

FA モルタルの防砂シート代替材としての適用に関する技術的検討

Development of FA Mortar Overspread Shield to Prevent Piping of Seawall Backfilling Materials

元木卓也¹・吉平健治²・鶴谷広一³・竹内剛⁴・小沢大造⁵・井筒庸雄⁶

Takuya MOTOKI, Kenji YOSHIHIRA, Hiroichi TSURUYA, Gou Takeuchi, Taizo KOZAWA, Tsuneo Izutsu

¹ 正会員 工修 (財) 沿岸開発技術研究センター 企画部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)

² 前 内閣府 沖縄総合事務局 那覇港湾空港工事事務所 (〒900-0001 沖縄県那覇市港町 2-6-11)

³ 正会員 工博 東海大学海洋研究所教授 (〒424-8610 静岡県清水市折戸 3-20-1)

⁴ 電源開発株式会社 エンジニアリング事業部 (〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)

⁵ (財) 沿岸開発技術研究センター 理事 (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)

⁶ 正会員 工修 電源開発株式会社 エンジニアリング事業部 (〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)

A new material (FA mortar) which is mainly made of coal ashes is investigated experimentally and numerically for the use of sucking prevention behind the backfill of a caisson in place of a sheet. The validity is confirmed in the present study and based on the investigations, the test execution has been conducted in Naha Port.

Key Words : FA mortar, coal ashes, sucking prevention sheet, Naha Port

1. はじめに

わが国の電気事業における石炭灰の発生量は平成12年度で約630万トンであり、平成18年度には1,000万トンを越えると推測されている。このうち、有効利用率はセメント原料を中心に約70%であり、残りは管理型処分場に埋立て処分されているのが現状である。今後増加する石炭灰に対処するために、有効利用に関する技術開発は重要な課題と言える。

一方、国土交通省の「港湾の技術開発の長期政策」においては、リサイクル材料の積極的な活用を通じた循環型社会への対応などが重要技術開発テーマとして掲げられている。

沖縄総合事務局では、那覇港(新港ふ頭地区)岸壁整備工事が進められており、そのうち、裏込石表面に防砂シートによる吸出防止工を計画している。しかし、事例調査結果等から防砂シートの被災による土砂吸出しおよび陥没等が生じている場合がある。そこで、防砂シートのように破れることによって機能性が損なわれないと考えられる代替材料として、石炭灰を主体とした吸出し防止工(FAモルタル)について適用可能性を見極めるため、技術的検討を実施した。本論文では、FAモルタルの特性を把握するための室内試験、FEM解析による安全性の検証、透過波圧低減に関する水理模型実験、現場試験工事等での検討を中心に述べる。

2. FAモルタルの概要と施工方法^{1),2)}

FAモルタルとは、石炭灰F(フライアッシュ)に少量のセメントC(セメント添加率C/(C+F)の範囲では5~10%)を添加し、適量の混練水と混合することで力学特性を大幅に改善した新材料であり、軽量性、高い流動性、遮水性、環境に対する安全性が特徴である。

施工方法は、FAモルタルの打設時に運搬・圧送中の流動性(スランプ≒20cm±2cm)を確保するためかつ傾斜部に対して安定性を保つために、打設直前に硫酸アルミニウムを添加(全粉体乾燥重量の0.5%程度)することによって、型枠無しで行うことができる。この施工法をFAM-NF工法と呼んでおり、防砂シート設置部に直接FAモルタルを打設することによって硬化後に止水機能を持たせることができる。

3. FAモルタルの適用についての課題

FAモルタルを防砂シートの代替材として適用する場合には、①透過波圧や変形による曲げ引張応力などの外力に耐えうる強度および厚さを有しているか、②FAモルタルはその性状が炭種、排出元(発電所等)で大きく異なるので、実際に使用する排出元の石炭灰を用いた場合に従来通り強度を発現するか、を確認する必要がある。また、これまで裏込めの勾配が1:1.5の場合については実績があるが、③今回FAM-NF工法にて那覇港のように

