

河口堆積ヘドロと石炭灰から造る 地盤改良材の物理特性

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF FOUNDATION IMPROVEMENT MATERIALS MADE FROM RIVER MOUTH SEDIMENTATION SLUDGE AND COAL ASHAS

藤原哲宏¹・西浦大貴²・日比野忠史³・吉岡一郎⁴

Tetsuhiro FUJIWARA, Hiroki NISHIURA, Tadashi HIBINO and Ichiro YOSHIOKA

¹正会員 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²学生会員 広島大学大学院 工学研究科 (同上)

³正会員 博士(工学) 広島大学大学院准教授 工学研究科 (同上)

⁴正会員 工修 中国電力㈱ 流通事業本部 (〒730-8701 広島県広島市中区小町4-33)

In the tidal flat of river-mouth and closed water area, sedimentation of the sludge progresses. The sludge of the tidal flat decreases ability for water purification and deteriorates environmental condition of habitat, and a landscape is damaged. "Walkway" and "terrace" on the sludge tidal flat which was built using the foundation improvement material developed by this research tie the water's edge up with a person. The main material of the foundation improvement material is sedimentation sludge and coal ash. Use of these material, it itself reduces environmental load. When establishing these directions, the cost with which dredging mud is disposed can be reduced.

In this study, we grasped physical characteristics of the foundation improvement materials that used tidal flat sedimentation sludge and coal ash. Furthermore, we clarified importance of water content and necessity of the protection from ship waves by field test.

Key Words : *sedimentation sludge, coal ash, fly ash, foundation improvement material, sand covering, tidal flat, promenade, water content, mixed method, compression strength*

1. はじめに

太田川と瀬戸内海は、広島における生活と文化を繋ぐ中心的な役割を担ってきた。広島が水の都として発展していくためには、治水、水辺空間の創出・利用なども含めた総合的な取り組みが必要である。1990年3月には、国土交通省・広島県・広島市の3者が協力して、一般市民が安心して河川空間を利用できるよう「水の都ひろしま」構想を策定し、水の都としてより魅力的な都市づくりを進めてきた。このような都市づくりの一環として、太田川市内派川の水辺の整備による親水性の向上が進められており、干潟に近づきたくなくなるような水辺空間の回復が求められている¹⁾。

都市化による浅海域埋立が進んだ平坦な地域を流下する河川河口部や閉鎖性海域に発達する干潟では、河川上流や海域から運搬されるヘドロ（有機細粒泥）が堆積し、干潟の泥化が進行している。干潟のヘドロ化の進行は、水質浄化能力の低下や生物棲息環境が悪化するだけでなく、景観価値を含む水辺環

境を損なっている。

本研究で開発した地盤改良材を用いてヘドロ干潟に構築する「散策道」や「テラス」は、人と水際を結び付けるものである。地盤改良材の主材料は干潟に堆積したヘドロと石炭火力発電所から排出される石炭灰であり、これらの材料の使用自体が環境負荷低減に繋がるものである。これらの使用法が確立されれば、干潟堆積ヘドロのみならず浚渫ヘドロを有効に活用することができ、浚渫泥処理に莫大な費用を投じる必要性が加速度的に低減される。

本研究で対象とする地盤改良材は、ヘドロが堆積した干潟上を人が歩行することを可能にする硬度を有するもののカニ等の棲息を防げない程度に軟質な干潟覆砂材（必要以上に硬化しない覆砂材）である。本研究では、河口干潟堆積ヘドロと石炭灰造粒物を利用した地盤改良材の力学特性を把握するとともに、この特性を考慮した地盤改良材の現地施工方法を検討した。

