

汚泥の処理処分に関する研究 (第14報)

——圧密脱水を併用した汚泥固化処理の検討 (その2)——

喜田大三 久保博
漆原知則

Studies on Treatment and Disposal of Mud (Part 14)

——Examination of Solidification Treatment with Consolidation after Mixing of Solidifier (2)——

Daizo Kita Hiroshi Kubo
Kazunori Urushibara

Abstract

“Solidification with consolidation method” is very effective for treating weak mud. The efficiency of this method is remarkable with volume decrease on solidification of mud mixed with a solidificant such as cement or lime. Accordingly, the feature of consolidation of solidificant-mixed mud was examined. (1) The relations between H_0 (length of maximum drainage path) and S (settlement) were the following: $S = \alpha \cdot H_0$ when $H_0 \leq 1$ cm, and $S = \sqrt{\beta \cdot H_0 + \gamma + \delta}$ when $H_0 > 1$ cm, where α , β , γ and δ are constants. (2) The time t for nearly equilibrated settlement was shown as $t = T \cdot H_0 / C_v$. In this equation, T is time constant based on degree of consolidation, $U_T = (\sqrt{\beta \cdot H_0 + \gamma + \delta}) / \alpha \cdot H_0 \times 100$ (%), and C_v is coefficient of consolidation when $H_0 \leq 1$ cm. (3) The water content w_z of consolidated mud at z (length from drainage face) was simulated with U_z (degree of consolidation at z) in U_T determined by consolidation theory, and the water content was calculated from U_z . And, the strength at z of consolidated mud depended on its water content.

概 要

軟弱泥土を処理する圧密併用固化工法(仮称)では、固化材を混合した土を圧密した際の体積減少の程度が大きいほど、当工法の効果は著しい。そこで、固化材(セメント、石灰)混合土の圧密における排水距離 H_0 と沈下量 S 、沈下がほぼ落着くまでの時間 t 、および改良土の性状との関係を検討した。試験結果は、実用規模において、それぞれの関係を検討する際の有益な資料になる。

(1) S と H_0 の関係は次の実験式とよく一致した。 $H_0 \leq 1$ cm では $S = \alpha H_0$ 、 $H_0 > 1$ cm では $S = \sqrt{\beta H_0 + \gamma + \delta}$ 。 α 、 β 、 γ 、 δ は定数。
(2) t と H_0 の関係は、 $t = T \cdot H_0 / C_v$ (T : 時間係数、 C_v : 圧密係数) で求められる。ここで、 T として、 $U_T = (\sqrt{\beta H_0 + \gamma + \delta}) / \alpha H_0 \times 100$ (%) から求めた時間係数、また C_v として、固化材の硬化がほとんどない場合 ($H_0 \leq 1$ cm) の試験で求めた圧密係数を適用する。

(3) 排水面からの距離 z と含水比 w_z の関係は次の方法による計算値とよく一致した。その方法は、 U_T における各点の圧密度 U_z を圧密理論によって求め、 U_z を w_z に換算する方法である。また、 z と強度 q_u の関係は固化材の種類で異なるが、 w の影響によって支配される。

1. まえがき

建設工事では、軟弱な泥土(汚泥)を取扱う機会が多い。その代表的な工事には、河川や港湾などのヘドロ浚渫工事、地中連続壁工事および泥水シールド工事などが挙げられる。これらの泥土は高含水比で、非常に軟弱な

ために、適切な処理処分が行なわれなければ、周辺環境を汚染したり、工事の進行を妨げることになる。そのため近年、軟弱泥土のさらに有効な処理工法の開発が要望されている。

本報では、より優れた泥土処理工法を開発するため、既報¹⁾の「圧密脱水を併用した固化処理」(以下、圧密併

用固化という) に関して、その後行なった研究成果の一部を述べる。この圧密併用固化では、圧密圧力を加える方法としていくつかの方法が考えられるが、ここでは気密性二重袋に入れた固化材混合土を真空吸引することによって、大気圧で圧密脱水する方法を基本に考えた。

ところで、圧密併用固化では、固化材混合土を圧密した際の体積減少が大きいかほど、処理効果も著しい。しかし、固化材混合土の圧密特性は一般の粘性土と異なる点が多いため、一般の粘性土の圧密理論をそのまま適用できない。したがって、固化材混合土の圧密特性を把握することは、圧密併用固化を実用化するために非常に重要と考えられ、室内試験によって各種検討を行なった。その結果、有益な知見を得たので、報告する。

