

浚渫粘土の圧密特性と沈下予測方法に関する研究

—浚渫粘土による神戸空港島埋立を対象にして—

地盤工学分野

岡田 広久

Abstract

浚渫粘土は高含水比で超軟弱な状態にあるため、その圧密特性は低応力域での値が必要となり、かつ含水比依存性を示す。圧密特性は一般に、体積比 f を算術目盛にとった $f\text{-log}p$ 、 $f\text{-log}k$ 、 $f\text{-log}c_v$ 関係として表すが、圧縮性については f を対数目盛で表した $\text{log}f\text{-log}p$ 関係の方がよいという指摘がある。本研究では、初期含水比を変えた遠心自重圧密試験、段階载荷圧密試験を行い、圧密特性を算術 f と対数 f で整理・比較し、対数 f による方が圧密特性を正しく表されることを示す。また、遠心自重圧密試験の圧密曲線と含水比分布のシミュレーション計算を行い、対数 f による圧密特性を用いた方が正しくシミュレートできることを示す。さらに、浚渫粘土による神戸空港島埋立地を対象に鉛直排水工法による地盤改良を含めた沈下予測を行い、実測値とほぼ一致したことを示す。

1. はじめに

臨海地域では、泊地の確保、水深維持、環境改善などのため、大量の浚渫粘土が発生している。この浚渫粘土は、一般に海上の人工島へ埋立処分されているが、この浚渫粘土は超軟弱であるため、大きな沈下が長時間にわたって生じる。また、処分地となる人工島造成には限りがあるので、投入した浚渫粘土を鉛直排水（バーチカルドレーン）工法などによる地盤改良を行って減容化させ、処分地の延命化を図る必要がある。これらを克服するためには、事前の沈下予測に基づく浚渫粘土投入計画を立て、処分地の受入土量を正確に把握することが重要で、新たな浚渫粘土が受け入れられない場合は、さらなる圧密促進工法を併用することも必要となる。ただし、浚渫粘土は通常自然堆積地盤と異なり、高含水比かつ超軟弱な状態であるため、圧密特性は低応力域での値が必要であり、かつ初期含水比状態によって変化する。そこで、浚渫粘土の圧密特性の変化を正確に捉え、それに基づく沈下予測計算を行うことが重要である。

ところで、粘土の圧密特性は圧縮性と圧密速度で表されるが、圧縮性は一般的に、体積比 f を算術目盛にとった $f\text{-log}p$ 関係で表され、圧密速度は $f\text{-log}c_v$ 関係として表される。しかし、 $f\text{-log}p$ 関係は一般に、正規圧密領域で直線になるといわれているが、実は下に凸な曲線となることの方が多い。一方、 f を対数目盛にとった $\text{log}f\text{-log}p$ 関係の方が直線性がよいことが既に報告されている¹⁾。

本研究では、まず、初期含水比を変えた浚渫粘土の段階载荷圧密試験と遠心自重圧密試験を行い、算術 f

と対数 f で表した場合の圧密特性を検討し、両者による遠心自重圧密試験のシミュレーション計算を行って検証した。次に、図-1に示す神戸空港島埋立地を対象に、浚渫粘土埋立および鉛直排水工法による地盤改良も対象とした沈下予測を行い、実測値と比較した。



図-1 研究対象地区

2. 浚渫粘土の圧密特性の検討

2.1 試験方法

用いた粘土は神戸港から採取した浚渫粘土で、その物理特性は液性限界 $w_L=103.1\%$ 、塑性限界 $w_p=36.3\%$ 、

表-1 圧密試験の条件

試験方法	遠心 加速度	排水 条件	初期含水比 w_0 (%)	初期層厚 H_0 (cm)	
段階 载荷 圧密	—	両面	130, 160	4.0	
			190, 220		
			250, 280		
遠心 自重 圧密	100 g	片面	160, 190	8.8, 10.6	
			220, 250	11.8, 13.5	
		両面	160, 190	13.3, 15.3	
			220, 250	17.4, 18.9	
		50 g	片面	190, 220	16.1, 18.0
				250, 280	21.2, 21.5

自然含水比 $w_n=280\%$ である。この粘土の圧密特性を把握するため、初期含水比 w_0 を変化させた段階載荷圧密試験と遠心自重圧密試験を行った。試験条件を表-1に示す。なお、圧密途中の含水比分布を調べるため、遠心力載荷を途中で打ち切った試験(100g 場の $w_0=160$ 、190、220%) も加えた。

圧密諸定数の算出方法は、段階載荷圧密試験では、各段階荷重における沈下量から f と m_v の関係を、 \sqrt{t} 法から f と c_v の関係を求め、 c_v と m_v から f と k の関係を求めた。遠心自重圧密試験では、圧密終了後、深さ方向に含水比を測定し、自重応力と組み合わせる圧縮曲線を求め、さらに、圧縮曲線から f_0 に対応する p_0 を算出し m_v を求めた。また、片面排水条件の初期沈下速度 $v_0=k\gamma_0'/\gamma_w$ (γ_0' は粘土の初期水中単位体積重量) から f_0 に対応する k を求め、 m_v を組み合わせる c_v を算出した。なお、100g 場の両面排水条件では圧縮曲線を、50g 場の片面排水条件では k を求めている。

