

地盤改良固化土の粘着力と一軸圧縮強さの関係

北島 明 福島 伸二^{*1}

概 要

軟弱地盤の盛土造成や構造物構築によるすべり破壊防止あるいは圧密沈下抑制のためにセメントなどの固化材を用いた固化改良工法が適用される例が多いが、複合地盤的設計法を採用する場合と構造物的設計法を採用する場合に分けられ、それぞれ必要な固化土の強度指標が相違する。すなわち、複合地盤的設計法は固化土の三軸圧縮試験による強度パラメータ（粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ）により目標強度が設定されるのに対して、構造物的設計法は一軸圧縮試験による一軸圧縮強さ q_u のみで足りる場合が多い。一方、実施工での固化改良部の強度管理は試験実施が容易な q_u が採用されるのが普通である。したがって、複合地盤的設計法では加えた固化材量に強く依存する c と、これに対応する q_u の関係が必要となる。そこで、本稿は固化改良地盤を複合地盤的設計により取り扱う場合を想定し、筆者らが経験した地盤改良工事で実施した室内配合試験の結果を整理して実務的に利用できる固化土の c と q_u の関係式を提案するものである。

Relationship between cohesion strength and unconfined compression strength of cement-improved soil

Abstract

There are many cases where a soil-improving method using cement is selected for avoiding sliding failure or consolidation settlement on soft ground. Thinking about the design method, these improvement methods are divided into two types, one about composite ground and the other to structure, and each of them requires a different strength index. In the case of composite ground, the design method requires cohesion strength and internal friction angle by a series of triaxial compression tests, and the other needs unconfined compression strength by unconfined compression tests. In general, only unconfined compression strength is used for a quality control related to strength at a construction site, so it is necessary to know the relationship between cohesion strength and unconfined compression strength.

In this paper, we suggest a relational expression between cohesion strength and unconfined compression strength by our data from numerous ground improvement works.

キーワード： 地盤改良固化土、一軸圧縮強さ、
粘着力

*1 土木本部土木エンジニアリングセンター

§1. はじめに

軟弱地盤の盛土造成や構造物構築によるすべり破壊防止あるいは圧密沈下抑制のためにセメントなどの固化材を用いた固化改良工法が適用される例が多いが、改良深さは 5m を超えるものが一般的で中層あるいは深層固化改良工法が対象となる。中層・深層固化改良工法は設計法に着目すると、複合地盤的設計法²⁾を採用する場合と構造物的設計法³⁾を採用する場合に分けられ、それぞれ必要な固化土の強度指標が相違する。すなわち、複合地盤的設計法は軟弱地盤に新たに加わる荷重によるすべり破壊や支持力不足の対策のための固化改良部を一種の地盤とみなし、内部をすべり面が通るとした安定計算により改良仕様を決定するもので、固化土の三軸圧縮試験による強度パラメータ（粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ）により目標強度が設定される。

これに対して、構造物的設計法は固化改良部をすべり面の通らない構造物とみなし、新たに加わる荷重が固化改良部の許容応力を超えないように固化改良仕様を決定するのが基本なので、一軸圧縮試験による一軸圧縮強さ q_u のみで足りる場合が多い。一方、実施工での固化改良部の強度管理は試験実施が容易な q_u が採用されるのが普通である。したがって、複合地盤的設計法では加えた固化材量に強く依存する c と、これに対応する q_u の関係が必要となる。

そこで、本稿は固化改良地盤を複合地盤的設計により取り扱う場合を想定し、筆者らが経験した地盤改良工事で実施した室内配合試験の結果を整理して実務的に利用できる固化土の c と q_u の関係式を提案するものである。

§2. 従来の固化土の粘着力と一軸圧縮強さの関係

地盤改良分野では一般的に

$$c = (1/2) \cdot q_u \quad (1)$$

なる関係が採用されている⁷⁾。上式では、 c は暗黙のうちに飽和粘性土地盤の短期安定問題における全応力表示の非圧密・非排水強度 σ_{uu} を用いているのと同じと思われる。しかしながら、長期安定問題的に扱う複合地盤的設計法における固化土の c は、周辺地盤の強度パラメータとの整合性を考えれば有効応力表示の値が求められ、安定計算に採用できる合理的な固化土の c と q_u の関係が必要となる。

