

# 石炭灰を利用した海成軟弱粘土のセメント固化による 人工漁礁への適用性

後 藤 恵之輔\* · 山 中 稔\*  
富 永 恵 介\*\* · 田 中 稔\*\*\*

## Hardening Properties of Marine Soft Clay Using Fly Ash and Its Application to an Artificial Fish Reef

by

Keinosuke GOTOH\*, Minoru YAMANAKA\*  
Keisuke TOMINAGA\*\* and Minoru TANAKA\*\*\*

A huge amount of marine clay accumulated in Omura Bay, Nagasaki becomes a cause of the water pollution. Because the marine clay is very soft, it is hard to be utilized. On the other hand a fly ash produced from thermoelectric power plants is increasing year by year with the change of recent energy situation. But both of these materials are able to regard as valuable resources.

In this study in order to discuss the utilization of these materials, several cement hardening laboratory tests of the marine clay by using the fly ash were carried out for the long term. As a result the hardened materials mixed the fly ash showed very high strength, and it became clear that the application to an artificial fish reef was fully recognized.

### 1. はじめに

湖沼や港湾部等の水域では、水の移動が少ないために軟弱な粘土が多く堆積する環境にある。長崎県中央に位置する大村湾は、その外海とは湾北部の針尾瀬戸と早岐瀬戸の2カ所で通じているのみで、外海水との交換が困難な二重の閉鎖性内湾を形成している。この海水交換の少ない地理的条件に加えて、大村湾周辺の開発が進むにつれて生活雑排水の流入が増加し、海底には海成軟弱粘土が大量に堆積している。これまでに著者ら<sup>1), 2)</sup>は、大村湾海成粘土の有効利用を目的として、海成粘土のセメント固化実験を行ってきた。その結果として、海成粘土のみのセメント固化では、高い固化強度を得られないことが明らかとなった。

一方、産業廃棄物の一つに挙げられる火力発電所から産出される石炭灰は、1970年代の2度の石油危機か

ら石油代替エネルギーとして石炭火力発電が見直され、それ以降、電力事業から発生する石炭灰は年々増加傾向にあり、現在では年間500万t以上<sup>3)</sup>と言われている。そこで、海成粘土のセメント固化による有効利用における強度増加を目的として、自硬性、軽量性を有する石炭灰の添加を試みた。

本研究では、大村湾の水質改善と石炭灰の資源としての有効利用を目的として、セメントを用いた混合固化実験を行うことにより、得られた一軸圧縮強さから、例えば、あまり強度を必要としない人工漁礁への適用を検討するものである。

### 2. 用いた試料の諸特性

#### 2.1 大村湾海成粘土の物理特性

実験に用いた海成粘土は、大村湾内でも最も水質汚

1999年4月23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 Civil Engineering)

\*\*\*長崎県工業技術センター (Technology Center of Nagasaki)

濁現象が進行している湾最奥部に位置する津水湾の海底上層部より、船上からエクマンバージ型採泥器を用いて採取した。津水湾の水深は約5 m程度であるが、海水は非常に濁っており、透明度は1 mにも満たない。採取した大村湾海成粘土は、色調は暗灰色を呈し、多くの腐食有機物を含んでいることが予想されたが、採取直後は腐食臭は特に感じられなかった。

試料として用いた海成粘土は、4 mmふるいを用いて海成粘土内部に含まれる貝殻や木枝等の混入物を取り除いて、実験に使用している。

Table 1 に、大村湾海成粘土の土質工学的物理試験結果を示す。

Table 1 Physical properties of the marine clay

Saturated unit weight	$\gamma_{\text{sat}}$	(gf/cm <sup>3</sup> )	1.40
Density of soil particles	$\rho_s$	(g/cm <sup>3</sup> )	2.70
Natural water content	$w_n$	(%)	120.3
pH			9.4
Liquid limit	$w_L$	(%)	48.6
Plastic limit	$w_p$	(%)	27.3
Plasticity index	$I_p$		21.3
Ignition loss	$L_i$	(%)	14.3
Humic-acid content		(%)	0.3

津水湾より採取した海成粘土試料は、自然含水比120.3%であり、pHは9.4で若干高いアルカリ性を示し、強熱減量値は14.3%と有機物を比較的多く含んでいることが明らかとなった。また、日本統一分類法によれば、CL（低液性限界の粘土）に分類される。

