

石炭灰スラリー工法による埋め立て地盤の強度と環境に関する長期評価

川口 正人 堀内 澄夫 佐藤 厚子 西本 聡
(技術研究所) (技術研究所) (北海道開発土木研究所) (北海道開発土木研究所)

Long-Term Stability on Strength and Environmental Suitability of Coal Fly Ash Slurry

by Masato Kawaguchi, Sumio Horiuchi, Atsuko Sato and Satoshi Nishimoto

Abstract

Previous studies by the authors have shown that the strength of cement containing coal fly ash slurry increases for up to 10 years. Although the rate of increase depends upon the type of coal fly ash (CFA) mixture, the reason for the differences has not been studied. Moreover, while long-term control of the environmental risk is crucial for the utilization of CFA, few studies on this subject have been reported. To confirm the long-term stability of CFA mixtures, the authors conducted over a period of 15 years a series of mechanical and environmental lab tests using 11 samples of various kinds collected from an actual construction site. The tests prove that the mechanical properties of these CFA mixtures are stable and have lower environmental risk. A method for choosing the appropriate type of CFA for developing long-term strength is also proposed.

概要

筆者らは10年に亘る石炭灰スラリー地盤の安定性の検討から、石炭灰の種類によって発現する強度特性が大幅に異なる現象を捕らえてきたが、そのメカニズムは解明されていなかった。また、長期環境適合性は再生資源を有効利用する上で重要な評価項目であるがほとんど検討されていない。そこで、15年経過した石炭灰スラリー固化体試料を用い、強度面、環境面の双方から検討を行った。その結果、安定した強度の持続と利用に際して環境悪化が無いことが確認された。また、必要とされる長期構造強度の発現特性に合わせた石炭灰の選択方法を提言した。

§ 1. はじめに

日本では2002年に770万トンの石炭灰が発生しており、その有効利用技術の確率が強く望まれている。特に主な発生源である火力発電所は海に面して立地している。沿岸域では石炭灰スラリー利用技術が有望で



写真 - 1 石炭灰スラリー打設中の人工島

あり、徐々に適用箇所が増え始めているところである。しかし、白鳥大橋プロジェクトに関する研究¹⁾を除き、10年以上の長期に亘る安定性の検討はされていない。白鳥大橋プロジェクトでは石炭灰、火山灰、海水および少量のセメントにより調製したスラリー100,000m³を直径67mの橋脚建造のための人工島造成材料として使用した²⁾⁻⁴⁾(写真-1)。この工事から以下の事項が確認されている。

- 1) 発電所から発生する石炭灰を使用したため、いろいろな炭種を原料としたが、オンライン水分計や自動材料供給システムにより管理することで設計仕様書に適合する造成材料を製造することができた。
- 2) 石炭灰スラリーは軽量かつ自硬性があるため、側圧を従来の砂を埋め戻し材料とする場合に比べ、1/18から1/6に大幅減少することができ、コフアダム壁の側方変形や曲げモーメントを減らすことができた。

写真 - 2 に示すように橋脚建設のため造成された



写真 - 2 再掘削中の人工島

人工島内部を掘削し、1999年に白鳥大橋は竣工した。新しい社会基盤構築材料を使用する際において耐久性は設計上最も大切な検討項目である。例えば、白鳥大橋人工島では、埋め立て材料に対して一軸圧縮強さが1MPa以上の強度を維持することが求められた。Reymond⁵⁾は地盤材料として利用する際の強度に関する検討において石炭灰を転圧し造成した堤防の長期強度を測定し、粘着力の増加が2年間見られたと報告している。また、Barenberg⁶⁾は石灰を添加した石炭灰とを道路基盤材料として利用し、強度は材令の対数に比例して10年間増加が見られ、10年で15MPaの強度に達したと報告しているが、これは地盤材料としては明らかに過剰な強度である。

