ヘドロ化した海域における石炭灰造粒物の 海底散布時のめり込み量の評価と予測

AN EVALUATION AND PREDECTION OF FLY ASH BEANS SINKING MASS INTO THE MUDDY SEDIMENTS

末次弘道¹・三戸勇吾²・木村道夫³・日比野忠史⁴

Hiromichi, SUETSUGU, Yugo MITO, Michio KIMURA and Tadashi HIBINO

¹正会員 中国高压コンクリート工業株式会社環境事業部 (〒730-0041 広島市中区小町4-33)

²正会員 博(農) 復建調査設計株式会社環境技術部水圏環境課 (〒732-0052 広島市東区光町2-10-11)

³正会員 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所 (〒730-0029 広島市中区三川町2-10)

⁴正会員 博(工) 広島大学准教授 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

In order to be turned into actual utilization of the coastal environment technique that a muddy sea bed covered with fly ash beans, we evaluated the buried depth of the fly ash beans that generated at the construction in Kaita bay.

The buried depth of fly ash beans occurred 3cm to 7cm. The covering thickness was not contributed to the buried depth. At the construction, fly beans dropped to sea bed 7cm at first, after that requisite amount of fly ash beans was dropped. It demonstrated that intrusion to the sediment fly ash beans occur first layer, but the intrusion does not occur above on the second layer.

The buried depth of fly ash beans correlated to the surface water content, and water content of the buried depth sediment was 144% to 242%. It indicated water content of surface sediment and vertical profile can use predicted buried depth. Additionally we developed simple equipment for predicted the buried depth. It can predict the buried depth by drop the weight sediment core sample and measure the instruction depth of weight.

Key Words : buried depth, fly ash beans, prediction, muddy sediment, water content

1. はじめに

海域環境の改善手法として覆砂は一定の効果があ
ることが認められており有効な対策の一つといえる。
しかしながら、近年の瀬戸内海における海砂の採取
禁止や新生堆積物による効果の低減といった問題を
抱えており、これらの課題を解決し得る底質改善手
法の開発が望まれている。

中国地方整備局では、広島湾奥部において、従来
の覆砂の欠点を解決し得る底質改善手法として石炭
灰造粒物によるヘドロ被覆手法を提案し¹⁾、平成
22年5月から6月にかけて実証試験区画の施工を
実施した。

実証試験で使用した石炭灰造粒物は火力発電所で
発生した石炭灰をセメントで造粒固化した材料であ
り、中央粒径は約2cm、土粒子密度は1.8g/cm³程度、
珪素、アルミニウムを主成分とする他、鉄、カルシ
ウム、マグネシウム分等を含む。

上記の施工では、石炭灰造粒物を海底へ散布する
際に石炭灰造粒物の底泥へのめり込みが生じること
が、事前に実施した室内実験より明らかとなっており、
施工時のめり込み量(材料の割増量)を推定する
ことが大きな課題であった。

本稿では、施工終了直後に実施しためり込み量等
に関する調査結果から、ヘドロ被覆手法施工時に
いて現地で実際に生じためり込み量を評価すると
ともに、今後、本手法を実用化する上で必要なめり
込みによる割増量の予測方法を考案した。

2. 施工工法および施工の概要

(1) 実証試験区画の配置および施工層厚

実証試験区画の施工は広島湾奥部に位置する海田

*Station No. of the measured point of total application amount is not described.

図-1 実証試験区画の配置と調査地点。

図-2 ベルトコンベア方式薄層撒き出し工法概念図.

湾南部の奥まった小海域内約6haで行われた（図-1）．実証試験範囲における水深は7～10mであり、北側から南側にかけて緩やかな傾斜を持つものの、フラットな海底面をしている．小海域の湾口（北）側から湾奥（南）側に向けて、20cm、10cm、5cm

の厚みを持った区画が設計されており、石炭灰造粒物による覆砂を実施する上で最適な散布層厚をモニタリング等で明らかにしていく計画となっている（図-1）．

実際の施工に際しては、この設計上の散布層厚に底泥への石炭灰造粒物のめり込みによる割り増し量を加えた散布量が必要となる．事前に実施された室内実験による検討により、実証試験海域で石炭灰造粒物を散布した場合、最低でも2cmのめり込みによる割り増しが生じることが予想されていた¹⁾．そこで、今回の施工では2cmをめり込みによる割り増し量と考え、それぞれの区画に2cmの散布層厚を加えた散布量を施工上の設計値とした．

