

セメント改良された高含水比粘性土の強度特性

平川 修治* 柴田 徹* 西原 晃* 稲岡政孝**

Strength of Cement Treated High Water Content Clayey Soils

Shuji HIRAKAWA* Toru SHIBATA* Akira NISHIHARA* Masataka INAOKA**

ABSTRACT

Cement treatment of soils by liquified stabilization is one of effective methods for improving utilization of large mass of surplus soils generated by construction works. In liquified stabilization, water content of soils is so high comparing with conventional stabilization method that water content affects the strength of cement treated soils. In case of cement treatment in clayey soils, effect of the physical and chemical properties of surplus soils cannot be disregarded too. In this research work, a number of unconfined compression tests have been performed on some cement treated high water content clayey soils. It is shown that effect of water content on the strength of cement treated clayey soils can be evaluated by newly introduced parameter ξ . A method of estimating the strength of cement treated soils using parameter ξ is presented as well.

キーワード：セメント改良, 高流動化処理, 粘性土, 強度

Keyword: Cement treatment, Liquified stabilization, Clayey soils, Strength,

1. まえがき

我が国では軟弱地盤が多いため、建設工事をするにあたり現場で発生した残土は高含水比の軟弱粘性土が多く、その処理が問題となっている。その対策の一つとして注目されているのが、高含水比軟弱粘性土に水とセメントを混合して強度を増加させ、埋め戻し材料あるいは提体材料などとして再利用する高流動化処理工法である[1]。

セメント添加による地盤改良においては、必要とされる強度を確保するために、施工に先だって、セメント添加量と強度の関係を求めるための配合試験が行われるのが普通である。そのため、セメント添

加量と強度の関係に関してこれまで数多くの研究が行われている。しかし、高流動化処理土は従来のセメント改良工法に比べて含水量が多く、含水比が改良土の強度に及ぼす影響が大きい。またセメントの添加量が抑えられるため、その強度特性には現場発生土の物理・化学的性質、力学特性など土質材料としての特性も大きく影響する。

本研究はこのような観点から、セメント改良した高含水比粘性土を用いて行った一連の一軸圧縮試験結果をもとに、高流動化処理土の強度特性における含水量の影響ならびに粘性土の物理特性との関連を検討したものである。その結果として、セメント改良された高含水比粘性土の強度は、含水比と水セメ

* 建設環境工学科 **大学院土木工学専攻 (現：舞鶴市役所)

ント比をかけ合わせたパラメータを用いて評価できること、そしてと強度の関係には粘性土の液性限界が関係することを示す。またと強度の関係を用いて、高流動化処理土の配合設計を行う方法を新たに提案する。

2. 高流動化処理泥土の強度特性

2.1 実験概要

実験に用いた試料は、ニュージーランド産の陶器用粘土とイ草染色用の尾道染土の2種類の粉末粘性土である。これら試料の力学特性を表2.1に示す。なお、液性限界および含水比はすべて比で表している。ニュージーランド粘土はカオリナイト系粘土鉱物を多く含む粘土、尾道染土は堆積岩を粉末にした粘土質シルトであり、これら2種類の粘性土は、粒土分布や液性限界など、その物理・化学的性質において大きく異なっている。

Table 2.1 Physical properties of soils

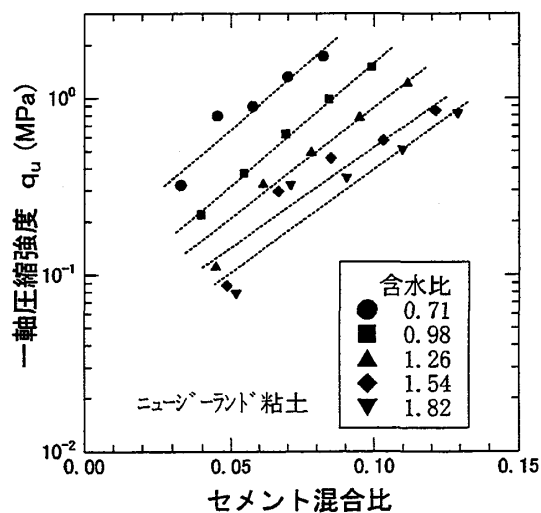
	ニュージーランド粘土	尾道シルト
粗砂分(%)	0	0
細砂分(%)	0.8	0.3
シルト分(%)	6.2	62.7
粘土分(%)	93.0	37.0
液性限界	0.711	0.342
塑性限界	0.379	0.177
塑性指数	0.642	0.164
土粒子密度	2.498	2.584