一方、副産物を地盤材料として利用するためには環境適合性に関する検討も必要であるが、石炭灰の埋め立て地盤に関する長期の評価はされていない。

本研究では、石炭灰の有効利用を促進する上で求められる長期適合性を評価するため、15年を経過した白鳥大橋プロジェクトの室内保管試料を強度面と環境面の双方から検討した。

§ 2 . 実験方法

2.1 使用した材料

造成1年後に橋脚施工のため人工島内を掘削した際に、ブロック状のスラリー硬化体を50cm程度の大きさで採取した。ブロックは、清水建設株式会社技術研究所にそのまま搬送し、コア採取機によって直径5cm、高さ10cmの円柱状のサンプルを複数作った。このサンプルは乾燥と炭酸ガスによる中和反応を防止するためポリエチレン袋に個別包装し、室内保管した。

表 - 1 に採取した試料の仕様を示す。なお石炭灰の種類は、石炭の種類を意味しており、燃焼条件や石炭成分など、深度（施工時期）によって物性は若干異なっている。

溶出試験にあたっては、溶出溶媒に純水と海水とを使用した。海水溶媒は苫小牧付近から採取したものを、加熱殺菌したのち、ろ過して使用した。溶出溶媒の諸元を表 - 2 に示す。

2.2 強度試験

ブロックサンプルの一軸圧縮強度試験は施工後2年、10年、15年で実施した。

2.3 バッチ振とう溶出試験

環境庁告示 46 号法に基づき溶出試験した。分析項目は、pH、総水銀 (T-Hg)、鉛 (Pb)、六価クロム (Cr(VI))、カドミウム (Cd)、ヒ素 (As)、セレン (Se)、ホウ素 (B)、フッ素 (F) の9種である。

2.4 タンクリーチング試験

タンクリーチング試験はサンプルを粗砕せず、塊状のまま溶媒水中に静置水浸し、水中に溶出する成分濃度を測定する方法である。樹脂製容器に試料 150 g 程度を入れ、純水または海水を固液比 1 : 10 にて注ぎ入れ水浸させた。容器を密封、20 の恒温室内に静置、水浸後 1,3,7,14,28,68,148 日にて容器より検液を採取した。分析項目は 2.3 と同様とした。なお、このタイプのタンクリーチング試験では、一つの容器から経時的に検液を採取するため、徐々に固液比が小さくなる。採取された検液中の濃度は、初期の固液比での濃度よりも高くなるため、つぎの方法により補正した。すなわち、採取回数を i 回目とした時の検液の濃度を C_i 、

表 - 1 使用したスラリーの諸元

Slurry No	Coal Fly-Ash Type	Sample Depth -m	Cement Content %	Water Content %	slurry		Molded Samples	
					Slump cm	Bleeding %	7day qu MPa	28day qu MPa
1	A	0.5	4	40	11.1	1.2	0.41	0.79
2	B	1.5	5	35	10.8	1.1	0.70	1.02
3	B	2.5	5	35	9.0	0.7	0.70	1.06
4	C	3.5	5	50	10.3	1.3	0.44	0.95
5	D	4.5	5	60	10.9	3.5	0.22	0.60
6	B	5.5	5	35	10.0	0.8	0.53	1.18
7	E	7.0	4	50	9.8	3.4	0.35	0.87
8	E	8.0	4	50	10.5	1.3	0.30	0.74
9	F	9.0	5	35	10.8	0.7	0.69	1.04
10	E	10.5	4	55	9.3	2.9	0.35	0.70
11	C	12.0	5	40	10.4	2.3	0.41	1.00

表 - 2 使用した溶出溶媒

	pH	T-Hg	Pb	Cr(VI)	Cd	As	Se	B	F
	[-]	[mg/L]							
Purified Water	6.2	N.D.							
Seawater	8.1	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	4.2	N.D.