(2) 施工時期・施工工法

施工は平成22年5月10日から平成22年6月30日にかけて行われた．施工上の設計散布層厚は7cm、12cm、22cmであるのに対して、散布する石炭灰造粒物の中央粒径は約2cmであり、薄く均一に材料を散布可能となる施工工法を用いる必要があった．そこで、

(a) 施工前の海底地形（北側からの鳥瞰図）

(b) 施工後の海底地形（北側からの鳥瞰図）

(南側からの鳥瞰図)

(北側からの鳥瞰図)

(c) 実証試験区の形状（b-aより作成）

図-3 実証試験区画の施工状況.

今回の施工では「ベルトコンベア方式薄層撒出し工法」が採用された。本手法では、ベルトコンベアを使用し、ホッパー下部より覆砂材の一定量をベルトコンベアへと供給し、スクレーパーによって均一に切り出すことで散布を行う²⁾（図-2）。ベルトコンベアへの覆砂材の供給量、ベルトコンベアの手速および船速を調整することで、任意の面積当たり散布量を得ることが可能である。また、船速はアンカーにより船体を固定し、ウインチにてアンカーワイヤーを巻き取る速度を制御することで船速が決定される。船速の調整はGPSとコンピュータープログラムにより行われる。

施工範囲は東西に分け、それぞれ1工区、2工区とし、1工区については5月19日～6月3日に、2工区については6月7日～19日に石炭灰造粒物の散布を行った。また、底泥への石炭灰造粒物のめり込み量は、最初に薄層で散布を行なった後に必要な層厚分を散布することで最小限に留めることが可能である³⁾。そこで、12cm（10cm区画）、22cm（20cm区画）の散布を行う際には、最初に層厚7cm分の石炭灰造粒物の散布を行い、その後、必要な層厚分の散布を行った。

3. 調査方法

調査は、施工前後において、施工区画の形状やめり込み量の分布を把握するため、深浅測量、総散布量の測定、砂面棒による被覆層厚の測定、柱状採泥試料による被覆層厚およびめり込み量の測定を行った。以下に各調査の方法を示す。

(1) 深浅測量

区画全体の形状を把握するため、施工前・後において図-1に示す範囲で深浅測量を行った。

(2) 総散布量の測定

石炭灰造粒物の散布量の精度を確認するため、総散布量（めり込み量を含んだ正味の石炭灰造粒物の散布量）の測定を行った。各試験区画において、施工前に縦30cm、横30cm、高さ10cmの鋼製の受け箱を図-1の地点に設置した。施工直後に受け箱内に散布された石炭灰造粒物の層厚を測定することで、総散布量を確認した。

(3) 砂面棒による被覆層厚の測定

各試験区画における被覆層厚（めり込み量を除外した層厚）を把握するため、砂面棒による被覆層厚の測定を行った。施工前に図-1に示す地点の海底へ砂面棒を設置し、施工後、砂面棒の値を読み取ることで石炭灰造粒物による被覆層厚を測定した。

図-4 各試験区における総散布量の測定結果。

図-5 各試験区における被覆層厚の測定結果。

(4) 柱状採泥による被覆層厚・めり込み量の測定

石炭灰造粒物の被覆層厚やめり込み量を測定する上で、アクリルチューブ等による柱状採泥試料の観察は有効で確実な手法の一つである。しかしながら、石炭灰造粒物は中央粒径が2cm程度と粗いため、アクリルチューブが貫入しにくく、且つ、試料が乱れやすいため、施工後に柱状採泥を行うのが困難であると考えられた。そこで、施工前にアクリルチューブ（φ=150mm、H=500mm）を海底へ半分程埋没させた状態で設置しておき、施工後にアクリルチューブを回収することで、限りなく不攪乱に近い状態で柱状採泥を行った。採取した柱状採泥試料は上層側から慎重に分取しながら観察を行い、被覆層厚とめり込み層厚の測定を行った。

また、めり込み量と底泥の物理的特性の関係を把握するため、施工前および施工後において、アクリルチューブ設置地点において底泥含水比の測定を行った。

4. 実証試験区画の施工状況

施工前および施工後の深浅測量結果の差分から実証試験区の施工出来高を算定し、区画全体の形状を把握した（図-3）。20cm区画、10cm区画、5cm区画の実証試験区は場所によるばらつきが数～10cm程度見られるものの、概ね設計どおりの形状で施工されていた。なお、深浅測量の測定結果は測定時の船の揺動等の影響で10cm程度の誤差を持ったため、cm単位での形状の変化を評価することが難しい。しかし、今回の測定では、岸壁のコンクリート面等

表-1 施工前の含水比, めり込み量, めり込み部下層における含水比.