2.2 算術 f による圧密特性

(1) f - $\log p$ 関係

図-2(1)に両試験で得られた圧縮曲線を f - $\log p$ 関係として示す。 w_0 が大きいほど圧縮曲線が上方に位置しており、明らかに圧縮曲線が含水比に依存している。また、 w_0 が高くなるほどやや下に凸の曲線を描く傾向が見られる。なお、遠心自重圧密試験の $w_0=250\%$ の $p=0.01\sim 0.6\text{tf/m}^2$ 、 $w_0=220\%$ の $p=0.01\sim 0.1\text{tf/m}^2$ で f が大きくなっているのは材料分離による影響(粗粒子が下方に、細粒子が上方に集まる現象)と考えられる。また、図中の実線は両試験の結果と最も長く合うように w_0 ごとに引いたものである。この直線を $f=f_{p=1}-C_c \log p$ ($f_{p=1}$ は $p=1.0\text{tf/m}^2$ の f の値) として表し図中に示す。 $f_{p=1}$ 、 C_c の値は w_0 と強い相関関係が見られ、材料分離の影響を受ける高含水比の粘土でも外挿によって f - $\log p$ 関係を求めることができる。

(2) f - $\log m_v$ 関係

図-2(2)に f - $\log m_v$ 関係を示す。なお、図中に示す実

線は先の f - $\log p$ 式を用いて式(1)により f に対する m_v 値を求めたものである。式(1)には f が分母に含まれているため、 f - $\log p$ 関係は曲線となる。

$$m_v = \frac{C_c}{\ln 10 \cdot f} \cdot \frac{1}{p} \quad (1)$$

f - $\log p$ 関係が w_0 に依存するため、 m_v も w_0 に依存する。段階載荷圧密試験の m_v は実線とほぼ整合している。ただし、遠心自重圧密試験の m_v は f - $\log p$ 式を用いて f_0 に対する値を求めているので当然整合している。

(3) f - $\log k$ 関係

図-2(3)に f - $\log k$ 関係を示す。実験値の分布は w_0 による違いは見られず、ほぼ直線となり、 k は f によって一義的に決まるといえる。ただし、 $w_0=250$ 、 280% の遠心自重圧密試験では材料分離が生じて沈降速度が速くなったので、 k を過大に見積もっている可能性がある。それらを除くと k はやや下に凸の曲線となっているように見える。

(4) f - $\log c_v$ 関係

図-2(4)に f - $\log c_v$ 関係を示す。図中に示す実線は先の f - $\log m_v$ 、 f - $\log k$ 関係から、 $c_v=k/(m_v\gamma_w)$ を用いて計算した f - $\log c_v$ 関係である。 f - $\log c_v$ 関係は m_v の影響を受けて曲線となり、 w_0 によって大きく変化し、 w_0 が大きくなるほど c_v は大きくなる。段階載荷圧密試験の c_v は w_0 が高くなるほど大きく、勾配が大きくなる傾向がみられるが、計算値との整合性はやや悪い。遠心自重圧密試験の c_v は f - $\log k$ 関係のずれを反映して $w_0=160$ 、 220% で計算値との整合性は悪い。

2.3 対数 f による圧密特性

(1) $\log f$ - $\log p$ 関係

図-3(1)に図-2(1)と同じ試験結果による圧密曲線を $\log f$ - $\log p$ 関係として表す。 f - $\log p$ 関係と同様に、 w_0 が高いほど圧縮曲線は上方に位置し、含水比依存性が見られる。 w_0 が高いほど圧縮曲線は直線的となるが、 w_0 が低いほど上に凸の曲線を描く傾向がみられる。なお、 $w_0=250\%$ の $p=0.01\sim 0.6\text{tf/m}^2$ で f が大きくなっている

