

粘土・生石灰系の圧密特性に関する基礎実験

福田 直三*・三浦 哲彦**・周藤 宜二***・古賀 正宏***

Basic Experiments on Consolidation Characteristics of Clay-Quicklime System

Naozo FUKUDA, Norihiko MIURA, Yoshiji SUDOH
and Masahiro KOGA

Abstract

This paper reports experimental results on the consolidation characteristics of clay-quicklime system concerned with the quicklime pile method and the multiple strip-sandwich method, a new method for embankment construction with cohesive soils.

Consolidation tests on quicklime specimens were performed to investigate the expansive characteristics of them during water supplying. Several kinds of triaxial compression tests were also carried out on clay-quicklime system in drained and undrained conditions.

From these experiments useful informations were obtained concerning with the consolidation mechanism of clay-quicklime system.

1. ま え が き

粘性土を対象とした地盤改良工法は、物理的な脱水による方法、セメント、消石灰などを用いた化学的固化による方法、また生石灰パイル工法¹⁾や多段式サンドイッチ工法²⁾のように生石灰の水和反応を利用した方法などがある。

生石灰の水和反応を利用した工法では、水和反応時の吸水、膨張、発熱効果などをいかに設計に反映させるかが問題となる。しかしながら、これらの現象は十分解明されていないために、効果的な設計への取入れが難しく、現場への応用から経験的に改良効果を評価しているのが現状である。

本報では、この生石灰の水和反応に基づく粘土の圧密現象のメカニズムを把握し、設計法を確立することを目的とするものであり、(1) 生石灰のみおよび (2) 粘土・生石灰系の供試体について行った基礎的な実験の結果について述べる。実験は、標準圧密試験機および油圧サーボによる応力・変位制御方式の三軸圧縮試

験機を用いた。ただし、今回の実験では、生石灰と粘土を混合攪拌する工法は対象から除くものとする。

2. 粘土・生石灰系の圧密特性

2.1 生石灰の吸水膨張

生石灰パイル工法や多段式サンドイッチ工法などにおいては、生石灰の水和反応が重要な役割を果す。反応の原理は、Table 1 に示すとおりである³⁾。この反

Table 1 Hydration of quicklime

	CaO + H ₂ O → Ca(OH) ₂ + 65.5 kJ/mol		
Molar weight	56	18	74
Specific gravity	3.2	1.0	2.24
Weight ratio	1.0	0.32	1.32
Volume ratio	1.0	1.1	2.0

応が、粘土・生石灰系の中で生じる場合には、次に示す諸現象が段階的あるいは並進的に生じることによって、粘土の改良がもたらされると考えられる。1) 生石灰の水和による粘土層からの吸水圧密、2) 生石灰の膨張圧と吸水による負圧との相加作用に基づく圧密促進、3) 水和熱による透水係数の増加に基づく圧密

* 復建調査設計(株) (山口大学研究生)

** 建設工学科

*** 復建調査設計(株)

促進, 4) 生成した消石灰のサクシオンによる吸水圧密, および 5) 長期的には消石灰の炭酸カルシウム化に伴う補強効果があげられる. また, 多段式サンドイッチ工法では, 以上の効果の他に, 6) 盛土自重によるフィルターファブリックを介しての圧密促進, 7) フィルターファブリックによる補強効果が加わることになる⁴⁾.

2.2 設計上の問題点

生石灰の吸水膨張効果を設計へ取込む場合の問題点は, 次項があげられる.

- 1) 膨張圧およびサクシオンによる圧密促進効果の発生時期と効果の程度.
- 2) 生石灰の吸水膨張量と粘土の脱水収縮量がほぼ同じとなることと膨張圧の発生とのメカニズムの評価.
- 3) 水和により消石灰となる過程で, サクシオンによる吸水量と境界条件 (変位拘束条件, 排水条件) との関係.
- 4) 粘性土の初期含水比, 飽和度, 圧密降伏応力などと改良効果との関係.

このように粘土・生石灰系の圧密現象に関しては未解明のところが多く, 膨張圧による効果は設計に取入れられていないのが現状である.

