

護岸工事に伴う海底浚渫土の高盛土陸上処分

— 橘湾発電所土捨場工事における設計・施工 —

A Report of high filling disposal on land with dredged soil generated by shore protection works

末沢 等*・岡田 英信**・立川 貴重***

Hitosi Suezawa, Hidenobu Okada, Takasige Tatekawa

The disposal area of Tachibanawan Power Station is located on the opposite shore of the station site, in which area the volume of fill material will amount to about 2, 200 million m3 and its height about 50 meters.

Large part of the material(about 1,200 million m3), dredged from the bottom of the sea, has almost no strength, and so it is necessary to be solidified by mixing with portland cement to filled up.

in order to advance the whole construction smoothly and reduce its cost, it is important to design and build the fill keeping minimum stability.

in this paper one of examples of design and quality control method, taking account of the characteristics of the solidified soil, is reported.

Keyword: disposal area, dredged soil, solidified soil

1. はじめに

橘湾火力発電所は、電源開発と四国電力が共同立地を行っている総出力280万kWの石炭専焼火力発電所である。発電所建設工事は、各社の専有工事と共有工事から構成され、その内、土捨場（将来はPR館等の付帯施設用地）工事は共有工事に分類されるが、設計・施工は四国電力が担当している。（表－1）（図－1）

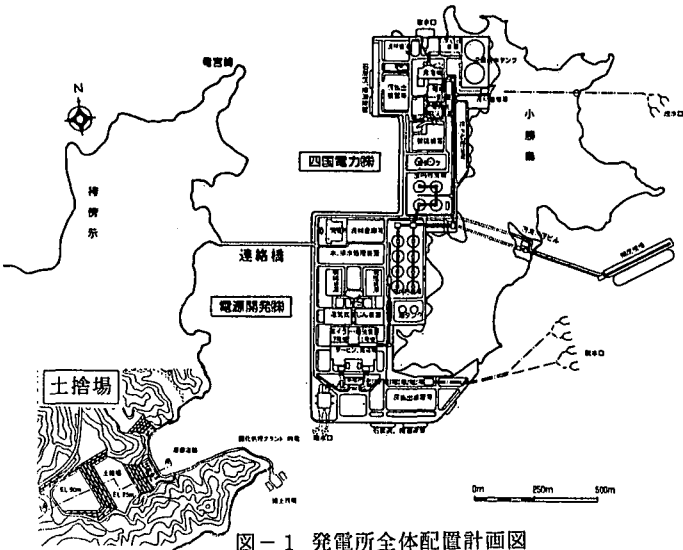
土捨場工事は、総盛土量約220万m3、盛土高約50mにおよぶ高盛土工事であり、この内、約120万m3が、護岸工事等により発生する軟弱な海底浚渫土という特徴を有する土捨場となっている。

従来、海底浚渫土は、海洋投棄あるいは埋立土としての利用が一般的であったが、当工事では、外洋ならびに周辺海域の環境保全と自己努力による建設工程の確保を目的として、セメント混合による固化処理を行った後、陸上土捨場へ盛立処分する計画とした。

陸上処分計画は、固化土の大規模かつ高盛土という我国でも事例のない盛土工事となることから、高盛土の安定性を設計・施工の両面から信頼性が高く合理的なものとする事が、当発電所建設工事全体に大きく影響を及ぼす重要事項であった。

表－1 発電所計画の概要

項目	四国電力	電源開発
発電所計画地	徳島県阿南市橘町小勝	
出力	280万kw	
	70万kw×1基	105万kw×2基
運転開始時期(予定)	平成12年7月	平成12年7月 平成13年1月
発電所敷地	敷地総面積 陸地造成 海面埋立 残存緑地	119万㎡ 25万㎡ 39万㎡ 55万㎡
揚・貯炭設備	揚炭機橋：14万D.W.T級×1バース 貯炭設備：屋内式貯炭場（サイロ）	
環境設備等	排煙脱硝装置、電気式集じん装置、排煙脱硫装置、総合排水処理装置など	
使用燃料	海外炭 年間使用量：約620万t	
	約160万t	約460万t
石炭灰処置	年間灰発生量：約86万t	
計	約22万t 全量を有効利用する	約64万t 大半を有効利用する
冷却水取放水設備	方式 深層取水、水中放水	
	冷却水量 約32㎡ 秒	約45㎡ 秒×2条



