

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*

DISINTEGRATION OF COHESIVE CLAY LUMPS USED
AS SOIL-CEMENT

枷場重正**・川村満紀***
By Shigemasa Hasaba and Mitsunori Kawamura

1. まえがき

道路路盤材料としてソイルセメントは早くから注目され、道路の構造的機能上からも効果的であることが指摘されている^{1), 2)}。

しかしソイルセメントに使用する土は一般に粗粒子土または light clay に限られ、ポルトランドセメントによる粘性土の安定処理は通常不可能とされている。

そのおもな原因は粘性土を十分小さな土粒子集合体にときほぐす(注)ことのできるプラントがないためである。

わが国における路床土は気候性土、火山灰、沖積土など粘性をもったものが多いが、上述のような理由で一般にこれら粘性土をポルトランドセメントによって経済的に安定処理することは不可能とされ、現場近くに砂質土などが容易に得られる場合にのみ安定処理を行なっているようである。しかし土の物理的性質にのみ着目すれば、いかなる土もときほぐすことによってソイルセメントとして有効に使用できる。このような考え方からすれば、劣悪な粘性土も乾燥し、ときほぐすことによってソイルセメントとしての道路路盤への使用可能性について検討することはわが国の路床土の特徴よりみて意義あると考えられる。またソイルセメントの性質に影響をおよぼす要因については多数の研究がなされてきたが、ときほぐしの程度がソイルセメントの一軸圧縮強度におよぼす影響に関しては 2, 3 の研究^{3), 4)}がみられるにすぎず、これらの研究もつねに同一の粒度分布の試料が得られているかどうかという点で実験方法に欠かんがあるようである。

とくに粘性土を使用したソイルセメントに関する実験ではときほぐし程度が非常に重要な要素であり、Highway Research Board's Committee によるソイルセ

メントの定義においても“粉碎された土 (pulverized soil)”を使用することが明確化されているにもかかわらず、これまでの実験、研究では“粉碎の程度”的あいまいなものが多い。米国の Portland Cement Associationにおいても室内実験のための土試料の調整法として、土粒子本来の大きさを減少させないように粉碎し 4.76 mm ふるいで一応ふるい、実際の各種試験には 3/4 in 以下 4.76 mm 以上の試料を加えることとしている⁵⁾。しかしここにおいてもときほぐしの方法や程度については言及されていない。

このように粘性土をソイルセメントとして有効に使用するという面からも、また室内実験において土粘子の粒度調整法に普遍性をもたせる面からも粘性土のときほぐしの機構について解明されねばならないと思われる。粘性土のときほぐし機構については粘性土塊の力学的性質との関連において論じなければならないが、粘性土塊の力学的性質はきわめて複雑なものであるばかりでなく、材料全体になされた仕事量の測定は実験上かなり困難である。ここでは粘性土塊の物理的、幾何学的性質として含水比と大きさをとりあげ、また粘性土塊にあたえる仕事量を定性的に示すものとして機械の回転速度(次節参照)の大小をとりあげ、これら要因とときほぐし効果の関係について実験的に明らかにする。

このような目的で、まず粘性土をときほぐし機械を製作し、金沢市卯辰山産の粘性土と関東ロームについて上述のような観点から行なった 2, 3 の実験結果について述べる。

また最後に圧縮強度からみて、このような方法でときほぐされた粘性土はソイルセメントとして十分使用可能であることを示す。

2. 実験概要

(1) 装置

実験に際し使用した機械器具はまずときほぐし試験用試料作製装置(写真-1)および本研究用として試作したときほぐし機(写真-2)である。

写真-1 に示す装置は 40 cm × 40 cm × α cm (ここでは供試体の大きさによって、 α として 3, 4, 5 の 3 種類

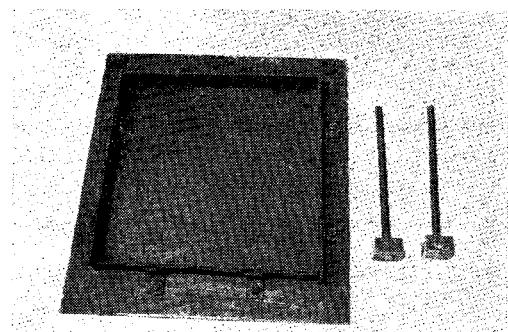
* 第 22 回土木学会年次学術講演会(昭和 42.5)にて一部発表

** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科教室

*** 正会員 工修 金沢大学講師 工学部土木工学科教室

注 従来粘性土塊を機械的により小さな集合体に分離する操作に「粉碎(pulverization)」という用語が使用されているが、土粒子の集合体の大きさをより小さい集合体に“分散”させるという意味を強調するために、ここでは「ときほぐし(disintegration)」という語を使用する。