ST.	Water Content at 0-2cm (%) ¹⁾	Buried Depth (cm)	Water Content at Buried Depth (%) ²⁾
1-2	359	3.0	216
1-3	470	7.0	242
2-2	175	3.6	216
2-3	421	7.5	176
3-2	447	7.0	144
3-3	393	4.5	217

1) Before the construction. 2) After the construction.

を基準面として, 施工前後の測定結果の補正を行っており, 全体的な形状は概ね把握できていると考えられる.

また, 海底に設置した受箱に捕集された総散布量の平均値について見てみると, 設計値に対する誤差は5cm区画では+1.2cm, 10cm区画では+2.3cm, 20cm区画では+4.8cmであった. また, 各区画ともに±2cm以下のバラツキ (標準偏差) があった. 今回の施工で散布された石炭灰造粒物の中央粒径は約2cmであることを考慮すれば, 本施工工法は非常に精度良く材料の散布が行えていたと言える (図-4).

さらに, 砂面棒および柱状採泥試料による被覆層厚の測定結果の平均値について見てみると, 設計値に対する平均値の誤差は5cm区画では3.6cm, 10cm区画では9.5cm, 20cm区画では18.9cmであった (図-5). 被覆層厚の測定値についても, 用いた材料の粒径を勘案すれば, 良い精度で施工されていたと言える. 一方で被覆層厚の測定結果の地点間の標準偏差について見てみると, 各区画ともに2cm以上と受け箱で測定した全散布量の測定結果よりも大きくなっていた (図-5). また, 被覆層厚の設計値に対する誤差の分布に空間的な偏りは認められなかった. これは5章で議論するとおり, 底泥の含水比によって, 石炭灰造粒物のめり込み量が変化することから, 底泥の含水比の分布が比較的不均一であったことを反映したものと考えられる.

図-6 実証試験海域における平均的な底泥含水比の鉛直分布.

図-7 実証試験海域における深度1cmと深度5cmの底泥含水比の関係.

5. 施工時に生じためり込み量とその予測

(1) 施工時に生じためり込み量

表-1は今回の施工で得られた表層の含水比とめり込み量, めり込み部下層-2cmの含水比を示したものである. 石炭灰造粒物のめり込み量は区画間による差は認められず, 散布量によってめり込み量に差は生じなかった (表-1). これは, 2. (2) で示したとおり, 7cmの石炭灰造粒物の散布を行った後に, 10cm区画では+5cmの, 20cm区画では+15cmの散布を行なったため, 海底面への衝突時の応力が分散され, 7cm散布時以上のめり込みがほとんど生じなかったためと考えられる.

井上ら (2010)³⁾ は室内実験結果より, 施工時に生じるめり込み量が底泥の含水比によって変化することを予測している. 今回の実海域での施工結果についても, 施工前の底泥の表層0-2cmの含水比の分布は, めり込み量の分布と良い一致を見せている

(表-1). このことは, 含水比に代表される海底の軟弱性がめり込み量を決定づける大きな要因であることを示している. なお, 測定を行った6地点中1地点 (ST.2-2) については, 含水比が175%と相対的に低いのに対して, めり込み量は3.6cmと相対的に高く, 他の地点と若干傾向が異なっていた. これは, 現地海域の底泥中の含水比の分布が不均一であり, 施工前に含水比を測定した箇所と施工後にめり込み量を測定した箇所を測定した箇所の含水比が異なっていたためと考えられる.

