

浸透柱による水循環の形成と 底質改善効果の把握

UNDERSTANDING OF PORE WATER MOVEMENT AND ENVIRONMENTAL QUALITY IMPROVEMENT BY INFILTRATION-PILLAR

藤原哲宏¹・日比野忠史²・末國光彦³・末次弘道⁴・富田智⁵・水野雅光⁶

Tetsuhiro FUJIWARA, Tadashi HIBINO, Mitsuhiko SUEKUNI,
Hiromichi SUETSUGU, Satoshi TOMIDA, Masamitsu MIZUNO

¹正会員 中電技術コンサルタント(株) 山口支社 (〒754-0002 山口市小郡下郷1225番地9)

²正会員 博士(工学) 広島大学准教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 中国電力(株) (〒730-8701 広島県広島市中区小町4-33)

⁴正会員 中国高圧コンクリート工業(株) 環境事業部 (〒730-0041 広島県広島市中区小町4-33)

⁵正会員 日本ミクニヤ(株) 環境防災部 (〒734-0015 広島県広島市南区宇品御幸4-4-7)

⁶正会員 国土交通省中国地方整備局 太田川河川事務所 (〒730-0013 広島県広島市中区八丁堀3-20)

The organic sediment moves with water flowing in estuary. It is carried to the river with flood tide from river mouth, and settles on the riverbed at a tidal flat. The organic sediment settled there causes the environment deterioration and loss of waterside scene value. Then, the environmental quality improvement technology was proposed using fly ash for consolidated sediment.

We established the construction technology for environmental improvement at riverbed covered by organic sediment. The infiltration-pillar was constructed as a method of supplying oxygen into consolidated sediment by the water movement in the pipe with the ebb and flood tide. After infiltration-pillar was constructed, the effect of the environmental improvement decreased the sulfide and the ignition loss in the sediment, and it was confirmed to decrease the nitrogen in the pore water.

Key Words : *tidal range, pore water movement, organic sediment, sediment improvement, benthos*

1. はじめに

太田川と瀬戸内海は広島における生活・文化を繋ぐ中心的な役割を担ってきた。広島が今後、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・県・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望まれており、干潟に近づきたくするような水辺空間が求められている。

日比野ら¹⁾は市内派川に形成された干潟では、広島湾からの海水の遡上に伴って運ばれてきた有機泥が多く堆積しており、有機泥の流入量が干潟生物等による消費量を上回るため、干潟の泥化が進行している状況にあることを示している。従来層(砂層)

の上に堆積した有機泥(シルト・粘土)は、太田川デルタ内で形成されている地下水流動を制限し、河川感潮域の干潟内の水循環も阻害している。このため、透水性の高い材料(石炭灰造粒物等)を使って水循環を生起させることで、干潟底泥内に酸素を供給し好気的環境をつくることできれば、生物機能の回復も含めた干潟環境の改善を図ることができる。

著者らは、既に、有機泥の堆積した河岸における親水性向上技術(浸透柱、覆土)を開発し、天満川の現地実験^{2),3)}により浸透柱および覆土の効果を把握し、現在、その技術を確立するために実証試験⁴⁾に入っている。

本研究では、旧太田川空鞆橋付近の実証試験フィールドで2005年12月に施工された浸透柱の効果を検証するため、水質・底質および生物調査を実施し、浸透柱による水循環の形成と底質改善効果について検証を行った。

2. 実証試験の概要

本実証試験は、広島市の市街地を貫流する旧太田川空鞘橋下流（2K880～2K960）付近で実施した。旧太田川空鞘橋付近の干潟の外観を図-1に示す。試験区域周辺には、河床（横断形）の約2割程度に干潟が形成されている。この干潟は、約0.5m程度の厚さで有機泥が堆積した泥干潟である。有機泥が堆積している層（シルト・粘土層）の下には砂層が存在している。

(1) 試験区域の概要

試験区域の概要を図-2に示す。2005年12月に実証試験区域の施工を行い、約100m×3mの試験区内に生物エリアと周辺エリアの2つのエリアを造成した。生物エリアは泥質の改善を目的としたエリアであり、浸透柱設置による底生生物の良好な生息環境の創造を目指している。生物エリアには、浸透柱の間隔を1.5mにした区域（以下、浸透柱エリア（間隔1.5m）と示す）と浸透柱の間隔を3.0mにした区域（以下、浸透柱エリア（間隔3.0m）と示す）を設けた。一方、周辺エリアは、未施工のエリアであり、

