

浅層改良を併用した非着底型深層改良地盤の鉛直支持力特性の評価[†]

石 藏 良 平* 松 田 博* 安 福 規 之**
大 嶺 聖** 鹿 島 浩 司*

Bearing Capacity of Floating-Type Cement-Treated Columns with Shallow Stabilization

by

Ryohei ISHIKURA*, Hiroshi MATSUDA*, Noriyuki YASUFUKU**,
Kiyoshi OMINE** and Koji KASHIMA*

Economy and environmental safety have recently become very important factors in the construction of soil structures. A combined technology of shallow stabilization and floating-type cement treated columns has an advantage to reduce the construction cost of the soil structure on deep soft soil layers. In this paper, bearing capacity of this type improved ground were investigated. At first, in order to evaluate bearing capacity of this type improved ground, skin friction applied around surface of the floating type column was investigated. Secondly, loading model tests were conducted under the plane strain condition in different improvement conditions to investigate failure tendency of the improved ground. Finally in order to evaluate bearing capacity of this improved ground, equivalent conversion model is proposed with consideration of skin friction. It was confirmed that bearing capacity of the improved ground can be estimated by using this proposed model. By using this model, the embedded depth of an equivalent foundation can be related to the improvement parameters such as improvement ratio and improvement depth.

Key words : Shallow stabilized ground, Floating type cement-treated column, Bearing capacity, Skin friction

1 緒 言

浅層改良を併用した非着底型深層改良地盤は、上部構造物の機能が保たれる範囲内で沈下を許容する工法である。Fig. 1 右に示す従来の着底型地盤改良技術¹⁾と比較して経済性や環境面において有効な技術として期待されている。改良地盤はFig. 1 左に示す非着底型の改良形式であり、改良地盤の安定性を検討するためには、深層改良体に作用する周面摩擦抵抗の評価が重要となる。²⁾

著者らはこれまで、改良地盤の内部安定性について、浅層改良地盤の曲げ破壊に着目し、深層改良体に作用する周面摩擦抵抗を考慮した応力分担比を用いて浅層改良地盤の曲げ破壊を評価する方法を示してきた。³⁾

また、対象とする改良地盤は近年建設基礎として使用されつつあるパイルド・ラフト基礎の構造形式に類似し

ている。パイルド・ラフト基礎の支持力特性に関する研究はすでに行われており^{1), 4), 5)}本研究が対象とする改良地盤においてもその支持力特性を把握することは重要と考える。

本論文では、改良地盤の外部安定性について、改良地盤の鉛直支持力特性に着目し、実験的な検討を行った。改良条件の異なる模型地盤に対して載荷試験を行い、改良地盤の破壊挙動の考察を行った。また、改良地盤を改良率や改良深さといった改良仕様の変化に応じた根入深さを持つ等価基礎に置き換えて鉛直支持力を評価する方法を提案し、実験結果との比較からその検証を行った。

2 周面摩擦抵抗の定式化

本研究ではこれまで、深層改良体に作用する周面摩擦抵抗を評価するために、有限要素法による数値解析から、改良率や改良深さなどの改良仕様と周面摩擦抵抗の関係について考察を行った。その中で、深層改良体に発生する摩擦抵抗の度合いが改良率や改良深さなどの改良仕様の影響を受けることを解析的に明らかにしてきた。²⁾深層改良体に作用する周面摩擦抵抗を定量的に評価するため、モデル化した改良地盤の1ユニットをFig. 2に示す。浅層改良を併用することによって深層改良体上部では、深層改良体と未改良土間での相対変位が発生しにくいのに対し、非着底型深層改良体の先端付近では改良体と未改良土間で相対変位が発生し、周面摩擦抵抗が発現すると考えられる。そのため、深層改良体に発生する周面摩擦