1:1.2の勾配についても適用可能かどうか、を確認するため、試験工事を実施した。

4. FA モルタルの適用についての課題

3. で述べた①の課題を明らかにするために検討を行った。その概略のフローを図-1に示す。FA モルタルの配合を変化させたときの物理性状について室内試験を行って確認し、構造物の沈下を予測したあとで、室内試験の値を用いてFEM解析を実施し、最終的にFA モルタルの必要厚さを検討した。

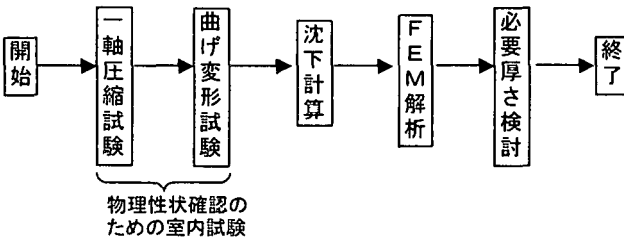


図-1 FA モルタル検討フロー

4.1 FA モルタル特性把握のための室内試験

FA モルタルの設計にあたり、セメント添加率、水粉体比(W/(C+F))をパラメータにして18ケースの一軸圧縮試験、曲げ変形試験を実施し、強度と変形係数の関係、クラック進展に伴う周辺ひずみの変化等の把握を行った。本室内試験では、試験工事をを行う那覇港で使用する電源開発(株)石川石炭火力発電所産の石炭灰(湿灰)を用いて実施した。

(1) 一軸圧縮試験及び曲げ変形試験結果

図-2および図-3に一軸圧縮試験と曲げ変形試験結果を示す。

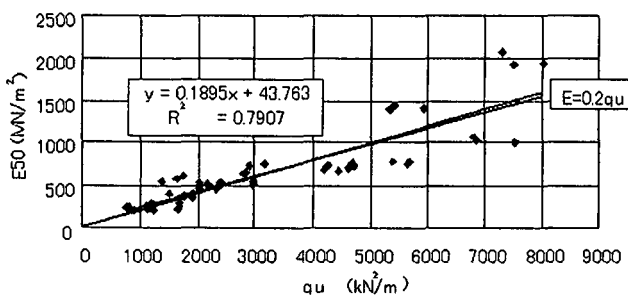


図-2 一軸圧縮強度(q_u)と変形係数(E_{50})の関係

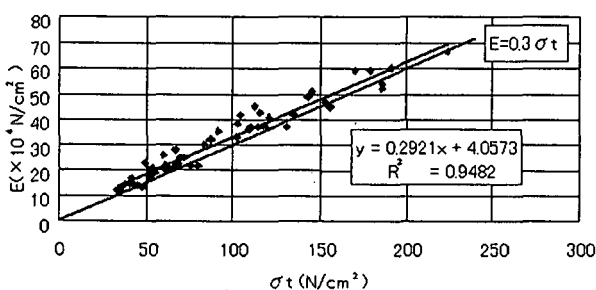


図-3 引張応力(σ_t)と変形係数(E)の関係

(2) 室内試験のまとめ

(1)の結果から以下の関係が得られ、後述する弾性解析(FEM解析)の物性値として用いた。

$$E_{50} = 200q_u \quad (1)$$

$$E_t = 3000\sigma_t \quad (2)$$

なお、同時に破壊時の σ/q_u の整理した結果、 σ_t が q_u の20%程度以上になるとクラックが発生すると考えられる。

4.2 周辺地盤の沈下予測

FA モルタルが破壊する状況としては、ケーソン背面に埋立土砂が投入され、圧密沈下の進行に伴いFA モルタルに引張応力が発生し、許容引張応力を上回った場合が想定される。したがって4.3で述べるFEM解析に用いる条件として検討位置における相対的な最大沈下量を求めた。なお、計算ソフトは圧密計算沈下システムDECALTO(富士通FCENA/XシリーズWindows版)を使用した。

