loading at the distance of 50cm between electrodes.

Fig. 9. Temperature variation in ground under electric loading at the distance of 100cm between electrodes.

合が10%の所と試料幅の中央部の2箇所とした。模型地盤作成方法等については薬液の選定試験と同様である。

以下に試験要因を示す。

- 電極間距離 L (50cm, 100cm)

4・2 試験結果および考察

Fig. 8, 9 は、通電時における模型地盤内の温度の経時変化を示したものである。これを見ると通電時間に伴い地盤中の温度は上昇し、ある時間で温度が下降する傾向を示した。これは電極付近の地盤が強化し、薬液が泳動できなくなり、地盤内のイオンの移動が減少し、電流が減少したためと考えられる。

また試料の中央付近の方が、陽極付近より温度が高くなっており、その差は電極間距離 100cm の方が 50cm より大きいことがわかった。これは電極間距離が長くなると通電による電力消費量が多くなるためと考えられる。

この結果と地盤強度との関係から、地盤中の温度変化が、地盤の強化に影響を及ぼしている可能性もある。

5 ま と め

薬液を電気泳動で砂地盤中に移動させ、液状化強度を増加させる室内試験を実施し、以下の結果が得られた。

- (1) 水ガラス 3 号と、塩化カルシウムを混合配置すると地盤が均一に改良できる。
- (2) 電気泳動によって、液状化強度比が増加する。また、電圧勾配が 1.0V/cm で強度が増加するが、電極間距離が 100cm になると試料中央部で強度が低下する。
- (3) 通電による地盤中の温度変化が、地盤の強化作用に影響を及ぼしている可能性がある。

(平成 10 年 11 月 20 日 日本材料学会第 3 回地盤改良シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 藤平雅巳, 小西 武, 清水英治, 安田 進, 永瀬英生, 材料, 44, 1031 (1995).
- 2) 村山朔郎, 三瀬 貞, 39, 20 (1954).