2. 石炭灰混合改質土の土質力学的特性

(1) 既往の混合土試験による知見

石炭灰混合処理土の強度は、施工含水比の状態に敏感に反応し、最適含水比より低い含水比で最大圧縮強度が発現する^{2),3)}。一方、混合処理土の水浸による強度低下割合は、混合時の含水比が低いほど大きい^{2),3)}。中粒土から粗粒土の試料の場合、最適含水比より低い含水比で混合した供試体は水浸により崩壊したとの試験結果もある²⁾。

干潟ヘドロと石炭灰造粒物に川砂を加えた混合土による既往の配合試験では、水浸時の強度が最も高い石炭灰造粒物の配合が容積比で0.56（湿重量比0.50）であった⁴⁾。

(2) 既往の施工試験による知見

図-1に示す広島市内を貫流する太田川派川の2箇所で干潟堆積ヘドロを石炭灰造粒物により改質した覆砂材の施工試験を行っている。天満川3.0km地点（中広大橋下流側）では、2004年5月に河川縦断方向2.5m×河川横断方向2.0m、厚0.15mで改質覆砂材を敷設した。表-1に敷設した改質覆砂材の配合を示す。覆砂材の地盤硬度は徐々に増加し、覆砂厚の減少は施工後約2ヶ月で安定し、施工10ヶ月後においても10%程度の減少（踏み入れ乱した場所：13%の減厚、乱さない場所：10%の減厚）であった⁴⁾。

旧太田川3.0km地点（基町護岸空鞘橋下流側）では、覆砂の施工方法の検討を目的として、2005年12月に、石炭灰造粒物により改質した覆砂材を前述の天満川3.0km地点の施工試験より平面的に大きい規模で敷設した⁴⁾。本地点では、河川縦断方向60m×河川横断方向3m、厚0.1mで改質覆砂材を敷設した。本地点の覆砂材は、施工約3ヶ月後には殆どが流出して覆砂下の干潟ヘドロが露出した。

両地点では、干潟勾配、ヘドロの粒度組成・自然含水比、河川流量・流速、航行船舶隻数・速度、覆砂施工方法に差異はあるが覆砂流出状況が相違する主要因は明らかになっていない。

(3) 試験に用いる石炭灰造粒物の特性

石炭灰の主成分はシリカ (SiO_2) およびアルミナ (Al_2O_3) であるが、加圧流動床複合発電方式 (PFBC) 石炭火力発電所から発生する石炭灰は、石炭と石灰石を混合燃焼するので、他方式発電所の石炭灰と比較して酸化カルシウム (CaO) の含有量が高く自硬性を有する。また、石炭灰を単独で土質改良材として用いる場合には、含水比低下が主な改良効果であることから処理効果の即効性や圧縮量の減少および過度に増加しない混合処理土の強度増加が期待できる。

本試験に用いる石炭灰造粒物は、PFBC方式石炭火力発電所から発生する石炭灰を用いて製造された石炭灰造粒物を粒径2mm以下に分級した造粒物であり、高含水比粘性土の締固め性能を改善させる改質材などとして用いられている。表-2に本試験に用いた石

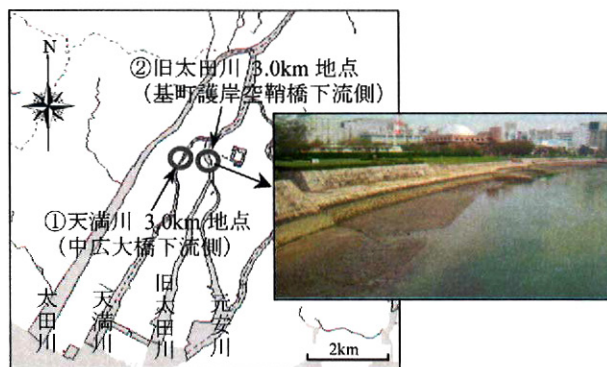


図-1 施工試験実施位置図

表-1 敷設した改質覆砂材の配合

項目	ヘドロ	川砂	造粒物
湿重量比	0.35	0.15	0.50
容 積 比	0.30	0.14	0.56
単位体積重量 (kN/m^3)	14.7	13.7	11.4

