

締固め砂杭の打設に伴う海底隆起地盤の形状予測

運輸省港湾局 正会員 平尾 壽雄
 不動建設(株) 正会員 坪井 英夫
 同上 正会員 多賀 久勝
 名古屋大学工学部 正会員 松尾 稔

1. はじめに

海上工事に於いて、粘性土地盤に締固め砂杭、すなわちサンドコンパクションパイル(以下SCPと略す)工法により砂杭を造成する際に大量の砂を圧入することにより海底地盤が隆起してくる事はよく知られている。近年、隆起地盤の撤去時における海水汚濁の問題、さらに土砂処分場の確保が困難であることにより隆起地盤を撤去せずそのまま利用する機会が多くなっている。このため設計段階におけるSCP打設に伴う隆起地盤の形状予測は、その有効利用を図る上で重要である。

隆起地盤の形状、土量は原地盤の土質条件、改良深度、改良幅、置換率等の地盤改良の条件、砂杭打設順序等の施工条件、および既設構造物等の周辺の拘束条件が複雑に影響しあって定まるものと考えられる。隆起地盤の形状に対して幾つかの予測式が提案されてきたが、最近の施工事例をみると隆起土量(隆起高さ)が予測値を上回る傾向が大きく予測式の精度が問題となってきた。本文は最近10年間のSCP打設に伴う隆起地盤の施工データを分析し、隆起形状の予測方法について提案するものである。

2. 海底地盤隆起に関する研究経緯

海底地盤の隆起に関する主な研究を表-1に示す。一本ら¹⁾は1981年にSCP打設による隆起について始めて言及し、打設長と隆起の影響範囲について報告している。1980年代より土捨場の枯渇により隆起地盤を撤去せずそのまま有効利用する事例が出現し、隆起地盤の形状、土量の正確な予測方法の確立が望まれた。

曾我部²⁾はSCPの設計法と実施例の中で隆起の問題を取り上げ、そのメカニズム、形状、土量、および性状について始めて論述している。また、予測方法として隆起率 μ (隆起土量/設計投入砂量)を導入し、 μ より隆起土量、隆起高さを推定する方法を確立した。

