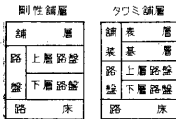


道路の安定処理に用いるソイルセメントについて

—その安定性を試験する際の問題点—

三 木 五 三 郎

1. まえがき 舗装道路は一般に第1図に示すような構造をもっている。ここに路床は地山を削ったり盛土を締め固めた普通の土であるが、路盤ないし基層は表層かひ伝えられる荷重に耐えてある程度以上の圧縮抵抗とせん断抵抗を示さねばならない。従来はこの部分に粒度を調整した砂利ないし碎石を十分に締め固めただけのものを用いることが多かったが、最近これらをさらに安定処理することが多くなった。



ここに安定処理とは原材料にセメント、アスファルト、その他の安定剤を加えて混合してから十分に締め固める工法で、安定処理しないときと比較して一般的に強くなることはもち論であるが、透水性がなくなるので含水量の変化による安定性の低下も少く、凍上等の被害も受けにくく、また原材料の質が悪いものでもある程度強くして経済的な路盤の構築を可能にする等、幾多の利点を有している。

そこで以下にはわが国でも最近にわかに注目されるようになったセメントによる安定処理について若干の考察を試みたい。特にその安定性を確かめるための試験については欧米でも実にまちまちの方法が用いられ、これらの結果を実際の設計なり施工管理に应用するには多くの問題点が残されている。

2. ソイルセメントの性質 普通の土にセメントを加えてよく混合し、適当な含水量で十分に締め固め、湿った状態で養生をすると次第に強さが増してくる。このソイルセメントを用いて現場にある厚さの安定処理層を設けるとき、その性質に影響する因子としては第1表のよ

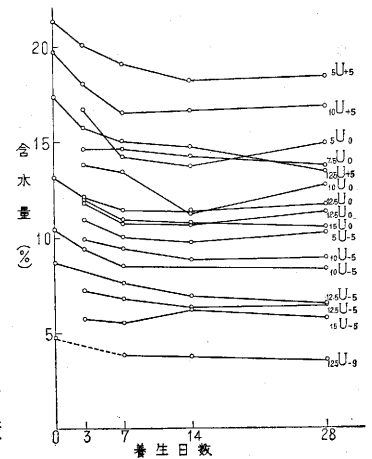
第1表 ソイルセメントの性質に影響する因子

材	土	材料土の本来の性質
		粒度・コンステンシー・含有有機物の量と性質
料	セメント	混合前の土の状態
		含水量・粉砕度
施	工	セメントの性質
		セメントの量
方	法	添加材の性質と量
		セメントの加え方
現	場	混合の方法と程度
		ソイルセメントの含水量
条	件	締め固めの方法と程度
		養生方法・期間・温度
場	条	材料
		荷重・気象・水の条件

うなものが数えられるであろう。

ソイルセメントに用いるセメント量は普通 5~15% (セメント量は今は原材料の土粒子の重さに対する重量百分率で示すが普通であるが、米国などでは締め固めた容積に対するセメントの容積百分率で表わしていることもある) で原材料土と比較すれば少く、したがって土とセメントを

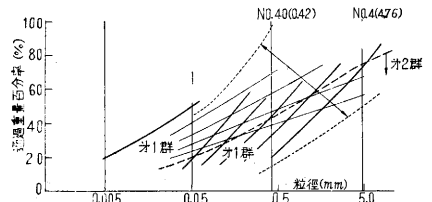
混合した材料も混合直後には大体土の性質を保持している。したがってこの材料を現場に打設するには土の場合のようにこの混合材料の最適含水量近くで十分に締め固めることが要求され、セメ



U記号の説明:

左のサフィックスはセメント量(%)
 右のサフィックスは締め固め時の含水量の最適含水量からのへだたり(%)

第2図 水和による含水量の漸減 (秋田山砂)