写真-1

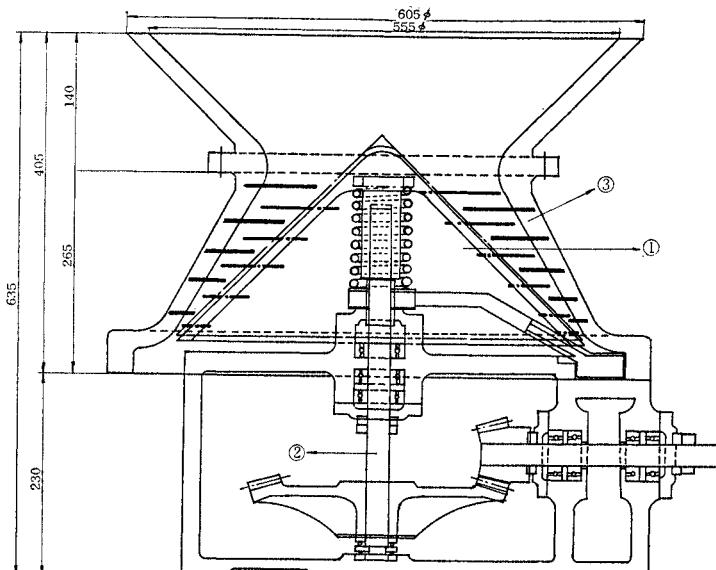


を用いている)の粘性土板が作製できるように高さ a cmで40 cm長さのカーボンが底板(すべて鋼製)にとりつけられ、写真に示す突き棒によって突き固められるようにしたものである。

後者のときほぐし機(原動機:特殊分捲三相交流モーター1PS)は、その横断面は図-1に示すようなものである。

この図で①のヘッドが軸②を中心にして回転し、その表面に固定されたロッドと③の外壁に固定したロッド間においてつぎの3種の作用によって、上方より投入され

図-1 ときほぐし機械横断面



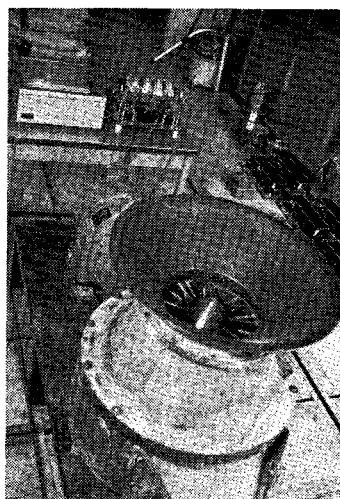
単位:mm

表-1 使用土の物理的性質

試料	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
三角座標による分類	ローム	シルト質ローム	砂質ローム	シルト質ローム	粘土質ローム	粘土	シルト質ローム
液性限界(%)	72.3	66.8	128.0	70.5	64.7	46.6	71.2
塑性限界(%)	40.8	47.4	88.3	36.9	39.7	30.6	45.2
塑性指数	31.5	19.4	39.7	32.6	25.0	16.0	26.0
最適含水比(%)	38.5	35.5	91.0	71.8	36.0	28.0	32.0
最大乾燥密度(g/cm³)	1.27	1.31	0.79	1.39	1.30	1.44	1.34
比重	2.59	2.64	2.85	2.53	2.64	2.60	2.64

No. 3: 関東ローム

写真-2



た粘性土塊がときほぐされるものと考えられる。すなわち第1は回転するロッドによる打撃、第2は回転ロッドと固定ロッド間ににおけるせん断(回転速度が大なるときは衝撃せん断、小さいときは静的せん断と考えられる)、第3にヘッドの面と外壁間ににおける一種のせん断(機械下部においてとくに著しいと考えられる)の3つの作用である。

