

# 汚泥の処理処分に関する研究 (第12報)

—固化泥土の力学特性の検討 (その1)—

喜田大三 漆原知則  
久保博

## Studies on Treatment and Disposal of Mud (Part 12)

—Dynamic Properties of Mud Solidified by Cement (1)—

Daizo Kita Kazunori Urushibara  
Hiroshi Kubo

### Abstract

In this paper, examinations of the dynamic properties of mud solidified by cement are reported, mainly for the case of solidifying the shallow part of very weak muddy ground.

(1) In order to obtain information regarding subsidence and failure of fixed slabs in case of loading hardened surface ground (hardened slab), unconfined compression tests and bending tests are very important.

(2) The unconfined compressive strength ( $q_u$ ) and the bending strength ( $\sigma_b$ ) were examined with regard to mud solidified by cement. The  $\sigma_b/q_u$  ratio was about 0.6. The  $\sigma_b$  of samples mixed roughly mud and cement were very scattered in comparison with  $q_u$ . Then, the modulus of elasticity ( $E_s$ ) was  $E_s \cong 80 q_u$ , in correlation with  $q_u$ .

### 概 要

軟弱地盤，とくに浚渫土砂埋立地やスラッジ処分地などのような超軟弱地盤を改良する際，あらかじめ表層をセメント等で固化することは非常に有効である。本報では，このような表層固化における固化泥土の力学特性を検討した。

(1) 固化した表層地盤（固化版）に載荷した場合の固化版の沈下・破壊に関する知見を得るため，一軸圧縮試験および曲げ試験が特に重要である。

(2) 埋立地の超軟弱泥土を用いて，セメント固化供試体を作製し，一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) および曲げ強さ ( $\sigma_b$ ) を調べた。その結果， $\sigma_b/q_u$  比は約 0.6 であった。また，混合時間が短かく，混合不良の供試体では  $\sigma_b$  のばらつきが非常に大きくなった。なお，固化泥土の一軸圧縮試験から求めた弾性係数 ( $E_s$ ) は  $q_u$  と高い相関があり， $E_s \cong 80 \cdot q_u$  であった。

## 1. まえがき

浚渫土砂を埋立ててから日の浅い埋立地，あるいはスラリー状の廃棄物や掘削残土を埋立てた処分地などは，いわゆる超軟弱な地盤となっている。臨海部の限られた平地を中心に都市，産業が立地しているわが国では，このような軟弱地盤をも土質安定処理を行なって，積極的に土地利用していかざるを得ないケースが多い。

ところで，軟弱地盤改良の一般的な工法として，まずシート等を敷設して，その上に土砂を徐々にまき出し，地盤改良機械の作業可能な地耐力を得たのち，地盤改良

機械によってペーパードレーンやサンドドレーンなどを打設して，圧密脱水を促進させる工法がある。しかし，粘着力が  $1 \text{ ton f/m}^2$  にも満たないような超軟弱地盤の場合，シート等敷設の作業効率が著しく低下するだけでなく，その上に土砂をまき出す作業も困難となる。このような場合に，軟弱地盤の表層 1~2m 程度にセメントや石灰を添加して，表層をあらかじめ固化処理しておくことは，これら一連の地盤改良工事を円滑かつ確実なものにするために，非常に有効である<sup>1)~3)</sup>。

しかし，表層固化した地盤は，固化層と無処理地盤からなる二層系複合地盤を形成しており，工事中に載荷重

がかかった場合、固化層はせん断応力や曲げ応力をうける。このため、表層固化工事の設計・施工において、これらの応力に対する固化泥土の力学特性を把握しておくことは極めて重要である。そこで、本報では、固化泥土の力学特性として、一軸圧縮強さ、曲げ強さなどに関する予備的検討を行なった。

## 2. 表層固化処理における一軸圧縮強さ、曲げ強さの適用

### 2.1. 一軸圧縮強さ (qu)

一軸圧縮強さ (qu) は CBR などと同様、安定処理土の強さ表示に最もよく用いられる力学特性値である。軟弱泥土の表層固化の設計・施工においても、qu は重要な力学特性値である。qu によって、表層の固化部分(固化版)の所要強さ、さらに固化版の所要厚さを検討する手法として、以下のようなものがある。

