土木学会論文報告集
第 177 号・1970 年 5 月

粘性土のときほぐしの度合がソイル セメントの収縮特性および粘弾性性質におよぼす影響*

THE INFLUENCE OF DISINTEGRATION OF CLAY LUMPS ON SHRINKAGE CHARACTERISTICS AND VISCOELASTIC PROPERTIES OF SOIL-CEMENT MIXTURES

栁 場 重 正**・川 村 満 紀***・大 深 伸 尚****
By Shigemasa Hasaba, Mitsunori Kawamura and Nobuhisa Ofuka

1. 緒　　言

ソイル セメントを道路路盤に使用する場合，凍結融解，湿潤乾燥に対する耐久性とともに収縮によるきれつ発生が重要な問題である。ソイル セメントの収縮きれつについては，粘性土では全収縮は大きくなるが，きれつは細かく，密であり，粗粒子土では収縮は小さいがきれつ間隔は大きいといわれている[1]。このように粘性土と粗粒子土とでは収縮によるきれつ発生の特徴にかなりの差異があり，これはおもに両者における収縮機構および力学的性質の違いによるものと考えられる。

粗粒子土を使用したソイル セメントの収縮について，岡田，川村は路盤の露出面に発生する引張応力の大きさから考えて，セメント量および細粒子土の含有量がきれつ発生に影響すると結論している[2]。最近の研究としては土の含有粘土鉱物の種類がソイル セメントの収縮特性に大きく影響するという Nakayama and Handy の研究[3]，また土の種類，セメント量，含水比，混合時の温度など種々の要因の影響を実験的に調べ，capillary tension, liquid adsorption, lattice shrinkage によってソイル セメントの収縮機構を説明しようする K.P. George の論文がある[4]。しかしソイル セメントの収縮特性そのものに不明な点が多いと同時にきれつ発生の機構についてまだ十分な検討がなされていないようである。とくにきれつ発生においてソイル セメントのクリープ変形が重要な役割をはたしていることがすでに指摘されており[2]，また最近アメリカにおいても収縮きれつ発生におけるソイル セメントの粘弾性性質の働きについて検討されているようである[5]。しかしソイル セメントのクリープ，粘弾性性質に関する研究の不足がきれつ発生機構解明に大きな障害となっていることも事実である[6]。

一方粘性土塊を適当な粒度にときほぐすことによって圧縮強度の点から考えて，粗粒子土と同様にソイル セメントとして十分使用できることが著者らによってすでに示されている[7]。このようなときほぐし粘性土を使用したソイル セメントの収縮特性およびきれつ発生においては，粘性土のときほぐしの度合およびときほぐし時の含水比が重要な要因であると考えられる。しかし同一のときほぐしの度合を有する粘性土を比較的多量に得ることが困難であるということもあって，ソイル セメントの収縮特性および粘弾性性質におけるときほぐしの影響について言及した論文はまだないようである。

本論文の第1の目的は粘性土のときほぐしの度合が現在ソイル セメントの分野で問題となっている収縮特性および粘弾性性質におよぼす影響について実験的検討を加えることである。

他方このようなときほぐし粘性土を使用したソイル セメントではセメント ゲルの移動または Ca^{++} イオンの拡散による力学的性質の改善が期待できる。そしてこれらの現象は粘性土のときはほぐしの度合との関連において工学上有効に利用することができると考えられる。すでにソイル ライムにおいて X 線回折によってポゾラン反応の進行状況を観察することによって Ca^{++} イオンの拡散が実用上効果をもつことが確かめられている[8]。

以上の観点より本論文の第2の目的はときほぐし粘性土を使用したソイル セメントにおけるセメント ゲルの移動や Ca^{++} イオンの拡散による内部構造の変化を粘性土のときほぐしの度合，含水比および材令との関連のも

* 第 23 回土木学会年次学術講演会（昭 43.10）および第 18 期日本材料学会学術講演会（昭 44.5）にて一部発表
** 正会員　工博　金沢大学教授　工学部土木工学教室
*** 正会員　工修　金沢大学講師　工学部土木工学教室
**** 正会員　工修　金沢大学助手　工学部土木工学教室

とに力学試験（クリープ試験）によって把握することである。

2. 実 験 概 要

（1） 使用材料および配合

使用セメントは普通ポルトランド セメントである。使用土は金沢市卯辰山産であり，その物理的性質は表—1に示すとおりである。セメント量(土の乾燥重量に対する重量百分率）はすべて 10% であり，供試体作製時のソイル セメントの含水比は最適含水比(31.5%)である。

表—1 Physical properties of soil used

Properties	Soil
Size Ranges:　>74 μ (%)	4
74 - 5 μ (%)	93
< 5 μ (%)	3
Liquid Limit (%)	63.4
Plastic Limit (%)	30.9
Plastic Index	32.5
Maximum Dry Density (g/cm³)	1.37
Optimum Moisture Content (%)	31.5

（2） ときほぐし粘性土試料の作製法

種々の粒度および含水比のときほぐし粘性土試料を作製するために，おのおの 30%，20%，10%，0% の含水比をもつ一辺 4 cm の粘性土立方体（最適含水比，最大乾燥密度に突き固めた粘性土の立方体を所定の含水比になるまで乾燥炉中に放置した）をときほぐし機[7]によってときほぐした。また各含水比に対してときほぐしの度合の異なるときほぐし機械の回転速度を 3 種類変化させてた。

（3） ソイル セメント供試体の寸法および作製法

ときほぐされた粘性土にただちに所定量のセメントを添加し，最適含水比になるまで水を加えながら 15 r.p.m. の回転速度のアインリッヒ型ミキサを用いて試料 5 kg につき 5 分間混合した。締固め度の決定には JIS A 1210「土の突固め試験方法」を参考にした。すなわち締め固められたソイル セメントの単位容積あたりの突固めエネルギーを JIS A 1210 の規定と同一にするという考えから，この規定と同一のランマーを使用し，ソイル セメントの単位容積あたりの突固め回数は JIS A 1210 の規定と等しくした。