図－1 発電所全体配置計画図

* 正会員 四国電力(株) 橘湾火力建設所 土木第二課(〒774 徳島県阿南市橘町幸野100の1)

** 正会員 四国電力(株) 橘湾火力建設所 土木第二課

*** 正会員 四国電力(株) 建設部 計画課

2. 浚渫土陸上処分の経緯・課題

(1) 経緯

当発電所建設工事の施工は、護岸を概成した後、埋立、発電所本館基礎掘削等の手順となるが、護岸基礎部には、軟弱な粘性土が厚さ10m程度堆積しているため、護岸構築に伴い大量の浚渫土を処分する必要があった。

この浚渫土の処分については、従来、海洋投棄あるいは埋立処分が一般的であったが、

- ・外洋への海洋投棄は、1972年ロンドンでの「廃棄物その他海洋汚染防止に関する条約」の採択以降の国際情勢から、非常に難しい状況となっている
- ・当地点近傍に、適当な埋立処分地がない
- ・当発電所埋立海域への浚渫土投入可能時期は、当海域が「瀬戸内海環境保全特別措置法」の適用を受けするため、護岸概成後あるいは仮締切施工後となり、着工当初からの投入はできない
- ・浚渫土の処分工程が全体建設工程を左右するため、自己努力で処分能力を確保する必要がある

ことなどを踏まえ、当工事では、セメント混合による固化処理を行った後、陸上処分する計画とした。

(2) 解決すべき課題

盛立計画の具現化に当たっては、100万m³を超える浚渫固化土の高盛土陸上処分は、我国で事例がなく、

- ・高盛土下における固化土の挙動特性の把握
- ・降雨に伴う植生等周辺環境への影響軽減
- ・大量かつ高品質を確保できる固化処理技術

など種々の課題を克服する必要があった。

3. 浚渫固化土の盛土材への適用性

当発電所地点の海底堆積土は、N値0～3程度の細粒分含有率60～90%程度、含水比60～100%程度の砂混じりシルトあるいは粘性土であり、盛土としての強度は全く期待できない状況であった。

このため、固化材等を添加して盛土材としての強度を確保する必要があり、適切な固化材の選定、固化材添加量と強度の関係、再練返しによる強度低下状況、降雨に伴う固化材成分の溶出などについて室内試験により検討した。

(1) 固化材の選定

含水比が高く、有機物が含有している軟弱粘性土等の場合、普通ポルトランドセメントでは、強度が発現しにくい事例も多いため、当地点の浚渫土に適した固化材選定を目的として、普通ポルトランドセメントの他、軟弱土用セメント固化材4種類の比較試験を行った。

その結果、当地点の浚渫土に対しては、強度発現性状に遜色はなく、コスト面からもあり利である普通ポルトランドセメントの使用が可能であることを確認した。(図-2)

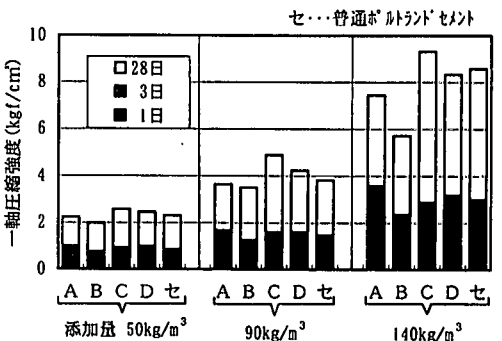


図-2 固化材の種類と強度

(2) 固化材添加量と強度

浚渫土の含水比・粒度・セメント添加量等が固化土の強度に及ぼす影響を検討した結果、

- ① セメント添加量が多いほど、また含水比が低いほど強度が大きい
- ② 粒土が細かいほど強度は大きい

ことが確認できた。また、浚渫土の含水比・粒度を的確に把握することにより、固化土の強度管理が可能であるとの見通しを得た。(図-3)(図-4)