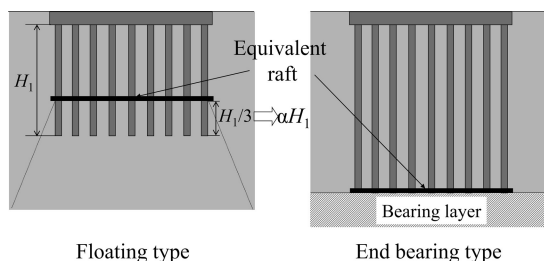


Fig. 1 Concept of floating-type improved ground and equivalent raft method.¹⁾

[†] 原稿受理 平成 23 年 5 月 10 日 Received May 10, 2011 ©2012 The Society of Materials Science, Japan

* 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Dept. of Civ. Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

** 九州大学大学院工学研究院 〒819-0395 福岡市西区元岡, Dept. of Civ. Eng., Kyushu Univ., Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395

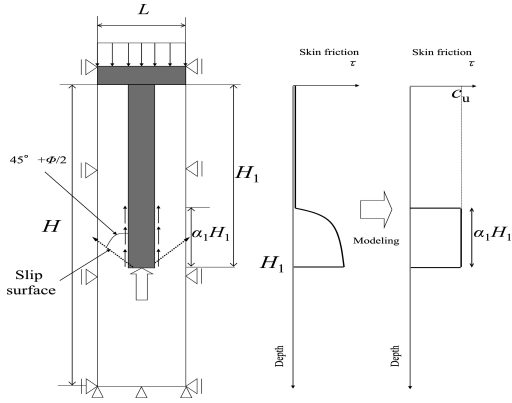


Fig. 2 Hypothesis of skin friction applied around the surface of columns.

抵抗を定量的に評価するためには、深層改良体本数や改良深さが改良体先端の相対変位が発生する長さ及び影響を明らかにする必要がある。

著者はこれまで、深層改良体に作用する周面摩擦力を深層改良体の全周面積で除した値を平均的な周面摩擦抵抗 $\bar{\tau}$ と定義し、周面摩擦抵抗 $\bar{\tau}$ と改良地盤の形状 H_1/L の関係を未改良土の強度増加率 c_u/p_0 から以下の近似式により評価できることを既に提案している。²⁾

$$\frac{\bar{\tau}}{p_0} = \frac{c_u}{p_0} \cdot \frac{1}{H_1/L} \quad (1)$$

ただし、 $\bar{\tau} \leq c_u$ (c_u : 未改良土の非排水せん断強度)とし、 H_1 : 深層改良深さ、 L : 深層改良体の間隔 (ピッチ) を表す。 H_1/L が大きくなるほど改良率や深層改良深さが大きくなることを意味する。先行予備圧密応力 p_0 を受けた未改良土に生じる平均的な周面摩擦抵抗 $\bar{\tau}$ は、 H_1/L の増加に伴い、双曲線的に減少する。つまり、改良率や深層改良深さが大きくなるほど、深層改良体と未改良土間での相対変位が小さくなるため、深層改良体に作用する周面摩擦抵抗 $\bar{\tau}$ は小さくなる。

Fig. 3 に数値解析によって得られた周面摩擦抵抗 $\bar{\tau}$ を先行予備圧密応力 p_0 で除した値と改良地盤の形状 H_1/L との関係を示す。²⁾解析結果には、自重の影響を考慮した実規模スケールでの結果も併記されている。式(1)は、図中の曲線で示されるように、深層改良体に発生する平均的な周面摩擦抵抗 $\bar{\tau}$ と改良条件との関係を概ね捉えることができている。本研究では、周面摩擦抵抗の発現特性