(1) プーシネスクの式による方法 複合地盤における地耐力を求める際に用いられるプーシネスクの式によると、図一1のような場合での固化版強さ、固化版厚はつぎのようになる。

$$\tau_1 = \frac{3}{4} \cdot P \cdot \frac{z_A/a}{\left\{1 + \left(\frac{z_A}{a}\right)^2\right\}^{3/2}} \quad \dots\dots(1)$$

$$qu_1 \geq 2 \cdot Fs \cdot \tau_1 \quad \dots\dots(2)$$

$\tau_1$ : 固化版のせん断応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

P: 円形等分布荷重 (kgf/cm<sup>2</sup>)

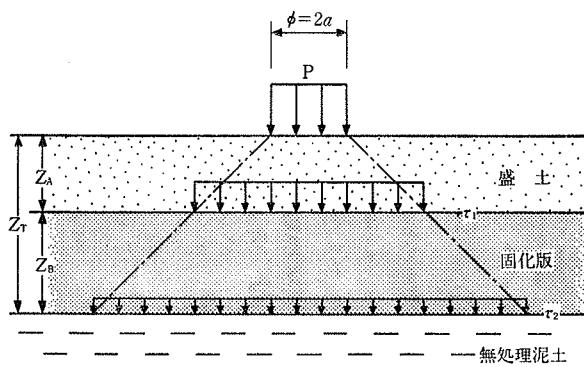
a: 等分布荷重の載荷半径 (cm)

Z<sub>A</sub>: 盛土厚 (cm)

qu<sub>1</sub>: 固化版の必要な一軸圧縮強さ (kgf/cm<sup>2</sup>)

Fs: 安全率

また、固化版厚 Z<sub>B</sub> は(1)式において、Z<sub>A</sub> の代わりに Z<sub>T</sub> (=Z<sub>A</sub>+Z<sub>B</sub>) を入れて、無処理地盤にかかるせん断応力  $\tau_2$  を求め、 $\tau_2$  が無処理地盤のせん断強さ  $\tau_0$  を上回らないようにすることによって求められる。



図一1 表層固化におけるせん断応力を示す模式図

(2) 押し抜きせん断破壊として検討する方法 固化版の下は強さの極めて弱い無処理地盤であるので、载荷によって固化版に押し抜きせん断応力がかかる。この押し抜きせん断応力に耐え得るために、必要な一軸圧縮強さはつぎのようになる。

$$\tau_p = \frac{P}{b \cdot z_B} \quad \dots\dots(3)$$

$$qu_2 \geq 2 \cdot Fs \cdot \tau_p \quad \dots\dots(4)$$

$\tau_p$ : 固化版の押し抜きせん断応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

P: 载荷重 (kgf)

b: 固化版の中間厚におけるせん断周長 (cm)

qu<sub>2</sub>: 固化版の必要な一軸圧縮強さ (kgf/cm<sup>2</sup>)

なお、(1)、(2)の他に、qu から粘着力Cを換算して、固化版上に载荷した場合の荷重による固化版の円弧すべりを検討することもある。

### 2.2. 曲げ強さ (σ<sub>b</sub>)

一般に、安定処理土の曲げ強さが測定されることは少ない。しかし、ヘドロのような超軟地盤の表層固化部分(固化版)の上に载荷した場合など、固化版の変形および破壊は、上記のせん断応力よりもむしろ曲げモーメントによって支配されることが多い。したがって、超軟地盤の表層固化工事などに際しては、曲げ強さ (σ<sub>b</sub>) およびその変形特性の検討が非常に重要となる。

例えば、吉田<sup>1)</sup>は载荷時における固化版の変位を、弾性床(軟弱地盤)上にのったハリあるいは版として弾性理論解で近似する手法を提案している。また、载荷時における固化版の破壊については、载荷によって固化版中に生ずる最大曲げモーメントから求めた曲げ応力と固化版の曲げ強さを比較することによって検討する方法が考えられる。

以上、軟弱地盤を表層固化した場合の固化版上に载荷された際の、固化版の変形・破壊を検討するために、一軸圧縮試験および曲げ試験は非常に重要であることが明らかになった。そこで、第3章、第4章において、固化泥土の qu, σ<sub>b</sub>, 弾性係数に及ぼす各種要因の影響、さらに qu, σ<sub>b</sub>, 弾性係数の相互関係などを把握するため、埋立地の軟弱泥土を事例として予備的試験を行なった。