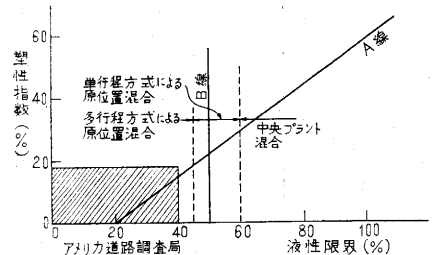


PCA のソイルセメント簡略試験法による土の分類

第1群: 0.05mm 以下の試料が 20% 以下で No. 4 残留試料が 25% 以下、または 0.05mm 以下の試料が 20~50%

第2群: 0.05mm 以下の試料が 20% 以下で No. 4 残留試料が 25% 以上

(a) 粒度上の限界



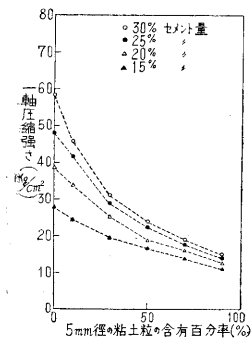
(b) コンステンシー上の限界

第3図 ソイルセメントの材料として経済的に利用可能な土の性質

ントが水和するために必要な水分もこの程度の含水量があれば十分である。第 2 図には締め固め直後にパラフィンで密封して重量の変化を防いだ供試体の含水量が、時間の経過とともに減少してゆく実験結果を示したが、これは水和の進行を間接的に示すものといえよう。しかし逆にここでわれわれは、ある養生期間後のソイルセメントの含水量が、水分の漏失を全く防いでおいたとしても必ずしも施工時の含水量を示していないことに注意する必要がある。

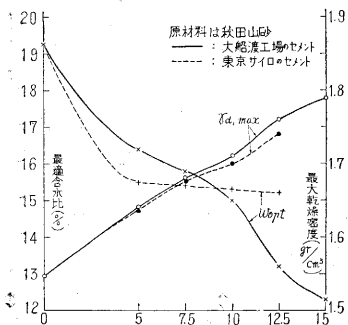
ソイルセメントの原材料として経済的に利用できる土にはおのずから限度があり、第 3 図には米国の道路調査局の基準を示した。これから明らかなように現在では砂質土ないしはそれ以上の粗粒材を用いることが多いが、英国では (b) 図中に示すように液性限界の大きな粘土質土についても施工機械ないしは方法を工夫してその利用を考えている。ローム質火山灰土の多いわが国でもこれは当然研究してゆかねばならない重要問題である。

粘土質土がソイルセメントの原材料として好ましくない一つの原因には、セメントとの混合前に十分な粉碎の行われ難いことがあげられる。大きな団粒が残っている程弱いものができることは当然で、第 4 図には英国の Grimer と Ross が行った室内実験結果の一例を示す⁽²⁾。材料土の十分な粉碎と添加剤との均一な混合が安定処理用機械(ロードスタビライザ)に要求される最も重要な性能であることも自明であろう。



第 4 図 材料土の粉碎度と強さとの関係 (Grimer & Ross)

セメントの性質は微妙にソイルセメントの締め固め度ないしは強さに影響を持つようである。一般に砂質土にセメントを加える場合には、セメントがシルト分として粒度の改善に役立つ結果、セメント量に比例して乾燥密度が増大するが、同じポルトランドセメントでも工場が



第 5 図 セメントによる締め固め特性の相異

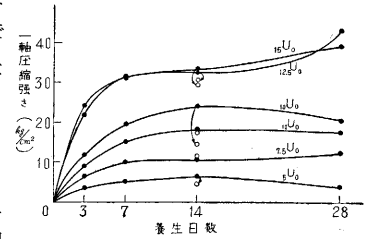
異なるならばその程度が相異することがある (第 5 図参照)。セメントの種類が違えば得られる結果は当然異なるので、広い現場の施工に正確に室内実験結果を反映させることはこの点だけからみてもかならずしも簡