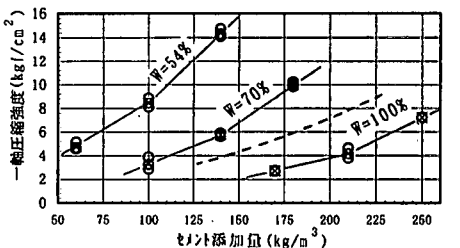


図-3 セメント添加量と強度の関係

(3) 固化土の再練返しによる強度低下

固化土は、セメント混合から2時間以上経過後の再練返しにより、4週強度が50～75%程度に低下することがわかった。

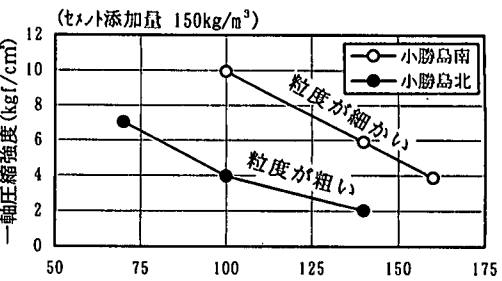


図-4 浚渫土の粒度と強度の関係

従って、セメント混合後、速やかに盛立てることとし、盛立後の再練返しを行わないような施工計画とする必要があると判断した。(図-5)

(4) 塩分・アルカリ分の溶出

降雨あるいは地下水により、セメント添加後の固化土から、塩分・アルカリ成分の溶出が懸念されたため、人工降雨実験を実施した。その結果、

- ・固化土の表面を砂で覆土した場合、表面水は実験当初からpH等の上昇はなく安定している。
- ・覆土しない場合、実験当初は、pHが高くアルカリ分等の溶出が確認されるが、時間経過とともに減少することから恒常的な溶出の可能性は薄い

ことがわかった。(図-6)

上記、(1)～(4)から、海底浚渫土の高盛土陸上処分における安定性確保の可能性、アルカリ分等の溶出に係る環境影響等については、固化材の添加・盛立方法等適切な施工計画の策定により対応可能である見通しを得た。

4. 固化土の強度特性

当地点の海底浚渫土を用いて一軸圧縮試験・三軸圧縮試験・圧密試験等を行い、固化土の強度特性を確認した。

(1) 変形係数(E_{50})

変形係数(E_{50})は、一軸圧縮強度(q_u)に比例して大きくなり、破壊ひずみは、約1～3%である。(図-7)

(2) 三軸圧縮試験(CU)

一軸圧縮強度 $q_u=2.2\text{kg/cm}^2$ の供試体に対して、三軸圧縮試験を行った結果、

- ・三軸応力状態では、破壊後においても比較的大きな残留強度がある
- ・三軸圧縮強度は、拘束圧(σ_c)が $q_u=2.2\text{kgf/cm}^2$ より小さい場合、 σ_c 値によらず一軸圧縮強度とほぼ同程度の値となるが、 σ_c 値が $q_u=2.2\text{kgf/cm}^2$ を上回る場合、 σ_c 値に比例して一軸圧縮強度が大きくなることとなった。これは、拘束圧により固化土内部のセメンテーションの一部が破壊されるか否かで、三軸圧縮強度が変わってくるものと考えられる。(図-8)

