

Semen Tuban 港 (インドネシア) のシルテーション対策の効果

Rahman Hidayat*・入江 功**・小野 信幸***
竹内 伸夫****・森本 剣太郎*****

熊本港で最初に開発された潜堤方式のシルテーション対策工法がインドネシアの Semen Tuban 港に適用された。同事業の実施に平行して行われた有明海、周防灘沿岸の港湾の底泥と Semen Tuban 港の底泥との沈降特性比較試験では、インドネシア泥の方がはるかに高濃度浮泥層の持続時間が長く、従って同一の経過時間でみた場合、その層厚も厚くなることがわかった。そこで、潜堤の天端高を高くすることが浮泥流入の阻止機能の向上に有効かを数値計算、水理実験で調べたところ、その有効性が確認された。実際の Semen Tuban 港では、海底面から 2 m の高い潜堤 (熊本港では、1~1.5 m) が用いられ、埋没が有効に阻止された。

1. はじめに

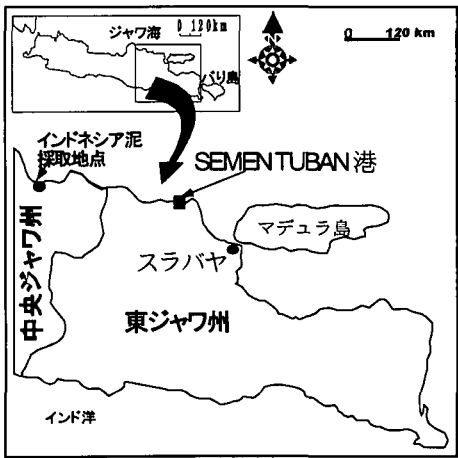
シルトや粘土などの微細な土粒子が航路や泊地に埋没することをシルテーションと呼んでいる。インドネシアなどの東南アジアでは、雨季に緩勾配の河川から排出された微細な土粒子が航路や泊地に堆積し、港湾の稼動に大きな支障を来す例が多く、対策法の樹立が急務となっている。わが国では、九州地区の有明海や周防灘のような内湾性の海岸において、阿蘇をはじめとする火山系地層を流下する河川からの排出により、潟土(ガタ)と呼ばれる軟弱な泥土が広く分布堆積しているため、シルテーション問題を抱える港が多い。さらに最近では、輸送コスト削減のための船舶の大型化への要請の高まりを背景に、航路や泊地などの港湾施設は水深化の必要性に迫られており、シルテーション問題はさらに深刻化するものと考えられる。大水深港として早くから開発整備が進められている熊本港では、1992 年より航路や泊地を直立潜堤で囲むことによるシルテーション対策が取られ効果を上げてきた。この熊本港の実績を参考に、インドネシアの Semen Tuban 港でも大水深港整備のため同様の対策が、潜堤天端を熊本港の場合より高くすることで実施された。本研究では潜堤を高くした同港のシルテーション対策の効果を現地測深図に基づいて追跡すると共に、埋没防止機能の向上方策について底質特性試験および埋没過程の数値シミュレーションにより基礎的な考察を行うものである。

2. Semen Tuban 港のシルテーション対策

2.1 自然条件

Semen Tuban 港は、図一1に示すようにインドネシアの東ジャワ州のジャワ海に位置し、セメントの積出し港として、整備されてきた。この海域の沿岸部は、汀線域

から水深 5 m までは海底勾配 1/100 の比較的急勾配をなしており、それ以深は 1/500 の緩勾配をなしている。5 年確率の有義波高は 3.9 m、周期は 10 s で、潮位差は平均 1.46 m、潮流は 0.15 m/s 未満である。底質は大部分が中央粒径 0.05 mm 以下のシルトおよび粘土であり、高濃度浮泥層 (フルードマッド) の厚さは約 1 m にも及ぶことが観測されている。一般にジャワ海のように赤道無風帯と呼ばれる低緯度地域では、台風やサイクロン等の強風の発生は頻度が少ない。しかし、一方において、雨季に集中する降雨は、多量の微細な泥土を流下排出させ、沿岸部に堆積させる。このような海域に航路泊地が浚渫されると、比較的小規模の波によるじょう乱によってもシルテーション問題を引き起こすようになる。赤道から南北に遠ざかり高緯度地域に至ると、高波浪による影響を受けるようになる。このような場合は、きわめて多量の泥土を排出する揚子江、黄河河口域沿岸を除き、わが国の周防灘や有明海沿岸 (熊本港) に見られるように、シルテーション問題が重要となるのは内湾域に限られてくる。



