

# ドラム型遠心装置による直投土砂の堆積形状予測

三宅達夫\*・柳畑亨\*\*

## 1. まえがき

水深 20 m 前後における大型の土運船を用いた埋立ての急速化施工に当たり、埋立区域においては、土砂投下に伴う海底地盤のすべり破壊を起こすことなく均質な埋立地盤を造成する施工法が要求されている。したがって、埋立てにおける土砂投下時の堆積形状や海底地盤の安定性への影響などを事前に予測しておくことが施工計画立案時に重要となってくる。底開式土運船から投下された堆積土砂の形状予測に関しては、解析的な研究として箭内 (1960)、松見ら (1992)、重松 (1998) による研究があり、実験的な研究として 1g 場における幾何学的縮小模型を用いた小川ら (1969)、武藤ら (1974) による研究があるが、これらの研究では投下箇所の海底条件を固定床としており、投下土砂の現海底地盤へのめり込みや衝撃力、サンドマットの変形状況は考慮されていない。本研究の目的は、投下土砂の現海底地盤へのめり込みを含めた土砂堆積形状を予測することである。研究手法として、水理学的にも地盤工学的にも相似則を考慮できる遠心模型実験手法を用いた。併せて、一投投下時の遠心模型実験による堆積形状および土運船内の土砂排出速度を 1g 場の現場実験 ([東亜建設工業(株)・東洋建設(株)] 1998) と比較し、模型実験の相似則の確認を行った。

## 2. 遠心模型実験における相似則

本研究で用いた遠心場での相似則は以下ようになる。幾何学的相似比を  $N$  とすると (添え字  $p$ ,  $m$  はそれぞれ原型と模型を示す)、

$$L_m = L_p / N \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表され、 $Ng$  場での時間の相似比は、加速度比が

$$g_m / g_p = N \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表されるので、

$$L_m / T_m^2 = N \cdot L_p / T_p^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

であり、故に、

$$T_m = T_p / N \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表される。したがって、速度は

$$\begin{aligned} v_m &= L_m / T_m = (L_p / N) \cdot (N / T_p) \\ &= L_p / T_p = v_p \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

となる。ここに、 $L$  は長さ、 $g$  は重力加速度 ( $=9.81 \text{ m/sec}^2$ )、 $T$  は時間、 $v$  は速度をそれぞれ表す。

一方、落下体の地盤への影響を考えるならば、衝撃力 ( $F^* = F_p / F_m$ ) の相似性を吟味すればよい。

ここに、原型の衝撃力  $F_p$  は

$$\begin{aligned} F_p &= \rho_s \cdot V \cdot dv/dT \\ &= \rho_{sp} \cdot L_p^3 \cdot L_p / T_p^2 \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

であり、原型と模型とで同じ材料の落下体を使用するならば、すなわち、 $\rho_{sp} = \rho_{sm}$  ならば、模型での衝撃力  $F_m$  は  $Ng$  場では

$$F_p / F_m = N^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表され、地盤への衝撃圧  $p$  は

$$p_p / p_m = 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここに、 $\rho_s$  は落下体材料の密度、 $V$  は落下体の体積である。ところで、衝撃圧が地盤の安定挙動に関する影響を考えると、原型と模型に対して、 $p = \sigma$  の関係が成立する必要がある。ここに、 $\sigma$  は地盤内応力を表す。したがって、原型の地盤強度  $c$  に対して、 $Ng$  場の模型実験では原型と同じ地盤強度  $c$  を持つ地盤で模型実験を行えばよいことになる。因みに、 $Ng$  場の模型実験では Froude 則は満たされている。Reynolds 則は形状係数に陰な形で含まれているので、模型寸法比と加速度比の積を一定とした、いわゆる Modeling of models を行うか、1g 場の実物大実験を行って模型の原型に対する相似性をチェックする必要がある。本研究では後者の 1g 場の現場実験により相似性の確認を行った。 $Ng$  場における原型と模型の相似比の関係を表-1 に示す。

## 3. 実験概要

### 3.1 実験装置

実験に使用した装置は図-1、表-2 に示すように有効直径 2.2 m、最大遠心加速度 440 g、最大搭載質量 3.7 ton、同心 2 駆動軸を有するドラム型遠心装置である。本実験手法の詳細については H. R. Barker (1998) を参照されたい。なお、本装置は流れ、造波が可能である。模型容器は周長 6.91 m、幅 0.8 m、深さ 0.3 m の円形水路

