

繰返し荷重を受けるソイルセメントの 変形および強度特性

DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF
SOIL-CEMENT MIXTURES UNDER REPEATED LOADING

枷場 重正*・川村 満紀**・大浦 隆***
By Shigemasa Hasaba, Mitsunori Kawamura and Takashi Ohura

1. まえがき

走行自動車の大型化に伴い、経済的な路盤材料の開発の重要性はますます増大しつつある。ソイルセメントは路盤材料として種々の点で望ましい工学的性質を有することがこれまでの多くの研究によって実証され、実際にもかなり多くの施工例がみられる。従来ソイルセメントの種々の力学的性質の評価は静的な荷重条件下で行われ、動的載荷によってその力学的特性を検討することは非常にまれである。すなわち、ソイルセメントの路盤材料としての適不適は一軸圧縮強度、CBR、湿潤乾燥および凍結融解試験に基づいて判断してきた。

実際には道路舗装体は輪荷重の動的な繰返しを受け、この繰返し応力がソイルセメントの力学的性質を変化させたり、あるいは疲労破壊に至らしめることは容易に予想される。しかし繰返し荷重実験は静的荷重試験のように簡単には実施できないため、動的荷重下におけるソイルセメントの挙動に関する系統だった研究はきわめて少ないようである。さらに2層または3層系弾性理論を適用することによる舗装設計では、動的荷重下における路盤材料の弾性的性質についての知識が必要である。このような観点から、本研究は繰返し荷重を受ける路盤材料としてのソイルセメントの変形および強度特性について実験的検討を加えたものである。

2. 従来の研究概要

繰返し圧縮荷重下におけるソイルセメントの変形特性についての系統的な研究はきわめて少ない。しかし、すでに発表されている二、三の研究結果によると、土の種

類、セメント量、材令および含水比によってかなり違った結論が導かかれているので、問題点を明らかにするために、従来の研究の要点を記し、本研究の意義を明確にする。

Gandais¹⁾はセメント量10%のソイルセメントに圧縮強度の約15%の繰返し荷重を10万回まで与えた。その主な結果として、強度は繰返し荷重によって約20%増加し、回復性変形は繰返し数とともにやや減少するが、全変形はやや増加すると述べている。

Robichon²⁾はセメント量10%のソイルセメントに対して約2.1 kg/cm²の繰返し応力を与えた結果、試験前非浸水の供試体強度は繰返し載荷によって30~50%増加するが、浸水した供試体の強度は繰返し荷重によってほとんど影響を受けないという興味深い事実を述べている。これらの研究は比較的セメント量の大きいソイルセメントに関するものであるが、Mitchell³⁾らによる低セメント量のセメント安定処理土の繰返し荷重下における変形挙動は多少上述の結果とは異なったものとなるようである。

Mitchell³⁾は3%のセメントで処理されたシルト質粘土を24時間養生した供試体に繰返し荷重を与え、次のような結果を得ている。すなわち、全ひずみは繰返し数とともに増大するが、約1000回以後において一定値に達する。また、回復性ひずみは試験の出発直後に最大となり、その後繰返し数とともに減少する。その他、回復性ひずみに基づいた変形係数は圧縮応力の増大とともに大きくなることおよび繰返し荷重を受けた結果安定処理土に生ずる一種のひずみ硬化現象は非常に著しいが、終局強度はほとんど変わらないなどの結果を得ている。

このように既往の研究はたがいに必ずしも一致した結論を得ていないようである。Shenの研究結果⁴⁾との比較などから考えても、セメント量、材令および土の種類によってソイルセメントの構造は大幅に変化し、一概に

* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 ピー・エス・コンクリート株式会社

ソイルセメントといつても無処理土に近い性質を示すものから一種の貧配合コンクリートと考えられるものまであり、それらは繰返し荷重下においてかなり異なった挙動を示すものと考えられる。