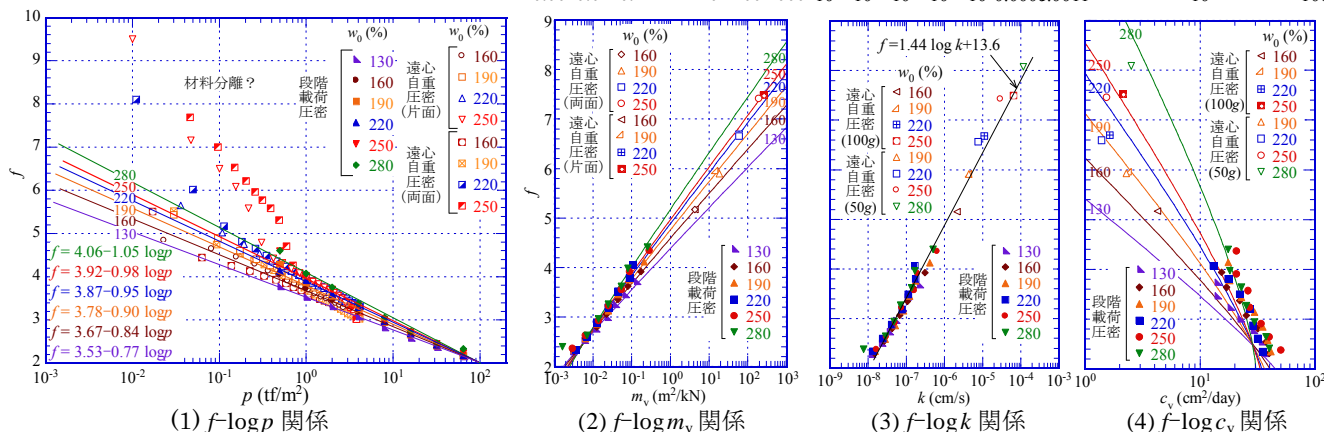


図-2 算術 f による圧密特性

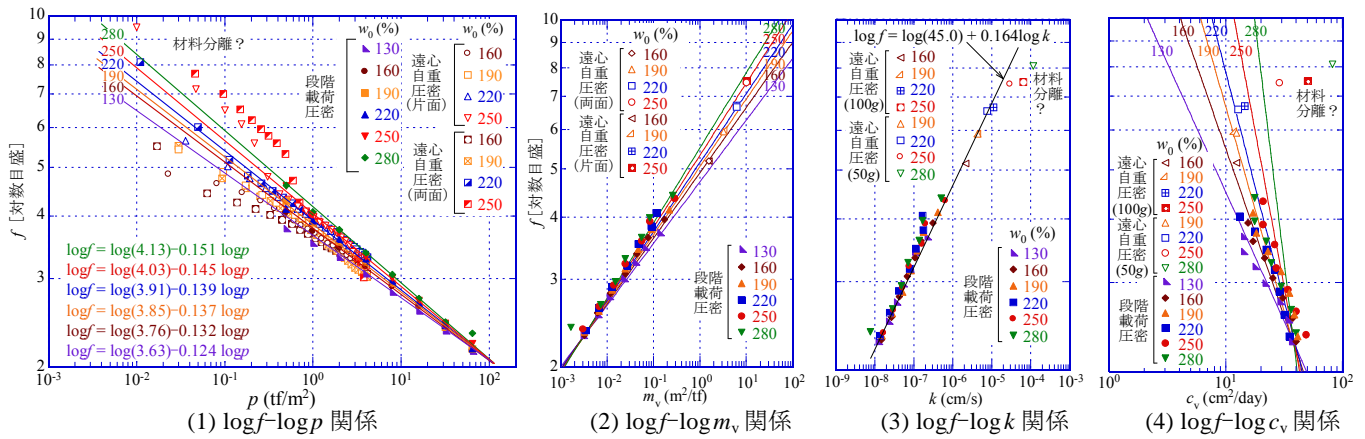


図-3 対数 f による圧密特性

るのは、やはり材料分離による影響である。図中に示す実線は両試験結果と最も長く合うように w_0 ごとに引いたものである。これを $\log f = \log f_{p=1} - C_c' \log p$ として表し図中に示す。 $f_{p=1}$ 、 C_c' は w_0 と強い相関関係が見られ、やはりこの関係を用いれば高含水比の粘土でも外挿によって $\log f - \log p$ 関係が求めることができる。

(2) $\log f - \log m_v$ 関係

図-3(2)に $\log f - \log m_v$ 関係を示す。図中に示す実線は先の $\log f - \log p$ 式を用いて式(2)により任意の f に対する m_v 値を求めたものである。この $\log f - \log m_v$ 関係は直線となる。

$$m_v = \frac{C_c'}{p} \quad (2)$$

段階载荷圧密試験における m_v 値は式(2)による値と整合性が良い。なお、遠心自重圧密試験による m_v は w_0 ごとの $\log f - \log p$ 関係を用いて表しているため当然整合している。

(3) $\log f - \log k$ 関係

図-3(3)に $\log f - \log k$ 関係を示す。実験値の分布は w_0 による違いがみられず、直線分布となっている。やはり k は f によって一義的に決まると考えられる。ただし、 $w_0=250$ 、 280% については材料分離の影響により k が過大になっていると考えられる。

(4) $\log f - \log c_v$ 関係

図-3(4)に $\log f - \log c_v$ 関係を示す。図中に示す実線は、先の $\log f - \log m_v$ 、 $\log f - \log k$ 関係から $c_v = k / (m_v \gamma_w)$ を用いて計算した $\log f - \log c_v$ 関係であり、直線となる。 $\log f - \log c_v$ 関係は、 m_v の影響を受けて w_0 によって変化し、 w_0 が高いほど c_v は大きくなる。ただし、図-2(4)に比べると変化率は小さく、全体的に c_v は大きくなっている。これは、 $\log f - \log m_v$ の方が $f - \log m_v$ よりも w_0 による変化が小さく、同じ f に対する m_v が $\log f$ の方が小さいためである (図-2(2)、図-3(2)参照)。段階载荷圧密試験の c_v は計算値との整合性がよい。遠心自重圧密試験の c_v は $w_0=250\%$ 、 280% は材料分離の影響で計算値よりも大きな値となっているが、 $w_0=160$ 、 190 、