2. 圧密併用固化工法(仮称)とは

圧密併用固化工法とは、汚泥に固化材を混合したのち、速やかに圧密脱水することによって汚泥を改良する工法である。当工法は、筆者らの数年間にわたる汚泥固化処理の研究において、考案された工法の一つである(特許出願中、特願52-1733および特願56-18088)。

圧密併用固化工法の基本フローは図-1 のようである。汚泥と固化材をミキサーで混合する。そして、固化汚泥を速やかに圧密袋に入れ、袋内を真空吸引し、袋に大気圧をかける。その際の圧密袋はフレキシブルな気密性のもので、分離水のみが排除できる構造になっている。その結果、袋内の汚泥は脱水され体積収縮する。このようにして、改良された汚泥は袋から取出し、所定の処分あるいは有効利用を行なう。

この工法の特長として以下のことが挙げられる。(i) 固化材量を減少できる。(ii) 処理後の土量を減少できる。(iii) 固化困難な極高含水比ヘドロ、有機ヘドロも固化できる。(iv) 短時間で大きな強度が得られる。

このような特長を有する当工法は各種の軟弱な汚泥に適用でき、特に従来、固化処理が困難であった高含水比ヘドロや有機ヘドロで効果が著しい。

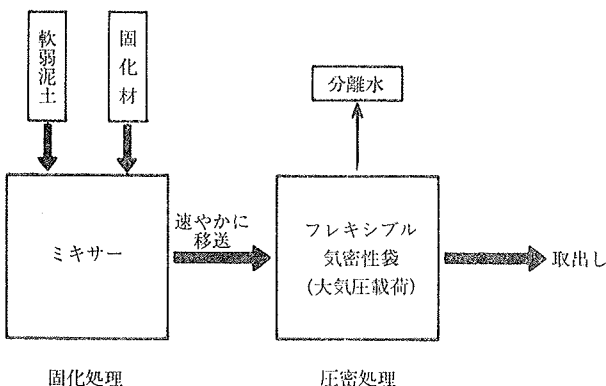


図-1 圧密併用固化的基本概念図

3. 圧密併用固化的圧密特性に関する検討事項

圧密併用固化的効果は、圧密脱水の程度に大きく影響される。圧密脱水における沈下量(収縮量)および圧密時間は、対象土が一定の場合、圧密圧力 ΔP と最大排水距離 H_0 によって決まる。ここでは、大気圧を利用し、 ΔP は一定とみなされるので、 H_0 の影響を主体に考える。

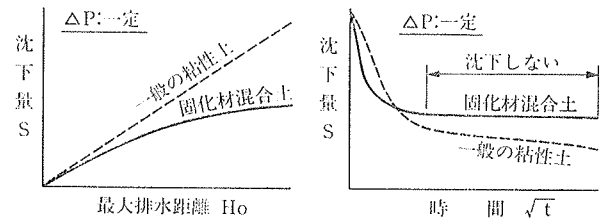


図-2 固化材混合土と一般の粘性土の圧密沈下の相違

したがって、圧密袋を用いて大気圧で圧密する場合、圧密袋の大きさおよび形状が圧密脱水の程度に及ぼす影響を把握することは非常に重要である。

一般の粘性土の沈下量 S および圧密時間 t は、テルツァギーの圧密理論によって求められる。

$$S = m_v \cdot \Delta P \cdot H_0 \quad \dots\dots\dots [1]$$

m_v : 体積圧縮係数

$$t = \frac{H_0^2 \cdot T}{C_v} \quad \dots\dots\dots [2]$$

C_v : 圧密係数, T : 時間係数

しかし、筆者らの従来の研究によると、固化材混合土の圧密沈下は一般の粘性土とかなり異なる。すなわち、図-2 に示すように、固化材混合土の S は H_0 に比例せず、また時間 \sqrt{t} との関係では初期に著しく、一定時間で完全に平衡に達する。そして、このように特異的な圧密沈下を示すので、圧密後の改良土の排水面からの距離に伴う強度および含水比の変化も当然、一般の粘性土と異なると考えられる。

そこで、圧密併用固化的圧密沈下および改良土の性状に関して、本報告では以下のことを検討する。

- (i) 最大排水距離 H_0 と沈下量 S の関係
- (ii) 最大排水距離 H_0 と圧密沈下がほぼ落ち着くまでの時間 t との関係
- (iii) 改良土の排水面からの距離と強度および含水比の関係