また、ときほぐし効果を評価するために行なうふるい分け試験装置はJIS A 1204に規定されている一連のふるいである。

(2) 原材料の物理的性質

本実験に使用した土試料は金沢市卯辰山産および千葉市産関東ロームであり、それらの物理的性質は表-1に示すとおりである。

(3) 実験方法

ときほぐし試験用粘性土供試体として一辺 a cm(ここでは a として 3, 4, 5 の3種類を使用した)の立方体を用いるため、上述の試料作製用型わく中に最適含水比になるように調整された土試料を2層に入れ、1層あたり全面均一に200回突き棒(重量 1100 g 写真-1参照)で突き固めた。

ここで200回という回数は予備実験によって乾燥密度が最大乾燥密度になるように決定された。200回という値は a が 4 cm に対するものであるが、

3 cm, 5 cm の場合は突き固められた粘性土の容積に比例させておののおの 150 回, および 250 回とした。このようにして突き固められた粘性土板を鋼製のナイフによって一辺 a cm の立方体に細分したのち, 立方供試体の含水比が所定のものになるように乾燥炉中で乾燥させた。このようにして得られた所定の含水比の立方供試体をときほぐし機の投入口上 40 cm の高さより 5 秒間に 1 個の割合で落下投入させた。

なお機械のヘッドの回転速度は 125, 250, 375, 500, 625 r.p.m. の 5 段階に変化させている。ときほぐされた土試料はただちにふるい分け試験に供した。

3. 粘性土のときほぐし効果

(1) ときほぐし効果の表示法

ときほぐし効果の表示法として、ここではときほぐされた粘性土塊の粒度分布状態を示す粒度加積曲線および細かさの程度を示すものとして比表面積 (S), $D.N.$ 値 (Disintegration Number) を使用した。

1 cm³ の試料のもつ総表面積として定義される比表面積 S は

$$S = f(\sum n d^2 / \sum n d^3) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、

f : 形態係数

d : 粒子径

n : 径 d をもつ粒子の数

ふるい分け試験の結果から S を求めるために、 $d_n \sim d_{n+1}$ mm の粒子はすべて $(d_n + d_{n+1})/2$ の球であるとして、つぎの式 (2) なる近似式を導いた。

$$S = f \sum \frac{r_{n+1,n}}{100 \cdot d_m} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、

$r_{n+1,n}$: ふるい $d_n \sim d_{n+1}$ mm の残留率

$$d_m = (d_n + d_{n+1})/2$$

また $D.N.$ 値とは次式で定義されるものである。

$$D.N. = \frac{\Sigma (\text{加積残留率})}{100} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

本論ではおもに式 (3) で表わされる $D.N.$ を、ときほぐし程度を判断する尺度とした。

(2) 実験結果と考察

a) 粘性土塊の含水比がときほぐし効果におよぼす影響

ときほぐされた粘性土の粒度加積曲線を土試料 No. 1 について示すと図-2 のようになる。ときほぐし時の供試体の含水比が粒度分布におよぼす影響は回転速度によって多少異なるけれども、図-2 のように含水比の減少とともに曲線は全体として粒径減少の方向に移行する。このような粒度加積曲線からは各種試料の粒度特性は不明確であるが、 $D.N.$ 値や比表面積を計算するとより明確になる。

図-2 粒度加積曲線
(土試料: No. 1, 回転速度 625 r.p.m., 供試体: 一辺 4 cm)

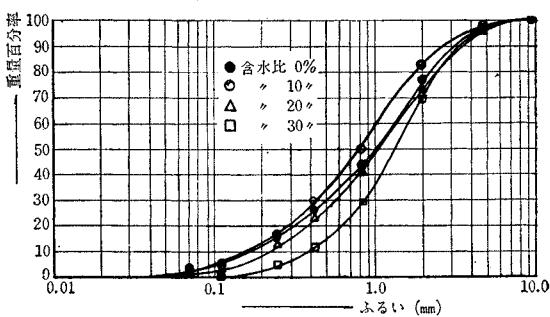


図-3 含水比と比表面積の関係
(土試料: No. 1)