220% では計算値との整合性はよい。

以上より、 $\log f - \log p$ の圧縮曲線は w_0 が高くなるほど直線性が良くなること、 $\log f - \log c_v$ 関係は直線で表され、実験値との整合性も良いことから、対数 f の方が圧密特性を正しく表すことができるといえる。

2.4 遠心自重圧密試験のシミュレーション

(1) 圧密曲線

2.2、2.3 で求めた算術 f と対数 f による圧密特性を用いて先の遠心実験のシミュレーション計算を行った。計算方法は式(3)に示す三笠の有限ひずみ圧密理論の ε 式を用いており、 c_v 変化と自重を考慮している。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \exp(2\varepsilon) \left\{ \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z_0^2} + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z_0} \right)^2 \right\} + \exp(2\varepsilon) \frac{dc_v}{d\varepsilon} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)^2 - \exp(\varepsilon) \frac{d(c_v m_v \gamma')}{d\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z_0} \quad (3)$$

対数 f と算術 f による計算結果と、遠心自重圧密試験の結果を比較した圧密曲線を図-4 に示す。図(1)の片面排水では、 $w_0=160\%$ の最終沈下量は実験値の方が少し大きくなっているが、曲線の分布は算術 f よりも対数 f の方が実験値に近い分布となっている。また、 $w_0=190$ 、 220% では対数 f の方が実験値と整合している。しかし、 $w_0=250\%$ では材料分離のため沈下が早くなっていると考えられ、対数 f 、算術 f と合わなかった。図(2)の両面排水では $w_0=160$ 、 190% の最終沈下量は、実験値の方が少し大きくなっているが、経過時間 $t_m=900\text{min}$ までは対数 f とほぼ一致していることがわかる。一方、 $w_0=220$ 、 250% では材料分離の影響が見られ対数 f と一致せず、実験値の沈下が早くなっている。

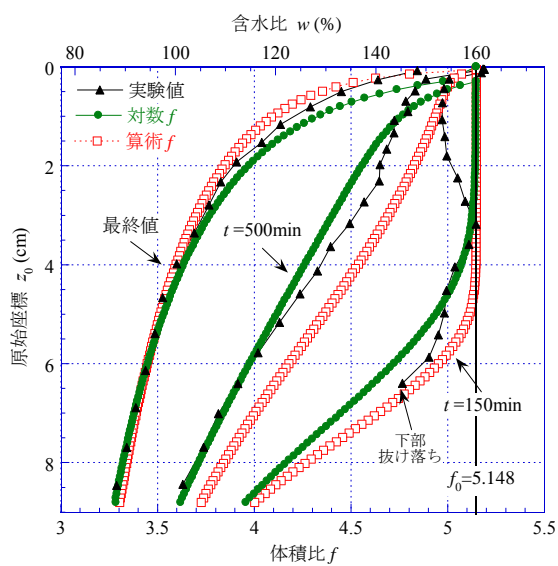
ここで、対数 f と算術 f による圧密速度を比較してみると、 $w_0=160$ 、 190% では算術 f の方が圧密速度は遅くなっている。これは、算術 f の c_v の方が小さいためである (図-2(4)と図-3(4)参照)。一方、 $w_0=220$ 、 250% ではその関係が逆転している。算術 f の c_v の方が小さいにも関わらず、圧密速度が速くなるのは、式(3)の右

辺第3項(自重項)内の m_v が $1/p$ を含み(式(1)参照)、 w_0 (f_0) が大きくなるほど、 p_0 が小さくなる ($w_0=220$, 250%でそれぞれ $p_0=10^{-3}$, 10^{-4} tf/m²オーダーとなる)ため、 $1/p$ が大きくなり、第3項成分による圧密進行が大きくなるためである。対数 f でも同様に $1/p$ を含むが(式(2)参照)、 w_0 が大きくなっても算術 f ほど $1/p$ が大きくなり($w_0=220$, 250%ともに $p_0=10^{-2}$ tf/m²オーダーとなる)。また、対数 f の方が安定した圧密計算(差分間隔を粗くできる)が可能である。