セメント改良土は、土粒子、水とセメントの混合物であり、これらの配合割合によってその力学特性が支配される。高流動化処理土は含水量が多く、水が力学特性に及ぼす影響は大きい。従来のセメント改良土においては、セメントの添加量の影響が主として議論され、含水量の影響を調べた研究は少ない。そこで本研究では、含水量とセメント添加量のそれぞれの影響を調べるため、含水比(=W_w/W_s)とセメント水比(=W_c/W_w)を変化させて実験を行った。ここで、W_s、W_w、W_cはそれぞれ土粒子、水、セメントの重量であり、水の重量は現場発生土にもともと含まれている水とさらに添加した水の重量の合計である。

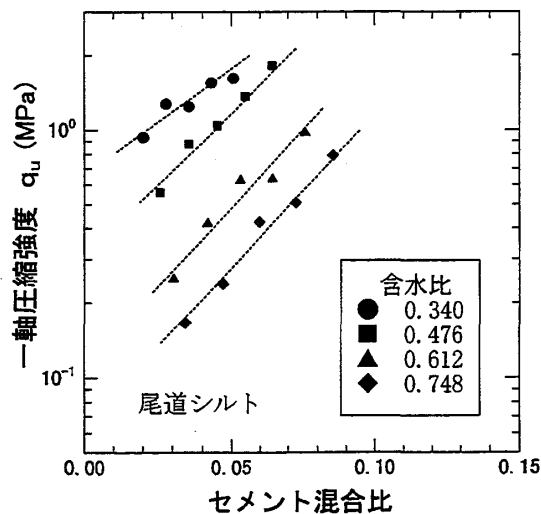
実験ではそれぞれの粘性土の液性限界の1~2.6倍の範囲でいくつかの含水比を設定し、またそれぞ

れの含水量に対して、0.08~0.2の範囲で設定したセメント水比となるよう水とセメントを配合した。今回使用した試料は粉末状であるため、まず液性限界に等しい含水比となるよう水を添加して練り合わせ、3日間放置したのち、設定したセメント水比と含水比になるようにさらに水とセメントを投入して、ミキサーで20分間攪拌した。混合した処理土は直径5cm、高さ10cmのプラスチック製モールド容器に入れて1日放置後、脱型して28日間密封養生したのち一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験は通常の1%/minのひずみ速度で行っている。また、一軸圧縮強度は同一配合で作成した3本の試料の実験結果の平均をとっている。

2.2 セメント混合比と一軸圧縮強度の関係



(a)



(b)

Fig. 2.1 Relation between cement mixing ratio and compression strength
(a) New Zealand clay, (b) Onomichi silt

セメント改良土の配合設計においては配合割合を表す指標として処理土 1 m³ 当たりのセメント添加量が多く用いられる。しかし、土粒子、水、セメントの密度が異なるため、単位体積当たりのセメント添加量ではそれぞれの配合割合を定量的に評価することができない。そこで、本研究では単位体積当たりのセメント添加量に対応する指標として、処理対象土の重量に対するセメントの重量比を表すセメント混合比 (=W_c/(W_s+W_w)) を考える。