生物エリアとの比較対照としての区域である。

(2) 実証試験項目の内容

実証試験項目の内容を表-1に示す。生物エリアおよび周辺エリアでの間隙水、底土、生物相の施工前と施工後11ヶ月の比較検討を行い、浸透柱設置による底質改善効果の把握を行った。間隙水の調査項目は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ （アンモニア態窒素）、 $\text{NO}_3\text{-N}$ （硝酸態窒素）、および $\text{NO}_2\text{-N}$ （亜硝酸態窒素）である。底土の調査項目は、表層で計測されたORP、硫化物、強熱減量、および粒度分布であり、サンプリング深度は0～10cmであった。生物相については、底生生物についてサンプリングを行った。

また、周辺エリア内および生物エリアの浸透柱内にセジメントトラップを設置し、夏期（2006年7～9月）の実証試験区域における有機懸濁物質の堆積量（SS）、および性状（粒度分布、強熱減量）の把握を行った。

浸透柱内および周辺では、塩分水温計、DO計、水温計を設置し、冬期（2006年1～3月）および夏期（2006年7～9月）における浸透柱付近の水循環の把握を行った。詳細については、次節に示す。

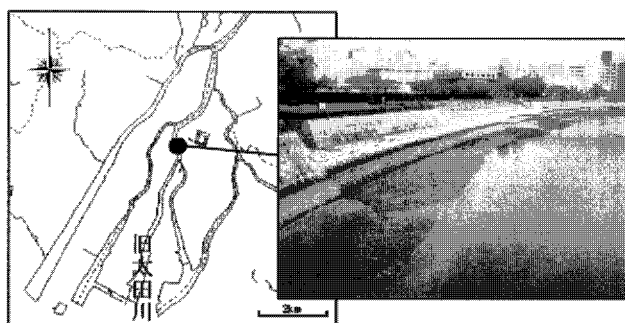


図-1 旧太田川空鞘橋付近の干潟

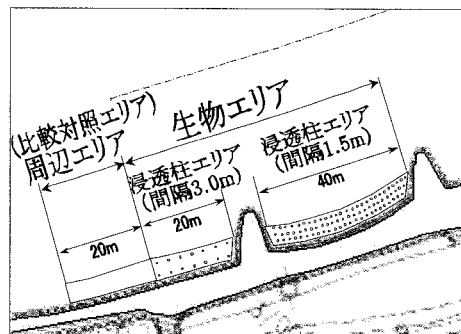
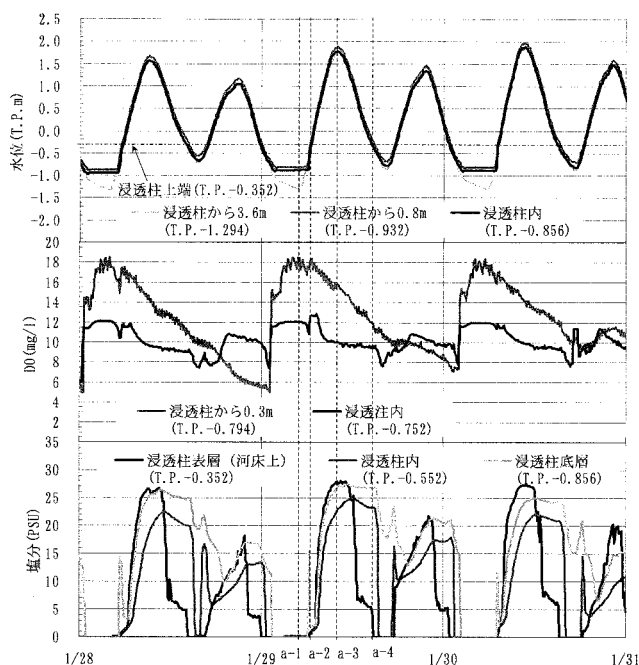