収縮試験に使用した供試体は幅 10 cm，深さ 10 cm，長さ 40 cm の直方体であり，供試体作製のための総突固め回数は 300 回で，1 層あたり 150 回の 2 層に突き固めた（深さ方向に 2 層に突き固めた。したがって突固め方向は収縮ひずみ測定方向に対して垂直である）。

クリープ試験供試体は直径 8 cm，高さ 30 cm の円柱体であり，総突固め回数 114 回，すなわち 1 層あたり 19 回で 6 層に突き固めた。

（4） 供試体の養生条件および試験時の環境条件

いずれの供試体も作成後温度 20°C の恒温室中で 7 日および 28 日間ポリエチレン袋中に密封した状態で養生した。試験中の供試体の環境条件は温度 20°C，相対湿度 85±2% の空気中である。

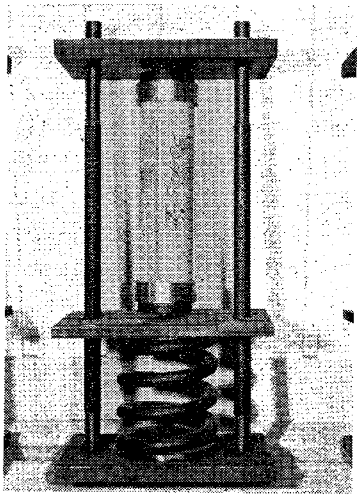
（5） 実験装置および方法

a） 収縮試験

所定期間養生後，供試体の 4 面（10 cm×40 cm 面）の中心線上に 30 cm 間隔に標点をはりつけ，時間にともなう各標点間距離の変化をベリーひずみ計で測定した。各種類の供試体は 2 本ずつ作成され，実験結果はそれらの平均値である。

b） クリープ試験

クリープ試験装置は写真—1に示すように 3 枚の鋼板と 2 本の鋼棒とスプリングを組み合わせたものである。所定の圧縮応力（一軸圧縮強度の 30% に相当する）を載荷後ベリーひずみ計（ゲージ長さ 30 cm）によって供試体の変形量を測定した。供試体のひずみがひずみ計の測定可能限度にくらべて非常に大きいので，供試体の両端に約 0.9 mm 間隔に直径 0.7 mm の多数の小孔をもつ鋼製キャップを設置し，上下キャップの適当な小孔の間隔の変化を測定した（写真—1 参照）。また与えた荷重の約 10% が減少するごとに再載荷を行ない，供試体のひずみ進行にともなう荷重の低減を防いだ。以上の一定応力載荷実験における測定ひずみよりまったく同一条件下で求めた無応力供試体の収縮ひずみを減ずることによ



写真—1 Greep test apparatus

ってクリープひずみを決定した。供試体はすべて2本ずつ作成し，実験結果はそれらの平均値である。

3. 実験結果の解析法

(1) 収 縮 試 験

乾燥時間にともなう収縮ひずみ発生の特徴を明確にするために収縮ひずみ (ε_S) と時間 (t) の間に式 (1) が成立するものとして各供試体の係数 S_∞, n を求めた。

$$\varepsilon_S=\frac{S_\infty t}{n+t} \quad \cdots\cdots(1)$$

S_∞：$t\to\infty$ における収縮ひずみ，n：S_∞ の 1/2 に達するに要する時間（日）

式 (1) を変形して

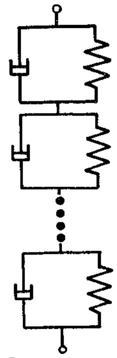
$$t=v\cdot S_\infty-n \quad \cdots\cdots(2)$$

ただし　$v=t/\varepsilon_S$

(2) クリープ試験

a) 遅延時間の分布関数の概念による解析

一般に工業用材料では応力とひずみの関係式を知ることが必要であると同時に材料の微視的構造をその力学的挙動から推定しようとする試みもなされる[9]。ここでは一般にそのような試みがなされている材料にくらべてかなり巨視的ではあるが，各種のときほぐし粘性土を使用したソイル セメントの粘弾性性質の特性を明らかにすると同時に本論文のもう一つの目的であるセメント ゲルの移動や Ca^{++} イオンの拡散による内部組織の変化を把握するためにクリープ試験結果を遅延時間の分布関数の概念によって解析した。図—1 に示すモデルに対応する基礎式は式 (3) で与えられる[9),10)]。



図—1 Mechanical model

$$J_c(t)=\int_0^\infty \Phi(\tau_K)\,d\tau_K-\int_0^\infty \Phi(\tau_K)e^{-t/\tau_K}d\tau_K \quad \cdots\cdots(3)$$

$J_c(t)$ ：クリープ コンプライアンス

$\Phi(\tau_K)$：遅延時間 (τ_K) の分布関数

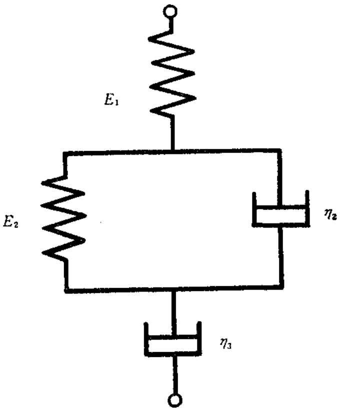
積分方程式 (3) の核関数 e^{-t/τ_K} を Step Function で近似置換する T. Alfrey and P. Doty の解析法によると，

$$\Phi(\tau_K)\doteqdot\frac{d[J_c(t)]}{dt} \quad \cdots\cdots(4)$$

によって分布関数の値は決定される。式 (4) の計算値は $J_c(t)$ の実験曲線から Rutledge の式に基づく数値微分によって求めた[11)]。

b) 四要素模型による解析

遅延時間の分布関数は後述するようにソイル セメントの内部構造の相違をかなり明確に表現するが，物理的意味が明確でない。ソイル セメントの粘弾性的性質をかなり正確に表わすといわれる四要素模型の各定数（図—2）は分布関数にくらべて物理的意味もある程度明確であり，収縮きれつを論ずるうえにおいても有効に利用できるようである。ここではときほぐしの度合，材令，含水比による模型定数の変化について考察を行なうために各供試体の四要素模型定数を求めた[12)]。



