

電気比抵抗を利用した杭周固定液の一軸圧縮強さの予測

戴 舒翼^{*1} 藤井 衛^{*2}

Prediction of the Unconfined Compressive Strength of Fixation in the Circumference of the Pile Using Electrical Resistivity

by

Shuyi DAI^{*1} and Mamoru FUJII^{*2}

(Received on Mar. 30, 2016 and accepted on May. 12, 2016)

Abstract

Bored precast piles are commonly used to support the foundation of buildings in soft ground. The supporting performance is influenced by the quality of the circumference-fixing liquid and the foot protection liquid. The principle method used to control the quality of the solidification liquid is to check the strength of the specimen at 28-days. However, it is desirable to predict the strength at a young age. Therefore, we tried to predict the unconfined compressive strength at 28-days using the young strength and electrical resistivity at 1-day. In this study, we measured the unconfined compressive strength and the electrical resistivity at 1, 2, 3, 7, 14 and 28 days and investigated the correlation between the strength and electrical resistivity. As a result, we proposed a method for predicting compressive strength using electrical resistivity.

Keywords: Circumference-fixing liquid, Unconfined compressive strength, Electrical resistivity

1. まえがき

地震の多い日本にとって、中規模以上の建築物には、地盤改良や杭基礎が一般的に用いられている。特に杭基礎の中で最も一般的に用いられている工法は、埋込み杭工法である。埋込み杭の支持性能は、Fig.1 に示すように、杭の根固め部や杭周固定部に注入した根固め液及び杭周固定液の品質に影響される。しかし、これらの品質は材齢 28 日の一軸圧縮強さで評価されているが、これにより、強度が不足していることが分かっていても再施工が困難であることが多い。そのため、早期強度の推定方法を確立することは、品質管理を行う上で非常に重要である¹⁾。

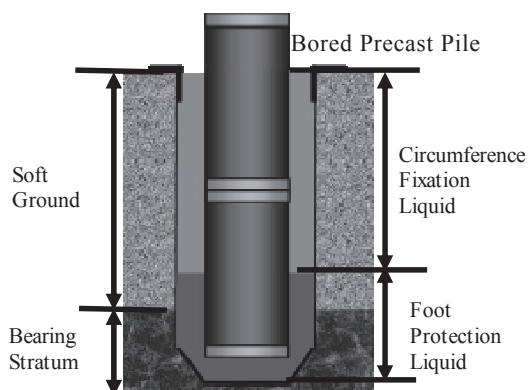


Fig.1 Circumference fixation liquid and foot protection Liquid.

筆者らは、この早期強度を推定するために、電気比抵抗(以後、比抵抗と呼ぶ)を利用することを思いついた。比抵抗は、セメント粒子に敏感に反応するので、セメント粒子が多いと、比抵抗の値は小さくなる。藤井らは、この点に着目し、未固化のソイルセメントコラムの品質管理手法に比抵抗を導入し、コラムの不均質性を評価する手法を提案した²⁾。また、高らは、固化したソイルセメントの材齢 3 日の一軸圧縮強さと材齢 28 日の比抵抗から、材齢 28 日の一軸圧縮強さを予測する方法を提案した³⁾。

本研究では、上記の研究をさらに発展させ、杭周固定液固化体の材齢 1 日の比抵抗と一軸圧縮強さから材齢 28 日の一軸圧縮強さを推定する手法を明らかにした。

2. 実験概要

2.1 実験要因

Table 1 に使用した材料の密度、Table 2 に配合表を示す。実験は、人工配合土(砂と粘土の比率が 3 : 7, 6 : 4, 8 : 2)を用いて、泥水密度が 1.7g/cm³, 1.5g/cm³, 1.3g/cm³, 水セメント比が 100%, 80%又は 60%, 泥水とセメントミルクの比が 3 : 7, 4 : 6, 5 : 5 に設定した。Fig.2 は作製

Table1 Density of materials.

Materials	Density (g/cm ³)
Clay	2.44
Sand	2.66
Cement	3.16
Water	1.00

*1 工学研究科建築学専攻修士課程

*2 工学部建築学科教授

した人工配合土の粒度分布曲線を示したものである．一軸圧縮試験は，材齢 1, 2, 3, 7, 14 及び 28 日にて行った．比抵抗の測定は，打設直後から 30 分ごとに 3 時間とし，それ以後は 1 時間ごとに 24 時間とした，その後，材齢 2, 3, 7, 14, 28 日の間隔で計測した．

Table 2 Mixing rate of circumference fixation liquid materials.