(1) 検討断面

図-4に検討断面を示す。下層地盤は地質調査資料よりシルト質砂層(厚さ:6~7m)、沖積粘土、洪積粘土、琉球石灰岩(-40m以深)となっており、ほとんど水平となっている。また、護岸の下層地盤はSCP($A_s=80\%$)及びSDにより地盤改良が成されている。

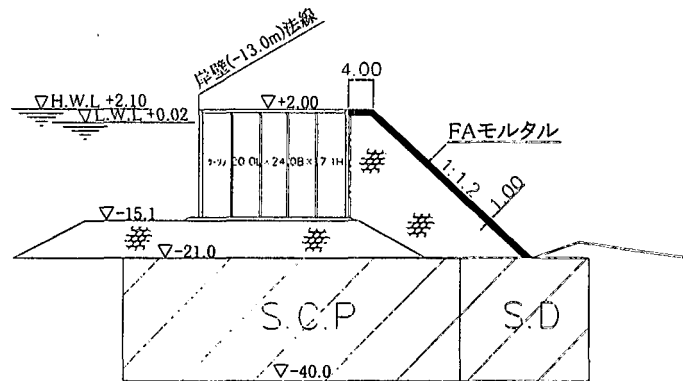


図-4 検討断面

(2) 土質定数、圧密係数(C_v)、体積圧縮係数の設定(M_v)

土質定数、圧密係数(C_v)、体積圧縮係数(M_v)等は、事前のボーリング調査および圧密試験結果の値を使用した。

(3) 沈下予測計算結果

護岸法線位置の沈下量を0cmとした場合に、相対的な変位量を求めた。FA モルタル法尻部で約25cm程度、無処理部で約40cm程度となった。これらの変位量をFEM解析時の沈下量として与えることとした。

4.3 FEM 解析

4.1および4.2で得られたFA モルタルおよび地盤のデータをもとに、FEM解析を行った。

(1) 解析用物性値

表-1に、解析に使用したそれぞれの物性値を示す。

表-1 解析物性値

構成材料名	単位体積重量 γ (kN/m ³)	圧縮強度 q_u (N/mm ²)	弾性係数 E(MN/m ²)	ポアソン比	引張強度 σ_t (N/mm ²)
岩盤	1	—	1,000	0.49	—
沈下要素	1	—	沈下調整	0.05	—
ケーソン	18	—	3,000	0.2	—
基礎捨石	18	—	100	0.3	—
裏込石	18	—	30	0.3	—
FAモルタル	1.65	5.0	1000	0.2	1.0
		7.0	1,400	—	1.4

(2) 解析モデル図

図-5 のようなモデル図を用いて解析を実施した。

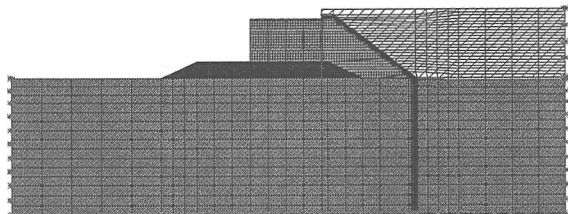


図-5 解析モデル図

(3) 解析ケース

解析ケースは、 $q_u=7\text{N/mm}^2$ 一定で FA モルタル必要厚さ (t) を 0.4~1.5m に変化させた場合と、 $t=1.0\text{m}$ 一定で q_u を 4~10N/mm² に変化させたケースで、各々裏込め石の変形係数を 30 MN/m² と 100MN/m² の 2 種類を用いて合計 30 ケース実施した。

(4) 解析結果

代表的な解析結果を図-6 に示す ($t=1.0\text{m}$, $q_u=7\text{N/mm}^2$)。また、FA モルタルの必要厚さを 1.0m として設計強度 (q_u) を 4~10N/mm² に変化させた場合の安全率を図-7 に示す。