\* 正会員 工 博 東洋建設(株)鳴尾研究所  
\*\* 正会員 博(工) 東洋建設(株)鳴尾研究所

表-1 本実験で用いた相似則

	原型	模型		原型	模型
縮尺比	1	1/N	圧力	$p$	$p$
長さ	$L$	$L/N$	地盤		
体積	$V$	$V/N^3$	応力	$\sigma$	$\sigma$
加速度	$1g$	$Ng$	ひずみ	$\epsilon$	$\epsilon$
速度	$v$	$v$	間隙圧	$u$	$u$
時間	$T$	$T/N$	粘着力	$c$	$c$
力	$F$	$F/N^2$			

表-2 装置の主な諸元

最大加速度	440 g (600 rpm)	
容器寸法	模型	実物領域 (最大加速度時)
	直径	2.2 m / 3041 m (延長)
	幅	0.8 m / 352 m
	深さ	0.3 m / 132 m
最大搭載質量	3.7 ton	1628 g-ton
駆動方法	同心2軸を採用	

m<sup>3</sup>級の実船の土倉部分を忠実に1/100で縮小した模型である。

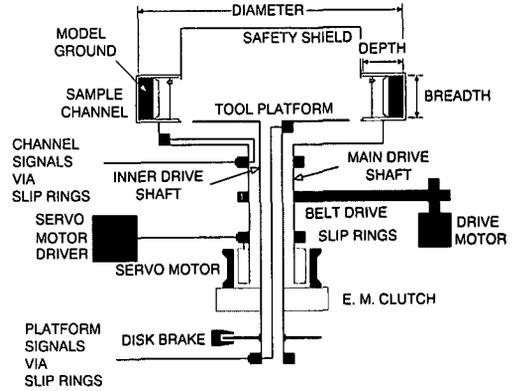


図-1 ドラム型遠心装置構造断面

である。

3.2 模型地盤と実験条件

本研究の対象とした地盤は前田 (1989) によって示された関西国際空港島の第1期建設地域の代表的地盤強度分布をモデル化している。現地条件に対応した模型条件を表-3に、実験ケースを表-4にそれぞれ示す。実験No. N2は現場実験との比較により相似則を確認するために行った。実験No. NとLは敷砂厚さの違いによる地盤変形への影響を、No. Hは海底粘土地盤強度の違いによる地盤変形への影響を検討するためである。投下土砂は図-2に示すように実物粒度に対して細粒含有率を同じにしてなるべく相似になるように珪砂5号と6号を1:1で混合したものである。

3.3 直投実験の概要

直投実験の手順を以下に示す。1) 写真-1に示す誘導装置に接続された土運船(写真-2)の土倉内に投入砂を積載する、2) 土運船を所定の投下位置に誘導する、3) 誘導装置のアームをスライドして、土運船を着水する、4) 写真-2に示す底扉を閉状態に保持している4台の空気式シリンダを瞬時に解放することにより底扉を開放し、土倉内の砂を投下する、5) 投下終了までの時間を土運船に設置した2台のポテンシオメータで投下に伴う土運船の上昇時間として測定する、6) 誘導装置のアームをスライドして、土運船を収納する、7) 堆積砂の高さを、容量500±250 mm、分解能1/200 mmのレーザー式変位計で所定の測線に沿って測定する。なお、写真-2は3000

表-3 現地条件と実験条件

	現地条件	実験条件
水深	平均: 18 m	10, 15, 20 cm
潮流	あり	考慮せず
海底地盤	粘土地盤: 正規圧密粘土 地盤強度分布: $C_u=2Z$ kN/m <sup>2</sup> (深さ Z: m)	粘土地盤: 正規圧密粘土 地盤強度分布: $C_u=2Z, 1Z$ kN/m <sup>2</sup> (深さ Z: cm)
土運船	底開式	底開式
底扉幅	3.2 m	3.2 cm

表-4 実験ケース

実験 No.	水深 (m)	直投時 加速度	地盤 作製時 加速度	砂層 厚さ (m)	段落し			
N1	10	100 g (3000 m <sup>3</sup> )	120 g	2.0	無			
L1				1.5				
N2				2.0				
L2	1.5							
N3	2.0							
L3	1.5							
H1	20	133 g (4000 m <sup>3</sup> )	120 g	1.5	有			
H2				60 g				
H3								
M1	15			133 g (4000 m <sup>3</sup> )		120 g	1.5	有
M2								
M3								