このような研究の現状を考慮に入れて、本研究では、土試料として粘性土と砂質土を選び、また7日材令において 20 kg/cm^2 の一軸圧縮強度を有するソイルセメントについて、繰返し荷重下の変形特性および強度変化などについて実験的検討を加える。

3. 実験概要

(1) 使用材料および供試体の作製法

砂質土は富山県小矢部市石動産であり、粘性土は金沢市卯辰山産である。粘性土は長期間室内で自然乾燥させ、ときほぐし機⁵⁾によって一定の粒度にときほぐしたものである。これら土試料の主な物理的性質は表-1に示すとおりである。

使用セメントは普通ポルトランドセメントである。

供試体は直径5cm、高さ10cmの円柱体であり、すべて所定の含水比(最適含水比)および最大乾燥密度になるように静的締固めによって作製されたものである。各供試体は硫酸紙で覆い、その上にパラフィンワックスを塗布して、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温恒湿室中で7日間養生されたものである。

(2) 材料の配合

日本道路協会編「アスファルト舗装要綱」では路盤用セメント安定処理土の目標圧縮強度は、アスファルト舗装では 30 kg/cm^2 、コンクリート舗装では上層路盤 20 kg/cm^2 、下層路盤 10 kg/cm^2 となっている。本実験では両舗装を含めての平均値として、目標7日強度 20 kg/cm^2 を選んだ。

7日材令において一軸圧縮強度が 20 kg/cm^2 となるようなセメント量を決定するために、適当な範囲で二、三のセメント量について最適含水比および最大乾燥密度を求め、他のセメント量に対する最適含水比および最大乾燥密度は比例配分によって決定される。たとえば、粘性土についてはセメント量15%と3%に対する最適含水比および最大乾燥密度を求め、その他のセメント量に対する値は比例配分によって推定される。

各セメント量について一軸圧縮試験(載荷速度0.5ton/min.)を行うことによって決定された砂質土に対するセメント量は7.3%であり、粘性土に対しては17.5%である。

(3) 実験装置および方法

繰返し荷重はサーボパルサー(島津社製、EHF-10形、最大荷重10ton)によって与えられる(写真-1、2)。荷重一時間関係は正弦関数であり、載荷速度は毎分180サイクルである。

繰返し回数増加に伴う縦方向ひずみ進行は図-1に示されるように差動トランジスタ型ひずみ計によって測定され、結果はペンレコーダに自記される。

繰返し載荷中における供試体からの水分の蒸発を防ぐために供試体をゴムスリーブ(写真-1、2および図-1参照)によって密封する。

応力条件は目標強度(20 kg/cm^2)に対する百分率で、I. 下限応力10%～上限応力50%，II. 下限応力30%～上限応力70%，III. 下限応力50%～上限応力90%の3種類である。すなわち、応力振幅をすべて強度の40%として、平均応力を強度に対する百分率で30%，50%，70%と変化させる。しかし、砂質土、粘性土とともに $22 \sim 23 \text{ kg/cm}^2$ の一軸圧縮強度を示したので、実際の強度に対する割合は上記の応力条件とは多少異なっている。