## 3. 試料と試験方法

供試した土は、伏木富山港新湊地区の埋立地の超軟弱泥土である。この泥土は、表一1に性状を示すように、有機物は少ないが、微細粒子に富んでおり、浚渫後それほど時間が経過していないので、非常に高含水比・超軟弱である。また、固化剤としては普通ポルトランドセメント(以下、セメントと略す)を用いた。

含水比 (%)	粒度分布			アッターベルグ限界			Gs	Ig.loss (%)
	粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)	w <sub>l</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub>		
140	30	67	3	74	25	49	2.73	8.7

表-1 新湊埋立地泥土の性状

つぎに、試験方法を述べる。セメントをスラリー状 (W/C=1.5) として泥土に添加し、ホバート型ソイルミキサーで混合後、一軸圧縮試験用および曲げ試験用のモールドに試料を流し込み、所定期間養生してそれぞれの試験を行なった。そして、これらの試料作製の際、セメント添加量、泥土含水比、混合時間、養生温度、養生日数の各条件を変えて、qu および  $\sigma_b$  に及ぼす影響を調べた。

一軸圧縮試験は供試体寸法  $\phi 50 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$  とし、JisA 1216 に従って、ひずみ制御方式 (ひずみ速度 1%/分) で行なった。また、曲げ試験は Jis 5201 に規定されている形状のジグを一軸圧縮試験機にセットして、供試体寸法  $b 40 \text{ mm} \times h 40 \text{ mm} \times l_0 160 \text{ mm}$  で行なった (図-2 参照)。なお、曲げ試験の荷重はたわみ量の制御 (1 mm

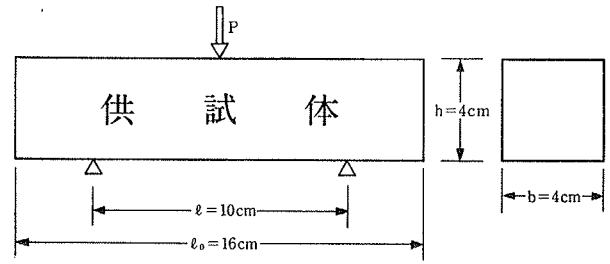


図-2 曲げ試験の模式図

/分) で行なった。曲げ強さ ( $\sigma_b$ ) は次式によって求められる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad \dots\dots(5)$$

M: 最大曲げモーメント (kgf·cm)

$$M = P \cdot l / 4$$

[P: 破壊時荷重 (kgf), l: スパン (cm)]

$$Z = b \cdot h^2 / 6$$

[b: 供試体幅 (cm), h: 供試体高さ (cm)]