表 - 3 一軸圧縮試験結果

Slurry No	2 year Strength			10 year Strength			15 year Strength		
	Av MPa	SD MPa	CV %	Av MPa	SD MPa	CV %	Av MPa	SD MPa	CV %
1	1.61	0.223	13.8	1.66	0.138	8.3	1.86	0.379	20.4
2	1.75	0.219	12.6	1.78	0.326	18.3	1.80	0.373	20.8
3	2.60	0.518	19.9	3.40	0.643	18.9	3.05	0.636	20.8
4	0.86	0.069	8.0	0.82	0.106	13.0	0.69	0.118	17.0
5	0.96	0.153	15.9	1.00	0.199	19.8	0.88	0.142	16.1
6	1.57	0.105	6.7	1.80	0.236	13.1	1.80	0.278	15.5
7	5.95	0.563	9.5	6.85	0.842	12.3	7.14	1.101	15.4
8	4.21	0.678	16.1	5.15	0.933	18.1	5.24	0.754	14.4
9	2.11	0.253	12.0	2.51	0.643	25.6	2.27	0.250	11.0
10	4.98	0.870	17.5	5.98	0.889	14.9	6.41	0.602	9.4
11	2.16	0.273	12.6	2.42	0.435	18.0	2.53	0.368	14.6

初期の溶媒量に対する溶媒の体積比を X_i とすると、2 回目以降の材令の真値 CT_i は、

$$CT_i = X_i C_i + \sum_{n=2}^i X_n (C_n - C_{n-1}) \quad [\text{mg/L}] \quad (1)$$

により求められる。

§ 3 . 結果と考察

3.1 強度の増加

一軸圧縮強度試験の結果を表 - 3 に示す。表 - 1 に示した短期材令の強度試験結果と合わせ、以下の結果を得た。

- 1) 材令 28 日では、石炭灰種の違いによる差異はさほど見られず、設計強度をほぼ満たしているが、長期材令になると灰種の差が顕著となる。
- 2) 強度発現の差異には打設深さ、セメント量、水含水量との相関性は見られない。
- 3) 長期材令における強度発現は以下の 3 種類に分類できる。

- (a) 高強度型 : No.7, 8, 10
- (b) 中強度型 : No.1,2, 3, 6, 9, 11
- (c) 低強度型 : No.4, 5

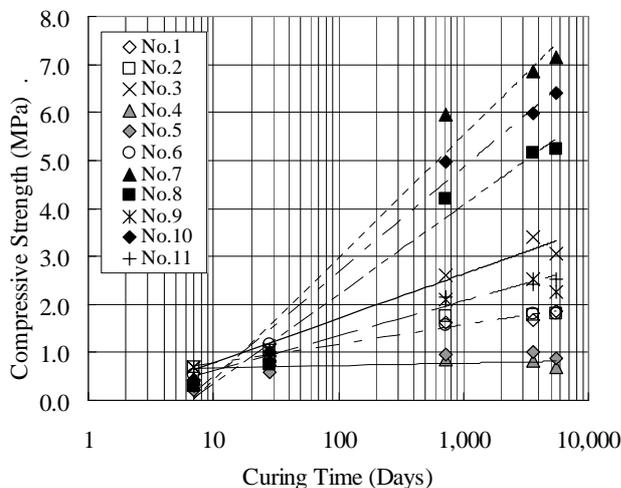


図 - 1 強度の経時変化

- 4) タイプ E の石炭灰は高強度型であり、タイプ B は中強度型に分類されるが、この二つの種類を比較すると、セメント量はタイプ B の方が多く、水分量はタイプ E の方が多い。一般的なセメント量が多く、水分量が少ないほど強度が高くなると傾向と逆の傾向を示している。