3. 実験

3.1 実験方法

生石灰パイル工法や多段式サンドイッチ工法などの粘土・生石灰系の地盤改良工法について, 施工条件に対応するように, Table 2 のごとく実験条件を設定した. すなわち, フィルターファブリックの有無に応じて排水条件を設定し, また, 変位拘束の有無に応じて三軸圧縮試験における条件を設定した. 今回の実験では, 境界変位が拘束される場合は軸方向変位拘束方式 ($\epsilon_a=0$) とし, 拘束圧が一定の場合は軸圧一定 ($p_a=const.$) 方式とした.

本実験ではまず生石灰の吸水膨張特性を把握するために, 標準圧密試験機により上載圧を加えた状態での吸水膨張実験を行った. ついで Fig. 1 に示す粘土・生石灰系の供試体について, 一連の三軸圧密実験を行った.

3.2 試料

実験に使用した粘土は, 広島県五日市沖で採取した不攪乱の沖積海成粘土である. その物性は, 自然含水比 $w_n=82\sim 122\%$, 湿潤密度 $\rho_i=1.39\sim 1.45\text{ g/cm}^3$, 比重 $G_s=2.60\sim 2.63$, 液性限界 $w_L=109\sim 127\%$, 塑性

Table 2 Mechanism of improvement method by clay-quicklime system

Improvement method	Mechanism of improvement	Test condition
Quicklime pile method	<p>(Horizontal section) $\epsilon_h=0$</p>	Total volume: constant Water moves only in the system : undrain
Multiple quicklime-layer method	<p>(Vertical section)</p>	Vertical pressure σ_v : constant Water moves only in the system: undrain
Multiple sandwich method	<p>(Vertical section)</p>	Vertical pressure σ_v : constant Water moves out from the system: drain
Multiple strip-sandwich method	<p>(Vertical section, front view)</p>	Boundary condition : $\epsilon_v, \epsilon_h \neq 0$ and $\sigma_v \neq \text{constant}$ Water moves out from the system : drain

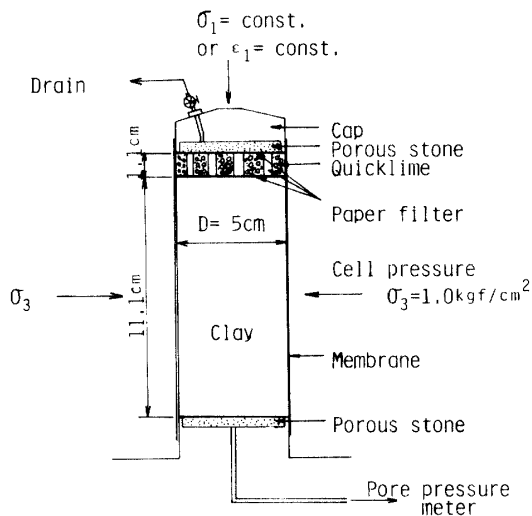


Fig. 1 Test specimen of clay-quicklime system.

指数 $I_p = 69 \sim 90$ および一軸圧縮強度 $q_u = 0.07 \sim 0.32$ kgf/cm² の軟弱粘土である。実験試料のむらをできるだけ少なくするために、 $\sigma_{30} = 0.5$ kgf/cm² で予備的に圧密を行った。

また生石灰は 0.25mm フルイを通過した粉末状のものを用いた。

4. 実験結果

4.1 生石灰の吸水膨張実験

(1) 吸水膨張特性

Fig. 2 は、試料高 $H = 1.5$ cm, 直径 $D = 6.0$ cm, 密度 $\rho_{10} = 1.25$ g/cm³ に調整した生石灰についての圧密・吸水膨張実験結果である。すなわち、上載圧の負荷による圧縮量、注水による吸水膨張量および上載圧の除荷による膨張量をそれぞれ示している。同図によると圧縮ひずみ～鉛直圧力曲線の勾配は $\Delta \epsilon / \Delta \log p_v = 0.076$, 吸水膨張ひずみ～鉛直圧力曲線の勾配は $\Delta \epsilon / \Delta \log p_v = 0.42$ であり、後者は前者の約 6 倍となっている。また反応終了後の除荷による膨張ひずみは、たかだか 2% 程度である。