(2) 底泥含水比からのめり込み量の予測

海底泥への材料のめり込み量は材料の割り増し量を意味するため, 施工計画上, 施工前にめり込み量を予測することが重要となる. 井上ら (2010)³⁾ は, 室内実験の結果から, 底泥含水比からめり込み量を予測する式 (1), 式 (2) を提案している.

$$\Delta H / h = \text{const.} \quad (1)$$

$$h = 0.001(WC_{5cm})^2 - 0.25WC_{5cm} + 16.3 \quad (2)$$

ここで, ΔH : めり込み量 (cm), h : 含水比が200%になる底泥深さ, WC_{5cm} : 深さ5cmの含水比 (WC_{5cm}), const. : 定数0.41をそれぞれ示す.

図-8 底泥含水比とめり込み量の関係（試料採取時の誤差が大きかったST. 2-2は除外して作成）。

式（１）及び（２）は表層から５ｃｍ深度の底泥含水比からめり込み量を予測している．しかし，実用上の試料採取の容易さ等を考えれば，表層泥の含水比からめり込み量を予測できることが簡便である．実証試験海域で2008～2009年の間に採取された柱状採泥試料の含水比のデータは図-6のような分布を持ち式（３）で示されるように近似される．

$$W_z = a \times Z^b \quad (3)$$

ここで， W_z ：深度 Z の含水比（％）， Z ：深度（cm）， $a \cdot b$ ：底泥に固有の定数である．

式(3)の定数 a ， b を観測データ毎に求め，表層から1cmの含水比（ WC_{1cm} ）と表層から5cmの含水比の関係式（４）を得た(図-7)．式（１）（２）及び（４）にて表層（1cm）の含水比からめり込み量の予測が可能である．

$$(WC_{5cm}) = 3.045(WC_{1cm})^{0.753} \quad (4)$$

なお，実際には表層から1cm位置の含水比を正確に測定するのは困難であり，表層0-2cm深度を採取し，深度1cmの含水比を代表させることが妥当である．

井上ら（2010）による予測式と今回実測した表層0-2cmの底泥含水比とめり込み量の近似式を比較すると切片については異なっていたものの，傾きはほぼ同程度であった（図-8）．室内実験は縦50cm，横50cm，高さ100cmの亚克力製の筒を用いて行われており，壁面側では衝突時の応力が横に逃げないため，実海域よりもめり込み量が多く見積もられていたと考えられる．しかしながら，今回の実海域での施工で得られた結果は，室内実験で予測されていたとおり，底泥の含水比によってめり込み量が予測できることを示すものであった．

一方で，式（４）から，底泥の含水比の鉛直的な分布が図-6に示すような累乗曲線で表されるため，表層の含水比からのめり込み量の予測式が成立したとも言える．すなわち，今回提示した式は底泥の含水比の分布が図-6のような分布を持つ場合に適用可能である．汎用的に考える上では，底泥含水比の分布が不均一である場合も当然考慮すべきである．

表層の含水比に関わらず，めり込み部下層の含水比は概ね200%前後である（表-1）．このことは，

図-9 めり込み量簡易測定装置の概要．

石炭灰造粒物の海底衝突時には，底泥含水比200%前後の軟度を持つ底泥までめり込むことを示している．このことから，含水比の鉛直的な分布が不均一な場合には，式（１）から（４）の予測式は不適当であり，含水比の鉛直的な分布からめり込みによる割り増し量を予測することが妥当と考えられる．

（３）簡易な現地測定からのめり込み量の予測

底泥含水比からのめり込みの予測は，試料の採取・含水比の分析と比較的労力がかかる．可能であればより簡易的にめり込み量を予測できることが望ましい．

そこで，図-9に示すような簡易な装置の開発を試みた．装置は，柱状採泥した亚克力チューブ上部に固定でき，装置の中央部にある滑車から球状の錘が下がっている．この錘を柱状採泥試料底泥上の約1mmの位置に静置した後，自由落下させ，石炭灰造粒物のめり込み量を再現する．錘の重量は石炭灰造粒物の海底衝突を再現するため，海底衝突時の運動エネルギーと同等の位置エネルギーを持つように調整した．すなわち，式（５）で表されるエネルギー保存式に，平均的な中央粒径（20mm）を持つ石炭灰造粒物の1個の重量約6 g，石炭灰造粒物の終末速度55cm/ses³）を適用し，海底面上1mmの位置エネルギーが石炭灰造粒物の海底衝突時のエネルギーと等しくなる重量を求めた．ここで，海底面上1mmを基準としたのは，ヘドロ化した海域では表層から1mm程度は浮泥が浮遊した層であり，海底