閉鎖性水域に堆積する海成粘土は黒色を呈し、異臭を発する。その原因として、有機物の分解が進み腐食したものが挙げられる。その中でも腐植酸の一種であるフミン酸は、その含有量と固化強度において負の相関がある<sup>4)</sup>と言われており、本研究の固化実験においてフミン酸による影響が懸念されたため、その含有量を測定した。測定の結果、本海成粘土試料のフミン酸含有量は0.3%であり、この程度のフミン酸含有量では、固化強度に対する影響は無いと考えられる。

## 2.2 石炭灰

本実験では、九州電力大村火力発電所においてマルチサイクロンで収集した石炭灰（フライアッシュ）を用いた。石炭灰を利用する大きな特徴として、その自硬性と軽量性が挙げられる。石炭灰試料は粒度試験結果より、最大粒径  $D_{\text{max}}$  は2 mm、平均粒径  $D_{50}$  は0.04mmであり、非常に小さな粒径を呈している。

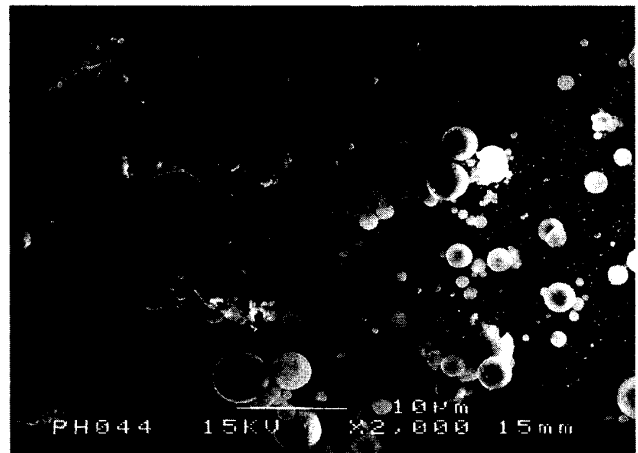


Photo 1 Fly ash particle (←————→ 10 $\mu$ m)

Photo 1 に、石炭灰試料の電子顕微鏡写真を示す。粘土粒子（5  $\mu$ m 以下）は一般に扁平な粒子形状を呈しているのに対し、石炭灰の粒子形状は表面が滑らかな球形粒子から構成されることが分かる。一般に、コンクリートの流動性を向上させるためには、混入する材料の粒径は丸い方が良くとされており<sup>5)</sup>、この石炭灰の丸い粒子形状が、流動性を促す効果を有していると言える。

石炭灰試料の化学分析結果は、Table 2 に示すとおりである。

Table 2 Chemical analysis

Contents	Omura thermal power made (%)	Matsuura thermal power made <sup>6)</sup> (%)
SiO <sub>2</sub>	62.10	58.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.45	28.23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.20	4.20
CaO	1.80	0.75
MgO	1.28	0.41
NaO <sub>2</sub>	1.65	0.47
K <sub>2</sub> O	2.22	0.70
SO <sub>3</sub>	0.22	0.00
TiO <sub>2</sub>	0.00	1.35
ig. loss	3.74	4.49

表中には、同じ長崎県内に位置する電源開発松浦火力発電所産石炭灰の化学分析結果<sup>6)</sup>を併記している。両石炭灰試料における各成分の差は、原料とする石炭の違いによるものであるが、ほぼ同じ値を示すと言える。成分分析の結果、二酸化ケイ素（SiO<sub>2</sub>）が最も高い値を示している。このシリカ分は、十分な湿潤養生を行えばセメントの水和反応においてポゾラン反応

を生じさせ、後述する固化強度を上昇させる働きを有していると一般的に言われている。このことから、石炭灰の利用は、固化強度促進材料及び水中構造物への適用としての有効性を示していると言える。また、石炭灰中のカルシウム含有率が高ければ、自己硬化性も高くなり、一軸圧縮強さも増加する<sup>7)</sup>と言われている。本石炭灰試料のCaOは1.80%であり、一般的な石炭灰の中では若干少ないと言える。