4. 供試土と試験方法

供試土は某港湾の浚渫土砂埋立処分場から採取した。その性状を表-1 に示す。供試土は微細粒子に富み、自然含水比163%で、液性指数1.78の超軟弱な泥土である。

この泥土に固化材(セメント、消石灰)をスラリー状($W/C=1$)にして乾土当り5%添加し、ソイルミキサー

自然含水比 (%)	粒度分布			アッターベルグ限界			Gs	lg.loss (%)
	粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)	W _L (%)	W _P (%)	PI		
163	30	67	3	110	42	68	2.73	12.3

表一 泥土の性状

試料名	乾土当り固材材量 (%)	両面排水			片面排水		
		Ho(cm)	φ (cm)	h (cm)	Ho(cm)	φ (cm)	h (cm)
セメント混合土	5%	0.25	0.5	1	4	10	20
		6	6	6	10	10	10
石灰混合土	5%	--	--	1	--	10	20
		--	--	6	--	10	10

Ho: 最大排水距離(概略値), φ: 直径

表二 圧密試験の試料と条件

で5分間混合して固材材混合土を作製した。そして、固材混合土が硬化しないうちに圧密容器に移し、荷重0.5 kgf/cm² で沈下が落ち着くまで圧密を行なった。なお、圧密圧力は実際に大気圧で加圧する際の圧力を想定して0.5 kgf/cm² とした。

圧密試験の試料および条件を表一2に示す。試料はセメント混合土、石灰混合土である。また、最大排水距離H₀ (片面排水の場合、試料高さと同じ) は0.25~20 cm とした。そして、H₀=20 cm の試料については、圧密試験後に試料を取出し、深さごとに一軸圧縮強さおよび含水比を測定した。

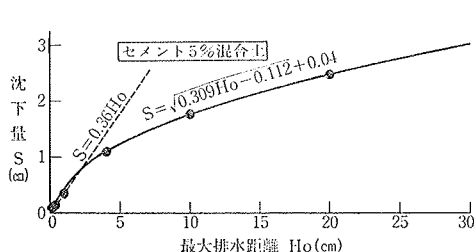
5. 結果と考察

5.1. 最大排水距離と沈下量との関係

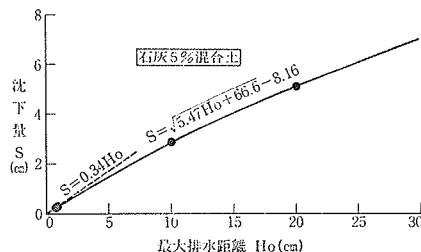
固材材混合土の最大排水距離H₀と、沈下がほぼ落ち着いた際の沈下量Sの関係について検討する。セメント混合土と石灰混合土の場合をそれぞれ図一3、図一4に示す。

(1) セメント混合土 H₀が約1cm以下の場合には、
 $S = 0.36H_0$ [3]

の関係が認められる。しかし、H₀がさらに増大すると、Sの増加は鈍化し、SとH₀の間の比例関係は成立しなくなる。これを前記の[1]式にあてはめ、4P=0.5 kgf/cm² を入れると、H₀ ≤ 1 cm の場合、m_v=0.72 cm²/kgf が得られ、H₀ > 1 cm ではm_vは徐々に減少する。したがって、セメント混合土では[1]式において、m_vを一定として単純にSを求めることはできない。このように、



図一3 セメント混合土の最大排水距離と沈下量との関係



図一4 石灰混合土の最大排水距離と沈下量との関係

$$S = -0.01 + 2.98S + 0.183S^2$$

これを變形すると、次式のようになる。

$$S = \sqrt{5.47H_0 + 66.6} - 8.16$$

.....[8] (標準誤差: 0.005)

セメント混合土のSが一般の粘性土と異なり、H₀と比例しない原因として以下のことが考えられる。

(i) H₀が大きいほど圧密時間は増大する。一方、セメント混合土の強度はセメントの硬化によって、時間とともに増大し、圧密沈下も時間とともに抑制される。したがって、SはH₀に比例した増大を示さない。

(ii) H₀が大きいほど、圧密圧力のうちで圧密容器の壁面に吸収される圧力が増大し、試料土(特に加圧面から離れた部分)に伝達される圧力が減少する。したがって、SはH₀に比例した増大を示さない。