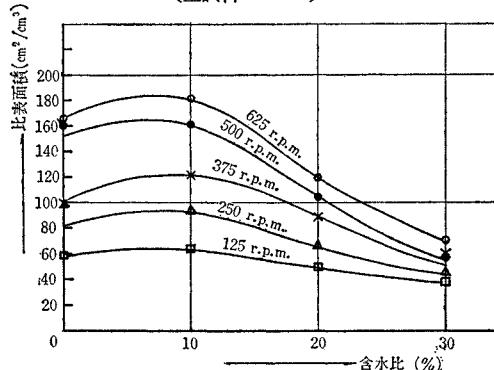


図-4 含水比と $D.N.$ の関係
(土: No. 1)

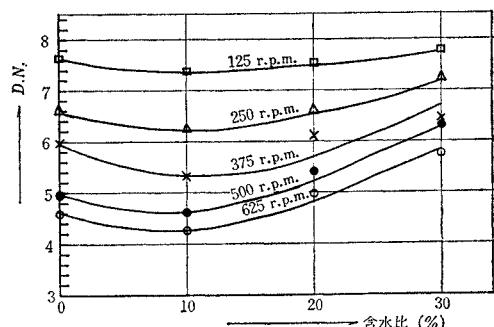
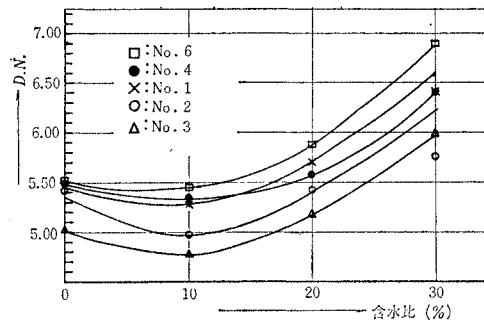


図-3 から明らかなように一定の回転速度によって立方供試体 (一辺 4 cm) をときほぐした場合、生ずる粒子の比表面積は含水比によって著しく異なる。No. 1 試料については含水比が 10% 前後のとき最大となる。

$D.N.$ 値によって評価すると図-4 のように含水比の減少とともに小さくなり、10% 前後で最小になる。これらの図から明らかなように、いずれの回転速度においても含水比が 10% 前後で $D.N.$ 値が最小値 (比表面積は最大値) をもつ曲線となる。物理的性質が多少異なる他の粘性土については最大乾燥密度の小さいものほど全般に $D.N.$ は小さくなるが曲線自身の形は同様でいずれも 10% 前後で最小になる (図-5 参照)。

図-5 各粘性土の含水比と D.N. の関係
(供試体: 一辺 4 cm, 回転速度: 500 r.p.m.)



すなわち本実験で使用した粘性土(関東ロームは除く)ではときほぐし時の含水比が 10% 前後のとき、もっともときほぐし効果があがるといえる。

b) ヘッドの回転速度とときほぐし効果の関係

回転速度がときほぐし効果におよぼす影響について明らかにするために、回転速度と比表面積の関係をえがくと図-6 のようになり、また D.N. 値との関係については図-7 のようになる。図-7 が示すように各含水比において回転速度の増加とともに比表面積は直線的に大きくなり、D.N. 値は直線的に小さくなる。また 10% までは含水比が小さいものほどこう配は大きくなり、0% のものは 10% のものとほぼ等しいこう配となるようである。

図-6 回転速度と比表面積の関係
(土試料: No. 1)

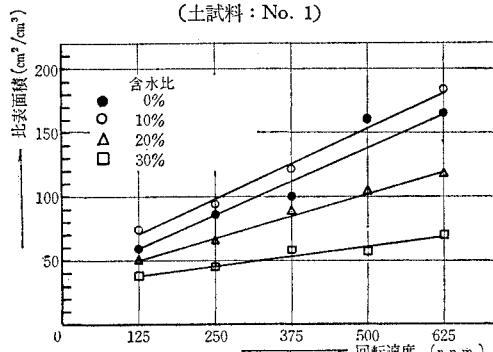
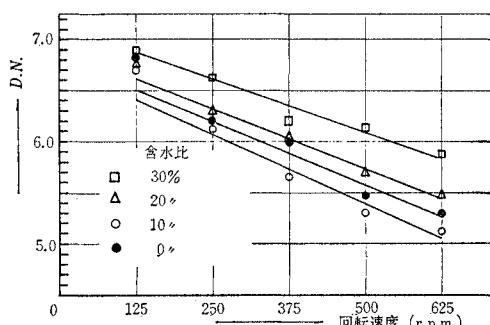


