

水中落下土砂の底泥地盤へのめり込み・貫入の定式化

五 明 美 智 男*・三 村 信 男**

非常に軟らかい底泥上に 20～50 cm の砂を撒く覆砂工法の実績が増え、効果などの調査結果が報告されている。しかしながら、投入時の衝撃などによって生じる底泥への砂のめり込み・貫入については、経験的な判断と実績に頼っているのが実状である。本研究では、底泥のせん断強度を指標として、衝突時の運動量保持率という新たな概念と Newton の衝突理論を基礎に、底泥へのめり込み・貫入理論の定式化を試みた。そして、水理実験により運動量保持率の推定と評価式の提案を行った上で、実工事へ適用した。その結果、覆砂の場合には運動量保持率がほぼ 1 となり、提案式によりめり込み・貫入限界が良く評価できることが明らかとなった。

1. はじめに

閉鎖性水域の底質改善法の 1 つである覆砂工法については、1980 年代より多くの試験研究が実施され、各地で実績が蓄積されるとともに最近では施工後の環境改善効果や生物回復効果などについて報告がなされている（堀江ら, 1996）。しかしながら、非常に軟らかい底泥上に薄層（20～50 cm）の砂を散布するため、対象となる底泥の強度特性と選択される投入方法によっては、着底時の衝撃や支持力不足による底泥内への砂のめり込み・貫入が懸念される。したがって、良質な砂層を形成し適切な土量管理を行うためには、めり込み・貫入を定量的に評価することが大変重要な課題となるが、経験的判断と実績にもとづいて特殊散布装置などを用いた工法が適宜選定されてきているのが実状である。特に、軟らかい底泥の強度特性を考慮した設計法や施工法あるいは施工管理について検討したような研究報告例はほとんどない。

以上のような背景から、本研究は、水中を自由落下した土砂の底泥への衝突、めり込み・貫入の定式化および評価手法の提案を目的として実施したものである。特に、今まで覆砂工事では測定されたことがなく、設計でも考慮されていなかった底泥のせん断強度を指標としている点が大きな特徴である。

2. 覆砂時のめり込み・貫入例

表一1 は、所定の覆砂厚を目標として施工した際の施工後の砂厚測定例を示したものである（干山, 1998）。これより、 $\pm 10 \sim 20$ cm 程度の精度での施工が可能であることやめり込み厚が 2～10 cm となることがわかる。しかしながら、視点を変えれば、表一2 に示すような考察が可能である。すなわち、目標厚さに対するめり込み厚には 3～50% と大きなばらつきが見られる。実際の覆砂厚さとめり込み厚との間に比例関係が成り立たないことか

表一1 施工方法と施工精度（干山, 1998）

施工場所	広島湾 1	広島湾 2	三重五ヶ所湾
施工範囲	19000 m ²	49000 m ²	105000 m ²
目標覆砂厚	50 cm	35 cm	20 cm
施工方法	コンベヤー バージ	バージアン ローダー	バージアン ローダー
施工精度	30～70 cm (± 20 cm)	20～50 cm (± 15 m)	15～30 cm (± 10 cm)
めり込み厚 (平均値)	1.7 cm	4.6 cm	10.1 cm
使用材料	海砂		

表一2 施工精度、めり込み厚と目標覆砂厚の関係

施工場所	広島湾 1	広島湾 2	三重五ヶ所湾
施工精度/ 目標覆砂厚	$\pm 40\%$	$\pm 42\%$	$\pm 50\%$
めり込み厚/ 目標覆砂厚	3.4%	13%	50.5%

ら、その原因は、投入方法と底泥の強度との相対的な関係によるものと推測される。

3. めり込み・貫入現象の定式化

（1）覆砂時の土砂の水中落下特性

最初に、類似の土砂投入方法との比較から、覆砂工法における土砂の水中落下、衝突形態の特徴について整理する。一般に、土砂塊の落下形態は、土砂投入方法および土砂性状、水深等の投入条件などに支配される。玉井ら（1995）によれば、点源から瞬間投入された土砂群は、土砂粒径と投入量に依存して単粒子沈降から土砂群までの落下特性を示すことが報告されている。覆砂工法では、均一かつ衝撃を少なくする目的で特殊散布装置が多用される場合が多く、この装置内で土砂が分散することにより、土粒子は単粒子沈降に近い状態で落下するものと考えられる。