その他の利点として、混和材として石炭灰を用いたコンクリートは気密性、水密性が高く、塩分の浸透を抑制する効果が認められるので、海水の作用を受けるコンクリートに適している<sup>8)</sup>ことが言われている。以上から、本研究の研究目的である、固化体の漁礁への適用を検討する観点から、石炭灰使用の優位性が大きいと考えられる。

### 3. 石炭灰と海成粘土の混合固化実験

#### 3.1 配合条件および養生方法

Table 3に、配合条件を示す。混練りの順序としては、初めに石炭灰、普通ポルトランドセメント（以下、NPと称す。）を均一になるように充分混合した後、海成粘土及び海水を加えて充分に攪拌した。混練り終了直後に直径10cm、高さ20cmのプラスチック製モールドに少量ずつ詰め込んだ。詰め込み時には、供試体内部に空隙が生じないように、卓上型バイブレーターを用いて供試体に振動を加え、気泡を充分に除去しながら均一な供試体作成を図った。さらに、供試体上面からの急速な乾燥を防止するために、プラスチックフィルムとガラス板を用いて上面を覆い、成型から1週間は室内気中養生で、その後は水温20℃一定の水槽で所要期間を室内水浸養生（人工海水）とした。また、養生水は1週間毎にpHを測定し、1ヶ月毎に交換した。

Table 3 Conditions of hardening tests for the marine clay and the fly ash

Hardening material	Normal portland cement
Mix proportions (Weight %)	(Marine clay:Fly ash:Cement) =35:45:20
W/C	1.95
Cure method	in water at laboratory (tap water, constant 20℃) change cure water per one month
Period for cure	7, 28, 49, 91, 182days

#### 3.2 一軸圧縮試験結果

##### (1) 供試体重量の推移

Figure 1に、所要期間養生後の供試体における材令と供試体重量の関係を示す。各材令においてバラツキはあるものの、養生日数の増加に伴い供試体重量は増加傾向である。水浸養生であるため、養生日数の増加により水分を吸収し重量が増加したのではないかと考えられ、材令と含水比の関係について検討を行った。Figure 2に材令と含水比の関係を示す。特に養生49日目の含水比が低く、各材令を平均しても材令初期の含水比の方が長期養生後の含水比よりも高い傾向にある。このことから、セメントによる水和反応の影響ではないかと考えられる。

Figure 3は、セメント混練り後の水和反応概念図<sup>9)</sup>を示している。Fig. 3(a)~Fig. 3(c)は、(a)水和直後、(b)水和数時間後、(c)水和数日後を示している。まず、(a)のセメント混練り直後では、水和反応は進行していないためセメント粒子と空隙部分の水