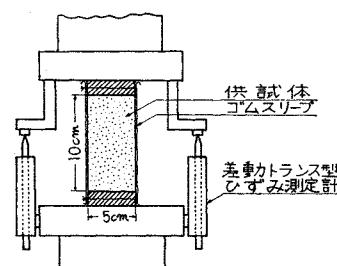


図-1 たて方向ひずみ測定装置

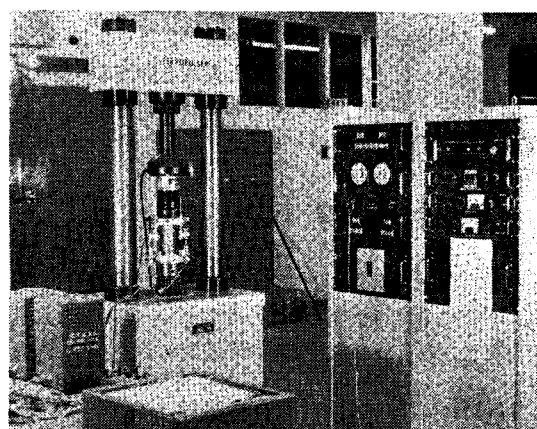


写真-1 繰返し荷重試験装置

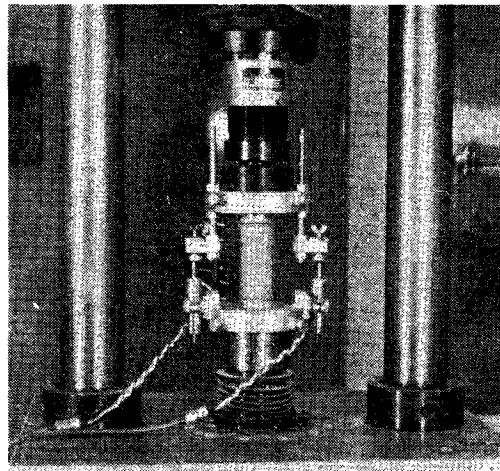
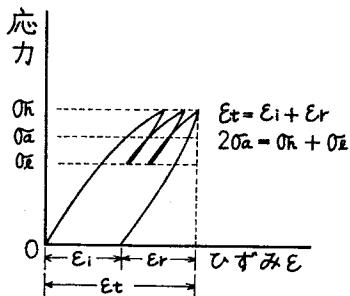


写真-2 たてひずみ測定装置

また砂質土では、応力条件Ⅲにおいて 30 万回以前に疲労破壊が生じたので下限応力 40%～上限応力 80% という条件で実験が行われた。

これらの応力条件下で、繰返し荷重を受けたソイルセメントの強度、弾性係数（強度の 1/3 点と原点を結ぶ割線係数）およびボアソン比の変化を明らかにするために、30, 100, 300, 1,000, 3,000, 1 万, 3 万, 10 万, 30 万の各回数の繰返し載荷実験終了後に、静的～軸圧縮試験を行う。さらに、繰返し載荷中に測定された縦方向ひずみから回復性ひずみおよび非回復性ひずみを求める（図-2 参照）。

図-2 回復性(ϵ_r)・非回復性(ϵ_i)ひずみ説明図

4. 実験結果と考察

(1) 繰返し荷重下におけるソイルセメントの全ひずみ、回復性ひずみおよび非回復性ひずみ

全ひずみ (ϵ_t) および非回復性ひずみ (ϵ_i) を図-2 のようにとる。また、繰返し回数增加に伴う全ひずみの変化をえがくと図-3 のようである。粘性土では、本実験の応力条件の範囲内においては、たがいにはほぼ平行な直線となり、1万回前後で、増加割合がやや大きくなっている。

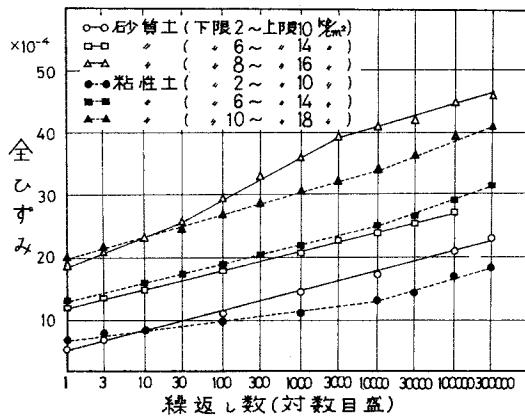


図-3 繰返し回数と全ひずみの関係

いるようである。砂質土では、低いほうの 2 つの応力条件下において、たがいに平行な直線となるが、最高応力下では 3,000 回まで他のものより勾配が大となり、その後また低下して、全体としてはかなり大きな全ひずみを示す。