(3) 圧密試験

標準圧密試験と加圧養生後の圧密試験を行い、高盛土下における固化土の圧密特性および盛立に伴う圧密の強度への影響を把握した。

a. 基本的な圧密特性

圧密降伏点を有する過圧密粘土と同様な挙動を示し、セメント添加量に比例して圧密降伏応力(P_y)が大きくなるとともに、降伏点が顕著に現れる傾向がある。当浚渫固化土の場合、 P_y と q_u の関係は室内試験結果から概ね、

$$P_y = (1.6 \sim 1.9) \times q_u$$

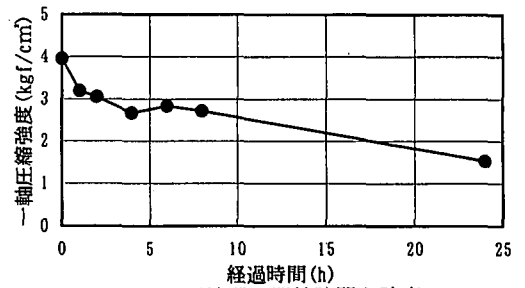


図-5 再練返し開始時間と強度

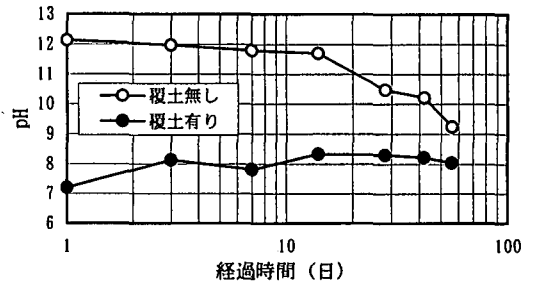


図-6 表面水のpHの経時変化

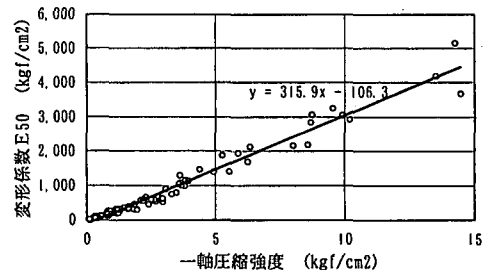


図-7 一軸圧縮強度と変形係数

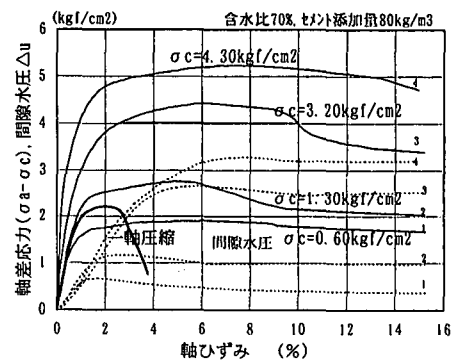


図-8 三軸圧縮試験結果

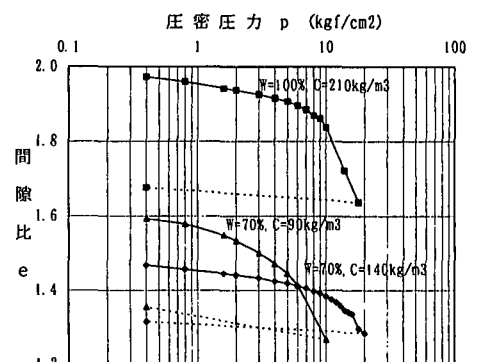


図-9 固化土の圧密試験結果

となった。(図-9)

b. 加圧養生後の圧密特性

・若材令時の急速加圧養生ケース

セメント練混ぜ後徐々に載荷重を増加し、10日後に最終盛立高EL. 50mに相当する加圧養生を材令28日まで実施した後、一軸圧縮試験を行った結果、通常養生の場合の約1.7倍に強度が増加した。