図-7 回転速度と D.N. の関係
(土試料: No. 1, 供試体: 一辺 4 cm)



c) 粘性土塊の大きさとときほぐし効果の関係

固体破碎の理論では粉碎に有効であった正味仕事量と粉碎効果との間には一定の関係が成立すると考えられ、中川によると⁶⁾ 稜の長さ D の立方体の材料の粉碎に要する仕事量 W は

$$W = C_1 D^3 + C_2 D^2$$

C_1, C_2 : 定数

粘性土塊のような塑性材料のときほぐしにおいても立方体の一辺 D と仕事量 W の間には何らかの関係が存在するはずであるけれども、 W の測定にはかなりの困難がともなう。

ここではときほぐし時に測定された消費電力から、一辺 3 cm, 4 cm, 5 cm の各立方供試体 1 個をときほぐすに要する仕事量を算出した結果、表-2 のようになった。

表-2 供試体一辺の大きさと仕事量

回転速度 (r.p.m.)	D	W, D.N.		
		3 (cm)	4 (cm)	5 (cm)
625	$W (\times 10^6 \text{ erg})$	0.16	0.15	0.18
	$D.N.$	5.3	5.4	5.2
375	$W (\times 10^6 \text{ erg})$	0.10	0.13	0.12
	$D.N.$	6.0	5.9	5.9
250	$W (\times 10^6 \text{ erg})$	0.12	0.18	0.14
	$D.N.$	6.3	6.4	6.4

D : 立方供試体一辺の長さ, W : 仕事量

この表から明らかなように、ある回転速度において各供試体の D.N. 値はほぼ等しい(各場合において一定のときほぐし効果があがっている)。このことから、本実験で行なった範囲の大きさの立方供試体では仕事量 W は一辺の長さ D の大きさに関係なく一定であるといえよう。すなわち弾性固体の破碎においては W と D の間にたとえば上述のような式が成立するけれども、締め固め粘性土の場合は多少の供試体の大きさの変化は仕事量にほとんど影響をおよぼさないと結論できる。つぎに立方体の一辺の長さとときほぐし効果の関係を明らかにするために、一辺 3 cm, 4 cm, 5 cm の立方供試体についてときほぐし試験を行ない、図-8, 図-9 のような結果を得た。図-8 が示すように、いずれの含水比においても、

図-8 供試体の大きさが D.N. におよぼす影響
(土試料: No. 4, 含水比: 30%)

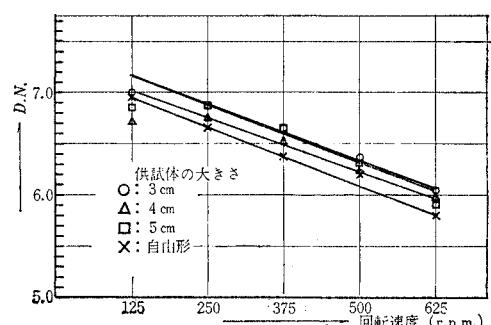
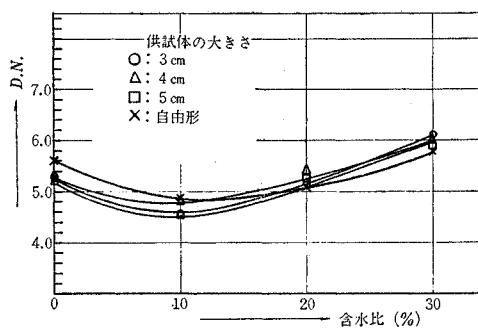


図-9 供試体の大きさと含水比-D.N. 関係
(土試料: No. 4, 回転速度: 625 r.p.m.)