図 - 1 に強度発現の経時変化を示す。高強度型は材令の対数に比例して強度が増加し、15 年経過後も持続して強度増加する傾向を示している。中強度型は 2 年から 10 年までは高強度型同様に材令の対数に比例して強度が増加するが、その後その強度増加は鈍り、到達した強度を維持する。低強度型は打設後 1 ヶ月程度の間、強度増加を示し、その後は安定した強度を維持する。これらの発現強度の違いは、水和水硬反応性の違いによるものであると考えられる。

3.2 化学組成の強度発現への影響

同じタイプの石炭灰は、施工時期や施工深さが異なっても、同様の強度発現傾向が観察される。このことから、強度発現の差異は石炭灰の組成などの要因によって生じていると考えられる。表 - 4 に使用した石炭灰の化学組成と溶融特性を示す⁷⁾。式(2)はアルカリ金属とアルカリ土類金属酸化物の占める割合を示しており溶融温度と相関性を示すことが知られている。

図 - 2 に 15 年経過したサンプルの強度と F1 との関係を示すが、F1 の増加に伴い強度が増加し高い相関性を示している。

表 - 4 使用した石炭灰の組成と溶融温度特性⁷⁾

CFA type	Slurry No	Chemical Component										Fusing Temperature		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	ST	HT	FT
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	K	K	K
A	1	70.3	23.0	1.3	1.1	0.7	0.3	0.1	2.3	0.1	0.3	1,813	1,813	1,813
B	2,3,6	54.3	17.8	16.5	0.8	3.9	1.3	0.3	1.0	0.2	2.6	1,623	1,613	1,723
E	7,8,10	60.6	18.5	4.2	0.8	9.2	1.2	0.9	0.6	0.3	3.7	1,563	1,603	1,613

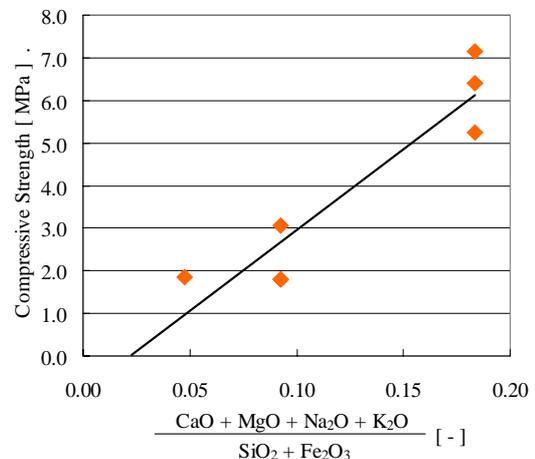


図 - 2 化学組成と強度の関係

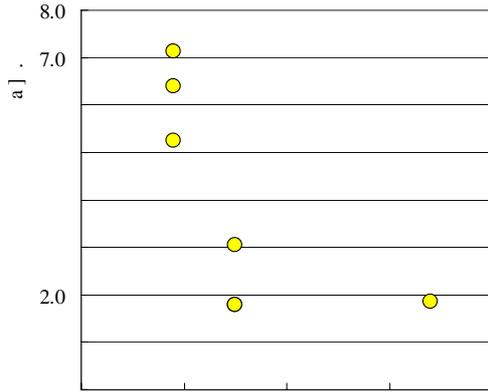


図 - 3 溶融温度と強度の関係

$$F1 = \frac{CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Fe_2O_3} \quad [-] \quad (2)$$

ここで結晶質の石炭灰に比べ、ガラス質の石炭灰はセメントとの化学反応性が高いことに着目する。図 - 3 に 15 年経過したサンプルと軟化点 (ST) との関係を示す。軟化点の低いものほど高い強度を発現している。F1 が高い石炭灰は低い溶融温度特性を示し、石炭燃焼時にはその熱により石炭灰を構成する鉱物が溶融する。灰はボイラー中の熱交換により急冷されるため、ほとんど結晶生成せずに電気集塵機で捕集される。すなわち、低融点炭はガラス質石炭灰を多く含み、セメントとのポゾラン反応を多く起こすことから高い強度を発現すると考えられる。