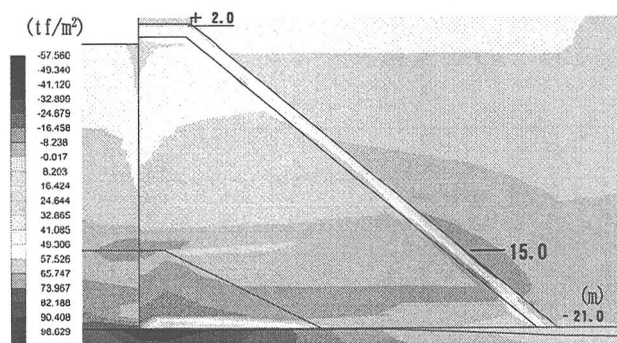


図-6 応力分布図 ($t=1.0\text{m}$, $q_u=7\text{N/mm}^2$)

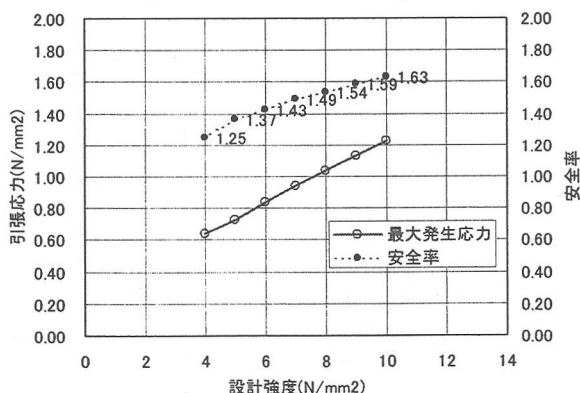


図-7 設計強度と発生最大応力および安全率の関係

図-6 より、深さ-15m 程度の位置で、FA モルタルの表面付近に最大応力 (約 1N/mm²) が発生していることがわかった。この場合 ($t=1.0\text{m}$, $q_u=7\text{N/mm}^2$) の安全性の評価では、安全率 (F_s) は 1.49 となっている。

図-7 より、設計強度が 4N/mm² における最小安全率でも、 $t=1.0\text{m}$ であれば $F_s=1.25$ となり安全性は確保されていることがわかる。

また、解析用物性値の内、FA モルタルの変形に最も影響があるのは裏込め石の弾性係数である。これは、裏込め石の物性(弾性係数)により FA モルタルの変形が決まり、裏込め石がかみ合って硬い方が FA モルタルに発生する応力は大きくなるためである。これを考慮し、裏込め石の弾性係数について感度分析を実施した。その結果を表-2 に示す。

表-2 裏込め石の変形係数別の安全率

圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (MN/mm ²)	最大引張応力 ()は安全率を示す (N/mm ²)			
		30	50	70	100
4.0	800	0.64(1.25)	0.78(1.03)	0.89(0.90)	0.98(0.82)
5.0	1,000	0.73(1.37)	0.91(1.10)	1.02(0.98)	1.11(0.90)
6.0	1,200	0.84(1.43)	1.07(1.12)	1.14(1.05)	1.24(0.98)
7.0	1,400	0.94(1.49)	1.17(1.20)	1.26(1.11)	1.37(1.02)
8.0	1,600	1.04(1.54)	1.26(1.27)	1.36(1.18)	1.48(1.08)
9.0	1,800	1.13(1.59)	1.34(1.34)	1.45(1.24)	1.57(1.15)
10.0	2,000	1.23(1.63)	1.44(1.39)	1.56(1.28)	1.67(1.20)

(※) 部分は裏込め石の弾性係数 (MN/m²)、■ は安全率 $F_s \geq 1.0$ の範囲を示す)

表-2 より、裏込め石の弾性係数が 50MN/mm² 以下であれば、安全率 F_s は 1.0 以上であることがわかった。実際の裏込め石の状況は、基礎捨石のように締め固められて密な構造と違い捨石を投入した状態であることから、弾性係数としては 30 MN/m² ~ 50 MN/m² 程度と考えられ、厚さ 1.0m を確保できれば十分安全側であると考えられる。