図 2.1 はそれぞれ高流動化処理したニュージーランド粘土と尾道染土において含水比を一定としたときのセメント混合比と一軸圧縮強度の関係を示したものである。これらの図より含水比が一定であれば、一軸圧縮強度の対数とセメント混合比の間にはほぼ直線関係が成り立つことがわかる。また、それぞれの含水比に対する直線関係はほぼ平行となっており、セメント混合比と一軸圧縮強度の間には含水比を媒介変数として明確な相関関係が存在する。したがって、深層混合処理工法など従来のセメント改良工法のように、含水比がほぼ均一な地盤にセメントのみを添加する場合において、セメント混合比は改良土の強度を評価する指標として有効である。しかし、高流動化処理土のようにセメントと同時に水を添加する場合には含水量によって強度が大きく変化するため、セメント混合比のみでは評価することができず、含水量の影響も含めた別の指標が必要である。

2.3 含水比、セメント水比と圧縮強度の関係

高流動化処理土は従来のセメント混合処理工法に比べて含水比が高く、セメント添加量が少ないことが特徴としてあげられる。したがって、高流動化処理土の力学特性には処理対象土の特性が強く現れることが考えられる。処理対象土が粘性土の場合、その強度は含水比に依存することが知られている。図 2.2 は、液性限界付近の高含水比における粘性土の強度と含水比の関係を調べたものである。使用した試料は液性限界の影響を調べるために、ニュージーランド粘土と尾道染土を種々の割合で混合したものである。液性限界付近の高含水比の粘土は非常に軟弱であるため、せん断強度はベーンせん断試験によって求めている。この図より、含水比と強度の対数の間には直線関係が成り立つこと、そして粘性土の含水比と強度の関係には液性限界が関係していることがわかる。

図 2.3 はそれぞれニュージーランド粘土と尾道染土の高流動化処理土の強度における含水比の影響を調べたものである。この図より、セメント水比が一定であれば、通常の粘性土と同様に含水比と強度の

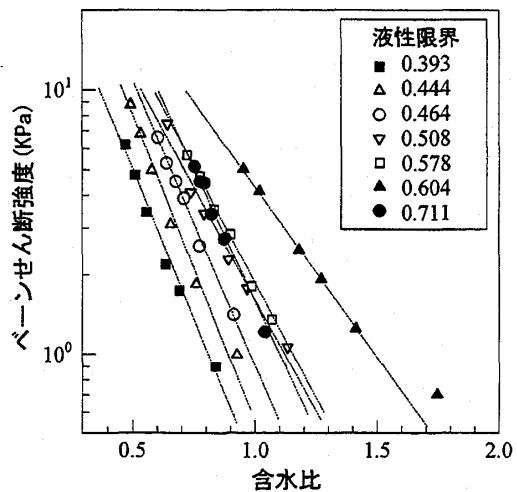


Fig. 2.2 Relation between water content and Vane shear strength of clayey soils

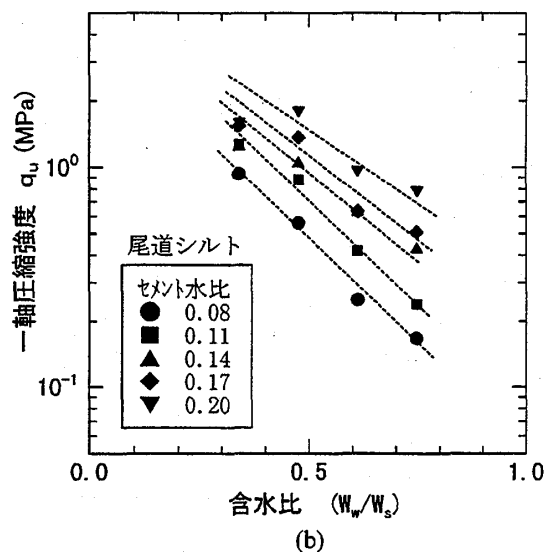
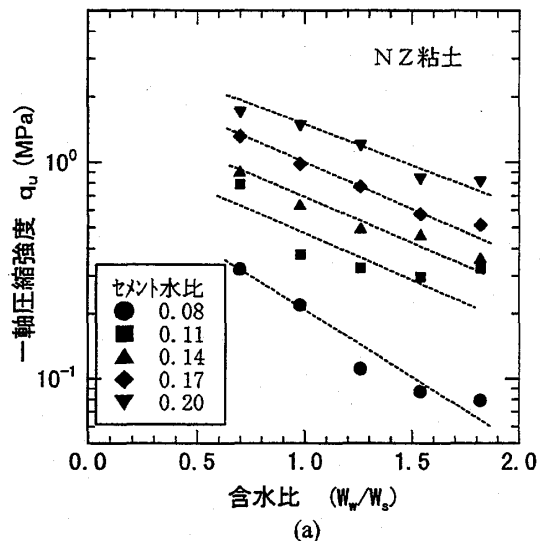