柳原ら¹⁾の検討に因れば、高い強度を示す石炭灰スラリー固化体の表面には網目状物質の生成が見られるがこれは C-S-H ゲルに起因するものである⁸⁾。以上をまとめれば、低融点の石炭灰はセメントと C-S-H ゲル

を水和反応で生成し、このことから長期に亘る強度発現を示したといえる。埋め立て地盤を再掘削するケースの様に所定強度を持続的に維持するタイプの灰や、長期に亘り強度を増進するタイプの灰など、石炭灰スラリーを地盤材料として利用する際の強度設計に対して、本知見を展開することが可能となった。

3.3 バッチ振とう溶出試験

表 - 5 に、バッチ振とう溶出試験の結果をまとめる。純水、海水とも六価クロムとホウ素以外の重金属類は検出されなかった。最大量は六価クロムで 0.05mg/L、ホウ素で 5.7mg/L であり、双方とも海水を溶媒とした時である。純水による溶出試験ではすべて土壤環境基準を満たしている。白鳥大橋で使用したスラリーは石炭灰、火山灰、セメントおよび海水により調製されたが、溶出試験で検出された六価クロムとホウ素は、これらの構成材料に起因している。特に、海水に関しては表 - 2 に示すようにホウ素の主要な供給源である。純水より海水による溶出結果の方が高いホウ素濃度となっている。表 - 5 から 1.8 ~ 4.2mg/L の差が見られるが、いずれも溶出に使用した純水と海水の溶媒中の濃度差 4.2mg/L 以下となっている。スラリー固化体に含まれているアルミニウム成分へのホウ素の化学吸着は、溶出検液中に含まれる濃度が溶媒海水に含まれる濃度より低くなる一要因と考えられる⁹⁾。

3.4 タンクリーチング試験

バッチ試験の結果、六価クロムとホウ素以外の重金属類は検出されなかったことから、タンクリーチング試験ではこの 2 つの成分に関して検討した。図 - 4、5 に六価クロムに関するタンクリーチング試験結果を示す。タンクに水浸後 28 日までは濃度が顕著に増

表 - 5 バッチ振とう溶出試験結果

Slurry No	Leachate: Purified water [mg/L]										Leachate: Seawater [mg/L]							
	pH	T-Hg	Pb	Cr(VI)	Cd	As	Se	B	F	pH	T-Hg	Pb	Cr(VI)	Cd	As	Se	B	F
1	10.1	N.D.	N.D.	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	2.4	N.D.	8.8	N.D.	N.D.	0.05	N.D.	N.D.	N.D.	4.2	N.D.
2	10.0	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	1.4	N.D.	8.8	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	5.6	N.D.
3	9.8	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	1.3	N.D.	8.7	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	4.9	N.D.
4	7.2	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	2.4	N.D.	8.2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4.2	N.D.
5	9.4	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	1.0	N.D.	8.8	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	4.1	N.D.
6	9.5	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	1.6	N.D.	8.7	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	4.3	N.D.
7	10.9	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	2.5	N.D.	9.0	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	5.7	N.D.
8	10.8	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	2.4	N.D.	9.0	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	5.3	N.D.
9	8.5	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	0.3	N.D.	8.5	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	3.6	N.D.
10	10.7	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	2.4	N.D.	8.9	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.	5.2	N.D.
11	9.5	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	1.4	N.D.	5.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4.8	N.D.
JLT46		0.0005	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	1	0.8									
JLT46(*)		0.0015	0.03	0.15	0.03	0.03	0.03	3	2.4									
WPCL	5.8-8.6	0.005	1	0.5	0.1	0.1	0.1	10	8	5.0-9.0	0.005	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	230	15

* N.D. : Not Detected

* JLT46 : Japanese Environmental Quality Standard for Soil Pollution

* JLT46(*) : Japanese Environmental Quality Standard for Soil Pollution for only upper zone of under ground water level