図一1 Semen Tuban 港の位置

* 学生会員 工修 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
** 正 会 員 工博 九州大学教授 大学院工学研究院環境都市部門
*** 正 会 員 工修 九州大学助手 大学院工学研究院環境都市部門
**** 学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
***** 学生会員 工修 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

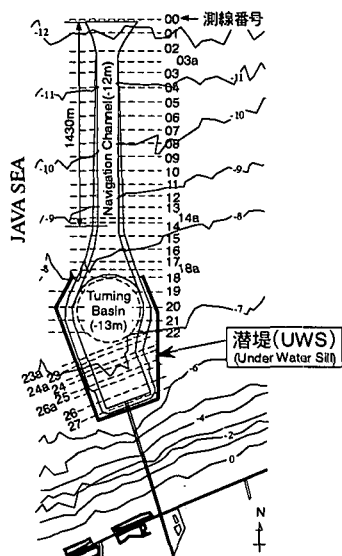


図-2 Semen Tuban 港のレイアウト

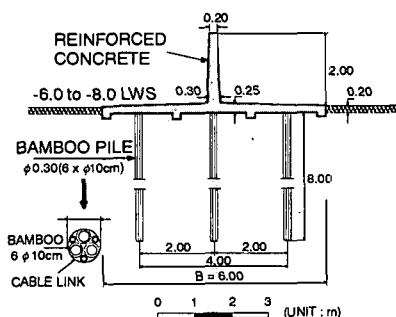


図-3 Under Water Sill (UWS) の形状

2.2 シルテーション対策施設 (UWS)

Semen Tuban 港では、輸送コストの節減のため、船舶の大型化が余儀なくされ、受け入れ船舶の規模を 10,000 DWT から 40,000 DWT に増大させるため、航路水深 12 m、泊地水深 13 m を確保する必要があった。特に泊地部は、浅海域に位置するため埋没が最も顕著な場所であり、浚渫してもすぐに埋没してしまうことが問題であった。この対策として、図-2 に示すように、浅海域の 13 m 泊地を取り囲むように、全長 2400 m のシルテーション対策用潜堤 (Under Water Sill; 以後 UWS) が設置された。UWS の諸元は、図-3 に示すように、高さ 2 m、長さ 6 m、底版の幅 6 m であり、軟弱な地盤条件に対応するため竹を 6 本組にした基礎により支持する構造になっている。

図-4 は、航路泊地浚渫後の深浅測量調査の時期を示すものである。最初の掘削浚渫は 1999 年 3 月から 1999 年 8 月にかけて実施され、その竣工直後、深浅測量 I (以