つぎに、繰返し回数と非回復性ひずみの関係を示すと図-4 のようである。強度のばらつきのために、各応力条件における砂質土と粘性土の非回復性ひずみの増加傾向について厳密な比較はできないが、全体として、砂質土の強度が粘性土より約 10% 低いことを考慮に入れたとしても、すべての繰返し回数において、砂質土のほうが粘性土よりもかなり大きな非回復性ひずみを示すことがわかる。また、この図にみられるもう 1 つの特徴は応力条件 ($8 \sim 16 \text{ kg/cm}^2$) における砂質土の非回復性ひずみがわずか 2 kg/cm^2 だけ低い応力条件 ($6 \sim 14 \text{ kg/cm}^2$) にくらべてかなり大きいことである。また、粘性土でも、高応力になるにしたがって、非回復性ひずみの増加割合が大きくなっている。この点をより明確にするために、各繰返し回数ごとに、横軸に平均応力の強度に対する比をとり、縦軸に非回復性ひずみをとると図-5 のよ

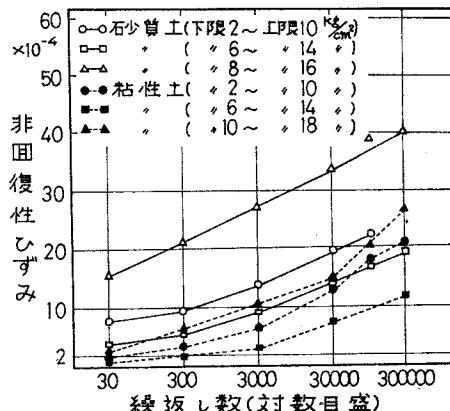


図-4 繰返し回数と非回復性ひずみの関係

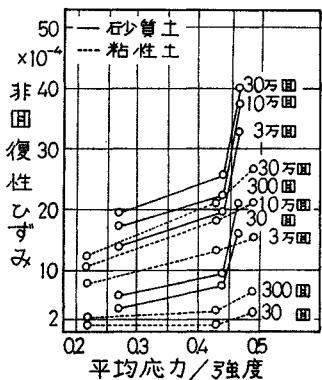


図-5 平均応力/強度比と非回復性ひずみの関係

うになる。これらの折線を比較すると、同じ平均応力/強度比に対して、いずれの繰返し回数においても、砂質土の全ひずみのうち非回復性ひずみの占める割合は粘性土のそれよりかなり大きいことがわかる。平均応力/強度比=0.4で比較すると、30回における砂質土の非回復性ひずみは粘性土の11倍、300回では2.7倍、3万回では1.5倍、10万回で1.3倍となる。このように、繰返し回数増加に伴って粘性土の非回復性ひずみの増加割合が大となり、砂質土の非回復性ひずみの値に近づく。特に砂質土の(平均応力/強度)-非回復性ひずみの関係にみられる1つの特徴は0.42付近で急に非回復性ひずみが増加することである(図-5)。しかしこの種の供試体の圧縮強度は30万回まで増加している(図-11参照)ことから、この高い非回復性ひずみは直接疲労破壊に結びつくものではないと考えられる。このような急激な非回復性ひずみの増加が疲労破壊と関係があるか否かは工学上興味深い問題であり、今後の研究を待たねばならない。

つぎに、回復性ひずみと繰返し回数の関係をえがくと図-6のようになる。いずれも300回までやや増加の傾向を示し、その後30万回まで減少し続ける。粘性土では平均応力にほぼ比例して回復性ひずみは大きくなるが、砂質土では応力条件I(下限2~上限10kg/cm²)とII(下限6~上限14kg/cm²)間の差は粘性土の場合にくらべてかなり小さい。このことは砂質土ソイルセメントは比較的大きな平均応力の繰返しを受けると、全ひずみのうち、非回復性成分の占める割合が大きくなることを示している。