単ではない。

ソイルセメントにごく少量の分散剤を添加して締め固め性能を改良し、強さの増大をも期待する試みが行われているが、この場合には添加剤がセメントの水和を妨げたり破壊したりしないようなものでなければならない⁽³⁾。

ソイルセメントは一般にセメント量が多い程、また養生期間が長い程強くなる (第 6 図)。

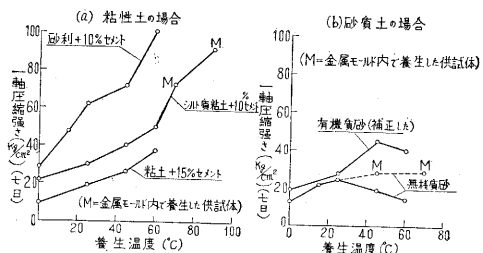
しかし同一セメント量・養生期間のものでも締め固めの程度が異なればその強さに著しい差が生ずることも注意せねばならない。第 7 図には含水量の変化した締め固め状態 (JIS 相当、その 1.1 倍、および 0.9 倍



第 6 図 ソイルセメントの一軸圧縮試験結果例 (秋田山砂、○は 7 日養生後 7 日水浸供試体の強さを示す)。

の密度になるように静的に締め固めた状態) に対する強さの分布を円柱形供試体の一軸圧縮強さで比較した結果を示した。

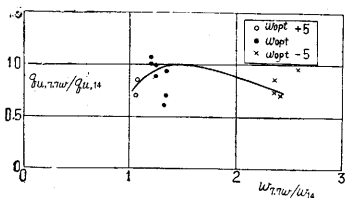
養生温度はまたソイルセメントの強さに重要な影響を持っている。第 8 図には Clare と Pollard の試験結果の



第 8 図 養生温度と強さとの関係 (Clare & Pollard)

一例を示したが、温度が 1°C 変化すると一週間に於ける一軸圧縮強さで大体 2.5% の変化が生ずると報告されている。

一度施工されたソイルセメントは、 \nearrow 湿潤・乾燥、凍結・融解というような風化過程にさらされるとその強さが減少してくることは当然予想されることで、最近までは成型供試体にこのような営力を繰返し作用させて質の低下の度合を調べるのがソイルセメントの性質の最も基本的な試験方法だとされていた。このような方法は現在では試験を簡略化しようとする要求に於て、余り実施されない傾向にあるが、しかし実際のソイルセメント層に



第9図 吸水による強さの減少率 (14日強度)

円柱形供試体を1週間養生後さらに1週間だけ浸水したための含水量および強さに現われる変化の状況を、2週間普通に養生した供試体の強さと比較して示している。すなわち最適含水量より乾いた所で締め固められた供試体が、最適状態で締め固められたものに比して含水量の変化が大きく、強さも若干減少することがよくわかる。そしてこれはソイルセメントの現場施工に対しても重要な示唆を含むものである。

3. ソイルセメントの試験法 ソイルセメントの性質の試験方法を規定した代表的な規格としては、まず米国の ASTM の標準試験方法と英国の標準規格とがあげられる。前者は主としてソイルセメントの耐久性に注目して 1940 年代から広く行われてきたものであり、後者は比較的新しく安定処理土の一般的な試験方法として定め

られたものであるが、安定法の判定方法としてはその一軸圧縮強さまたは支持力比に着目しているのが大きな特徴である。ソイルセメントの室内試験結果を何とか現場の設計施工の基準として用いようとするためには直接的にその強さを測定しようとするのも当然で、試験方法の簡略化を望む傾向とも合致して現在では各方面でこの一軸圧縮試験ないし支持力比試験が行われるようになった。しかしその細目を見ると内容の変化の多いことにも驚かされる。わが国でもソイルセメントの施工が急速に実用化を見ようとする現在、その室内試験方法にも早急に一定の規格を定めて統一的なデータを集積し、各所の施工結果を適確に比較検討できるようにすることの重要なことは言をまたないであろう。そこで以下には各種の試験方法を簡単に紹介しながらこれに関連する問題点のいくつかについて触れてみることにする。