またいづれの大きさの供試体においても、回転速度が低下するにしたがって D.N. 値はほぼ直線的に低下している。またときほぐし効果の最適含水比については、図-9 よりいづれの大きさの供試体も含水比 10% 前後で D.N. 値が最小となる。すなわち、ときほぐし前の粘性土塊の大きさに関係なく、ときほぐし効果の最適含水比は 10% 前後であるといえる。さらに図-8, 図-9 より各回転速度において、供試体の大きさによって D.N. 値にはほとんど差がないことがわかる。結局回転速度一定という条件のもとでは、ときほぐされる粘性土塊の大きさが多少変化してもときほぐし効果にはほとんど差がない。

4. 関東ロームのときほぐしについて

関東ロームの最適含水比は他の粘性土にくらべて非常に高く(表-1 における No. 3 参照)、ときほぐし時の含水比を 0~96.5% の広範囲に変化させた。図-10~図-13 が示すように、含水比および回転速度と D.N. 値または比表面積との関係は他の粘性土とほぼ同様である。この場合は含水比が 10~20% でもっともときほぐし効果があがっている。また回転速度が大きくなると比表面積は大きくなり、D.N. 値はほぼ直線的に小さくなる。

図-11 から含水比が 60% 以下では回転速度の増加とともに比表面積は急に大きくなるが、含水比の大きい 80%

図-11 含水比と D.N. の関係
(土試料: No. 3)

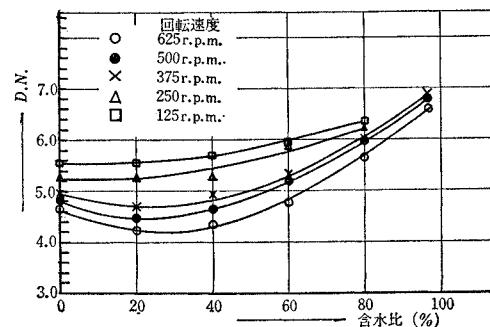


図-12 回転速度と比表面積の関係
(土試料: No. 3)

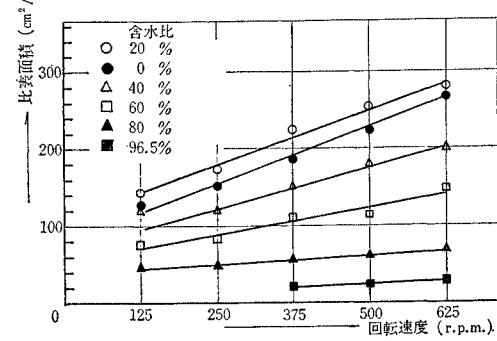
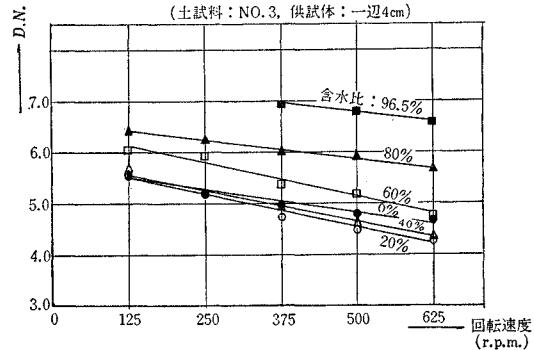


図-13 回転速度と D.N. の関係
(土試料: NO. 3, 供試体: 一辺4cm)

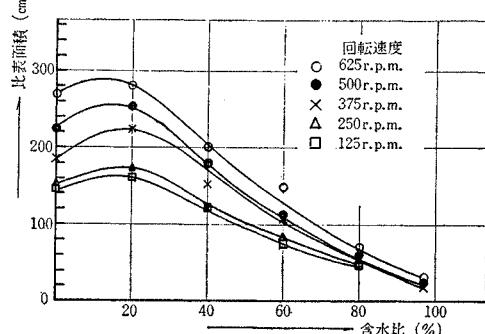


%, 96.5% では回転速度の増加にともなう比表面積の增加割合は含水比の小なるものにくらべて小さい。このことは含水比の大きいものでは回転速度を大きくして、単位時間にあたえるときほぐしのためのエネルギー量を大にしてもさほどときほぐしが進展しないことを示している。