図—2 Four-element model

c) 双曲線仮定による解析

一定応力下におけるコンクリートのクリープ-時間関係の表示法として，双曲線方程式を仮定する方法がある[13)]。ここではこの方法を用いて極限クリープひずみを求めた。

$$\varepsilon_C=f(t)\cdot\sigma \quad \cdots\cdots(5)$$

ε_C：クリープひずみ，σ：応力 (kg/cm^2)

$f(t)$ をつぎの形で表わす。

$$f(t)=\frac{m}{n_C+t} \quad \cdots\cdots(6)$$

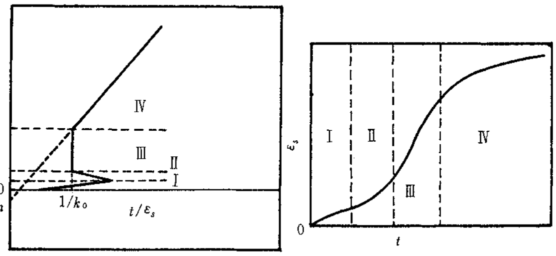
m：単位応力あたりの極限クリープひずみ (cm^2/kg)

n_C：極限クリープの 50% に達するに要する時間（日）

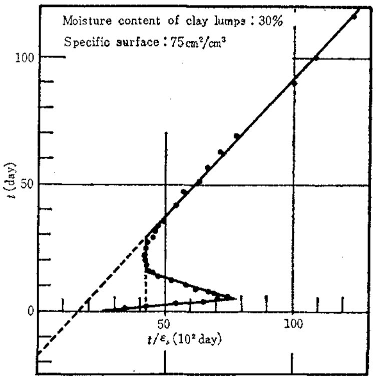
4. 実験結果と考察

(1) 粘性土のときほぐしの度合とソイル セメントの収縮特性の関係

通常コンクリートや砂質土を使用したソイル セメントでは t と v の関係は直線になるが，本実験においては模式図として図—3のようになる。すなわち初期乾燥時間では単一の直線にならず全体として収縮ひずみの発生過程を4段階に分けて考えることができる。たとえばときほぐし時の含水比 30%，比表面積 74.7 cm^2/cm^3 の供試体では図—4のようになる。すなわち第1期は収縮ひずみ (ε_S) がコンクリートのように双曲線関数的に発生する過程である。第2期は収縮ひずみが時間に対して直線的に進行する第3期への過渡的なものである。第3期は v=const. したがって $\varepsilon_S=k_0 t$ で示される。第4期



図—3 Schematic diagram for the progression of shrinkage strain (ε_s) with drying time (t)



図—4 An example of the relationship between drying time (t) and t/ε_s (ε_s : shrinkage strain)

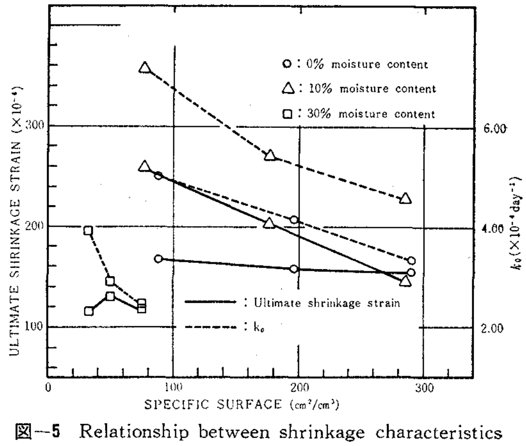
は第1期と同様に双曲線的に収縮ひずみが進行する過程である。

ときほぐしの度合（比表面積で表示する），ときほぐし時の含水比がソイル セメントの収縮特性におよぼす影響を明らかにするために第3期の係数 k_0 および第4期の S_∞, n を求め，これら係数と比表面積の関係を示すと**図—5** および **表—2** のようになる。

a) 粘性土のときほぐしの度合と極限収縮ひずみ（S_∞）の関係

ときほぐし時の含水比10%のソイル セメントの極限収縮ひずみはときほぐしが進み，比表面積が大きくなるにしたがって小さくなっている（図—5参照）。一方含水比0%のものは比表面積が大きくなっても S_∞ の値にほとんど変化がない。

一般にときほぐし粘性土を使用したソイル セメントの収縮特性はセメント ゲルによって結合されていない土粒子集合体（以後 clay pocket と記す）の分布状態および clay pocket そのものの収縮特性の影響を受けると考えられる。後述の分布関数による解析結果および供試体切断面（写真—2参照*）より推察されるように含水比0および10%の粘性土を使用したソイル セメントではときほぐしの度合によって clay pocket の占める割合が異なる。すなわち，ときほぐしの度合が進んでいないほど（比表面積が小さいほど）clay pocket の占める割合は大きいと考えてよい。したがって含水比0と10%の間においてみられる上述のような収縮特性の相違は，おもに clay pocket の収縮特性の差によるものと考えられ，0%のものにはときほぐしの度合（比表面積の大小）による差がみられないのは0%のものの clay pocket の収縮は10%にくらべて小さく，skeleton（セメント ゲルによって土粒子が結合されている部分）のそれにほとんど匹敵する程度のものであるためと思われる。これに対して含水比30%のときほぐし粘性土を使用したソイル セメントの S_∞ は小さい（図—5）。これは後述の分布関数の形から推定されるように含水比30%のものは7日間養生によってかなり均質な内部構造になり，他の含水比のものにくらべて clay pocket の部分の占める割合が小さいことを示している。このことは比表面積約 80 cm²/cm³ という一定のときほぐしの度合においても，ときほぐし時の含水比によって極限収縮ひずみが異なるという結果にもなる（**図—5**）。結局，ときほぐし時の含水比の違いによるセメント ゲルの拡