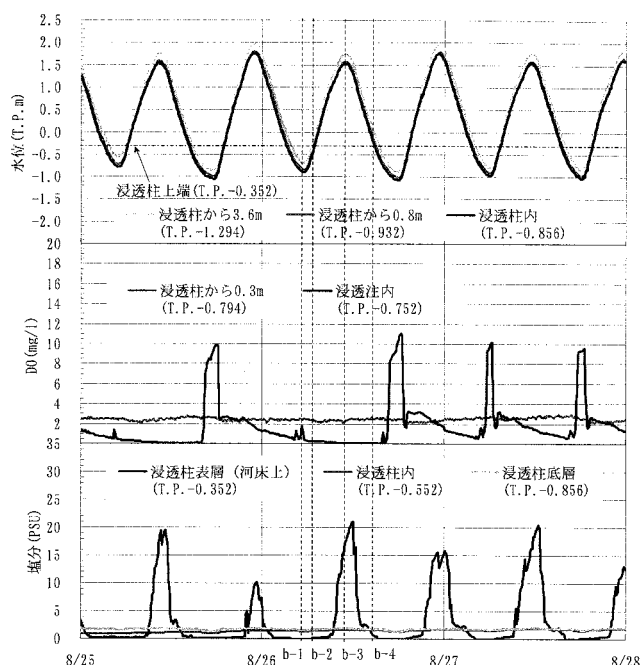
図-2 試験区域の概要

表-1 実証試験項目の内容

対象 エリア	調査項目	調査箇所数	調査時期
生物 エリア	[間隙水] ・ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$	・ 浸透柱エリア(間隔 1.5m) … 1 箇所	・ 施工前 (2005年9月)
	[底土] ・ ORP、硫化物、強熱減量、粒度分布	・ 浸透柱エリア(間隔 3.0m) … 1 箇所	・ 施工後11ヶ月 (2006年10月)
	[生物相] ・ 底生生物		
周辺 エリア	[トラップ内の堆積物量] ・ SS、粒度分布、強熱減量	・ 浸透柱エリア(間隔 1.5m) 浸透柱内… 2 箇所	・ 施工後8～10ヶ月 (2006年7～9月)
	[間隙水] ・ 水温、塩分、DO、水位	・ 浸透柱内および周辺 (図-3参照)	・ 施工後2～4ヶ月 (2006年1～3月)
			・ 施工後8～10ヶ月 (2006年7～9月)
周辺 エリア	[間隙水] ・ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$	・ 周辺エリア … 1 箇所	・ 施工前 (2005年9月)
	[底土] ・ ORP、硫化物、強熱減量、粒度分布		・ 施工後11ヶ月 (2006年10月)
	[生物相] ・ 底生生物		
周辺 エリア	[トラップ内の堆積物量] ・ SS、粒度分布、強熱減量	・ 周辺エリア … 1 箇所	・ 施工後8～10ヶ月 (2006年7～9月)



(a) 冬期大潮期 (2006/1/28~1/31)



(b) 夏期大潮期 (2006/8/25~8/28)

図-4 水位の変化に伴う浸透柱付近のDO・塩分の変動特性

(3) 浸透柱付近の計測機器の設置概要

浸透柱の流動調査の概要(断面図)を図-3に示す。浸透柱の直上、中層、底層に塩分水温計: Compact-CT, 浸透柱の下層および浸透柱から0.3m離れた下層にDO計: Compact-DOW, 浸透柱の底層および浸透柱から0.8m離れた底層に水温水位計: Compact-TDを設置した。河川内(浸透柱から3.59m離れた場所)においても、水温水位計: Compact-TDを設置した。また、浸透柱周りの3箇所水温計: Compact-T(以上、アレック電子社製)を設置した。