固化土は固化対象土に固化材を加えただけの非締固め型と、固化材を加えてから締固めをする締固め

型の二つに分けられる。前者は細粒分を多く含む高含水比の軟弱地盤などの中・深層固化改良のような固化材を混合するだけで、 c 強度成分だけを確保するもので、 ϕ 強度成分を期待しないものである。後者は盛土材などの粘着力不足を補うために固化材を加えてから通常の盛土材と同様に一定層厚で撒き出してから締固める浅層固化改良に属するもので、 c 強度成分だけでなく、盛土材に粗粒分が含まれているため締固めて土粒子間のかみ合せ効果による ϕ 強度成分も期待するものである。

次章以下に、筆者らが経験した地盤改良工事で実施した室内配合試験のうちの代表的な非締固め型固化土と締固め型固化土のそれぞれにおける c と q_u の関係を紹介し、すべての試験結果の検討から両者の関係式を提案する。

§3. 非締固め型固化土の一軸・三軸圧縮強度特性

非締固め型固化土の試験は、ある用地造成工事において盛土築造によるすべり破壊対策として中層固化改良を施工することになった軟弱地盤から採取した粘性土試料 KKK-Ac を用いて実施した。試料は軟弱地盤表面から深さ 2~3m から油圧ショベルによりバケット掘削したもので、図 1 に粒度曲線を記号◇印により示し、粒度特性が最大粒径 $D_{max} = 9.5\text{mm}$ 、 $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分含有率 $F_c \approx 70 \sim 80\%$ にあり、自然含水比が $w_n \approx 89\%$ であった。

固化材は高含水比粘性土の固化改良に適したセメント系固化材（高有機質土用）を水・固化材比 $w/c = 1.0$ によりスラリー化して使用した。固化材添加量は固化対象土 1m^3 当たりの質量 ΔM_c (kg/m^3) により表示する。一軸圧縮試験は、一般に非締固め型固化土の対象となる強度レベルが締固め型のものに比較して高いことを考慮して、固化土の試験は q_u が $1,500\text{kN}/\text{m}^2$ を超える範囲まで実施した。

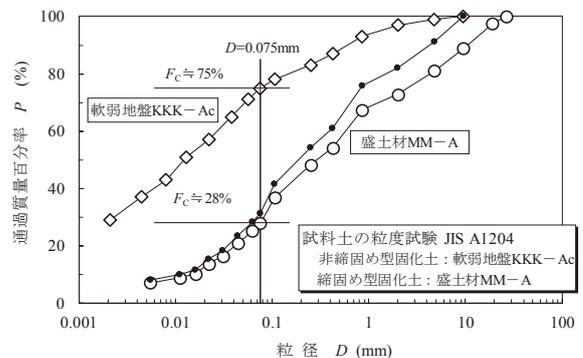


図 1 試料土(軟弱地盤と盛土材)の粒度曲線

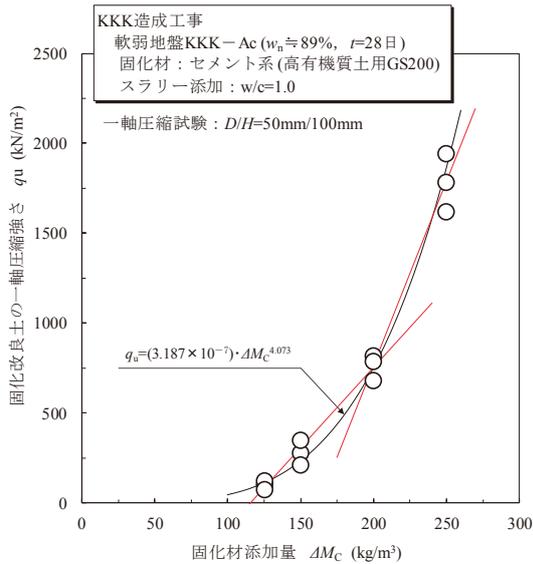


図2 非締固め型固化土の q_u と ΔM_c の関係

図2は ΔM_c を $\Delta M_c=125, 150, 200, 250\text{kg/m}^3$ と変えて固化させた供試体の一軸圧縮試験により得られた q_u と ΔM_c の関係を示す。図から、 q_u は ΔM_c に応じて増加し、低強度から高強度までの広範囲の強度レベルでは曲線的な増加傾向を示すことがわかる。ただし、強度範囲を限定すると、例えば強度レベルを $q_u=750\text{kN/m}^2$ 前後で二つに分けるとそれぞれの強度範囲で比例的な関係が認められるので赤色で示したように直線近似もできるようである。