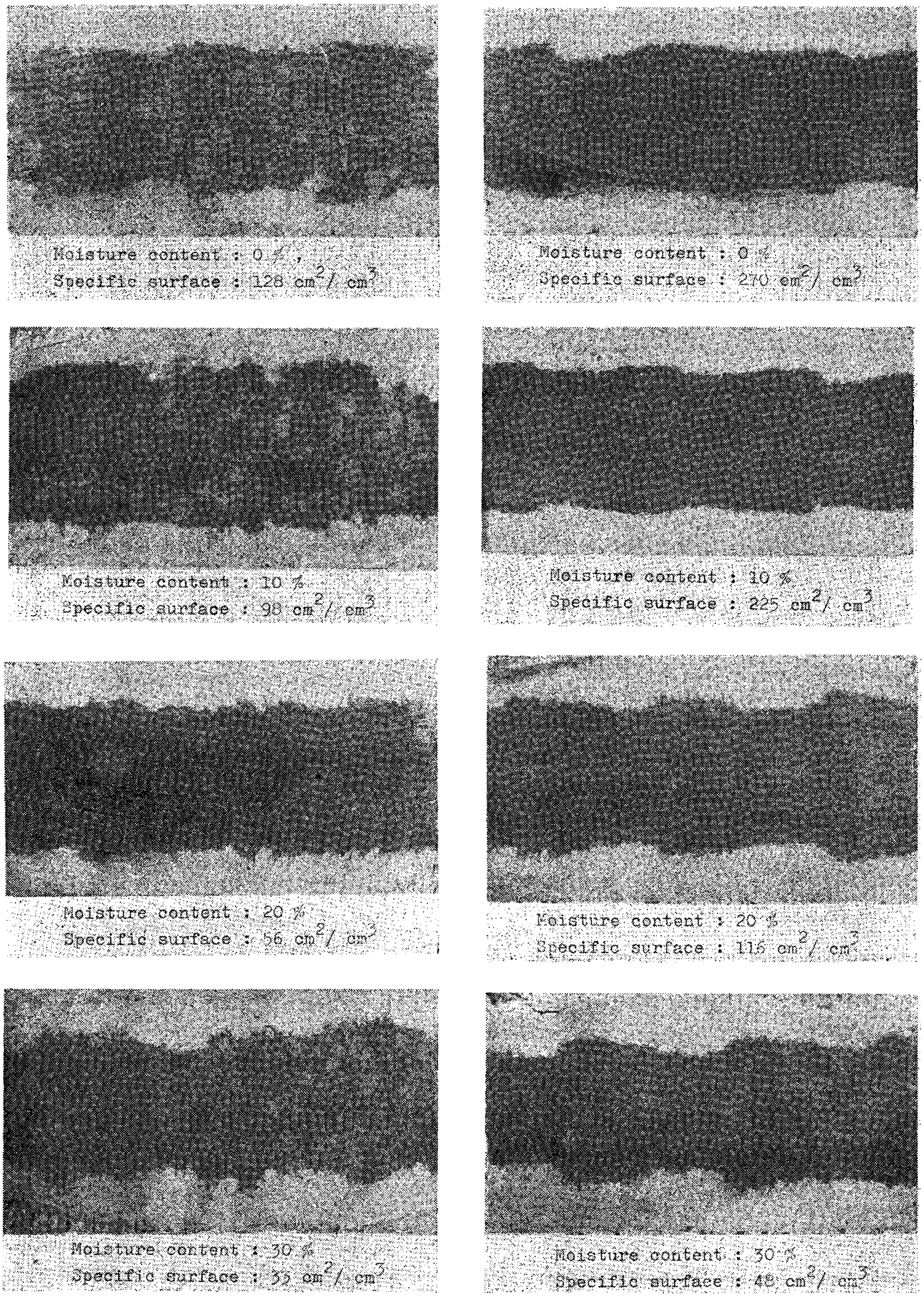


図—5 Relationship between shrinkage characteristics of soil-cement and the specific surface of clay lumps sample used

表—2 Relatioship between n and the specific Surface of clay lumps

Moisture Content (%)	Specific Surface (cm²/cm³)	n (days)
0	86	5
	195	6
	290	6
10	75	12
	174	15
	285	14
30	33	12
	49	14
	75	17

* クリープ試験終了後（供試体作製時より250日経過）供試体をコンクリート カッターによって切断した後断面にフェノールフタレンのアルコール1%溶液を塗布した．写真より供試体の表面からかなり炭酸化が進行していることおよび各供試体の clay pocket の分布状況が明確に示されていることがわかる．



写真—2 Indication of sections of soil-cement specimens on which phenolphthalein 1% ethyl alcohol solution is sprinkled.

散の程度もまたソイル セメントの収縮に影響をおよぼす一つの大きな要因であるといえよう。したがって実用的な面から考えると，ときほぐし時の含水比を 30% 程度にするか，または 0% まで乾燥した粘性土を使用すれば，ときほぐしの度合がすすんでいなくても極限収縮ひずみの小さいソイル セメントが得られるが，含水比 10% 程度ではかなりときほぐしの度合をあげなければ極限収縮ひずみは大きくなる。

砂質土を使用したソイル セメントの極限収縮ひずみの一例として 27×10^{-4} が得られている[2]。本実験では S_∞ として $(112\sim258)\times10^{-4}$ となる。このように粘性土を使用したソイル セメントの収縮ひずみは大きいものでは砂質土のソイル セメントの 10 倍ぐらいになるが本実験で使用した粘性土ではときほぐし時の含水比を最適含水比程度にすれば 5 倍ぐらいまで減少させることができる。

b) 粘性土の比表面積と係数 k_0 の関係

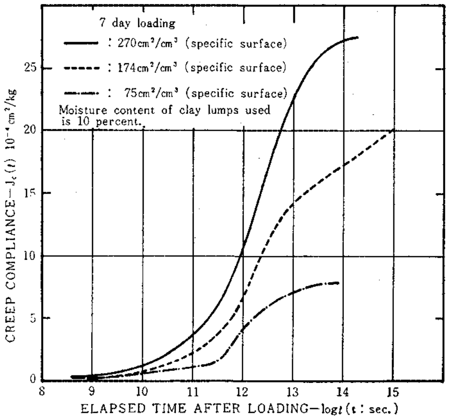
いずれの含水比においても比表面積の増大にともない k_0 は小さくなる。すなわち，ときほぐしの度合のすすんだものほど第 3 期の収縮ひずみ速度は小さくなる（図―5）。また S_∞ の場合と同様に同程度の比表面積をもつ試料 (80 cm²/cm³) においても ときほぐし時の含水比によって k_0 の値が著しく異なる。これらのことから大きなひずみ速度で進行する第 3 期の収縮ひずみはおもに clay pocket の収縮に起因するものと考えられる。

c) 粘性土の比表面積と n の関係

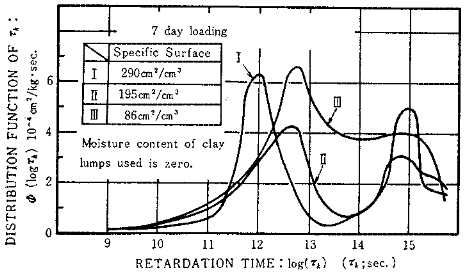
表―2 に示されるように比表面積と n との間には明確な関係はないが含水比 0% の n は他のものにくらべて著しく小さい。このことは ときほぐし時の含水比が 0% のものは他の含水比のものより収縮ひずみが速く進行して S_∞ に近づくことを示している。

