

【研究報告】

海面埋立を想定した模擬廃棄物が底面粘土層に及ぼす影響評価

Evaluation of the effects of dumped simulated wastes on seabed clay layer assuming coastal landfill

永岡修一^{*}、大野博之^{**}、八村智明^{*}、宮原哲也^{*}、松本謙二^{*}、大渡俊典^{***}、飛田靖之^{****}、富田洋平^{****}Shuichi NAGAOKA^{*}, Hiroyuki OHNO^{**}, Tomoaki HACHIMURA^{*}, Tetsuya MIYAHARA^{*},Kenji MATSUMOTO^{*}, Toshinori OHWATARI^{***}, Yasuyuki HIDA^{****} and Youhei TOMITA^{****}

【要約】 廃棄物の海面最終処分場では、埋立区域の底面遮水層として在来地盤の沖積粘土層が利用されている。廃棄物を埋立投入する上で、この底面遮水層となる沖積粘土層への廃棄物のめり込みなどといった、遮水機能への影響が懸念される。しかし、そういった影響に関する調査研究事例は少ないのが現状である。そこで筆者らは、模擬廃棄物の沈降現象を室内・現場実験等で捉えてきた。それらの結果から、投入物の沈降現象における終端速度を把握することができたが、投入物それぞれの終端速度と底面遮水層への影響を明らかにするため、投入物の底面へのめり込みと、その対応策について検討した。

その結果、めり込み等による底面影響を防ぐには、細粒な廃棄物などの緩衝材の事前敷設、あるいは浮泥などの利用が有効であることが実験的に示された。また海底面への衝撃は、空中を落下する石などの衝撃と類似しており、ヘルツの理論である程度推察できることが明らかとなった。

キーワード：海面最終処分場、薄層埋立工法、遮水層、沈降現象

1. はじめに

大都市近郊では最終処分場の残余容量が逼迫し、さらに、内陸に最終処分場を確保することが困難となっていることから、内陸の処分場に比べて埋立容量を大きくとれる海面最終処分場が設置されることが多くなってきている。

こうした廃棄物の海面埋立を行う上で、底面への影響などが問題となる。海面最終処分場の場合、大都市近郊の港湾区域内に設置される場合が多く、また都市は沖積平野に立地している場合が多いという地理的要因もあり、海面最終処分場の遮水層として自然堆積地盤である沖積粘土層をそのまま用いる場合が考えられる。最終処分場の構造基準では、「不透水性地層（厚さ5m以上、透水係数が100nm/秒（ $=1 \times 10^{-5}$ cm/秒）以下の地層若しくはルジオン値1以下の岩盤又はこれと同等以上の遮水

の効力を有する地層）」であれば、遮水シートなどの遮水工を必要としないことから、これら沖積粘土層を底面遮水層としている。しかしこの場合、投入された廃棄物により遮水層が損傷することに伴う遮水機能の低下や、5m以上という遮水層厚の規定値を満足出来ないことなどが無いような工夫が必要である。埋立当初における浮棧橋からの廃棄物の薄層埋立は、その工夫の一つであると言えるが、その具体的な方法についての考え方や指針が十分には示されていない。海面最終処分場においては、沖積粘土層が遮水工と同等のものとして用いられているので、遮水シート同様に保護する必要が生じる可能性があり、また使用前検査時においても表面遮水工の遮水性能は検査チェック項目とされているが、水中での廃棄物の沈降現象や海底面への着底に関する研究は、古賀¹⁾などによって取り組まれてきたものの、その数は少ないのが現状である。

そこで筆者らはまず、廃棄物を模擬した砂及び礫を主体とした粒子群の水中における落下挙動、及び底面への衝撃に寄与する沈降速度について、数kgオーダーの投入量とした室内投入実験、及び数トンオーダーの投入量とした現場スケールの投入実験を実施し、以下のような知見を得ている。

* (財) 日本環境衛生センター西日本支局企画事業部

Dept. of Project Promoting, West Branch Office, JESC

** (財) 日本環境衛生センター東日本支局環境科学部

Dept. of Environmental Science, East Branch Office, JESC

*** (財) 日本環境衛生センター西日本支局環境科学部

Dept. of Environmental Science, West Branch Office, JESC

****(財) 愛知臨海環境整備センター

Aichi Seaside Environment Center

- ① 物質の液体中の沈降を考える場合、レイノルズ数が最も重要であり、水理学的な相似則の成立にはレイノルズ数がほぼ同じであることが必要であるが、投入実験におけるレイノルズ数は図1に示すように、礫と砂で区別した場合、実験のスケールによらずほぼ同じであり、統計的にも有意な差が無いことが分かった。これは、室内実験と現場実験がスケール則の成り立つ同一の現象と捉えられることを示している。