表-2 石炭灰造粒物の特性（製造業者公表値）

項目	内 容
化学成分	SiO_2 : 44% Al_2O_3 : 13% CaO : 21% Fe_2O_3 : 4% その他 : 18% （内、カーボン9%）
締固め特性	最大乾燥密度 : $\rho_{\text{max}} = 10.55 \text{ kN/m}^3$ 最適含水比 : $w_{\text{opt}} = 43.1\%$ 平均出荷時含水比 : $w_0 = 23\%$
力学特性 (1Ec締固め状態)	コーン貫入試験 : 13.3 N/mm^2 CBR試験 : 81.5%



写真-1 分級した石炭灰造粒物

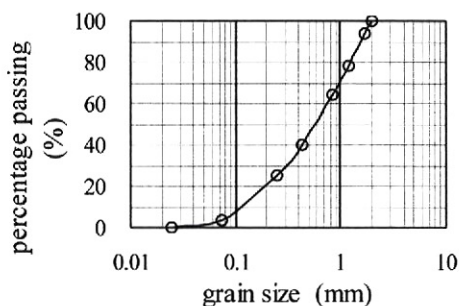


図-2 分級した石炭灰造粒物の粒度組成

炭灰造粒物の物理・化学的特性、写真-1に外観、図-2に粒度組成を示す。

(4) 試験に用いる干潟堆積ヘドロの性状

干潟堆積ヘドロは、図-1に示す旧太田川3.0km地点（基町護岸空鞘橋下流側）で採取した。表-3に採取ヘドロの初期性状、図-3に粒度組成を示す。採取ヘドロは細粒分が58%を占める高含水比の粘性土である。試験に用いるヘドロは2mm以上のベントスや貝殻などの不純物を除去して供試体試料とした。

(5) 石炭灰造粒物混合改質ヘドロ供試体

石炭灰造粒物混合改質ヘドロ試料は、干潟堆積ヘドロに石炭灰造粒物を添加してモルタルミキサーを用いて混合した。一軸圧縮試験の供試体は、混合試料を内径5cm×高さ10cmのモールドに3層に分割して入れ、1層あたり30回突き固めて作製した。表-4に改質ヘドロ試料の混合割合と混合時の含水比条件を示す。

土質力学的試験は干潟堆積ヘドロに混合する石炭灰造粒物の量を体積比50%と30%の2型式について、コンシステンシー特性、最適含水比および一軸圧縮試験を行った。

(6) 改質ヘドロのコンシステンシーと最適含水比

表-5に改質ヘドロのコンシステンシー特性と最適含水比を示す。塑性指数は、石炭灰造粒物の混合による細粒分含有率の低下により低くなり、水浸吸水による強度の変動性が改善されている。

改質ヘドロの最適含水比は、粒度組成に比較して最適含水比の高い石炭灰造粒物の混合により、細粒分含有率の低下に反して、配合割合50%の試料が高くなっている。石炭灰造粒物は、細粒分が3%で素材の最適含水比が出荷時含水比より約20%高く（表-2）、高含水比粘性土の改質材料として、粒度および含水比の調整に優れた特性を有する。石炭灰造粒物の乾燥状態での混合には、含水比低下による強度増加と処理効果の即効性が期待できる。

(7) 改質ヘドロの硬度および耐久性の室内試験

広島市内を貫流する太田川派川は、約12時間周期の潮汐干満の影響を受けている。現場施工干潟覆砂は、感潮域での乾湿繰り返し条件下での養生となる。表-6に示すように、本試験では乾湿繰り返し条件下での養生の他に、恒温での気中養生ならびに水中養生を行い、硬度および耐久性は、一軸圧縮強度で評価した。