これらの結果より、FA モルタルの圧縮強度が低下を生じても安全率を確保できるように設計強度を 7N/mm² と設定した。また、FA モルタルの厚さについても、同様に安全率を確保できる 1.0m とした。

4.4 仮想モデルにおけるクラック進展解析

FA モルタル表面のクラック発生安全率がどの程度になれば、FA モルタルにクラックが貫通するのか、FA モルタル厚さを 1.0m とした場合について試算を行った。厚さ 1.0m の板に強制的に変位を与えて引張応力が発生する簡易モデルを想定し、クラックをジョイント要素で表現し、仮想最大引張応力に対してジョイント要素の許容引張強度を低減させ、クラックの進展深さと FA モルタル厚さ $t=1.0\text{m}$ の関係を安全率で整理した。図-8 に安全率とクラック深さの関係を示す。

これによると、 $F_s=0.5$ においてクラック深さが 1.0m となり FA モルタルを貫通する結果となった。この結果と表-2 の結果から、FA モルタルの強度が仮に 4N/mm² で裏込め石の弾性係数が 100MN/m² ($F_s=0.82$) であっても、厚さ

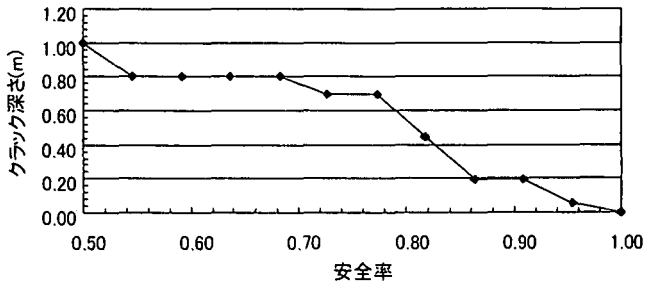


図-8 安全率とクラック深さの関係

1.0m の FA モルタルではクラックが貫通しないことが分かった。

5. 透過波圧に関する検討

ケーソン前面にて受けた波圧(p)はマウンドを透過し、透過波圧(p_{max})となってケーソン背面に作用する。埋立て完了までの工事期間は、この透過波圧に FA モルタルの自重で抵抗させる必要があることから、その透過波圧を適切に評価し、FA モルタルの必要厚さ 1.0m の妥当性を確認すること必要があったため、水理模型実験を実施した。

5.1 概要

模型実験は、模型縮尺を 1/20 とし、70m 二次元造波水路内に模型を設置して表-3 に示す実験条件で実施した。

表-3 実験条件

case	天端被覆	波高(m)	周期(s)	潮位(m)
1-H1-H	なし	2.8	12.6	H.W.L. +2.1
1-H1-L	"	"	"	L.W.L. ±0.0
1-H2-H	"	"	15.1	H.W.L. +2.1
1-H2-L	"	"	"	L.W.L. ±0.0
1-H3-L	"	4.2	"	"
1-H4-L	"	1.6	12.6	"
2-H2-H	あり	2.8	15.1	H.W.L. +2.1
不規則波	なし	$H_{1/3}=1.6$	$T_{1/3}=12.6$	L.W.L. ±0.0

波の種類としては、防波護岸の吸い出し災害のメカニズムに関する水理模型実験³⁾に倣い、規則波での実験とした。また、確認のために不規則波での実験も実施した。規則波の波高については、那覇港における設計条件の最大波は、波高 2.8m、周期 12.6s であるので、 $H=H_{max}$ (2.8[m]) を基準としたが、設計波の 150% である $H=1.5H_{max}$ (4.2 [m]) および、 $H=H_{1/3}$ (1.6 [m]) とした実験も実施した。周期については、合田による現地観測データの解析例では $T_{max}=(0.6\sim 1.3)T_{1/3}$ のような関係が報告されていることを考慮し、物質を透過する波のエネルギー減衰に対しては周期の及ぼす影響が大きい考え、実験では安全側も考慮して、 $T=(1.0, 1.3)T_{1/3}$ (12.6[s], 15.1[s]) の 2 周期を設定した。波の入射角は安全側を考慮し、 0° と設定した。