表-1 主な過去の海底隆起に関する研究

番号	著者	出典	概要	隆起率	平均隆起高H	隆起形状	備考
①	一本松	「サンドコンパクションパイル工法」土と基礎 29-5(280) 1981.5	隆起の影響範囲について1974年の論文より引用して報告した。				
②	曾我部 隆久	「サンドコンパクションパイル工法の設計、施工の技術課題」土木学会研究討議会(広島) 1981.10	SCPの設計法と実施例を示し、隆起の問題、形状、土量、メカニズム、形状について始めて論述、隆起式を提案。	$\mu = 0.316as - 0.028L + 0.036qu + 0.70$	$H = (8iL(\tan\theta_1 + \tan\theta_2)) / \mu Vs$	一方向打設方向について、モデル化	平均隆起高H、及び最大隆起高Hmaxを求める重回帰式も提案
③	平尾 松尾	「締固め砂杭の打設に伴う海底隆起地盤の活用に関する研究」土木学会論文集 第364号/III-4, 1985.12	SCP打設に伴う隆起地盤の実態と特性について始め体系的に論述有効利用するときの技術的課題を解明。	1981年に曾我部が提案した次式で測定結果を照査し、妥当であることを確認。 $\mu = 0.316as - 0.028L + 0.036qu + 0.70$	1981年に曾我部が提案した次式で測定結果を照査し、妥当であることを確認。 $H = 2.816as + 0.497qu - 0.413$	1ブロック打設後、11ブロックを施工する場合の隆起影響角度について報告	現地試験で得られた結果を体系的に整理
④	河本 堀見	「SCP打設に伴う隆起土の予測」第21回土質工学研究発表会 1986.6	曾我部1981の提案式はパイル長L<20mの実績(28例)に基づいて作成されている。今回、このデータにL \geq 20mのデータ(13例)を追加して回帰分析している。	$\mu = 2.803 \cdot 1/L + 0.356as + 0.112$ ($\gamma = 0.690$)	工事範囲を反映させた三次元モデル(オベリスク)における平均隆起高さを求める。(施工に制約条件のない場合 $\theta = 60^\circ$)	①隆起率を提案式より求める。 ②隆起形状二次元、または三次元に仮定する。 ③平均隆起高を求める。	
⑤	平尾 松尾	「地盤改良に伴う粘性土地盤表面の隆起部分の特性に関する研究」土木学会論文集 第376号/III-6, 1986.12	現場試験の結果に他の施工事例を含めて検討し、隆起の形状の推定方法を提案。隆起の有効利用する場合の設計法を提案。形状・特性・安定・沈下の評価方法を提案。	$\mu = 2.803 \cdot 1/L + 0.356as + 0.112$ ($\gamma = 0.690$)	$H = \left(\frac{1}{2} + \frac{11\beta}{4} + \frac{113\alpha_1}{4} + \frac{1-\beta}{4} \alpha_1 \right) H_{max}$	打設方法に強く影響を受けることを指摘。形状はSCPの一方向打設方式、二方向打設方式により生じる隆起の形状をモデル化	
⑥	福手 植古 坪井	「サンドコンパクションパイルの大規模な打設に伴う海底隆起地盤の形状予測」第33回土質工学シンポジウム 1988	隆起の形状を左右する条件として、 ①SCPの打設方向 ②SCP打設周囲の拘束条件を考慮して三次元的な形状予測方法を提案。		SCP打設方向、打設周囲の拘束条件により隆起形状を推定して、隆起率を設定し、各施工ブロックごとの隆起を重ね合わせて決定する。	隆起形状検討のための基本モデルとして8ケースを提案し、それぞれについて影響範囲を提案。	前田・高井・福井「サンドコンパクションパイルの大規模施工に伴う隆起地盤の形状と物性」土木学会論文集 第403号/IV-10, 1989.3に物性と形状を示し、隆起地盤の有効利用が可能と報告。
⑦	中野 野町 坪内	「大阪湾フェニックス計画の実施」土木技術44巻9, 1989	SCP径 ϕ 2000の施工実績に基づく隆起率の推定式を提案し、施工管理に適用。	$\mu = 4.667 \cdot 1/L + 0.271as + 0.205qu - 0.290$ ($as \geq 0.5$)			

曾我部の解析データはいずれも砂杭長が20m以下のものであり、砂杭長が30m以上の大深度施工になると μ がマイナスになるという問題を内在していた。このため、塩見ら³⁾は曾我部の解析データに砂杭長が20m以上のものを加えて回帰分析を行い、新たな推定式を提案している。

平尾ら³⁾は隆起地盤の実態と特性について始めて体系的に論述し、隆起地盤を有効利用するときの技術的な課題を解明している。また、現場試験の成果に他の施工事例を含めて検討し、隆起地盤の形状の推定方法を提案している。これは、隆起形状が打設方向に強く影響を受ける事を指摘し、打設方式による形状をモデル化し、その形状係数を提案したものである。

福手ら⁴⁾は関西国際空港の隆起地盤の解析結果より、隆起形状を左右する条件として、SCP打設方向に加え打設地盤の周囲の拘束条件を考慮して、3次元的な形状の予測方法を提案している。

中野ら⁵⁾は砂杭の大型化の動向に対応し、砂杭径 ϕ 2.0mの実績に基づいた新たな推定式を用いて、施工管理に適用している。

しかしながら、上記の研究に用いられた解析データはいずれも1985年以前のものであり、特に最近になって隆起の予測値に対して実測値が上回る傾向が見られ、予測精度が問題となってきている。