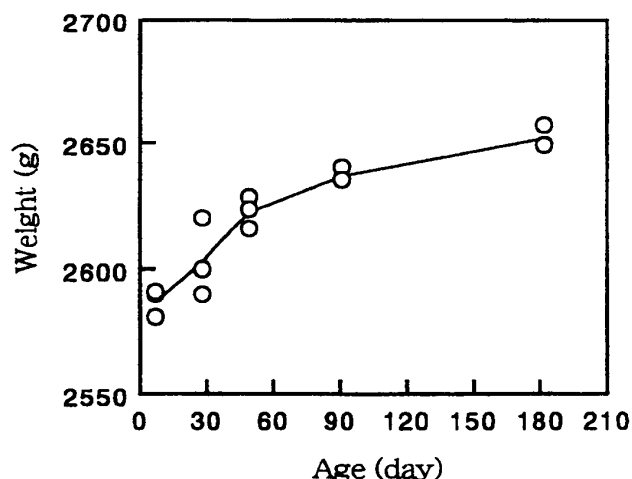


Fig. 1 Relationship between specimen weight and age

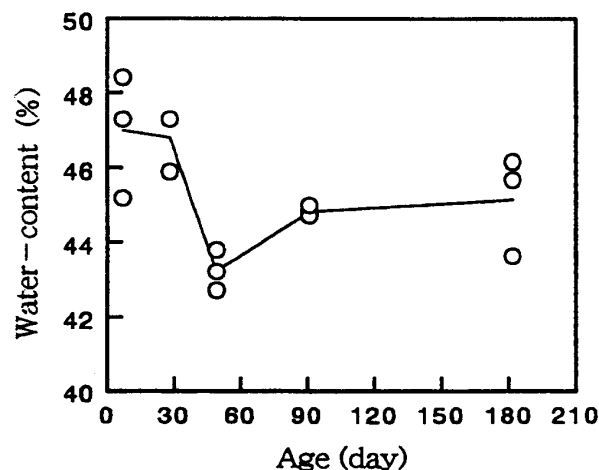


Fig. 2 Relationship between water content and age

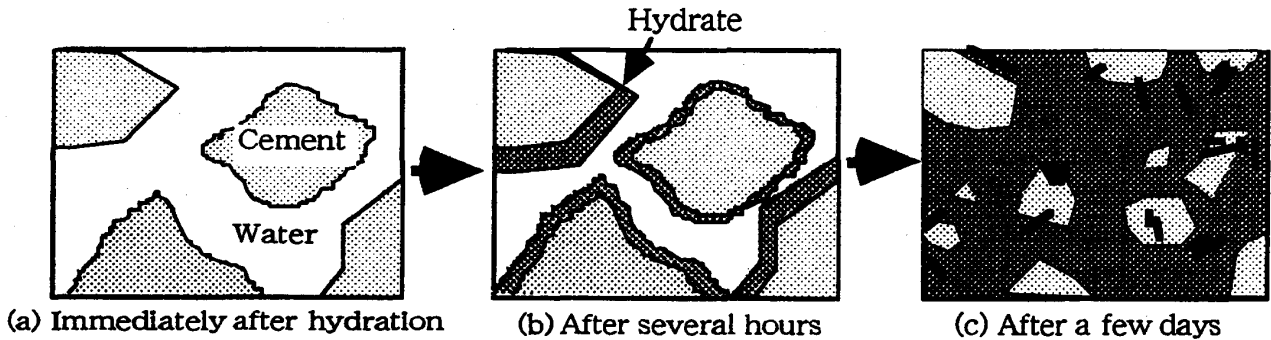


Fig. 3 Concept of hydration reaction (partly modified after Ref. (9))

しか存在していない。混練り数時間後の (b) では、セメント粒子を覆う様に水和生成物の層が徐々に厚くなり、水和反応が進行している状態である。その後、数日間養生を行えば、(c) の様に水和生成物層が十分厚くなり、粒子同士が接着し間隙を満たす。以上の (a) ~ (c) の現象を水和反応の緻密化と言う。

海成粘土のセメント固化反応過程を電子顕微鏡を用いて微視的観察した結果、水和生成物であるエトリンガイト結晶が確認され、材令に伴い結晶が長くなり、緻密化が進行する<sup>10)</sup> ことが明らかとなっている。このことから、海成粘土に石炭灰を添加した本固化実験においても、水和生成物により供試体内部の緻密化が進行し、材令に伴い供試体重量が増加したのではないかと考えられる。

(2) 固化強度の推移

Figure 4 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の関係を示す。各材令における固化強度は、材令49日を除いて全て一定値が得られていない。これは、今回使用した海成粘土は高含水比状態であったため、非常に粒径の細かい石炭灰および固化材と海成粘土が充分均一に練り混ざっていなかったため

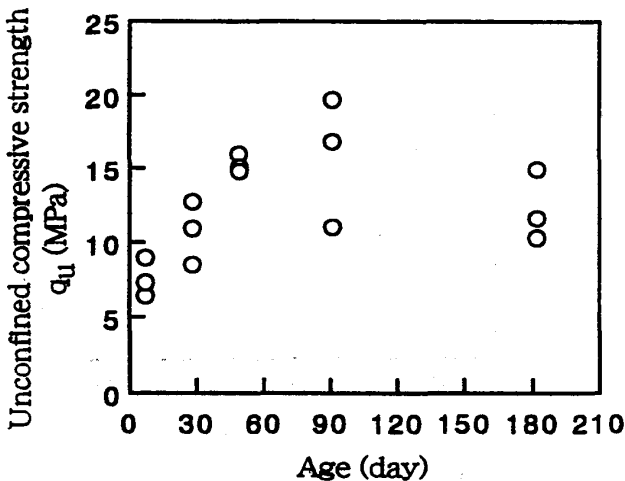


Fig. 4 Relationship between  $q_u$  and age

はないかと考えられる。また、材令49日まで増加傾向にあった固化強度が材令182日では若干低下している。材令91, 182日の固化強度の大きなバラツキから判断すると、材令49日に得られた固化強度15 MPa 程度が、海成粘土と石炭灰の混合固化実験において得られる固化強度のピークではないかと考えられる。