* WPCL : Japanese Environmental Quality Standard for Water Pollution Control Law

加し、その後平衡する。一部のサンプルでは 60 日に最大値を示しているが、これは純水、海水双方で見られることから、スラリーを構成する石炭灰成分の違いに起因していると考えられる。タイプ B では 60 日の最大値を示しているがタイプ E では見られない。表 - 4 から 2 つのタイプの成分を比較すると、タイプ E は鉄分の高い炭種であることがわかる。60 日以降の六価クロム濃度低下は六価クロムの還元反応による溶解度の低下や、鉄 - クロム化合物の生成によって起こったものと推定される。

図 - 6、7 にホウ素に関するタンクリーチング試験結果を示す。タンクに水浸後、14 日までは濃度増加し、その後平衡する。六価クロムとは異なりタイプ E の海水による試験のみ最大値を示す傾向が見られた。この

ことから、海水中の塩分によるイオン交換相互作用によって起こると考えられるが、メカニズムを明らかにするまでには至らなかった。

図 - 8、9 は水浸後 148 日経過後のバッチ振とう溶出試験とタンクリーチング試験の濃度の相関性を示す。純水、海水を溶媒とするホウ素、純水による六価クロムの試験結果では、よい相関性を示している。海水による六価クロム試験では、バッチ振とう溶出試験結果の方がタンクリーチング試験結果に比べ 0.015 ~ 0.02mg/L 低めにシフトしている。これは初期の溶媒との接触時において、海水中の塩による六価クロムの溶出抑制効果によるものと考えられる。6 時間のバッチ振とう溶出試験結果から長期に亘る溶出特性を推定することが可能となった。

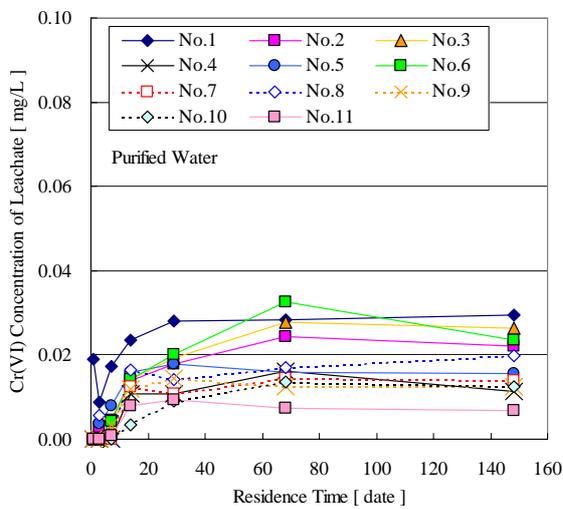


図 - 4 タンクリーチング試験結果(淡水 Cr(VI))

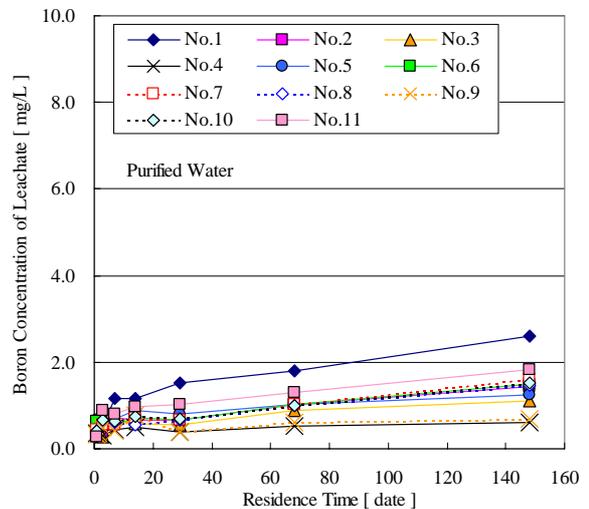


図 - 6 タンクリーチング試験結果(淡水 ホウ素)

