

# 海成粘土のセメント固化における養生温度と フミン酸の影響

後藤 恵之輔\*・山中 稔\*  
富永 恵介\*・小川 鉄平\*\*

## Effects of Curing Temperature and Humic-Acid on the Hardening Strength of Marine Clay Stabilized by Cement

by

Keinosuke GOTOH\*, Minoru YAMANAKA\*  
Keisuke TOMINAGA\* and Teppei OGAWA\*\*

In order to utilize the dredged marine clay, specimens of cement-hardened marine clay were cured at the real sea. The results of this cement hardening test indicate that the hardened strength differs according to the length of the curing period. The authors considered these differences in the hardened strength mainly because of the presence of the humic-acid in the marine clay and the temperature of the curing water. As a result of this investigation it was clear that there was no relationship between the hardened strength and the humic-acid since all the specimens tested contained the same amount of it. The main conclusion obtained was that there is a very clear relationship between the hardened strength and the temperature of the curing water.

### 1. はじめに

湖沼や都市域の海底に堆積する、一般にヘドロと称される海成粘土の浚渫が、水質浄化や航路確保等のために行われている。浚渫後の海成粘土は、そのほとんどが埋立地造成のために使用されているが、近年の埋立用地の不足から、他の利用方法の確立が望まれている。

長崎県央に位置する二重閉鎖性の大村湾の水質は悪化する傾向にあり、その一因が海成粘土の堆積によるものと考えられている。一方、同じ長崎県内に位置する雲仙・普賢岳の水無川流域には、大量の火山性土石流堆積物が堆積し、その処理問題も深刻な問題となっている。筆者らはこれまで、大村湾海成粘土と雲仙・普賢岳火山性土石流堆積物の有効利用を目的として、各種検討を行ってきた<sup>1) 2)</sup>。

本研究では、海成粘土を固化処理した供試体の室内水浸養生実験と、海成粘土と火山性土石流堆積物を混合固化した供試体の実海域水浸養生実験を行い、両養生実験における圧縮強度の経時変化及び、固化強度に及ぼす土石流堆積物混入の影響について検討を行った。また本実海域養生実験で、養生時期により固化強度が大きく異なる結果となったことから、その固化強度の違いが、海成粘土中のフミン酸含有量及び養生温度に起因するものと考え、それぞれについて検討を行った。

### 2. 試料及び物理試験結果<sup>3)</sup>

実験に供した海成粘土の採取位置は、大村湾最奥部の津水湾内（水深約5m）であり、船上よりエクマン

平成9年10月28日受理

\*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

\*\*大学院修士課程社会開発工学専攻 (Graduate Student, Department of Civic Engineering)

バージ型採泥器を用いて、海成粘土を採取した。

Fig. 1 に、固化実験に用いた海成粘土及び土石流堆積物の粒径加積曲線を示す。海成粘土は最大粒径 2 mm で、日本統一分類法により CH (粘土) に分類される。また、雲仙・普賢岳土石流堆積物は SG-V (火山灰質土まじり礫質砂) に分類される。

Table 1 に、海成粘土の物理試験結果を示す。土粒子密度  $\rho_s$  は  $2.75 \text{ g/cm}^3$  で、沖積粘土の中では比較的大きい値であるが、自然含水比  $w_n$  は 120.3% で、一般的な海成粘土と比較して若干小さい値を示している。

