

カオリン粒子を含む水ガラス系注入材で改良された土の一軸圧縮強さ

著者	山口 晶, 岡田 和成, 横井 勉, 金高 鉄次, 飛田 善雄
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	53
号	1
ページ	3-9
発行年	2019-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00024019/

カオリン粒子を含む水ガラス系注入材で改良された土の 一軸圧縮強さ

Unconfined Compression Strength of Grouted Soil Improved with Water Glass Grouting Material Including Kaolin Powder

山口 晶* 岡田 和成** 横井 勉**
Akira YAMAGUCHI Kazunari OKADA Tsutomu YOKOI

金高 鉄次*** 飛田 善雄*
Tetsuji KANETAKA Yoshio TOBITA

Abstract: Soil specimens improved with glass-type material including kaolin powder were subjected to unconfined compression strength tests. The specimens were made using a one-dimensional seepage apparatus. The unique relationship between the unconfined compression strength and condition of grout material was derived from the test results. It was confirmed that this relationship helps estimate the unconfined strength of grouted soil.

Keywords: Unconfined compression strength, Glass-type grout, Kaolin, One dimensional seepage test

1 はじめに

1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震では大規模な液状化被害が発生した。これらの地震では、既設構造物直下においても液状化が多数発生したことから、構造物の直下の地盤改良の実施が、現在の重要な課題である。

既設構造物直下の地盤改良を考えた場合、現状では浸透注入工法が一番適しているとされている。浸透注入の利点は、地盤自体がすでにもっている土構造を破壊することなく土粒子同士の結びつきを強くすることができること、直上からの施工のみでなく側面から注入管を挿入しての地盤改良も可能であることである。これにより、施工時に既設構造物に与える影響を最小限に抑えつつ、地盤を改良することが可能である。

浸透注入工法で用いられる注入材は大きく分けて二種類存在する。一つがセメント系注入材に代表される懸濁液型注入材であり、もう一つが水ガラ

ス系注入材に代表される溶液型注入材である。

汎用的なセメント系注入材の化学組成は、 SiO_2 が 15~25 %、 Al_2O_3 が 3.5 %以上、 CaO が 40~70 %、 SO_3 が 4.0 %以上で形成されている[1]。セメント系注入材を地盤に注入すると、セメント自体の水和反応により、ケイ酸カルシウム水和物が生成し、土粒子が接着され、土中水の一部が水和物中に固定される。また、セメントの水和反応により生成する水酸化カルシウムは、反応性の高い粘土鉱物とポゾラン反応を起こし、改良土の長期強度の向上に寄与する。改良土は短期強度と長期強度に優れるため、恒久的な地盤改良材として一般的に用いられている。ただし、セメント粒子の平均粒径は、普通セメントで 20 μm 、超微粒子セメントで 4 μm 、近年開発されている極超微粒子セメントで 1.5 μm [2]程度である。またセメント系注入材は、対象土質や配合条件により土壤環境基準を超える六価クロムの溶出が認められる場合がある[2]。

水ガラス系注入材は、主剤として水ガラス ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 溶液)を用い、硬化剤としてセメントなどの懸濁液や酸あるいは酸性塩を用いる注入材である。硬化剤としてセメントやベントナイトを用

* 東北学院大学

** 日本基礎株式会社

*** 東曹産業株式会社

いるものを懸濁型、無機系や有機系の溶液の硬化剤を用いるものを溶液型という。特に溶液型は懸濁物質を含まないため、浸透性に優れ砂質土にも注入可能であるが、強度はセメント系よりも劣る。従来は仮設に対して使用される場合が多かったが、近年は耐久性が確認されてきたことから、大きな強度を必要としないような液状化対策などの恒久的対策に使用される事例が増加している。