これらの原因のうち、(ii)は圧密容器の直径φと高さhの比φ/hを大きくするほど、無視できるようになる。今回の試験では、h=4cm, 10cm および 20cm はいずれもφ=10 cm とした。この場合に圧密容器の影響がどの程度であるかについては今後さらに検討を要するが、ここでは無視できる程度と考え、(i)が主原因と考えた。

(i)の原因は容器形状と無関係である。したがって、(i)を主原因とした場合、上記の試験結果はH₀が実用規模にまで増大した際にも適用できるであろう。そこで、図一3と図一4において、H₀(>1 cm)とSの関係式を検討した。その結果、両者は2次曲線で近似できることが判明し、最小二乗法によって次式が得られた。

$$H_0 = 0.37 - 0.288S + 3.23S^2$$

これを變形するとつぎのようになる。

$$S = \sqrt{0.309H_0 - 0.112} + 0.04$$

(標準誤差: 0.08)

なお、上式における各定数は対象土の含水比・粒度・有機物・粘土鉱物、固材材の種類・添加量、温度および試験装置などによって決まると考えられる。

(2) 石灰混合土 セメント混合土と同様、H₀が約1 cm以下の場合、SはH₀に比例しており、

$$S = 0.34H_0$$

の関係が認められる。そして、[1]式を用いて、4P=0.5 kgf/cm² を入れると、m_v=0.68 cm²/kgf が得られる。

しかし、H₀がさらに増大すると、前述のセメント混合土の場合と同様、Sの増大は鈍化する。その原因としてはセメント混合土の場合と同様のことが考えられる。また、両者の関係は次式によって近似される。

上式の各定数は、セメント混合土の場合と同様の因子によって決まると考えられる。

(3) セメント混合土と石灰混合土の比較 図-3と図-4の比較によって明らかなように、 H_0 が約1cm以下の場合には、セメント混合土のSと石灰混合土のSの差はほとんどない。しかし、 H_0 が約1cm以上になると、石灰混合土のSの方がはるかに大きくなる。このことは、セメント混合土の方が石灰混合土に比べて、早期に、しかも大きな強度を発現するためと考えられる。

(4) 実用規模における収縮量の検討 圧密併用固化工法の実用規模における最大排水距離 H_0 と収縮量 S_L (=沈下量S)の関係を、〔5〕式と〔8〕式から計算した。1例を以下に述べる。

いま、圧密併用固化において、 $H_0=50$ cm (直径1mの圧密袋に相当)の場合、収縮量 S_L は〔5〕式と〔8〕式からセメント混合土で4.0cm、また石灰混合土10.3cmである。圧密袋を球状とすると、体積減少率 V_d は

$$V_d = \left(\frac{H_0 - S_L}{H_0} \right)^3 \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots[9]$$

で与えられる。これによると、 V_d はセメント混合土で78%、また石灰混合土で50%となる。すなわち、固化材混合土の体積は圧密によって、それぞれ78%と50%に減少することになる。実際には、圧密袋は円柱状あるいは直方体状にする場合が多いので、上記のような体積減少に比べてやや少ない体積減少を示すと考えられる。

このように、今後実用規模の試験によって確認する必要があるが、上記の方法によって圧密試験結果をもとに圧密併用固化の圧密袋の大きさと収縮量の関係を概略予測することが可能であると考えられる。

5.2. 最大排水距離と沈下がほぼ落着くまでの時間との関係

固化材混合土の最大排水距離 H_0 と圧密沈下がほぼ落着くまでの時間 t との関係を求める方法として、以下の方法を検討した。〔2〕式において、 C_v として、固化材の硬化がほとんどない状態の圧密係数 C_{v0} を入れる。そして〔2〕式における T は次のように求める。固化材の硬化がほとんどないとした場合の沈下量 S_a (〔3〕式と〔6〕式より求める)、と固化材の硬化を考慮した沈下量 S_b (〔5〕式と〔8〕式より求める) との比 S_b/S_a を求める。この比は圧密理論における圧密度と意味が異なるが、ここでは S_b/S_a を圧密度 U_T として、 $U \sim T$ 関係図から U_T に相当する T を導く。このようにして、〔2〕式に C_v と T の値を入れることによって、 H_0 に対応する t を求める。

(1) セメント混合土 セメントの硬化がほとんどない場合の圧密係数 C_{v0} は、 $H_0 \leq 1$ cm の試験結果から $C_{v0} = 0.03 \text{ cm}^2/\text{min} = 43 \text{ cm}^2/\text{day}$ と考えられる。その理