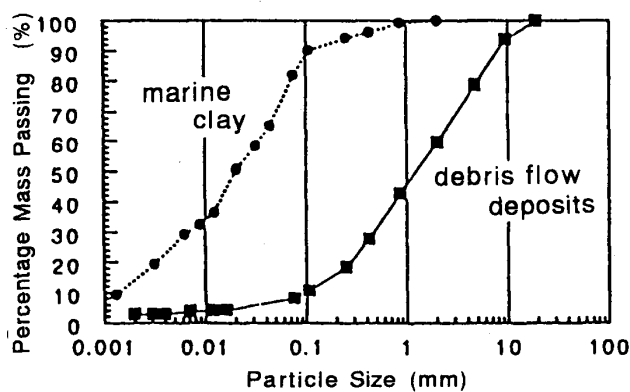


Fig. 1 Grain size accumulation curves

Table 1 Physical properties of the marine clay

Saturated unit weight $\gamma_{\text{sat}}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	1.33
Density of soil particles $\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2.75
Natural water content $w_n$ (%)	120.3
Salinity (%)	1.91
pH	7.48
Liquid limit $w_L$ (%)	91.3
Plastic limit $w_p$ (%)	34.5
Plasticity index $I_p$	56.8

### 3. 海成粘土の固化実験

#### 3.1 実験方法

Table 2 に、供試体作成及び養生方法を示す。5種類の配合比のうち、B配合は、後述する実海域養生固化実験における配合 ( $\alpha$ ,  $\beta$  配合) と同じ固化材の量 15% とした。B-1 は、混練りの際、水を加えない配合である。B-1 の水セメント比  $W/C = 6.80$ 、B-2 及び B-3 の  $W/C$  をそれぞれ 8.00, 9.00 とした。また A

配合は、B配合との比較として、固化材量を 20% に増やした場合である。A-2, A-3 の  $W/C$  は、それぞれ B-2, B-3 と対応している。B-1 以外の配合にはそれぞれ不足分の水量 (海水) を加えている。

ミキサーで充分混合した試料を直径 5 cm, 高さ 10 cm のプラスチック製モールドに入れ、振動を加えながら気泡を十分に除去して成形した。供試体本数は 1 条件 5 本とし、成形後の供試体は、7 日間空气中養生し、その後は水温  $20^\circ\text{C}$  一定の水槽で所要期間水浸養生した。水槽内の養生水は、水道水を用い、一週間毎に取り替えた。

Table 2 Condition of hardening tests for the marine clay only

Hardening material	Normal portland cement	
Mix proportions (Marine sludge: Cement)	(weight %)	
A-2;	80 : 20	$W/C = 8.00$
A-3;	80 : 20	$W/C = 9.00$
B-1;	85 : 15	$W/C = 6.80$
B-2;	85 : 15	$W/C = 8.00$
B-3;	85 : 15	$W/C = 9.00$
Cure method	in water at laboratory (tap water, constant $20^\circ\text{C}$ ) change cure water per one week	
Period for cure	7, 14, 28, 49, 91 days	

#### 3.2 結果及び考察

##### 1) 一軸圧縮強さ

Fig. 2 に、所要期間養生後の供試体における、材令と一軸圧縮強さ  $q_u$  との関係を示す。どの配合とも、 $q_u$  は材令 7 日で大きく強度が伸びた後、材令が伸びるにしたがい、若干強度の伸びを示している。配合別では、B配合の方が A 配合より高い強度を示すことが分かる。

Fig. 3 に、水セメント比  $W/C$  と一軸圧縮強さ  $q_u$  との関係を示す。どちらの配合とも、 $W/C$  が大きくなるにしたがい  $q_u$  は低下している。また、同一の  $W/C$  で比較すると、海成粘土の配合量が多い B 配合の方が高い強度を示していることが分かる。これは A 配合が海成粘土の配合量が少ない分、水セメント比を調整するために新たに加えた水量が多かったため、水セメント比は同じであるが、結果として低い強度になったものと考えられる。