5. ときほぐし粘性土を使用したソイルセメントの圧縮強度

3., 4.において、粘性土の物理的性質がときほぐし効果におよぼす影響について明らかになった。実際問題としてはこのようなときほぐし粘性土を使用したソイル

図-10 含水比と比表面積の関係
(土試料: No. 3)



セメントの道路舗装用としての耐久性およびくり返し荷重をはじめとする種々の荷重条件下における変形特性などが重要である。ここでは3.において述べた各種のD.N.値をもつ粘性土試料を使用したソイルセメントの一軸圧縮強度を求めた結果、ある程度のときほぐし効果が得られておれば、10%前後のセメント量で道路路盤用として十分使用可能であることが示された。

(1) 実験装置および方法

C.B.R. 試験用の載荷装置を使用し、ブルーピングリングによって載荷重を測定した。一軸圧縮試験用供試体はB.S. 1924-1957にしたがい、直径2in、高さ4inの円柱体を使用した。ときほぐされた粘性土にただちに所定量のセメント（ここでは乾燥土試料に対する重量百分率として5%および10%の2種類）を添加し、最適含水比になるまで水を加えながら15r.p.m.の回転速度のアインリツヒ型ミキサを用いて試料5kgにつき5分間混合した。供試体作製法はB.S. 1924による静的方法を採用した。すなわちJIS A 1210の突き固め試験の結果より得られた最大乾燥密度の供試体になるように所定量の試料を3層に分けて2つ割りモールド（内径2in、高さ7in）につめ、プラグをそう入してジャッキによって高さ4inの供試体が得られるよう加圧したあと、押し出した。成形後供試体は温度 $20^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度85%の恒温恒湿室において7日間養生したのち試験に供された。一軸圧縮試験はひずみ速度を一定にして($10^{-2}/\text{min}$)行なわれた。実験結果はすべて2個の平均値である。

(2) 実験結果と考察

原材料である粘性土のときほぐしの程度が一軸圧縮強度におよぼす影響を明らかにするために、セメント量5%，10%についてD.N.値と一軸圧縮強度の関係をえがくと図-14、図-15のようになる。

図-14 一軸圧縮強度とD.N.の関係

(土試料: No. 2)

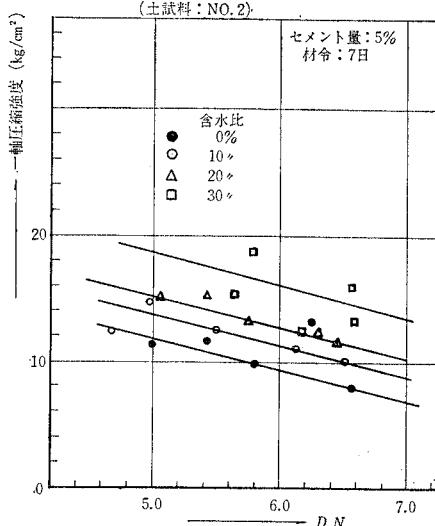
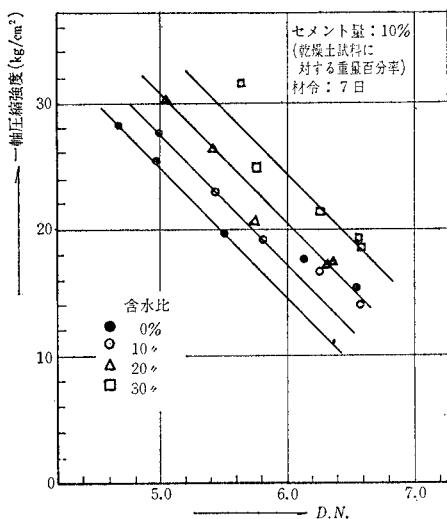


図-15 一軸圧縮強度とD.N.の関係
(土試料: No. 2)