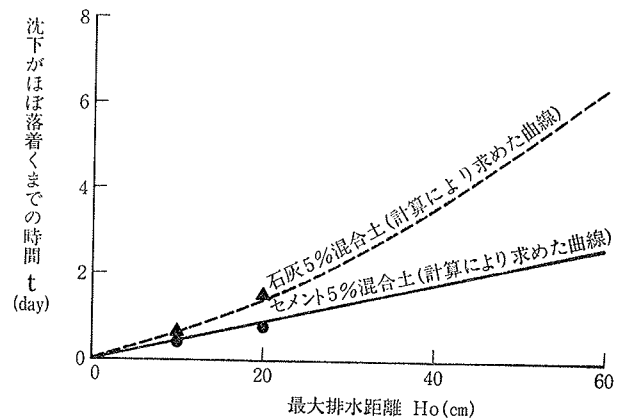


図-5 固化材混合土の最大排水距離と沈下がほぼ落着くまでの時間との関係

由として、試験結果は省略するが、 $H_0 \leq 1$ cm では H_0 に関係なくほぼ一定の圧密係数 $43 \text{ cm}^2/\text{day}$ が得られた。また、 U_T は〔3〕式と〔5〕式により次のようになる。

$$U_T = \frac{S_b}{S_a} = \frac{\sqrt{0.309H_0 - 0.112} + 0.04}{0.36H_0} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots[10]$$

これらの H_0 と U を〔2〕式に代入して求めた H_0 と t の関係は図-5のような曲線となる。なお、同図には次項で述べる石灰混合土の場合も併記している。図示されるように、計算値と実測値(沈下がほぼ落着くまでの時間)は、 $H_0 \leq 20$ cm の範囲であるが、ほぼ一致している。

(2) 石灰混合土 セメント混合土の場合と全く同様の方法によって検討した。その際、 $C_{v0} = 0.1 \text{ cm}^2/\text{min} = 144 \text{ cm}^2/\text{day}$ である。また、 U_T は〔6〕式と〔8〕式により次のようになる。

$$U_T = \frac{S_b}{S_a} = \frac{\sqrt{5.47H_0 + 66.6} - 8.16}{0.34H_0} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots[11]$$

このようにして求めた H_0 と t の関係は、図-5のような曲線となり、 $H_0 \leq 20$ cm の範囲であるが、実測値とよく一致することが認められる。

(3) セメント混合土と石灰混合土との比較 図-5のように、圧密時間は石灰混合土の方がセメント混合土に比べて大きく、その差は H_0 が大きいほど著しくなる。このことは、セメントの方が石灰よりも早期に硬化し、しかもその強度が大きいためと考えられる。

(4) 実用規模における沈下がほぼ落着くまでの時間の検討 図-5のように、セメント混合土、石灰混合土ともに $H_0 \leq 20$ cm における圧密時間は、実測値と計算値の間でよく一致している。そこで、実用規模の1例として、 $H_0 = 50$ cm (直径1mの圧密袋に相当)の場合を検討すると、収縮が落着くまで時間はセメント混合土で2.2日、また石灰混合土で4.9日と予測される。