・実盛立速度程度の加圧養生ケース

当工事の盛立速度は1.5m/月程度の盛立高であり、載荷重としては、0.3kgf/cm²/月となるため、試験載荷重を0.1~0.6kgf/cm²の範囲で行ったが、圧密降伏応力に顕著な増加は見られなかった。(図-10)(図-11)以上から、若材令時に大きな載荷重を受ける場合、強度は増加するが、当工事の盛立速度程度では、圧密による強度増加はほとんど期待できないことが分かった。

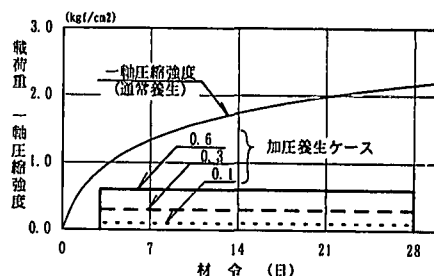


図-10 実盛立速度の加圧養生ケース

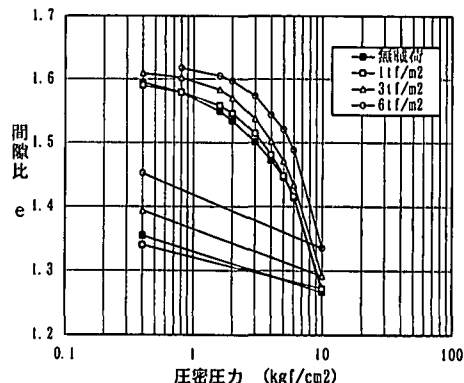


図-11 実盛立速度での加圧養生結果

5. 盛立ゾーニング計画

(1) 盛立ゾーニングの基本形状

当土捨場は、固化土と発電所掘削残土という2つの大きく性状の異なった盛土材料を大量に、かつ経済的に処分する必要があった。

このため、合理的な盛立ゾーニング計画を策定すべく、幾つかのゾーニング基本形状について検討した結果、コア型ゾーニング案は、固化土の必要強度を一軸圧縮強度(q_u)で2.2kgf/cm²と小さくすることができ、セメント添加量を抑えられ、経済性に優れていることから、採用することとした。(図-12)(図-13)

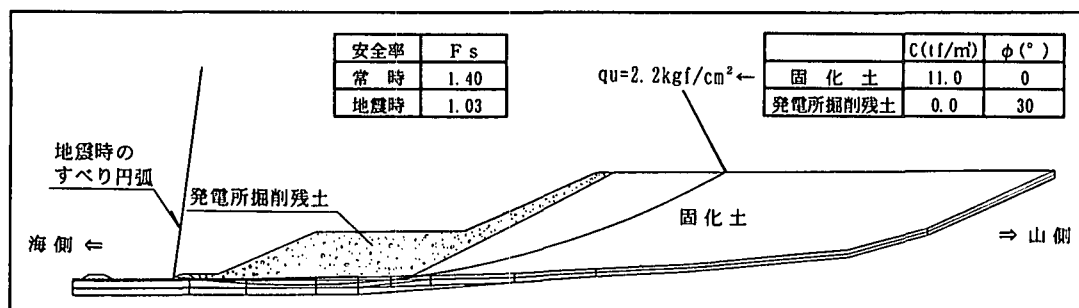


図-12 押え盛土型ゾーニング案の安定計算(地震時、水平震度 $K_h=0.15$)

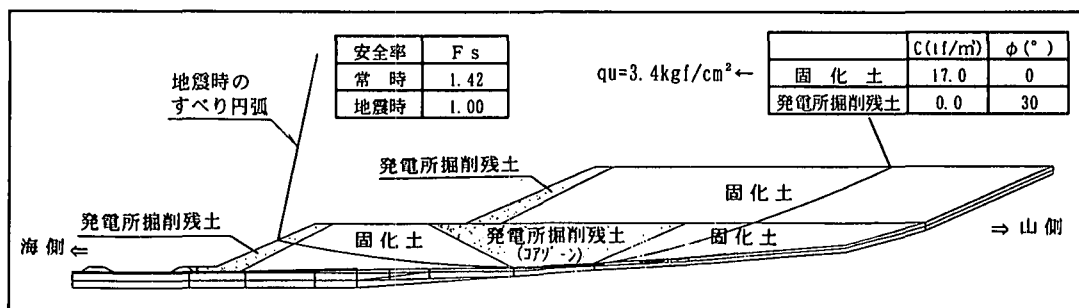


図-13 コア型ゾーニング案の安定計算(地震時、水平震度 $K_h=0.15$)