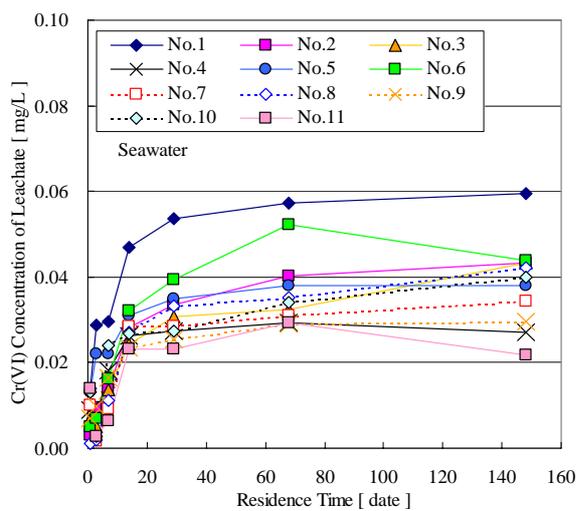


図 - 5 タンクリーチング試験結果(海水 Cr(VI))

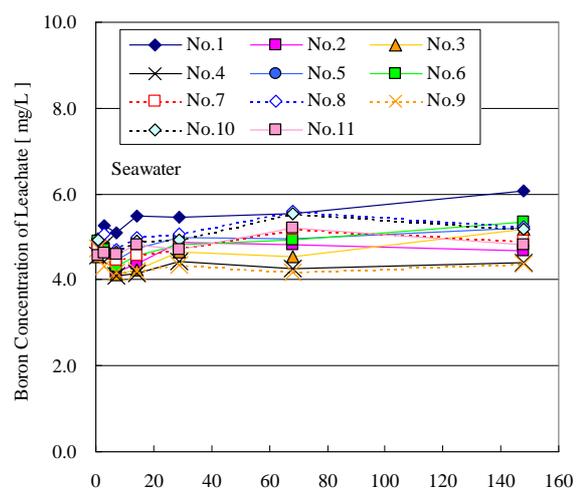


図 - 7 タンクリーチング試験結果(海水 ホウ素)

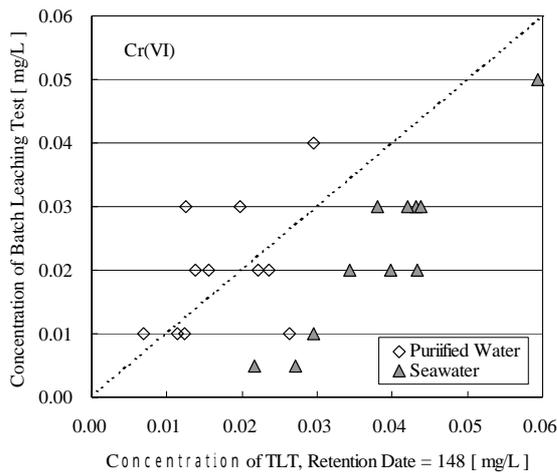


図 - 8 バッチとタンクリーチング比較(Cr(VI))

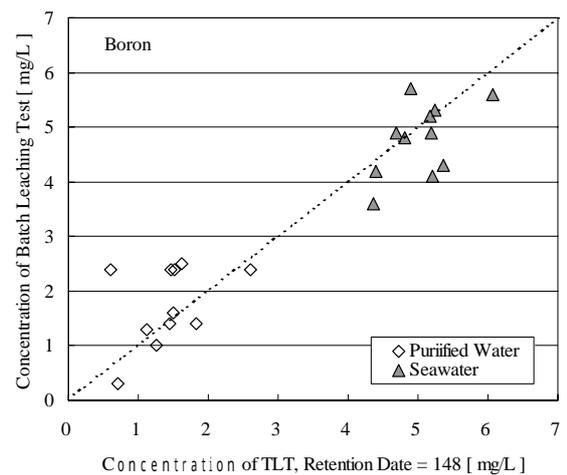


図 - 9 バッチとタンクリーチング比較(ホウ素)