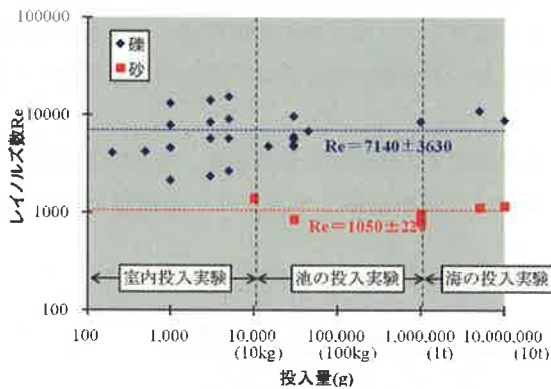


図1 室内及び現場投入実験におけるレイノルズ数と投入量の関係

- ② 砂と礫を分けて考えた場合、また実験スケールを分けて考えた場合、底面に着底する直前の沈降速度 (以下、着底直前速度と称す) の平均値の差に統計的な有意差はない (図2)。

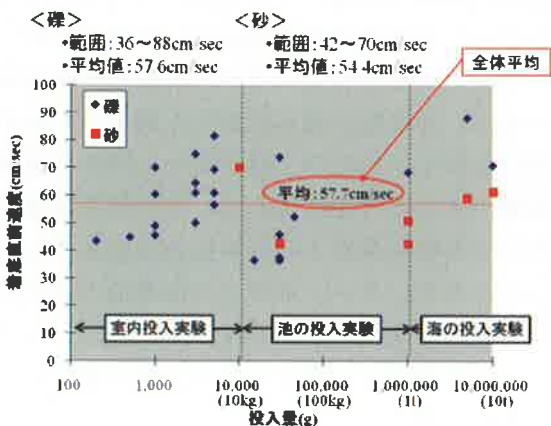


図2 着底直前速度と投入量の関係

- ③ 現場スケールにおける投入実験において、投入廃棄物の沈降・拡散現象の観察には、図3に示すような、サイドスキャンソナーによる音波探査手法を用いている。このソナーの定点観測から、時間経過の軸に沿った水中沈降

現象などの変化を、またソナーを移動させることにより、海底の底面地形が把握できる。このため、海面最終処分場の埋立管理においては、海面下に埋め立てた廃棄物の堆積状況をソナーで監視することにより、より安全で合理的な埋め立てが可能であり、廃棄物投入の管理・監視法としてもソナーが有効な道具になり得ると考えられる。

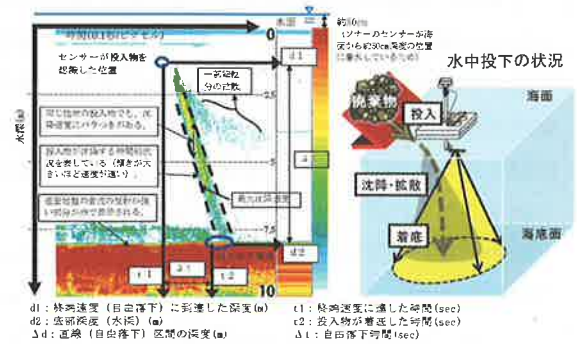


図3 定点観測の場合の音波探査による水中降下物の捉え方

- ④ 図4に示すように、礫のような単体になりやすいものは、着水後早期に沈降速度が終端速度 (沈降過程において抵抗と重力が釣り合っ等速運動する際の沈降速度) へと至るため、単一粒子の沈降速度式であるニュートンの式である程度表現し得るが、砂のように塊になりやすいものは、ニュートンの式によらないことが分かった。

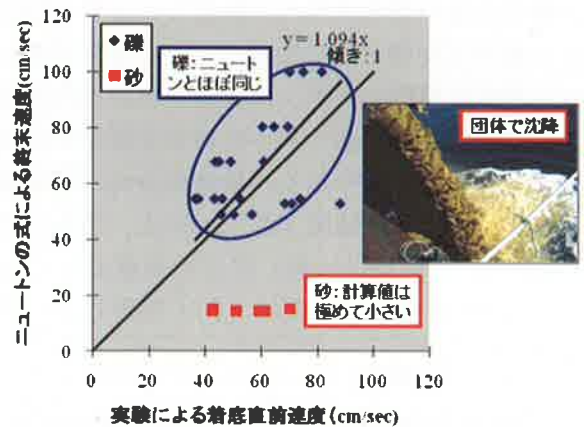


図4 ニュートンの式による終端速度と実験による着底直前速度の関係

以上より、砂や礫程度の粒径を有する廃棄物の沈降挙動については、ある程度把握することが出

来た。次に必要な取り組みとしては、砂や礫のような多粒子で構成された廃棄物、また、より大型の固形廃棄物などが海面投入された場合の底面遮水層への影響を捉え、その影響を極力緩和し、遮水性を担保し得る対策を見出すことが考えられる。