No.	Cement milk : Slurry (Volume ratio)	Sand : Clay (Mass ratio)	W/C (%)	Slurry density (g/cm ³)
A	3 : 7	8 : 2	100	1.5
B	4 : 6	8 : 2	100	1.5
C	5 : 5	8 : 2	100	1.5
D	3 : 7	8 : 2	80	1.5
E	4 : 6	8 : 2	80	1.5
F	3 : 7	8 : 2	60	1.5
G	4 : 6	8 : 2	60	1.5
H	4 : 6	3 : 7	100	1.5
I	4 : 6	6 : 4	100	1.5
J	4 : 6	3 : 7	100	1.7
K	4 : 6	6 : 4	100	1.7

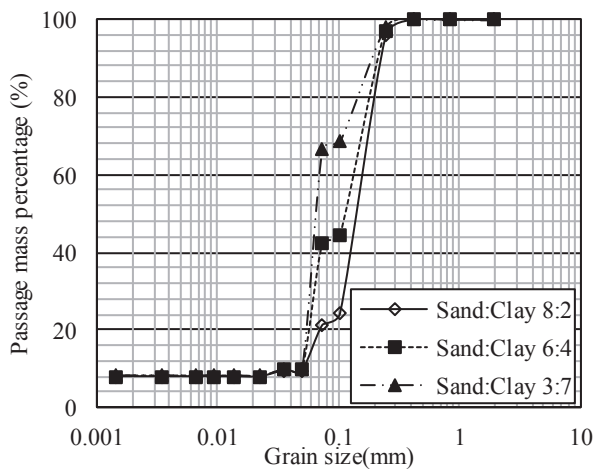


Fig. 2 Grain size distributions of soil samples used for circumference fixation liquid.

2.2 作製方法及び養生方法

Fig.3 は杭周固定液の作製手順を示したものである．最初に水，セメント，珪砂と笠岡粘土を計量し，計量した水をそれぞれの容器に投入した，一つ目の容器に珪砂，笠岡粘土を投入し，3 分間ハンドミキサーで攪拌して泥水を作製した．そして，二つ目の容器にセメントを入れ，3 分間攪拌してセメントミルクを作製した．最後にこれらの泥水とセメントミルクを混合し，3 分間攪拌したものを杭周固定液とした．また，この溶液をポリエチレン製袋に，Fig.4 に示した所定の位置まで投入し，気中養生を行った．養生温度は 25℃とした．Fig.5 は，使用したポリエチレン製袋である．

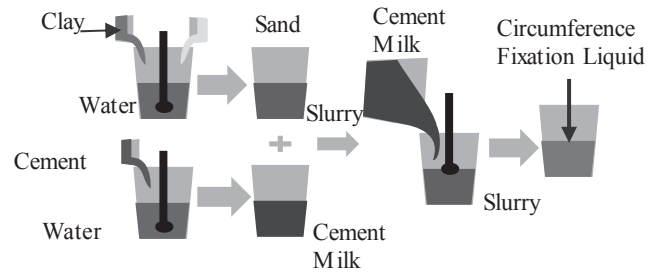


Fig.3 The combination procedure.

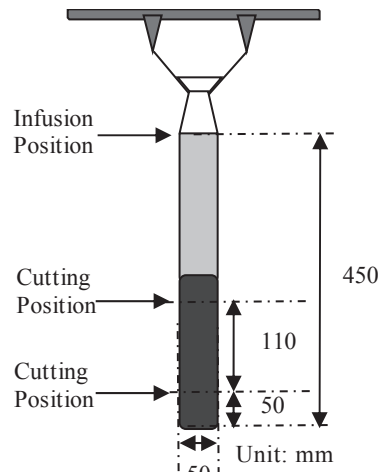


Fig.4 Infusion position and cutting position.



Fig.5 Polyethylene bag.