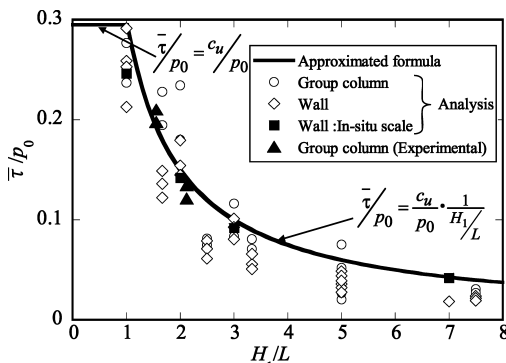


Fig. 3 Formulation of skin friction and improvement conditions.²⁾

を検証するため、1次元圧縮条件での模型実験も行っている。模型実験の詳細については文献(6)を参考されたい。図中には、実験結果についても加筆している。実験結果は、 H_1/L の増加とともに $\bar{\tau}/p_0$ が減少する式(1)と傾向が一致している。なお、 $\bar{\tau}/p_0$ は、未改良土の強度増加率 c_u/p_0 を超えないものとし、 $H_1/L \leq 1$ の範囲では、 $\bar{\tau}/p_0 = c_u/p_0$ になるものとする。²⁾

3 実験概要

3.1 模型実験の概要と手順

本論文で用いた実験装置の概要を Fig. 4 に示す。模型地盤の作製方法は、市販のカオリン粘土を圧密させて未改良地盤を作製する。⁶⁾含水比 80% に調節した粘土を、20kPa の圧密応力で予圧密したものを未改良地盤と見なす。未改良地盤に改良柱体を挿入し、改良地盤を作製する。均質化を図るために、深層改良体にはエーテル系ウレタンを使用する。ウレタンの寸法は直径 30mm の杭で、変形係数は約 50MPa であった。載荷方法は、模型地盤作製後に、地盤表面全体に $p_c = 10\text{kPa}$ の載荷圧をベロフラム式エアシリンダーおよび鉛玉により作用させ、圧密が概ね終わるまでしばらく放置する。その後、応力制御の条件で改良地盤の中心に、ベロフラム式エアシリンダーを用いて、排水条件で最終的に 40kPa まで載荷を行い、その沈下量を計測する。さらに、非排水条件で急速載荷を行い、載荷板中心部に取り付けた変位計とロードセルにより改良地盤の沈下量と中心部の載荷圧を測定する。地盤内の挙動は、土槽前面のメンブレンの変形により測定する。実験ケースとしては、Table 1 に示すように、無改良ケースと杭式の正方形配置で改良率および深層改良深さを変化させた計 4 ケースの載荷試験を行った。Case 2 および Case 3 は、深層改良体積が同一条件となっている。なお本研究では、深層改良体を剛体と仮定しており、改良体を通るすべり破壊は発生しないものとする。

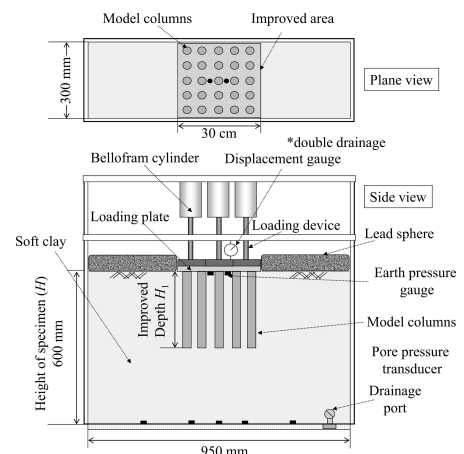


Fig. 4 Schematic illustration of model ground.

Table 1 Test conditions of loading model tests.