さらに、図-7は回復性ひずみに対する非回復性ひずみの比の繰返し荷重回数に伴う増加状況を示したものである。

両土試料ともに繰返し数増加に伴い、この比の値は急激に増加する。砂質土の値は全体として粘性土より大きく、特に砂質土の最高応力条件IIIが非常に大きな値を示している(30万回において7)。粘性土においては3応

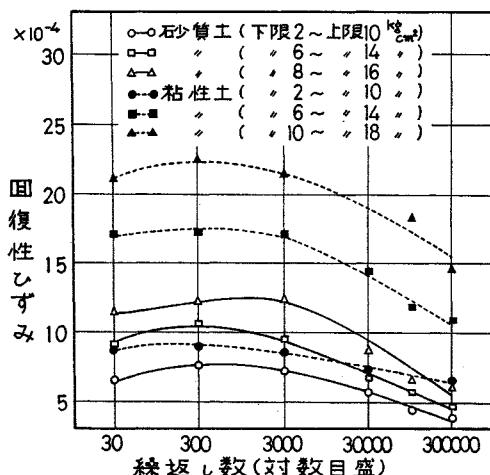


図-6 繰返し回数と回復性ひずみの関係

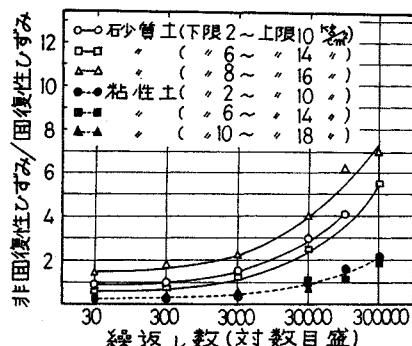


図-7 繰返し回数と(非回復性/回復性ひずみ)比の関係

力条件間の差はほとんどなく、砂質土とはかなり異なった挙動を示す。

(2) 繰返し載荷が応力-ひずみ曲線、弾性係数およびボアソン比におよぼす影響

種々の回数の繰返し荷重を受けたソイルセメント供試体の応力-ひずみ曲線をえがくと図-8のようになる。すでに報告されているように⁶⁾、処女応力-ひずみ曲線は特有の凸形であるが、数10サイクルの繰返し荷重を

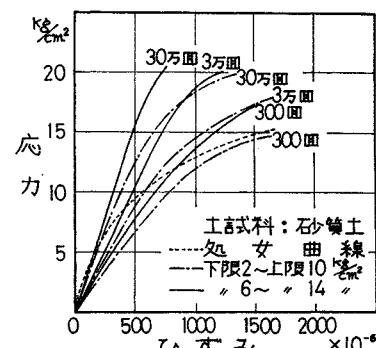


図-8 各繰返し回数における応力-ひずみ曲線

受けただけで直線化することがわかる。直線化とともに300回までは応力一ひずみ曲線の勾配は減少するが、その後、繰返し回数の増加とともに勾配は大きくなる傾向が顕著にみられる。この特異な現象は次に述べるよう、弾性係数の繰返し回数に伴う変動傾向として現われているが、現在のところ、これを説明することはできない。

これらの応力一ひずみ曲線に基づいて、破壊強度の1/3点における割線弾性係数を求め、それらの繰返し回数に伴う変化をえがくと図-9のようである。

全体として、砂質土ソイルセメントの弾性係数は粘性土よりかなり大きい。前述の応力一ひずみ曲線からもある程度推定できるように、砂質土ではいずれの応力条件下においても、300~1000回までは弾性係数は減少し、その後、30万回まで著しく増大し続ける。粘性土においても、砂質土と同様に、1000回前後までは弾性係数は低下し、その後増加するという傾向を示すが、その変化の程度は砂質土ほど大きくない。