気中養生供試体は混合・突き固め・脱枠後、室温20℃で気中養生し、一軸圧縮強度と含水比を測定した。水中養生供試体は脱枠後に3日間気中養生して水浸養生に移行した。乾湿繰り返し養生供試体は脱枠後に3日間気中養生をした後、水浸6時間、干出6時間の乾湿繰り返し養生し、干出2時間後に一軸圧縮強度と含水比を測定した。写真-2に脱枠直後の供試体を示す。外観は石炭灰造粒物を50%混合した供試体表面に土粒子間の空隙による凹凸が多い。

表-3 採取した干潟堆積ヘドロの初期性状

含水比 (%)	70.6
強熱減量 (%)	6.5
単位体積重量 (kN/m ³)	15.3

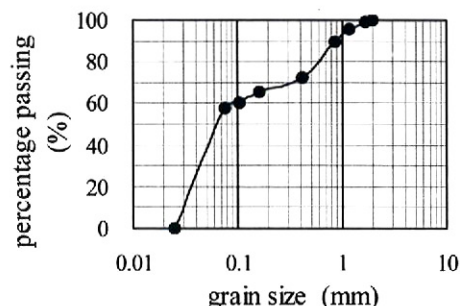


図-3 干潟堆積ヘドロの粒度組成（不純物除去後）

表-4 改質ヘドロ試料の混合割合と含水比条件

供試体 番号	体積比 (%)		混合時の 含水比条件
	ヘドロ	石炭灰 造粒物	
Na50	50	50	自然含水比 $w_o=47\%$
Na30	70	30	自然含水比 $w_o=56\%$
Op50	50	50	最適含水比 $w_{opt}=36\%$
Op30	70	30	最適含水比 $w_{opt}=30\%$

表-5 改質ヘドロのコンシステンシーと最適含水比

石炭灰造粒物の 配合割合 (%)	0	30	50
液性限界 w_L (%)	70.2	63.0	60.6
塑性限界 w_P (%)	31.6	46.7	51.0
塑性指数 I_P	38.6	16.3	9.7
最適含水比 w_{opt} (%)	—	30	36

表-6 供試体の養生条件

供試 体 番号	体積比 (%)		養生条件			混合時 含水比
	ヘ ドロ	石炭 灰造 粒物	気中 養生	水中 養生	乾湿 繰り返し	
Na50	50	50	○	—	—	自然含水比
Na30	70	30	○	○	○	自然含水比
Op50	50	50	○	—	○	最適含水比
Op30	70	30	○	—	—	最適含水比