3. 隆起率の推定

3.1 従来の隆起率推定式と予測精度

現在、隆起率 μ の推定方法として一般的には以下のものがある。

曾我部²⁾は施工事例のうちデータのよくそろっているものについて(28例)分析を行い、隆起率、隆起高さの回帰式を得た。

これによると、隆起率 μ は置換率、砂杭長、および原地盤強度との相関性が大きく、回帰式は次式で示される。

$$\hat{\mu} = 0.316a_s - 0.028L + 0.036q_u + 0.70 \dots (1)$$

ここに、 a_s ; 置換率、 L ; 杭長(m)、 q_u ; 原地盤の強度($L/3$ の深さの一軸圧縮強さ、 tf/m^2)である。塩見らはこの(1)式が杭長が大きくなるとマイナスになるという問題があるため上記データに $L \geq 20m$ のデータを加えた回帰分析より(2)式を得た。

$$\hat{\mu} = 2.803/L + 0.356a_s + 0.112 \dots (2)$$

現在、隆起率の推定方法として最も一般的に用いられているものは(2)式であるが最近の施工例を見るとこの推定値を上回る傾向が強くなっている。

そこで過去10年の実績をもとに検討を行った。解析データは塩見の解析データ41例に最近10年間のデータ48例を加えたものである。

(2)式による実測値と推定値の関係を図-1に示す。また、実績値と推定値の比($\mu/\hat{\mu}$)を図-2に示す。

これによると、実測隆起率は推定隆起率の1.17倍であり、特に最近のデータのみに限ると1.33倍である。

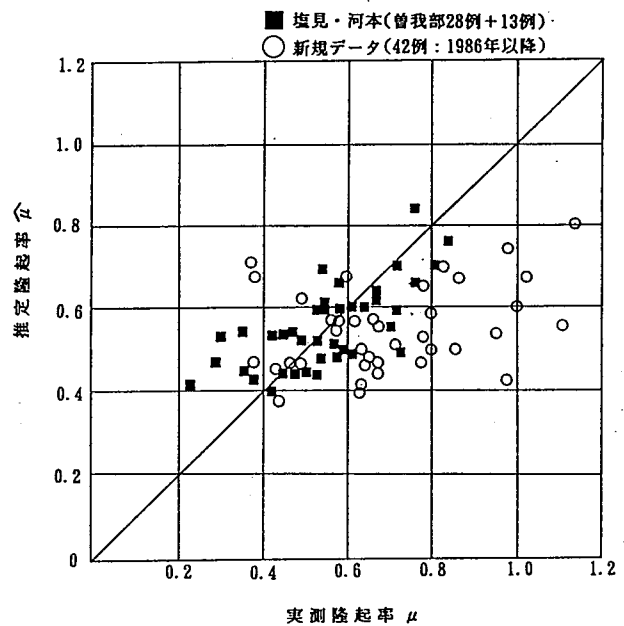


図-1 (2)式による実測値と推定値の関係

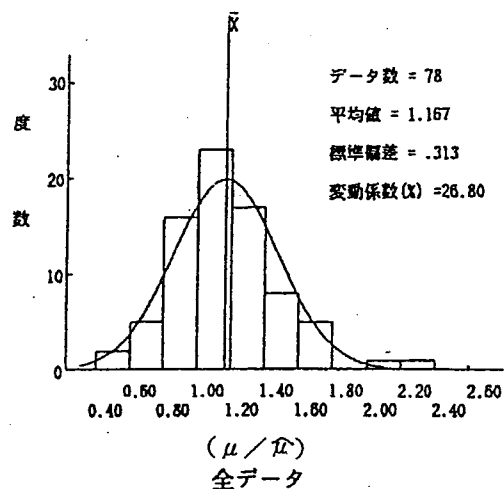


図-2 (2)式による $\mu/\hat{\mu}$ の分布

3. 2 隆起率に影響を及ぼす要因

隆起率に影響を及ぼす要因は(2)式によると杭長L、置換率 a_s である。これらと隆起率の関係を整理すると図-3、図-4の結果が得られる。各々の相関は以下の通りである。なお、Lについては(2)式同様に1/Lにて整理した。

$$\mu = 0.557 + 1.782/L \quad (\text{相関係数 } R = 0.542)$$

$$\mu = 0.425 + 0.323a_s \quad (\text{相関係数 } R = 0.251)$$

一方、最近の施工事例に見られる特徴としては砂杭径の大型化があげられる。そこで、杭径毎に隆起率を整理したものを図-5に示す。これによると、杭径 ϕ (m)の増加とともに隆起率が大きくなる傾向が認められる。同一置換率でも杭径が小さい方が周辺への影響が小さいことは文献 8)においても知られているので、 ϕ との関係について検討すると相関は以下の通りになる。

$$\mu = 0.302 + 0.187\phi \quad (\text{相関係数 } R = 0.436)$$

砂杭の直径別に μ を整理し、従来一般的であった $\phi = 1.6$ mの砂杭の隆起率の平均値との比率を見ると、図-6に示すように $\phi = 2.0$ mの場合1.19、 $\phi = 1.0$ mの場合0.89となる。