（2）水中落下土砂による衝撃に関する既往知見

めり込み・貫入を衝撃問題としてとらえ、土木分野における類似現象とその解析方法を整理したものが表一3

* 正会員 博(工) 東亜建設工業株式会社技術研究所

** 正会員 工 博 茨城大学 教授 広域水圏環境科学教育研究センター

表-3 類似衝撃現象の分類と解析方法

現象	衝撃区分	Newton の理論	Hertz の理論	流体
雪崩	soft to hard			○
土石流 (泥質)	soft to hard			○
土石流 (礫)	hard to hard		○	
落石 (対覆工)	hard to hard		○	
杭打設	hard to hard	○		
覆砂 (砂粒子)	hard to soft	◎		

である。表中の衝撃区分は、土木学会 (1998) を参考にし、衝突体、被衝突体の変形と相対的な硬軟をもとに分類したものであるが、従来、被衝突体として軟らかいものを対象とした研究はほとんどない。

水中を落下した土砂が非常に軟らかい底泥に衝突する現象については、2つの形態を考えることができる。第1の形態は、土粒子1個に注目したもので、衝突時には変形のない土粒子と軟らかい底泥との間での衝突が生じ、全体としてはこうした単一砂粒子の衝突の重ねあわせと考えるものである。特に、浮泥が堆積し大きな土粒子が衝突するような場合には、土粒子が単独で底泥中にめり込んだり貫入したりするような現象が見られるものと推測される。第2の形態は、土砂塊全体を衝突体と考え、衝突時に底泥地盤の変形とともに土砂塊の変形が伴うと考えるものである。本研究では、表-3に示すように前者の立場を取り Newton の衝突理論を基礎にめり込み・貫入理論を導くことにする (表中、◎)。

(3) 運動量保持率 α の導入

簡単のため、単一の落下球体を対象とする。球体が底泥に衝突し、その後静止するまでを2つの区間 (衝突中: $0 \sim \Delta t$, 衝突後: $\Delta t \sim t$) に分け、それぞれの区間での変形量を δ_0 , δ' とする (図-1)。このとき、系の全運動量については、一定かつ衝突前の球体が持つ運動量に等しく、衝突中は運動量保存則により運動量の交換がなされる。衝突後には、球体および地盤の運動量に配分され、衝突後の球体は底泥の粘着力が摩擦力として卓越する場で沈降して静止ものとして、現象を定式化する。

運動量保存則を衝突前の球体の持つ運動量で正規化すれば (1) 式となる。

$$\alpha + \beta = 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = \frac{m_1 v_{1f}}{m_1 v_{1i}} = \frac{m_1 v_{1f}}{m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta = \frac{m_2 v_{2f}}{m_1 v_{1i}} = 1 - \alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 m : 質量, v : 速度, 添字 1, 2: 球体および底泥, 添字 i, f : 衝突開始時刻 t_i , 衝突終了時刻 t_f を示す。また、 α, β は衝突前の球体運動量に対する衝突後の球体運

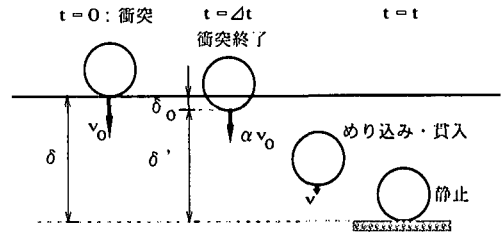


図-1 球体の貫入・めり込みのモデル化

表-4 α の推定例 (落下高さ 1 m)

