

# 41. 海面廃棄物最終処分場における CIP 法を用いた沈降現象の検討

Numerically Study of Sedimentation through Fluid to the Ground at the Coastal Landfill disposal by Using CIP Method

磯部有作, 河原裕徳 (地層科学研究所), 大野博之 (環境地質), 登坂博行 (東京大学),  
八村智明 (日本環境衛生センター), 武馬雅志 (愛知臨海環境整備センター)

Yusaku Isobe, Hironori Kawahara, Hiroyuki Ono, Hiroyuki Tosaka, Tomoaki Hachimura, Masashi Buma

## 1. はじめに

海面処分場における薄層埋立工法による投入後の水中での沈降・底盤への衝撃の把握は処分場内の安定化の問題として重要な課題である。そこで、実際に室内や現場での投入実験<sup>1),2)</sup>などで沈降速度や底面遮水層へめり込み具合などもわかってきている。

しかしながら、これらの現象を適切に表現できる解析手法は未だ確立されていない。本研究では、界面現象の表現に有効な CIP 法を用いて、沈降現象の数値解析的な評価手法について検討した。

## 2. 解析手法

流体モデルにはニュートン流体やビンガム流体等があり、本検討はビンガム流体を考慮している森口ら<sup>3)</sup>によるプログラムを用いた。流体力学に関する基礎知識はここでは割愛し、ビンガム流体の地盤せん断強度を考慮した計算手法の概略を以下に示す。詳細は森口ら<sup>3)</sup>を参照されたい。

通常のビンガム流体モデルでは、材料のせん断強度は一定値で表現され、拘束圧に依存する地盤材料のせん断強さを表現することはできない。そのため、ビンガム流体モデルに地盤材料のせん断強度を持たせる必要がある。

ビンガム流体モデルとモール・クーロンの破壊規準を用いると地盤材料のせん断強度を考慮したビンガム流体モデルは、

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + c + \sigma' \tan \phi \quad (1)$$

と定義される。ここに、 $\tau$ はせん断応力、 $\dot{\gamma}$ はせん断ひずみ速度、 $\eta_0$ は降伏後の粘性係数、 $c$ は粘着力、 $\sigma'$ は有効応力、 $\phi$ は内部摩擦角を示す。ただし、この解析手法では、地盤材料を流体として仮定するために、有効応力の概念はない。次式に示すように拘束圧を流体の圧力  $p$  で代用している。

$$\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta' = \eta_0 + \frac{c + p \tan \phi}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

また、式(2)において、せん断応力をせん断ひずみ速度で除して表すことで、等価粘性係数(割線粘性係数) $\eta'$ が得られる。

以上による地盤材料のせん断強度を考慮したビンガム流体モデルの挙動の概念図を図-1に示す。

そして、この $\eta'$ を流体の粘性係数と見なし、次式に示す運動方程式を解くことで、流動化シミュレシ

ョンが可能となり、粘性係数の時間的・空間的变化により地盤材料の変形特性を表現することになる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \eta' \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \eta' \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + b_i \quad (3)$$

ここに、 $u_i$ は速度ベクトル、 $\rho$ は密度、 $\eta$ は粘性係数、 $b_i$ は外力ベクトル、 $p$ は圧力である。

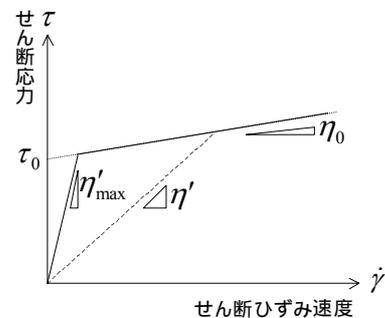
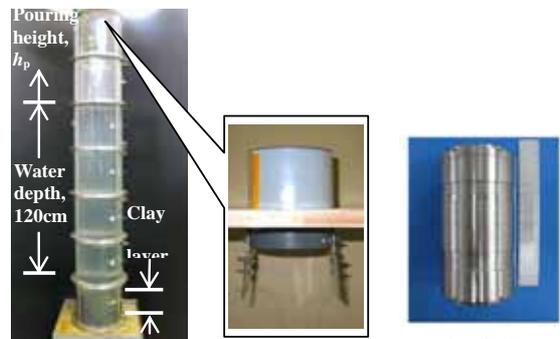


図 - 1 せん断強度を考慮したビンガム流体モデル

## 3. 沈降現象の検討

実験は、海底粘土地盤に及ぼす影響を検討する前段階として、円筒水槽内の静水中を沈降する土質試料群の一次元沈降挙動、及び底部に敷設した粘土層への影響の把握を目的として行っている<sup>1)</sup>。そのため実験は、図-2(a)(b)に示すようなアクリル製円筒水槽を用いて室内でのモデル実験を実施している。投入は、人為的誤差を極力取り除くために底部開放型の投入装置を用い、自然落下させている。