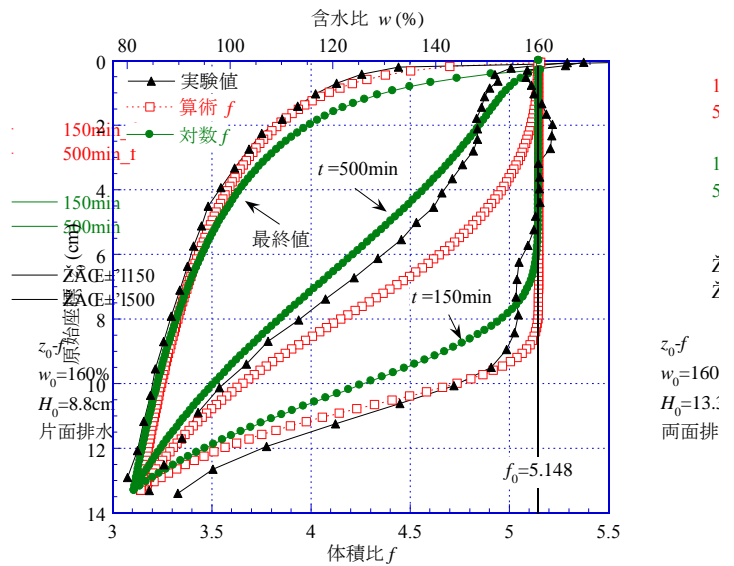
(2) 含水比分布

遠心自重圧密試験を所定の荷重時間 t で止めた試験結果($w_0=160$ の片面、両面)と算術 f と対数 f の計算結果を比較した含水比分布を図-5に示す。深度は圧密前後の体積比 f_0 , f_t を用いて原始座標で示している。また、参考のため最終値の含水比分布も図に示している。なお、 $t=150$ minでは粘土が非常に軟弱であったため、試料のサンプリングが難しく、図(1)片面排水では下部が抜け落ち、図(2)両面排水では含水比にバラツキがみられ、算術 f と対数 f の計算値ともに実験値との整合性が悪い。しかし、 $t=500$ minでは片面排水、両面排水ともに対数 f の方が実験値に近づいている。また、図は省いたが、 $w_0=190\%$ でも $t=500$ minで同様の実験を行っており実験値は片面、両面ともに対数 f とほぼ同じ分布となる結果が得られた。ただし、 $w_0=220\%$ では、材料分離の影響で計算値とは合わなかった。

以上から、圧密曲線は、材料分離の影響がみられるケースを除けば、対数 f の方が算術 f よりも実験値と整合する。また、含水比分布も対数 f の方が実験値を再現しており、浚渫粘土の自重圧密を正しくシミュレートできるのは対数 f であるといえる。なお、算術 f では w_0 が高くなるほど $1/p$ の値が大きくなるため、圧密速度を過大に見積もると考えられる。



(1) 片面排水



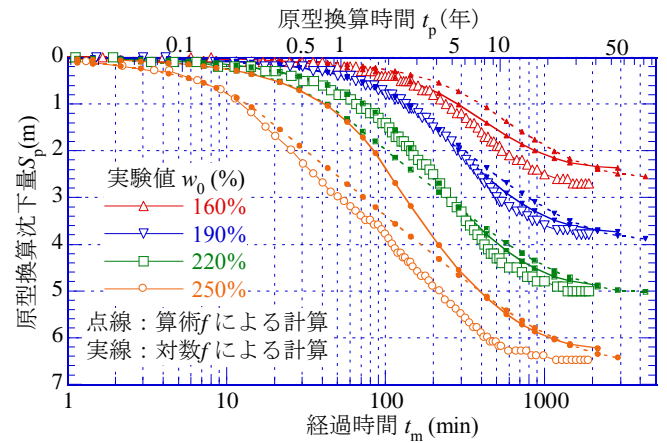
(2) 両面排水

図-5 計算値と実験値の含水比分布の比較 ($w_0=160\%$)

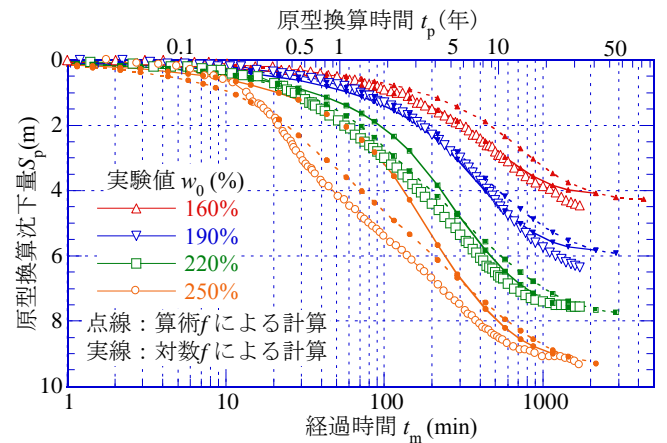
3. 浚渫粘土による神戸空港島埋立の沈下計算

3.1 浚渫粘土埋立のシミュレーション計算

図-1に示した埋立対象地区を拡大した平面図を図-6に示す。なお、平面図には計算対象地点(対象地区の中心点、●)、ドレーン打設後の沈下計測地点(●)も記載している。埋立が行われている池は、周りが緩傾斜の護岸で囲まれているため、すり鉢状になってお



(1) 片面排水条件



(2) 両面排水条件

図-4 計算値と実験値の圧密曲線の比較

り中央部で最も深くなっている。また、底部には透水性の良い敷砂が設けられている。

浚渫粘土投入による埋立履歴として、投入前後の年月日と粘土層上面の標高を表-2の左側に示す。ところで、先の圧密特性を求めた浚渫粘土（二次浚渫粘土と呼ぶ）は2008/9/24から投入されたものであるが、それ以前から浚渫粘土の投入（一次浚渫粘土）が行われている。この一次浚渫粘土は神戸港の浚渫粘土の他、川や運河の浚渫土砂も一部混ざっているが、一次浚渫粘土の大部分は粘土であり、また後の沈下計算と整合性がとれていることから、この粘土の圧密特性は二次浚渫粘土と同じものとして計算した。なお、本計算は対数 f による圧密特性を採用し、 $\log f - \log p$ 、 $\log f - \log c_v$ 、関係は図-3(1)、(4)に示す $w_0=280\%$ での値を用いた。