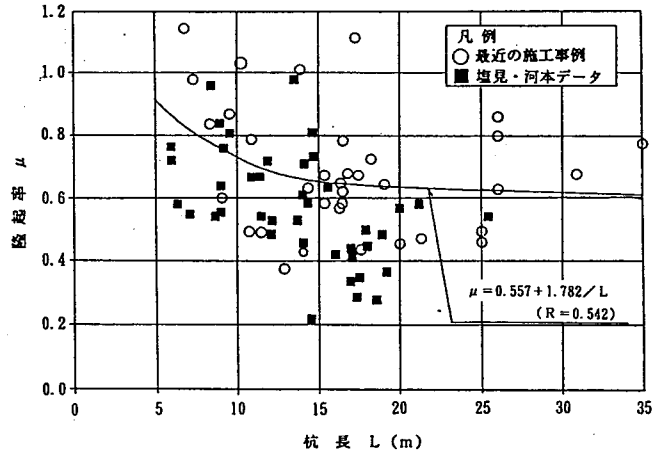


図-3 砂杭長と実測隆起率の関係

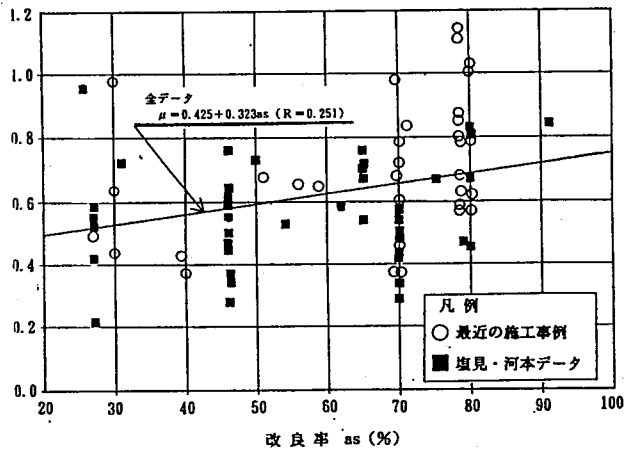


図-4 置換率と実測隆起率の関係

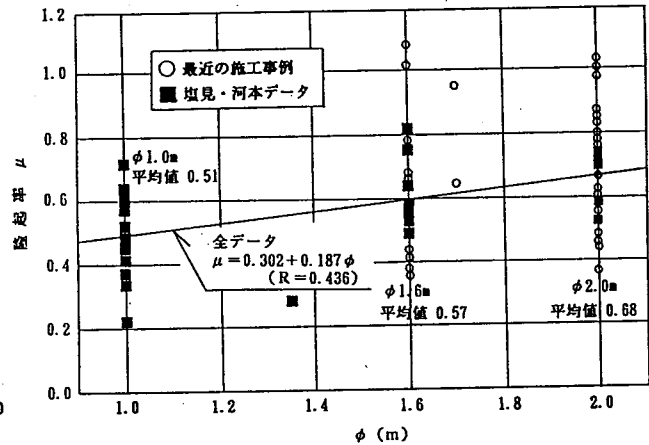


図-5 砂杭径と実測隆起率の分布

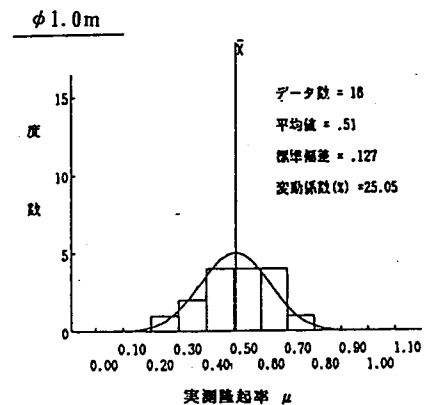
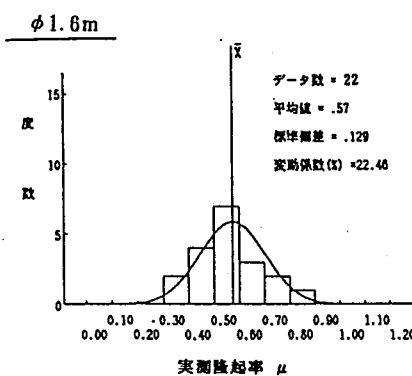
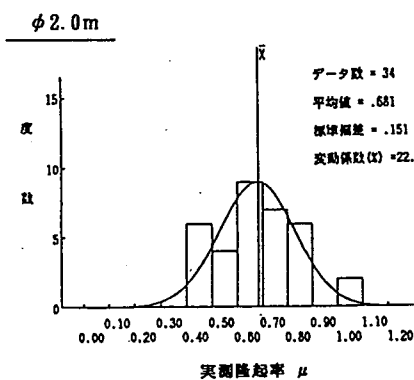


図-6 杭径毎の隆起率の分布

3. 4 新しい隆起率推定式の提案

上記の隆起率に影響を及ぼす3つの要因について重回帰分析により推定式を求めると、

$$\mu = 2.477/L + 0.400a_s + 0.101\phi + 0.011 \dots (3)$$

となる。相関係数は0.614であり、(2)式と比べると推定精度は向上し、実用上十分な推定が可能であると考えられる。図-7に実測値と推定値の比較を示す。

また、従来の標準的な杭径である1.6mのデータのみについて、同様に推定式を求めると、(4)式がえられる。

$$\mu(1.6m) = 1.999/L + 0.678a_s + 0.053 \dots (4)$$

相関係数は0.648であり、(3)式よりも良い相関が得られた。図-8に実測値と推定値の比較を示す。

この(4)式と図-5の関係を用いて任意の砂杭径に対応する回帰式を求めることができ、(5)式が得られる。

$$\mu(\phi) = \mu(1.6m) \times f(\phi) \dots (5)$$

杭径2.0mの場合、 $f(\phi) = 1.19$ であり、推定式は(6)式のようになる。

$$\mu(2.0m) = 2.117/L + 0.718a_s + 0.056 \dots (6)$$

(6)式を用いて推定隆起率($\hat{\mu}$)と実測隆起率(μ)とを比較したものを図-9に示す。

4. 隆起形状の推定

4. 1 砂杭の打設方向を考慮した形状係数

隆起地盤の形状に関しては砂杭の打設方向の影響が大きく、未改良域へ粘性土を押しやる形で発達する。砂杭の打設方向は基本的には一方向打設方式と二方向打ち分け方式に分けられる。