2.3 一軸圧縮試験

実験方法としては，まず，Fig.4 に示した位置で試験体を切断した．ソイルセメントはコンクリートと異なり，紙やすりで研磨できることから，載荷面を紙やすりを用いて，平板で平滑度を調整しながら，Fig.6 に示したように， $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ の大きさに成型した．作製した材齢 1, 2, 3, 7, 14, 28 日の試験体を各材齢 3 本ずつ，直径及び高さ(最大値と最小値とを 0.1mm まで測定)を測定した．そして，これらの試験体を Fig.7 に示すように，万能試験機の台座に乗せ，上に球座を平行に乗せた状態で，「埋め込み工法に用いる根固め液及び杭周固定液の圧縮強度試験方法」(社団法人 コンクリートパイル建設技術協会)に準じて，試験体が破壊するまで荷重を作用させた⁴⁾．

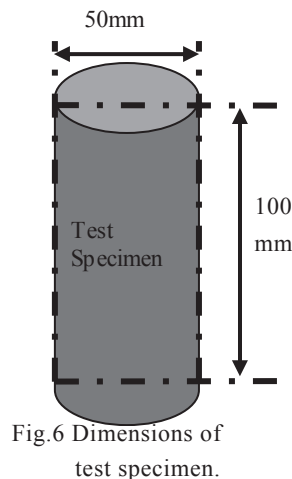


Fig.6 Dimensions of test specimen.

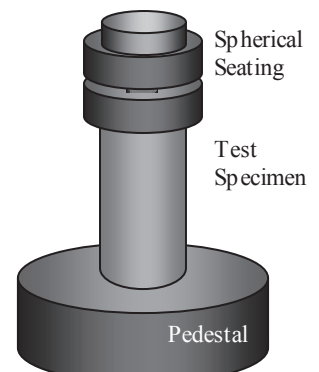


Fig.7 Appearance of test.

2.4 比抵抗の測定

比抵抗の測定は、Fig. 8 に示した市販の電気伝導率計を用いて行った。電極の寸法を Fig. 9 に示す。またその仕様を Table 3 に示す。また、測定に用いた試験体は、一軸圧縮試験体と同じ条件にて作製したものである。

比抵抗の計測においては、電極を試験体に挿入するため Fig.10 に示すように、 $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱試験体の中心にドリルで $\Phi 12 \times 75\text{mm}$ の孔を開けた。そして、孔中にブリーディング水を注入し、湿潤状態を確認後、電極を挿入した。ブリーディング水は、杭周固定液を打設後、硬化してきた杭周固定液と分離して抽出した。

3. 結果及び考察

3.1 一軸圧縮試験の結果

Fig.11 は、一軸圧縮試験の結果である。Fig.11 に示すように、半対数紙上で材齢と共に、一軸圧縮強さは直線的に増加していくことが分かる。3 本の試験体の一軸圧縮強さの平均値から、最もばらついた試験体の標準偏差は $\sigma_{\max} = 0.263(\text{N/mm}^2)$ であり、ばらつきが最も小さかった試験体の標準偏差は $\sigma_{\min} = 0.001(\text{N/mm}^2)$ であった。

3.2 比抵抗の測定結果

Fig.12~Fig.22 は、Table 2 に示す杭周固定液の比抵抗の経時変化散布図である。これらによると、材齢 1 時間から 3 時間までは、比抵抗が凝結作用により、土粒子間とセメント粒子間のイオンの動きが活性化するために減少する。しかし、材齢 3 時間から 1 日まで試験体が固化し始め、比抵抗も徐々に増加している。そして、材齢 1 日から材齢 28 日まで、比抵抗は試験体の組織変化が密になってゆくと共に増大している。Fig.23 は、材齢 1 日から 28 日までの比抵抗の測定結果をまとめたものである。Fig.23 に示すように、半対数紙上で材齢と共に、比抵抗は直線的に増加していくことが分かる。

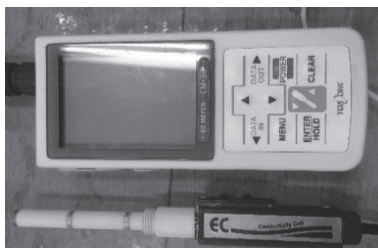


Fig.8 Portable type electrical conductivity meter.

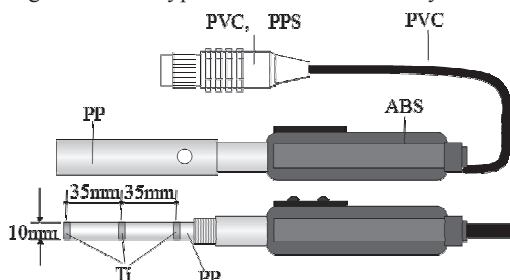


Fig.9 Dimensions of portable type electrical conductivity meter.