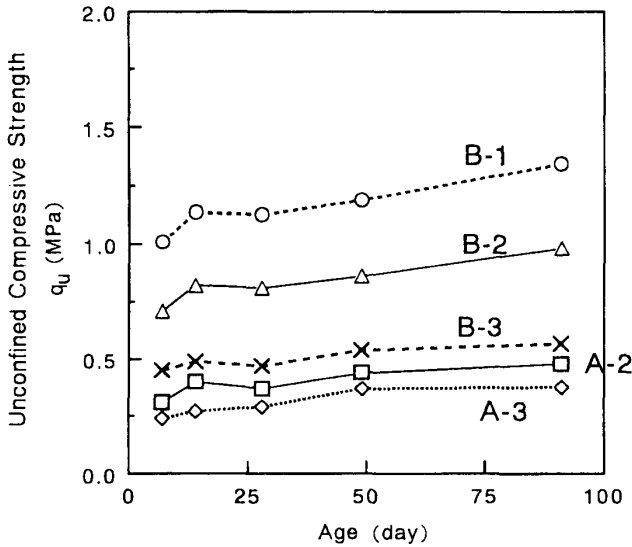


Fig. 2 Relationships between age and  $q_u$

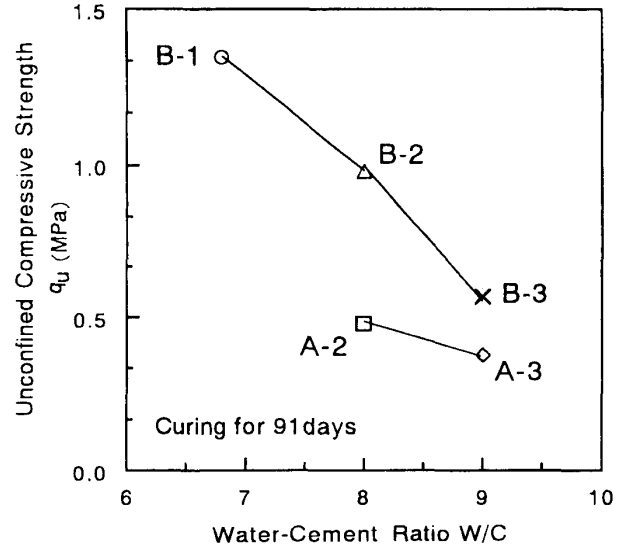


Fig. 3 Relationships between W/C and  $q_u$

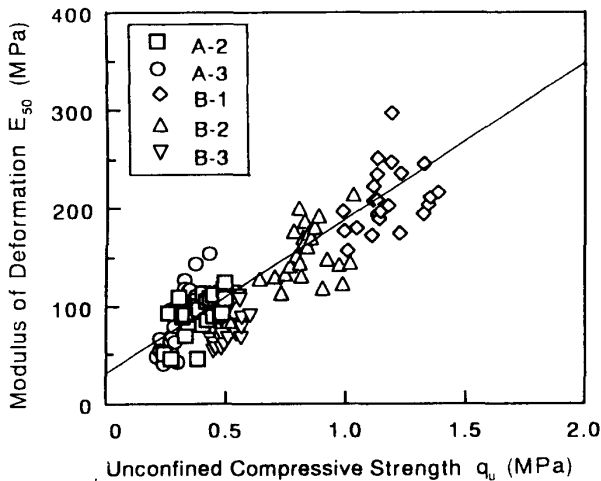


Fig. 4 Relationships between  $q_u$  and  $E_{50}$

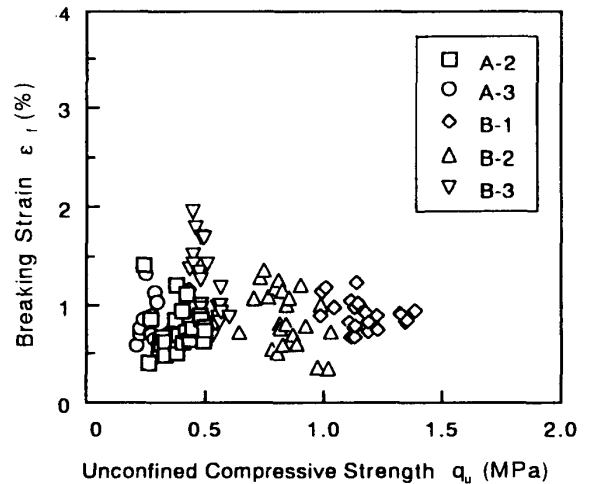


Fig. 5 Relationships between  $q_u$  and  $\epsilon_f$

2) その他の力学特性

一軸圧縮試験からは、一軸圧縮強さ  $q_u$  の他に、変形係数  $E_{50}$  と破壊ひずみ  $\epsilon_f$  を得ることができる。

Fig. 4 に、一軸圧縮強さ  $q_u$  と変形係数  $E_{50}$  の関係を示す。 $q_u$  と  $E_{50}$  は正の相関関係があり、両者に直線関係があるとすれば、相関係数は  $r=0.573$  で相関性はあまり高くないと言える。関係式は、

$$E_{50} = 159q_u + 31 \text{ (MPa)} \quad (1)$$

である。 $E_{50}$  には、ベディングエラーによる誤差が大きく含まれているため、 $E_{50}$  と  $q_u$  の関係からは、セメント改良土の変形係数と強度の関係の定量的な本質を捉えることができない<sup>4)</sup> と言われている。しかし、一般的に言われている自然地盤の粘性土におけるセメント系安定処理土の  $E_{50} = 105q_u$  の関係<sup>5)</sup> と比較した場合、ヘドロのみを固化した本試料の場合はやや大きい傾向を示している。