そこで平尾らはこの2つの方法の隆起形状を図-10に示す様な形状にモデル化して隆起形状の推定を行っている。

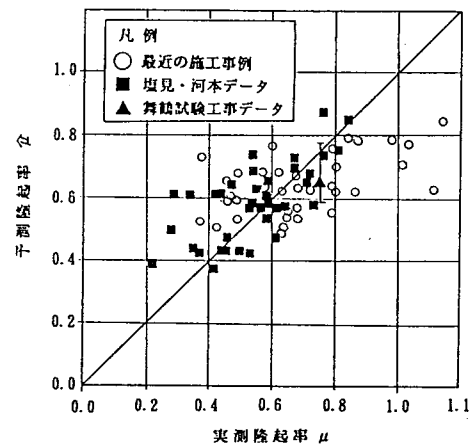


図-7 (3)式による推定値と実測値の比較

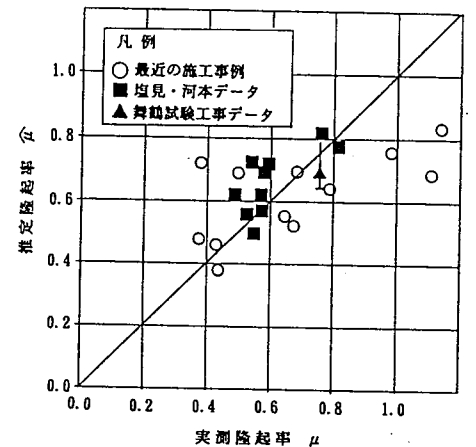


図-8 (4)式による推定値と実測値の比較

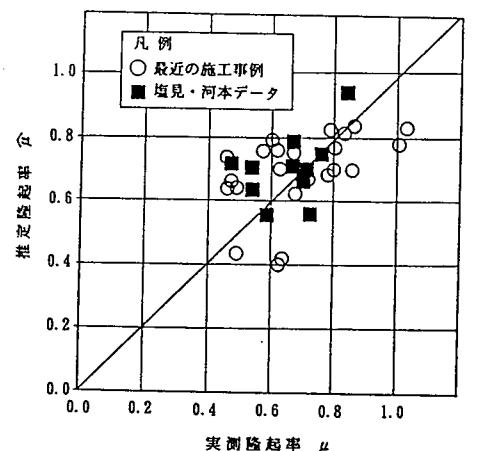
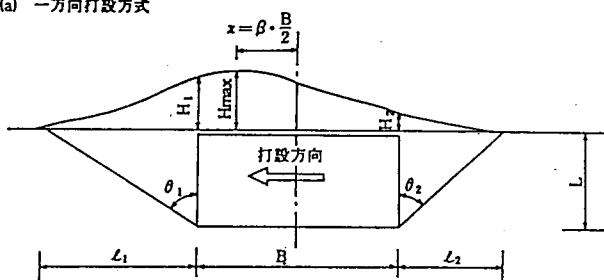


図-9 (6)式による推定値と実測値の比較

(a) 一方向打設方式



(b) 二方向打ち分け方式

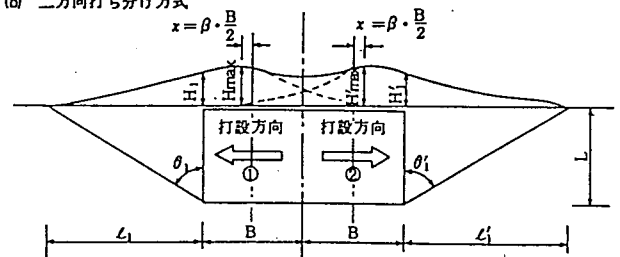


図-10 砂杭打設方式と隆起地盤の形状

最大隆起高さ H_{max} 、改良範囲前端の隆起高さ H_1 、改良範囲後端の隆起高さ H_2 、最大隆起高の生じる地点と中心までの距離 X 、前方隆起範囲 l_1 、後方隆起範囲 l_2 、改良幅 B で隆起の形状を表し、形状係数として H_{max} と H_1 の比 α_1 、 H_{max} と H_2 の比 α_2 、 X と $B/2$ の比 β 、隆起範囲の発生角度を前方方向 θ_1 、後方方向 θ_2 と定義する。表-2 に最近の施工事例より求めた隆起地盤の形状を示す値、およびそれから求めた形状係数を示す。この結果は、平尾らの提案(文献 4)する $\alpha_1=0.85$ 、 $\alpha_2=0.40$ 、 $\beta=0.70$ 、 $\theta_1=60^\circ$ 、 $\theta_2=45^\circ$ とほぼ同様な値である。