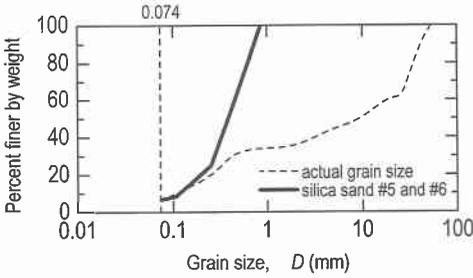


図-2 投下材料の粒度分布

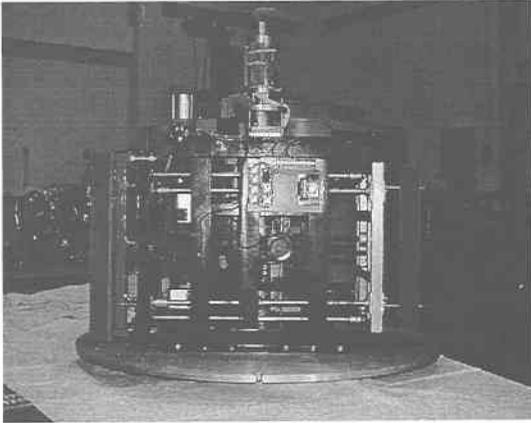


写真-1 土運船の誘導装置

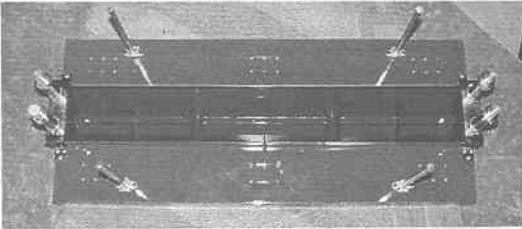


写真-2 3000 m³級土運船の1/100 模型

図-5 に示す。現場実験の値の平均値が 20-26 秒であるので、遠心模型実験はその 1/100 であることから、先述の時間に関する相似則を満たしている。また、このことは土運船の底扉幅に対して相似粒度の材料を使用すればよいことを示している。図-4、5 から、本実験は実物の結

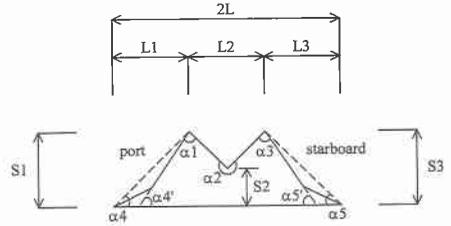


図-3 横断面堆積形状変数

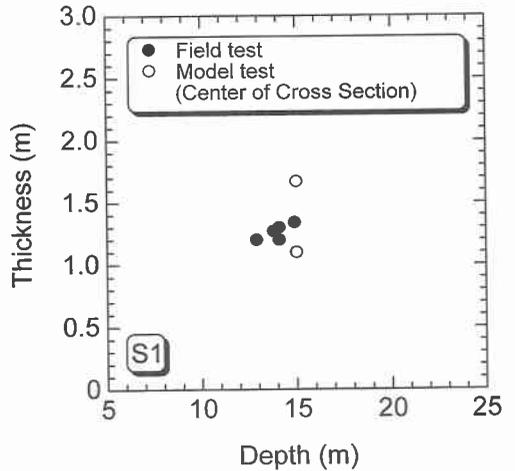


図-4(a) 左側側頂部堆積厚-水深関係

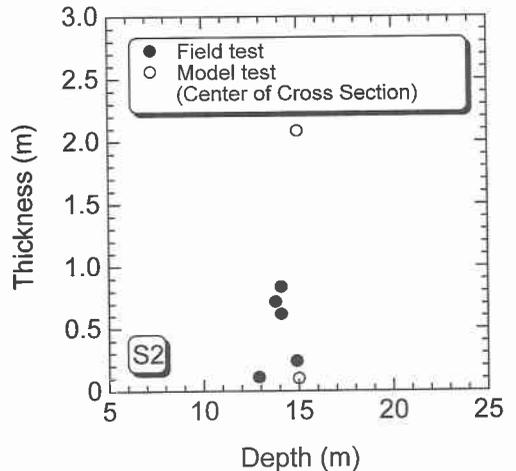


図-4(b) 谷部堆積厚-水深関係

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 模型実験と現場実験の比較—相似則の確認

1998 年、六甲沖フェニックス事業が行われている水深約 15 m の実海域において、直投埋立て時の堆積形状、海底地盤の変形状況調査を目的に、3000 m³級底開式土運船を含む各種の土運船を用いた直投実験を行なった。図-3 は堆積形状を規定する各種の変数を示している。図-4 (a)-(c) には現場実験と表-4 中の実験 No. N2 の堆積形状に関する結果を変数毎に示している。同図に示した値は土運船の長手方向中央の横断面で測定した。