Fig. 5 に、一軸圧縮強さ  $q_u$  と破壊ひずみ  $\epsilon_f$  の関係を示す。一般的なセメント系安定処理土の破壊ひずみは、 $q_u$  が  $0.5 \text{ MPa}$  以下の強度では通常の土と同様にかなりばらつき、強度が増加するのにしたが脆性的な傾向が著しくなり、 $1 \text{ MPa}$  以上の  $q_u$  では破壊ひずみは  $0.5\% \sim 1.0\%$  の範囲に近づく<sup>6)</sup> と言われている。本実験で用いた海成粘土でも、 $q_u$  が  $0.5 \text{ MPa}$  以下では  $\epsilon_f$  は  $0.4 \sim 2.0\%$  と大きくばらついているが、 $q_u$  が  $0.5 \text{ MPa}$  以上では  $\epsilon_f$  は  $1\%$  程度に収束する傾向を示している。

4. 実海域養生固化実験

前述の海成粘土のみの固化実験では、得られる固化強度は小さく、変形量も大きいことが明らかとなった。そこで、雲仙・普賢岳火山性土石流堆積物（以下、堆積物と示す）を海成粘土に混入し、固化体の強度を高

めることを試みた。また、固化体の海洋構造物への適用を考えていることから、大村湾内の実海域において供試体の養生を行った。

#### 4.1 実験方法

Table 3 に、供試体作成及び養生方法を示す。固化材は普通ポルトランドセメントを用い、配合試料として用いた堆積物、海成粘土及び固化材それぞれの配合は、 $\alpha$  と  $\beta$  の2条件で行った。どちらの配合比とも水セメント比W/Cは2.17である。これらの試料と固化材をホバート型ミキサーで十分に混合した後、直径10 cm、高さ20cmのプラスチック製モールドに入れ、振動を加えながら十分に気泡を除去して成形した。供試体本数は1条件3本とした。配合は、1996年8月8日（夏期、平均水温25℃）と、同年11月28日（初冬期、平均水温15℃）の2回行った。成形後の供試体は7日間気中養生した後、所要期間、実海域内で水浸養生した。供試体の養生位置は、大村湾内における大村市竹松地区の埋立堤防外側の、波浪の影響が少ない消波ブロック上水深約2 mの位置とし、透水性のある箱内にひもで固定して静置し養生した。