Fig. 2.3 Relation between water content and compression strength of cement treated soils
(a) New Zealand clay, (b) Onomichi silt

対数の間にはほぼ直線関係が成り立つことがわかる。以上のように、高含水比の粘性土の場合、セメントの添加の有無にかかわらず、強度の対数と含水比の間に直線関係が成り立つと考えてよい。

一方、セメントの硬化は水との水和反応によるものであり、その強度の発現にはセメントと水の比が重要な指標となると考えられる。図-2.4 は、含水比を一定とした場合の水セメント比 (= W_w/W_c) と一軸圧縮強度の関係を示したもので、図-2.3 と同様に、水セメント比と一軸圧縮強度の対数の間にほぼ直線関係が成り立つことがわかる。

以上のように、含水比と水セメント比をパラメータとする場合、一方を一定とすると他方の増加に対して一軸強度の対数がほぼ直線的に減少する。そこで、含水比と水セメント比の影響を表す最も簡単

な指標として、次のようなパラメータを考える。

$$\xi = \frac{W_w}{W_s} \times \frac{W_w}{W_c} \quad (1)$$

このパラメータ ξ と一軸圧縮強度との関係を示したものが図 2.5 である。図より、含水比とセメント水比の広い範囲にわたって次の関係が成り立つことがわかる。

$$\log q_u = a - b \xi \quad (2)$$

ここに、 q_u は一軸圧縮強度 (単位は Mpa) である。

図 2.6 は式 (2) の関係が他の粘性土においても成り立つか確認するために、過去に行われた実験結果を用いて検証したものである。実験に用いた試料は岡山県笠岡市で採取された自然粘土で、表 2.2 に示

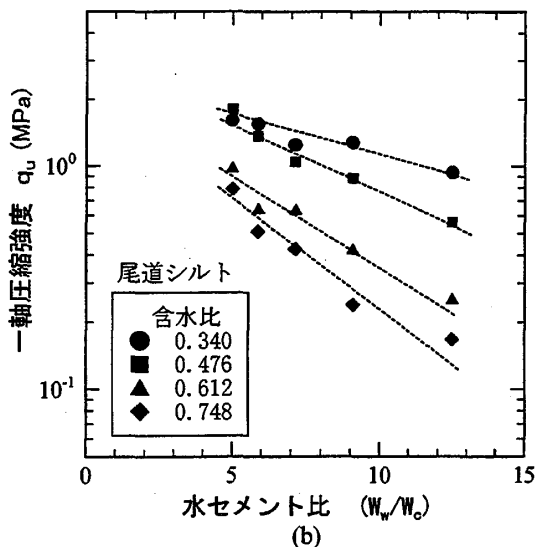
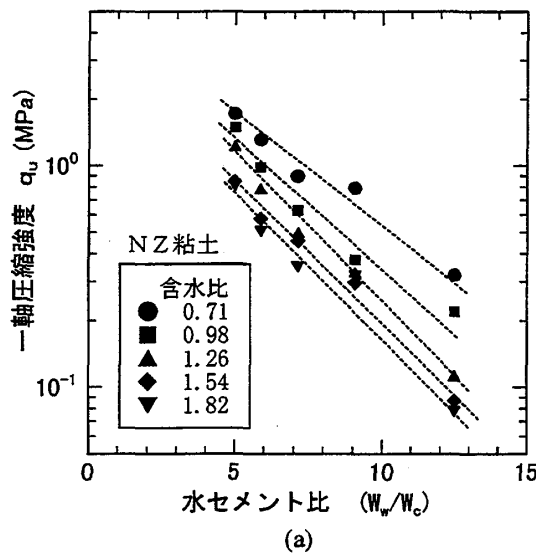