5.2 実験結果

図-9 に実験結果を示す。FA モルタルが裏込め石天端を被覆していない場合には、FA モルタルに作用する波圧はケーソン前面の波圧の 30% 程度になるが、FA モルタルが裏込め石天端を被覆している場合(ケース 2-H2-H)は 53% になった。これは既往の実験結果³⁾と同様であり、天端を被覆しない方は透過波圧が 20% 程度低減していることを確認した。

今回は天端を被覆しないことを想定しているので、この結果から事前検討で得られている FA モルタルの必要厚さ 1.0m (ケーソン前面波圧の 30% で算定) の妥当性を確認できた。

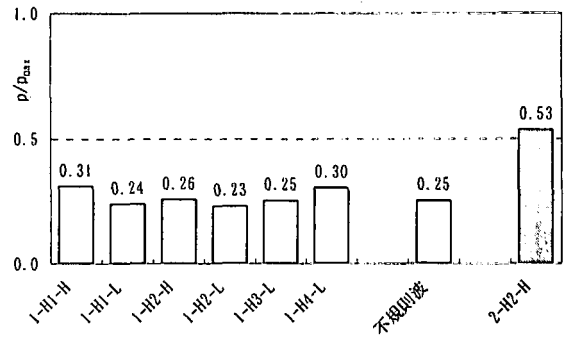


図-9 各実験ケースにおける p/p_{max}

6. 現場試験工事

3. で述べた②、③の課題について確認するため、那覇港にて以下に示す試験工事を実施した。

6.1 概要

試験工事の概要を表-4 に示す。

表-4 試験工事の概要

工期		平成13年12月～平成14年3月
施工数量		約1,700m ²
設計強度		7N/mm ²
基本配合	セメント添加量	C/(C+F)=10%
	水粉体比	W/(C+F)=40%
	硫酸アルミニウム添加量	B/(C+F)=0.5%
日打設量		約90m ³

6.2 品質管理

品質管理は、打設日に供試体を 3 本分採取し、材例 28 日において一軸圧縮試験を実施した。併せて現場においてドラム缶内に打設したもの(現場コア)を海中で養生し、所定の材齢を経た後引揚げて、供試体作成後一軸圧縮試験を実施した。また、現場コアを用いた溶出試験、打設中に周辺の海水を採取した水質分析を行った。

(1) 一軸圧縮試験結果

室内海水養生の供試体および現場コアの一軸圧縮試験結果は、全てのデータが設計強度(7N/mm²)を上回り、全

体の平均強度が8.1N/mm²となった。また、変動係数も5%以下となり、石川石炭火力発電所産の石炭灰を用いた場合でも設計強度を上回る均一なFAモルタルが製造・施工されたことが確認された。

(2) 溶出試験結果

表-5 に示すように、全てのデータが土壌環境基準値以下となっており、環境への影響が無い事が確認された。

表-5 溶出試験結果

項目	単位	計量結果	環境基準値	測定下限値
ふっ素	mg/l	0.2	0.8	0.1
ほう素	mg/l	0.14	1.0	0.01
砒素	mg/l	0.003	0.01	0.002
六価クロム	mg/l	0.02	0.05	0.01
セレン	mg/l	N.D	0.01	0.005

(3) 水質分析結果

表-6 に示すように、全てのデータが排水基準値以下となっており、周辺への影響が無い事が確認された。

表-6 水質分析結果

項目	単位	打設直上	ケーソン外港	環境基準値
pH	—	8.2	8.2	—
SS	mg/l	1.8	N.D	—
六価クロム	mg/l	N.D	N.D	0.5
砒素	mg/l	N.D	N.D	0.1
セレン	mg/l	N.D	N.D	0.1
濁度	度	1.0	0.3	—