写真-2 脱枠直後の供試体の外観

（左：Op50，右：Op30，外径5cm×高さ10cm）

(8) 改質ヘドロの室内試験結果

図-4に気中養生供試体の養生日数と一軸圧縮強度の関係、図-5に同供試体の養生日数と含水比の関係

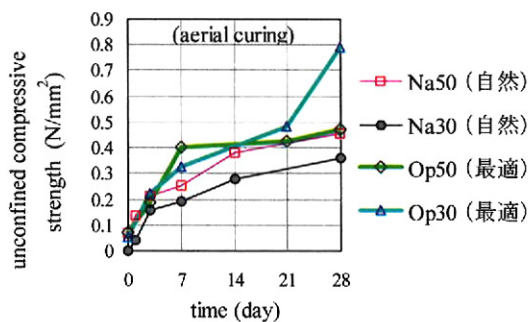


図-4 養生日数と一軸圧縮強度の関係（気中養生）

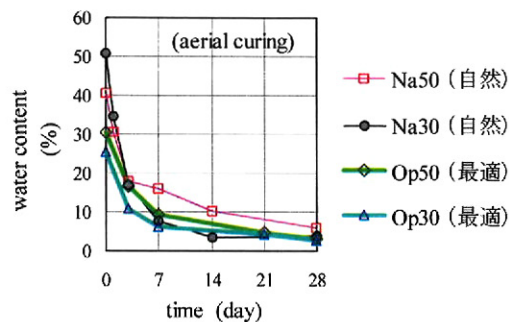


図-5 養生日数と含水比の関係（気中養生）

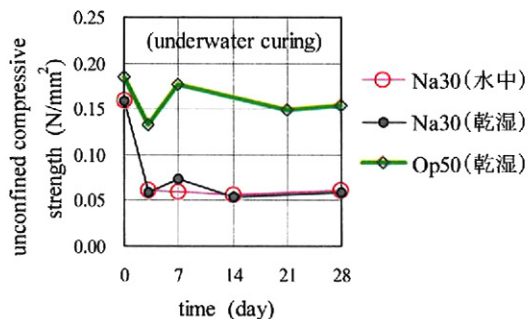


図-6 養生日数と一軸圧縮強度の関係（水浸養生）

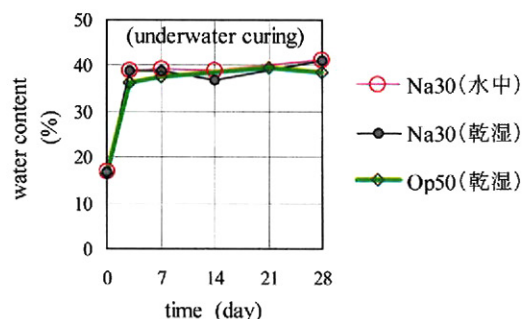


図-7 養生日数と含水比の関係（水浸養生）

を示す。気中養生では材令の経過とともに含水比が低下し、一軸圧縮強度が増加している。

自然含水比混合供試体(Na50, Na30)では、材令1日で含水比が40.5%から30.4%(Na50)、50.6%から34.5%(Na30)に低下している。材令3日でNa50とNa30の含水比が逆転して、Na50の含水比が高くなるが養生期間を通してNa50の一軸圧縮強度が高い。

最適含水比混合供試体(Op50, Op30)の比較では、養生期間を通してOp50の含水比が高い。含水比の差異が1%未満となる材令21日以降はOp30が高い一軸圧縮強度を得ている。

養生期間の経過とともに各供試体間の含水比の差異は縮小するが、石炭灰造粒物の混合割合が高いNa50とOp50は材令が進むと一軸圧縮強度の差が縮小し、混合割合の低いNa30とOp30は一軸圧縮強度の差が拡大しており、石炭灰造粒物の混合割合が高い方が改質ヘドロの力学特性が安定している。

図-6に水浸した後、水中養生または乾湿繰り返し養生した供試体の養生日数と一軸圧縮強度の関係、図-7に同供試体の養生日数と含水比の関係を示す。3日間気中養生した自然含水比混合供試体(Na30)は、水浸後に含水比が36%~39%（水浸前の2.2~2.3倍）に上昇し、一軸圧縮強度が水浸前の37%~39%まで低下する。水浸により含水比が上昇し強度が低下した供試体は、その後の養生期間中に含水比および強度ともに一定の値を保っている。水浸による含水比上昇および強度低下は、水中養生と乾湿繰り返し養生の差異がなく、乾湿の水浸時間による差異は少ないと考えられる。

最適含水比で混合した石炭灰造粒物50%混合供試

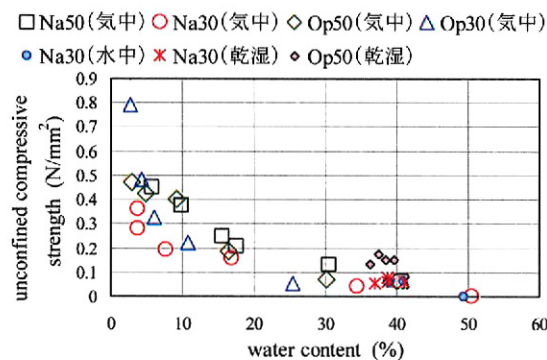


図-8 含水比と一軸圧縮強度の関係

体(Op50)は、水浸により含水比は2.2倍に上昇するが、一軸圧縮強度は80%程度が残留し、自然含水比で混合した石炭灰造粒物30%混合供試体(Na30)と比較して、水浸時に高い一軸圧縮強度を得ている。