表-2 最近の施工事例に基づく形状係数パラメータ

工事名	打設方向	改良仕様			隆起地盤の形状 (m)							形状係数				
		as	B(m)	L(m)	H_{max}	H_1	H_2	X	l_1	l_2	α_1	α_2	β	θ_1	θ_2	
A 岸壁	一方向	0.91	22.5	9.0	3.8	3.4	1.0	6.0	27.0	9.0	0.89	0.26	0.53	71.6	45.0	
B 防波堤	"	0.70	27.0	21.5	4.6	4.3	2.1	10.5	25.5	18.5	0.93	0.46	0.78	49.9	40.7	
C 防波堤	"	0.50	36.0	17.0	3.5	2.5	1.1	5.5	—	8.5	0.71	0.31	0.31	—	26.6	
D 岸壁	"	0.80	15.0	20.0	4.8	4.4	2.7	6.0	25.0	15.0	0.92	0.56	0.80	51.3	36.9	
E 護岸	"	0.79	60.0	16.7	8.3	5.1	2.5	17.0	50.0	20.0	0.61	0.30	0.57	71.5	50.1	
F 岸壁	"	0.79	22.0	35.0	6.5	6.5	4.5	11.0	38.0	30.0	1.00	0.69	1.00	47.4	40.6	
G 護岸	"	0.79	22.4	15.2	5.7	4.1	1.9	11.2	37.0	25.0	0.72	0.33	1.00	67.7	58.7	
H 防波堤	二方向	0.70	15.3	13.0	3.0	3.0	—	4.2	42.0	—	1.00	—	0.55	72.8	—	
			13.6		3.3	3.3		7.2	38.0		1.00		1.06	71.1		
I 護岸	"	0.58	27.0	19.5	3.4	3.3	—	11.5	43.0	—	0.97	—	0.85	65.6	—	
			20.0		3.3	2.8		5.0	30.0		0.85		0.50	57.0		
J 護岸	"	0.55	20.2	20.0	4.2	4.0	—	6.1	26.2	—	0.95	—	0.61	52.6	—	
			15.5	15.7	4.5	4.5		7.3	25.0		1.00		0.94	57.9		
K 岸壁	"	0.70	20.0	18.2	5.2	4.0	—	6.0	55.0	—	0.77	—	0.60	71.7	—	
			20.0		3.5	3.5		3.0	35.0		0.67		0.30	62.5		
											0.85	0.42	0.70	61.5	42.7	

注) 二方向打ち分け方式については、両方向の値の平均値を1データとして扱う

4. 2 隆起形状の推定方法

隆起土量 V は図-11 のように隆起地盤の形状を直線近似することにより、 V_1 から V_5 の合計として(7)式で算定する。

$$V = (C_1 B + C_2 L) H_{max} \dots\dots (7)$$

$$C_1 = \frac{1}{2} + \frac{1-\beta}{4} \alpha_1 + \frac{1+\beta}{4} \frac{1+3\alpha_2}{4}$$

$$C_2 = (\alpha_1 \tan \theta_1 + \alpha_2 \tan \theta_2) / 2$$

また、隆起土量は隆起率 μ と打設砂量 V_s の積として式(8)で求める。

$$V = \mu V_s \dots\dots (8)$$

(7)、(8)式より、 H_{max} は(9)式により表すことができる。

$$H_{max} = \frac{\mu V_s}{C_1 B + C_2 L} \dots\dots (9)$$

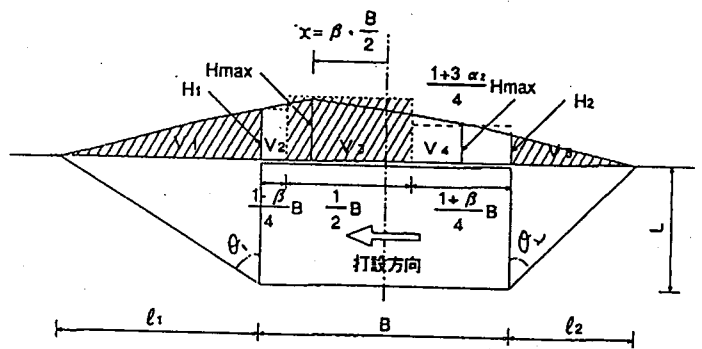


図-11 隆起地盤形状の近似

以上の結果より、隆起地盤の形状は図-12に示す流れに沿って求めることができる。砂置換率 a_s 、平均砂杭長 L 、砂杭径 ϕ を用いて隆起率 μ を算定し、式(8)の隆起土量を算定する。次いで(9)式により H_{max} を算定し、 α_1 、 α_2 を乗じて H_1 、 H_2 を求める。また、改良幅 B および改良深さ L と β 、 θ_1 、 θ_2 より x 、 l_1 、 l_2 を求める。