Table 1 に示されるように、生石灰はほぼ同体積の水を吸水し、体積は約 2 倍となるが、これは大気圧下での現象であって、鉛直圧力が大きくなると Fig. 2 にみられるように膨張量は次第に小さくなり、 $p_v \approx 30$ kgf/cm² で膨張量は 0 となる。

Fig. 3 は同実験における膨張量の経時変化を示したものである。これより鉛直圧力の高いほど吸水に時間を要していることがわかる。これは生石灰密度 ρ_{10} の上昇に伴う透水能力の低下に起因するものと考えられる。

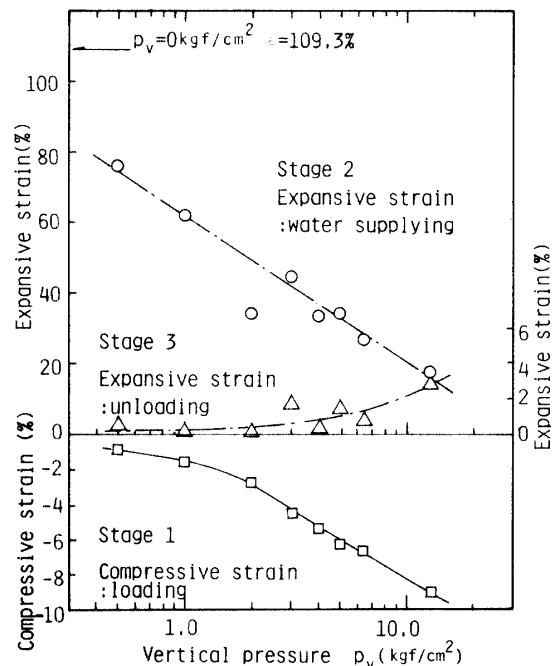


Fig. 2 Compressive and expansive characteristics of quicklime in oedometer test.

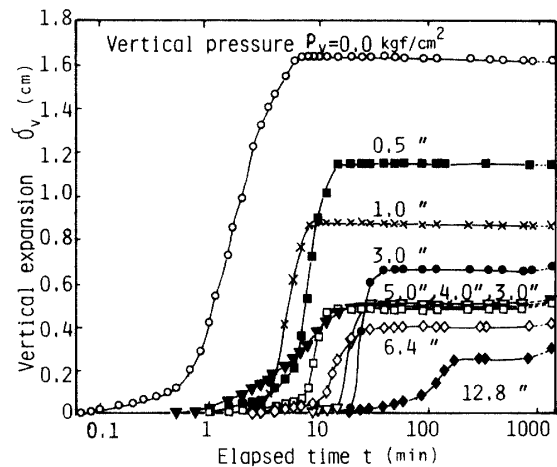


Fig. 3 Measured vertical expansion amount of quicklime due to water supplying.

(2) 水和反応前後の状態量の比較

Table 3 は圧密試験機を用い、急速に水和反応させた場合の試験前後における状態量の比較を行ったものである。同表から生石灰の水和に要する水量は、同質量の 0.341～0.367 (平均 0.353), 飽和度はほぼ 100%, また上載圧 $p_v = 0 \sim 12.8$ kgf/cm² に対し間隙量は試験前の 2.01～0.57 倍と大きく変化している。

4.2 粘土・生石灰系の三軸圧密実験

(1) 境界拘束条件の影響

Fig. 1 に示す粘土・生石灰系の供試体に対して、軸

Table 3 Comparison of physical properties of slaked lime

Vertical pressure p_v (kgf/cm ²)	Water content w (%)	Dry weight W_d (gf)	$\frac{W_d - W_1}{W_1}$	Degree of saturation S_r (%)	$\frac{H_2}{H_1}$	$\frac{V'_v}{V_v}$
0.0	73.08	71.10	0.342	99.9	1.988	2.014
0.5	55.38	71.66	0.352	94.5	1.758	1.625
1.0	50.59	71.68	0.352	92.4	1.555	1.394
2.0	31.31	72.15	0.361	101.6	1.298	0.861
3.0	36.94	71.45	0.348	99.0	1.395	1.033
4.0	28.49	71.60	0.351	98.1	1.258	0.806
5.0	29.68	71.60	0.351	98.6	1.275	0.833
6.4	24.50	72.49	0.367	96.6	1.210	0.711
12.8	19.77	71.55	0.350	96.8	1.111	0.566