このように、今後さらに各種試験によって確認する必

要があるが、上記のような考え方によって、沈下がほぼ落ち着くまでの時間を算出する方法は妥当と考えられる。

5.3. 最大排水距離と改良土の性状との関係

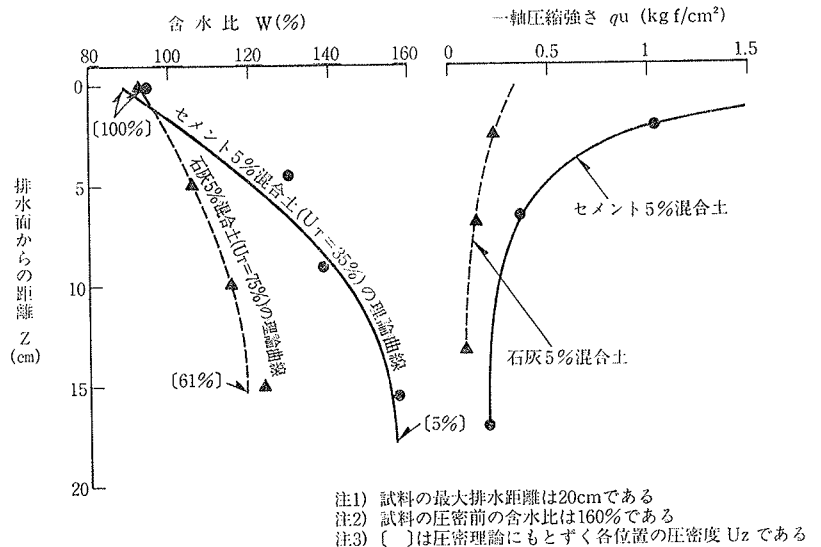
圧密併用固化では、5.1.と5.2.に述べたように、固化材の硬化がほとんどないとした場合に比べて、実際の沈下量はかなり小さくなっている。一方、試験の結果、後述のように、排水面付近では固化材の硬化が少ない初期においてかなり脱水されるけれども、排水面から離れた深部では脱水があまり行なわれない。そこで、 H_0 の大小によって、圧密後の改良土の含水比 w および一軸圧縮強さ q_u が排水面からの距離 Z との関係でどのように変化するかを検討する。

セメント混合土、石灰混合土の結果を図一6に示す。同図において、含水比を示す曲線は、〔10〕式と〔11〕式によって求めた圧密度 U_T をもとに、排水面からの距離 Z と各位置の圧密度の関係を示す圧密理論を利用して、各位置の圧密度 U_z を求めそれぞれを含水比 w_z に換算して求めたものである。

(1) セメント混合土 圧密後のセメント混合土の含水比は、排水面付近では約90%まで低下している。一方、排水面から最も離れた $Z=16\text{ cm}$ では、含水比は約155%であり、圧密前の含水比160%に比べて僅かしか低下していない。このように、圧密後のセメント混合土の含水比は排水面から離れるほど、その低下の程度が小さくなっている。そこで、これらの試験結果と上記のように圧密理論を応用して求めた含水比曲線とを対比させた結果、図一6のように両者はよく一致している。したがって、上記の方法による含水比曲線は、圧密後のセメント混合土の含水比を把握するのに有用と考えられる。

つぎに、圧密後の q_u は、排水面付近では約1 kgf/cm² と非常に大きい。しかし、 q_u は深部になるほど減少し、 $Z=15\text{ cm}$ では0.2 kgf/cm² であり、圧密併用しないセメント固化土と同程度であった。

(2) 石灰混合土 石灰混合土の含水比は、排水面付近ではセメント混合土と同様に約90%まで低下している。そして、排水面から離れるほど、含水比の低下程度は減少し、深部 ($Z=15\text{ cm}$) では含水比約125%である。このように、石灰混合土はセメント混合土ほど顕著でないが、セメント混合土と同様に排水面から離れるにつれて脱水されにくい。そこで、これらの試験結果と上記のようにして求めた含水比曲線とを対比させた結果、図一6のように両者はよく一致している。したがって、上記



図一6 排水面からの距離と改良土の性状

のようにして含水比を算出する方法は、石灰混合土の場合にも妥当であると考えられる。

つぎに、圧密後の q_u は、排水面付近の方が深部よりも大きい、その差は小さい。

(3) セメント混合土と石灰混合土の比較 含水比に関しては、石灰混合土の方が深部までよく脱水される。

一方、強度に関しては、セメント混合土の方が全体として大きな強度を与え、特に排水面付近では大きな強度を発現する。

(4) 実用規模における改良土の性状の検討 実用規模において確認する必要があるが、図一6のように実測値と計算値はよく一致している。したがって、排水面からの距離ごとの改良土の性状は、上記のように計算によって把握することが可能と考えられる。

いま、 $H_0=50\text{ cm}$ の場合、セメント混合土では、含水比の低下および強度の著しい増大は表層の約15cmが主体となる。また、石灰混合土では、含水比低下は圧密袋の中心部まで及び、中心部でも表層の1/2程度の含水比低下が期待できる。

6. あとがき

圧密併用固化工法(仮称)は、軟弱泥土の処理に極めて有効と考える。当工法の効果は固化材混合後の圧密脱水の程度に大きく影響される。そこで、本報告では、固化材混合土の圧密特性を詳細に検討し、有益な知見を得た。当工法の実用化のために、さらに研究を継続中である。

参考文献

- 1) 喜田, 久保, 辻: 汚泥の処理処分に関する研究(第8報), 大林組技術研究所報, No. 18, (1979), pp. 95~99