埋立をシミュレートした自重圧密計算結果を表-2の右側に示す。計算は、表の太字で示す浚渫粘土投入直前の実測値に合うように投入層厚を繰返し計算で求めている。実測値と最後に合わせた2010/2/4以降、計算値と実測値の整合性はよい。

次に、計算値と現地のチェックボーリングで測定された含水比分布を図-7に示す。2009/6/10で比較すると、実測値は多少のバラツキがあるが、二次浚渫粘土では計算値は実測含水比の範囲の中央付近を通過しているが、一次浚渫粘土の実測値は $w=50\% \sim 100\%$ となっており計算値よりも低い。これは、一次浚渫粘土の不均質性によるものと考えられる。2010/1/15、4/13の二次浚渫粘土では、計算値は実測値の範囲のほぼ中央を通過しているが、一次浚渫粘土ではやはり不均質性のため、実測値の方が低くなっていると考えられる。

3.2 ドレーン打設後の沈下促進効果の予測

図-8にPBDの打設状況と浚渫粘土層に作用する有効応力の状態を表したものを示す。なお、埋立地の水位はK.P.+7.2m、下面の敷砂の水位はK.P.+2.0mである。PBDの打設により、まずは粘土層の排水距離が短くなるため圧密が促進される。さらに、PBDは先端1.5mでシール（遮水）しているため、粘土層の上面と下面で水位差（ $\Delta H=5.2m$ ）が発生し、粘土層内の有効応力が増大（ $\Delta p=5.2tf/m^2$ ）するため、水位低下による圧密促進も期待できる。

一般に、鉛直排水工法に対する沈下予測計算方法として、式(4)のBarron解が用いられている。

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \quad (4)$$

$$\text{ここに、} F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad T_h = \frac{c_h}{d_e} t$$

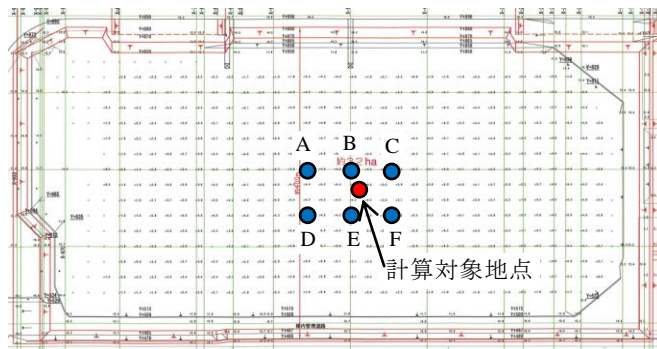


図-6 埋立対象地区の平面図

表-2 埋立履歴のシミュレーション

	浚渫投入回数	年月日	経過日数 (day)	実測値 K.P.(m)	投入層厚 (m)	計算結果 K.P.(m)
一次浚渫粘土	1	2001/8/18	0	-13.5	2.64	-13.5
		2001/10/5	48	-12.1		-11.22
	2	2002/1/24	159	-11.7	1.48	-11.68
		2002/3/4	198	-10.9		-10.43
	3	2002/9/27	405	-10.9	2.80	-10.90
		2002/11/16	455	-9.6		-8.41
	4	2004/2/24	920	—	0.68	-9.40
		2004/3/3	928	—		-8.78
	5	2004/4/15	971	-8.9	6.44	-8.91
		2005/5/15	1366	-4.9		-4.38
6	2006/12/5	1935	-5.4	3.36	-5.41	
	2007/2/6	1998	-4.2		-2.41	
二次浚渫粘土	7	2008/9/24	2594	-3.7	3.52	-3.70
		2008/12/5	2666	-0.65		-0.61
	8	2008/12/16	2677	-0.65	3.96	-0.66
		2009/3/5	2756	2.7		2.82
	9	2009/3/26	2777	2.7	1.08	2.71
		2009/5/5	2817	3.5		3.54
	10	2009/7/1	2874	3.2	3.40	3.21
		2009/9/30	2965	6.5		6.06
	放置	2010/2/4	3092	5.4	—	5.41
		2010/4/7	3154	5.1		5.16
2010/4/21		3168	5.1	5.10		
2010/5/6		3183	4.9	5.04		