図3は試験を実施したシリーズの中で ΔM_c が最も少ない $\Delta M_c=125\text{kg/m}^3$ の固化土について等方圧密 $\sigma_{3c}=50, 100, 200\text{kN/m}^2$ の非排水三軸圧縮試験を実施して得られた偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ・ 過剰間隙水圧 u と軸ひずみ ϵ_1 の関係を示す。図4は、図3から最大偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ とその時の過剰間隙水圧 u_f を読み取り、有効応力表示での Mohr の応力円を描いてその包絡線を直線により近似して求めた強度パラメータ (c', ϕ') を示す。固化土の ϕ' は $\phi' \approx 20^\circ$ と小さく、これは固化対象の試料が細粒分を多く含む粘性土であるため固化しても内部摩擦的強度成分が期待できないためであり、非締固め型固化土の特徴といえよう。

ΔM_c の少ない低強度の固化土では、図4に示したように、 (c', ϕ') を破壊時の Mohr の応力円の包絡線を直線により近似して求めやすい。しかしながら、 ΔM_c が多い高強度の固化土では、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ は σ_{3c} による相違が少なく、試験のバラツキもあることから σ_{3c} に対応したものとにならないなど、Mohr の応力円の包絡線を直線により近似しにくくなる。高強度の (c', ϕ') を試験で得られた Mohr の応力円の接線

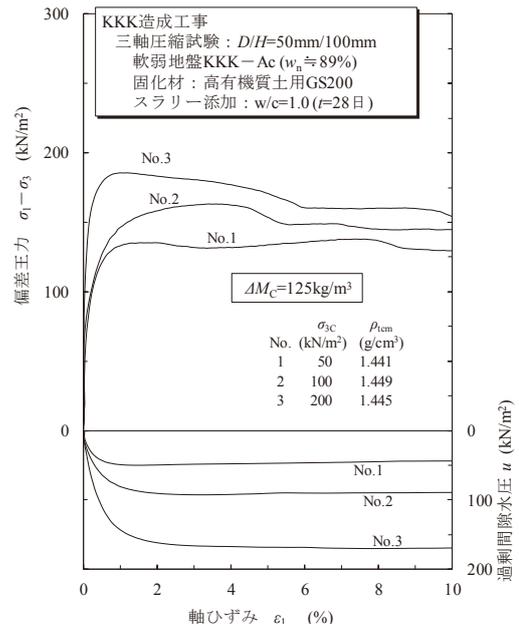


図3 非締固め型固化土の応力～ひずみ曲線

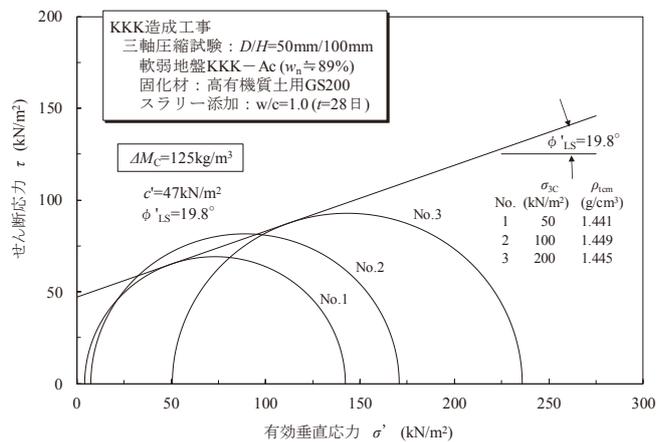


図4 非締固め型固化土の強度パラメータ

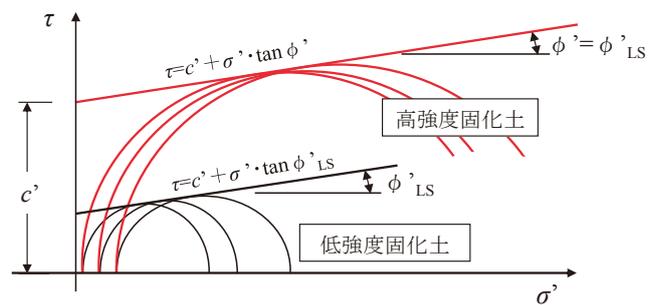


図5 非締固め型固化土の粘着力 c' の求め方

から機械的に直線近似して求めると、 c' を正確に評価できない可能性がある。また固化土の強度発現は固化材による固結構造の形成による c' の増加が主体なので、 ΔM_c の増加が ϕ' の増加につながることは明らかである。そこで高強度固化土の ϕ' は図5に概念的に示すように ϕ' の求めやすい ΔM_c の少ない低