水ガラス系注入材の利点は、懸濁液型注入材よりも相対的に浸透性が良いことであるが、固結時に注入材の体積収縮が発生することが場合によっては問題になる。土粒子のみで形成された地盤であれば、注入材の体積収縮により土粒子同士を引き寄せる効果が発揮され、見かけ上有効応力が増加することになる。しかし、杭や構造物の基礎部分を含む地盤改良となった場合、注入材の体積収縮により、地盤と構造物の間に隙間が発生してしまい、十分な改良効果が得られない場合がある。なお、ホモゲルでは体積収縮が 15～25 % 発生することが分かっている[3,4]。著者らは、この注入材の体積収縮を抑制する方法として、水ガラス系注入材にカオリンを混合する方法を考案した。現在は、カオリンの種類と混合量が、体積収縮量の抑制に与える影響を検討中であるがカオリンを混合しない

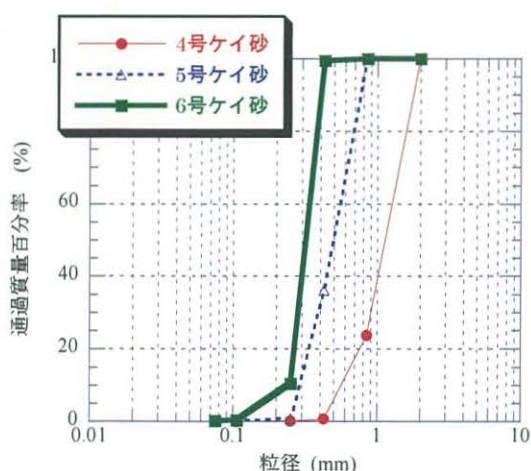


表 2 実験条件

実験名	試料	水ガラス濃度 (%)	カオリン混合量 (g/l)
T4-125-0	ケイ砂 4 号	12.5	0
T4-125-15			15
T4-125-45			45
T4-150-0		15.0	0
T4-150-15			15
T4-150-45			45
T4-175-0		17.5	0
T4-175-15			15
T4-175-45			45
T4-200-0		20.0	0
T4-200-15			15
T4-200-45			45
T4-225-0		22.5	0
T4-225-15			15
T4-225-45			45
T5-125-0	ケイ砂 5 号	12.5	0
T5-125-15			15
T5-125-45			45
T5-150-0		15.0	0
T5-150-15			15
T5-150-45			45
T5-175-0		17.5	0
T5-175-15			15
T5-175-45			45
T5-200-0		20.0	0
T5-200-15			15
T5-200-45			45
T5-225-0		22.5	0
T5-225-15			15
T5-225-45			45
T6-125-0	ケイ砂 6 号	12.5	0
T6-125-15			15
T6-125-45			45
T6-150-0		15.0	0
T6-150-15			15
T6-150-45			45
T6-175-0		17.5	0
T6-175-15			15
T6-175-45			45
T6-200-0		20.0	0
T6-200-15			15
T6-200-45			45
T6-225-0		22.5	0
T6-225-15			15
T6-225-45			45

ダーにより計測した。

実験手順を以下に箇条書きで示す。図 3 に各ステップの模式図を示す。

- 1) アクリル管下部に下ペDESTALと孔が空いたアクリル円盤を設置した後、アクリル管内に土試料を乾燥落下法で堆積させ、側面を軽くたたくことで密度を調整する。その後、上部に孔が空