	0.1 m 厚 コンクリート版	0.1 m 厚 自然石	備考
鋼球 (大)	-0.43	-0.82	$d=22 \text{ mm}$, $m=32.58 \text{ g}$, 比重 7.778
鋼球 (小)	-0.48	-0.85	$d=11 \text{ mm}$, $m=5.41 \text{ g}$, 比重 7.778
木球	-0.47	-0.48	$d=20.32 \text{ mm}$, $m=2.68 \text{ g}$, 比重 0.583
自然石 (花崗岩)	-0.43	-0.73	平均径 17.63 mm, $m=7.37 \text{ g}$, 比重 2.569
備考	強度 60~180	強度 740	単位: kg/cm^3

動量、底泥運動量の比として、それぞれ運動量保持率、運動量転移率と定義する。表-4 は、試みに三上 (1984) が示した落石のはねかえり高の報告例から、 $v = \sqrt{2gH}$ (H は落下高およびはね上がり高) により衝突前後の速度を求め、運動量保持率を推定したものである。表-3 に示した衝撃区分によれば hard to hard の衝突となって跳ね返ることから α はマイナスとなるとともに、球体自体の変形が考えられる木球を除けば、地盤の強度が大きいほど保持率が小さくなる傾向がある。

また、 α と図-1 に示しためり込み・貫入状況との関係は以下のように整理される。すなわち、 $\alpha=0$ の場合には、衝突時の底泥表面の変形または破壊が最大となり、その変形跡に球体が落ち込む ($\delta = \delta_0$)。 $0 < \alpha < 1$ では、衝突時の変形と球体のめり込み・貫入による変位が複合して見られる ($\delta = \delta_0 + \delta'$)。さらに、 $\alpha=1$ の場合には、衝突時の変形はほとんど生じることなく、球体のめり込み・貫入変位のみが見られる ($\delta = \delta'$)。

(4) 衝突後の球体の運動

次に、衝突後に底泥内へめり込み・貫入する球体に作用する摩擦力が底泥の粘着力 c とめり込み量 δ' に比例するものと仮定すれば、衝突後にめり込み・貫入する球体に働く抵抗力 F は (4) 式で与えられる。

$$F(t) = kc\delta' \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 k : 比例定数である。静止するまでの時間を t とすれば、 $\delta' = \int_0^t v dt$ となることから、球体の運動方程式、加速度 a は以下ようになる。

$$m_1 a = F \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$a = \frac{F}{m_1} = \frac{k}{m_1} c \delta' = \frac{k}{m_1} c \int_0^t v dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

さらに、球体が底泥に衝突するときの速度を v_0 とすれば、衝突後めり込み・貫入開始時の初期速度は αv_0 となることから、(6) 式を $v = \alpha v_0 - \int_0^t a dt$ に代入することにより、

$$v = -\frac{m_1}{kc} \frac{d^2 v}{dt^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。これを解いて、貫入中の速度、静止までの時間 t および変形量 δ' は、それぞれ

$$v = \alpha v_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{\frac{kc}{m_1}} t\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m_1}{kc}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\delta' = \sqrt{\frac{m_1}{kc}} \alpha v_0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる。

4. めり込み・貫入実験

砂粒子よりも大きな球体を用い、水中および空中でのめり込み・貫入実験を実施し、3. で誘導した理論の妥当性を確認するとともに、 α の推定、めり込み・貫入の評価式導出を試みた。

(1) 実験方法

海水を用い所定の強度に調整した東京湾浚渫泥を2つの円形水槽(空中落下実験: 直径20 cm, 高さ20 cmの鉄製容器, 水中実験: 直径80 cm, 高さ80 cmの亚克力製水槽)に敷設した後、球体を落下させ衝突後のめり込み・貫入量をポイントゲージで計測した。主要な実験条件を表-5に示す。なお、底泥の粘着力については、五明・三村(1992)と同様ベーンせん断強度で代表させ、トルク1 kgのハンドベーン(羽根寸法: 4 cm×2 cm および3 cm×1.5 cm)を用い測定した。