上式に、当試験における l, b, h を代入すると、(5)式は  $\sigma_b = 0.234 P$  となる。

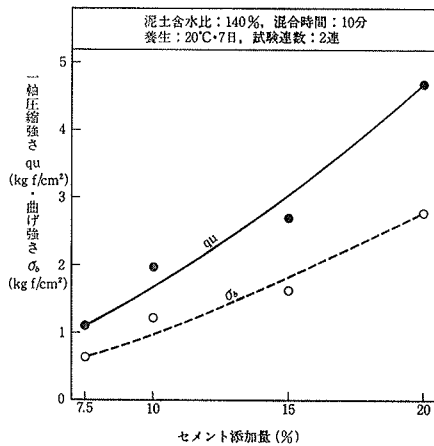


図-3 セメント添加量と一軸圧縮強さ・曲げ強さの関係

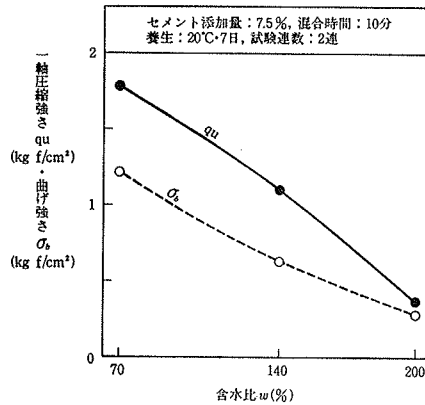


図-4 泥土含水比と一軸圧縮強さ・曲げ強さの関係

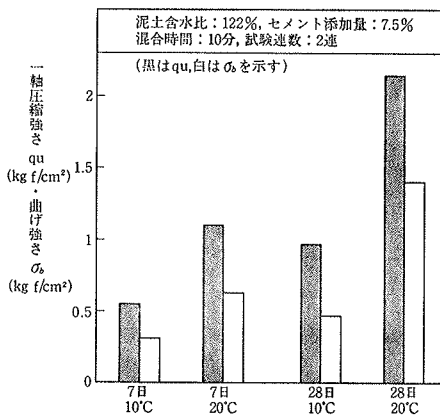


図-5 養生温度・養生日数が一軸圧縮強さ・曲げ強さに及ぼす影響

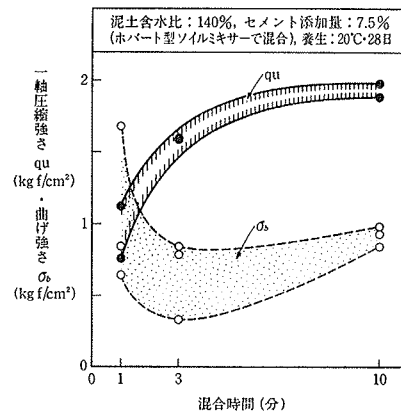


図-6 混合時間と一軸圧縮強さの関係

#### 4. 結果と考察

##### 4.1. 一軸圧縮強さ (qu) および曲げ強さ ( $\sigma_b$ )

qu および  $\sigma_b$  に及ぼすセメント添加量、泥土含水比、養生温度、養生日数、混合時間の影響を図-3~6に示す。

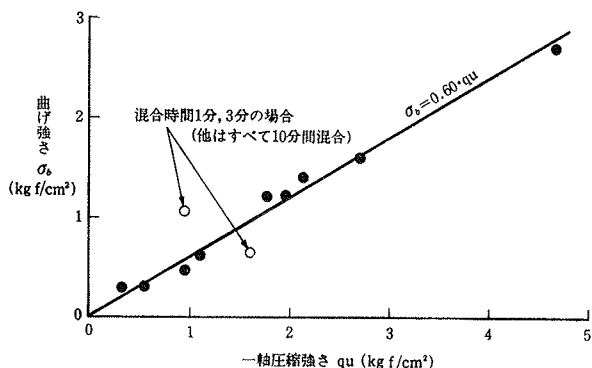
図-3, 4のように、セメント添加量の増大、含水比の減少に伴って qu および  $\sigma_b$  は増大している。また、図-5において、qu および  $\sigma_b$  は養生日数によって勿論増大しているが、養生温度による影響も著しく、10°Cから20°Cへの温度上昇によって2倍以上に増大することが認められる。この養生温度の上昇に伴う qu の増大程度は、他の土で従来得られた試験結果に類似している<sup>5)</sup>。このように、図-3~5において、qu と  $\sigma_b$  はほぼ同じ傾向で増減しており、これらの要因が qu,  $\sigma_b$  のいずれに対しても、同様に影響を及ぼすことが示唆される。

さて、混合時間の影響を調べ

た図一6では、 $q_u$  は混合時間とともに増大し、混合時間1分の場合、ばらつきも大きい。このことは、混合精度が  $q_u$  およびそのばらつきに影響したことを示唆し、従来の試験結果とも一致している<sup>6)</sup>。一方、 $\sigma_b$  は  $q_u$  と全く異なる傾向を示した。すなわち、混合時間の増大に伴う  $\sigma_b$  の増減はばらつきが大きく、明瞭でない。そして、注目すべきこととして、混合時間1分、3分における  $\sigma_b$  は非常に大きくばらついている。しかも、 $\sigma_b$  が  $q_u$  を上回ることは一般にないにもかかわらず、ここでは  $q_u$  を上回る例も認められる。この理由は以下のように考えられる。 $\sigma_b$  は供試体上面付近に働く圧縮応力と供試体下面付近に働く引張応力の複合応力に対する強さである。その際の引張り応力に対する強さは、供試体中に空隙や特に強さ的に弱い部分があれば、その影響を著しくうける。このため、混合が充分でない供試体の  $\sigma_b$  は  $q_u$  に比べて、大きくばらついたものと考えられる。また、曲げ試験後の供試体の破断面を観察した結果、10分混合の供試体の破断面は上載荷重の位置からはほぼ垂直方向に沿った平面であった。一方、混合時間1分・3分で作製し、 $\sigma_b$  が  $q_u$  を上回った供試体の破断面は上載荷重の位置からはずれ、しかも斜め方向に複雑な形状を呈した。このことから、 $\sigma_b$  が  $q_u$  を上回るほどに大きい値となったのは、混合不良のために、供試体中の最大曲げモーメントがかかる部分に、相対的に強さの大きい部分が存在していたことなどによると推察される。