陸上における落石対策の分野では、古くからロックシェッドなどの構造物への影響や、衝撃力の緩和の方策について、落石対策便覧^{2),3)}に示されるように、各種の実験的、理論的、また数値解析的な検討がなされ、衝撃に対する緩衝材として敷砂などを考え、その応力拡散によりロックシェッドなどの部材への衝撃力の直接の作用を緩和させる方法について、従来から検討されている。

水中の落下物については落石対策便覧でも検討されておらず、新たな検討が必要な状況にあるが、落下挙動の速度の考え方は異なるとは言え、衝撃現象自体は大きくは変わらないと思われる。

そこで本報告では、室内及び現場投入実験の結果から、底面粘土層への影響について検討する。

2. 実験概要

2.1 室内投入実験

室内において衝撃現象を把握するために、写真1に示すような直径30cm、全高210cmの1次元円筒水槽を用いた。この水槽底面に、2.0mm以下に粒度調整した、博多湾より採取された海成粘土 ($\rho_s=2.519\text{g/cm}^3$, $w_L=108.9\%$, $I_p=73.8$) を用い、水深 $z=120\text{cm}$ 一定条件下で、写真1(b)に示す底部開放型の投入装置を用い、初速度 $v_0=0\text{cm/sec}$ にて、表1に示すモルタル塊及び鉛玉を1,000g投入した。



(a) 1次元円筒水槽



(b) 投入装置

写真1 室内実験装置

沈降速度は、投入試料の沈降挙動をビデオカメラで撮影し、試料が投入される水深 $z=120\text{cm}$ を所定の区間に区切り、最初に粘土層に着底すると考えられる、試料群の主たる先端部が各区間を沈降するのに要した時間を計測し、その区間の平均沈降速度として算出した。

表1 室内実験に用いた試料

試料	本投入		予投入
	モルタル塊	鉛玉	礫
写真			
寸法 (mm)	41×40×(22~60)	$d \approx 10$	4.75 < d < 19.0
密度 (g/cm ³)	$\rho_s = 1.60 \sim 2.24$	$\rho_s = 11.3$	$\rho_s = 2.68$

このモルタル塊の投入にあたっては、投入前に予め、底面へのめり込みがほとんど無視できる小粒子 (密度 2.68g/cm^3 、粒径 $4.75 \sim 19.0\text{mm}$ の礫、表1参照) を投入した場合の緩衝効果についても検討した。具体的には、小粒子を予投入しない条件の他に、予投入量 $1,500\text{g}$ (層厚約 0.8cm を形成) と予投入量 $3,000\text{g}$ (層厚約 1.6cm を形成) と条件設定した場合についても検討した。

さらに、密度の異なる鉛玉 ($d \approx 10\text{mm}$) についても同様の投入実験を行った。この場合も、予投入無しの場合の他に、前述と同じ小粒子の予投入量を $3,000\text{g}$ とした場合の実験を行った。

2.2 現場投入実験

2.2.1 模擬廃棄物の沈降状況の把握



海洋などの水中において、実際の沈降及び衝突の状況を捉えることは難しい。そこで、表2に示すような加速度センサーを用いて検討を行った。

このセンサーは、発泡ウレタン製のフロートをつけることにより密度を変えることが可能である。全国都市清掃会議⁴⁾によれば、埋立廃棄物の湿潤密度は $0.7 \sim 2.1\text{g/cm}^3$ 程度であり、この範囲の密度を取るようにフロートによる調整を行った。加速度センサーそのものは、直径 7cm 、高さ 13cm の円筒形であり、フロートつきで換算粒径十数 cm の大きさ (球と仮定したときの体積からの換算値) の投入物となる。

この加速度センサーを搭載した投入物の現場スケールの投入実験を、前述の砂・礫の投入実験を行った海面最終処分場建設予定地において実施し、

沈降及び衝突の状況を把握した。

表2 フロートを付けた加速度センサー

名称	フロートA	フロートB
写真		
密度 (g/cm ³)	1.24	1.98

2.2.2 模擬廃棄物が底面粘土層に及ぼす影響

並行して、現場スケールの衝撃現象の把握・評価のため、大型固形物の投入実験を実施した。

実施した海域は、海底に厚く浮泥が堆積しており、その下部に底面遮水層となる沖積粘土層が堆積している。浮泥の物性は、表3に示されるように沖積粘土層とは異なり、その強度は極めて小さいことがわかる。

表3 浮泥層と粘土層の諸物性

(a) 浮泥 (Ac層上部堆積) 層の物性値

粒度特性				コンシステンシー特性		
礫 (%)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数
0.2	3.0	50.6	46.2	102.9	34.5	68.4
一般						
比重 (g/cm ³)	含水比 (%)	飽和度 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	土粒子密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強度 (kN/m ²)
---	124.1	98.2	1.374	0.592	2.718	---