表-5 実験条件

ベーンせん断強度 (Pa)	110~550
落下球体径 (cm)	0.83~13
落下球体質量 (g)	0.76~66.71
空中落下高さ (cm)	1, 2.5, 5, 10
水中落下高さ (cm)	60

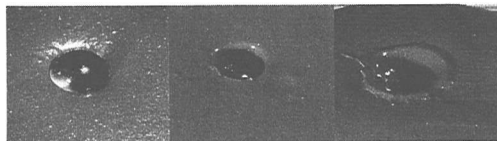


写真-1 めり込み・貫入跡

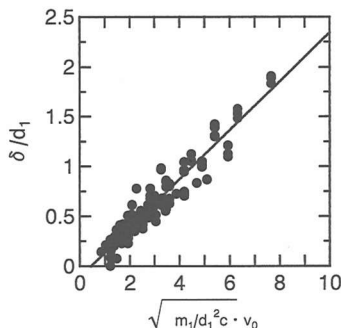


図-2 めり込み・貫入量

(2) めり込み・貫入状況

写真-1は、めり込み・貫入状況の一例を示したものである。落下球体の粒径 d_1 の1/2程度のめり込みが見られる場合、球体に接触する底泥面の引き連れあるいは盛り上がりが見られる。一方、粒径の2倍程度のめり込み・貫入が見られる場合には、めり込み・貫入跡とともに周囲の盛り上がりやはね上がり跡が確認される。

(3) α の推定

図-2は、(10)式において球径 d_1 で無次元化した指標を用いて、実験結果を整理したものである。ただし、この段階では運動量保持率 α が未定なので、 $\alpha=1$ として衝突直前の速度 v_0 を用いている。図からわかるように、データのまとまりが良く、次式のような線形の関係が得られる。

$$\frac{\delta}{d_1} = 0.2448 \sqrt{\frac{m_1}{d_1^2 c}} v_0 - 0.1107 \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、 δ/d_1 が小さい領域でばらつきが少ないことから、こうした範囲でも α は比較的1に近い値となるものと推定される。また、ベーンせん断強度が大きいときには衝撃的な荷重作用に対し弾性的な応答を示すことから、原点を通過しない直線となっている。

(11)式において左辺の δ をゼロとした場合は、運動量保持率 $\alpha=0$ の場合に相当し、また $c=0$ で $\alpha=1$ となるものと仮定することにより次式が得られる。

$$\frac{cd_1^2}{v_0^2 m_1} = 4.895 : \alpha=0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{cd_1^2}{v_0^2 m_1} = 0 : \alpha=1 \quad \dots\dots\dots (13)$$

これら2式を用い、 α と $cd_1^2/v_0 m_1$ の関係が線形であると仮定すれば、次式により任意の c および v_0 に対する α を算定することができる。

$$\alpha = 1 - \frac{1}{4.895} \frac{cd_1^2}{v_0^2 m_1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

そこで、実験値より軟らかい底泥に球体が衝突する場

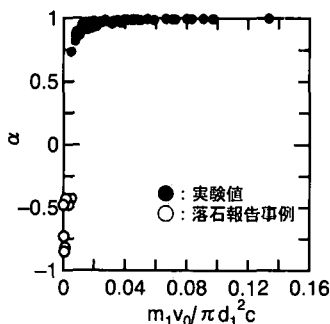


図-3 運動量保持率の推定値

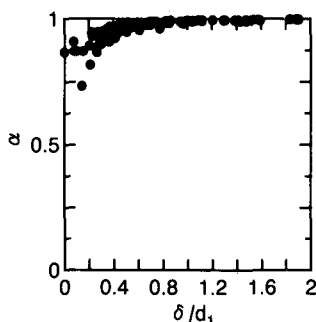
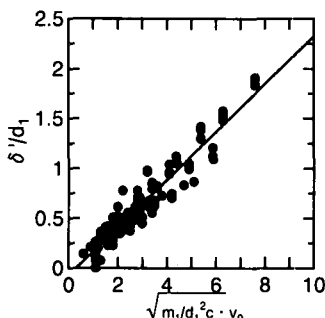
図-4 δ/d_1 と α の関係