Table 3 Specifications of the electrical resistivity meter.

Description of product	Portable type electrical conductivity meter
Model number	CM-31P
Measuring method	Electrode method for two phases
Measurement range of electrical resistivity	$0.01 \Omega \cdot \text{m} \sim 1\text{k} \Omega \cdot \text{m}$
Application range of temperature	$0.0 \sim 100.0^\circ\text{C}$
Power-supply voltage	DC100V
Humidity range	$<80\text{RH}\%$

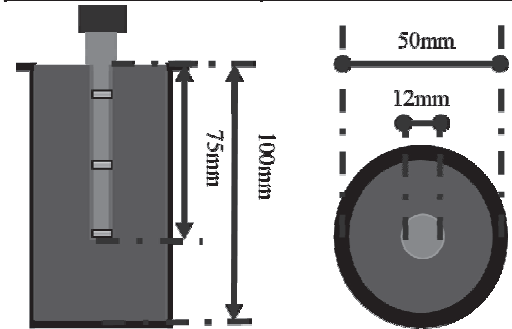


Fig.10 Image of measuring location.

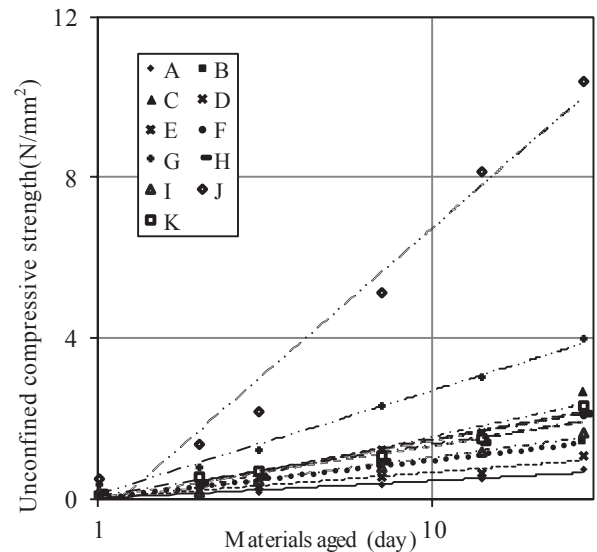


Fig.11 Relationship between unconfined compressive strength and material aged.

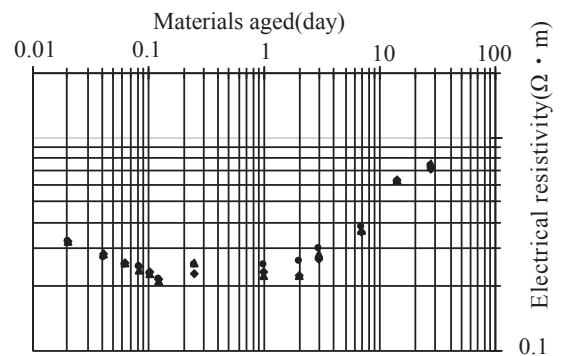


Fig.12 Relationship between electrical resistivity and material aged for type A.

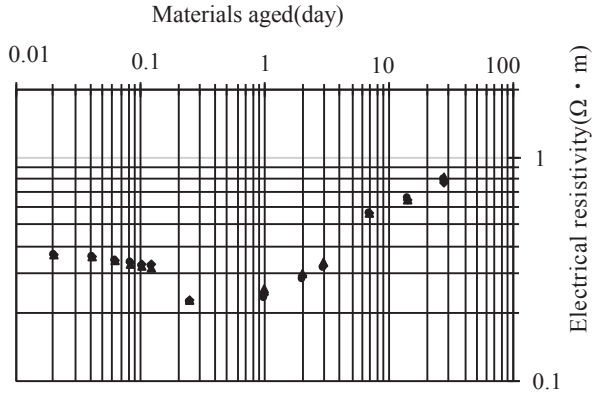


Fig.13 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. B.