(b) 浮泥 (Ac層上部堆積) 層のせん断強度

深度 (cm)	せん断強度 τ (kN/m ²)	深度 (cm)	せん断強度 τ (kN/m ²)
0	計測不能	30	1.1
10	2.7	40	計測不能
20	2.5	50	計測不能

(c) シルト質粘土層 (Ac層) の物性値

粒度特性				コンシステンシー特性		
礫 (%)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数
0.3	5.3	46.1	48.3	85.9	30.0	56.5
一般						
比重 (g/cm ³)	含水比 (%)	飽和度 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	土粒子密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強度 (kN/m ²)
2.680	86.7	100	1.522	0.803	2.695	35.7

実験には、表4に示すような、様々な形状及び質量を有するコンクリートブロックを用いた。これらのブロックには簡易的な目盛りをつけ、また比較参考のため、鉄製のグレーチングも用いている。実験では、これらの投入物を台船上から1次元的に投入し、図5に示すように着底後あらかじめ投入物に取り付けておいた目盛り付きロープ

伝いに水中カメラを沈め、投入物の着底状況のモニタリングを行った。また実験終了後、投入した大型投入物を引き上げ、浮泥の付着状況の観察からも、めり込みの評価を行った。

表4 大型固形物の投入実験に用いた試料

名称	コンクリート [®] ブロック (基本型)	コンクリート [®] ブロック (角型 1/2)	コンクリート [®] ブロック (正方形断面)	コンクリート柵
寸法 (mm)				
質量 (kg)	≈ 8	≈ 4	≈ 6	≈ 10
外観				
名称	コンクリート製物干し台	コンクリート平板	鉄製グレーチング	
寸法 (mm)			幅 300×厚さ 25×長さ 995	
質量 (kg)	≈ 25	≈ 3	≈ 8	
外観				



図5 モニタリング状況

3. 実験結果及び考察

3.1 室内投入実験結果

室内実験によるモルタル塊及び鉛玉の結果を表5、表6、及び図6、図7に示す。

これらの結果に見られるように、予投入を行わない場合、モルタル塊で約9cm、鉛玉で約11cmの最大めり込み量となった。これに対して、予投入を行った場合には、めり込み量は大きく減少し、

予投入3000gでは、モルタル塊、鉛玉ともにほとんどめり込みが見られなかった (図6(c)に見られるように、0.6cmのめり込みが見られたが、後発のモルタル塊の衝突により押されたものと考えられる)。すなわち、小粒子の予投入を行い、緩衝材の層を作ることで、モルタル塊や鉛玉のような大レイノルズ数の投入物のめり込みを緩和できることが示された。

以上のことから、落石対策便覧に示されるように、ロックシェッドなどの構造物への影響を緩和させる緩衝材の役割を予投入の小粒子が担ったものと考えられる。

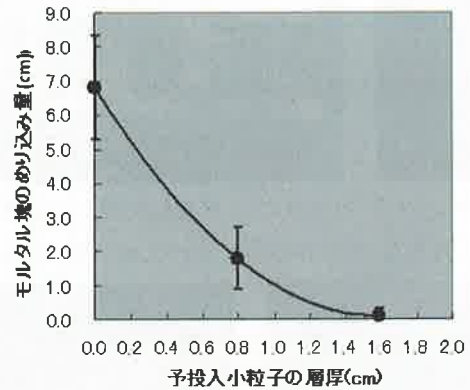


図7 予投入の層厚とモルタル塊のめり込み量

表5 モルタル塊及び鉛玉の室内投入実験結果

予投入	なし	1,500g	3,000g
本投入	モルタル塊	モルタル塊	モルタル塊
写真			
本投入	鉛玉	---	鉛玉
写真		---	

表6 室内投入実験結果

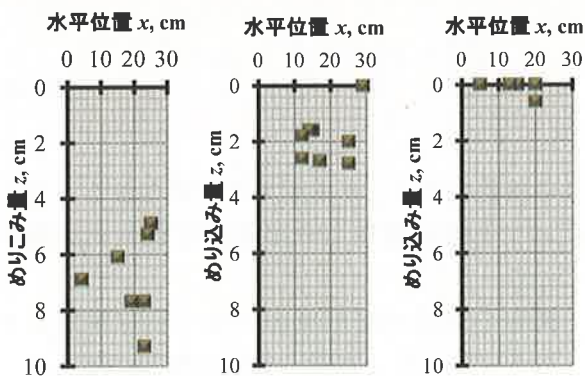
投入物の種類	密度 (g/cm ³)	投入質量 (g)	換算粒径 (mm)	計測平均終端速度 (cm/sec)	終端速度 [Newton 式] (cm/sec)	めり込み量 [計測値] (cm)
モルタル塊						
予投入なし	1.92	1000	50.45	121.10	117.0	4.80~9.25
予投入1,500g	1.92	1000	50.45	121.10	117.0	0.00~2.80
予投入3,000g	1.92	1000	50.45	121.10	117.0	0.00~0.60
鉛玉						
予投入なし	11.3	1000	10	146.10	174.2	0.00~11.00
予投入3,000g	11.3	1000	10	146.10	174.2	0.00