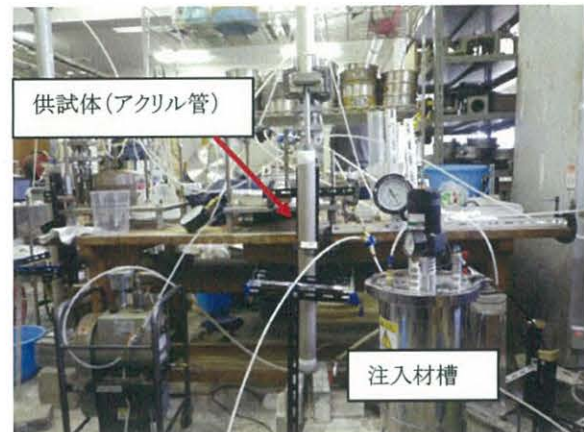


図 2 一次元浸透実験装置

- いたアクリル円盤を置き、0.2 MPa の垂直力をかける。
- 2) 水頭差 1.2 m を保ちアクリル管の下部から水を通水する。上部から水が流出したことを確認し、通水を止める。
- 3) 所定の濃度の注入材をアクリル管下部から注入圧 (0.05 MPa) をかけて浸透させる。
- 4) 計算上試料内の水が注入材に置き換わった直後付近で、濁りが見られるものの透明に近い注入材が上部から流出する。
- 5) さらに、継続して注入材を流し、懸濁した注入材がアクリル管上部から排出してから、300 ml 流出させる。所定量に達したら注入を止める。
- 6) 注入材が流出しないようにアクリル管下部を非排水状態とし、注入材の注入管をアクリル管から取りはずす。
- 7) 上部に湿った布を被せてビニールで覆い、室温 25 °C で所定の日数 (14 日間) 養生を行う。
- 8) 所定の日数に達したら、アクリル管も含めて高さ 12 cm に切断する。アクリル管から試料を取り出し、一軸圧縮試験を行う。

3 実験結果と考察

3.1 水ガラス濃度と一軸圧縮強さ

表 2 に示したそれぞれの実験条件毎に 5 つの供試体で一軸圧縮試験を行っているが、供試体の位置により一軸圧縮強さが大きく偏るような傾向はみられなかった。そこで、これ以降は、一つの実験条件の一軸圧強さの平均を一軸圧縮強さの実験値 $q_{u,exp}$ とし、それをもとに議論を行う。

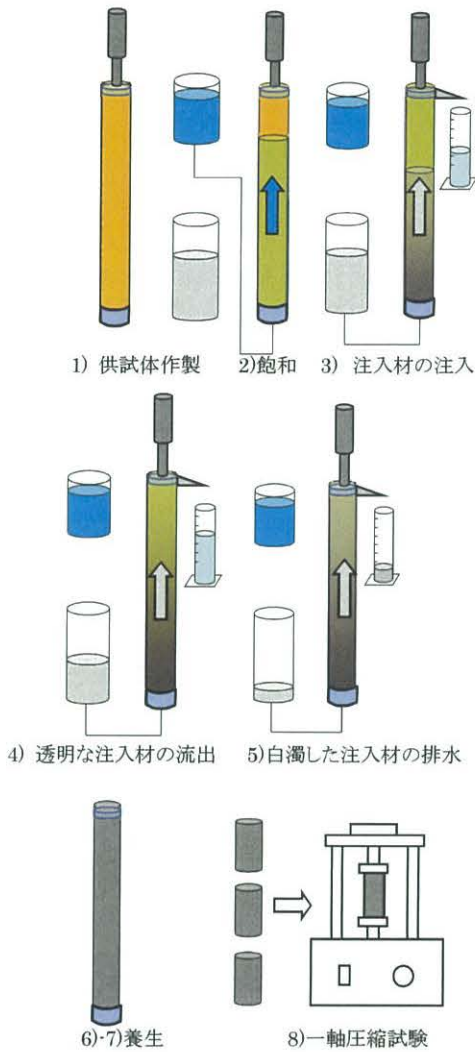


図3 実験手順模式図

図4にケイ砂4号, 図5にケイ砂5号, 図6にケイ砂6号の水ガラス濃度と一軸圧縮強さ $q_{u,exp}$ の関係をカオリン混合量毎に示す。図中の直線は近似直線である。一軸圧縮強さ $q_{u,exp}$ は水ガラス濃度に対してほぼ直線的に増加しており, その近似直線は x 軸と0~11%の範囲で交わっている。なお, これらの近似直線の x 軸との交点の平均を計算したところ, 7.1%であった。この物理的意味は, 砂試料の供試体は注入材の水ガラス濃度が7.1%以下の場合には自立しないため, 一軸圧縮強さを求めることができないことを示している。そこで, 図4~6の実験結果について, 水ガラス濃度が7.1%で一軸圧縮強さ $q_{u,exp}$ が0kPaを通る近似直線を求め, これを補正近似直線とした。図4~6に対して補正近似直線に書き換えたものが図7~9である。これらのグラフを比較すると, ケイ砂4号から5号, 6号と試料の粒径が小さくなるに従い補正近似直線の傾きが大きくなること, 図7~9の全