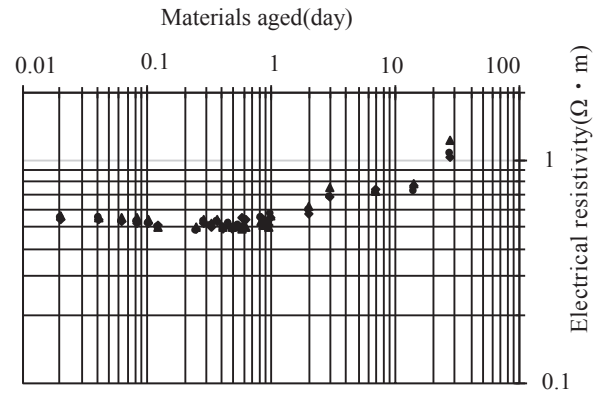


Fig.17 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. F.

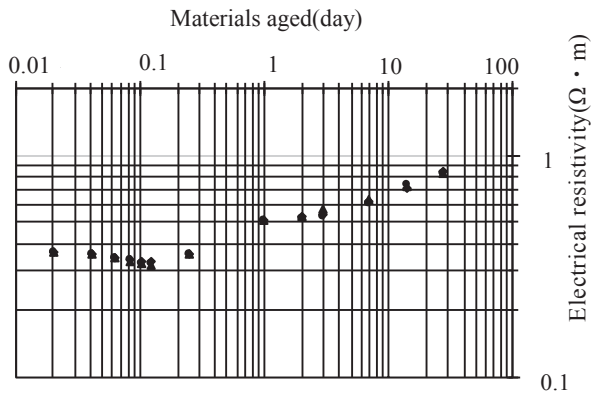


Fig.14 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. C.

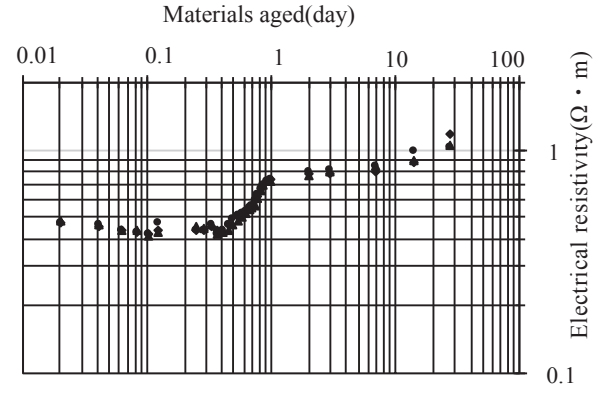


Fig.18 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. G.

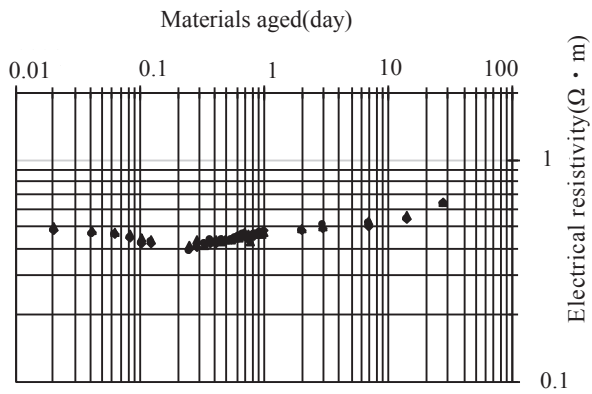


Fig.15 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. D.

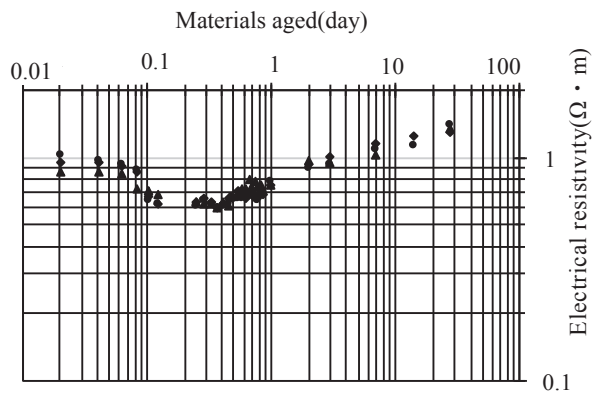


Fig.19 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. H.