#### 4.2 一軸圧縮強度

Fig. 6 に、所要期間養生後の供試体における、材令と一軸圧縮強さ  $q_u$  との関係を示す。図中、 $q_u$  は3本の供試体の平均値で表している。

8月に養生開始した供試体の場合、 $\alpha$  及び  $\beta$  配合とも材令7日で高い強度を示し、Fig. 2 に示した固化強度と比較して、最も高い強度を示すB-1の4~6倍の強度を有していることが分かる。両配合とも Fig. 2 に示した海成粘土のみの固化特性と比較して強度

Table 3 Condition of submerged hardening tests mixed with the marine clay and volcanic deposits

Hardening material	Normal portland cement
Mix proportions (Deposits: Clay: Hardening material) (weight %)	$\alpha$ ; 70 : 15 : 15 (W/C=2.17) $\beta$ ; 60 : 25 : 15 (W/C=2.17)
Grain size of Deposits	16mm~4 mm : 40% 4 mm~ : 60%
Cure method	submergence in sea water
Mixing day	① 8 Aug.'96 (average at 25℃) (sea water temp.) ② 28Nov.'96 (average at 15℃)
Cure period	7, 28, 49, 91, 182 (170) days

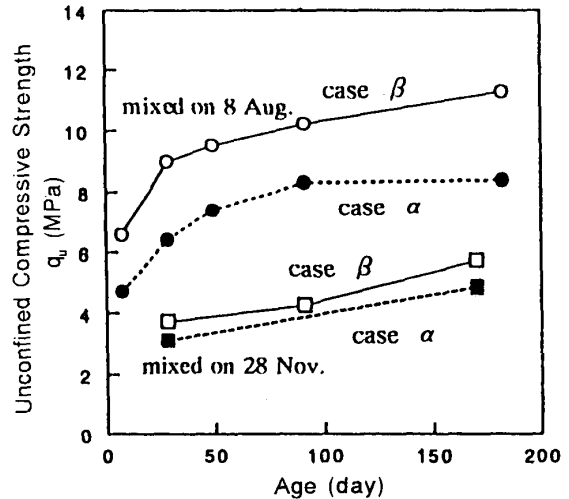


Fig. 6 Hardening strength for specimens submerged at sea

の伸びが持続するのは、セメントの水和反応によって生成された水酸化カルシウムが堆積物に含まれるシリカ分 ( $\text{SiO}_2$  64.5%) と結合し、ポゾラン反応を発生させ、強度を増進させるためであると考えられる。

一方、11月に養生開始した供試体の  $q_u$  は、8月に同じ配合条件で養生開始した供試体の場合と比べて、非常に低い値となっている。この違いは、無視できないほどに大きい。この固化強度の違いが何に起因するものか、以下に検討を行った。

#### 5. 固化強度に及ぼす影響の検討

前述の実海域における固化強度において、養生開始時期の違いによって、固化強度が大きく異なる結果となった。固化強度に及ぼす影響として考えられるのは、配合条件、練混ぜ作業及び圧縮試験方法が同じだとすると、養生水の温度の違い、海成粘土に含まれる有機物含有量及び有機物成分の違い等が考えられる。

海成粘土中の有機物成分のうち、固化強度に大きな影響を及ぼすものとして、有機物の腐食によって生じるフミン酸の存在が考えられる。この土中のフミン酸含有量が多いほど固化強度が低下する場合がある<sup>7)</sup>ことが言われている。

そこで、フミン酸含有量と養生温度の二つの影響因子それぞれについて検討を行った。供試体の養生温度は、10℃、20℃、30℃の3条件とし、それぞれの海成粘土のフミン酸含有量を測定した。