3.2 現場投入実験結果

前述の砂・礫を模擬廃棄物とした、現場スケールの投入実験後には、海底面表層のサンプリングを実施している。その結果によると、投入した砂は浮泥層の上部5cm程度まで、礫は浮泥層の上部20cm程度まで混入したことが分かった。また浮泥層は底面遮水層の上に80cm程度堆積しており、浮泥層の下にある底面粘土層に、砂や礫の投入による影響がないことが確認された。



写真2 砂・礫のめり込み状況と浮泥層の存在の確認



(a) 予投入なし (b) 予投入1,500g (c) 予投入3,000g

図6 モルタル塊のめり込み量

次に、大型固形物の投入実験におけるコンクリートブロック類のめり込みの様子の一例を、写真2に示す。また、それぞれのコンクリートブロック類のめり込み量を表7に示す。これらの結果に示されるように、めり込み量は7.5~30cm程度であり、めり込みは浮泥層内に収まっていると言える。



(a) コンクリートブロック(基本型) の着底状況と引き上げ後の状況 (約15cmのめり込み)



(b) コンクリート製物干し台の着底状況と引き上げ後の状況 (約25cmのめり込み)

写真3 コンクリートブロックの着底状況と引き上げ後の状況

表7 大型投入物のめり込み量一覧

名称	最大めり込み量
コンクリートブロック (基本型)	約 15cm
コンクリートブロック (角型 1/2)	約 7.5cm
コンクリートブロック (正方形断面)	約 12cm
コンクリート柵	約 20cm
コンクリート製物干し台	約 25cm
コンクリート平板	確認できず
鉄製グレーチング	約 20~30cm

以上より海底面への衝撃は、空中を落下する石などの衝撃と類似した挙動を示すことが分かる。図8に見られるように、衝突後0.1秒以内に最大衝撃加速度(力)に達し、その後立ち上がり時よりもゆっくりと加速度(力)が減少していく。その時の衝撃圧は被衝突体の強度(浮泥の場合のせん断強度1.1kN/m²)に比べて大きく、衝突によるめり込みや破断といった現象が生じる可能性が示唆される。加えて上記の知見より、突き刺さるような棒形状を有する長尺な、密度の大きい廃棄物の場合、底面粘土層に今回観察されたようなものよりも深いめり込みを生じる可能性がある。

一方で図9に見られるように、一気に衝突せず少しずつ速度が減少して行くような、十分な着底が見られない場合もあった。このような場合、理論値よりも小さな衝撃力になると思われる。

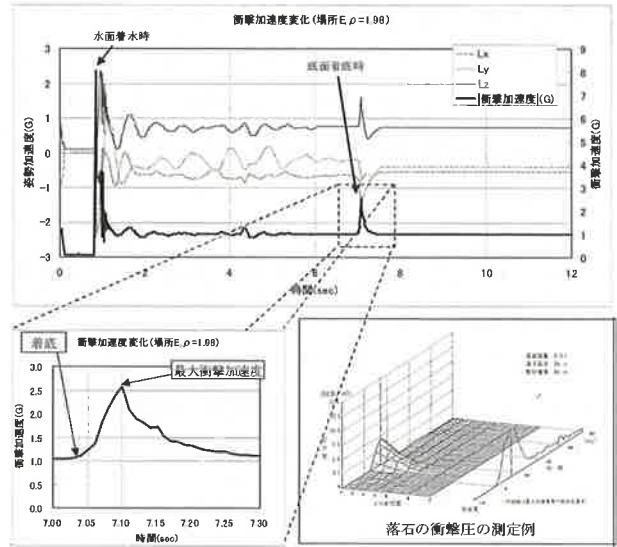


図8 加速度センサー搭載投入物の姿勢加速度と衝撃加速度の計測結果 (密度1.98g/cm³)

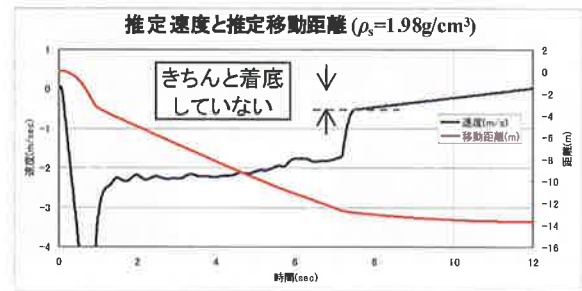


図9 着底時の加速度センサーの状況: 一気に着底しきれずに速度が残存し徐々に着底

3.3 ヘルツの理論による衝撃力とめり込み量

ここでは、ヘルツの理論による衝撃について考える。

ヘルツの理論では、衝突をする2つの球体(質量 m)において、衝撃力 P と衝突後の局部変形量 r との関係は、以下のようなになる。

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -P \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) = -n_1 P \quad \text{式 (1)}$$