浸透柱底層のTD計はT.P.-0.856m, 河川内のTD計はT.P.-1.294m地点に設置された。また、これらは10分間隔で連続計測されていた。

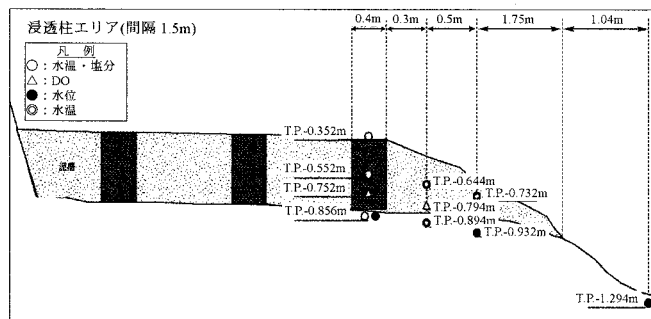


図-3 各計測機器の設置状況

3. 浸透柱設置による水循環の形成

浸透柱設置後の間隙水の流動特性について、本論文では冬期および夏期の大潮期における水位, DO, 塩分, および水温から検討を行った。

図-4には, (a)冬期大潮期 (2006年1月28日~1月

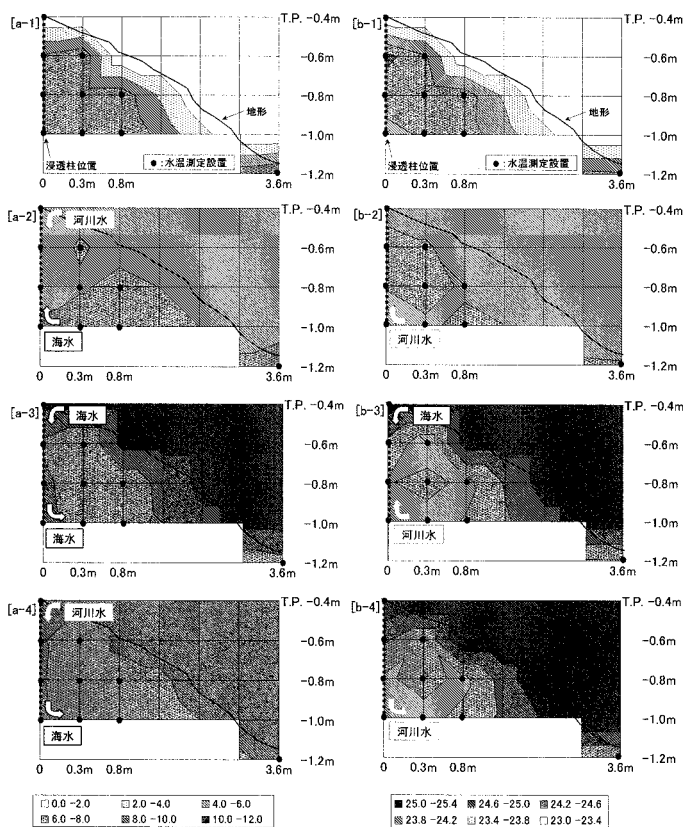


図-5 水位の変化に伴う浸透柱付近の水温変動特性

31日), (b)夏期大潮期 (2006年8月25日~8月28日)に測定された浸透柱および浸透柱から0.8m, 3.6m離れた場所の水位, 浸透柱内および浸透柱から0.3m離れた場所のDO, 浸透柱の鉛直3層の塩分について変動特性が示されている。また, 図-5には, 各時期での干潮時, 上げ潮時, 満潮時, および下げ潮時 (a-1~a-4, b-1~b-4)における浸透柱付近の水温の変動特性が示されている。

(1) 間隙水の流動特性

間隙水の流動特性について、図-4、図-5から①泥内水温は河川水温よりも高く、遡上してくる海水温よりも低くなっていること、②浸透柱内では潮汐に伴った地下水流動があり、特に冬期の地下水位は、大潮干潮時に浸透柱直下の砂層面（T.P.-0.856m）よりも低くなること、③冬期の水循環は、上げ潮時に浸透柱の上下端から海水が流入し、その後、河川水が浸透柱の上端から流入してくること（詳細は3.(2)参照）、④夏期の水循環は、上げ潮時に浸透柱の下端から河川水が流入し、その後、海水が浸透柱の上端から流入してくること（詳細は3.(2)参照）、⑤調査地点には冬期に25psu、夏期に20psu程度の海水遡上があること、⑥冬期には常時貧酸素化していないが、夏期の浸透柱内では満潮から干潮に向かって貧酸素化する期間があることがわかる。