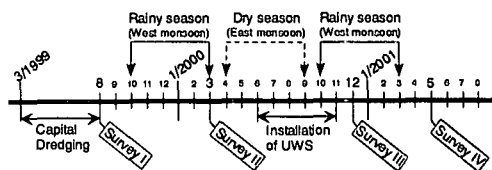


図-4 UWS の施工と深浅測量調査の実施時期

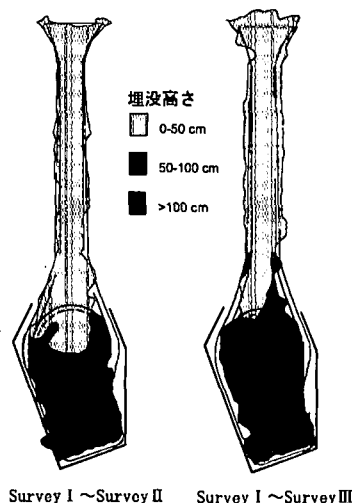


図-5 港内埋没量の平面分布

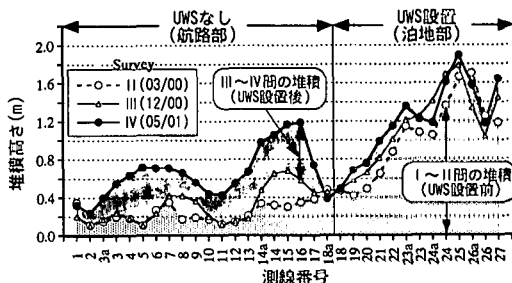


図-6 UWS 設置前後の埋没高さの比較

後 Survey I と呼ぶ) が行われた。引き続き雨季 (西モンスーン期) は、掘削された航路泊地は何らシルテーション対策が施されることなく経過した。そして 2000 年 3 月に第 2 回目の深浅測量 (Survey II) が実施された。引き続き海上の穏やかな乾季 (東モンスーン期) を利用して、すなわち 2000 年 6 月から 11 月にかけて、UWS が図-2 に示すように泊地部を取り囲んで設置された。2000 年 11 月に UWS の設置工事が竣工した直後の 2000 年 12 月に、第 3 回目の深浅測量 (Survey III) が実施された。その後、この港は雨季の影響下に入ったが、この雨季が終了した後の 2001 年 5 月に第 4 回目の深浅測量が実施された。図-5 は、Survey I から Survey II までの雨季にお

ける航路泊地埋没量の平面分布(図中左側), および Survey I から最後の Survey III までの間の埋没量平面分布を示したものである。これによると, 泊地の沖側の船回し場 (Turning Basin) にある程度の埋没が認められる。

図-6 は, 図-2 に示した航路泊地に沿う側線番号での埋没高さの累積値を, Survey I の測深図を基準として, Survey II, Survey III および Survey IV の結果を図示したものである。すなわち, Survey I (図の基線) から Survey II までの間の堆積高 (図中薄いハッチ) は, 最初の雨季における埋没によるものである。これより, 泊地における埋没量が著しく, また, 航路においてもかなりの埋没が生じている。一方, Survey II から Survey III の間の埋没高は, 引き続き乾季におけるもので, 航路, 泊地のどちらにおいても顕著な埋没は見られない。図-4 に示したように, UWS は, この時期に図-6 に示す泊地部に設置された。UWS 設置後に雨季を迎えた Survey III から Survey IV の間の埋没高 (図中濃いハッチの範囲) は, 航路部で顕著な埋没が見られるものの, UWS を設置した泊地部においては, 埋没高は著しく減少している。この結果より, UWS は浅海域のシルテーション防止にきわめて有効に働いたことがわかり, これがいかなる要因で説明できるのかを, 室内実験と数値シミュレーションにより考察を加えることにする。

3. シルテーション対策効果検証の試み

3.1 底質の沈降特性

シルテーションの主な原因となるのは, 底面付近に形成される高濃度浮泥層 (Fluid mud) であり, これはシルトや泥土などの微細粒子が沈降する過程で生じる。その沈降特性は底質の粘性や凝集性に起因して非常に複雑である。そこで, 本研究では, 表-1 に示す 8 種類の底質について沈降特性試験を行った。底質は, 市販のカオリナイト (ASP 600, 林化成(株)), 九州地区の熊本港, 中津港, 三池港周辺の採取泥, 及びインドネシアの Semen Tuban 港周辺とそこから 300 km 程度西の海岸での採取泥 (インドネシア泥) である。カオリナイト以外の底質

表-1 底質試料の粒度と密度

試料名	粒径 (mm)			密度 (g/cm ³)
	D ₆₀	D ₅₀	D ₃₀	
カオリナイト	0.00122	—	—	2.586
熊本泥 I	0.01188	0.00670	—	2.690
熊本泥 II	0.02813	0.01974	0.01974	2.723
中津泥 I	0.03112	0.02025	0.00304	2.723
中津泥 II	0.01132	0.00700	0.00225	2.702
三池泥	0.00450	0.00400	0.00250	2.679
インドネシア泥	0.00100	—	—	2.726
Semen Tuban 港泥	0.00418	0.00363	0.00255	2.746