Quicklime (initial condition): Weight $W_1=53.01$ gf, Density $\rho_{10}=1.25$ g/cm³, Specific gravity $G_{10}=3.2$, Height $H_1=1.5$ cm, Void $V_v=25.85$ cm³

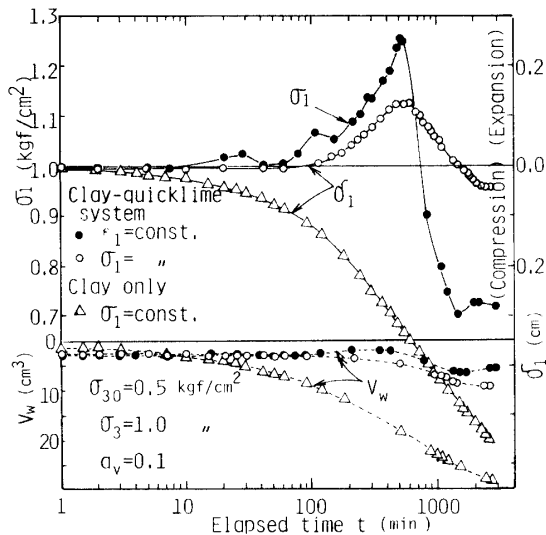


Fig. 4 Consolidation characteristics of clay-quicklime system.

圧一定 ($\sigma_1=1.0$ kgf/cm², 排水) および軸変位拘束 ($\epsilon_1=0$, 排水) の実験を行った場合の圧密実験の結果を Fig. 4 に示した。

軸変位拘束実験における軸圧の増分 (膨張圧) のピーク および軸圧一定実験における軸変位量の増分 (膨張量) のピークは、 $t \approx 500$ 分でほぼ等しい。また両値の変化の開始もほぼ等しく $t \approx 60$ 分である。すなわち、生石灰の水和反応の大部分は 60~500 分の間に生じたものと考えられ、境界拘束条件に影響を受けていないことがわかる。また粘土のみの等方圧密実験による軸変位量と粘土・生石灰系のものとの相対差は、生石灰の膨張量に相当するが、後者は $t \approx 2000$ 分でほぼ変位が落ち着く傾向にあり、前者に対し圧密の促

進されていることがわかる。

次に粘土からの排水量は、 $t \approx 500$ 分すなわち生石灰の水和反応がピークを越えた頃から徐々に大きくなり、1000 分を過ぎると次第に終息している。この傾向は、粘土・生石灰系の膨張圧あるいは膨張量の経時変化とのよい対応を見ることができ。また粘土のみの排水量との相対差は、生石灰の水和反応および消石灰の間隙に吸水された水量約 20 cm³ に相当するものである。

(2) 間隙水圧測定結果の比較

Fig. 5 は、下に示す 4 種類の条件下で調べた粘土の間隙水圧~圧密時間曲線である。

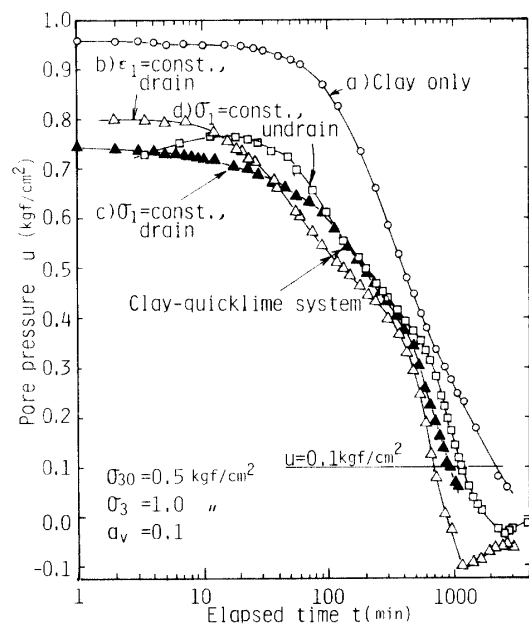


Fig. 5 Change of pore pressure in clay with elapsed time.