図-5 運動量保持率により補正した底泥へのめり込み・貫入量

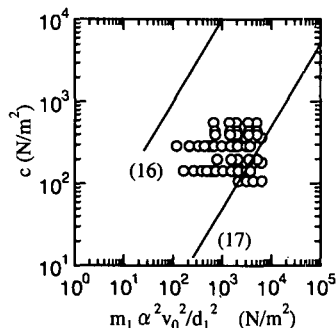


図-6 めり込み・貫入限界の推定結果

合の運動量保持率 α を推定した。図-3 は、 α が衝突時の表面の抵抗力と運動量とに依存するものと考え、慣性力と粘性力の比を表す $mv/\pi d^2 c$ と α の関係を示したものである。また、図-4 は、 δ/d_1 と α の関係を示したものであり、 $\delta/d_1 \geq 1$ の範囲では $\alpha=1$ となっていることがわかる。このように、運動量の大部分が保持されていることが確認されたことから、以下の解析においては $\delta=\delta'(\delta_0=0)$ と考えることにする。

(4) めり込み・貫入量の推定

図-5 は推定した α から衝突時の速度を算出し、 $\delta \rightarrow \delta'$ として式 (10) の関係を改めて求めたものである。これより、次の関係式が得られる。

$$\frac{\delta'}{d_1} = 0.2398 \sqrt{\frac{m_1}{d_1^2 c}} \alpha v_0 - 0.0755 \dots (15)$$

また、 $\delta'/d_1=0, 1$ となる条件を求め、 c について変形すれば、

$$c = 10 \frac{m_1 \alpha^2 v_0^2}{d_1^2} : \frac{\delta'}{d_1} = 0 \dots (16)$$

$$c = \frac{1}{20} \frac{m_1 \alpha^2 v_0^2}{d_1^2} : \frac{\delta'}{d_1} = 1 \dots (17)$$

となる。図-6 は、(16)、(17) 式と実験結果をあわせて示したものである。一般に自由沈降する球体については、終端速度を容易に求めることができることから、これらの式を用いて、めり込み限界を求めることが可能である。

5. 実工事への適用

(1) 工事・調査概要

琵琶湖南湖、松島湾五大堂前における覆砂工事は、それぞれ 1992 年 1～3 月、1993 年 6～8 月に実施された。琵琶湖では、陸上に仮置きした砂を水と攪拌してポンプで圧送して、台船上に装備した特殊散布装置で投入する方法を採用した。一回の撒き出し厚を 5 cm とし、スイング方式で施工した。一方、松島湾での覆砂域は遊覧船の往来が激しいため、スパット式バックホウ (2 m³) による方法で施工した。ただし、投入位置・量の管理、衝撃圧の緩和、均一散布を可能にするために、鉄筋メッシュ ($D=13$, 10 cm ピッチ) を受枠 (7.5 m $\times$ 7.5 m) 上に取付けたメッシュ付き投入枠を併用した (詳細は五明ら、1994 を参照)。

(2) 底泥のせん断強度

覆砂工事の実施に先立ち、アクリル製パイプ (内径 100 mm, 長さ 1000 mm) により柱状試料を採取し、ペーン試験などを行った。液性限界で正規化された表層の含水比は、琵琶湖で 1.5 強、松島湾で 2 を超える値となっており、前者ではほぼ自重圧密が始まる含水比にまで低下しているのに対し、後者では浮泥の堆積が顕著となっていた。