※ D₆₀, D₅₀, D₃₀ は, 累加百分率 60, 50, 30% に対応する粒径

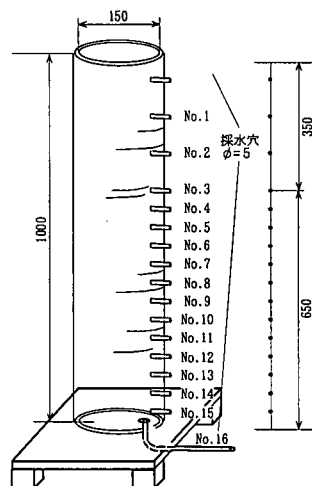


図-7 沈降試験用の大型シリンダ

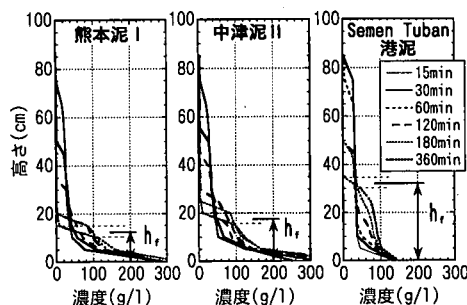


図-8 底質試料の粒度と密度

は, いずれもシルテーションが問題となる港湾周辺の泥土である。表-1 中には, これらの粒度試験と密度試験結果を示した。

沈降試験は, 以下の手順で行った。まず, 図-7 に示すような高さ 1 m, 直径 15 cm の大型シリンダ中に海水の密度 (1.025 g/cm³) に調整した塩水 (または真水) と試料を投入して十分攪拌した。このとき, 試料投入後の懸濁液の水面は底から 90 cm の高さになるよう調整した。その後, 一定時間静置した後に, 5 cm 間隔で設置した採水穴 (側面 15 箇所, 底面 1 箇所の計 16 箇所) より同時に採水し, その比重を密度比重計により測定して濃度に換算した。これを初期濃度が 10, 20, 40 g/l の 3 ケース, また, 静置時間を 15 分から 360 分の範囲で変化させた条件で行い, 各時刻の鉛直濃度分布を求めた。

図-8 は, 測定結果の一例として, 初期濃度 40 g/l の条件での鉛直濃度分布を熊本泥 I, 中津泥 II, Semen Tuban 港泥について示したものである。図より, 静置時間が短い初期の段階 (120 分後程度まで) では, 上層の方で初期濃度にほぼ等しい 40 g/l から 0 へと濃度が急激に減少する濃度界面が存在し, この界面が時間の経過と

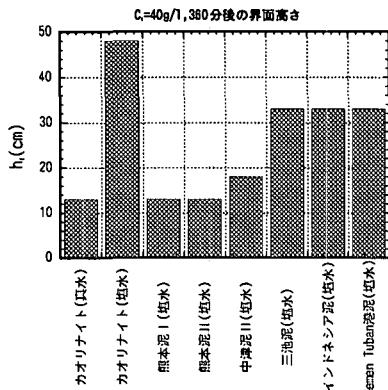


図-9 360 分後の高濃度浮泥厚の比較 (初期濃度 40 g/l)

ともに下がっている様子がわかる。しかし、界面が下降する速度や、最終的な底面近くの濃度分布は、底質によって違いが見られる。また、図中に示した h_f は、360 分後の濃度分布における界面高さであり、この高さを全ての底質について比較したものが図-9 である。図より、インドネシア泥、Semen Tuban 泥及び三池泥は、熊本泥や中津泥に比べて h_f が明らかに高くなっており、これら 3 つの底質はなかなか沈殿せずに Fluid mud の状態が長時間続くものと考えられ、これらの地域のシルテーション問題はより深刻であろうと予想される。