- a) 粘土のみ
- b) 粘土・生石灰系軸変位拘束 ($\epsilon_1=0$ 一定), 排水
- c) 同上, 軸圧一定 ($\sigma_1=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 一定), 排水
- d) 同上, 非排水

これらの各曲線を比較することから, 生石灰の作用による粘土の圧密促進効果を評価することができる。たとえば, 間隙水圧が 0.1 kgf/cm^2 に達するまでの時間 t を比較すると, a) で2150分であるのに対し, b) で700分, c) で900分, d) で1150分である。a) に対する時間短縮比はそれぞれ0.32, 0.43, 0.53であり, 生石灰の作用により著しい圧密促進効果を生じている。また b)~d) の圧密特性の比較から, 圧密促進効果は 1) 排水条件>非排水条件, 2) 軸変位拘束>軸圧一定となることがわかった。これにより有効応力の増加に伴う強度発現効果も同様な傾向となることが推測される。

これらの結果から, 上述の a)~d) のうち, b) の工法が最も改良効果が発揮され则认为されるが, この条件にほぼ近い効果を与える工法として, Table 2 中で示した帯状多段式サンドイッチ工法 (Multiple strip-sandwich method) が考えられ, 同工法の有利性を推察することができる。

(3) 過圧密粘土・生石灰系の圧密特性

Fig. 6 は, 予備的に $\sigma_{30}=2.0 \text{ kgf/cm}^2$ で圧密したあと, $\sigma_3=1 \text{ kgf/cm}^2$ に除荷することによって過圧密比2.0に準備した粘土・生石灰系における圧密実験結果を示したものである。間隙水圧と軸圧の経時変化はおおむね対応しているようにみうけられる。

Fig. 4 における未圧密状態 ($\sigma_{30}=0.5 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_3=1.0 \text{ kgf/cm}^2$) に比べ, 膨張圧のピーク値は1.54倍と大きい, それに達する時間は4倍を要している。

過圧密粘土では, 自重圧密による強度増加を期待することはできないが, 本実験のように粘土・生石灰系とすることにより, 脱水圧密効果を期待できるように

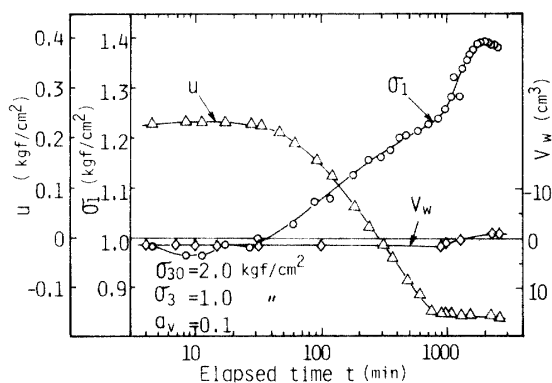


Fig. 6 Changes of pore pressure, axial pressure and volume of expelled water from specimen.

なる。このことは, 後述するように, 実験後に調べた含水比減少量が平均4.0%であることからわかる。また飽和度は19.7%であり, さらにある程度の脱水が引続くものと考えられる。

(4) 圧密に伴う含水量変化

圧密に伴う粘土の含水量変化を知ることは, 圧密効果あるいは圧密に伴う強度増加等を推定する上で重要である。

Fig. 7 は, $\sigma_3=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 下での一連の実験における初期含水比 w_0 と実験終了時の含水比変化量 Δw の関係を示したものである。この関係は, 生石灰と粘土の体積比率 a_v を10%の場合であり, 次式で示される。

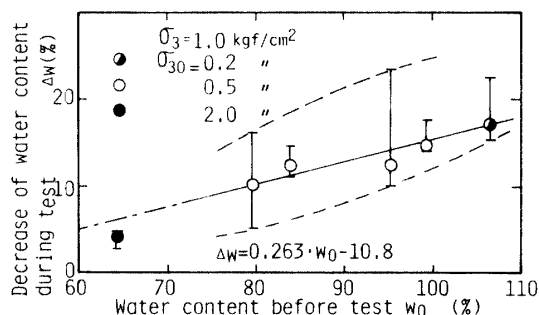


Fig. 7 Changes of water content of clay during triaxial consolidation test.

