土 木 研 究 所 資 料

第 418 号

火山灰質粘性土の強度回復と生石灰処理効果に関する一実験

昭和43年10月

建 設 省 土 木 研 究 所

目　　次

1. まえがき …… 1

2. 試験に用いた土 …… 1

3. 試験方法 …… 4

3－1　こねかえした土の強度回復に関する試験 …… 4

3－2　生石灰処理効果に関する試験 …… 5

4. 試験結果および検討 …… 8

4－1　こねかえした土の強度回復 …… 8

4－1－1　締固め効果とこねかえし効果 …… 8

4－1－2　強度の経時的変化 …… 22

4－2　生石灰処理効果 …… 28

4－2－1　基本的な土の性質の変化 …… 28

4－2－2　処理後の経過時間と含水比の変化 …… 32

4－2－3　処理後の経過時間と温度の変化 …… 37

4－2－4　処理後の経過時間と強度の変化 …… 41

5. 検討結果のまとめ …… 47

6. あとがき …… 49

付　録 …… 50

1. まえがき

鋭敏比の高い土を盛土材料として取扱う際には、トラフィカビリティからくる施工能率の問題と、一度こねかえした土の強度低下およびその経時的な回復現象を盛土施工後の安定性にどのように考慮するかという問題が生ずる。こねかえした土の経時的な強度の回復性状は、こねかえし時の含水量、あたえたエネルギーの大きさなどに大いに関係するものと考えられる。

さらにこのような土は、石灰などで処理すると性状の改良に非常に有効である場合が多いことも一般に知られている。しかし、混合法の難しさなどから、その施工法については検討の余地が残されている。

この報告書はこのような鋭敏比の高い土の取扱いの問題として、こねかえした土の経時的な強度回復性状ならびに生石灰処理方法（混合法とパイル法）とその土性改良効果を検討するために行った室内試験の結果をまとめたものである。

なお、試験は、一般国道４号線矢板バイパス工事（宇都宮国道工事事務所）の施工指針に関連して行なわれたもので、現場で問題となった土を用いて実施した。

2. 試験に用いた土

試験に用いた土は、栃木県矢板市地先の一般国道４号線矢板バイパス工事現場から採取したものである。

土の物理的性質などは表－１および図－１に示すものであるが、Ｘ線回析試験結果（宇都宮国道工事事務所資料）によれば、主要粘度鉱物として、ハロイサイトととくに好ましくない土性を与えるといわれるモンモリロナイトを含むものである（モンモリロナイトは生石灰処理による改良効果が大であるとされている）。

この土の試験時における自然含水比として３７～５９％を選定したが、地山における含水比は場所によっては４２～５９％の範囲にあった。この相違は、試料の採取時期や場所の不一致、運搬途中の乾燥などによって生じたも

のと思われる。

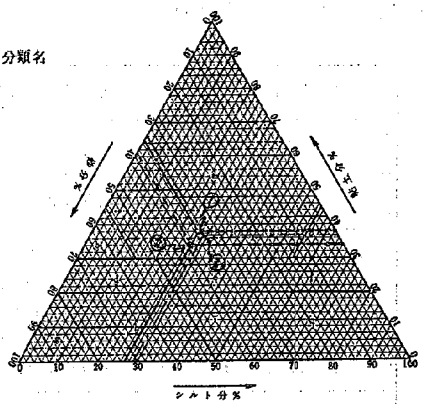
表－1　試験土の物理的性質

地山含水比	37.0～50.0%（42.0～59.0%）
三角座標分類	粘　土
比　　重	2.747
最適含水比	29.0（%）
最大乾燥密度	1.43（g/cm³）
液性限界	44.4（%）
塑性限界	33.6（%）
塑性指数	10.8
流動指数	3.8
統一分類	CL

図－1 土の粒度試験結果

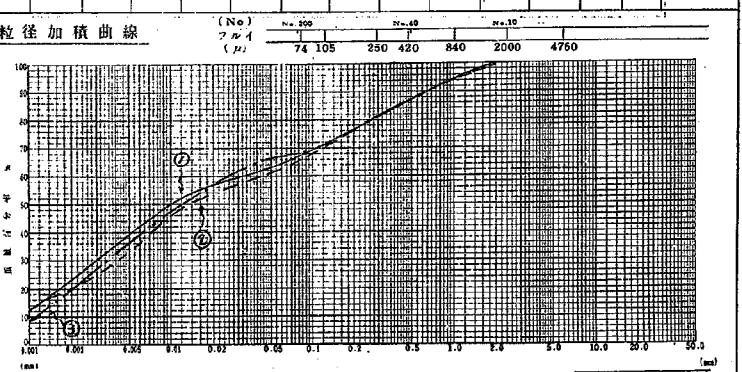
2000μフルイ通過試料の粒度による土の分類名

- ⓐ 粘土
- b 砂質粘土
- c シルト質粘土
- d 砂質粘土ローム
- e 粘土質ローム
- f シルト質粘土ローム
- g 砂
- h 砂質ローム
- i ローム
- j シルト質ローム



試料番号	レキ分 %	砂分 %	シルト分 %	粘土分 %	最大径 mm	60%径 mm	10%径 mm	均等係数	2000μフルイ通過率%	420μフルイ通過率%	74μフルイ通過率%	三角座標上の記号	三角座標による分類	備考
①	0	35	27	38	2.0	0.030	0.001	30	100	86.18	67.58	a	粘土	—— ①
②	0	39	27	34	2.0	0.032	0.001	32	100	86.02	65.93	a	粘土	- - - ②
③	0	34	29	37	2.0	0.027	0.001	24.5	100	86.04	66.74	a	粘土	-·-·- ③