(2) 固化土の強度特性に着目したゾーニング計画

固化土の設計強度は、コア型ゾーニング案の円弧すべりの検討から、必要強度として $q_u=2.2$ kgf/cm²としたが、圧密降伏等固化土特有の強度特性の面からも問題ないか検証する必要があった。

そこで、固化土の強度特性(状態曲面)をシュミレートできる弾塑性モデルによりFEM解析を行い、我が国初の固化土の高盛土について安定性を検討した。

a. せん断に対する安定性

固化土の三軸圧縮試験結果に基づくせん断強度と、FEM解析結果による盛土内の発生応力の比(応力比)

は、いずれのゾーンにおいても常時で1.8以上となり、せん断破壊に対しては、局所的にも安全であることを確認した。

(図-14)

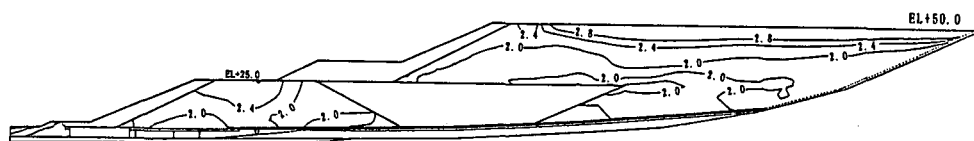


図-14 せん断応力に対する安定性(応力比コンター図)

b. 圧密降伏に対する安定性

FEM解析結果では、盛土内底部に6~7kgf/cm²程度の応力が発生し、固化土内の一部で圧密降伏値を越え塑性化する領域が生じる結果となった。

この塑性化に対する評価としては、応力面からだけ考えれば塑性化しても有効拘束圧が盛土内部にあれば、三軸圧縮試験で確認した残留強度が期待できるため、即座に盛土の安定性に影響することはない。

しかし、変形面から考えると、塑性化する領域と塑性化しない領域の沈下量の差に起因するクラックが発生し、そこからの雨水侵入等による有効応力の低下が想定され、これに伴い残留強度の低下が懸念されるため、盛土全体の安定性に影響が及ぶ可能性があった。

(図-15)