(2) 浸透柱内の塩分の変動

冬期の塩分の上昇は、河床上（T.P.-0.352m）では海水の遡上とともに起こっているのに対し、浸透柱底層（T.P.-0.856m）では河床上に先行して、水位上昇への転移時にDO低下とともに起こっている。その後、底層での塩分上昇は低下に転じ、河床塩分の上昇とともに、再上昇している。この時、浸透柱内（T.P.-0.552m）においても塩分上昇が起こっているが、底層塩分よりも低く、遡上海水、底層水よりも低温の水が流入している。さらに、浸透柱内では高い塩分状態が干潮時まで持続しているが、河床に遡上する海水水温よりも数℃低くなっている。高い塩分状態が継続するのは、干潮位が-1mを下まわらず、下げ潮に伴って河川水は淡水化するが浸透柱内（地盤内）には海水が残留していることがわかる。

一方、夏期の塩分の上昇は、浸透柱底層（T.P.-0.856m）では起こらず、河床上（T.P.-0.352m）で海水の遡上とともに満潮直前に起こっている。底層では、低温の河川水が流入しており、満潮後、河川水は低温で浸透柱表層の高温の海水と混合することなく、底層より流出していることがわかる。しかし、9月下旬以降は浸透柱底層から海水が流入し、浸透柱内の流動が回復していた。

(3) 浸透柱内のDOの変化

浸透柱内のDOの変化は、浸透柱内が河川水で満たされた後にDOが上昇しており、干潟表面を遡上してきたDOを多く含む海水の水塊が浸透柱表層から流入したために起こったと考えられる。また、冬期と比べて夏期の干潮時には早くからのDOの低下がみられ、浸透柱内に堆積している有機泥によるDOの消費があったことが推測できる。

4. 浸透柱周辺の底質改善効果

浸透柱周辺の底質改善効果の検証について、すべて施工前1データ、施工後1データのみに基づいており、物理性状の時空間的なばらつきが大きいことを勘案すると、ここでの検証は参考程度にとどまる。

(1) 間隙水に含まれる栄養塩の変化

間隙水に含まれる栄養塩（アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素）と底質のORP（酸化還元電位）の施工前（2005年9月）と施工後（2006年10月）の変化を図-6(a)～(d)に示す。