次に、土倉内の土砂の投下開始から終了までの時間を

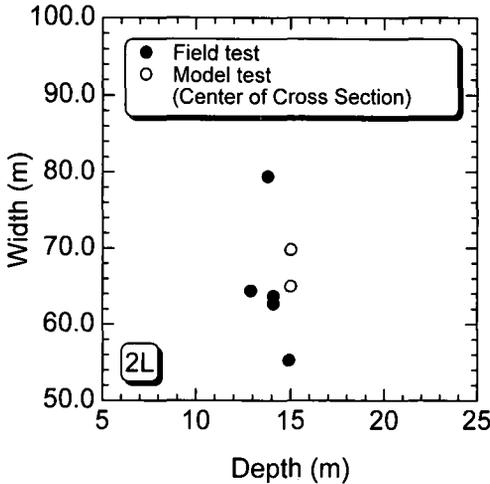


図-4(c) 全拡散幅-水深関係

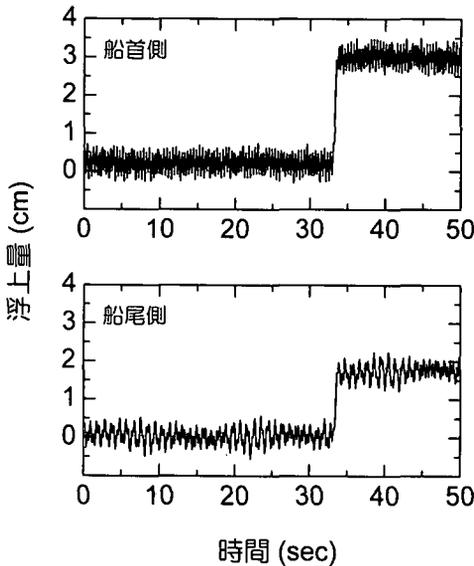


図-5 土砂投下時間

果を比較的良好な精度で再現できていることが分かり、本実験で採用した相似則により、遠心模型実験から実物の挙動を直接再現できるといえる。

4.2 地盤強度とめり込み量の関係

本実験では、粘性土地盤作製に際して、現地強度分布になるように粘土スラリーを自重圧密させているが、粘性土地盤の強度が小さければ、投下土砂の堆積厚増加に伴う粘性土地盤へのめり込み量が大きくなることは容易に想像できる。そこで、自重圧密時の遠心加速度を小さくして強度の小さい粘性土地盤を作製し、直投実験を行った。図-6(a), (b)に自重圧密時の遠心加速度を60gおよび120gに設定した粘性土地盤の非排水せん断強

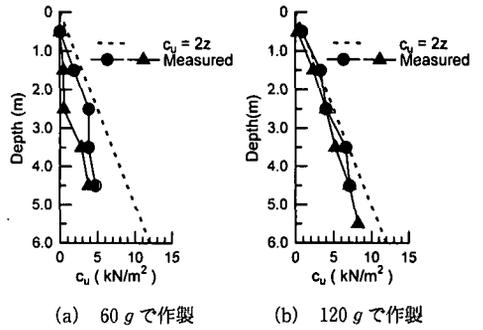


図-6 地盤強度分布

度分布をそれぞれ示す。

図中の破線は関西国際空港島および六甲沖フェニックス建設区域の海底地盤の代表的な非排水せん断強度分布  $C_u = 2Z$  kN/m<sup>2</sup>を示す。直投実験前・後の粘性土地盤表面のめり込み量を表-5に示す。ここで、自重圧密後の粘性土地盤高さや直投実験終了後の粘性土地盤高さの差を直投土砂のめり込み量とした。実験 No. H1 と L3 では、水深、敷砂層厚、投入土砂量が同一であり、表-5より堆積砂(盛砂)の単位面積当たりの土砂重量もほとんど同じであるにもかかわらず、盛砂を投下することにより生じるめり込み量はかなり異なる値を示していることが分かる。このことから、粘性土の非排水せん断強度が盛砂の堆積形状に影響を及ぼすといえる。因みに、現場実験では最大めり込み量10cm程度であった。次に、4000m<sup>3</sup>級の土運船を用いた場合の段落しによるめり込み量への影響を検討した。ここに、段落しとは各土倉内の土砂を個々に投下する方法であり、本実験では3倉のうち先ず中央部の1倉分を先に落とし、その後両端の2倉を投下した。表-6にめり込み量を示す。

また、段落しを用いた場合には、用いない場合と比較して、①堆積厚が小さい、②拡散幅が大きい、③めり込み量が小さい、という特徴を有する。

4.3 堆積形状予測

ここでは、ドラム型遠心装置による直投模型実験結果を基に、土運船横断方向の投下土砂の堆積形状に関する予測式を提案する。本研究で用いた変数を以下に示す。

表-5 土砂めり込み量

実験 No.	計測箇所	盛砂の単位面積当たりの土砂重量 (kn/m <sup>2</sup> )	めり込み量 (m)
H1	盛砂不投下部	—	0.1
	盛砂投下部	6.02	0.3
L3	盛砂不投下部	—	0.02
	盛砂投下部	6.27	0.06