粒径加積曲線



コロイド	粘土	シルト	砂	レキ

3. 試験方法

試験は、こねかえした土の経時的な強度変化と生石灰処理による効果を調べるための試験に分けて行った。

3－1　こねかえした土の強度回復に関する試験

自然含水比を基準とする含水比（このような土を取扱う現場では、自然含水比より乾燥側で施工すべきか、あるいは自然含水比のままで施工できるかという判断を必要とする場合が多い。）から含水比を数種に変えて調整した試料を、異なるエネルギーをもって、ＣＢＲモールド（スペーサーディスクを除く）内で突固めて供試体を作成し、これを含水比の変化のないよう保存した後、一定時間経過ごとにとり出して強度変化を調べる方法をとった。

試験条件は表－２に示すとおりである。含水比の低い条件においては、後の生石灰処理効果との比較の意味でそれに相当する含水比条件とした。

単に乾燥させて所定の含水比に調整した試料と、一度絶乾乾燥状態に近いところまで乾燥させた後加水して所定の含水比に調整したものでは、経時的な変化の　が異なるだろうという考えをもって、試料の初期の含水比処理が異なる条件を設けた。

試料に加える突固めエネルギーはランマーの落下回数によって変えたが、含水比の高い試料については、それが困難であったのであらかじめランマーの突固め回数に相当する足踏みの回数を調べておき、足踏みの回数によって加えるエネルギーの大きさを調整した。

供試体の保存は、モールドに突固めた状態のままで上下部をパラフィンでシールし、含水比の変化が起こらないよう注意して室内の冷暗な所に安置しておく方法をとった。

供試体は一条件につき６ケ用意し、作成当日、３日後、７日後、１５日後、３０日後、１００日後の試験に供した。

強度試験は、主として一軸圧縮試験によったが、含水比が高く供試体成

形が困難なものについては、コーンペネトロメータ（先端角度30°、底断面積3.23cm²）による試験に代えた。

表－2　試験条件

		含水比条件	突固めエネルギー	試験項目	備考
自然含水比から気乾または加水	A①	自然含水比（$W_n \div 40\%$）	ランマーによる 5層，10回，55回，80回	一軸圧縮試験	
	A②	$W_n + 5\%$（加水）	足踏みによる 500回，1000回，2000回	コーンペネトロ試験	
	A③	$W_n - 10\%$（気乾）	ランマーによる 5層，10回，55回，80回	一軸圧縮試験	含水比は生石灰5％添加による低減含水量相当
	A④	$W_n - 15\%$（気乾）	〃	〃	含水比は生石灰10％添加による低減含水量に相当
気乾後加水	B①	W_n'（A①相当含水比）	〃	〃	
	B②	$W_n' + 5\%$（A②相当含水比）	足踏みによる 500回，1000回，2000回	コーンペネトロ試験	

3－2　生石灰処理効果に関する試験

生石灰による処理方法として混合法あるいはパイル法（こねかえしの生ずる前の土取地山に生石灰のパイルをうち、含水比の低下をはかるとともに掘削運搬時の自然混合による効果をもねらう方法）をとった場合の効果を比較するために、それぞれの方法によって処理した後の試料について一定時間経過ごとに含水比、温度、強度などの試験を行いその変化を調べた。

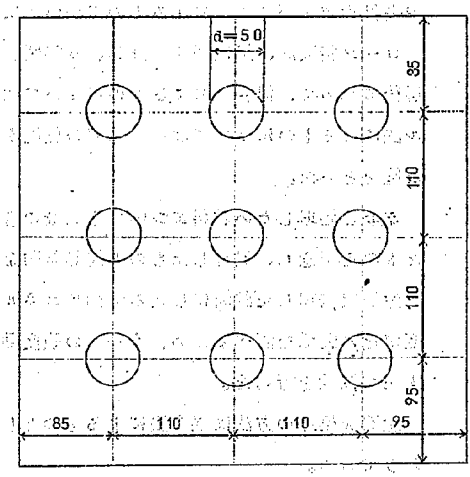
処理する試料の含水比は、自然含水比と降雨時などの増加を想定して自然含水比＋10％の2条件に調整し、添加する生石灰の量は土の乾燥重量に対する5％と10％を定めた。

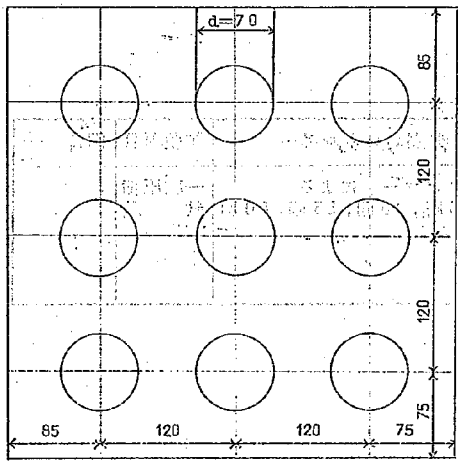
混合法によるものは、含水比を調整した試料に所定量の生石灰を添加し、人力による混合を3分間行った後、これを横40cm×縦40cm×深さ25cmの

容器に踏固めによって入れて試験に供した。

パイル法によるものは、含水比を調整した試料を足踏みによって前述と同じ容器につめ、生石灰添加比５％の場合は径５cm×深さ１０cmの孔を図－２（ａ）の位置から、添加比１０％の場合は径７cm深さ１０cmの孔を図－２（ｂ）の位置からあけて生石灰の所定量を投入し試験に供した。

(a) 生石灰５％添加のパイル位置





(b) 生石灰１０％添加のパイル位置

図－２

含水比は、添加時、2日後、7日後において、混合法によるものにおいては容器の中央付近から、パイル法によるものにおいてはパイル間の位置から深さ方向、上、中、下層より試料をとって試験し、平均的な値を調べた。

温度は、処理後10分間、20分間、30分間、1時間、6時間、1日間、2日間、7日間、の経過ごとに、混合法によるものにおいては容器の中央付近で、パイル法によるものにおいてはパイルの中央で測定した。

コーン指数は、処理後10分間、6時間、1日間、2日間、7日間の経過後において、混合法によるものにおいては容器の適当な位置から、パイル法によるものにおいてはパイル間の位置から深さ方向に測定して平均的な値をとった。