アンモニア態窒素は、施工前と施工後で全体的に減少傾向にあり、約1/2～1/3程度に減少した。また、

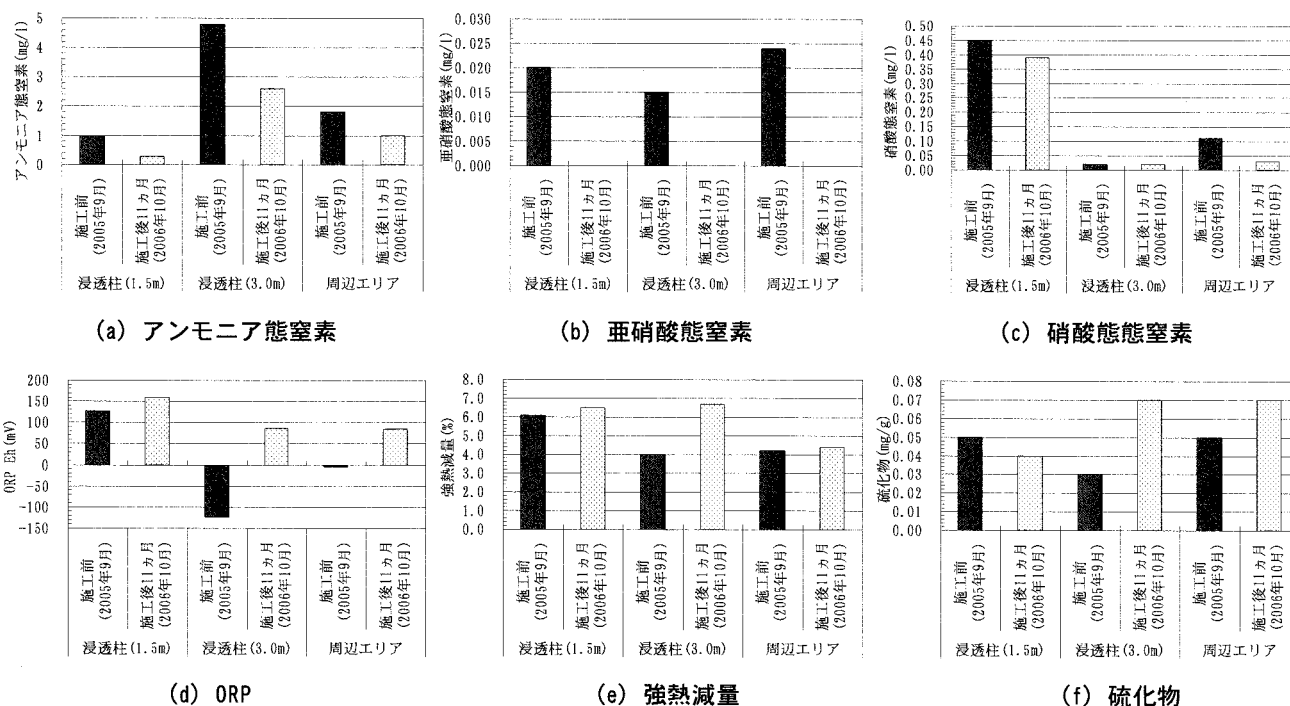


図-6 施工前及び施工後11ヶ月における間隙水質・底質の性状変化

亜硝酸態窒素も、同様に減少傾向で施工後に全エリアで定量下限値（0.005mg/l）以下であった。硝酸態窒素は、浸透柱エリア（間隔3.0m）で施工前後に0.02 mg/lと同じ値を示したが、浸透柱エリア（間隔1.5m）および周辺エリアでは減少した。底質ORPは、全体的にプラス傾向にあり、還元状態から酸化状態に推移していることがわかる。

間隙水に含まれる無機態全窒素は減少しており、無機態窒素としての全量が減少したことになる。硝化の基となる NH_4^+ は一般的に還元状態で多く存在しており、酸素がある酸化状態で NO_2^- 、 NO_3^- となる⁵⁾。冬期から夏期にかけての季節的な変化、潮汐の変動による底土内への酸素の供給などの影響により、硝化と脱窒が交互に起こることにより全窒素量の減少につながったと考えられる（図-7参照）。

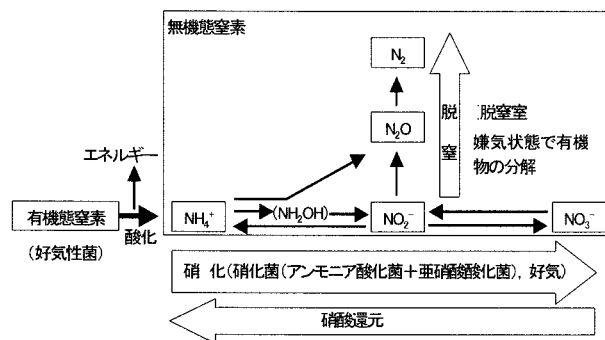


図-7 硝化および硝酸還元反応

(2) 浸透柱内に堆積するトラップ量と沈降速度

2006年7月13日～10月5日の約3ヶ月間で浸透柱に堆積したトラップ量と沈降速度を図-8に示す。

本試験区域のトラップ量は、夏期の約3ヶ月間で1,540.6gであり、そのうち約9割以上の1,411.2gが8

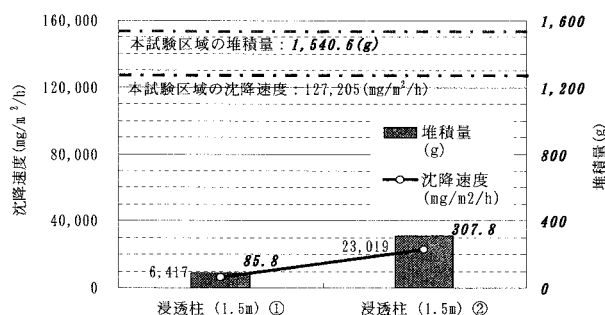


図-8 浸透柱に堆積したトラップ量と沈降速度

月23日～10月5日に堆積したトラップ量であった。夏期の後半に一気に堆積物量が増えたことの原因として、台風（13号、9/17）等による河川水の出水による影響であると考えられる。