$$\Delta w = 0.263 w_0 - 10.8 \quad (1)$$

ところで, 粘土・生石灰系の圧密終了時における含水比低下量 Δw は, Table 1 の関係を用いれば次式となる。

$$\Delta w = a_v \frac{\rho_{10} \left(1 + \frac{G_s w_0}{100}\right)}{G_s} \left\{ 0.32 + 2 \left(\frac{1}{\rho_{10}} - \frac{0.943}{G_{10} \rho_w} \right) \rho_w \right\} \quad (2)$$

ここに, G_s, w_0 は粘土の比重と初期含水比, G_{10}, ρ_{10} は生石灰の比重と密度である。ただし, 粘土および反応後の消石灰の飽和度 S_r は100%としている⁵⁾。

しかしながら, Fig. 2 ですでに示したように, 上載圧下において生石灰の膨張量が変化する。このことを考慮して, 式(2)を見直すこととし, 今回の一連の実験結果を整理してみる。まず, 生石灰の水和反応に要する含水量 ΔM_{w1} は, 生石灰質量の0.306~0.350倍, 平均0.33倍であり次式で示すことができる。

$$\Delta M_{w1} \approx 0.33 V_{10} \rho_{10} \quad (3)$$

ここに V_{10} は生石灰の体積である。

次に消石灰の間隙を満たす含水量 ΔM_{w2} は, 消石灰

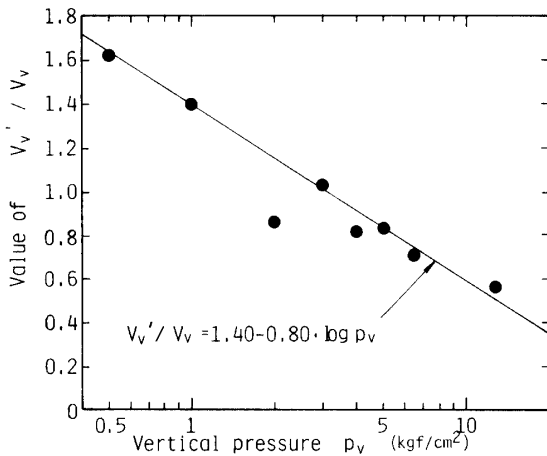


Fig. 8 Relationship between vertical pressure and value of V'_v/V_v .

の間隙量 V'_v と飽和度 S_r の積として求められる。ここで消石灰の間隙量 V'_v と生石灰の間隙量 V_v の比は、Table 3 から Fig. 8 のごとく示され、次式の関係式が得られる。

$$V'_v/V_v = 1.4 - 0.81 \log p_v \quad (4)$$

また、飽和度は粘土・生石灰系の圧密実験で63.9~87.2%、平均80%である。これは標準圧密試験機による急速水和実験における $S_r \approx 100\%$ に対し低い値となっている。これらの実験結果から、 ΔM_{w2} は以下のように導かれる。

$$\begin{aligned} \Delta M_{w2} &= V'_v S_r \rho_w \\ &= V_{10} n \frac{V'_v}{V_v} S_r \rho_w \\ &= V_{10} \left(1 - \frac{\rho_{10}}{G_{10} \rho_w}\right) (1.4 - 0.81 \log p_v) 0.8 \rho_w \end{aligned} \quad (5)$$

ここに n は生石灰の間隙率である。

したがって生石灰による含水比低下量 Δw は式 (3)、(4) より、

$$\begin{aligned} \Delta w &= \frac{\Delta M_{w1} + \Delta M_{w2}}{M_d} \\ &= \frac{V_{10} \rho_{10}}{V \rho_d} \left\{ 0.33 + \left(\frac{1}{\rho_{10}} - \frac{1}{G_{10} \rho_w} \right) (1.4 - 0.81 \log p_v) 0.8 \rho_w \right\} \\ &= a_v \frac{\rho_{10} \left(1 + \frac{G_s w_0}{S_r}\right)}{G_s} \left\{ 0.33 + \left(\frac{1}{\rho_{10}} - \frac{1}{G_{10} \rho_w} \right) (1.4 - 0.81 \log p_v) 0.8 \rho_w \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに M_d , V , ρ_d , G_s , w_0 , S_r は、粘土の乾燥質量、体積、乾燥密度、比重、初期含水比および飽和度であ