(a)円筒水槽

(b)底部下方型投入装置

(c)加速度センサーを搭載した投入物

図 - 2 投入実験の概要

この鍋島・永岡らの実験<sup>1)</sup>では、沈降の速度に着目すると、例えばモルタルの沈降速度は約 80cm/sec が得られている。

一方、実スケール規模の現象把握として、建設中の海面最終処分場を利用して、図-2(c)に示すような加速度センサーを搭載した投入物の現場実験を行い、沈降及び衝突の状況を把握した<sup>2)</sup>。投入は海上より約 3.0m の位置から行い、空中の降下 水面への衝突 海中の沈降(水深は約 10m) 海底への衝突といった一連の現象を加速度・速度で捉えた。この加速度センサーによる速度の変化の一例を図-3 に示す。この結果は、加速度センサーを搭載した投入物の大きさを約 15cm 立方、密度を約 2000(kg/m<sup>3</sup>)とした例である。同様に投入物が沈降する速度に着目すると、この結果に見られるように、着水後から着底までの間、海中での沈降速度は 2.0 ~ 2.5m/sec で沈降し、着底時に速度がほぼ 0m/sec になっていることが分かる。

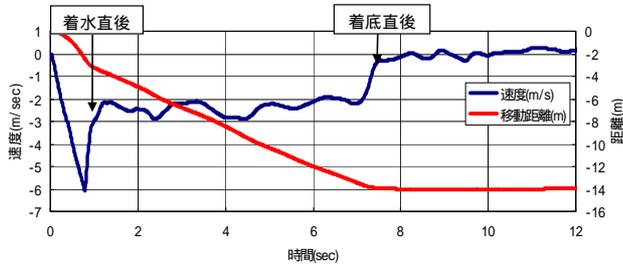


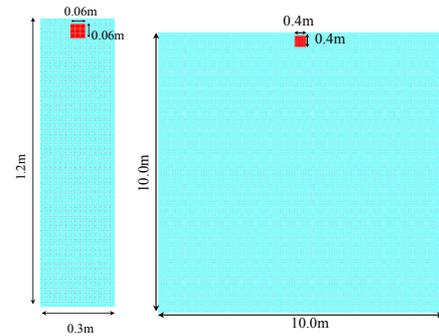
図 - 3 現場実験での計測結果

#### 4. 解析による沈降現象

検討ケースは、室内でのモデル実験レベルを対象とした場合はケース 1、現場での実規模を対象とした場合をケース 2 として 2 ケースを実施した。

検討の概要は、剛な物体を水面から落下させ、沈降の速度や底面に到達する時間などを検討した。また、解析条件は、図-4 に解析モデル図を、表-1 に解析条件および物性値を示している。この結果を図-5 に示す。

ケース 1 では、最大約 65cm/sec の沈降速度に達した後、速度が 45cm/sec に減少している。このケースは、モルタルを用いた実験と比較すると、沈降速度は解析の方がやや遅い結果となったが、沈降速度が一定となったまま沈降する現象を捉えることはできた。またケース 2 でも CIP 法の解析結果も 2.5m/sec 前後の一定沈降速度で沈降している。現場で得られている結果は、投入物の大きさや密度の条件が解析とはやや違うものの、図-3 に示すように投入物はほぼ 2.0 ~ 2.5m/sec の沈降速度で沈降し、着底時に急激に速度が減少する結果が得られている。また、室内・現場実験ともに水深が浅いところでは沈降速度に差異がある。これは、実験では空中からの落下を実施しているが、解析では水面から落下させた条件で行っているためである。ケース 1, 2 ともに解析は実験の沈降現象をある程度表現できるものであると言える。

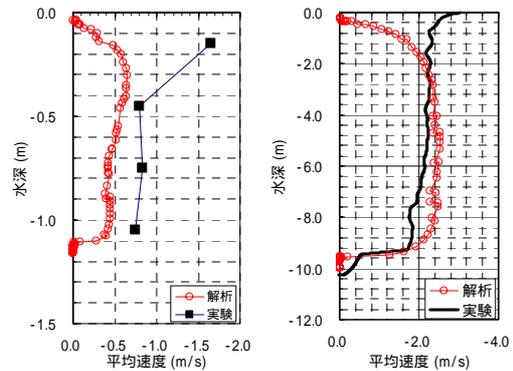


(a)ケース 1 (b)ケース 2

図 - 4 解析モデル図

表 - 1 解析条件および物性値

		ケース 1		ケース 2	
		試料	水	試料	水
密度	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2650	1000	2650	1000
粘性係数	$\eta$ (Pa·s)	-	0.001	-	0.001
メッシュサイズ	$\Delta x, \Delta y$ (m)	$\Delta x=0.02, \Delta y=0.02$		$\Delta x=0.1, \Delta y=0.1$	
メッシュ数	$N_x \times N_y$	15 × 60		100 × 100	
重力加速度	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9.81		9.81	
CFL 基準		0.005		0.005	



(a)ケース 1 (b)ケース 2

図 - 5 水深と平均速度の解析結果

#### 5. まとめ

今回は、流体解析手法の 1 つである CIP 法による解析を用いて、沈降現象をある程度表現できることがわかった。今後は、より精度よく実験の沈降現象との整合性をとるとともに、試料の着底後のめり込み現象についての検討も課題である。

#### 文献

- 1) 鍋島勇太, 永岡修一ほか(2009) : 廃棄物の海面投棄を想定した試料群の静水中における一次元沈降挙動と底部粘土層への影響, 第 8 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.359-362
- 2) 磯部有作, 河原裕徳ほか(2010) : 薄層埋立工法における沈降・めり込み現象の数値解析的検討, 第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会(投稿中)
- 3) 森口周二, 八嶋厚, 沢田和秀(2008) : CIP 法を用いた地盤の大変形解析, 計算工学講演会論文集巻, 11 号, 1 頁, pp.399-402