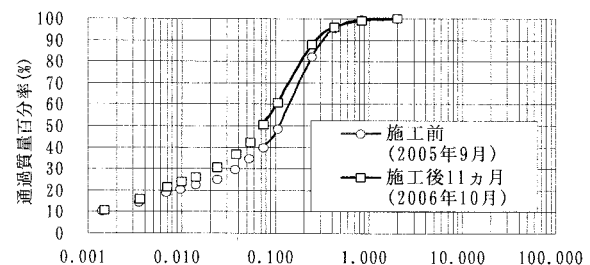
浸透柱エリア（間隔1.5m）内の2箇所の浸透柱内に堆積するトラップ量は、85.8gおよび307.8gであり、冠水時間から算出した沈降速度は、6,417mg/m²/hおよび23,019mg/m²/hであった。浸透柱内に堆積するトラップ量は、本試験区域と比べて約1/5～1/18程度であり、浸透柱内の石炭灰が懸濁物質をトラップし、浸透柱内の浸透性を保っていたことが推察される。ちなみに、トラップ内の堆積物の物理性状は、シルト・粘土含有量が約50%、強熱減量が3.0%程度であり非常に泥質の堆積物であった。

(3) 浸透柱周辺の粒度性状の変化

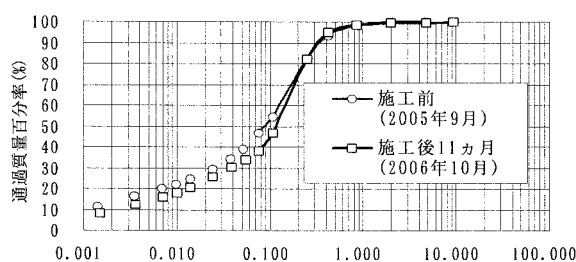
各試験エリアの表層（採取深度：0～10cm）における粒度分布の施工前（2005年9月）と施工後（2006年10月）の変化を図-9(a)～(c)に示す。

底土の粒度性状は、全体的に細砂以下の粘土・シルトの粒径が約40%以上を占めていた。施工前と比較した施工後の粒度分布は、浸透柱エリア（間隔1.5m）および浸透柱エリア（間隔3.0m）ではほぼ横ばい傾向にあり、大きな粘土・シルト含有率の変化はなかった。一方、周辺エリアでは、粘土・シルト含有率が15.3%から45.3%まで上昇しており、懸濁物質の堆積に対して、泥処理が進んでいないことが予想される。

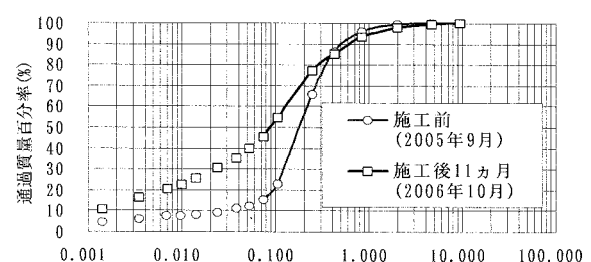
また、目視による観察によると、浸透柱内はカニの生息場となっており、浸透柱自体が生物生息場としての機能も有している。浸透柱の近傍ではシルト・粘土の含有率が安定しており、生物の生息環境が悪化する傾向ではないことがわかった。



(a) 浸透柱エリア（間隔1.5m）



(b) 浸透柱エリア（間隔3.0m）



(c) 周辺エリア

図-9 施工前後における各試験エリアの粒度分布の変化

(4) 底質の有機物量、硫化物量の変化

底土に含まれる有機物量（強熱減量）と硫化物量の施工前（2005年9月）と施工後（2006年10月）の変化を図-6(e)～(f)に示す。

施工前と施工後の底質を比較すると、強熱減量は浸透柱エリア（間隔3.0m）で増加傾向にあったが、浸透柱エリア（間隔1.5m）および周辺エリアで横ばい傾向であった。また、硫化物量は、浸透柱エリア（間隔3.0m）および周辺エリアで増加傾向であったが、浸透柱エリア（間隔1.5m）では減少傾向にあった。

底土に含まれる有機物と硫化物量は、周辺エリアで横ばいから増加傾向にあったが、浸透柱エリア（間隔1.5m）で横ばいから減少傾向にあり、浸透柱設置により底質がやや改善される傾向にあった。しかし、浸透柱エリア（間隔3.0m）では、有機物と硫化物量がともに増加傾向であったことから、浸透柱設置による底質改善効果は浸透柱エリア（間隔1.5m）ほど大きくなかったことが伺える。