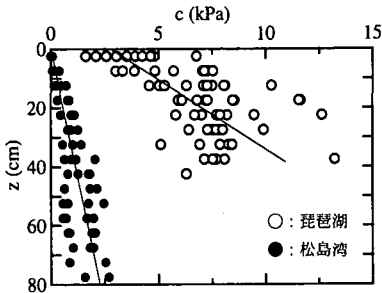


図-7 琵琶湖、松島湾のペーンせん断強度鉛直分布

表-6 単一砂粒子のめり込み・貫入限界強度

項目	琵琶湖	松島湾
粒径 d_{90} (cm)	0.3	0.15
沈降速度 (cm/s)	25.0	17.7
めり込み・貫入=0のせん断強度 (Pa)	260	65
現地表層のせん断強度 (Pa)	5000	0~500
サンプリング調査による混合厚 (cm)	0	5~10

図-7はペーンせん断試験により得られた強度 c の鉛直分布を示したものである。強度は泥深とともに増大するが、松島湾底泥の c は琵琶湖のその 1/5 以下に過ぎず、大きな違いが認められる。

(3) 底泥変形量と工法の評価

4.で展開した単一球体のめり込み・貫入限界の式 (16) を用いて、実際の覆砂材について検討する。沈降時にある程度の分級が生じるものと考え、対象土粒子としては、衝突に有効な代表粒径を考慮して粒径加積曲線で 90% 通過となる d_{90} を用い、平衡に達した際の自由沈降速度を算出した。表-6は、両事例について、めり込み・貫入量がゼロとなるせん断強度と実測の表層強度を比較したものである。琵琶湖では、砂粒子単独でのめり込み・貫入が生じないことが明らかであるが、松島湾ではめり込み・貫入が発生することが予想される。実際、松島湾での砂層と底泥層の境界では混合層が発生しており、こうした推定結果とよく一致している。また、水搬後シャワー状に散布した琵琶湖事例では、衝突時にはほぼ自由沈降の状態になっているものと推定されるのに対し、バック

ホウで投入した松島湾事例では団塊状に落下した可能性がある。底泥の強度特性、支持力特性からすると、松島湾事例においては、もう少し分散させ自由落下に近い状態で投入する必要があったものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、質点の衝突理論を拡張して導いためり込み・貫入理論にもとづき、運動量保持率 $\alpha > 0$ の条件で実験を実施し、せん断強度、衝突速度および運動量保持率によって貫入・めり込み限界を推定する実験式を求めた。さらに、これらの結果を琵琶湖、松島湾での覆砂工事に適用し、実際に見られためり込み現象の評価を行った。本研究で拡張した衝突理論においては、底泥が非常に軟らかいことに着目し、結果的に運動量保持率がほぼ 1 に等しい領域の現象を対象とすることとなった。運動量保持率が 1 より小さくなるものと考えられる砂地盤や固い粘性土地盤、改良地盤等への衝突の場合についての検討は、今後の課題としたい。

謝辞：本研究の実施にあたり、底泥について地盤工学の視点から様々なご助言をいただきました茨城大学都市システム工学科地盤工学研究室安原一哉教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 五明美智男・三村信男 (1992): 現地不攪乱底泥の強度特性について, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 501-505.
- 五明美智男・雨貝信治・半沢秀郎 (1994): 底泥のせん断強度と覆砂厚の評価, 第 1 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 109-114.
- 五明美智男 (2001): 衝撃現象を考慮した覆砂工法の調査設計施工法に関する研究, 茨城大学学位論文, p. 162.
- 玉井昌宏・村岡弘爾・室田 明 (1995): 固体粒子群の落下挙動と誘起流動に関する研究, 土木学会論文集, No. 509, pp. 143-154.
- 土木学会 (1998): ロックシェッドの耐衝撃設計, 構造工学シリーズ 8, 丸善, p. 270.
- 干山善幸 (1998): 底質改良技術, 沿岸の環境圏, フジテクノシステム, pp. 1147-1158.
- 堀江 毅・井上聡史・村上和男・細川恭史 (1996): 三河湾での覆砂による底質浄化の環境に及ぼす効果の現地実験, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp. 225-235.
- 三上善蔵 (1984): 落石防止防護工法, 理工図書, p. 243.