6.3 施工状況

写真-1、写真-2 に施工状況写真を示す。写真-1 はコンクリートポンプ車の筒先からFAモルタルが排出されている状況である。これは、硫酸アルミニウムを添加後の状況であり、スランプ値は10cm程度である。

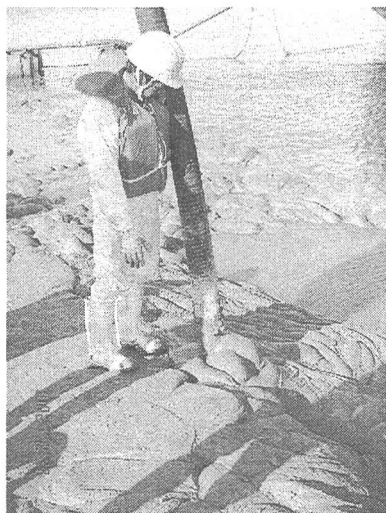


写真-1 天端打設近景

7. 今後の課題

本試験工事では、粉塵等の環境対策設備の簡素化を図るため、FAモルタルの主材となる石炭灰に湿灰を用いた。しかし、湿灰が予想以上に搬送および計量設備に負荷をかけ、プラント全体の製造能力を低下させた。今後は搬送および計量設備の改造等の対策が必要であると考えている。また、今回は、配合試験の段階から石炭灰の排出元を特定して実施した。今後は、異なる発電所からの供給も想定して事前に配合試験を実施し、その施工性およびFAモルタルの強度特性等を十分に把握する必要がある。

8. おわりに

今回の防砂シート代替材としてのFAモルタルの適用に関する技術検討の結果、室内試験で得られた物性を用いたFAモルタルの設計の考え方、透過波圧低減効果の把握、試験工事における施工性、環境特性等について知見が得られた。その結果、防砂シートの代替材としてFAモルタルの適用が十分可能であるという結論を得た。石炭灰を用いた本工法は、技術的妥当性の他にリサイクル材料の積極的な活用による循環型社会構築の観点からも、本格採用に向けた検討が進められることが期待される。

参考文献

- 1) 能登原功、和田重久、鷺尾朝昭：フライアッシュモルタルを用いた岸壁工事の施工、電力土木、No. 284, pp. 29-33, 1999.
- 2) 井関晴夫、栗島敏、鷺尾朝昭：フライアッシュモルタルを用いた管理型灰処分場遮水工事の施工、電力土木、pp. 106-110, 1991.
- 3) 高橋重雄、鈴木高二朗、徳淵克正、岡村知光、下迫健一郎、善功企、山崎浩之：護岸の吸い出しに関する水理模型実験、港湾技術研究所報告、Vol. 35, No2, pp. 3-58, 1996.

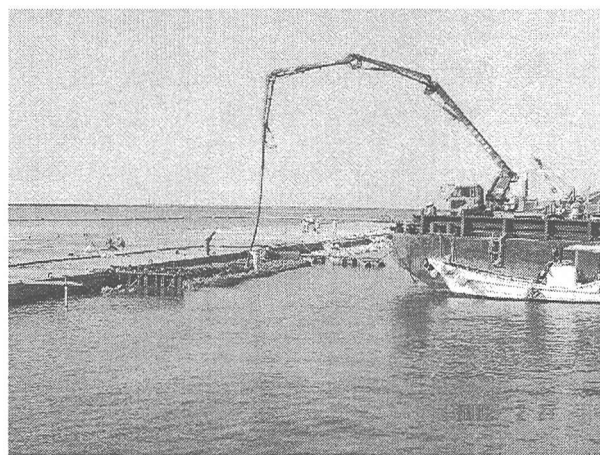


写真-2 天端打設遠景