（2） 粘性土のときほぐしの度合とソイル セメントの遅延時間の分布関数の関係

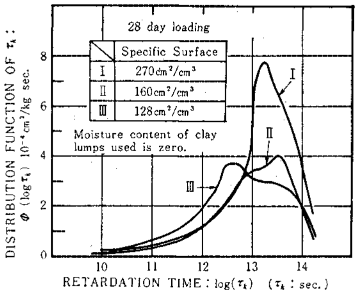
図―6 はときほぐし時の含水比 10%，3 種の比表面積の粘性土を使用したソイル セメントのクリープ コンプライアンス $J_c(t)$ 曲線を示す。ときほぐしの程度によってかなり異なった曲線になることがわかる。$J_c(t)$ 曲線から τ_K の分布関数 $\Phi(\log\tau_K)$ を求めると含水比 0% の粘性土については 図―7（載荷時の材令：7 日），図―8（載荷時の材令：28 日）のようになる。これらの図から使用粘性土の粒度の差によって $\Phi(\log\tau_K)$ はかなり違った形になることがわかる。このようにときにほぐし時の含水比，ときほぐし度（比表面積）および材令によって $\Phi(\log\tau_K)$ は特徴のある形を示すようであり，その点について以下に考察する。



図―6 Creep compliance of soil-cement mixtures using clay lumps sample



図―7 Distribution function of τ_K in soil-cement mixture using clay lumps sample



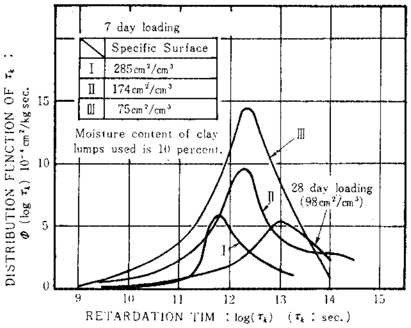
図―8 Distribution function of τ_K in soil-cement mixture using clay lumps sample

まず図―7 より明らかなように，ときほぐし時の含水比 0% で材令 7 日のものは，いずれの曲線も異なった最大値をもつ 2 つの分布関数を合成したような形になり，比表面積の大きいものはとくに「二重くさび型」になる。このような形は 0% の 7 日材令のものにのみ見られ，28 日材令では図―8 のようにいずれも「二重くさび型」にならない。この「二重くさび型」はこの種類のソイル セメントはかなり力学的性質の異なる 2 つの相より成っていることを想像させる。すなわち定量的に詳細な説明はむずかしいが，0% の 7 日材令のソイル セメントでは clay pocket の占める割合が大きく skeleton 部分に匹敵し，また 0% の clay pocket の力学的性質は他の含水比のものとはかなり異なったものであると推察される。したがって 図―7 における比表面積 290 cm²/cm³ の曲

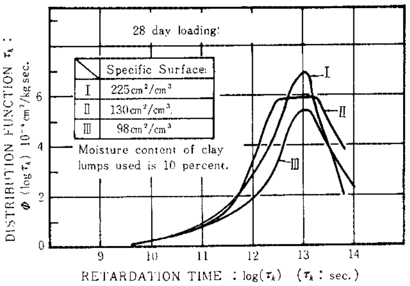
線と 86 cm²/cm³ のものとの相違によって示されるように，ときほぐしの度合が分布関数の形にかなり大きく影響することになる。

図—**9**，図—**10** によって示されるように含水比 10% のものは 0% におけるほど比表面積の大小による Φ(log τ_K) の形の差異は顕著でない。このことから含水比 10% 粘性土を使用したソイル セメントでは 0% の場合よりセメント ゲルの移動または Ca^{++} イオンの拡散が容易なため原材料の粘性土塊が粗くても養生とともに形成される内部構造は clay pocket の少ないものになり，分布関数の形にときほぐしの度合による差があらわれなくなるものと推察される。含水比 20%，30% のものでは比表面積による分布関数の形に違いはほとんどみられなくなる（図—**11**，図—**12**，ただし 20%，30% のものでは比表面積そのものにあまり大きな差がないが）。また 30%，20% の高含水比の分布関数と 0%，10% の低含水比のものとの顕著な差異は前者は後者にくらべて短い遅延時間領域で大きな関数値をもつことである（図—**11**，**12** と 図—**7**,**8**,**9**,**10** を比較)。