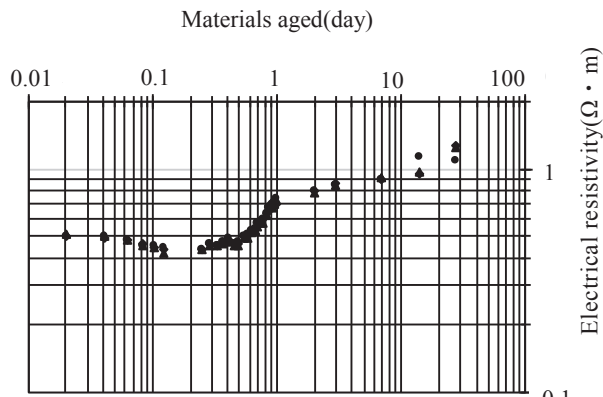


Fig.16 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. E.

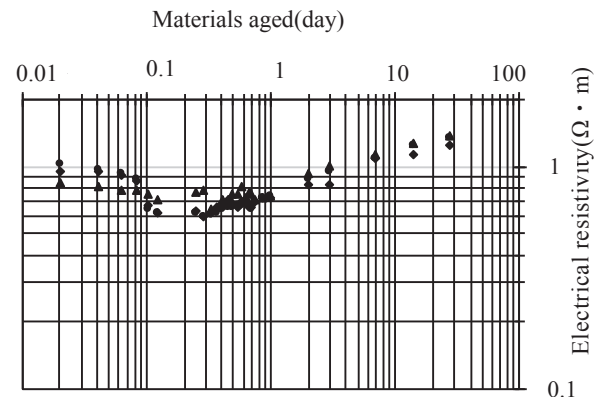


Fig.20 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. I.

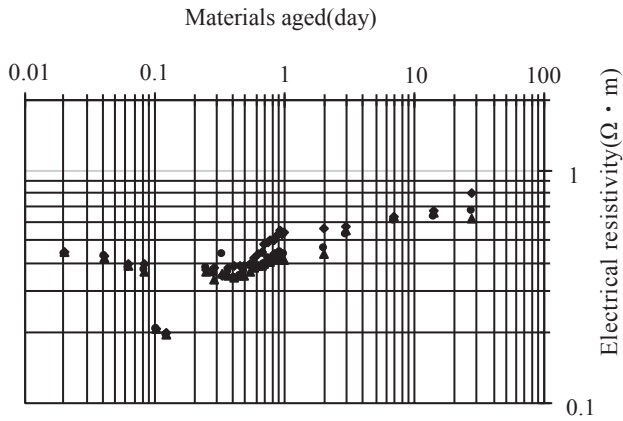


Fig.21 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. J.

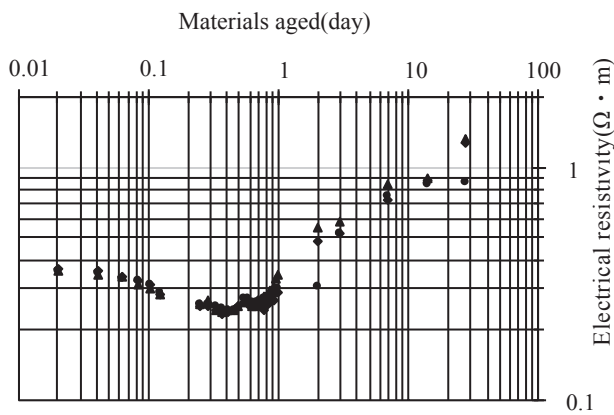


Fig.22 Relationship between electrical resistivity and material aged for type. K.