なお、処理しない試料についても比較の意味で上記と同様に容器につめたものを用意し、処理したものと同じ試験を行った。

生石灰処理した試料に加える突固めエネルギーの大きさと、経時的な強度変化の関係を調べるため、3－1の強度回復に関する試験と同様の方法もって試験を行った。

生石灰処理の方法は混合法によるものとし、その試験条件は表－3のとおりである。

表－3　試験の条件

		添加率	突固めエネルギー	試験項目	備考
生石灰添加	C①	乾燥重量に対する 5%	ランマーによる 5層，10回，55回，80回	一軸圧縮試験	
	C②	〃 10%	〃	〃	

4. 試験結果および検討

4－1　こねかえした土の強度回復

4－1－1　締固め効果とこねかえし効果

試料の含水比あるいは突固めエネルギーを変えて作成した供試体の経時的な強度の変化は表－4に示すとおりである。この結果から含水比－密度－強度の関係を図－3－1～図－3－6によってみると、突固め回数55回と80回はほとんど同じ締固め密度であり、とくに自然含水比以上においては、10回突固め密度とほぼ同じであることが示されている。試料含水比の調整過程の相違による密度の差もはっきりしていない。

強度についてはこれを図－4によってみると、自然含水比以上の場合においてとくにこねかえし効果が大となっていることがみられ、含水比が比較的低い場合においては強度からみた締固め効果が大となっていることがわかる。この締固め効果とこねかえし効果の境の含水比条件は、A①とA③の条件すなわち自然含水比と自然含水比－10％の間にあるものとみられる。

表－4－1　強度試験結果

試験条件　A①

経過日数（日）	突固め回数（回）	含水比 W（%）	乾燥密度 γ_d（g/cm³）	一軸強度（コーン指数）q（Kg/cm²）	初期強度に対する比 q/qo	1.0%ひずみ変形係数 E 1.0	2.5%ひずみ変形係数 E 2.5
0	10	39.7	1.18	0.737	1.000	1.50	2.68
	55	43.2	1.19	0.195	1.000	1.30	1.28
	80	40.7	1.22	0.176	1.000	0.90	1.16
3	10	39.9		0.728	0.995	1.40	0.76
	55	41.2	1.21	0.213	1.092	1.00	0.64
	80	41.2	1.22	0.132	0.750	0.60	0.68
7	10	38.1	1.23	0.728	0.995	1.10	2.64
	55	37.8	1.23	0.218	1.117	1.60	1.04
	80	38.3	1.23	0.153	0.869	1.00	0.80
15	10	40.7	1.19	0.660	0.896	1.60	1.48
	55	40.7	1.20	0.213	1.092	1.80	1.16
	80	40.9	1.13	0.187	1.062	1.30	0.72
30	10	40.4	1.21	0.789	1.074	13.20	12.32
	55	41.7	1.18	0.210	1.077	2.10	2.72
	80	40.6	1.24	0.229	1.301	3.50	2.36
100	10	41.6	1.20	0.870	1.180	12.20	8.96
	55	41.2	1.21	0.227	1.165	5.50	3.28
	80	39.4	1.29	0.343	1.948	7.40	5.44

表－4－2　強度試験結果

試験条件　A②

経過日数（日）	足ぶみ回数（回）	含水比 W（%）	乾燥密度 γd（g/cm³）	一軸強度（コーン指数）q（kg/cm²）	初期強度に対する比 q/q0	1.0%ひずみ変形係数 E 1.0	2.5%ひずみ変形係数 E 2.5
0	500	43.8		(0.163)	1.000		
	1000	43.6		(0.163)	1.000		
	2000	43.5		(0.137)	1.090		
3	500	45.8		(0.200)	1.227		
	1000	44.2		(0.246)	1.510		
	2000	44.5		(0.124)	0.906		
7	500	43.6		(0.405)	2.485		
	1000	46.7		(0.193)	1.185		
	2000	43.4		(0.192)	1.401		
15	500	44.8		(0.576)	3.534		
	1000	44.8		(0.197)	1.209		
	2000	43.5		(0.210)	1.533		
30	500	41.5	1.22	(0.976)	5.987		
	1000	42.0	1.21	(0.488)	2.992		
	2000	41.3	1.24	(0.488)	3.580		
10	500	42.9	1.20	(0.854)	5.240		
	1000	42.1	1.22	(0.657)	4.072		
	2000	45.5	1.18	(0.224)	1.634		

表－4－3　強度試験結果

試験条件　A③

経過日数（日）	突固め回数（回）	含水比 W（%）	乾燥密度 γd（g/cm³）	一軸強度（コーン指数）q（kg/cm²）	初期強度に対する比 q/q0	1.0%ひずみ変形係数 E 1.0	2.5%ひずみ変形係数 E 2.5
0	10	30.5	1.26	2.99	1.00	153.50	116.48
	55	29.9	1.41	4.22	1.00	61.40	107.60
	80	28.9	1.38	4.09	1.00	61.40	87.32
3	10	30.2	1.29	3.68	1.23	174.00	
	55	30.6	1.46	6.01	1.42	61.40	166.04
	80	32.0	1.45	5.41	1.32	155.30	152.08
7	10	29.3	1.29	2.42	0.81	158.40	
	55	29.1	1.45	5.51	1.31	95.00	125.77
	80	28.4	1.46	6.88	1.68	117.80	121.28
15	10	30.2	1.21	1.79	0.60	132.20	
	55	27.5	1.42	5.06	1.20	169.30	183.64
	80	29.2	1.45	5.07	1.24	79.30	104.56
30	10	29.1					
	55	28.2	1.45	4.52	1.07	86.10	138.84
	80	27.9	1.43	5.07	1.24	134.70	160.36
100	10	29.3					
	55	28.4	1.46	4.23	1.00	117.90	120.56
	80	30.2	1.44	4.16	1.02	75.10	64.00