3.2 潜堤高の影響の室内実験と数値計算

潜堤による埋没防止は潜堤の高さ (h_s) と Fluid mud の厚さ (h_f) との関係が重要である。本研究では、これを明らかにするための実験と数値シミュレーションを行った。

a) 実験方法の概要

実験は、図-10 に示すような水槽を用いて行った。この水槽は、幅が 20 cm と薄くしてあり、Fluid mud の流動状況をよく観察できるよう工夫されたものである。水槽の中央付近には航路を模した落込み部があり、また、一方向流れを発生させるポンプが設置されている。実験では、水槽中央に潜堤模型を設置し、その片側にフルードマッドを形成させた条件を初期状態とし、その後ポンプにより流れを発生させ (流れの向きは図中右から左)、潜堤上を浮泥が越流する条件を再現した。実験条件は、航路部以外の水深は 40 cm、Fluid mud の厚さ h_f は 7 cm、流れは断面平均流速 5 cm/s とし、潜堤高 h_s は 10 cm と 20 cm の 2 種類とした。また、Fluid mud は、底質にカオリナイトを用い、図-10 中の Gate A と B を締め切った状態で濃度が 20 g/l になるよう攪拌し、しばらく自由沈降させた後に静かに Gate A, B を引き上げて、潜堤から泥止めの間に一様に Fluid mud を分布させた。

b) 数値計算方法の概要

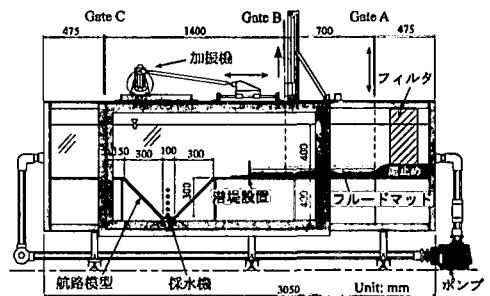


図-10 Fluid mud 流動観察用実験水槽 (Slim-tank)

数値計算は、著者ら (2001) の密度流の計算モデルを基にし、上で述べた実験と同じ条件の計算を行った。基礎式は、以下のような連続の式 (式 (1)), (1)'), 運動方程式 (式 (2)), 濃度の拡散式 (式 (3)), 状態方程式 (式 (4)) の 4 式である。これらを、鉛直 2 次元の多層モデルとして差分化し時間発展的に解いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz = 0 \quad (\text{水面}) \quad (1)$$

$$w + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{z_k} u dz = 0 \quad (\text{水中}) \quad (1)'$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (uu)}{\partial x} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ - \frac{g n}{h^{1/3}} |u| \frac{\partial h}{\partial x} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_k}^{\eta} \rho dz \quad \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (cu)}{\partial x} + \frac{\partial (cw)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + cw_f \quad \dots (3) \end{aligned}$$

$$\rho = \rho_w + \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_s} c \quad (4)$$

ここで、 t は時間、 x, z は水平・鉛直方向の座標、 h は水深、 η は水面変位、 u, w は水平・鉛直流速、 c は濃度、 ρ は密度、 ρ_s は土粒子密度、 ρ_w は水の密度である。また、 N_x, N_z は水平・鉛直方向の粘性係数、 K_x, K_z は水平・鉛直方向の拡散係数で、これらは密度成層の効果を取り入れるためリチャードソン数の関数として与えた。計算は、実験と全く同じ条件を対象とし、側方境界には対数分布則を仮定した流速分布を境界条件として与えた。

c) 結果と考察

図-11 は、実験における Fluid mud の流動状況を示したものである。図中、左側が潜堤高 10 cm、右側が 20 cm の場合で、それぞれ流れを作用させてから 15 秒後と 30 秒後の写真である。これらの写真で白い部分がカオリナイトにより作られたフルードマッドである。ともに、右