この場合の式は、さまざまな仮定をおくことで、衝突による最大衝撃力や局部変位量の式が導かれている。

- ① 衝突の継続時間が球体の持つ固有周期よりも十分に長く、振動の影響が無視できる。
- ② 衝撃力 P と局部変形量 r の間は、静的に接触する圧力問題とする。
- ③ 投入物(球体1)は底面(球体2)に比べては

るかに小さい。すなわち $m_2 \gg m_1$ ($R_2 \gg R_1$: R は半径) の関係が成り立つ。

以上を仮定すると、最大衝撃力 P_{max} と最大局所変形量 r_{max} は、以下の式で表される。

$$P_{max} = n^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4} v_0^2 m_1 \right)^{\frac{3}{5}} \tag{式 (2)}$$

$$r_{max} = \left(\frac{5}{4} \frac{v_0^2}{n} m_1 \right)^{\frac{2}{5}} \tag{式 (3)}$$

$$n = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} R_1^{\frac{1}{2}}$$

$$k_i = \frac{(1 - \nu_i^2)}{\pi E_i} \tag{式 (4)}$$

ここで、 m_1 : 投入物 (球体1) の質量, v_0 : 投入物 (球体1) の衝突時の速度, R_1 : 投入物 (球体1) の半径, ν_i : 球体 i のポアソン比, E_i : 球体 i の弾性係数 (地盤の場合は変形係数) である。

この最大局所変形量 r_{max} がめり込み量に相当する。なお、これらの式は、落石対策便覧の基本式ともなっている。

一方、衝撃圧 Q については、ヘルツの理論では示されていないが、めり込み量より形成される円の面積より算出することとした。すなわち、めり込んだ部分の球の面積をめり込み分の球 R_1 が形成する円の半径 R_{as} から求め、衝撃圧を式 (6) により算出できるものとした。

$$R_{as} = \sqrt{R_1^2 - (R_1 - r_{max})^2} \tag{式 (5)}$$

$$Q \geq \frac{P_{max}}{R_{as}^2 \pi} \tag{式 (6)}$$

図 8 に示すように、落石 (質量 3t) の衝撃が作用するときには、衝突後瞬時に衝突面に衝撃圧が作用し、その値は数千 kN/m^2 に達する。しかし、この最大衝撃圧に達するときには、めり込みはまだ完了していないと考えられ、衝撃圧の作用する面積は式 (5) よりも小さなものであることが考えられる。従って、正確には式 (6) のようにはならないと思われるが、最低限作用しうる衝撃圧と考えられるので、便宜的に式 (6) を用いた。

式(2)や式(3)より、衝撃力やめり込み量を算出

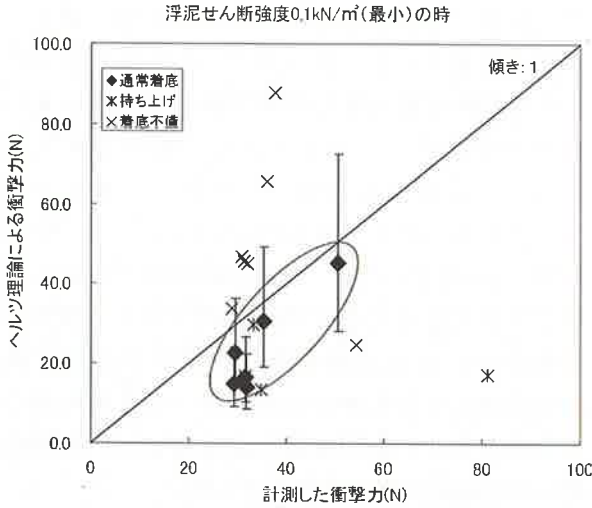
した。なお、ここで用いた物性の諸元は、表 8 に示すような値とした。図 10 は、これらの結果の内、室内実験の粘土層や現場実験の浮泥層のせん断強度の最小値から求めたそれぞれの変形係数によるヘルツ理論の衝撃力とめり込み量を示したものである。なお、表 3 (b) に示すように、浮泥の表層 10cm 程度はベーンせん断試験で強度を求めることができないほど弱い強度であり、便宜的に浮泥のベーンせん断試験で計測可能なせん断応力の約 1/10 である 0.1 kN/m^2 を用いて浮泥の最小値とした。また、室内実験の底面粘土は、計測最小値 0.07 kN/m^2 のせん断強度とした。