表－4－4　強度試験結果

試験条件　A④

経過日数（日）	突固め回数（回）	含水比 W（%）	乾燥密度 γ_d（g/cm³）	一軸強度（コーン指数）q（kg/cm²）	初期強度に対する比 q/q_0	1.0%ひずみ変形係数 E 1.0	2.5%ひずみ変形係数 E 2.5
0	10	23.2	1.41	1.34	1.000	106.80	
	55	24.8	1.51	9.44	1.000	531.70	
	80	24.0	1.41	15.09	1.000	686.50	
3	10	23.5	1.03	1.61	1.202	115.20	
	55	22.6	1.46	4.97	0.527	222.60	
	80	22.6	1.48	5.64	0.322	85.90	
7	10	24.8	1.19	0.80	0.597	56.20	
	55	26.6	1.52	9.97	1.057	371.40	
	80	25.3	1.50	8.96	0.526	439.50	
15	10	21.8	1.28	2.34	1.747	100.90	
	55	21.6	1.42	5.03	0.533	968.80	
	80	21.5	1.54	12.60	0.835	553.60	
30	10	23.7	1.20	1.59	1.186	69.10	
	55	25.6	1.47	6.57	0.739	427.80	
	80	24.3					
100	10	25.3	1.32	1.45	1.083	99.00	
	55	24.9	1.47	6.32	0.670	303.80	
	80	24.3	1.45	7.00	0.411	235.60	

表－4－5　強度試験結果

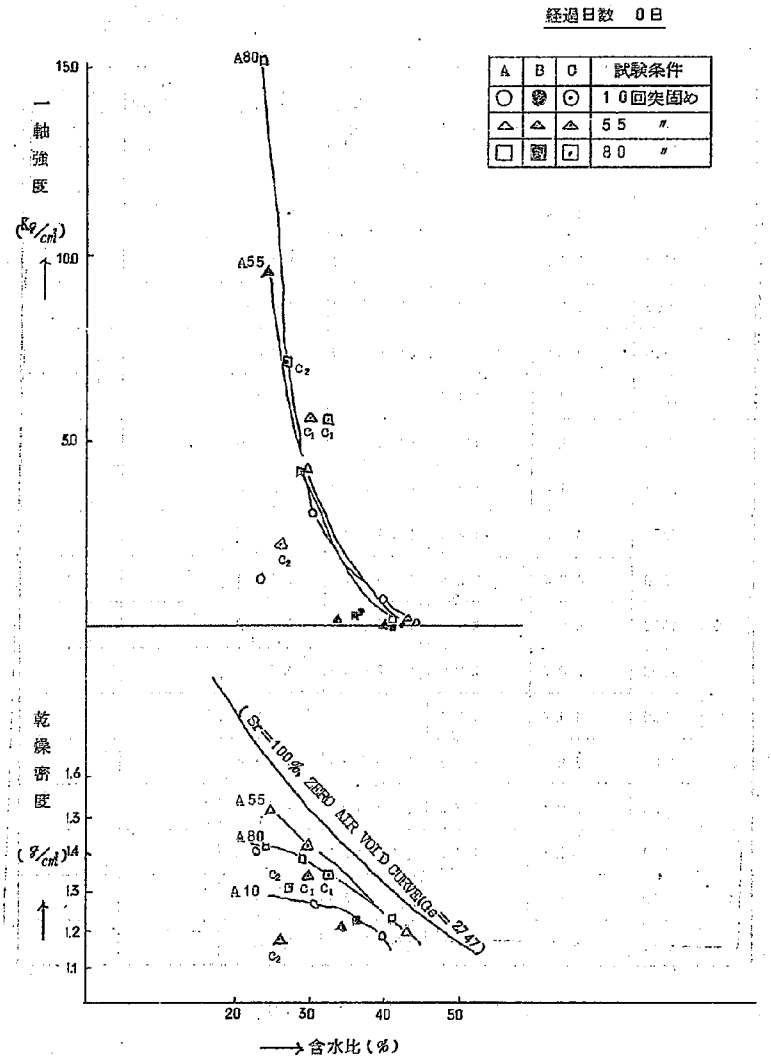
試験条件　B①

経過日数（日）	突固め回数（回）	含水比 W（%）	乾燥密度 γd（g/cm³）	一軸強度（コーン指数）q（kg/cm²）	初期強度に対する比 q/q0	1.0%ひずみ変形係数 E1.0	2.5%ひずみ変形係数 E2.5
0	10	36.7	1.04	0.436	1.000	2.75	3.36
	55	33.8	1.20	0.195	1.000	2.52	1.87
	80	36.1	1.22	0.202	1.000	4.57	1.76
3	10	38.3	1.24	0.489	1.122	3.49	3.49
	55	37.4	1.27	0.205	1.051	3.58	2.57
	80	37.9	1.28	0.168	0.832	1.18	0.72
7	10	38.5	1.27	0.475	1.089	6.46	4.76
	55	37.2	1.32			4.31	2.72
	80	37.6	1.17	0.211	1.045	4.49	1.84
15	10	39.6	1.28	0.609	1.397	4.91	4.80
	55	38.2	1.29	0.276	1.415	3.49	3.19
	80	37.1	1.36	0.220	1.089	2.87	1.24
30	10	37.4	1.31	0.380	0.872	4.94	3.88
	55	36.7	1.29	0.245	1.256	3.40	2.84
	80	37.5	1.29	0.165	0.817	3.47	1.24
100	10	37.7	1.34	0.540	1.239	10.09	7.40
	55	37.3	1.47	0.260	1.333	4.87	3.99
	80	35.9	1.32	0.325	1.609	6.20	2.48