(1) **耐久性を調べる試験** ASTM の方法では、まず適当な3種のセメント量の試料を準備し、4"φ×4.6"のモールドに突き固めることによっておのおのの最適含水量と最大乾燥密度とを求め、各セメント量ごとに試料をそのモールドに最適条件で突き固めて成型した供試体2個あてを準備して第2表のような湿潤乾燥または凍結融解の風化過程にさらす。その1個については試験の経過中の定められた時期に一定のワイヤブラシを用いて供試体表面から試料をこすり落とし、このハク脱量を測定する。また他の1個については同時期に含水量と容積の変化率を測定するのである。ポルトランドセメント協会ではこの測定値に対して第3表のような基準値を定め、ある材料土を基層ないしは路盤材として用いる際の必要セメント量決定の基礎としている。

この方法は米国において従来極めて広く用いられて信頼性のあるものとされているが、多量の試料土(約45kg)と長い試験期間(約6週間)を要し、しかも強さの

第2表 耐久性試験方法の比較

ASTM				英国標準規格 (BS 1924: 1957)			
湿潤乾燥試験 (D559-44)		凍結融解試験 (D560-44)		水浸試験 (3-8)		凍結試験 (3-9)	
No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
成型 (4"φ×4.6")	成型 (4"φ×4.6")	成型 (4"φ×4.6")	成型 (4"φ×4.6")	成型 (2", 4", 6"φ*)	成型 (2"φ×4")	成型 (2"φ×4")	成型 (2"φ×4")
養生 (21°±1.7°C, 90%以上の湿度)	養生 (21°±1.7°C, 90%以上の湿度)	養生 (21°±1.7°C, 90%以上の湿度)	養生 (21°±1.7°C, 90%以上の湿度)	養生 (25°±2°C, パラフィンで密封)	養生 (25°±2°C, パラフィンで密封)	養生 (25°±2°C, パラフィンで密封)	養生 (25°±2°C, パラフィンで密封)
7日	7日	7日	7日	7日	7日	7日	7日
水浸 (室温)	水浸 (室温)	凍結 (-23°C以下)	凍結 (-23°C以下)	水浸 (25°±2°C)	水浸 (25°±2°C)	水浸 (25°±2°C)	水浸 (25°±2°C)
5h	5h	22h	22h	7日	7日	24h	24h
42h	42h	2h	2h	一軸圧縮試験	一軸圧縮試験	凍結 (下部から8°Cの水を毛管吸水させながら上部を-5°Cに保って)	凍結 (下部から8°Cの水を毛管吸水させながら上部を-5°Cに保って)
1h	1h	22h	22h	比較	比較	水浸 (48h)	水浸 (48h)
12サイクル	12サイクル	2h	2h	$R_f = \frac{D_f}{D_c} \times 100$	$R_f = \frac{D_f}{D_c} \times 100$	融解 (上部を25°±2°Cにして)	融解 (上部を25°±2°Cにして)
12サイクル	12サイクル	12サイクル	12サイクル			14サイクル	14サイクル
測定結果を基準値(第3表)と比較	測定結果を基準値(第3表)と比較	測定結果を基準値(第3表)と比較	測定結果を基準値(第3表)と比較			一軸圧縮試験	一軸圧縮試験
						D_f	D_c
						一軸圧縮強さを比較 $R_f = \frac{D_f}{D_c} \times 100$	