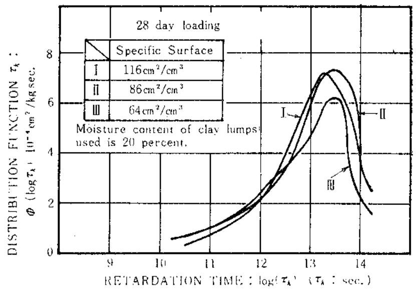
さらに粘性土の比表面積，材令と分布関数の特徴の関係をより明確にするために，各分布関数の最大値（Φ_{max}）と比表面積の関係および分布関数の最大値を与えるときの遅延時間と比表面積の関係を図示すると図—**13**，図—**14** のようになる（ただし 0% の「二重くさび型」のものは小さい方のくさびの Φ_{max} およびそのときの遅延時間をとる)。載荷時の材令 7 日では含水比 0%，10% の粘性土を使用したソイル セメントの分布関数の最大値は比表面積が大きくなるにしたがって小さくなる傾向を示す。これに反して破線で示される載荷材令 28 日のものは 7 日材令とは逆に比表面積が大きくなるにしたがって関数の最大値は大きくなる（図—**13**)。また図—**14** から明らかなように，載荷材令 7 日では含水比 0%，10% のものは比表面積が大きくなると分布関数の最大値をあたえるときの遅延時間 （$(\log \tau_K)\Phi_{max}$） は小さくなっている。このように含水比 0%，10% では関数特性値（Φ_{max}，$(\log \tau_K)\Phi_{max}$） と比表面積との関係が載荷材令 7 日と 28 日とで逆の傾向を示す。さらに 28 日のものは 7 日のものよりピーク全体が log(τ_K) の大なる方向に移行し，ピーク高さは小さくなっている。これらの事実から含水比 0%，10% では 7 日材令以後においてもセメント ゲルの移動や Ca^{++} イオンの拡散が進行し，同時にポゾラン反応も生じかなり内部構造が変化していることがわかる。これに対して含水比 30% のものは 7 日材令と 28 日材令の間でピークの高さまたは形に大きな変化がない。さらに高含水比のものは比表面積が小さく，粗い粘性土塊であるにもかかわらず，関数の形は 0% の粗い粘性土を使用したソイル セメントのように「二重くさび型」にならない。これらの事実から 30% のように高い含水比の粘性土を使用するとセメント ゲルの移動または Ca^{++} イオンの拡散が低含水比のものよりもすすみやすく，少なくとも 7 日材令において比較的均質な内部組織になっているものと推察される。



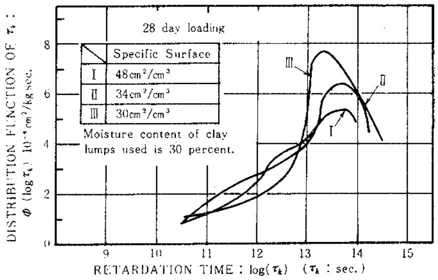
図—**9** Distribution function of τ_K in soil-cement mixture using clay lumps sample



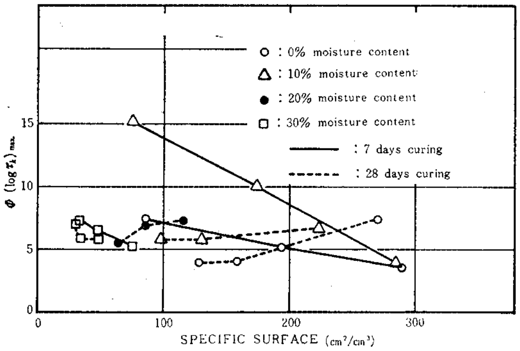
図—**10** Distribution function of τ_K in soil-cement mixture using clay lumps sample



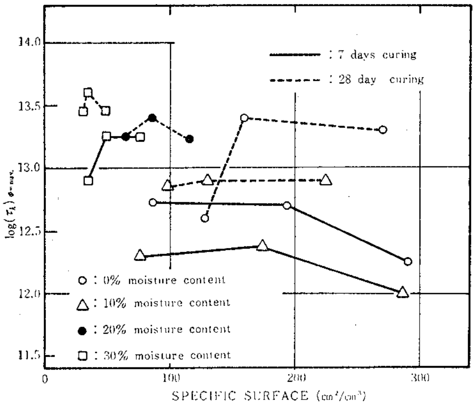
図—**11** Distribution function of τ_K in soil-cement mixture using clay lumps sample



図—**12** Distribution function of τ_K in soil-cement mixture using clay lumps sample



図—13 Relationship between the maximum value of the distribution function and the specific of clay lumps sample used



図—14 Relationship between the retardation time taking the maximum value of Φ and the specific surface of clay lumps sample used

以上を総合するとソイル セメントの遅延時間(τ_K)の分布関数の形から考えて，ときほぐし粘性土を使用したソイル セメントの内部構造は粘性土の含水比，ときほぐしの度合および材令によって決まり，同一のときほぐし程度では高含水比のものの方がセメント ゲルの移動や Ca^{++} イオンの拡散が速く進み，早い時期に均質で安定な内部構造になるようである。このような高含水比と低含水比における内部構造の相違は供試体の切断面を肉眼で観察することによってもある程度確認できるようである（写真—2 参照)。

(3) 粘性土のときほぐしの度合がソイル セメントの四要素模型定数におよぼす影響

載荷材令7日および28日に対する各種ソイル セメントの四要素模型定数は **表—3**, **表—4** のようになる。これら定数のうち比較的短時間における材料の応力に対する応答の特性を示すと考えられる E_1 と比表面積の関係および長時間にわたる材料の流動特性を示す η_3 と比表面積の関係をえがくと **図—15**, **図—16** のようになる。

前述の収縮特性や分布関数にはときほぐし時の含水比

表—3 Four-element model constants of each soil-cement mixture using clay lumps (7 day loading)

Moisture Content (%)	Specific surface (cm²/cm³)	E_1 (×10⁴ kg/cm²)	E_2 (×10³ kg/cm²)	η_2 (×10³kg·day/cm²)	η_3 (×10⁵kg·day/cm²)
0	86	0.79	0.98	3.27	0.43
	195	0.88	1.59	2.80	1.03
	290	0.67	1.00	1.50	1.12
10	75	0.58	0.39	0.96	0.78
	174	0.71	0.67	1.45	0.45
	285	0.95	1.38	2.97	0.48
30	33	0.72	0.70	2.06	1.30
	49	0.73	0.77	2.88	0.63
	75	0.62	0.66	2.68	0.57

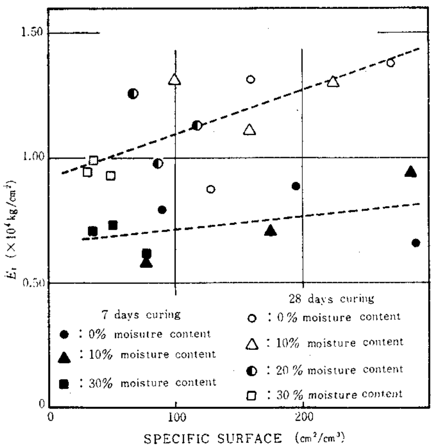
表—4 Four-element model constants of each soil-cement mixture using clay lumps (28 day loading)