図-8に含水比と一軸圧縮強度の関係を示す。含水比と一軸圧縮強度には明らかな関連があるとともに、同一含水比では石炭灰造粒物の配合割合の大きい方が一軸圧縮強度は高い。本試験と既往の知見から、石炭灰造粒物の配合割合を約50%とし、混合時の含水比を最適含水比(30%~40%)とする改質ヘドロが現地施工に適していると評価される。

3. 現地施工・掃流試験

(1) 試験場所と試験の概要

現地施工・掃流試験は、試験施工覆砂の流出を確認した旧太田川3.0km地点（基町護岸空鞆橋下流側図-1）で実施した。表-7に覆砂試料の施工状態と試験条件を示す。試料混合時の含水比は別途測定した最適含水比の37.3%とし、養生時間は試料混合から現地干潟での水浸までの時間であり、養生した試験室の温度は9℃～12℃の間で変動していた。試料番号Co1, Co3, Co4およびCo5は試験室で混合・養生後に現地干潟に敷設し、試料番号Co2およびCo6は現地で混合敷設した。試料番号Co5およびCo6は敷設初期の流出を防止する目的で、網目1mmの被覆網により覆った。

図-9に試験覆砂の施工位置概況、図-10に試験覆砂の配置模式図、写真-3に水浸前の石膏半球を示す。石膏半球は石膏本体と石膏を接着するアクリル板で構成し、本体石膏は焼石膏280gに純水160mlを加えて、直径16cmの半球形に固化成型した。石膏半球は干潟上に固定し、河川流水によって減少する湿重量を比較することで、河川流水の位置的な相違を把握するものである。

試験覆砂位置は一潮汐の間、小潮期に約2時間、大潮期に約7時間の干出が生じる標高(TP. -0.3m)にある。試験覆砂位置での流速、流水方向、水深はアレック電子社製EM計、同TD計を用いて計測した。

(2) 現地掃流試験結果

図-11に干潟上面での河川水流速と水深の経時変化を示す。干出前後の時間帯において、突発的に流速の早い護岸方向に向かう水流が観測されている。この水流は航跡波に起因するものと考えられ、覆砂流出の主な要因と考えられる。また、下げ潮時の水位の低い時間帯に速い河川水流を観測している。

図-12に石膏半球の重量減少量の経時変化を示す。石膏半球の減少量はP13, P12, P11の順に大きく、突堤から離れる上流側が河川流および航跡波が卓越していると考えられる。覆砂中に埋設したP14に重量の変化はなく、覆砂流出の外的要因は河川流および航跡波と考えることができる。

図-13に干潟上での暴露試験による覆砂の土粒子重量の変化を示す。被覆網で覆ったCo5およびCo6は暴露12日後における土粒子の流出が、非被覆のCo1～Co4と比較して少ないので、暴露試験の期間を61日間に延長した。

Co1～Co4の比較により、水浸時の含水比の低いCo1とCo4の土粒子残留比率が高いことから、土粒子の流出は養生時間よりも水浸時の含水比との関連性が高いと考えられる。また、水浸時の含水比が最も高いCo5は長期間の暴露においても土粒子の流出量が少なく、被覆網による保護は覆砂土砂の流出を抑制している。写真-4に示すように保護岩や突堤状のブロックで覆砂を取り囲むことで、航跡波を直接受けずに覆砂材の流出を回避できる。

表-7 施工状態および試験条件

試料番号	湿重量(kg)	養生時間(hr)	水浸時含水比(%)	供試体作製場所	被覆網の有無	現地観測日数
Co1	20	15	28.3	試験室	無	12日
Co2	20	3	—	現地	無	12日
Co3	10	27	32.9	試験室	無	12日
Co4	10	15	28.3	試験室	無	12日
Co5	10	9	34.8	試験室	有	61日
Co6	10	3	—	現地	有	61日