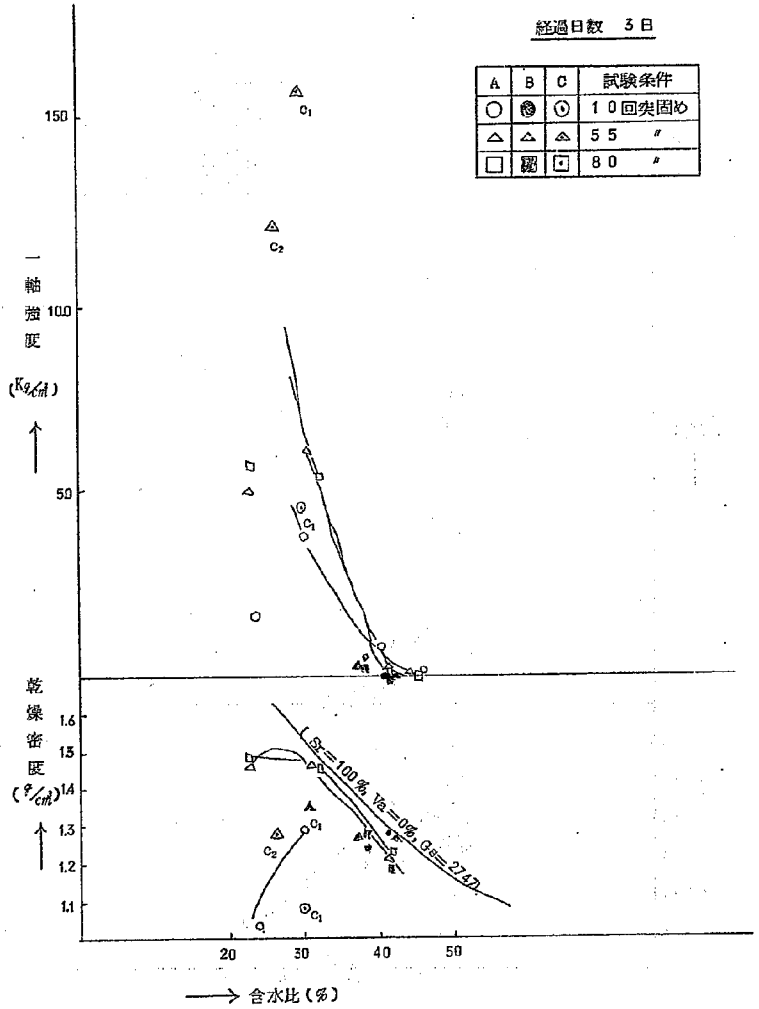
表－4－6　強度試験結果

試験条件　B②

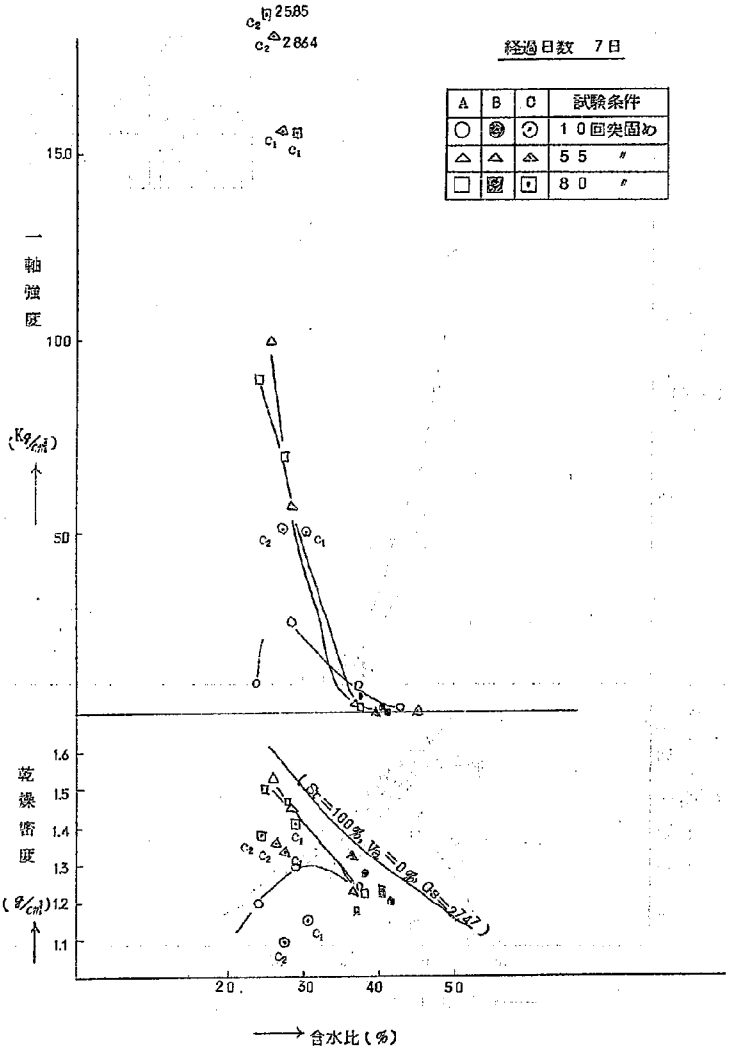
経過日数（日）	足ぶみ回数（回）	含水比 W（%）	乾燥密度 γd（g/cm³）	一軸強度（コーン指数）q（kg/cm²）	初期強度に対する比 q/q0	1.0%ひずみ変形係数 E1.0	2.5%ひずみ変形係数 E2.5
0	500	42.3		(0.164)	1.000		
	1000	40.9		(0.164)	1.000		
	2000	41.0		(0.138)	1.000		
3	500	41.2	1.28	(0.179)	1.092		
	1000	41.9	1.27	(0.118)	0.720		
	2000	42.4	1.18	(0.098)	0.711		
7	500	41.8	1.20	(0.229)	1.396		
	1000	41.4	1.21	(0.221)	1.347		
	2000	41.2	1.23	(0.140)	1.015		
15	500	40.4	1.23	(0.374)	2.341		
	1000	39.6	1.24	(0.374)	2.282		
	2000	38.7	1.25	(0.244)	1.769		
30	500	41.4	1.21	(0.325)	1.981		
	1000	38.5	1.25	(0.699)	4.264		
	2000	39.6	1.25	(0.358)	2.595		
10	500	37.6	1.30	(1.985)	12.100		
	1000	39.7		(0.863)	5.262		
	2000	36.6		(0.978)	7.096		