図-10は繰返し回数とポアソン比（横方向ひずみは電気抵抗線ひずみゲージによって測定）の関係を示したものであるが、繰返し載荷を受けることによるポアソン

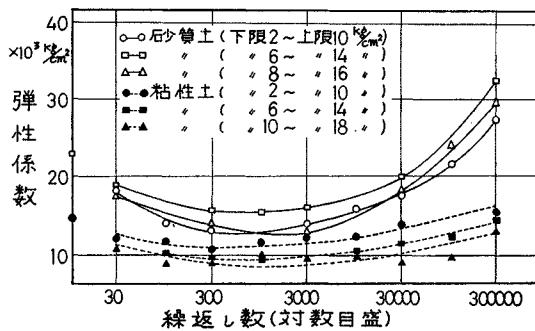


図-9 繰返し回数に伴う弾性係数の変化状況

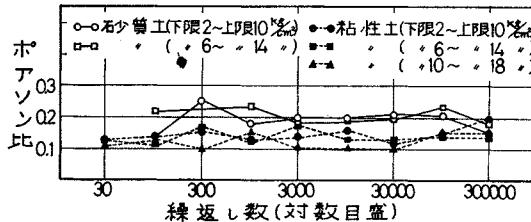


図-10 繰返し回数とポアソン比の関係



図-11 繰返し回数に伴う強度の増加割合

比の変化は現応力条件下ではほとんど見られない。

(3) 繰返し載荷が圧縮強度におよぼす影響

各繰返し回数において、無載荷供試体の強度に対する比をとると図-11のようになる。繰返し回数とともに、強度は徐々に増加し続け、30万回において、約20%の強度増加がみられる。このような強度増加は繰返し荷重を受けたコンクリートについてもみられる現象であるが、コンクリートの場合と同様に、この現象を繰返し荷重による供試体の締め固まりによるち密化のみによって説明することは困難なようである。また繰返し載荷によって30~50%も強度が増加するという報告²⁾もあり、実験条件によっても増加割合は異なるようである。

5. 補装路盤材料としてのソイルセメントの特性

前節では、ソイルセメントの繰返し荷重下における変形特性および強度について得られた実験結果を述べたが、ソイルセメントが補装路盤材料として使用されるとき、上述の繰返し荷重下における諸特性がソイルセメントの路盤材料としての機能におよぼす影響について二、三検討を加える。

まず、いずれの繰返し回数においても、砂質土の非回復性ひずみは粘性土よりかなり大きい（図-4）。このことは、砂質土ソイルセメントの実際路盤の残留沈下量が大きくなることを意味しており、特に舗装版の不等沈下量が大きくなる可能性を示している。このような不等沈下によるコンクリート舗装版の局部破壊を軽減するという点に関する限り、粘性土のほうが砂質土より路盤材料として望ましい性質をもっているといえよう。

ソイルセメントの弾性係数は路盤の荷重分散効果および乾燥収縮によるひびわれ発生において非常に重要なファクターである^{7),8)}。前節において述べたように、繰返し荷重回数に伴うソイルセメントの弾性係数の変化はかなり大きく、特に砂質土では30万回の繰返し回数の範囲内で最大値は最小値の2倍程度にまで達する。図-9にみられるこの特異な現象はソイルセメントの路盤材料としての働きに重要な意味をもっている。弾性係数の増加は荷重分散効果という点では望ましい。また、ソイルセメント路盤には乾燥過程の初期に表面に生ずる引張収縮応力を軽減することがきれつ発生防止上効果的と考えられている^{7),8)}。砂質土ソイルセメントの弾性係数は繰返し回数1000回程度まで一時的に低下するという事実を考慮すれば、ソイルセメント施工後、収縮きれつ発生時期を繰返し荷重回数1000回程度に相当する交通量に合わせるように、養生後なるべく初期に荷重を与えるこ