注) 混合時含水比は何れも最適含水比の37.3%とした

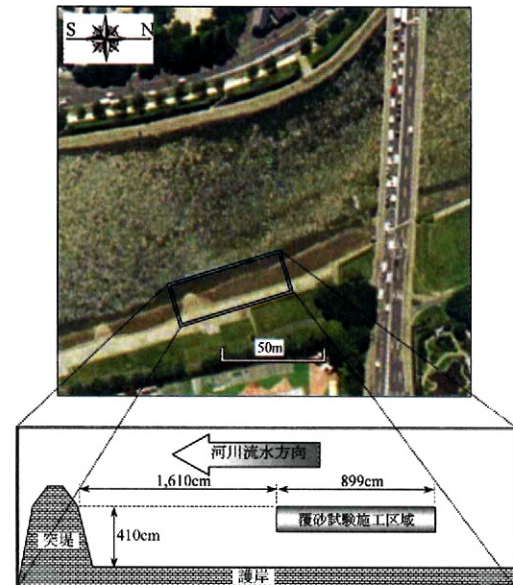


図-9 試験覆砂の施工位置概況

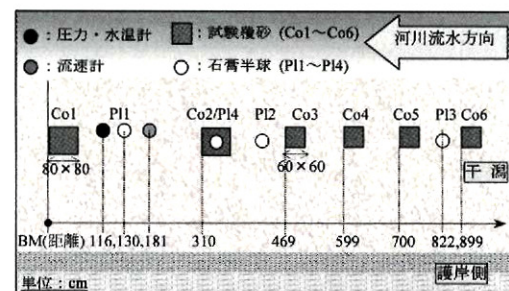


図-10 試験覆砂の配置模式図

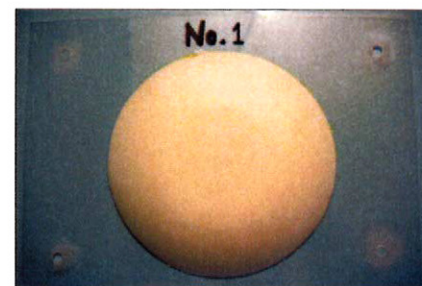


写真-3 石膏半球（直径 16cm）

4. おわりに

ヘドロが堆積した干潟上の歩行を可能にし、カニ等の棲息を防げない程度に軟質な干潟覆砂材の実用化を目的として、河口干潟堆積ヘドロと石炭灰造粒

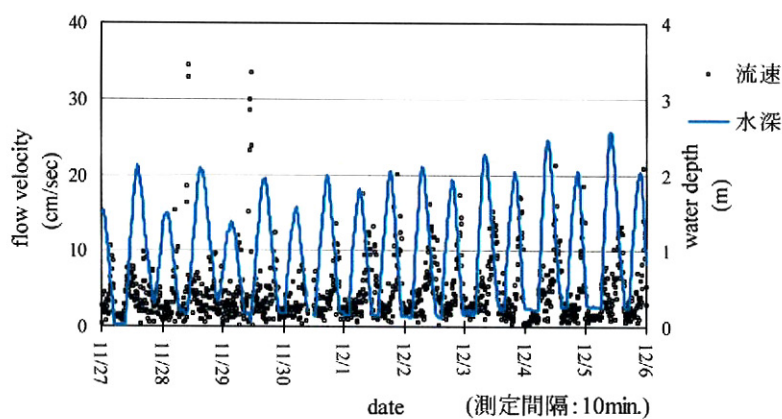


図-11 干潟上面の河川水流速と水深の経時変化

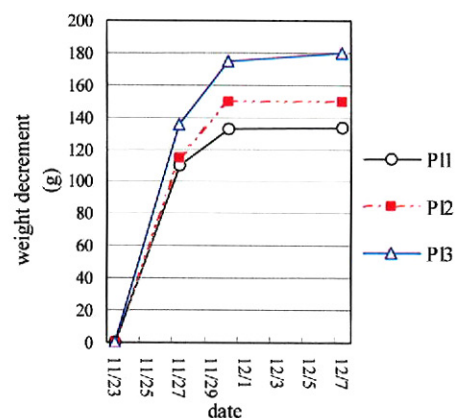


図-12 石膏半球の重量減少量の経時変化

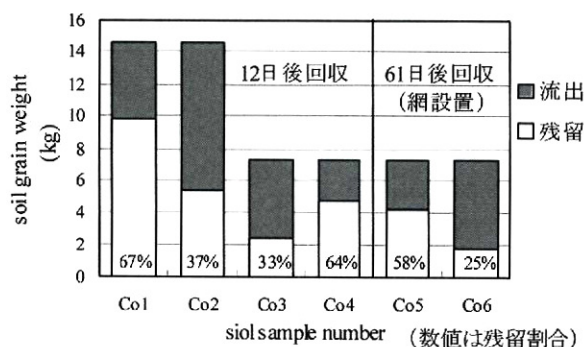


図-13 干潟暴露前後の覆砂の土粒子重量変化

物を利用した地盤改良材の力学特性の把握と、地盤改良材の特性を考慮した現地施工方法を検討した。以下に試験結果をまとめる。

(1) 石炭灰を混合した改質土の力学特性の評価

- 対象とするヘドロは50%を超える細粒分と6%を超える有機質を含むため、高含水比状態を維持し地耐力を有していないが、石炭灰造粒物を添加することにより、含水比と塑性指数が低下し、ヘドロは地盤改良材としての特性を有する。
- 改質材の最適含水比は石炭灰造粒物の混合割合とヘドロの有機性状等によって変化するが、30～40%の範囲にあり、最適含水比で混合することで改質材を水浸した時の強度低下を抑制できる。