Moisture Content (%)	Specific Surface (cm²/cm³)	E_1 (×10⁴ kg/cm²)	E_2 (×10³ kg/cm²)	η_2 (×10³kg·day/cm²)	η_3 (×10⁵kg·day/cm²)
0	128	0.87	1.44	6.00	1.39
	160	1.31	1.51	7.61	1.58
	270	1.38	1.06	5.00	0.95
10	98	1.31	1.15	3.84	1.21
	130	1.11	0.91	3.29	1.24
	225	1.30	0.89	2.88	1.78
20	64	1.26	1.11	4.28	0.96
	86	0.98	0.99	4.58	0.94
	116	1.14	0.91	4.06	0.84
30	30	0.99	0.94	5.04	0.48
	34	0.94	1.04	5.61	0.43
	48	0.93	0.81	4.72	1.14

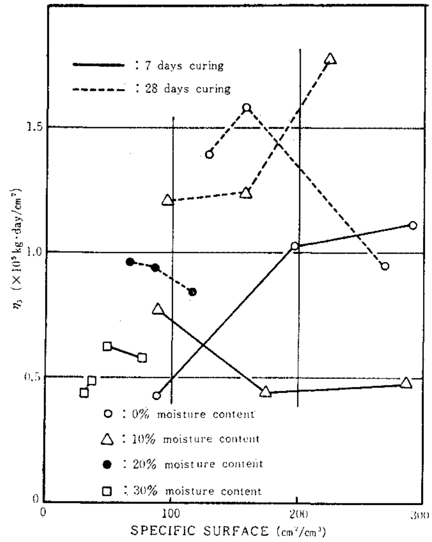
による明確な差がみとめられたが，**図—15** から明らかなように E_1 と比表面積の関係は含水比によって大きな差異はなく，比表面積が増加するにしたがって E_1 は大きくなっている。これに対して η_3 と比表面積の関係は含水比によってかなり傾向が違っている。これは E_1 は skeleton 部分の剛性を示し，η_3 には clay pocket の影響が卓越することによるものと思われる。すなわち分布関数および供試体切断面の肉眼による観察結果から示されるように，含水比 30% のものの内部構造は他のものにくらべて均質であるが，それだけ skeleton 部分のセメント水和ゲルやポゾラン反応によるケイ酸カルシウム水和物の濃度が小さくなるために E_1 は小さくなるものと考えられる。一方 η_3 と比表面積の関係は含水比 0% と 10% とで逆の傾向になり，また載荷材令7日と28日とでも互いに逆の傾向を示す(**図—16**)。η_3 は clay pocket が全体に対して占める容積率およびその流動特性によって支配されると考えられるが，これらの要因と上述の実験結果との関連づけは本実験のみからは不可能である。

(4) 粘性土のときほぐしの度合と極限クリープひずみの関係

図—17, **図—18** は載荷材令7日および28日における

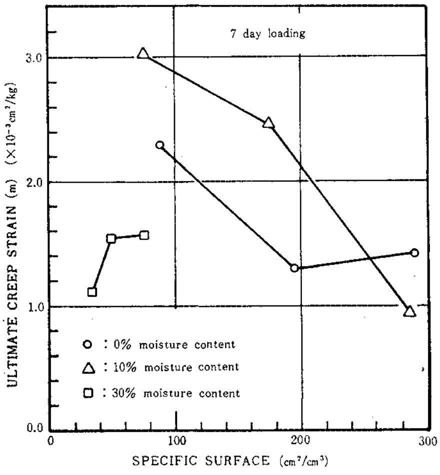


図—15 Relationship between E_1 and the specific surface of clay lumps sample used

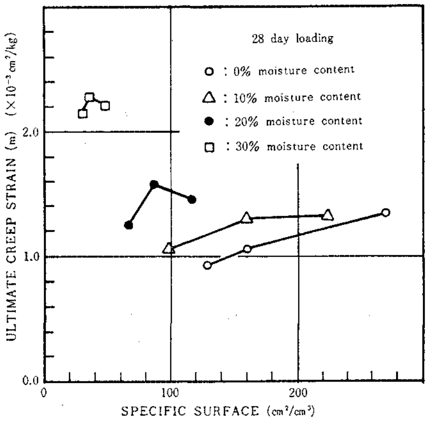


図—16 Relationship between η_3 and the specific surface of clay lumps sample used

比表面積と極限クリープひずみ (m) の関係を示す。載荷材令 7 日のものはいずれの含水比においても比表面積が大きくなるにしたがって極限クリープひずみはかなり小さくなるが，28 日材令のものでは，含水比 30% の m は他のものにくらべてかなり大きく 20%，10%，0%の含水比間には差はほとんどみられず，また 7 日材令と逆に比表面積が大きくなると m は多少増加する傾向を示す。しかし全体として 28 日材令のものは含水比 30% の場合を除いて，ときほぐしの度合および含水比が変化しても極限クリープ ひずみ は変化せず $1.0\sim1.5\times10^{-4}$ (cm²/kg) の値を示す。これは，分布関数の結果より推察されたように，7 日材令から 28 日材令の間に内部構造がより均質になり，7 日養生供試体にみられたときほぐしの度合および含水比の差による内部構造の差異が少なくなるためと考えられる。



図—17 The variation of ultimate creep strain with the specific surface of clay lumps sample used

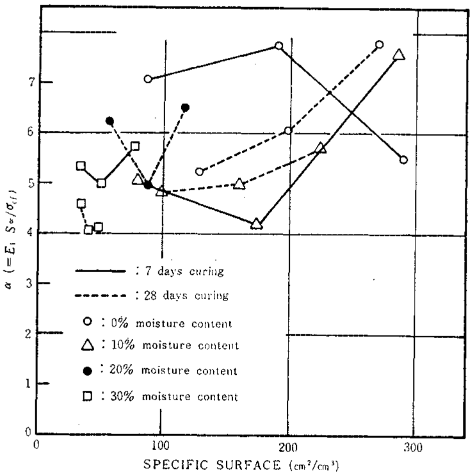


図—18 The variation of ultimate creep strainc with the specific surface of clay lumps sampl used