Fig. 2.4 Relation between water content and compression strength of cement treated soils
(a) New Zealand clay, (b) Onomichi silt

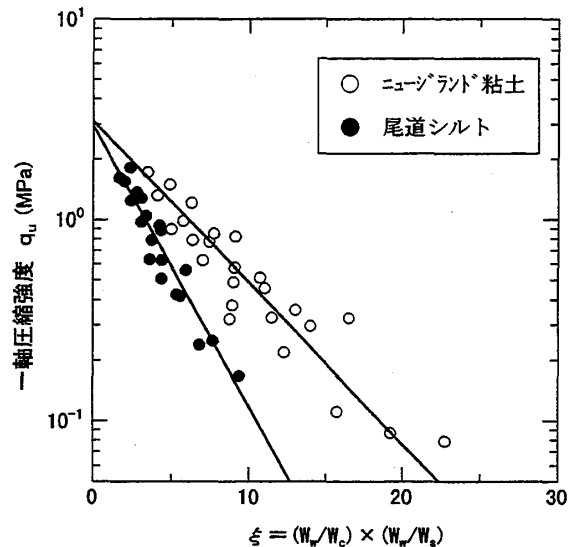


Fig. 2.5 Relation between ξ and compression strength

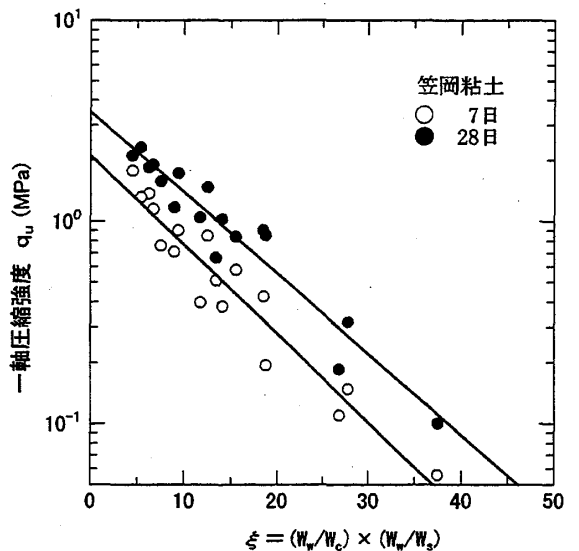


Fig. 2.6 Relation between ξ and compression strength of cement treated natural clay

すように、液性限界の高いシルト質粘土である。この実験は深層混合処理を念頭においており、含水比は自然含水比前後の1.2~1.8、セメント水比は0.04~0.25の範囲で行われている。実験試料の作成方法は本研究と全く同じで、セメント添加後、7日、14日、28日の時点で一軸圧縮試験を行っている。図-2.6では7日ならびに28日強度の結果を示しているが、いずれの結果においても一軸強度の対数と ξ は直線関係にある。

表 2.3 は式(2)における係数 a、b の値をまとめたものである。また、図 2.7 はこれらの係数の値をそれぞれの粘性土の液性限界に対してプロットしたものである。係数 a は養生日数とともに増加し、また同じ養生日数で比較した場合、粘性土の液性限界とともに若干大きくなる傾向が見られる。係数 b は ξ の変化に対する圧縮強度の変化の程度を表す係数であり、養生日数の影響は小さいようである。しかし、粘性土の液性限界の影響を強く受け、液性限界が大きくなるにつれて係数 b は小さくなる。図 2.2 の結果からわかるように、液性限界の高い土ほど、含水比の変化に対する強度の変化は小さい。このような粘性土の物性と強度の関係がセメントを添加した場合にも影響しているものと考えられる。このように、高流動化処理粘性土の力学特性には粘性土の物性が影響すると思われるが、その影響に関しては粘性土の化学的性質ならびに粒度分布の影響も含めてさらに検討する必要がある。