- 改質材の強度発現の主要因は乾燥による含水比の低下であり、乾燥した石炭灰造粉物を添加することにより初期含水比を低下させ処理効果の即効性が期待できる。
- 石炭灰造粒物の混合割合50%（体積比）の供試体が混合割合30%に比べて圧縮強度と水浸抵抗性が高い。
- 施工直後の水浸によって含水比は上昇し強度は低下するが、一度の水浸により含水比および強度ともに安定するため水浸の繰り返しは改質材の流出、強度低下および崩壊に及ぼす影響は小さい。



写真-4 旧太田川空鞘橋下流に施工された遊歩道（河岸に堆積したヘドロ干潟上に地盤改良材を用いて施工（太田川河川事務所施工））

(2) 現地施工試験結果

- 施工被覆材の流出は養生時間よりも水浸時の含水比との関連性が高く、水浸時の含水比を低下させることで流出を抑制できる。
- 施工被覆材は被覆網により覆うことで長期間流出を防ぐことができおり、保護岩（写真-4）などにより囲むことで航跡波を直接受けず改良地盤材の流出を回避できる。

参考文献

- 国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所：太田川における地域と連携した活動について，第7回太田川河川整備懇談会資料1，pp. 11～14，2009。
- 澤孝平，友久誠司，神田佳一：河川堤体材料の水浸時の形状維持特性と耐浸食性に関する研究，明石工業高等専門学校研究紀要（第48号），p. 37～44，2005。
- 阪本廣行：建設発生土へのフライアッシュの適用，石炭灰有効利用シンポジウム，セッション3-4，2003。
- 日比野忠史，末國光彦，山田恭平，田多一史，富田智，水野雅光：有機泥の堆積した河岸の親水性向上のための施工技術の検証，海洋開発論文集，pp. 939～944，2006。