表-6 段落しとめり込み量

実験 No.	計測箇所	盛砂の単位面積当たりの土砂重量 (kN/m <sup>2</sup> )	めり込み量 (m)
M2, M3	盛砂不投下部	—	0.02
M2	盛砂投下部	5.02	0.21
M3	盛砂投下部	5.09	0.09

B: 土運船の底扉幅, H: 水深, d: 空と満載時の喫水差, t: 投下時間, h: 粘性土層厚, C<sub>u</sub>: 粘性土表面から 1.5 m 深さでの非排水せん断強度, である。堆積形状を表す主な値は図-3を参照して, S, L, S'である。実験結果の回帰分析の結果, 最も強い相関を有する結果を示すと,

$$S = 0.078H + 1.113d + 0.006t - 13.195B - 0.643h + 24.61C_u + 41.665 \dots (1)$$

$$L = 1.174H + 11.470d - 0.051t - 19.303B + 19.953h + 156.757C_u + 24.335 \dots (2)$$

$$S' = 3.244S - 4.144 \quad 10 < H \leq 15 \dots (3-1)$$

$$S' = 0.397S + 0.869 \quad 15 > H \dots (3-2)$$

となる。これらの式により予測値と現場実験結果とを比較したのが図-7であり, 両者は比較的良好に一致している。

### 5. 結 論

大水深域における底開式土運船による直投土砂の堆積形状予測および土砂のめり込み量検討のため一連の遠心模型実験を行った。その結論は以下のようである。

- 1) 模型実験の結果は現場実験結果とよく一致しており, このことから, 今回採用した相似則に基づくドラム型遠心模型実験は実物挙動を直接再現できる。
- 2) 堆積形状は海底粘性土地盤の強度の影響を受ける。
- 3) 今回提案した堆積形状予測式は現場実験の結果を精度良く表す。

### 参 考 文 献

小川 元・竹内益雄 (1969): 土運船による投下土砂の分散, 土

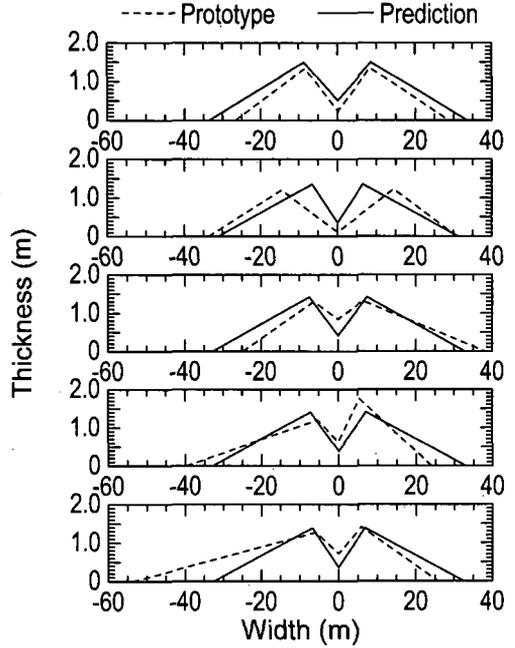


図-7 予測値と現場測定値による堆積形状の比較

士学会論文報告集, 第 161 号, pp. 39-49.

重松孝昌 (1998): 個別要素法を用いた固液混相流の解析モデルの開発とその適用性に関する研究, 大阪市立大学博士論文, pp. 1-54.

前田 進 (1989): 大規模沖合人工島の建設における地盤改良工法の将来展望と一事例, 土木学会論文集, 第 406 号, /III-11, pp. 1-15.

松見吉晴・泉 一幸 (1992): 底開式バージによる投入捨石群の堆積形状に関する予測モデル, 海岸工学論文集第 39 巻 (2), pp. 966-970.

武藤碩夫・吉井総介・石田 勉 (1974): 大規模埋立用底開バージによる土砂投下の研究, 三菱重工技法, Vol. 11, No. 1, pp. 92-104.

箭内寛治 (1960): 砂および礫の水中落下の散らばりに関する研究, 土木学会論文報告集, 第 69 号, pp. 51-57.

Barker, H. R. (1998): Physical Modelling of Construction Processes in the Mini-Drum Centrifuge, A dissertation for the degree of Ph. D. at the University of Cambridge, 301 p.