c. 圧密降伏に対する対策と効果

上記の圧密降伏に対する安定性評価を踏まえ、盛土底部の固化土の塑性化に対しては、長期的な安定性確保の観点から何らかの対策を講じておくことが必要と判断した。

対策としては、FEM解析結果による応力レベルに対応して固化土の強度増加ゾーンを設定し、塑性化領域を消滅させることとした。

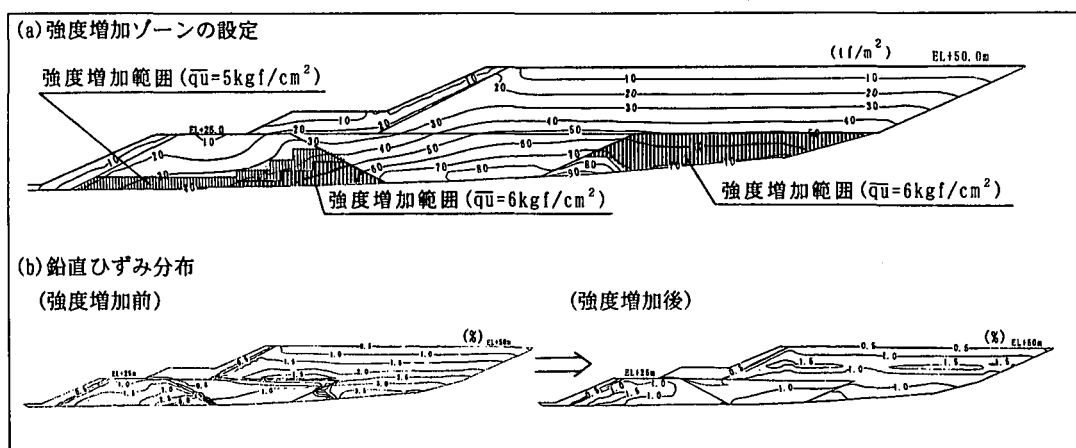


図-15 圧密降伏を考慮したゾーニング

6. 固化処理システム

固化処理システムは、工程確保のため、計画日処理量1,200 m³/日以上処理能力を有するとともに、盛立ゾーニングに応じた固化強度を、信頼性高く、かつ経済性を確保できるものとする必要があった。

このため、固化処理システムは、二軸強制練り方式で時間処理能力250m³/hrの混練り性能に優れた国内最大級の処理能力を有するシステムを今回新たに開発導入した。

また、品質管理設備としては、浚渫土含水比をリアルタイムに把握するR I 水分密度計、浚渫土の供給量を制御する土砂定量供給装置(スノーシェーパ)、ならびにスノーシェーパと連動してセメント供給量を制御するスクリュウフィーダ式のセメント供給装置などを設置した。

(図-16)

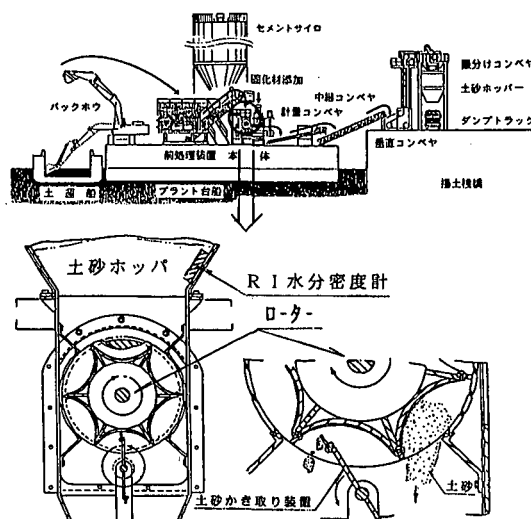


図-16 土砂定量供給装置(スノーシェーパ)

7. 強度管理方法

a. 目標強度

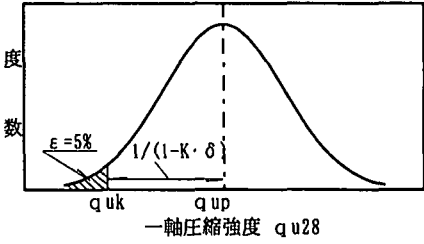
固化土の強度管理は、ゾーン毎の設計一軸圧縮強度(q_{uk})を下回る確率が5%以下となるよう管理することとした。強度の確率分布を正規分布と仮定すると、目標強度(q_{up})は以下のような設定となる。

$$q_{up} = 1 / (1 - k \cdot \delta) \cdot q_{uk}$$

但し、q_{uk}：設計一軸圧縮強度

$$k = 1.645 \text{ (超過確率 } \varepsilon = 5\%)$$

δ：変動係数



b. 強度推定式

固化材による安定処理土の強度予測式は、これまで幾つか提案されているが、適用に限界があり汎用的なものではない。このため、当工事では、強度推定式の因子として、データ取得が比較的容易なセメント添加量、含水比、砂分含有率、浚渫土温度の4因子を選定し重回帰分析したもの(強度推定式Ⅰ)と、セメント水比に着目して重回帰分析したもの(強度推定式Ⅱ)の2方法について検討した。その結果、