強度固化土の ϕ'_{ls} による直線を破壊規準として Mohr の応力円の包絡線を近似して求めることにした。

図 6 は ΔM_C を変えた固化土の試験から得られた結果から $\phi'_{ls}=19.8^\circ$ の破壊規準により求めた c' と ΔM_C の関係を示す。図から、 c' は図 2 に示した $q_u \sim \Delta M_C$ 関係と同様に ΔM_C の増加に対して曲線的な増加傾向を示すことがわかる。固化土の c' と q_u の関係は上述した式(1)を用いずに、図 2 に示した $q_u \sim \Delta M_C$ 関係と図 6 に示した $c' \sim \Delta M_C$ 関係を用いて、同一の ΔM_C により発揮されるそれぞれの値を対応させて求めることにする。

固化土は強度が高くなるほど脆性的性質が卓越し c'/q_u が一定とならないため、 c'/q_u の逆数である q_u/c' と q_u の関係を双曲線

$$q_u/c' = q_u / (\alpha + \beta \cdot q_u) \quad (2)$$

により近似した結果を図 7 に示す。図から、 q_u/c' は q_u の増加に対してある値に収束する傾向にあるが、その値は双曲線により $1/\beta=3.53$ と推定できる。

§4. 締固め型固化土の一軸・三軸圧縮強度特性

締固め型固化土の試験に使用した土（以下、崩積土と称する）は $w_n=29.7\%$ であり、図 1 に粒度曲線を記号○印により示したように $D_{max}=53mm$, $F_C \approx 28\%$ の粒度状態にあったが、供試体寸法を考慮して、9.5mm 以上の粒径分を除いたカット粒度状態（記号●印）で使用した。固化材は高炉 B セメントを粉体添加とし固化材添加量は湿潤状態にある $1m^3$ の土に対する質量 ΔM_C (kg/m^3) により表示する。

図 8 は $\Delta M_C=50, 75, 100, 150kg/m^3$ と変えて準備した固化土供試体の一軸圧縮試験から得られた q_u と ΔM_C の関係を示す。図から、固化土の $q_u \sim \Delta M_C$ 関係は、図 2 に示した非締固め型固化土の場合に比較すると、強度範囲が狭くほぼ比例的関係にあるので直線

$$q_u = -113 + 3.804 \cdot \Delta M_C \quad (3)$$

によりほぼ近似できることがわかる。

図 9 は崩積土単体の三軸圧縮試験から得られた応力～ひずみ関係を、図 10 は図 9 から読み取った軸ひずみ $\varepsilon_1=15\%$ 時の偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{15}$ から描いた有効応力表示の Mohr 応力円と、その包絡線を直線により近似して求めた強度パラメータ (c'_0, ϕ'_0) をそれぞれ示す。

図 11 は固化土の ΔM_C を変えた同様の試験から得られた c' と ΔM_C の関係を示す。非締固め型固化土と同様に、 ϕ' は崩積土単体と同じ $\phi'_0=30.2^\circ$ 一定として