写真 - 3 竣工後の白鳥大橋

海水を使用した溶出試験は純水によるものに比べ一般的に高い溶出値が得られるが、これは溶出溶媒に含まれるホウ素や六価クロムの濃度に因るものである。

表 - 3 に示す海水中に含まれる成分を考慮すると、白鳥大橋で使用した石炭灰スラリーは海域における有効利用において非常に低い環境影響であると評価でき、本方式による石炭灰の利用は合理的であったと結論できる。

写真 - 3 は竣工時の白鳥大橋を示すが、石炭灰スラリーが充填された人工島の上に建設された。今後も本工事から採取された試料により再生資源を有効利用した地盤の安定性に関して検討を継続する予定である。

§ 4 . まとめ

沿岸域において利用後 15 年を経過した石炭灰スラリー充填物の長期強度および環境に関する安定性に関する検討を実施し、以下の結果を得た。

- 1) 一軸圧縮試験結果から長期に亘る強度安定性を維持している。
- 2) 強度の発現性は石炭種の違いによって顕著であり、石炭灰中のガラス質成分によってその差異が生じたと示唆できた。
- 3) 15 年経過した試料から六価クロムとホウ素の溶出が見られたが、いずれも土壤環境基準を満たしている。
- 4) バッチ振とう溶出試験とタンクリーチング試験結果を比較するとホウ素では 14 日、六価クロムでは 28 日で同等の濃度となり平衡する。

石炭灰を選定することで、長期間強度増加を継続することが望まれる堤防への利用や、短期間で高い強度の発現が必要とされる道路の基盤材料への適用など、目的に合わせたスラリー設計が可能となった。

謝辞

本研究は、(財)石炭利用総合センター(現(財)石炭エネルギーセンター)のご協力の下で実施した。紙面を借りて謝意を表する。

<参考文献>

- 1) Yanagihara, M., Horiuchi, S. and Kawaguchi, M. (2000) : "Long-Term stability of coal-fly-ash slurry man-made island" Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Nakase and Tsuchida (eds.) Balkema, Rotterdam. pp763-769
- 2) Kawasaki, H., Horiuchi, S., Akatsuka, M. and Sano, S. (1992) : "Fly-Ash Slurry Island : II Construction in Hakucho Ohashi Bridge Project" J. Materials in Civil Eng. ASCE, pp134-152
- 3) Horiuchi, S., Taketuka, M., Odawara, T. and Kawasaki, H. (1992) : "Fly-Ash Slurry Island: I Theoretical & Experimental Investigations" J.

Materials in Civil Eng. ASCE, pp. 117-133.

- 4) Horiuchi, S., Tamaoki, K. and Yasuhara, K. (1995) : “Coal Ash Slurry or Effective Underwater Disposal” Soils and Foundations, Vol.35, No.1, pp.1-10.
- 5) Raymond, S. (1961) : “Pulverized Fuel Ash as Embankment Material” Proc. Of Instruction of Civil Engineers, Vol.19, pp.515-536,900-904
- 6) Barenberg, E. J. (1973) : “Utilization of Ash in Stabilized Base Construction” Proceedings of 3 rd Int. National Ash Utilization Symposium. BuMines, pp180-196
- 7) “石炭灰ハンドブック (第 2 版) ” , 環境技術協会・日本フライアッシュ協会(1995)
- 8) Torii, K. (1985) : Basic Studies on utilization of Industrial Waste for Soil Stabilization (Doctor Thesis for Kyoto University) , pp.147-194
- 9) Hollis, J.F., Keren, R. and Gal, M. (1988) : “Boron Release and sorption by fly ash as affected by pH and particle size” J. Environ. Qual., Vol.17, No.2, pp.181-184.