表 8 ヘルツの理論に用いた物性値とその根拠

投入物 (衝突体)			底面地盤 (非衝突体)		
物性名	物性値	備考	物性名	物性値	備考
ポアソン比 ν	0.194	コンクリートモルタル塊	ポアソン比 ν	0.45	粘性土 (N 値 ≤ 8)
	0.3	ステンレス		0.2	不燃性廃棄物 (中央値)
	0.44	鉛			
弾性係数 E 又は変形係数 E_{50} (kN/m^2)	2.5×10^7	コンクリート	変形係数 E_{50} (kN/m^2)	4.1~22.7	現場実験の浮泥: せん断強度より※
	2.0×10^8	ステンレスの縦弾性係数		2.8~15.7	現場実験の粘土: せん断強度より※
	1.61×10^7	鉛のヤング率		2436	粘土 (Ac) 層
	0.5×10^3	廃棄物地盤		2504	焼却残渣: 一軸圧縮強度より※
粒径 ϕ (m)	0.01~0.275	投入物の体積あるいは密度と重量から球体と仮定	一軸圧縮強度 q_u (kN/m^2)	0.2	室内の浮泥: 実測せん断強度の 2 倍
				0.07	室内の粘土: 実測せん断強度の 2 倍
				35.7	粘土 (Ac) 層
				36.7	焼却残渣 (中央値)
				1374	浮泥
終端速度 v_0 (m/sec)	Newton 式の 1/2~1 倍	単体投入の場合	湿潤密度 ρ_s (kg/m^3)	1522	粘土 (Ac) 層
				1675	焼却残渣 (中央値)
	Newton 式の 1/2~2 倍	複数投入の場合		間隙比 e	0.78
			0.49	廃棄物	

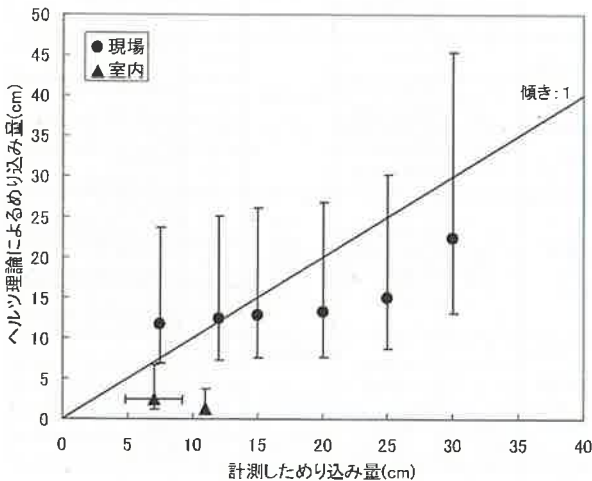
※その物質のせん断強度 (あるいは一軸圧縮強度) と粘土のその比に粘土の変形係数を掛けて算出 (備考)

- ①コンクリートやモルタル塊のポアソン比は、一般に 0.14~0.20 であるが、土石流・流木対策設計技術指針解説などより 0.194 とした。
- ②普通コンクリートの弾性係数は、 $2 \sim 3 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ であるが、土石流・流木対策設計技術指針解説などより $2.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ とした。
- ③ステンレスのポアソン比及び縦弾性係数は、ステンレス協会より設定した。
- ④廃棄物地盤の変形係数は、鳴海・池田及び池尻らでは $0.1 \sim 10 \text{ MN/m}^2$ 程度であるが、まだ固まっていないことを考慮して、 0.5 MN/m^2 程度とした。
- ⑤不燃性廃棄物のポアソン比は、東畑らより、0.1~0.3 程度であるので、その中央値とした。
- ⑥焼却残渣の変形係数は、焼却残渣の一軸圧縮強度より比例換算したものとして求めたが、上記④の文献の計測値の範囲内である。
- ⑦全国都市清掃会議より、焼却残渣の湿潤密度 $1340 \sim 2010 \text{ kg/m}^3$ 、一軸圧縮強度 $16.67 \sim 56.88 \text{ kN/m}^2$ の値の中央値とした。



(a) 現場の浮泥 (最小0.1kN/m²) への着底の仕方と衝撃力

※◆の棒は変形係数が 4.1~22.7kN/m² と幅を持つため、その最大と最小を採った。
底面のせん断強度を最小値と設定



(b) 現場実験の浮泥 (最小0.1kN/m²)、室内実験の粘土 (最小0.07kN/m²) の時のめり込み量

※各点の棒は、変形係数が 4.1~22.7kN/m² と幅を持つため、その最大と最小を採った。

図10 沈降物における衝撃力とめり込み量 (底面のせん断強度を計測最小値とした場合)