3. 高流動化処理土の配合設計に関する考察

高流動化処理土の品質規定には施工時の流動性、並びに材料分離抵抗性に対する配慮と、固化後の強度特性として一軸圧縮強度が採用されることが多い。配合設計に際しては、これらの特性、特に一軸圧縮

Table 2.2 Physical properties of kasaoka clay

粗砂分	細砂分	シルト分	粘土分
1.1 %	6.2 %	34.9 %	57.8 %

液性限界	塑性限界	塑性指数	自然含水比	土粒子密度
1.42	0.361	1.05	1.34	2.65 g/cm ³

Table 2.3 Coefficient a and b

粘性土	養生日数	液性限界	係数 a	係数 b	相関係数
NZ 粘土	28日	0.711	0.491	0.080	0.865
尾道粘土	28日	0.342	0.467	0.140	0.912
笠岡粘土	7日	1.42	0.325	0.044	0.920
	14日		0.438	0.043	0.928
	28日		0.544	0.040	0.927

強度について配合試験が行われ、その結果に基づいて必要とされる品質を満足するための含水量、セメント添加量の範囲が決定される。高流動化処理土の強度においては含水量の影響が大きく、また含水量は処理土の流動性と材料分離性にも関係する。したがって、高流動化処理土の配合設計においてはセメント添加量だけではなく、含水量の影響も考慮しながら決定することが重要である。

本研究の結果によれば、高流動化処理土の強度におけるセメント添加量と含水比の影響はパラメータ ξ によって評価することができる。したがって、あらかじめ想定される含水比の範囲で配合試験を行い、 ξ と強度の関係を求めておけば、所定の設計強度に対する ξ の範囲を決定することができる。そして、そのように決定された ξ の範囲内で、処理土の流動性ならびに材料分離特性を勘案しつつ、含水量とセメント量を決定すればよいことになる。

高流動化処理は現場発生土を利用するため、現場において配合を行うことも多い。 ξ を用いて配合を決定する場合、対象土に含まれる水の重量と土粒子重量を求めることが必要である。しかし、現場発生土の含水量は場所や天候によっても変化し、また現場発生土の含水量をその場で即時に測定することは容易ではない。そこで、ここでは現場で簡単に測定できる土の密度とセメントの添加量から処理土の強度を調整する方法について述べる。尚、以下では対象土の密度は地盤にもともと含まれていた水量と後から加えた水量を合わせて求められたものとする。

今、対象土の密度を γ (t/m³) とすれば、含水比は、

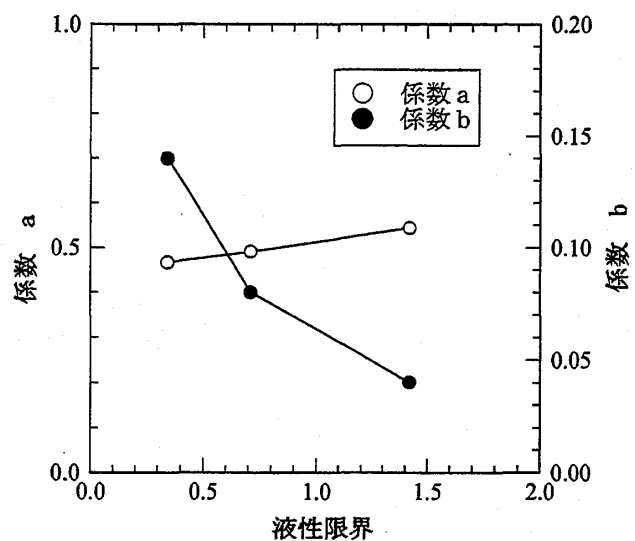


Fig. 2.7 Relation between coefficient (a, b) and liquid limit

$$\frac{W_w}{W_s} = \frac{(\gamma_s - \gamma) \gamma_w}{(\gamma - \gamma_w) \gamma_s} \quad (3)$$