(3) 得られた固化強度の比較

Figure 5 に、先に述べた、海成粘土と石炭灰の混合固化供試体 (以下、石炭灰混入供試体と称す。) の材令と一軸圧縮強さの関係を示すとともに、図中にはこれまで行ってきた固化実験において、NPを固化材として用いた一軸圧縮試験結果を併記している。それぞれの供試体配合条件は、普賢岳堆積物のみ固化 (雲仙・普賢岳土石流堆積物: NP=80:20)<sup>11)</sup>、海成粘土のみ固化 (海成粘土: NP=80:20)、および海成粘土と普賢岳堆積物の混合固化 (海成粘土: 雲仙・普賢岳土石流堆積物: NP=25:60:15)<sup>12)</sup> であり、固化材等の配合量において若干の相違があるものの、固化強度の推移に着目して石炭灰供試体との比較検討を行って見た。

海成粘土は高含水比であり非常に軟弱である。この

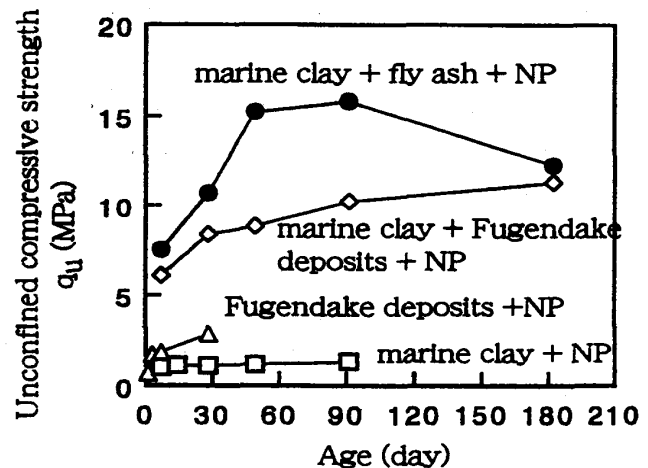


Fig. 5 Relationship between  $q_u$  and age

ため、海成粘土のみの固化では、初期固化強度は非常に低く、長期間養生を行っても強度増加は望めないことが明らかとなっている。一方、雲仙・普賢岳土石流堆積物を骨材として単独で固化した場合、材令28日において海成粘土のみ供試体の約2倍の固化強度が得られ、材令に伴い固化強度は若干の増加を呈している。このような材令に伴う強度増加は、海成粘土のみの固化では得られない現象であり、水和反応の促進による固化強度の増加と判断される。さらに、両者をNPにより固化した結果、材令初期においても約6 MPaもの高い固化強度が得られ、養生期間の増加に伴い固化強度は上昇し、7日強度の2倍もの固化強度である約12 MPaを記録している。

石炭灰混入供試体の固化強度は、養生初期である材令7日において約7 MPaの固化強度を示し、各材令においても上記のいずれの固化体よりも高い固化強度を有している。また、短期間の養生によって海成粘土と普賢岳堆積物混合固化供試体の182日強度を大きく上回り、混練り後から有効利用までの期間が短縮できる大きな優位性を持つことが明らかとなった。

### 3.3 pHの推移

#### (1) 供試体破断面におけるpHの推移

Table 4には、一軸圧縮試験後の石炭灰混入供試体破断面の破片を用いたpH測定結果を示している。材令7日から49日までは、材令の増加に伴い供試体破断面のpHは低下している。セメント固化体の海中投棄による環境面に及ぼす影響については、セメント混合直後から固化体のpHは11~12程度の高いアルカリ性を示すが、空気中の炭酸ガスにより内部の炭酸化が進み、次第にアルカリ性を失い中性化する<sup>13)</sup>とされている。しかし、材令91日ではこれまでとは逆に、pHが大きく上昇している。中性化の原因は、大きく分けると次の3つに分類される。①炭酸ガスによる場合、②炭酸ガス以外のガスによる場合、③熱による場合である。本研究では、室内の水槽（養生温度一