図10(a)より、衝撃力については、加速度センサー搭載投入物がきちんと着底した場合 (図中の通常着底) には、理論値と計測値が比較的近い値を示すことが分かる。

一方、図10(b)より、現場実験で測定されたコンクリートブロック等のめり込み量は、理論値と計測値が比較的近い値を示すものの、室内実験、特に鉛玉 (図10(b)の計測値11cmの▲) は、理論値から外れている。室内実験のモルタル塊は長辺6cmであるが、粘土層の中に9cmと完全に潜り込

んでいるものがあり、φ10mmの鉛玉では、粘土層の中に11cmも潜り込んでいる。また、鉛玉の形状は球形で他の投入物と比べ回転しやすい。このように、一部のモルタル塊や鉛玉のめり込みでは、現場実験のコンクリートブロック類に比べると、異なる現象が起きた可能性が考えられる。ヘルツの理論による式 (3) は、静的に接触する圧力問題と仮定して導かれた式であり、投入物が衝突時に回転したり、被衝突体である底面に潜り込んだりする現象は、この仮定にそぐわない。このため、理論値と計測値が異なる結果となったと思われる。

以上のことから、本実験結果は、浮泥や粘土のせん断強度が最小となる時の、即ち、投入物が衝突時に回転したり、被衝突体である底面に潜り込んだりしない場合の、衝撃力やめり込み量に近い値を示していると考えられる。従って、推定精度としては、落石の衝撃問題と同じように粗いものの、水中の沈降衝突時の衝撃現象をある程度ヘルツの理論から推察できることが示された。

今回得られた知見より、埋立処分場への廃棄物埋立前の展開検査において、底面影響を生じることが懸念されるような、例えば棒形状の長尺な、密度の大きい廃鉄筋のような廃棄物については予め除外することが、埋立管理上肝要であると言える。

4. まとめ

海面最終処分場において埋立投入される廃棄物を模擬した、砂及び礫を主体とした粒子群、また固形物単体の、室内及び現場スケールの投入実験より、以下の知見を得た。

- (1) 砂や礫の粒子群、及び大型固形物の投入実験では、めり込みは底面粘土層の上部に存在する浮泥層内に収まっており、粘土層への影響は無かったと考えられる。このことは、浮泥層の存在も、上述の緩衝層として機能し得ることを示唆している。
- (2) 一方で、そのような浮泥層が存在しない場合には、レイノルズ数の大きな廃棄物の投入により生じるめり込み等に対する対策として、めり込み等を生じない小粒径の廃棄物を予め投入し、緩衝層とすることが効果的である

ことが、実験的に明らかとなった。

- (3) 加速度センサーを用いた投入実験より、海底面への衝撃は、空中を落下する石などの衝撃と類似した挙動を示すことが分かった。
- (4) 水中における沈降衝突時の衝撃現象は、ある程度ヘルツの理論から推察できることが示された。
- (5) 以上のことより、廃棄物埋立前の展開検査において、底面影響を生じることが懸念されるような、例えば棒形状の長尺な廃棄物（例えば、廃鉄筋など）については、予め除外することが埋立管理上肝要であると言える。

【謝辞】

本研究は、(財)愛知臨海環境整備センターより委託を受けた「薄層埋立工法に係る技術検討調査業務委託(公益事業)」「同(その2)業務委託(公益事業)」及び「同(その3)業務委託(公益事業)」の中で実施された。ここに、関係各位のご協力に感謝の意を表す。

【参考、引用文献等】

- 1) 古賀大三郎, 他 (2004): 海面埋立地における焼却灰の沈降と凝集に関する研究, 環境工学研究論文集, 第41巻, pp.469-477.
- 2) 日本道路協会編 (1983): 落石対策便覧, 昭和58年7月, 丸善, 359p.
- 3) 日本道路協会編 (2000): 落石対策便覧, 平成12年7月, 丸善, 422p.
- 4) 全国都市清掃会議 (2010): 廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領 2010改訂版-II 編設計要領 3章貯留構造物 3.4節設計に際して考慮すべき荷重, pp.205-213.

Summary

On offshore disposal site, alluvial clay layer is frequently used as the layer of hydraulic barrier. The effect of waste dumping on alluvial clay layer, the layer of water shielding, is an issue of concern, things such as the degradation of the impermeable function. However, only few studies have so far been made on the effect of waste dumping on the layer of water

shielding. Hence, Authors have performed the laboratory and field experiments to reveal the settling phenomenon of dumped materials. In consequence, its terminal velocity could be grasped by the experiments. What seems to be a persisting issue is the effect of the terminal velocity on the layer of water shielding. Therefore, the effects of dumped samples on the bottom clayey soil layer and its countermeasures have been investigated in this report.

As a result, installing buffer materials (i.e. fine-grained wastes) onto the layer of water shielding preliminarily or utilize a floating mud existing on that are effective ways to prevent such damage. In addition, the impact to the seabed can be estimated using Hertz's Theory to some extent, since it is similar to the materials (i.e. stone) falling in the air.