隆起地盤の形状は海底地盤の特性によって異なることが予想される。本研究で対象としている地盤は軟弱な海底粘性土であり、形状に影響する表層部分の土性は大きくは変わらないものと考えられる。また、隆起率に対する粘性土の強度(一軸圧縮強さ)の寄与率は砂杭長、砂置換率等に比して小さく、棄却されうるが示されている。したがって、海底粘性土地盤を対象とする限りここに示した方法は妥当なものと言える。

5. まとめ

- 1) 隆起率を推定する方法として幾つかの推定式が提案されているが、その解析データはいずれも1985年以前のものである。近年、隆起率について調査してみると実測値は推定値の約1.3倍であり、隆起率の推定精度が問題となっている。
- 2) SCPの最近の傾向として砂杭径の大型化があげられる。そこで隆起率に影響を及ぼす因子として新たに杭径を取り上げると、杭径の増加とともに隆起率も大きくなることが判明した。
- 3) 最近の施工事例のデータをもとにして杭径の因子を加えた新たな推定式を求め、実測値と比較し実用上十分に推定が可能であることを確認した。
- 4) 隆起地盤の形状は砂杭の打設方向に大きく影響を受ける。このことから、打設方向を考慮した隆起地盤の形状をモデル化し、最近のデータよりその形状係数を求めた。
- 5) 形状係数、および隆起率の推定式を用いて、砂杭打設方向を考慮した隆起形状を推定するためのフローを提案した。

<参考文献>

- 1) 一本・末松; サンドコンパクションパイル工法, 土と基礎, 29-5, PP. 13~20, 1985.
- 2) 曾我部; サンドコンパクションパイル工法的设计, 施工の技術課題, 土木学会第36回年次学術講演会 PP. 39~50, 1981.
- 3) 平尾・松尾; 締固め砂杭の打設に伴う海底隆起地盤の活用に関する研究, 土木学会論文集, PP. 169~178, 第364号, 1985.
- 4) 平尾・松尾; 締固め砂杭の打設に伴う粘性土地盤表面の隆起部分の特性に関する研究, 土木学会論文集, 第376号, PP. 277~285, 1986.
- 5) 塩見・河本; SCP打設に伴う隆起土の予測, 第21回土質工学研究発表会, PP. 1861~1862, 1986.
- 6) 福手・樋口・古市・坪井; サンドコンパクションパイルの大規模な打設に伴う海底隆起地盤の形状予測, 第33回土質工学シンポジウム, PP. 23~28, 1988.
- 7) 中野・野町・坪内; 大阪湾フェニックス計画の実施, 土木技術, 44巻, 1989.
- 8) 多賀・河本・高橋 他; 高周波小径サンドコンパクションパイル工法の施工結果, 第27回土質工学研究発表会, PP. 2153~2156, 1992.

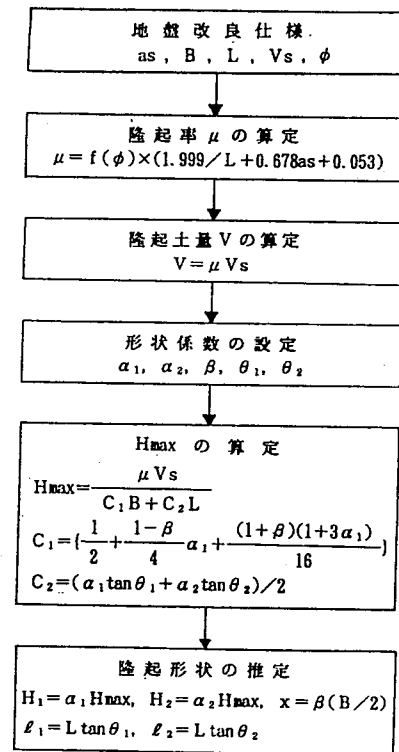


図-12 隆起地盤の形状の推定方法