Table 4 pH of specimen pieces

Age (day)	pH
7	11.4
28	11.1
49	9.9
91	11.2
182	11.8

定)により水浸養生を行っていたため、上記の原因は全て当てはまらないことから炭酸化が進行していないと考えられる。材令49日に大きくpHが低下しているのはセメントの水和反応が影響しているのではないかと考えられる。

#### (2) 養生水のpHの推移

Figure 6は、材令と養生水pHの測定値及び養生水pHの増加分の関係を示している。材令35日までは大村湾の海水を用いて水浸養生を行っていたため、材令初期において比較的高いpHを呈している。その後は、実験の利便性等を考慮して養生水に人工海水を適用したため、1ヶ月毎の養生水交換時ではpHはほぼ一定値が得られている。

pHの増加分（養生開始から1ヶ月毎に行った養生水交換直後のpH測定値からの増加分）は材令初期で大きく上昇した後、養生水の交換後もpH=0.8程度の増加を繰り返している。しかし、材令91日以降では徐々にpHの増加分が低下している。さらに、材令119日における養生水のpHは、養生水入れ替え直後のpHと等しく、その後は現在までpHの増加は見られていないことから、材令120日程度水浸養生を行えば、固化体からpHの溶出はほぼなくなると考えられる。また、固化体を実海域に水浸する場合は、海水流動により固化体からpHの溶出は希釈されると考えられることから、材令初期を除けば、実海域に水浸しても周囲に影響をあまり与えないと考えられる。

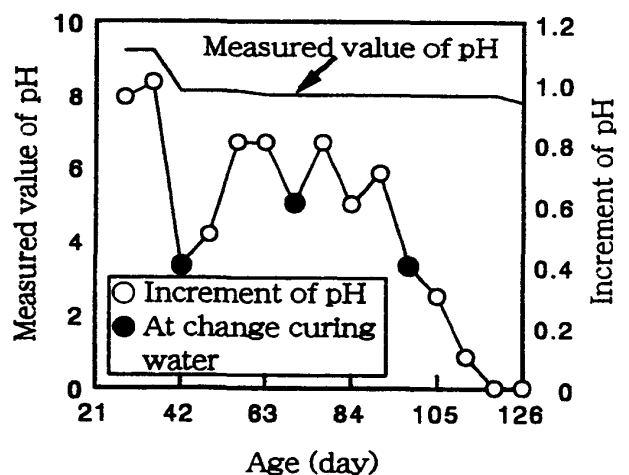


Fig. 6 Change of pH of curing water

### 4. 海中構造物への適用性

上記で得られた結果から、大村湾海成粘土と石炭灰の混合固化体における人工漁礁への適用性について検討する。人工漁礁は、人工的に海中に構造物を設置し、

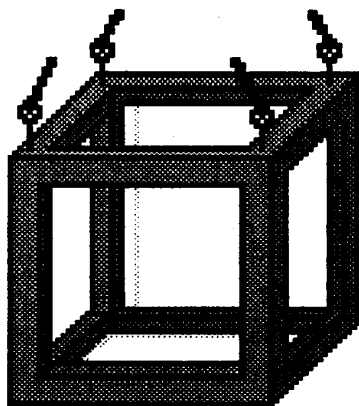


Fig. 7 Model of proposed artificial fish reef

対象とする水産生物の保護培養を図るための漁場施設である。その人工漁礁の設計についての検討項目は、施工時の運搬・積み重ねによる自重、着底時において海底面との接触時に発生する衝撃力等に耐え得る強度が必要であり、人工構造物による環境面へ及ぼす影響の考慮も必要である<sup>14)</sup>とされている。

本研究では、着水時における漁礁を吊り上げた状態で、部材に生じる引張強度から漁礁自体耐え得るかの検討を行った。Figure 7に、人工漁礁のモデルを示している。モデルでは部材幅を部材長の2割とした格子状の立方体漁礁を検討した。石炭灰混入供試体の供試体密度から漁礁重量を算定し、漁礁上部のピン4箇所を均等にワイヤーで吊り上げた場合に部材に働く引張強度を計算した。一軸圧縮試験により得られた圧縮強度を引張強度へ換算（引張強度=圧縮強度÷13）<sup>15)</sup>することにより、適用可能な寸法を算出した。