で求めることができる。ここに、 γ_s 、 γ_w はそれぞれ土粒子と水の密度(t/m^3)である。また、対象土 $1 m^3$ 当りに添加されるセメント量を C_m (t/m^3) とすると、

$$C_m = \frac{W_c}{V_s + V_w} = \frac{W_c}{W_w \left(\frac{1}{\gamma_s} \frac{W_s}{W_w} + \frac{1}{\gamma_w} \right)} \quad (4)$$

の関係が得られる。式(3)、(4)の関係を用いると ξ は次式のように表される。

$$\xi = \frac{(\gamma_s - \gamma)^2 \gamma_w^2}{C_m \gamma_s (\gamma - \gamma_w) (\gamma_s - \gamma_w)} \quad (5)$$

一般に土粒子密度は $2.6 \sim 2.75 t/m^3$ 程度の値をとるが、ここでは代表として、 $\gamma_s = 2.7 t/m^3$ とし、また、 $\gamma_w = 1.0 t/m^3$ とおけば、

$$\xi = \frac{(2.7 - \gamma)^2}{4.59 C_m (\gamma - 1)} \quad (6)$$

の関係が得られる。式(6)を用いると対象土の密度 γ と単位セメント量 C_m から ξ を求めることができ、さらに ξ と強度の関係から一軸強度を推定することができる。図 3.1 はこのようにして求めた q_u の推定値と実測値を比較したもので、両者はよく一致しているといえる。したがって、配合設計においては、対象土の密度 γ を設定すれば、所定の強度に対応する ξ の範囲となるよう式(6)を用いて単位セメント

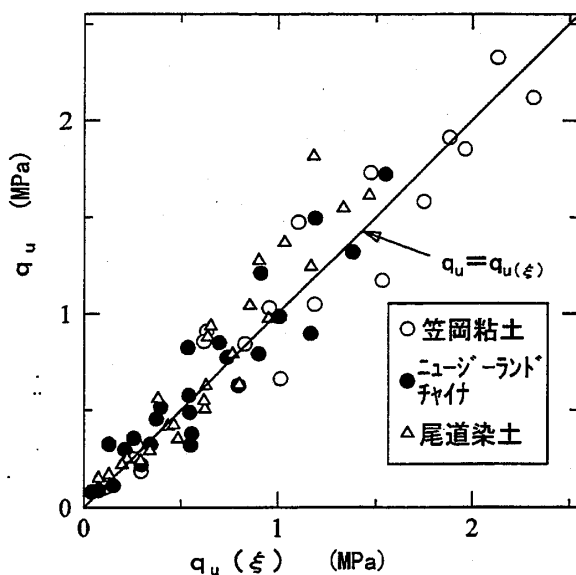


Fig. 3.1 Comparison between estimated and measured strength of treated soils

量を決定すればよい。またこの手順によれば、処理土の含水量の影響を考慮しつつ合理的な配合設計を行うことが可能である。

4. おわりに

本研究では、高流動化処理土の強度特性における含水比の影響を明かにする目的で行った一連の実験結果について報告した。本研究で得られた主な結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 高流動化処理土の圧縮強度の対数は含水比ならびにセメント水比と直線間系にあり、これらを組み合わせたパラメータ

$$\xi = \frac{W_w}{W_s} \times \frac{W_w}{W_c}$$

によって評価が可能である。

- 2) 高流動化処理土の一軸圧縮強度と ξ の関係には、粘性土の物性とくに液性限界が関係する。
- 3) 処理土の強度と ξ の関係を利用することにより、現場密度を用いて容易にかつ合理的な配合設計を行うことが可能である。

本研究では強度に関して考察を行ったが、高流動化処理土ではその圧縮性も重要な問題となる。また、品質管理の面で流動性や材料分離特性も重要であり、これらの特性を考慮した総合的な配合設計の確立が必要とされている。今後、これらの特性と ξ の関係を明かにし、合理的な配合設計の手法を確立していく予定である。

参考文献

- [1] 平川修治・柴田徹・西原晃・有岡正樹・森邦夫：高含水比泥土の有効利用法に関する実験研究，福山大学工学部紀要，第23巻，pp. 21-26，(1999)