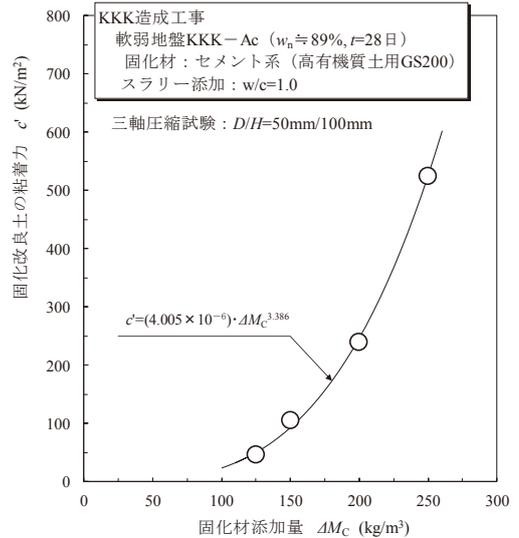


図 6 非締固め型固化土の c' と ΔM_C の関係

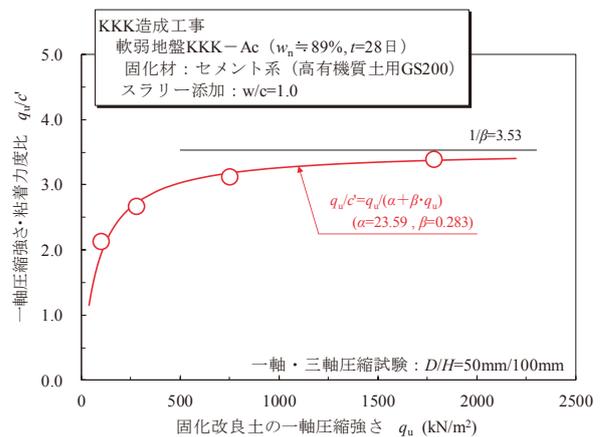


図 7 非締固め型固化土の c'/q_u と q_u の関係

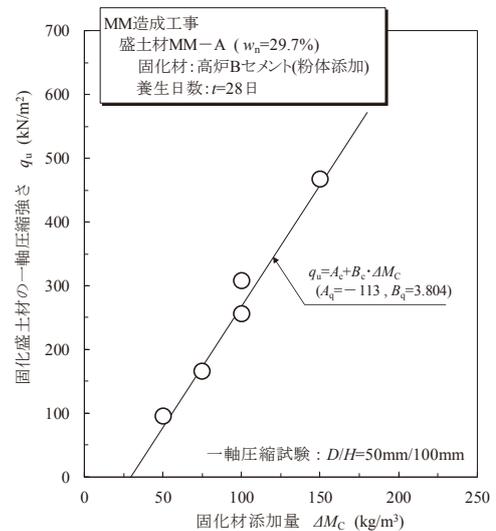


図 8 締固め型固化土の $q_u \sim \Delta M_C$ 関係

傾き ϕ'_0 の直線を破壊規準として得られる値を c' として採用することにした。図中の直線は $c' \sim \Delta M_c$ 関係を図 8 に示した $q_u \sim \Delta M_c$ 関係と同様に

$$c' = 10 + 0.996 \cdot \Delta M_c \quad (4)$$

の直線により近似したものである。

図 12 も非締固め型固化土と同様に $q_u/c' \sim q_u$ 関係を双曲線

$$q_u/c' = q_u / (17.34 + 0.259 \cdot q_u) \quad (5)$$

により近似した結果である。

§5. 固化土の粘着力と一軸圧縮強さの関係式

以上の試験結果から、固化土の $c' \sim q_u$ 関係は非締固め型あるいは締固め型で分類される固化土の種類、 q_u により示される強度レベルに関係なく、同形式の c' と q_u の関係式で表示できることがわかった。そこで、実務で使いやすい $c' \sim q_u$ 関係式として、

$$c'/q_u = a/q_u + \beta \quad (6)$$

で与えることにしたい。図 13 は非締固め型固化土 (○印) と締固め型固化土 (◇印) の試験から得られた上式による関係をそれぞれ示す。なお、式(6)は q_u が小さい低強度レベルでは現実的でない値を与えるので、有効範囲として $c'/q_u \leq 0.5$ とすることにした。実際には $c'/q_u \approx 0.5$ では $q_u \leq 100 \text{ kN/m}^2$ のような低強度であり実務的には固化改良の対象にならない強度レベルといえる。

図 14 は、図 13 に示した試験結果に加えて、他の 5 事例における固化土の室内配合試験から得られた $c' \sim q_u$ 関係をまとめて示す。各事例における固化材はセメント系固化材や普通ポルトランドセメント、高炉セメントなど一定ではない。図中では、固化土が非締固め型では N-C (固化材は $w/c=1.0$ のスラリー添加で Non-compacted) により、締固め型では C (固化材は粉体添加で Compacted) によりそれぞれを区別して示してある。図から、固化土の $c' \sim q_u$ 関係は固化土の種類や使用した固化材の相違にかかわらず c'/q_u が式(1)のように一定ではなく q_u によりおよそ $1/2 \sim 1/4$ の範囲で変化することがわかる。そこで、 $c' \sim q_u$ の平均的な関係式として図中の結果を近似した

$$c'/q_u = 23.1/q_u + 0.269 \quad (7)$$

を提案したい。図中には試験データの上・下限線をうまく近似できるように係数 a と β を設定した曲線もそれぞれ示してある。図から、 c'/q_u は強度レベル q_u が低いほど $1/2$ に近く、増加に伴って $1/\beta=1/3.72$ に収束してゆくことがわかる。