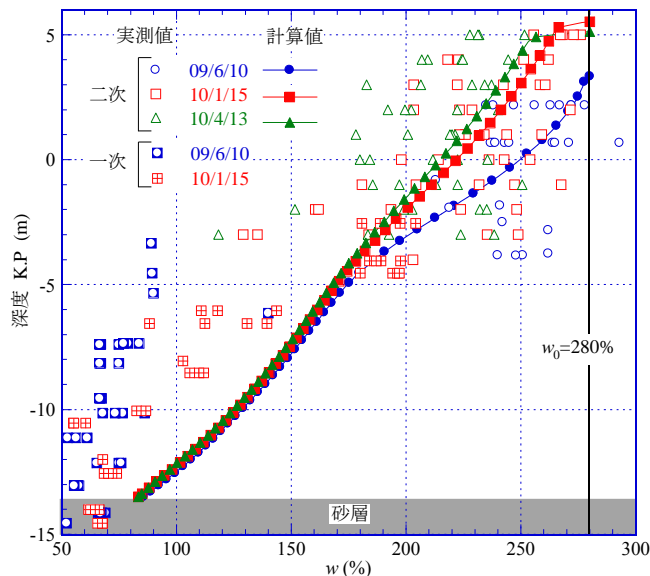


図-7 浚渫粘土埋立地の含水比分布

ここに、 T_h は時間係数、 t は実時間、 c_h は水平方向の圧密係数、 d_e はドレーン有効径、 d_w はドレーン直径である。 d_e は現地のドレーンピッチ $d=1.3\text{m}$ の三角形配置より $d_e=1.05d$ 、 d_w はドレーン幅 $a=94\text{mm}$ 、厚み $b=3.9\text{mm}$ より、 $d_w=2(a+b)/\pi$ として計算した。

また、自重圧密場では一次元圧密が無視できないので、Carrillo²⁾による Barron の圧密度 U_r と一次元圧密の圧密度 U_z を合成して圧密度 $U(t)$ を求める方法を採用した。ただし、一次元圧密の U_z は先の計算手法を用いた。

$$U(t) = 1 - (1 - U_z(t))(1 - U_r(t)) \quad (5)$$

今回の沈下予測方法では、まず Barron 解で用いる水平方向の圧密係数 c_h は軟弱粘土であるため、 $c_h=c_v$ とした。また、Barron 解では本来圧密中の c_h の変化を考慮できないが、今回のように自重圧密がある程度進行した地盤に対するドレーン打設では、深度方向に粘土の状態が異なるので、深度方向の c_h の変化を考慮する必要がある。そこで、ドレーン打設前の粘土層を 1m ごとに分割して層状地盤として扱い、ドレーン打設前の体積比 f_{ij} と、打設後圧密が終了する時の f_{ij} の平均値に対応する c_h を求め、深度方向の c_h の変化を擬似的に考慮した。なお、ドレーン打設による水位差による有効応力増分を上載荷重 ($\Delta p=5.2\text{tf/m}^2$) として与え、荷重は実施工に合わせて 19 日の漸増荷重とした。なお、粘土層上部 1.5m はドレーンに対する不透水層の役割を果たすものなので、その沈下は無視した。

図-9 に二次浚渫粘土上面の標高として計算値と実測値を示す。図中に示す計測地点は図-6 に示す計算対象地点付近の 6 地点である。計算値は沈下量が最も大きい地点 B、C の実測値とほぼ一致している。ただし、3367 日では、新たに投入された三次浚渫粘土の影響を受けて実測値の方が低くなっている。一方、その他の地点では計算値の方がやや沈下が大きい。これは、ドレーンの打設で周辺の粘土が乱れ、粘土の透水性が低下したためと考えられる。

4. 結論

本研究は、浚渫粘土を対象に、算術 f 、対数 f による圧密特性の表し方の検討を行い、その結果を踏まえて、実地盤の浚渫粘土埋立のシミュレーション計算と地盤改良に対する沈下予測を行った。本研究で得られた知見を以下に述べる。

- (1) 算術 f による圧密特性の表し方では、圧縮性と透水性の線形性を肯定すると m_v や c_v の関係は非線形となる。一方、対数 f では、圧縮性と透水性の線形性を肯定すると m_v や c_v の関係も線形となり、圧密特性を正しく表わすことができる。
- (2) 浚渫粘土の圧縮性は初期含水比 w_0 に依存するが、