(5) 収縮きれつ発生についての考察

弾性係数 E_1 および極限収縮ひずみ S_∞ が大きいほど収縮きれつが発生しやすいと考え，各供試体の $E_1\cdot S_\infty/\sigma_{cf}(=\alpha)$ (σ_{cf}：圧縮強度) を計算すると 図—19 のようになる (S_∞ はクリープ試験用の無応力供試体より求めたものである)。一，二の例外はあるが，全体として比表面積の大きいものの方が α は大きくなるようである。一方含水比の影響については，7 日材令の比表面積 290 cm²/cm³ (含水比 0%) のものを除いて同程度のときほぐしの度合では 0% の α よりも 10% の方が小さい。全体としては 7 日材令の 0% のものが著しく大きく，28 日材令の 30% のものが非常に小さい α 値を示す。

α には材料の粘弾性性質の影響は入っていないが，上述の実験結果より，あまりときほぐしの度合をあげなくても高い含水比の粘性土を使用し十分な日数にわたって養生すれば収縮きれつ発生という点でかなり有利なソイル セメントになることがわかる。材料の粘弾性 性質の



図—19 Relationship between $\alpha(=E_1 \cdot S/\sigma_{cf})$ and the specific surface of clay lumps sample used

収縮きれつにおよぼす影響については流動特性を示すη_3が小さいほどきれつ発生の軽減に役立つと考えられる。**表—3,4** から明らかなように含水比 30% のものの η_3 は全体として小さいことから考えて，上述のような結論は材料の粘弾性性質を考慮に入れた場合においても妥当なものと考えられる。

4. 結　　論

乾燥収縮試験およびクリープ試験結果を種々の方法によって解析することによって，粘性土のときほぐしの度合および含水比がソイル セメントの収縮特性および粘弾性的性質におよぼす影響について明らかになった。得られたおもな結果についてまとめるとつぎのようである。

(**1**) ソイル セメントの極限収縮ひずみは粘性土のときほぐしの度合 および ときほぐし時の含水比によって支配され，ときほぐし時の含水比を 30% 程度に高めるかまたは0% まで乾燥した粘性土を使用すれば，ときほぐしの度合があまりすすんでいなくても極限収縮ひずみは小さい。しかし含水比 10% 程度ではある程度ときほぐしの度合をあげて，比表面積の大きい粘性土を使用しなければ極限収縮ひずみはかなり大きくなる。

(**2**) ときほぐし時の含水比 0% の粘性土を使用したソイル セメントの遅延時間の分布関数は異なったピークをもつ2つの分布関数を合成したような形になり，比表面積の大きいものはとくに「二重くさび型」になる。しかし他の含水比のものおよび 28 日材令のものはすべて鋭い「くさび型」を示す。

(**3**) 本実験で得られた分布関数は $\log \tau_K = 12 \sim 13.5$ において最大値をもつ。これはコンクリートについて求められている $(\log \tau_K)_{\phi_{max}} = 13 \sim 17$[10] にくらべてかなり小さい。

(**4**) 四要素模型定数 E_1 は比表面積が増加するにしたがって大きくなり，ときほぐし時の含水比にはほとんど関係がない。一方 η_3 は含水比の影響を受け，含水比 30% の η_3 はかなり小さい。

(**5**) 載荷材令 7 日の供試体の極限クリープひずみは含水比によって異なり，比表面積が大きくなるにしたがって小さくなる。これに対して載荷材令 28 日の極限クリープひずみは含水比 30% のものを除いて，含水比間でほとんど差がなくまた比表面積が大きくなると多少増加する傾向を示す。

(**6**) $E_1 \cdot S_\infty/\sigma_{cf}$ を収縮きれつの発生しやすさを示す尺度と考えると，ときほぐし粘性土を使用したソイル セメントではあまりときほぐしの度合をあげなくても高い含水比の粘性土を使用し十分な期間にわたって養生を行なえば収縮きれつ発生の点でかなり有利なソイル セメントになる。

最後に本研究の実験を行なうに際し，堺市役所 水口宗夫，西松建設（株）能々新二，佐藤工業（株）泉 哲夫，静岡県庁 大石昭雄の諸氏の協力を得たことを付記し感謝の意を表する。

参　考　文　献

1) National Academy of Science : "Soil Stabilization With Portland Cement", H.R.B. Bull. 292, pp. 14~15, 1961.
2) 岡田・川村："ソイル セメントの乾燥収縮応力に関する二，三の考察"，土木学会論文集 第 142 号，pp. 37~45, 1967.
3) Nakayama, H. and Handy, R.L. : "Factors Influencing Shrinkage of Soil-Cement", Highway Research Record No. 86, pp. 15~27, 1965.
4) George, K.P. : "Shrinkage Characteristics of Soil-Cement Mixtures", Highway Research Record 255, pp. 42~58, 1968.
5) George, K.P. : "Cracking in Pavements Influenced by Viscoelastic Properties of Soil-Cement", Highway Research Abstracts Vol. 38, No. 12, p. 111, Dec. 1968, H.R.R. 263 pp. 47~59, 1969.
6) George, K.P. : "Cracking in Cement-Jreated Bases and Means for Minimizing It", Highway Research Record 255, pp. 59~71, 1968.
7) 枷場・川村："ソイル セメントの原材料としての粘性土のときほぐしについて"，土木学会論文集 No. 155, pp. 25~31, 1968.
8) Davidson, L.K., Demirel, T., and Handy, R.L. : "Soil Pulverization and Lime Migration in Soil-Lime Stabilization", Highway Research Record, No. 92, pp. 103~126, 1965.
9) 樋木・得丸："線型および非線型粘弾性体の力学的挙動を特性づける分布かん数について"，航空学会誌 第2巻，第 12 号，pp. 317~322, 1955.
10) 大岸："コンクリートのレオロジーに関する研究（その2)"，日本建築学会論文報告集，第86号，pp. 1~6, 1963.
11) 田中："応用数学—数値計算法—"，槙書店，1959.
12) 中川・神戸："レオロジー"，みすず書房，pp. 391~394.
13) Lorman, W.R. : "The Theory of Concrete Creep" Proc. ASTM, Vol. 40, pp. 1082~1102, 1940.

(**1969.8.21・受付**)