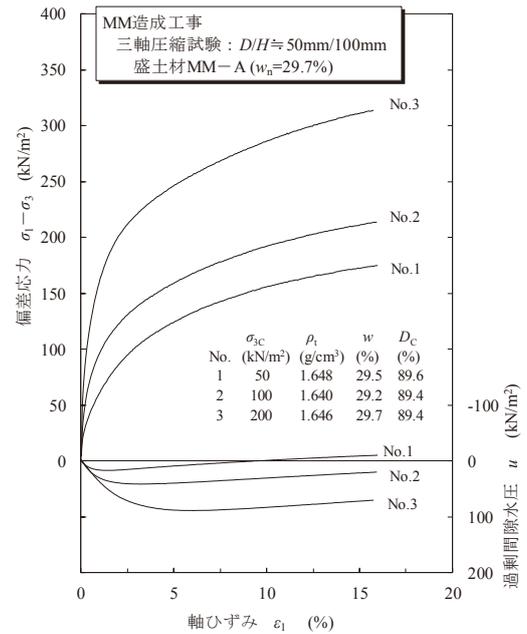


図 9 崩積土単体の三軸圧縮試験による応力～ひずみ関係

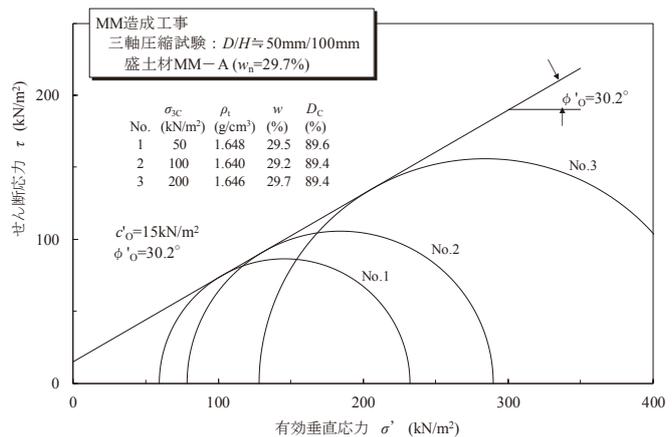


図 10 崩積土単体の破壊時の Mohr 円と強度パラメータ

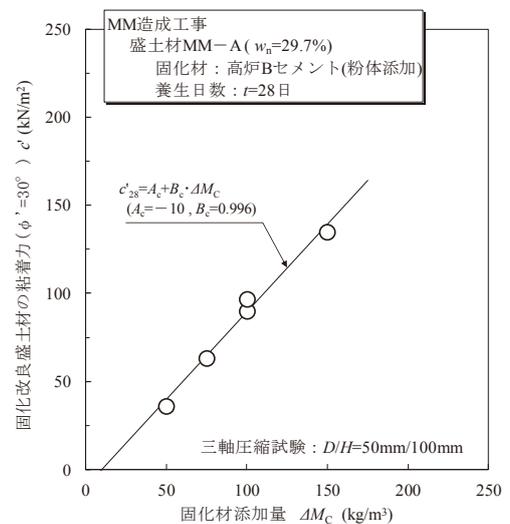


図 11 締固め型固化土の $c' \sim \Delta M_c$ 関係

提案した $c' \sim q_u$ 関係式(7)は、安定計算により設定された c' 表示の目標強度を現場で達成できる ΔMc をより合理的に求めることを目指したものである。すなわち、安定計算において周辺地盤の強度パラメータと整合性のある $c' \sim q_u$ 関係は、目標とする強度レベル q_u が高いほど式(1)との相違が大きくなり危険側の値を与えることになるので、正確な ΔMc を求めるために重要なものとなる。