てにおいてカオリン混合量が多くなると近似直線の傾きが大きくなることわかる。

3.2 平均粒径 D_{50} と補正近似直線の傾き

ここで, 図7~9の補正近似直線の傾きを, カオ

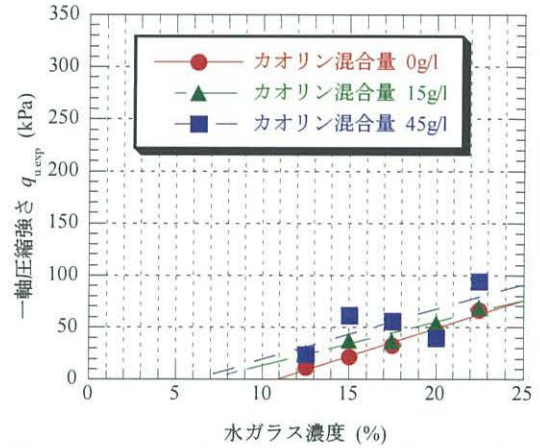


図4 ケイ砂4号の水ガラス濃度と一軸圧縮強さの関係

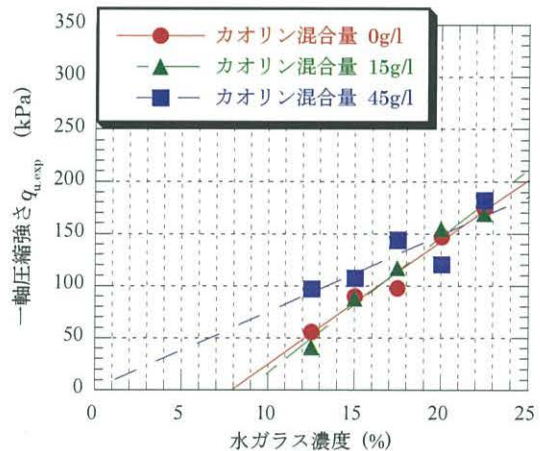


図5 ケイ砂5号の水ガラス濃度と一軸圧縮強さの関係

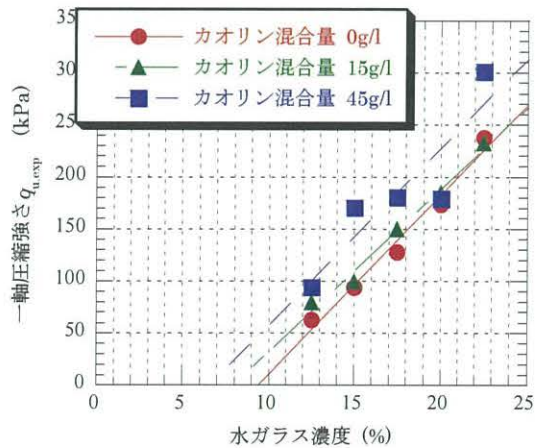


図6 ケイ砂6号の水ガラス濃度と一軸圧縮強さの関係

リンの混合量に対して整理する。図7~9の補正近似直線の傾きを、カオリンの混合量に対して、試料別に整理した図が図10である。この図においても、試料の粒径が小さくなると近似直線の傾きが大きくなること、カオリン混合量が多くなると近似直線の傾きが大きくなることが明確に示されている。カオリンを混合することにより、一軸圧縮強さが低下しないこと、若干ではあるが一軸圧縮強さがカオリンの混合量に応じて大きくなることを確認できた。