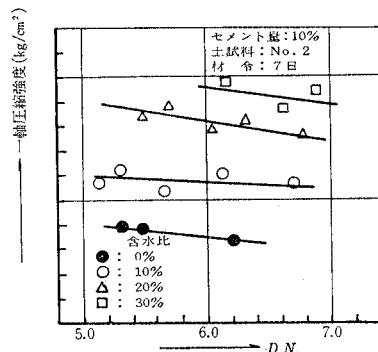


これらの図から明らかなようにD.N.値が小さくなるにしたがって直線的に圧縮強度は増大する。圧縮強度の増大割合はセメント量10%の方が5%よりもはるかに大きい。これらの図から得られるもう1つの特徴は同一のD.N.値をもつ試料でもときほぐし時の含水比が異なれば一軸圧縮強度も異なるという点である。すなわち、 σ_f -D.N.関係がときほぐし時の含水比によってたがいにほぼ平行な直線になる(2,3直線からはずれる点が存在してはいるが)。

本実験で使用した範囲の含水比(30~0%)ではときほぐし程度が同一であってもときほぐし時の含水比が大なるほど圧強度も大になるといえる。

水浸(6日間非水浸、1日水浸)の場合の一軸圧縮強度は図-16に示される。図-16からわかるように、D.N.の差による強度の差是非常に小さくなるが、ときほぐし時の含水比による差は非水浸のものより大きくなり、同じD.N.値に対して30%は0%の2倍近くの強度を示す。これはセメントの水和によって生ずるゲルや

図-16 一軸圧縮強度とD.N.の関係
(6日間非水浸、1日水浸)



Ca^{++} イオンの拡散の程度が含水比によって異なるためと考えられる。このことはときほぐし、乾燥の両面から考えて有利な特性であり、ソイルライム工法においてはすでに粘性土中のイオン拡散の現象が実験的に確かめられ、また実用上この現象が有利に働くことが認められている⁷⁾。

イギリスの Road Research Laboratory では 1 週間養生の圧縮強度の基準を 17.5 kg/cm^2 (250 psi) 以上としていることからすれば、セメント量 10% では本実験におけるときほぐし程度で舗装用ソイルセメントとして十分使用可能であろう。セメント量 5% の場合はほとんど上述の基準値より多少小さくなっているが、10% の場合はほとんど 17.5 kg/cm^2 以上の圧縮強度が得られていることから考えて、5~10% のセメント量でときほぐし時の含水比を 30% 程度まで高め、回転速度をあげて D.N. 値を小さくすればソイルセメントとして経済的な面からも十分使用できると考えられる。

6. 結論

自然含水比の高い粘性土をセメントによって経済的に安定処理できるかどうかはソイルセメントにおいて解決されねばならない大きな問題の一つである。

本論文ではそのような粘性土もある程度の乾燥、ときほぐしによってソイルセメントとして十分使用可能であることを示した。したがって本論文は粘性土のときほぐしという点に重点が置かれており、それを使用したソイルセメントの圧縮強度特性は道路路盤としての使用

可能性を検討するための資料にすぎない。ときほぐし粘性土を使用したソイルセメントの圧縮強度特性をはじめとする物理的、力学的諸性質については今後明らかにされねばならない問題であろう。

本研究は科学研究費の補助によって行なったものであり、実験に際し、久保田・直江・池田・北・東・熊野・中村・西川の諸君の協力を得、また本稿をまとめるにあたり金沢大学大学院生 大深伸尚君に手数をかけたことを付記し感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 山内豊蔵：“路盤材料とその構造的機能について”，材料 Vol. 16, No. 165, June 1967.
- 2) Childs, L.D. : “Tests of Concrete Pavement Slabs on Cement-Treated Subbase” H.R.R. 60 Rigid Pavement Design, 1963, p.p. 50~53.
- 3) Grimmer, F.J. and Ross, N.F. : “The Effect of Pulverization on the Quality of Clay-Cement” Proceedings, 4th Internat'l. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng., London, Vol. 2, pp. 109-13, 1957.
- 4) Catton, Miles D. : “Effect of Soil Lumps in Compacted Soil-Cement”, Road Constr., Vol. 22, No. 5, p. 148, May 1, 1944.
- 5) Portland Cement Association : “Soil-Cement Laboratory Handbook”
- 6) 久保・水渡・中川・早川：“粉体（理論と応用）”，丸善，昭 37.
- 7) Davidson, L.K., Demirel, T. and Handy, R.L. : “Soil Pulverization and Lime Migration in Soil-Lime Stabilization” H.R.R. No.92, 1965 pp. 103~126.

(1967. 9. 29・受付)