##### 5.1 フミン酸が固化強度に及ぼす影響

###### 1) フミン酸抽出方法

用いた海成粘土試料の採取から、練混ぜ固化までの

期間が異なり、フミン酸含有量の変化が懸念されたため、海成粘土の配合時毎のフミン酸含有量の測定を実施した。

フミン酸の抽出方法として、まず湿潤状態の海成粘土試料約120gを、0.5規定か性ソーダ溶液中にひたして48時間放置した後、遠心分離器（300rpm、約10分間）を用いてろ液と沈殿物を分離する。この段階で、土中の有機物のうちのアルカリに解けない成分は沈殿物として分離され、ろ液の方にはアルカリ可溶性の成分であるフミン酸とフルボ酸が抽出される。次に、ろ液に先に加えた0.5規定か性ソーダ溶液と同量の0.5規定塩酸溶液を加えて中和すると、フミン酸のみが沈殿するので、フミン酸とフルボ酸が分離できる<sup>8)</sup>。

本報告で用いるフミン酸含有量とは、以上のような方法で抽出したフミン酸の乾燥重量を、もとの海成粘土の乾燥重量に対する割合で表したものである。

## 2) 測定結果及び考察

フミン酸含有量の測定結果を Table 4 に示す。どの試料ともフミン酸含有量は0.4%程度と少なく、また値に大きな違いはないことが分る。フミン酸含有量と一軸圧縮強さとは負の相関関係がある<sup>8)</sup> ことは言われ

Table 4 Analysis of Humic-acid content

Specimens (Cure temp.)	Humic-acid content (mass-%)
10℃	0.43
20℃	0.45
30℃	0.38
Average	0.42

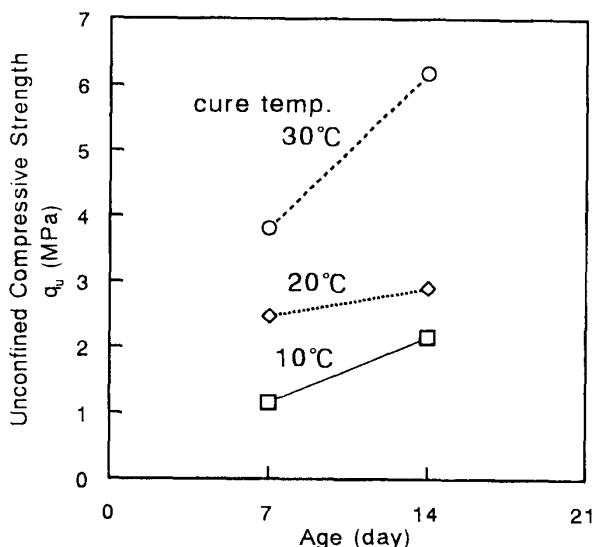


Fig. 7 Effects of cure temperature

ているが、その関係と比較してみても、本実験で測定したフミン酸含有量の違い程度では、一軸圧縮強さにはほとんど影響はないと考えられる。したがって、本実験における固化強度に及ぼすフミン酸含有量の影響は、フミン酸含有量がほとんど等しいことから、ほとんど無視できると考えられ、固化強度には養生温度の違いが大きく影響していることが考えられる。

## 5.2 養生温度が固化強度に及ぼす影響

### 1) 供試体作成方法

供試体の配合は、Table 3 と同じ条件で実施した。養生方法は成形から1週間を10, 20, 30℃一定の環境養生で、その後1週間は環境養生時の温度と同じ温度での水浸養生（水道水）とした。

### 2) 養生温度と固化強度の関係

Fig. 7 に、各養生温度における材令と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係を示す。どの養生温度においても、材令とともに強度  $q_u$  は上昇していることが分かる。また、養生温度が高くなるにしたがい、 $q_u$  は増加している。特に、材令14日で比較すると、養生温度30℃の  $q_u$  は、20℃のそれより約2.1倍も大きい値を呈している。材令と強度の関係は、土の種類、固化材あるいは養生条件等で異なってくるが、海成シルトで普通ポルトランドセメントで安定処理した場合の養生温度30℃と20℃での強度比は1.2倍程度であり<sup>9)</sup>、本実験で得られた値の大きさは注目に値する。