4 一軸圧縮強さの推定

4.1 一軸圧縮強さ $q_{u,est}$ の推定手法

本実験結果から、水ガラス濃度と一軸圧縮強さ $q_{u,exp}$ の関係は補正した近似直線で表すことが可能で、その補正近似直線の傾きは、カオリン混合

量によって異なることが示された。その補正近似直線の傾きをカオリン混合量で整理すると、試料の粒径毎に図10のようになることが分かった。この関係は、地盤の粒径、カオリン混合量、水ガラス濃度に応じて、一軸圧縮強さ q_u が一義的に定まる可能性があることを示している。従って、この関係を用いることにより、カオリンを混合した水ガラス注入材で地盤を改良した場合、改良体がどの程度の一軸圧縮強さ q_u になるかを推定できる可能性がある。そこで、本研究の実験結果をもとに、一軸圧縮強さの推定値 $q_{u,est}$ の算出方法を検討する。

ここで提案する一軸圧縮強さの推定値 $q_{u,est}$ の算出手順は次の通りである。

まず図10の関係は3つの粒径の試料の実験結果であるが、試料の粒径を平均粒径で代表させることにより、これをある範囲の任意の平均粒径に拡張を試みる。

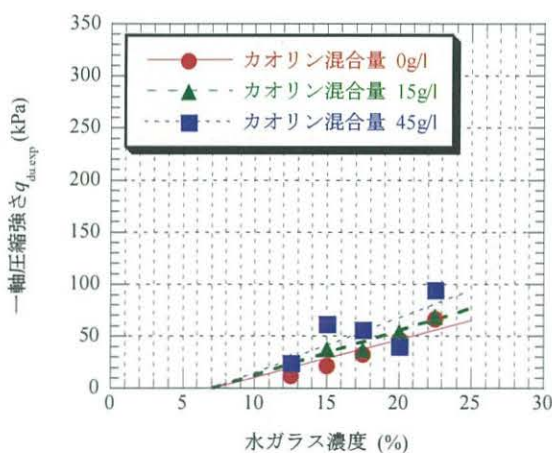


図7 ケイ砂4号の水ガラス濃度と一軸圧縮強さの関係

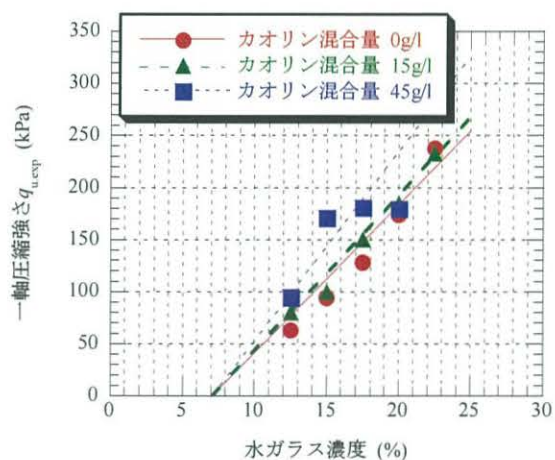


図9 ケイ砂6号の水ガラス濃度と一軸圧縮強さの関係

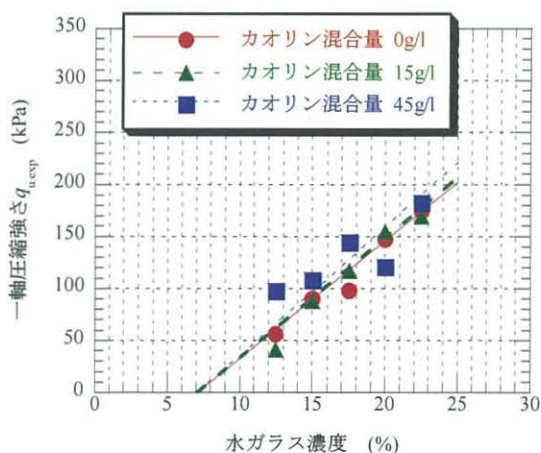


図8 ケイ砂5号の水ガラス濃度と一軸圧縮強さの関係

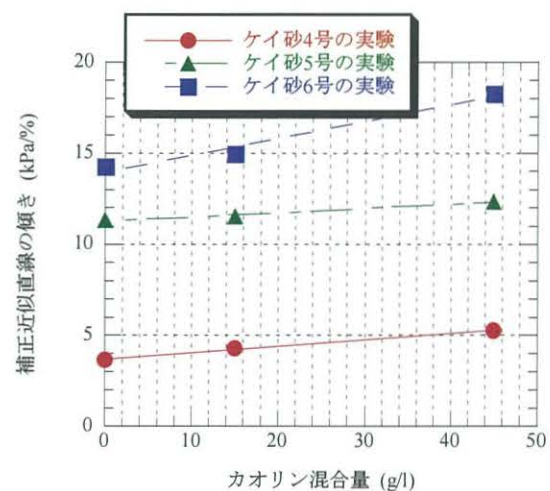


図10 粒径に対する水ガラス濃度と一軸圧縮強さの補正近似直線の傾き