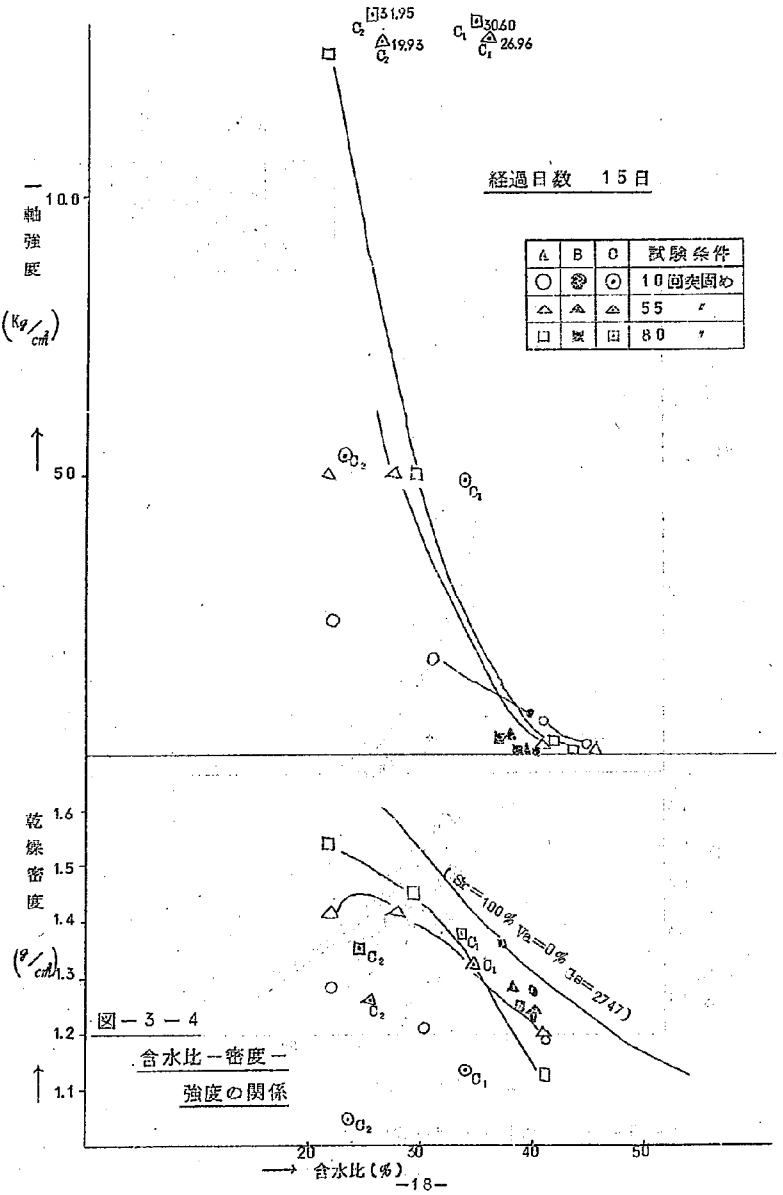
図－3－1　含水比－密度－強度の関係



図－3－2　含水比－密度－強度の関係

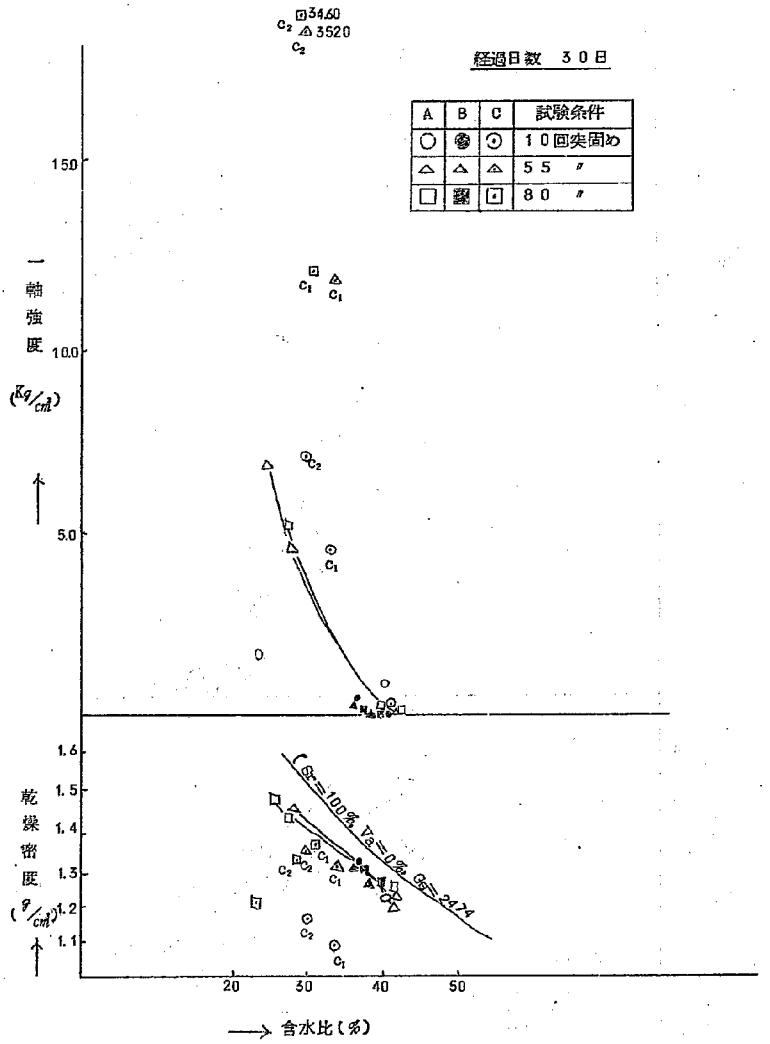


図－3－3　含水比－密度－強度の関係

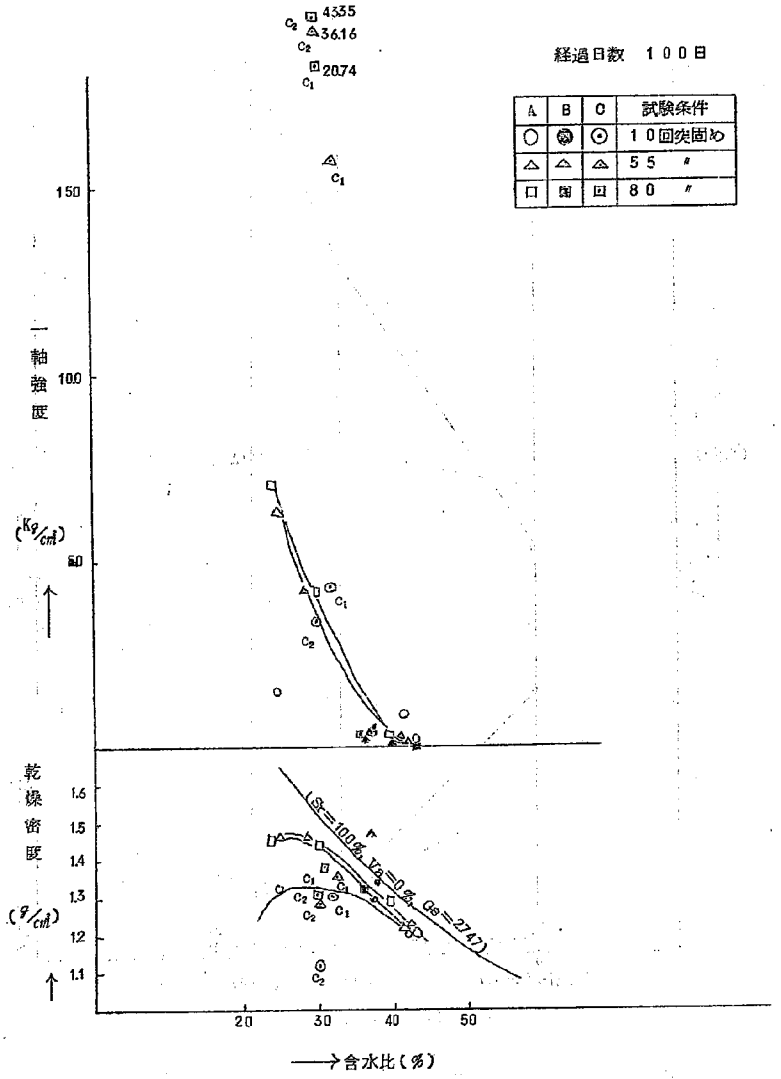


図－3－4

含水比－密度－強度の関係



図－3－5　含水比－密度－強度の関係



図－３－６　含水比－密度－強度の関係

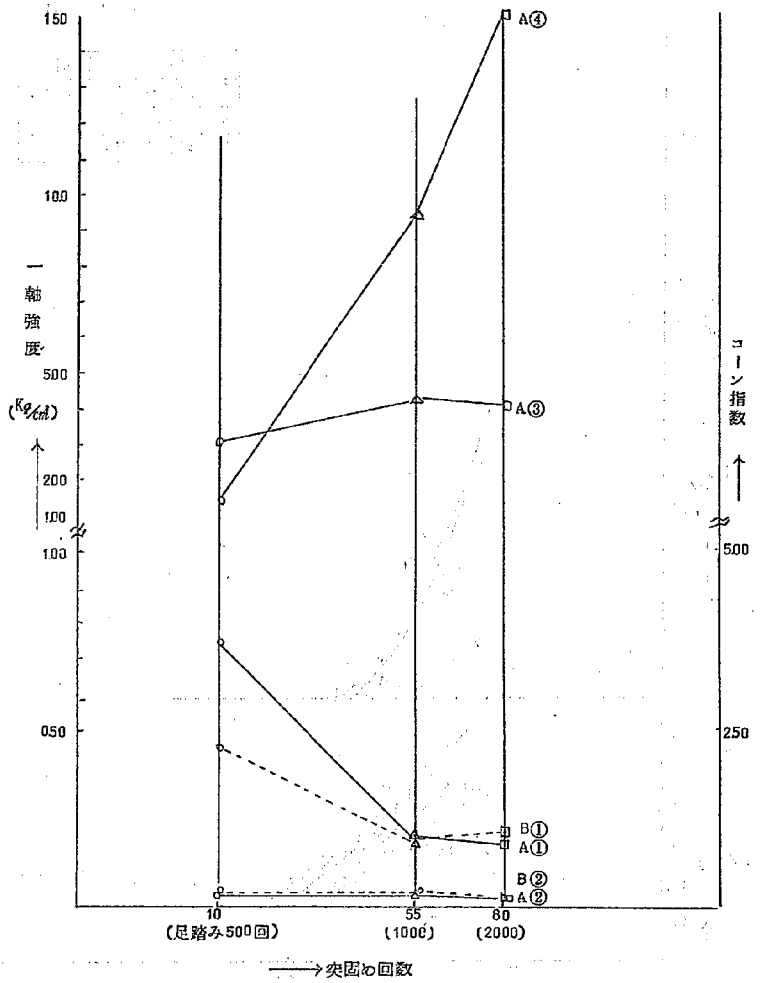


図--4　突固めエネルギーと強度の関係

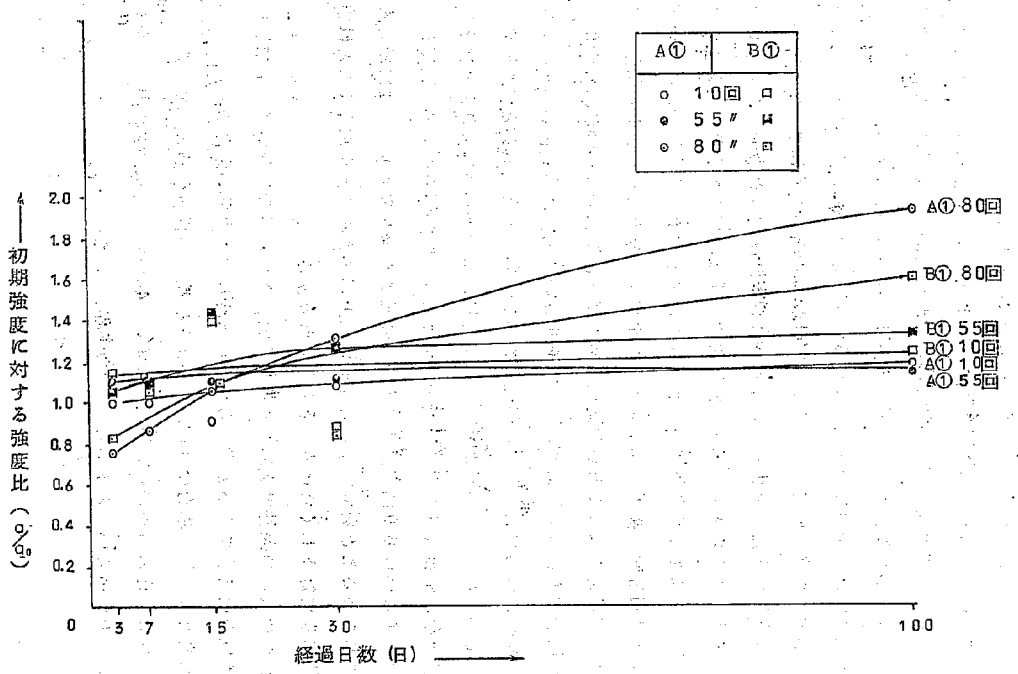
4－1－2　強度の経時的変化