(5) 底生生物の変化

全エリア（生物エリア+周辺エリア）における底生生物の施工前（2005年9月）と施工後（2006年10月）の変化を図-10に示す。全体的な傾向として、確認された底生生物は、施工前に11種389個体、施工後に8種561個体であった。

施工前の優占種は、ゴカイ科169個体(44%)、イトゴカイ科110個体(29%)、スナガニ科78個体(20%)であり、施工後は、イトゴカイ科269個体(48%)、スピオ科212個体(38%)、ゴカイ科58個体(10%)であり優占種に大きな変化が見られた。現在は、まだ有機汚濁指標種であるイトゴカイ科が47%を占め、優占種となっていた。確認個体数は、全エリアにおいて環形動物が優先していた。浸透柱エリア（間隔1.5m）では、施工前より施工後の方が少ないのに対し、浸透柱エリア（間隔3.0m）、周辺エリアでは、環形動物が大幅に増加し、施工前より施工後の方が多くなる傾向を示した。出現種類数は、浸透柱

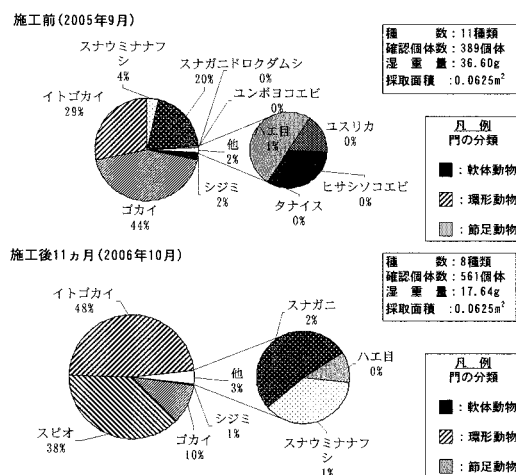


図-10 底生生物の変化

エリア（間隔3.0m）以外は、施工前より施工後の方が少なくなる傾向を示した。

周辺エリアの施工前と施工後を比較すると、施工後は環形動物だけが増加しており、生物相に偏りできていたのに対して、浸透柱エリア（間隔1.5m）では、生物相の偏りはほとんど確認されていなかったことから、生物の生息環境は悪化していないことが推察される。

5. おわりに

本実証試験において浸透柱の効果を検証するため、水質・底質および生物調査を実施し、水循環の形成と底質改善効果について検証を行った。浸透柱と覆土の併用工法については、現在、室内実験を含めて再検討中であり、実用化に向けて検討を行っている。

(1) 浸透柱設置による水循環の形成

水位の上昇とともに浸透柱底面（砂層）から海水が浸透し、浸透柱内に酸素を供給する仕組みが作られており、冬期の大潮期に顕著であることが確認された。

(2) 浸透柱内に堆積するトラップ量と沈降速度

夏期において、浸透柱内に堆積するトラップ量は、本試験区域と比べて約1/5～1/18程度であり、堆積物量が多い時期においても、浸透柱内の浸透性を保っていたことが推察される。

(3) 浸透柱周辺の底質改善効果

浸透柱施工後の底質改善効果は、浸透柱施工前と比べて底質中の硫化物、強熱減量の減少、および間隙水中のアンモニア態窒素、硝酸・亜硝酸態窒素の減少が確認された。

謝辞：本実験は、社団法人中国建設弘済会「技術開発支援制度」に基づく助成を受けて実施されたものである。記して、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 日比野忠史：河口域での有機物の循環と生物生息場の形成、水系環境の保全と創造-自然再生に向けて-講演集, pp.2-2-1～2-2-12, 2004.
- 2) 富田智, 日比野忠史, 末國光彦, 田多一史, 水野雅光：石炭灰造粒物を用いた底質改善技術の検討, 海洋開発論文集, pp.743～748, 2005.
- 3) 日比野忠史, 末國光彦, 田多一史, 富田智, 水野雅光：鉛直浸透を生起させた堆積泥内でのDO変動特性（石炭灰による底質浄化）, 年次学術講演会概要集, pp.469～470, 2005.
- 4) 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.
- 5) 菊地永祐：土と基礎の生態学, 5.水域における堆積物中の物質循環と底生生物, 土と基礎, pp.34～40, 2007