第 3 表 耐久性試験に対するソイルセメントの許容試験値

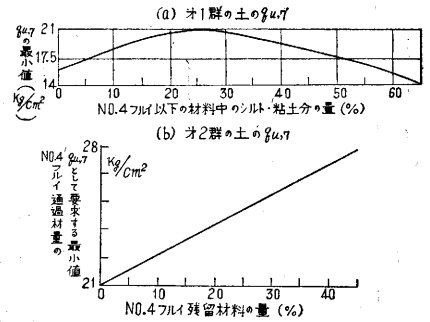
1. 耐久性試験中の容積の増大は、供試体作製時の容積の 2% を超えてはならない。
2. 耐久性試験中の最大含水量は、供試体作製時の全空ゲキを満すものであってはならない。
3. 耐久性試験中のソイルセメントの損失量は以下の範囲を満足すること。
 A-1-a, A-1-b, A-3, A-2-4 および A-2-5: 14% 以下
 A-2-b, A-2-7, A-4 および A-5: 10% 以下
 A-6, A-7-5 および A-7-6: 7% 以下
4. 上述した条件を満足するセメント量の範囲で、圧縮強さは材齢およびセメント量の増加とともに増大せねばならない。

変化を間接的にしか示さない所に難点がある。そこで英国の規格では供試体をなるべく小さな円柱形にし、風化過程にさらしたものとさらさないものとの一軸圧縮強さの比を求める方法を提案している(第 2 表)。前掲の第 9 図は英国規格による水浸試験結果の一例であった。

(2) 一軸圧縮試験 第 4 表にはソイルセメントの一軸圧縮試験方法を規定した二、三の代表的方法の内容を比較表示してみた。おのおのの試験方法に応じて測定さ

することは難かしい。結局一定のラボラトリーミキサを一定時間用いるというように規定するか、もしくは混合を続行しても得られる結果に変化

のみられない程十分に混合するというように規定する方法がなさそうである。しかも実験室と現場施工時との混合の程度の比較はさらに困難な問題であることはいうまでもない。



第 10 図 “砂質土”を材量とするソイルセメントの材齢 7 日における所要一軸圧縮強さ (米国 PCA の簡略試験法)

第 4 表 ソイルセメントの主な一軸圧縮試験方法の比較

	材料土の最大粒径	供試体の大きさ	締 固 め 方 法			養生方法	養生温度	養生期間	圧縮前の水浸	
			静 的	動 的	単位体積当り締固めエネルギー (lb·in/in ³)					
英国規格 B. S. 1924: 1957	約 0.1" † (B. S. の No. 7)	2"φ×4"	標準締固め* に対する最適含水量、最大乾燥密度に成型	標準方法**で上下プラグを通して各15回あて突固める	152	パラフィンで密封	25°±2°C	(普通日)	水浸せず	
	3/4" †	4"φ×8"		標準方法で各層25回6層に突固める						99
	1 1/2" †	6"φ×12"		改訂方法***で各層30回6層に突固める						
PCA の簡略法	約 0.2" (米国の No. 4)	2"φ×2" 4"φ×4.6"	標準締固めに対する最適含水量、最大乾燥密度に成型			恒湿室	21°±1.7°C	7 日	1時間 4時間	
カリフォルニア州		4"φ×4"	25,000 lb の静荷重で成型	(標準方法 (86 lb·in/in ³) と改訂 AA (SHO の方法 (390 lb·in/in ³) の中間) の締固めエネルギーだといわれる)		相対湿度 95% 以上の恒湿室	21°±1.7°C	7 日	24時間	

注) * 締固め標準方法 4"φ×4.6" のモールドに 5.5 lb のランマーで 12" 落下各層 25 回あて 3層に締固める
 ** 標準方法 5.5 lb のランマーの 12" 落下 † 80% 径
 *** 改訂方法 10 lb のランマーの 18" 落下