§6. おわりに

本稿は固化改良地盤を複合地盤的設計により取り扱う場合に必要となる固化土の c' と q_u の関係を室内試験により調べ、実務的に使用できる相互の変換式を提案した。今後の試験結果の蓄積により修正する必要があるが、当面の間はこれまでの試験結果の平均的關係として

$$c'/q_u = 23.1/q_u + 0.269$$

を提案した。提案した $c' \sim q_u$ 関係式は、安定計算により設定された c' 表示の目標強度を現場で達成できる ΔMc をより正確に求めることを目指したものである。

参考文献

1. (社)セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第4版，技報堂出版，pp.7-16，2012.
2. (財)土木研究センター編：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル(改訂版)，(財)土木研究センター，pp.75-90，2004.
3. (財)土木研究センター編：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル(改訂版)，(財)土木研究センター，pp.91-99，2004.
4. (財)土木研究センター編：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル(改訂版)，(財)土木研究センター，p.82，2004.

ひとこと

一軸圧縮強さと粘着力の比は強度によって異なり、高強度の場合は粘着力の過大評価により危険側になるおそれがあるが、今年の新戦力である佐藤輝明、伊藤将司、中野拓夢はたとえ期待が過大でも常に応えてくれるので勇気と安心を与えてくれる。



北島 明

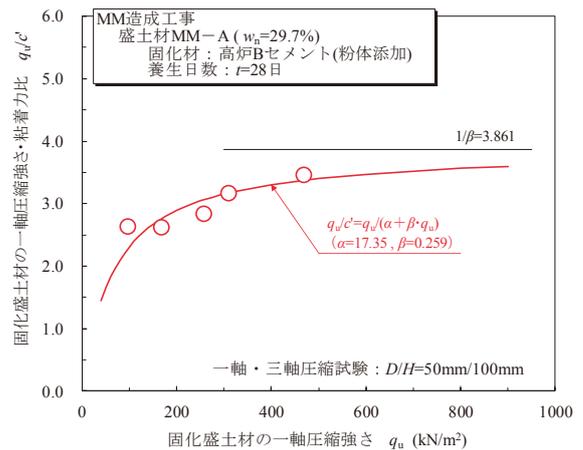


図 12 締固め型固化土の $q_u/c' \sim q_u$ 関係の双曲線近似

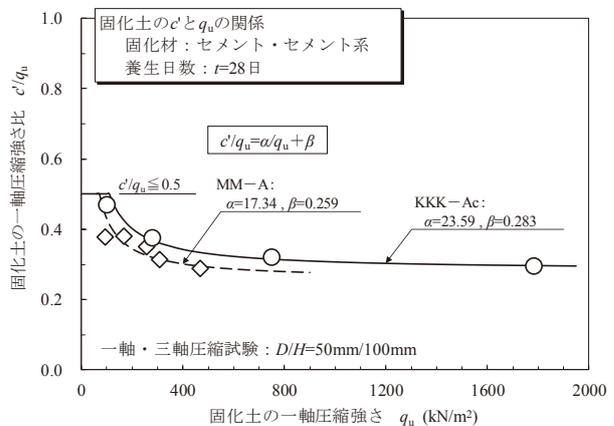


図 13 固化土の $c'/q_u \sim q_u$ 関係の比較

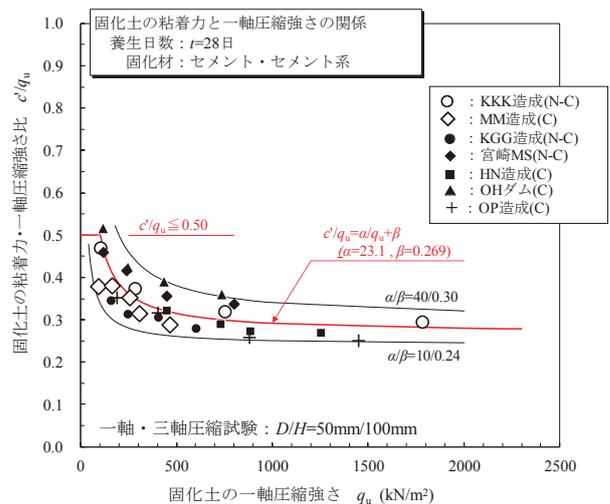


図 14 各事例における固化土の c'/q_u と q_u の関係