	Improvement ratio $a_p(\%)$	Ground depth $H(\text{mm})$	Normalized improved depth H_1/H	Surcharge p_c (kN/m^2)	Arrangement of columns
Case0	0	610	0	10	unimproved
Case1	12.5	610	0.50	10	group column
Case2	19.6	610	0.50	10	group column
Case3	12.5	610	0.75	10	group column

3・2 実験結果と考察

Fig. 5に、載荷試験から得られた荷重強度—正規化沈下量 (S/B) の関係を示す。 B は載荷板の幅を意味する。図より、Case 0 (無改良) では、載荷初期には、弾性的挙動を示すが、ある荷重を超えると急激に沈下量が増加する傾向を示した。これは、ある荷重を超えて地盤にせん断破壊が生じ、急激な沈下が生じたものと考えられ、模型地盤が全般せん断破壊を示しているものと考ええる。Case 1から3では、明確な破壊点を示さずに徐々に沈下が増大していく傾向を示した。これは、地盤に全般的にせん断破壊が生じるのではなく、荷重の増加に伴い徐々に局所的なせん断破壊を示したものと考ええる。本研究では、全般せん断破壊を生じるCase 0においては、沈下が急増する点での荷重強度を鉛直支持力 q_0 と定義した。局所せん断破壊が生じるCase 1からCase 3の鉛直支持力は、地盤の塑性変形がより進行している荷重強度—正規化沈下量がそれ以降直線的となる点での荷重強度を鉛直支持力 q_1 、 q_2 、 q_3 と便宜的に定義した。また、Case 2, 3の同一深層改良体積における鉛直支持力は、改良深さが大きなCase 3の方が大きくなる傾向を示した。これは、深層改良深さが大きい方が、土被り圧の大きな未改良地盤に荷重が伝達されたため支持力が増加したものと考ええる。

Fig. 6にCase 3 ($a_p = 12.5\%$, $H_1/H = 0.75$)における破壊時の変位ベクトルと模型地盤の改良部分を示す。変位ベクトルは、載荷直前から $S/B = 0.10$ までの値を2倍に

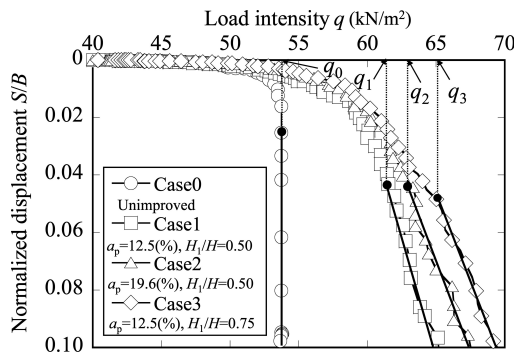


Fig. 5 Relationship between load intensity and normalized displacement.

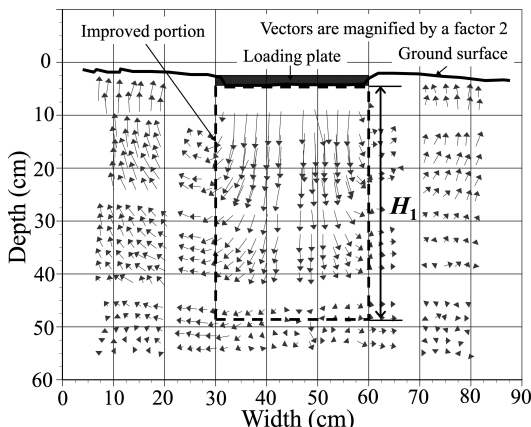


Fig. 6 Deformation of the model ground on failure process (Case3).

拡大したものを表示している。図中に示される改良部分の幅は載荷板の幅 B を、深さは深層改良深さ H_1 を表す。図より改良部分の上半分程度は一体化し、鉛直方向に変位が卓越するのに対して、改良部分の下半分では徐々に水平方向へ変位が生じるような挙動が確認された。これは、水平方向に未改良土が抜け出すようなすべり破壊が生じたためと考える。これは、所定の根入れ深さを持つ直接基礎の地盤挙動と類似しているものと考ええる。

3・3 鉛直支持力特性の評価

3・2節に示したように改良地盤の鉛直支持力は改良率や改良深さといった改良仕様に影響を受けるが明らかになった。そこで、改良地盤の鉛直支持力を改良仕様の変化に応じた根入れ深さを持つ等価な基礎の鉛直支持力として評価することを考える。