とがきれつ発生防止上望ましいといえよう。

さらに、繰返し荷重回数に伴う強度増加はきれつ発生防止上相乗的な効果をおよぼすであろう。

このように、ソイルセメントが破壊に至らない程度の繰返し荷重を受けることはその工学的性質を改善することになる。したがって、ソイルセメントに有害な損傷を与え、いわゆる疲労破壊に至らしめる限界応力条件を確立することが合理的な舗装設計上重要であり、その方針で現在研究を進めている。さらに、近年の重交通荷重に対する比較的高い強度をもつソイルセメントの繰返し荷重下における変形および疲労特性についての実験も進行中である。

6. まとめ

本報告では繰返し応力の応力振幅を一定 (8 kg/cm^2) として平均応力を 3 段階に変化させたときのソイルセメントの変形挙動 および 強度特性を実験的に究明している。通常、わが国で行われている一軸圧縮強度に基づくソイルセメントの配合設計においては、ある目標強度を得るためにセメント量が決定される。しかし、本研究の結果では、同一の圧縮強度をもつソイルセメントでも、使用土の種類によって、繰返し荷重下における変形特性がかなり異なり、非回復性変形の大きさという点では、路盤用ソイルセメント材料として、粘性土が砂質土よりもむしろ望ましい性質をもっていることが明らかになった。したがって、表層の種類に応じて路盤ソイルセメントの使用土の種類を選択することを考慮すれば、より合理的なソイルセメントの設計が可能になるものと思われる。

本研究で得られた主な結果をまとめると次のようである。

(1) 砂質土ソイルセメントでは、各応力条件とともに 300~1 000 回までは弾性係数は減少し、その後 30 万回まで増加する。

(2) 女子載荷の応力一ひずみ曲線は特有の凸形であるが、数サイクルの繰返し荷重を受けるだけで直線化する。

(3) 粘性土ソイルセメントの弾性係数一繰返し回数関係も砂質土ソイルセメントと同様な傾向を示すが、変動の大きさは砂質土ほど大きくない。

(4) 圧縮強度は繰返し回数に伴って変化し、30 万回で、20% 程度の強度増加がみられた。

(5) 全ひずみの進行は、砂質土、粘性土ソイルセメントとともに 30 万回まで半対数目盛ではほぼ直線となる。

(6) 本実験のような応力条件における 30 万回までの繰返し回数に対しては、砂質土ソイルセメントは粘性土より大きな非回復性変形を示す。

(7) 全体として、砂質土の回復性ひずみは小さく、繰返し荷重によって生ずる全ひずみのうち非回復性成分の占める割合がきわめて大きい。

(8) 現応力条件下では繰返し回数に伴うポアソン比の変化はないようである。

謝辞：本実験を行うにあたり、ご協力いただいた矢作建設（株）水谷治雄氏に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Gandais, M.A. : Effect of Repeated Loading on Properties of Soils Stabilized with Lime and Cement, Research Report, University of California, 1962
- 2) Robichon, J.M. : Resilience Characteristics of An AASHO Soil Stabilized with 10% Cement, Research Report, University of California, 1963
- 3) Mitchell, J.K., Shen Chik-Kang and Monismith C.L. : Behavior of Stabilized Soils under Repeated Loading, 米国政府文書シリーズ, Report No. AD-632802, 1965
- 4) Shen, C.K. : Behavior of Cement Stabilized Soil under Repeated Loading, Ph. D. Thesis, University of California, 1965
- 5) 柳場重正・川村満紀：ソイルセメントの原材料としての粘性土のときばぐしについて、土木学会論文集 No. 155, pp. 25~31. 昭和 43 年 7 月
- 6) 岡田 清・川村満紀：ソイルセメントの荷重変形特性に関する二、三の考察、材料、Vol. 13, No. 132, pp. 705~710, 昭和 39 年 9 月
- 7) Sanan, B.K. and George, K.P. : Viscoelastic Shrinkage Stress in Soil-Cement Base, Proc. ASCE, Vol. 98, No. SM 12, 1972
- 8) 岡田 清・川村満紀：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、No. 142, pp. 37~45, 昭和 42 年 6 月

(1974. 2.28・受付)