Fig. 8 は、実海域における養生温度の影響を見るために、Fig. 7 のデータを Fig. 6 に加えて描き直したものである。実海域の水温を考慮して比較すると、室内での20℃養生の  $q_u$  が、若干低い傾向にはあるが、ほ

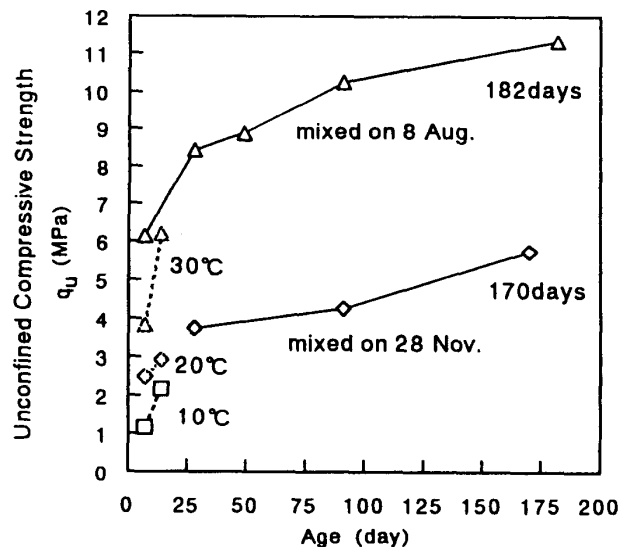
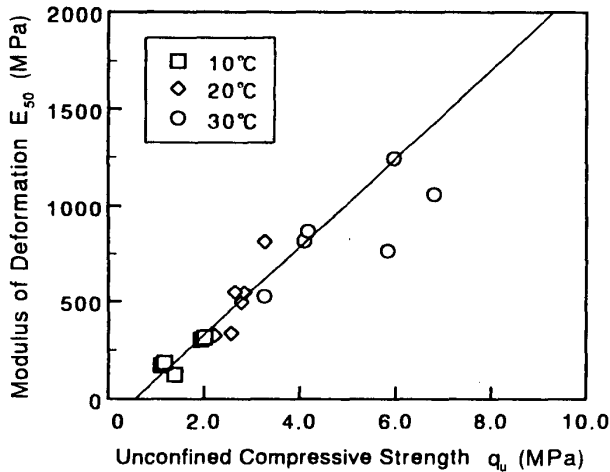


Fig. 8 Evaluation for effects of cure temperature

Fig. 9 Relationships between  $q_u$  and  $E_{50}$ 

ば室内養生実験と実海域養生実験との結果が良く一致していることが分かる。このことから、養生時期の固化強度が大きく異なった原因は、養生温度の違いによるものが大きいと言える。

### 3) その他の力学特性

Fig. 9に、実海域養生供試体における変形係数  $E_{50}$  と一軸圧縮強さ  $q_u$  の関係を示す。なお、材令7日と14日の供試体に関するデータのみが示されている。両者に相関があるとして関係式を求めると、

$$E_{50} = 250q_u - 142 \text{ (MPa)} \quad (2)$$

(相関係数  $r = 0.873$ )

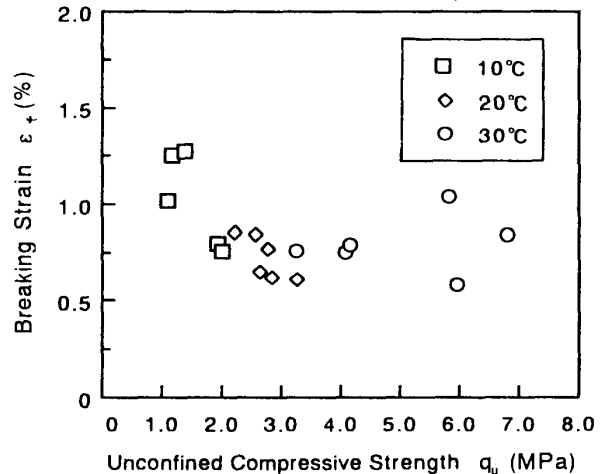
となる。Fig. 4のヘドロのみの場合の(1)式と比較して見れば、土石流堆積物を混入した実海域供試体の方が  $q_u$  に対する  $E_{50}$  は約60%大きくなっていることが分かる。これは、土石流堆積物混入により、間隙の減少による供試体密度の増加と、セメントの固化反応の促進による結果であると考えられる。