本研究ではこれまで改良地盤の沈下量と改良仕様とを関連付けることを目的に、深層改良体と未改良土が一体化する等価基礎と圧密沈下が卓越する圧密沈下対象層に区分する方法をすでに提案してきた⁷⁾提案法では、改良部分の未改良層と仮定する層厚が深層改良深さに占める割合を等価換算係数 α と定義している。 α は式 (1) に示す深層改良体に作用する周面摩擦抵抗を考慮した応力分担比を用いることで改良仕様の変化に応じて合理的に決定することができる⁷⁾

この方法を用いて改良地盤を等価基礎に置き換える際の根入れ深さ D_f を決定する。深層改良深さを H_1 とすれば、深層改良体と未改良土が一体化する等価基礎の根入れ深さ D_f は α を用いて $(1-\alpha)H_1$ と表せる。 α は改良率や深層改良深さ等の改良仕様によって変化するため、等価基礎の根入れ深さ D_f は改良仕様と関連付けた値となる。本研究では、改良地盤の鉛直支持力を改良仕様に応じて変化する根入れ深さ $D_f = (1-\alpha)H_1$ の等価基礎の鉛直支持力として評価することを考える。

Fig. 7に模型実験スケールで計算した D_f と改良仕様との関係を示す⁸⁾根入れ深さ D_f は、改良率および深層改良深さが大きくなるにつれて大きくなる傾向を示す。実験ケースを比較すると、同一改良体積のCase 2および3では正規化改良深さ H_1/H が大きなCase 3の方が根入れ深さ D_f は大きくなる傾向を示す。

等価基礎の支持力計算には、粘土地盤に対する簡便な回転すべりによる支持力公式を適用する。

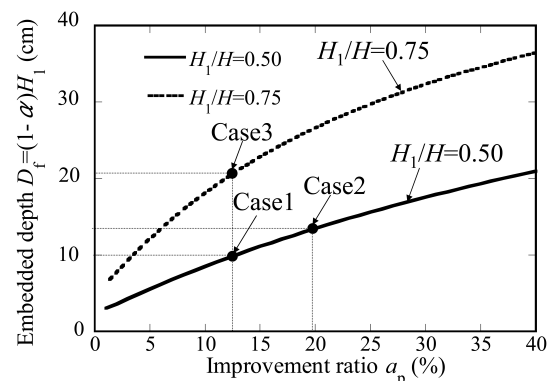


Fig. 7 Relationship between embedded depth and improvement parameters.

Fig. 8にその概念図を示す. 鉛直支持力 q_u は, 載荷幅 B , 根入れ深さ D_f の帯状基礎によって粘着力 c_u の粘土地盤に回転破壊が発生すると仮定すれば, 基礎底面の一端 O 点を中心とするモーメントの釣り合いから式 (2) で表される.⁶⁾

$$q_u = 2\pi\bar{c}_u + \frac{2D_f}{B}c_u + \gamma D_f + p_c \quad (2)$$

ここで, p_c は上載荷重, \bar{c}_u は事前に改良地盤中心部に載荷された荷重の分散による粘着力 c_u の分布を考慮した値を表す.

Fig. 9 に式 (2) による計算結果と Fig. 7 に示す各実験における改良仕様と関連付けた根入れ深さ D_f と鉛直支持力の実験結果との関係をプロットしたものを示す.⁶⁾ 式 (2) の計算結果は, 根入れ深さ D_f の増加とともに鉛直支持力も増加する傾向を示した. 各実験における改良仕様と関連付けた等価基礎の根入れ深さ D_f と鉛直支持力の実験結果との関係は, 式 (2) の計算結果とよく一致する傾向を示した.