・強度推定式Ⅰ(4因子による重回帰)

$$q_u = 0.07C - 0.118W - 0.031S + 0.091T + 6.61$$

C：セメント添加量(kg/m³)

w：含水比(%)

S：砂分含有率(％:0.075mm以上)

T：浚渫土温度(℃)

・強度推定式Ⅱ(セメント水比による重回帰)

$$q_u = 24.4(C/W') + 0.078T + 2.75$$

w'：補正含水比(自然含水比から強結合水を差引いた含水比)

を得た。強度推定式と実績強度はよく合っており、強度推定式の導入により強度の変動係数を低く抑えることが可能となったため、固化土の目標強度(q_{uk})を低く設定して、セメント添加量の低減が図れた。

(図-17)(図-18)

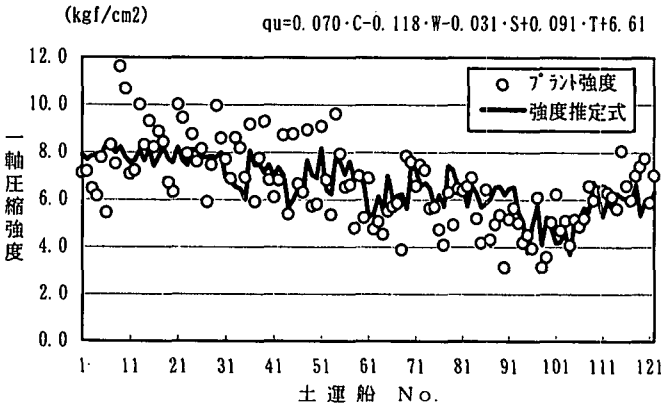


図-17 実績強度と推定強度

表-2 強度推定式(Ⅰ)における一軸圧縮強度への影響

項目	要因変化量	一軸圧縮強度の変化の目安
セメント	10kg/m ³	0.7~0.8 kgf/cm ²
含水比	10%	1.0~1.5 kgf/cm ²
砂分含有率 (≥0.075mm)	10%	0.3~0.4 kgf/cm ²
浚渫土温度	1° C	約0.1 kgf/cm ²

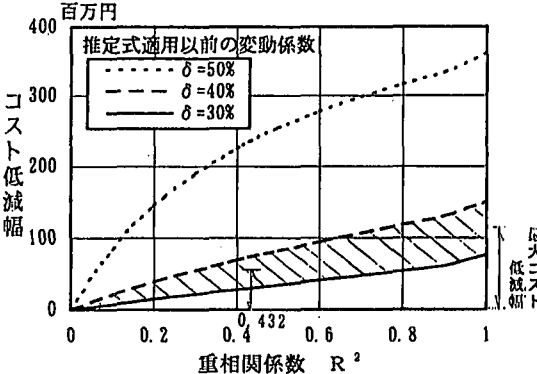


図-18 強度推定式の精度とコスト低減

8. まとめ

当海底浚渫の陸上盛立工事は、これまで周辺環境へ悪影響を及ぼすことなく、護岸工事等で発生する海底浚渫土(固化土)の盛立約70万m³を完了している。

当発電所は、「地域共生型発電所」を目指しており、当盛立工事の完了後は、その一環として跡地を地域開放型施設用地に利用し、P R館やグラウンドなどを設ける計画である。

「海底浚渫土の陸上盛立処分」は、近年の環境問題に対する社会的関心の高揚、海洋投棄に対する国際批判等を勘案すると、今後の海域工事、なかでも瀬戸内海あるいは東京湾等の閉そく海域における浚渫工事においては、従来の海洋投棄等に替わる処分方法として、着目される場合も増えてくると予想される。

当工事の例が、今後の同種工事における計画において何らかの参考になれば幸いである。

最後に、本工事の関係各位に深く感謝の意を表す次第である。