つぎに、図一3～6におけるそれぞれの  $q_u$  と  $\sigma_b$  の関係をまとめて図一7に示す。混合時間1分および3分の場合に少しはずれるけれども、その他のプロットはほぼ直線上に位置しており、 $\sigma_b \approx 0.6 q_u$  の関係が認められる。このように、固化泥土の  $\sigma_b/q_u$  比に対するセメント添加量、泥土含水比、養生温度、養生日数の影響は、この試験では認められなかった。

ところで、 $\sigma_b/q_u$  比について、従来いくつかの研究報告がある。谷山<sup>7)</sup>によると、プラスチックソイルセメントの  $\sigma_b/q_u$  比は1週で約0.45、4週で約0.35で、材令



図一7 一軸圧縮強さと曲げ強さの関係

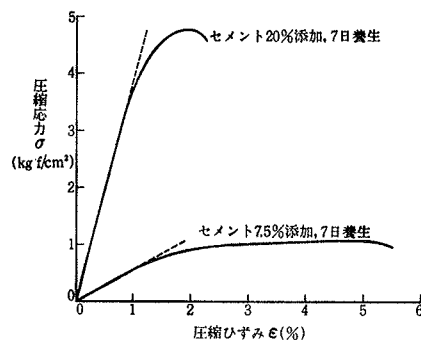
によって減少する傾向にある。吉田<sup>8)</sup>は  $\sigma_b/q_u$  比に関して、ソイルセメントで約0.1、セメント固化したヘドロで0.2～0.3を得ている。内田<sup>9)</sup>の試験では、セメント固化したヘドロの  $\sigma_b/q_u$  は約0.5である。さらに、小島<sup>10)</sup>によると、セメント固化した軟弱土の  $\sigma_b/q_u$  は0.2～1.0と広範囲にばらつき(平均0.5)、供試体作製時に気泡の除去が十分にできなかった供試体が特に小さい値を示した。なお、参考までに、コンクリートやモルタルの  $\sigma_b/q_u$  比は一般に0.15～0.25である。

このように、既往データによるセメント固化土の  $\sigma_b/q_u$  比は0.1～1.0と、一定でないが、筆者らの結果はこれらの値の平均よりもやや大き目であった。

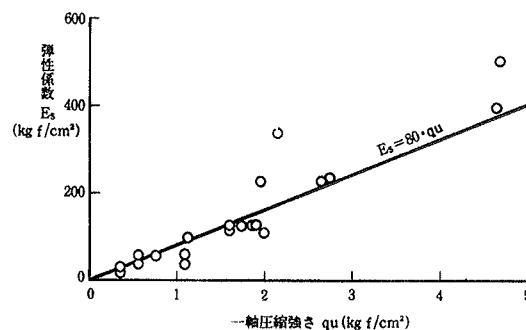
$\sigma_b/q_u$  比は供試土の種類、性状、供試体作製方法、強さ試験方法などによって、かなり変動するものと考えられ、今後さらに検討を要すると思われる。

#### 4.2. 弾性係数 ( $E_s$ )

固化泥土の一軸圧縮試験における応力～ひずみ曲線を図一8に例示する。応力～ひずみ曲線はいずれもコンクリートなどと同様、非線型である。これらの固化泥土は弾性的性質と塑性的性質を兼ね備えており、厳密な意味での弾性体ではないけれども、原点を通る応力～ひずみ曲線の接線の傾きによって、弾性係数  $E_s$  を求めた。その結果、図一9のように、 $E_s$  は  $q_u$  の大きいところではばらつきが大きくなるが、平均的には  $E_s \approx 80 q_u$  の関係