Table 5に、所定期間養生後の圧縮強度から算出した人工漁礁適用可能寸法を一覧している。材令初期である7日間水中養生で、部材長1.6 mまで適用可能であり、一般的に知られているコンクリートの設計基準強度である28日強度を用いれば、部材長2.25 mの人工漁礁が作成可能であると言える。また、49日養生以降から91日養生までの強度増加はあまり期待できず、182日養生に関しては強度が低下している。よって、本実験から安全性も考慮すると、得られた結果より若干小型を想定して、部材長2 m程度の小型人工漁礁を28日間水浸養生した後ならば、最も効果的で十分実利用が可能であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究において得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 津水湾から採取した海成粘土の物理試験の結果、有機物を多く含むがセメントの水和反応を阻害する

Table 5 Applicable member length of an artificial fish reef

Age (day)	compression strength (MPa)	tensile strength (MPa)	member length (m)
7	7.55	0.58	1.60
28	10.70	0.82	2.25
49	15.24	1.17	3.15
91	15.82	1.22	3.30
182	12.24	0.93	2.50

と言われているフミン酸含有量は非常に少なく、固化処理には問題ないと考えられる。

- (2) 石炭灰の粒子形状は、球形粒子であり表面は滑らかである。また、大村火力発電所産石炭灰の化学分析により、 $\text{SiO}_2$ を62.1%と多く含んでおり、セメント固化した場合に、その内のシリカ分 (Si)によるポゾラン反応から強度の増進が望める。
- (3) 海成粘土をセメントにより固化する場合、得られる固化強度は石炭灰を混入することにより材令初期で非常に大きく上昇し、材令49日までは強度増加は進行する。材令49日以降は固化強度の伸びはほとんど無く、材令182日においては若干の強度低下を呈したため、本実験における固化体のピークは材令49日の固化強度15 MPa程度ということが明らかとなった。
- (4) 固化供試体から溶出される養生水のpHを定期的に測定した結果、養生初期では大きくpHは上昇するが、養生日数が増加するに従いpHは低下することが明らかとなった。また、養生日数が120日を越えれば、養生水のpHは上昇しないことが明らかとなった。
- (5) 石炭灰混入供試体の長期水浸養生の結果、固化強度から引張強度を算出し実利用可能な部材長を計算した場合、部材長2 m程度で28日間水浸養生を行う方法が最も効果的であることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) K. Gotoh, M. Yamanaka and M. Tanaka: Marine Sludge and Volcanic Debris Flow Deposits Utilization from Environmental Point of View, Proc. of Japan-China Joint Symposium on Recent Developments of Theory & Practice in Geotechnology, pp. 63-68, 1997. 10.
- 2) 後藤・山中他：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, 長崎大学工学部研究報告, Vol. 28, No. 50, pp. 69-75, 1998. 1.
- 3) 嘉門・勝見他: 石炭灰の防塵処理と地盤改良への適用, 京都大学防災研究所年報, 第37号, B-2, pp. 35-46, 1994. 4.
- 4) 久楽・三木他: 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.
- 5) 村田・長滝他: 土木材料コンクリート, 共立出版, pp. 56-57, 1983. 3
- 6) M. Abdelhadi and K. Gotoh: Evaluation of Some Chemical and Adsorption Characteristics of Coal Ash Materials, Proc. 4th Int. Symp. on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, Boston, USA, Aug. 1998.
- 7) 地盤工学会: 廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用, pp. 34-37, 1998.
- 8) 日本建築学会: フライアッシュセメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, pp. 82-86, 1978.
- 9) セメント協会: わかりやすいセメントの化学, p. 3, 1993.
- 10) 後藤・山中他: 大村湾海成粘土のセメント固化反応に関する微視的観察, 平成9年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, III-30, pp. 432-433, 1998. 3.
- 11) 後藤・山中他: 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, pp. 313-316, 1995. 10.
- 12) 後藤・山中他: 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, pp. 2431-2432, 1997. 7.
- 13) セメント協会: セメント・コンクリート化学とその応用, pp. 47-52, 1998.
- 14) (社)全国沿岸漁場振興開発協会: 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針, pp. 142-143, 1993.
- 15) 土木材料実験教育研究会: 新示方書による土木材料実験法, 鹿島出版会, pp. 124-128, 1997.