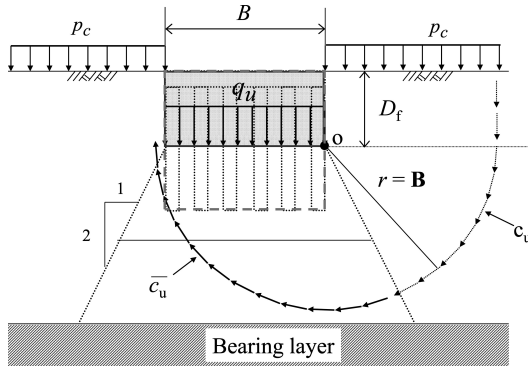


Fig. 8 Rotational failure of soft ground by the Equivalent foundation.

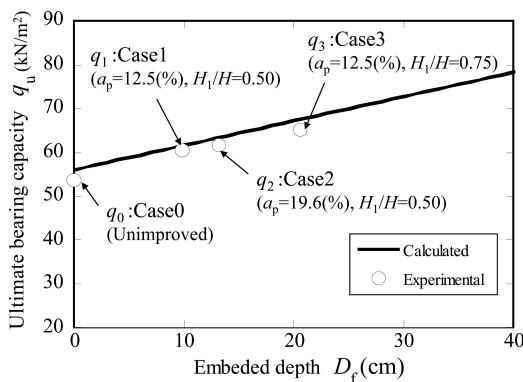


Fig. 9 Comparison between calculated and experimental value of ultimate bearing capacity.

4 結 言

本論文では, 浅層改良を併用した非着底型深層改良地盤の安定性について, 改良地盤の鉛直支持力特性に着目し, 改良地盤の破壊時の挙動を模型実験により考察した. また, 改良地盤を改良仕様と関連付けた根入れ深さを持つ等価基礎の鉛直支持力として評価する方法を提案し, 実験結果との比較からその検証を行った. 得られた主な結論を以下に示す.

- 鉛直載荷時の改良地盤の挙動を観察した結果, 改良部分の上半分程度は一体化し, 鉛直方向の変位が卓越する傾向を示した. 改良部分の下半分付近からは徐々に水平方向に未改良土が抜け出すようなすべり破壊が生じることが明らかになった.
- 浅層改良を併用した非着底型深層改良地盤の鉛直支持力は, 改良率や深層改良深さなどの改良仕様と関連付けた根入れ深さ D_f を持つ等価基礎の鉛直支持力として概ね評価できる.

今後は, 改良地盤の鉛直支持力特性について, 実規模スケールを想定した数値解析による検討を行っていく予定である.

参 考 文 献

- 1) M. J. Tomlinson, "Foundation design and construction", 5th Edition, Longman Scientific and Technical (1986).
- 2) R. Ishikura, H. Ochiai, K. Omine and N. Yasufuku, "Estimation of the settlement of improved ground with a combined technology of shallow stabilization and floating-type cement treated columns", Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, Vol.63, No.4, pp.1101-1112 (2007).
- 3) R. Ishikura, K. Omine, N. Yasufuku, H. Matsuda and H. Ochiai, "Evaluation of bending strength of shallow stabilized ground with floating-type deep mixing wall", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.59, No.1, pp.38-43 (2010).
- 4) T. Whitaker, "Experiments with model piles in groups", Geotechnique, Vol.1, No.4, pp.147-167 (1957).
- 5) K. Horikoshi and M. F. Randolph, "Centrifuge modeling piled raft of piled raft foundations on clay", Geotechnique, Vol.48, No.3, pp.301-317 (1998).
- 6) K. Kashima, R. Ishikura, H. Matsuda, N. Yasufuku and K. Omine, "Skin friction applied around surface of the floating type cement-treated and its application to the bearing capacity problem", Proceedings of the 9th National Symposium on Ground Improvement, pp.293-298 (2010).
- 7) R. Ishikura, H. Ochiai, K. Omine, N. Yasufuku, H. Matsuda and H. Matsui, "Evaluation of the settlement of in-situ improved ground using shallow stabilization and floating-type cement-treated columns", Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, Vol.65, No.3, pp.745-755 (2009).