図一8 一軸圧縮試験における応力～ひずみ曲線例



図一9 一軸圧縮強さと弾性係数の関係

が認められた。このように、土および固化剤の種類が同じであれば、その他の条件が変化しても  $E_s$  は  $q_u$  によって予測できることが示唆された。

なお、曲げ試験における応力とたわみ量の関係からも弾性係数を算出した。その結果は明示しないが、曲げ試験から求めた弾性係数は一軸圧縮試験から求めた弾性係数よりも、かなり小さな値を示した。すなわち、曲げ試験におけるたわみ量は一軸圧縮試験で求めた弾性係数を用いて計算したたわみ量よりも大きくなった。このことは、曲げ応力がかかった場合の変形特性の検討の際に、曲げ試験から求めた弾性係数を用いる方が妥当であることを示唆すると考える。しかし、曲げ試験における変位量の測定にはいくつかの問題点も見出されるので、この点については今後さらに検討していくことにしている。

## 5. まとめ

軟弱地盤、特に浚渫土埋立地やスラッジ処分地などのような超軟弱地盤を改良する際、シート等を敷設して土砂まき出しを行なう以前に、あらかじめ表層をセメント等で固化することは非常に有効である。本報では、このような表層固化などにおいて、必要となる固化泥土の力学特性の予備的検討を行なった。

(1) 固化した表層地盤（固化版）上へ载荷した場合の、固化版の沈下・破壊に関する知見を得るために、固化泥土の一軸圧縮試験および曲げ試験は特に重要である。

(2) そこで、一例として、伏木富山港・新湊地区の埋立地の超軟弱泥土を用いて、セメント固化供試体を作製し、一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) および曲げ強さ ( $\sigma_b$ ) を調べた。その結果、セメント添加量、泥土含水比、養生温度、養生日数を変化させても、 $\sigma_b/q_u$  比は約 0.6 であった。なお、混合時間が短かく、混合不良の供試体では  $\sigma_b$  のばらつきが  $q_u$  に比べて、非常に大きくなった。また、固化泥土の一軸圧縮試験から求めた弾性係数 ( $E_s$ ) は  $q_u$  と高い相関があり、 $E_s = 80 \cdot q_u$  であった。

以上のことから、表層固化後に载荷された場合の固化版の破壊に重要な意味をもつ  $q_u$  と  $\sigma_b$  の間には、一般に高い相関が存在し、 $q_u$  と  $\sigma_b$  のいずれかが分かれば

他方を推定し得ることが示唆された。また、固化版の変形に重要な意味をもつ弾性係数は、一般に  $q_u$  と高い相関を示すことが示唆された。しかし、 $\sigma_b/q_u$  比が土の種類や固化剤の種類によって、どのように異なるか、またこれら室内試験結果から計算された現地固化版の強度・変形特性と実際の現地固化版の強度・変形特性の対応がどのようであるか、などについて今後さらに調査研究を行なう予定である。

## 参考文献

- 1) 喜田, 久保, 漆原: 伏木富山港・新湊地区表層固化調査報告書 (昭和55. 2) (未発表)
- 2) 皆見, 平田: 大規模土地造成工事におけるシート工法の適用例, 基礎工, Vol. 3, No. 4, (1975), pp. 66~74
- 3) 三根, 吉田, 山口: 超軟弱地盤の表層安定処理工法 (第1報), 第10回土質工学研究発表会講演集, (1975), pp. 981~984
- 4) 吉田: 超軟弱地盤 (ヘドロ) の土質改良工法と载荷試験解析, 土と基礎, Vol. 24, No. 6, (1976), pp. 49~55
- 5) 喜田, 久保, 辻, 炭田: 汚泥の処理処分に関する研究 (第7報), 固化強度に及ぼす養生温度の影響, 大林組技術研究所報, No. 18, (1979), pp. 90~94
- 6) 喜田, 久保, 辻: 公害汚泥の固化処理に関する研究 (第1報), セメント固化における混合指数の提案とその適用, 大林組技術研究所報, No. 11, (1975), pp. 152~156
- 7) 谷山: プラスチックソイルセメントに関する二, 三の考察, 土と基礎, Vol. 9, No. 3, (1961), pp. 27~33
- 8) 吉田: 安定処理土の曲げ引張強さについて, 第11回土質工学研究発表会講演集, (1976), pp. 491~492
- 9) 内田, 他: 安定処理したヘドロの諸力学特性 (その2), 第12回土質工学研究発表会講演集, (1977), pp. 1321~1324
- 10) 小泉, 他: セメントスラリーの軟弱地盤への適用について, 第12回土質工学研究発表会講演集, (1977), pp. 1289~1292