図 10 では、近似直線は平均粒径が小さいほど上に位置し、傾きも大きくなっている。そこで、試料の平均粒径 D_{50} と図 10 中の近似直線の切片と傾きを整理することとした。平均粒径に対する図 10 の近似直線の切片を図 11 に、傾きを図 12 に示す。図 10 は二次曲線、図 11 は累乗の近似曲線で結んだ。図 10 を見るかぎり、近似曲線で結ぶことに問題はないと思われるが、例えば粒度分布が広い範囲にあるような土に対してはこの仮定が成り立たない可能性がある。仮に図 11 と図 12 中の近似曲線関係が成り立つとした場合、0.35 mm から 1.14 mm の範囲の任意の平均粒径 D_{50} で、図 10 に示したような補正近似直線の傾きとカオリン混合量の関係を示す直線を描くことができる。例として 0.4 mm から 1.2 mm までの平均粒径 D_{50} で、カオリン混合量と補正近似直線の傾きを描いたものを図 13 に示す。この図より、図 7~9 に対応する水ガラス濃度と一軸圧縮強さの推定値 $q_{u,est}$ の関係を示

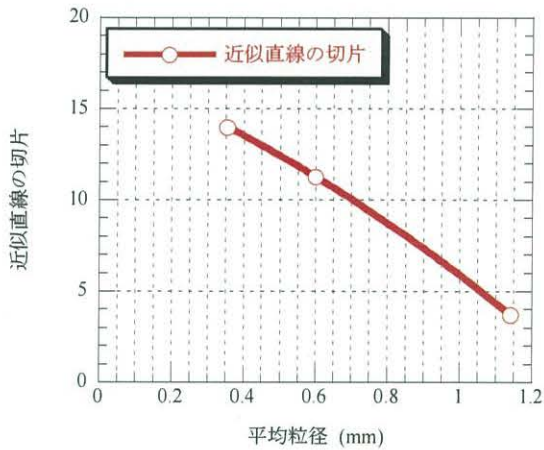


図 11 図 10 の近似直線の切片と平均粒径の関係

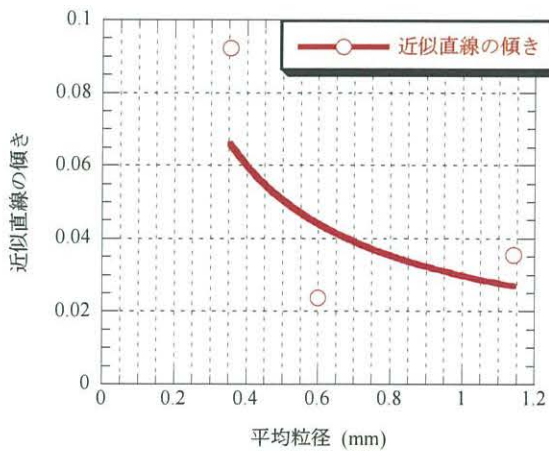


図 12 図 10 の近似直線の傾きと平均粒径の関係

すことが可能となる。例としてカオリン混合量が 10 g/l の場合の、水ガラス濃度と一軸圧縮強さの推定値 $q_{u,est}$ の関係を図 14 に示す。また、試料の平均粒径が 0.5 mm だった場合の水ガラス濃度と一軸圧縮強さの推定値 $q_{u,est}$ の関係を図 15 に示す。