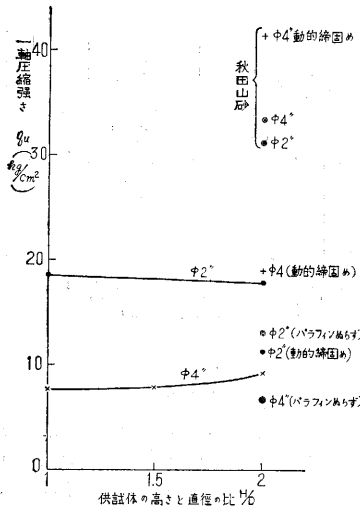
れた値の持つ意味に違いが生じ、結局設計基準に用いる値も一義的に考えられないという大きな不便がある。以下にはこの一軸圧縮試験方法に関連するいくつかの問題点について概観してみよう。

まず原材料土の粒度についていえば、最大粒径に応じて供試体の大きさを定めるべきで、この点は英国規格が合理的である。しかし粘性土と砂質土では同じ一軸圧縮強さを持っているとしても実用された場合の安定性に相異がある筈で、この点では 17.5 kg/cm² という一定値を基準値に採用している。現在の英国のプラクティスよりは、粒度との定量的な関連において基準値を定めている米国 PCA の簡略試験法(第 10 図)が進歩しているといえよう。この方法では材料土は粒度に注目して最初から第 1 群と第 2 群とにわけて考えるのである(第 3 図(a)参照)。

材料土の粉砕度ないしはそれとセメントとの混合度はソイルセメントの強さに大きな影響を持つが(例えば第 4 図参照)、実験室における混合の程度を定量的に指定

供試体の成型には静的・動的のいずれの締固め方法も用いられているが、両方法の使用を許している英国規格によっても得られる結果は必ずしも同じではない。動的方法は現場でも大容量の圧縮装置なしで採用できる利点を持ち、静的方法は任意の密度に均一な供試体を作製できる。筆者の実験室で砂について静的に締固めた 2"φ×4" 供試体の一軸圧縮試験結果では、変動係数が平均 13% になっており、この値は締固め含水量が最適程度より 5% 程度減れば 10% ほどの値まで好転し、増えれば 18% 程度まで悪化している。動的締固めではこれらの値よりもさらに若干悪い値を示している。

供試体の形および大きさが一軸圧縮強さに及ぼす影響をみるために砂について行った実験結果を第 11 図に示す。これによると直径一定で高さだけが変化したときにはほとんど影響がみられないにもかかわらず、同形でも直径が大きくなると著しく強さが減少した例がある。この場合には準備する試料の量が非常に異なるので、あるいは混合エネルギーの相異の影響も現われているかもしれ



第 11 図 供試体の形と強はとの関係 (特記以外は千葉海砂 セメント量 12.5% を一定に保つこと, 7 日養生) とが問題で (第 8 図参照), この点からすれば, 供試体が小さい程恒温室の容量が小さくてすみ有利である。前述の Clare と Pollard の報告⁽⁴⁾では高温養生を行うことによって普通温度による 1 週間強度を 1 日で求め, 試験期間を著しく短縮する可能性もあることを指摘している。

一軸圧縮試験の直前に供試体を水浸する方法と水浸しない方法があるが, これも結果に若干の差異をもたらす場合がある, しかしこれは成型時の含水量にも関係があるものであるから(例えば第 9 図参照), むしろ普通の一軸圧縮試験としては簡単のために水浸しないものについてだけ行い, 水浸の影響をみるためには別に水浸試験を行う英国規格のような方法がよいのではなからうか。

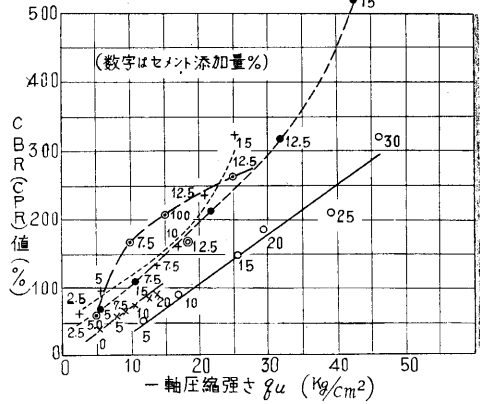
以上種々の観点から現行の一軸圧縮試験方法を考えてきたが, いずれにしてもある一つの方法で求めた結果から他の方法で求めた場合の結果を予測することは困難である。結局今後急速に土質安定処理工法が現場に普及すると思われるわが国においては, この際明確にある一定の試験規格を定めるべきだと考える。