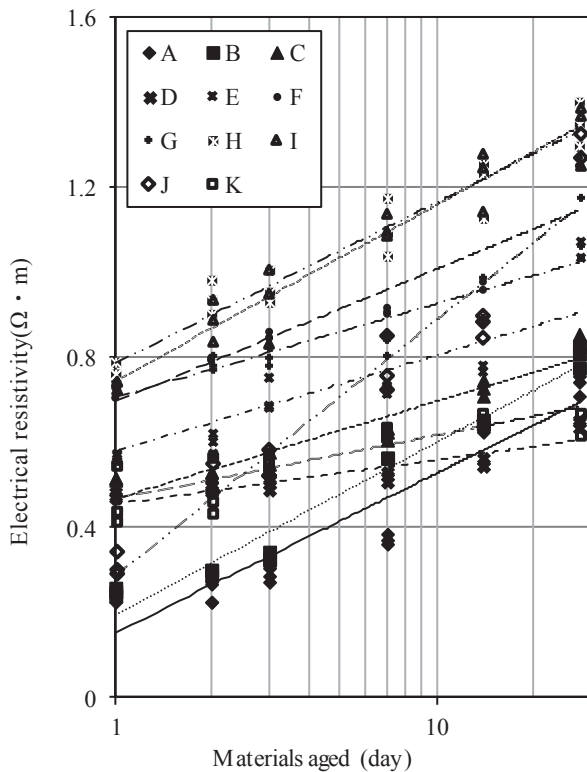


Fig.23 Relationship between electrical resistivity and material aged from 1 to 28 days.

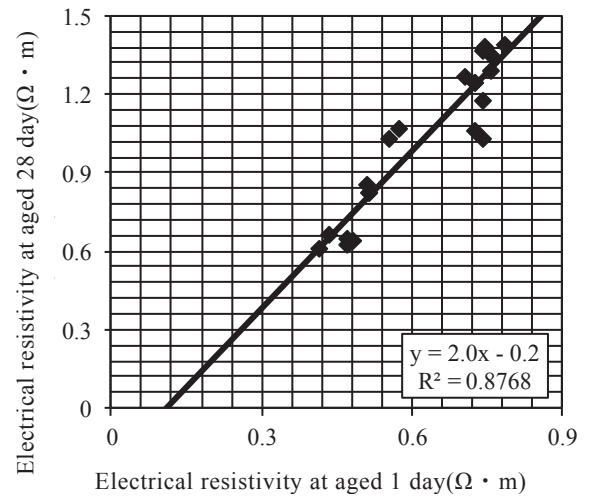


Fig.24 Relationship between electrical resistivity at 1 day and 28 days.

以上を Fig.24 のように、材齢 1 日と 28 日の比抵抗の関係としてまとめると、式(1)のように表される。

$$\rho_{28} = 2.0 \times \rho_1 - 0.2 \quad (1)$$

ここで、

ρ_{28} : 材齢 28 日における比抵抗($\Omega \cdot m$)

ρ_1 : 材齢 1 日における比抵抗($\Omega \cdot m$)

3.3 比抵抗と一軸圧縮強さとの関係

Fig.25 は、比抵抗と一軸圧縮強さの関係を示したものである。Fig.25 により、全体としての相関性の存在は見当たらないが、各要因における比抵抗と一軸圧縮強さは線形関係が成立することが分かる。

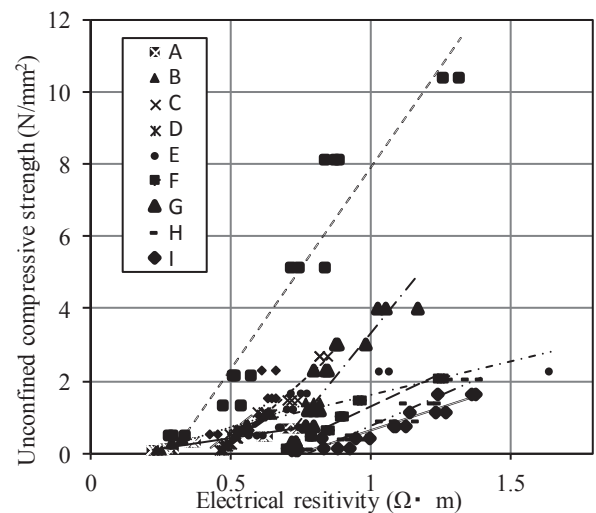


Fig.25 Relationship between unconfined compressive strength and electrical resistivity.

前述したように、一軸圧縮強さと材齢による変化、及び比抵抗と材齢による変化との間には、密接な関係が認められる。これらを線形関係により、 q_{u28}/ρ_{28} と q_{u1}/ρ_1 の