本研究で得られた実験結果について、仮に近似曲線等で補間できると考えた場合には、図 14 や図 15 で示したように、ある範囲における任意の平均粒径、水ガラス濃度、カオリン混合量の注入材で改良した試料の一軸圧縮強さ $q_{u,est}$ を算出することが可能となる。

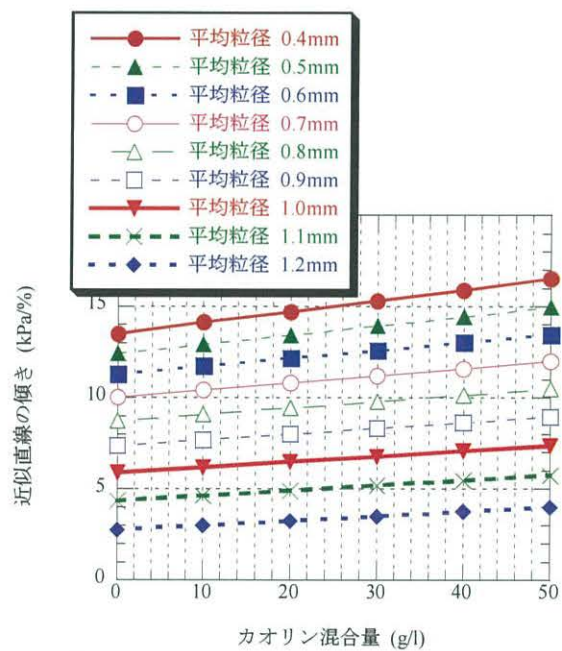


図 13 推定した粒径に対する水ガラス濃度と一軸圧縮強さの近似直線の傾き

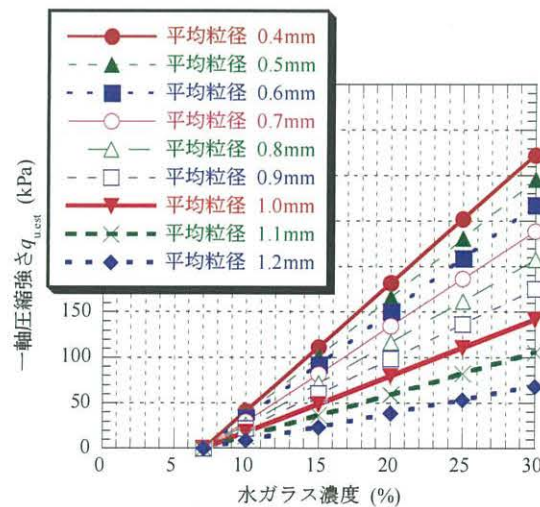


図 14 カオリン混合量が 10g/l とした場合の水ガラス濃度と推定した一軸圧縮強さ

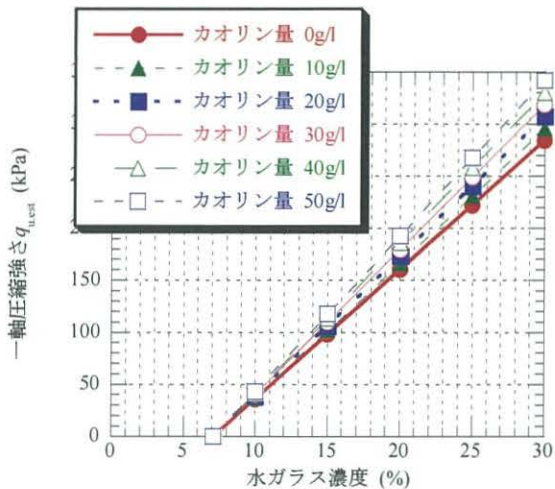


図 15 平均粒径が 0.5mm とした場合の水ガラス濃度と推定した一軸圧縮強さの関係

4.2 推定手法の確認

ここでは前節(4.1)で提案した一軸圧縮強さの推定値 $q_{u,est}$ の妥当性を確認することとする。ただし、本注入材は開発途中であり実際の地盤に注入してその効果を確認した事例がない。そこで、本研究で行った実験について、前節(4.1)で示した方法で一軸圧縮強さの推定値 $q_{u,est}$ を算出し、一軸圧縮強さの実験値 $q_{u,exp}$ と比較することとする。これは近似式を求めた元データと近似式から求めた推定データを比較することを意味し、近似の精度が高いほど、一致した結果となる。