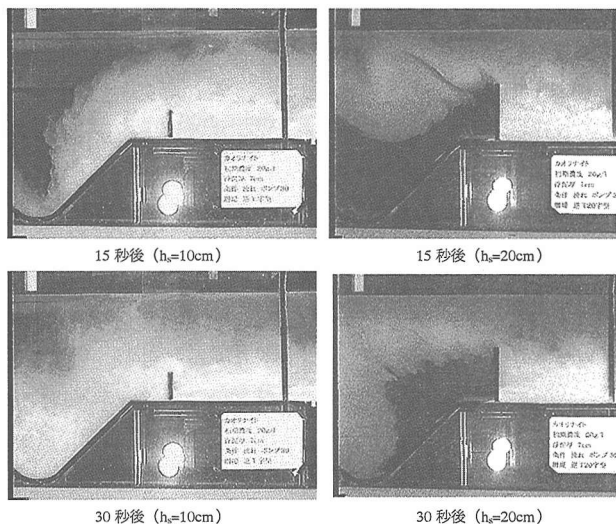


図-11 潜堤高が異なる場合の Fluid mud の流動状況の比較

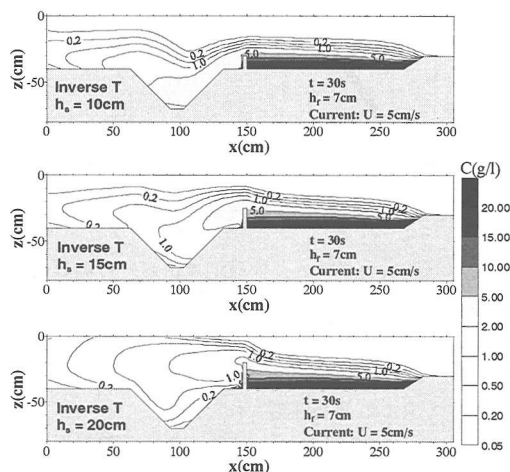


図-12 Fluid mud 流動状況の再現計算結果 (30 s 後)

から左へ向かう流れにより Fluid mud が潜堤上を乗り越えて航路の落込み部へと侵入している様子が撮影されている。しかし、潜堤高が 10 cm の場合には潜堤上を越流した浮泥は航路の斜面に沿って流下しているのに対し、潜堤高が 20 cm の場合には濃度が薄い浮泥が上層部を通過していることがわかる。シルトのような微細粒子の沈降特性は、濃度が 2 g/l 以下の条件では、濃度が薄いほど沈降速度は遅くなることが知られている。そのため、潜堤高が高くなると、潜堤上を越流する浮泥量自体が少なくなること、潜堤の下流側は縮流の効果により上層の

流速が速くなること、また潜堤直上の流速が速くなることにより潜堤下流側の後流渦の規模が大きくなり浮泥を攪拌する効果がさらに高まることなどの理由により、航路への埋没阻止能力はますます高まるものと考えられる。

図-12 は実験と同じ条件をシミュレーションした結果の一例であり、上から潜堤高が 10 cm, 15 cm, 20 cm の場合について、流動開始後 30 秒後の濃度のコンター図を示した。実験の場合と同様に、 h_b の高い方が航路側に流入する量が少なく航路へ堆積しにくくなることが再現されている。Semen Tuban 港の UWS は、熊本港の逆 T 型潜堤よりも高く (Tuban 港 = 2 m, 熊本港 = 1~1.5 m), このことが、シルテーションの激しい条件であるにもかかわらず、Semen Tuban 港の埋没対策が効果的に機能した理由の一つと考えられる。

4. ま と め

熊本港で最初に開発された潜堤方式のシルテーション対策工法がインドネシアの Semen Tuban 港に適用された。埋没対策施設の設置前後の深淺調査資料を検証し、その有効性が確認された。種々の港湾における底泥の沈降特性の比較試験を行ったところ、インドネシア泥が高濃度浮泥層の持続時間が長く、シルテーション問題がより深刻なことが予想された。そこで、潜堤の天端高を高くすることの効果について数値計算と水理実験で調べ、潜堤高が高いほど、埋没阻止効果が高まることが確認された。

謝辞：本研究の遂行にあたり、国土交通省九州地方整備局から熊本港をはじめ九州地区港湾の底泥試料等をご提供いただいた。ここに記して感謝の意を表します。また、Semen Tuban 港は、熊本港の前例にならって計画施工されたが、シルテーション対策に関する貴重な実績データを惜しむことなくご提供くださった、Mrs. Endah Dwi Astuti, Research and Development Director of PT SEMEN GRESIK (PERSERO) Tbk., Indonesia, and Mr. Suyitno, Surabaya Branch Manager of Wiratman & Associates, Indonesia に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- Hidayat, Rahman・入江 功・森本剣太郎・小野信幸 (2001): アジア地域の港湾におけるシルテーション対策とフルードマッド, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1406-1410.