(3) 支持力比試験 JIS A 1211 に規定されている路床土支持力比試験は, もともと米国でタワミ舗装設計用として発展した CBR 試験とほとんど同じものであるが, 英国においても安定処理土の試験用としてこれと極めて類似した CPR (円柱貫入比) 試験を規定している。この試験の CBR 試験との主な相異点は供試体成型エネルギーが比較的小さいことと, 養生に浸水法の代りにパラフィン密封法を採用していることくらいであるが, ただ現在のところではこの試験結果をただちに設計基準値として採用するまでには至っていない。第 12 図には CBR または CPR 値と一軸圧縮強さとの相関性を, 各所に発表されたデータからひろって示してみた。

ないが, いずれにせよ粘性土の場合についてもこの関係をさらにチェックするの必要を痛感している。

養生についてはパラフィンで密封すれば水の蒸発はほとんど妨げ得るが, 湿気室中に保存しても重量変化は僅少のようである。むしろ温度

記号	土の種類	LL	PI	一軸圧縮試験供試体寸法	試験者	
●	砂	SP	NP	2°φ × 2°	田中	
○	山砂	SP	NP	2°φ × 4°	三木	
◎	海砂	SP	NP	〃	〃	
+	シルト質砂	SM	NP	2°φ × 2°	田中	
X	赤土	MH	97	26	7cmφ × 14cm	竹下 田中
○	粘土	CH	70-75	45-53	4'立方	Maclean 等



第 12 図 ソイルセメント (7 日養生) の一軸圧縮強さ qu と CBR (CPR) 値との関係

4. あとがき ソイルセメントが最近急速に実用されるようになったのは, その性質自体がすぐれているためであることはいうまでもないが, 一方では能率のよい施工機械⁽⁶⁾を用いて品質の均一な安定処理層を経済的に施工することが可能となつたためでもある。しかしわが国の現状ではソイルセメントの基本的な性質などは見極める余裕がないまま現場施工へと先走るような傾向さえみられる。この際ごく簡単だと思われがちな試験法などにもいかに問題が多いかを知って頂き, 基礎的研究と実用とが相たずさえて健全に進展する一助にでもなり得れば幸である。 (33. 6. 11).

文 献

- 1) 三木五郎: 道路安定処理工法, 「機械化施工最近の傾向」 p. 1~49, 日本建設機械化協会, 1957. 10.
- 2) F. J. Grimer and N. F. Ross: The Effect of Pulverization on the Quality of Clay-cement, Proc. of 4th I. C. on SMFE, Vol. 2, 1957, p. 109~113.
- 3) 山内豊昭: 土質安定工法の概要, 土木学会西部支部, 1957. 10. p.61.
- 4) K. E. Clare and A. E. Pollard: The Effect of Curing Temperature on the Compressive Strength of Soil-cement Mixtures, Geotechnique, Vol IV, No. 3, Sept. 1954, p. 97~107.
- 5) J. A. Leadbrand and L. T. Norling: Simplified Methods of Testing Soil-cement Mixtures, HRB Bulletin 122, 1956, p. 35~47.
- 6) 三木五郎: ロードスタビライザの現状と将来, 建設の機械化, No. 97, 1958 年 3 月, p. 21~24.

正 誤 表 (6 月号)

頁	段	行	種別	正	誤
7	右	23	本文	0.5°	5°
8	左	27	〃	Lorenz	Lorentz
11	〃	16	〃	$\epsilon_m = \epsilon_m'$	$\epsilon_m = m'$
24	右		第 6 図	540 560 580 600...	540 560 540 600...