る。ちなみに、今回の実験条件で $a_v = 10\%$, $\rho_{10} = 1.26 \text{ g/cm}^3$, $G_s = 2.63$, $G_{10} = 3.2$, $p_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$, $w_0 = 84\%$ を式 (6) に代入すれば、 $\Delta w = 13.3\%$ となり、式 (1) から求めた $\Delta w = 11\%$ とほぼ同程度の値となる。

Fig. 9 は、上記計算例を参考とし、 w_0 , a_v と Δw の関係を示したものである。ただし、式 (6) は今回の実験結果に基づくものであるため、 $w_0 \leq 60\%$ の外挿部は破線で示した。

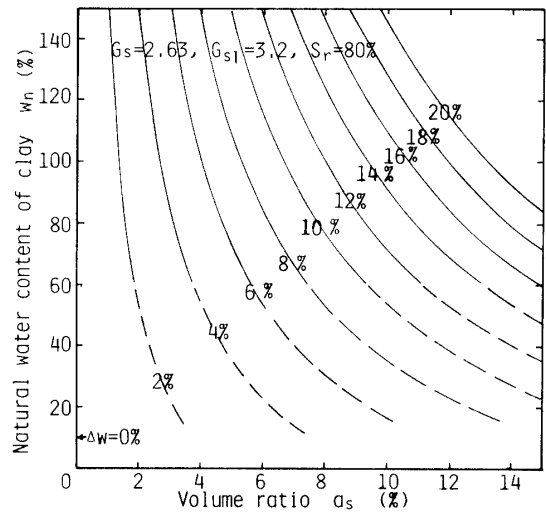


Fig. 9 Decrease of water content in clay-quicklime system.

$$(p_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2, \rho_{10} = 1.26 \text{ g/cm}^3)$$

5. まとめ

生石灰パイル工法や多段式サンドイッチ工法のような生石灰を用いた粘性土地盤の改良工法の設計に資するため、粘土・生石灰系の圧密特性に関する基礎実験を行い、次のような結論を得た。

1) 生石灰に上載圧 p_v を K_0 状態で加えた後、給水による p_v と膨張量の関係を調べた。その結果、両者の関係は半対数図上で直線となる。すなわち $p_v = 0 \text{ kgf/cm}^2$ では膨張後の高さは初期の2.1倍となるが、 $p_v = 30 \text{ kgf/cm}^2$ で膨張量は実質的には0となるのがわかった。

2) 粘土・生石灰の吸水・膨張のメカニズムは、まず粘土に接したある範囲の生石灰が吸水膨張して膨張圧を生ぜしめ、そののち消石灰となった領域のサクシオンによる吸水が行われる。このような反応が順次生石灰の内部に伝達されていく様式で説明できる。

3) 粘土・生石灰系における圧密は、境界拘束条件や排水条件の差はあっても、粘土のみの圧密よりかな

り促進される。特に軸変位拘束および排水条件の場合にその効果の大きいことがわかったが、この境界条件は帯状多段式サンドイッチ工法に相当するものである。

4) 過圧密粘土・生石灰系の圧密特性も正規圧密粘土とほぼ同様な反応を緩やかであるが生じる。過圧密粘土では自重圧密による強度増加を期待することはできないが、粘土・生石灰系とすることにより、脱水圧密効果を期待できるようになる。

5) 粘土・生石灰系の圧密において、生石灰・粘土体積比率 a_v 、生石灰密度 ρ_{10} 、上載圧 p_0 、粘土初期含水比 w_0 などを与えることにより、合理的な含水比低下式を得た。

謝辞

今回の一連の実験において、九州大学工学部山内豊聡教授より多くのご教示をいただき、ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工指針，軟弱地盤対策工指針 p. 151 (1977)
- 2) Yamanouchi, T. and Miura, N.: Proc, 3rd A. R. C. SM & FE, Haifa, 1 p. 256 (1967)
- 3) 稲田倍穂，加藤泰典：基礎工，3, 20 (1965)
- 4), 5) 山内豊聡，三浦哲彦，福田直三，林重徳「材料」投稿中 (昭和 58 年 10 月 15 日 受理)