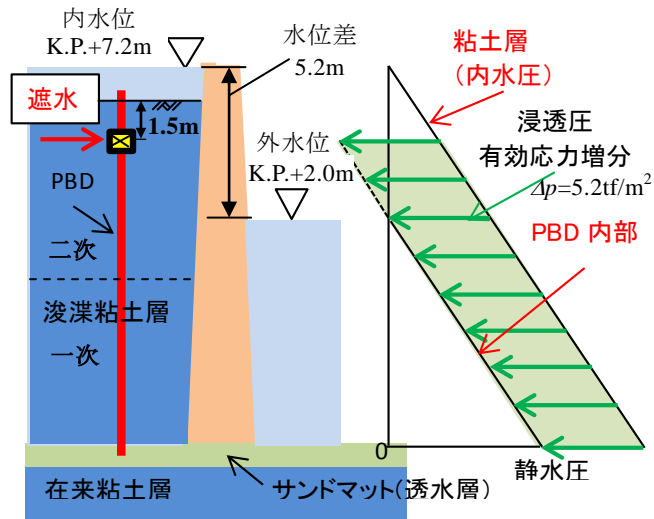


図-8 ドレーン打設状況と発生する有効応力

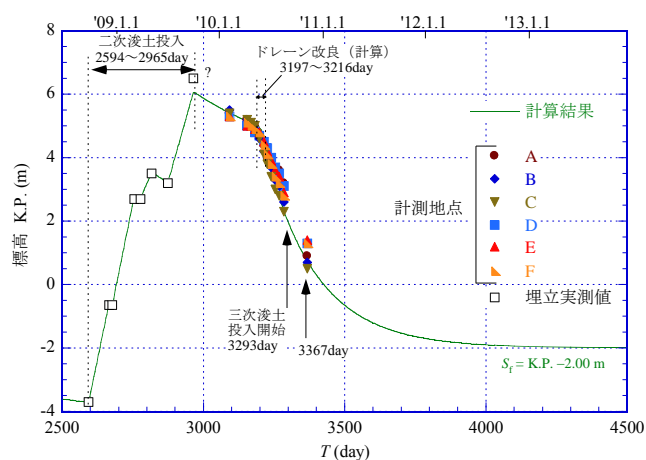


図-9 ドレーン打設後の計算値と実測値

$\log f$ - $\log p$ の圧縮曲線は w_0 が高くなるほど直線性が良くなること、 $\log f$ - $\log c_v$ 関係は直線で表され、実験値との整合性も良いことから、対数 f の方が圧密特性を正しく表すことができるといえる。

- (3) 浚渫粘土の自重圧密過程をシミュレートすると、圧密曲線、含水比分布ともに対数 f による圧密特性の方が実験値との整合性はよい。
- (4) 対数 f による圧密特性を用いて、神戸空港島を対象にした浚渫粘土の自重圧密過程をシミュレートすると、圧密曲線、含水比分布ともに実測値とほぼ一致した。
- (5) 粘土層を層状地盤に分けて深度方向の c_h の変化を擬似的に考慮した Barron 解と一次元圧密と合成する沈下予測手法を開発し、それによる沈下予測値は実測値とほぼ一致した。

なお、神戸空港島埋立地区では、この沈下予測に基づいて三次浚渫粘土が投入され、昨年 12 月末に無事に工事が終了した。

<参考文献>

- 1) Butterfield, R.: A natural compression law for soils (an advance on e-log p), Geotechnique, Vol. 29, No.4, pp.469-480, 1979.
- 2) Carrillo, N.: Simple Two and Three Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils, Journ. Math. Phys., 21-1, 1942.

討 議 等

◆討議 [大内先生]

粘土地盤の圧密において、遠心模型載荷実験の模型と実地盤との時間の相似則について。

◆回答：実地盤と模型地盤との時間の相似則は、遠心加速度 g の 2 乗になる。例えば、 $g=100$ の時、模型上での時間 $t_m=150\text{min}$ での圧密挙動は、実地盤では $t_p=150 \times 100 \times 100=1.5 \times 10^6\text{min} \doteq 1041.7\text{day}$ となる。

模型実験を行う場合、相似則を満足する必要がある。相似則を求め方は、時間、長さ、密度の次元をもった物理量を組み合わせて、無次元数を算出する(例えば、レイノルズ数 R_e 、フルード数 F_r など)。無次元数が等しくなれば、相似則が満足される。

圧密における無次元数の一つとして、時間係数 T_v が挙げられる。

$$T_v = c_v \frac{t}{H^2}$$

$$\pi = \rho G H m_v$$

また、遠心実験における無次元数 π は以下で表される。実地盤の粘土層厚 H_p と模型の粘土層厚を H_m としてその縮尺を $n = H_p/H_m$ とすると、 T_v の相似則を満足するためには、 $n^2 = t_p/t_m$ となる。一方で、 π を満足するためには、 $n = G_p/G_m$ となる。

◆討議 [重松先生]

算術 f と対数 f の実験値の定量的な整合性はどのようになっているのか。実験値を対数でとると微妙な変化をとらえられないのではないのか。

◆回答：実験値を対数で表すと微妙な変化が捉えにくくなるという点もあるが、粘土の一般的な傾向として、 $f\text{-}\log p$ で表すと粘土の構造の発達により下に凸の曲線となり、直線にはならない傾向が見られる。しかし、 $\log f\text{-}\log p$ で表すと直線性が良くなることが知られている¹⁾。本研究では、圧密特性を再度見直して算術 f 、対数 f でシミュレーションを行うと、対数 f の方が実験値と近くなったことから、整合性がとれていると判断した。

◆討議 [松村先生]

実測値が無ければ求めにくいのか。

◆回答：実験値

浚渫粘土地盤は、時間が経つにつれて含水比や湿潤密度などが大きく変わるので、実測値に基づいて埋立

が開始された時点から、シミュレーションを行う必要がある。

◆討議 [重松先生]

この研究では、粘土の最終値を重要視しているのか。それとも、圧密過程を重要視しているのか。

◆回答：本研究では、最終値も含めた圧密過程を重要視している。