図 16 に実験値と推定値の比較を示す。直線が 1対1 の関係を示している。プロットは概ね推定値の 100 kPa 以内の範囲に収まっている。結果を整理する過程で行なった近似における誤差の影響は少ないと言える。

5 まとめ

本研究では、カオリンを混合した水ガラス注入材を用いて一次元浸透実験を行い、養生後に一軸圧縮試験を行った。カオリンを混合することにより、一軸圧縮強さが低下するような悪い影響がないことを確認するとともに、カオリンの混合量に応じて一軸圧縮強さが若干ではあるが上昇することが分かった。一軸圧縮強さ $q_{u,exp}$ を水ガラス濃度、平均粒径、カオリン混合量で整理することにより、任意の平均粒径、水ガラス濃度、カオリン混合量における一軸圧縮強さの推定値 $q_{u,est}$ を算出する手法を提案した。その手法に基づいて、本実験結果と算出手法を用いた推定値を比較したところ、両者の

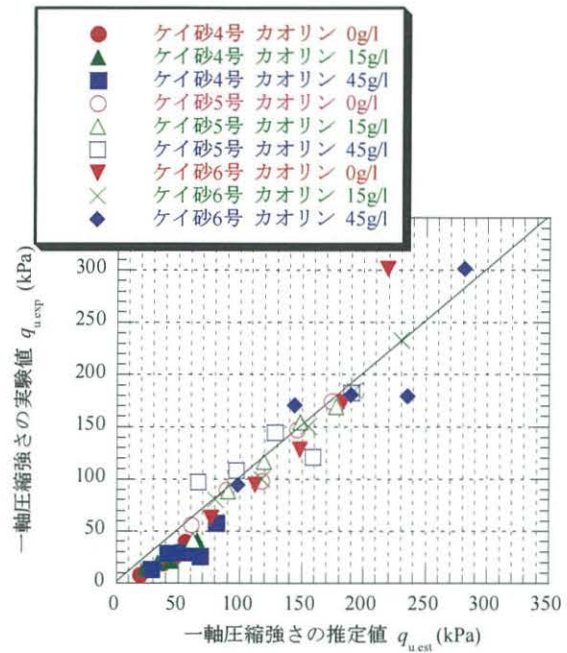


図 16 一次圧縮強さの推定値と実験値の比較
差が 100 kPa の範囲内に収まったことから、提案した算出手法は妥当な実験結果を与えるものであったことが確認できた。

カオリンを混合した水ガラス注入材については、まだ開発途中であり、実地盤に注入して強度を確認した事例がない。今後は、実際の地盤に注入した事例について、本推定手法を適用し、その妥当性を確認する必要がある。また、実験データも粒径がそろったケイ砂試料による実験結果であり、粒径が広い範囲で分布している試料にも適用できるか等を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 社団法人セメント協会: ``セメント系固化材による地盤改良マニュアル'', 技法堂出版株式会社 (2012), pp.24.
- [2] 小泉悠, 田中俊行, 竹内仁哉, 金沢智彦, 西垣誠: ``極超微粒子セメント注入材による砂質土地盤への注入工法の開発'', 材料, Vol.61, No.1(2012), pp.52/57
- [3] 石田聖一, 赤木寛一, 鈴木慎一, 野中政幸: ``薬液で固結させた砂の長期耐久性について'', 土木学会第 58 回年次学術講演会 (2003), pp.1141/1142
- [4] 地盤注入開発機構 恒久グラウト・本設注入協会: ``恒久グラウト注入工法技術マニュアル'', 恒久グラウト・本設注入協会 (2017), pp186/188