関係は Fig.26 に示すように、密接な関係が認められた。Fig.26 より、材齢 28 日の一軸圧縮強さは式(2)のように表すことができる。式(1)を式(2)に代入すると、式(3)のようになる。この式(3)は材齢 1 日の一軸圧縮強さと比抵抗から材齢 28 日の一軸圧縮強さを予測できることになる。これによる計算値と実測値を比較すると Fig.27 のように両者は概ね一致することが分かった。

$$q_{u28} = 7.0 \times q_{u1} \times (\rho_{28}/\rho_1) \quad (2)$$

$$q_{u28} = 14.0 \times q_{u1} - 1.5 \times (q_{u1}/\rho_1) \quad (3)$$

ここで、

q_{u28} : 材齢 28 日における一軸圧縮強さ(N/mm²)

q_{u1} : 材齢 1 日における一軸圧縮強さ(N/mm²)

ρ_{28} : 材齢 28 日における比抵抗($\Omega \cdot m$)

ρ_1 : 材齢 1 日における比抵抗($\Omega \cdot m$)

4. まとめ

本論文をまとめると、以下のようになる。

- 1) 打設直後から材齢 3 時間までの比抵抗値は減少傾向にあるが、材齢 3 時間から材齢 1 日までは試験体が徐々に固化し始め、その後 28 日まで両対数紙上で直線的に増大する。
- 2) 1)の結果より、材齢 1 日の比抵抗から材齢 28 日の比抵抗を予測することが可能である。
- 3) 一軸圧縮強さと材齢による変化及び比抵抗と材齢による変化をもとに、材齢 1 日の一軸圧縮強さと比抵抗から材齢 28 日の一軸圧縮強さを予測する式を提案することが出来た。

今後、現場にて打設直後の杭周固定液に電極を挿入し、式(3)の適用性について検討したい。

参考文献

- 1) 田村昌仁・藤井衛他 8 名：「電気比抵抗による改良体の品質評価に関する現場実験」，日本建築学会構造系論文集，第 531 号，pp. 95～99，(2000)。
- 2) 藤井衛他 4 名：「深層混合処理工法による改良体を対象とした品質管理・推定手法」，材料，Vol.53，No.1，pp.9～12，(2004)。

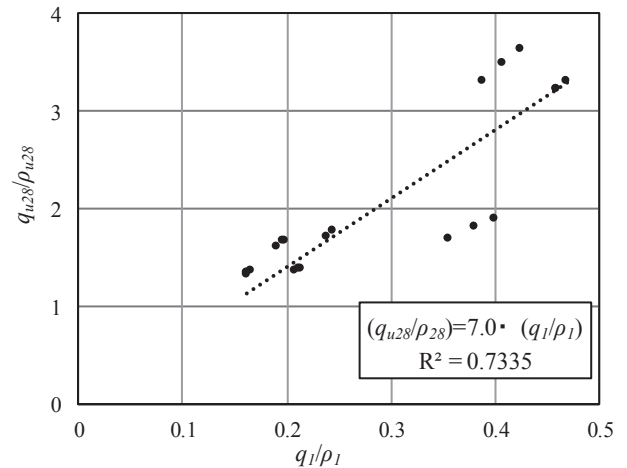


Fig.26 Relationship between q_{u28}/ρ_{28} and q_{u1}/ρ_1 .

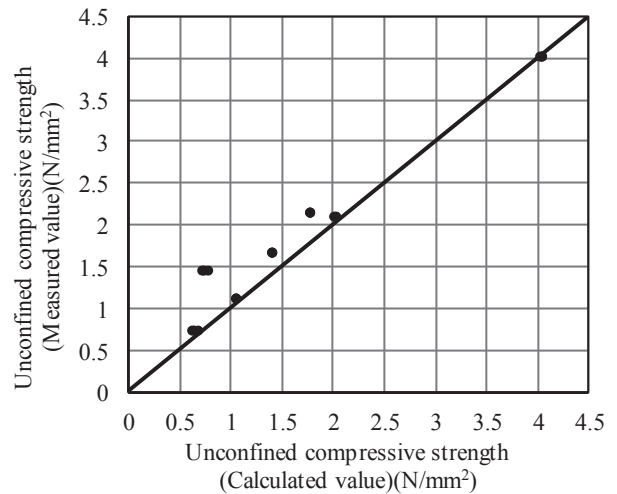


Fig.27 Compare with calculated value and measured value of unconfined compressive strength.

- 3) 高元浩・藤井衛他 6 名：「エコセメントの杭周固定液への適用性に関する研究(その 2 電気比抵抗による一軸圧縮強さの予測)」，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 375～376，(2011)。
- 4) コンクリートパイル建設技術協会：既製コンクリート杭の施工管理，(2013)。