Fig. 10に、材令7日及び14日の供試体における破壊ひずみ  $\epsilon_f$  と一軸圧縮強さ  $q_u$  の関係を示す。  $q_u$  が大きくなるにしたがい、  $\epsilon_f$  は0.8%程度に減少する傾向を示している。Fig. 5のヘドロのみの結果と比較すれば、Fig. 10の  $\epsilon_f$  は若干小さくなっている。このことは、  $q_u$  が大きくなったことにより、供試体が脆性的な破壊を示すようになった表れであると考えられる。

## 7. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 海成粘土のみを固化した場合、どの配合とも初期強度は小さく、また材令の延びに伴う強度の上昇は小さい。水セメント比が大きくなるにしたがい、一

Fig. 10 Relationships between  $q_u$  and  $\epsilon_f$ 

軸圧縮強さは比例的に小さくなる。

- 2) 海成粘土に土石流堆積物を混入して固化した供試体の実海域養生実験では、海成粘土のみを固化した場合と比較して、固化強度は4~6倍の高い強度を示した。しかし、固化強度は、配合時期によって強度が大きく異なる結果となった。
- 3) その固化強度に及ぼす要因として、海成粘土中のフミン酸含有量と、供試体の養生温度の違いに着目して実験した結果、今回用いた海成粘土試料ではフミン酸含有量の影響はほとんど無いと思われ、養生温度の影響が固化強度に大きく影響することが明らかとなった。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、長崎県工業技術センター海洋技術科・田中 稔科長には、研究全般にわたりご指導頂くとともに、実験に際し多大な便宜を図って頂いた。また、同・大脇 博氏にはフミン酸測定でご協力頂いた。ここに、深謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 後藤・山中・徳永他；雲仙・普賢岳火山性土石流堆積物の有効利用に向けた物理及び力学特性の把握，火山灰質土の性質とその設計・施工に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.313-320，1995。
- 2) 山中・後藤・中條他；大村湾海成粘土の土質性状と固化特性に関する実験的研究，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B，pp.480-481，1996。
- 3) 後藤・山中・平井他；大村湾海成粘土の室内及び実海域養生固化実験，第32回地盤工学研究発表会平

- 成9年度発表講演集, 地盤工学会, pp.2431-2432, 1997.
- 4) 木幡・前川・矢島・村本・馬場崎: セメント系安定処理土の強度・変形特性について, セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.1-19, 1996.
- 5) 細谷・牧原・木幡・奈須・日比・萩野: セメント系改良材による現場改良土の品質評価, 同上, pp.42-56, 1996.
- 6) 嘉門・勝見: 河川の底質汚泥の処理と地盤材料への有効利用, 京都大学防災研究所年報, 第35号, B-2, pp.267-287, 1992.
- 7) 大場・藤崎・小島: 土壌有機物がセメントの硬化におよぼす影響, セメント・コンクリート, No.237, pp.2-8, 1966.
- 8) 久楽・三木・岡田: 土中のフミン酸が土質改良効果に及ぼす影響, 土木技術資料, Vol.26, No.8, pp.405-410, 1984.
- 9) 堀内・伊藤・森田・吉原・久野・花圃・田中: 低温度下におけるセメント混合土の強度発現性, 第19回土質工学研究発表会, pp.1609-1610, 1984.