図-10 めり込み量簡易測定装置と海田湾施工時の底泥含水比とめり込み量の関係．

図-11 海底泥における底泥含水比の鉛直分布と簡易めり込み装置の測定値。

面へ設置させ落下させる場合、ほぼ抵抗の無い範囲であると考えたためである。

$$\frac{1}{2} \times m_c \times v^2 = m_c' \times g \times h \quad (5)$$

ここで、 m_c ：石炭灰造粒物1個の平均重量(g)， v ：石炭灰造粒物の終末沈降速度(cm/sec)， m_c' ：簡易めり込み装置の重量(g)， g ：重力加速度980(cm/sec²)， h ：錘の設置高さ(cm)を示す。

図-10は本装置の測定を行った結果と海田湾の施工で得られた結果を表層含水比との関係で比較したものである。めり込み簡易測定装置によるめり込み量の測定値は、概ね室内実験で得られた予測式と一致していた(図-10)。これはめり込み量簡易測定装置も室内実験と同様に壁面側では衝突時の応力が横に逃げないため、実海域よりもめり込み量が多く見積もられるためだと考えられる。本装置による石炭灰造粒物散布時のめり込み量の予測結果は、数cm程度多めに見積もられるものの、実用上の簡便さを考慮すれば、有効な手法であると考えられる。

図-11は底泥含水比の鉛直的な分布が異なる海底泥におけるめり込み量簡易測定装置の測定結果を示したものである。Case1, 2は実証試験区側の底泥の測定結果であり、概ね含水比200%の深度まで生じていることから5。(2)における結論を支持している。また、Case3, 4は実証試験区周辺よりもより有機汚濁が顕著で高含水比を持つ底泥を用いた試験結果である。錘のめり込み深度は概ね含水比400%程度の深度となっており、めり込み量は含水比のみならず泥のコンシステンシー等にも依存することを示唆している。

7. 結論

(1) 実証試験区のめり込み量の評価

実証試験区の設計値に対する施工出来高の誤差は数cm程度と精度よく施工ができていた。

底泥へのめり込み量は、3～7cm程度であり、散布層厚によるめり込み量の違いは明確ではなく、先に薄層で

散布することで、散布量の大小に関わらず最小限に留めることが可能であることと実証された。

また、めり込み量は底泥含水比に依存しており、室内実験にて予想されていたとおり、底泥の含水比が高いほどめり込み量は多く生じることが明らかとなった。

(2) めり込み量の予測手法の考案

実証試験区で得られた底泥含水比とめり込み量の関係から、表層の含水比を変数とするめり込み量の予測式を得た。また、めり込みは底泥含水比が200%程度の深度まで生じていた含水比の鉛直的な分布からめり込み量の予測を行うことも可能と考えられた。

実用上は、含水比の鉛直的な分布が不均一である場合も想定されるため、代表的な箇所での含水比の鉛直的な分布を把握した上で、表層の含水比を変数としためり込み量の予測式を用いるか、含水比の鉛直的な分布から予測するかを判断する必要があると考えられる。

さらに、より簡易的にめり込み量を推定するため、めり込み量簡易測定装置を開発した。めり込み量簡易測定装置の測定結果は室内実験で得られた予測式と概ね一致しており、めり込み量の予測に有効であると考えられる。また、泥のコンシステンシーといった不確定な要素も含めて、めり込み量を推定可能と考えられることから、より実用的な手法と考えられる。

今後は本稿で得られた予測手法を他の海域へ適用し、知見を集積することで、予測手法の有効性を確認していくとともに、予測精度を高めていくことが重要と考えられる。

参考文献

- 1) 日比野忠史・三戸勇吾・今川昌孝・駒井克昭・木村道夫：ヘドロ被覆設計のための海底有機泥挙動の把握，海洋開発論文集，第26巻，pp.141-146，2010。
- 2) 中国電力株式会社・株式会社エネルギー・エコ・マテリアル・中国高圧コンクリート工業株式会社：撒き出し装置。特開2008019572。2008-01-31。
- 3) 井上省吾・日高和幸・木村道夫・日比野忠史・首藤 啓：石炭灰造粒物の海底散布時の沈降・めり込み特性，海洋開発論文集，第26巻，pp.129-134，2010。