表－4から強度の経時的変化をみると，自然含水比以上の含水比条件のものについては，かなり強度回復のあることがわかる。これを初期強度（供試体作成時の強度）と各試験時の強度の比によって経時的にどのように変化するかをみたものが，図－5－1～図－5－2である。

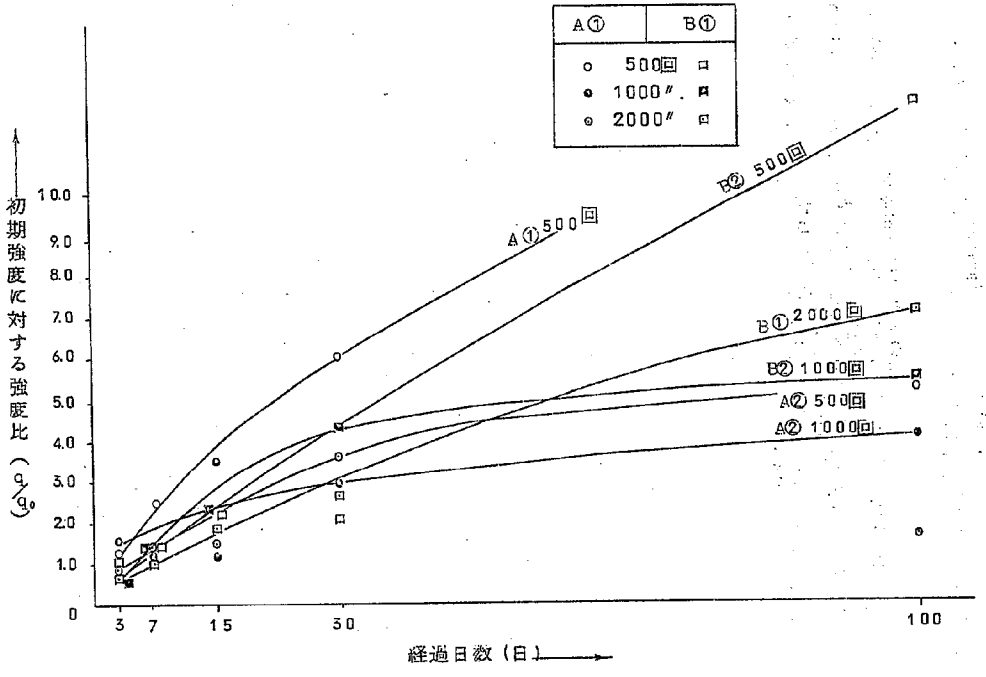
自然含水比の条件においては，図5－1でみられるように加えたエネルギーが大きな80回突固めのものの経時的な変化がとくに大となっている。一方，自然含水比より大なる含水比条件においては，図5－2のように加えたエネルギーの大きさによる強度比の変化傾向にあまり差を生じていない。図－4でも示されるように自然含水比より大なる含水比条件においては，10回程度の突固めエネルギーですでに十分なとねかえしの状態にあることが考えられ，これが加えたエネルギーに関係のない経時的な変化を示す原因であろうと思われる。これらを合わせて考えると，とねかえしの大きな条件のもの程経時的な強度比の増加傾向は大となることが推察される。しかし表－4からわかるように，自然含水比あるいはそれより含水比の多い条件では，100日経過後における10回突固めのものの強度は55回あるいは80回突固めのものの強度よりも大であり，密度はほとんど同じであることを考慮すると，必要以上にエネルギーを加えることは強度的にみて好ましくないものと考えられる。

自然含水比の条件で突固め回数55回位までの場合においては，強度比1.3位が最終値であると考えられ，自然含水比より多い条件の場合においては自然含水比の場合の4倍以上の最終強度比が得られるようである。

試料含水比の調整過程の相違による影響については，含水比調整が完全になされていないこともあってはっきりしていない。



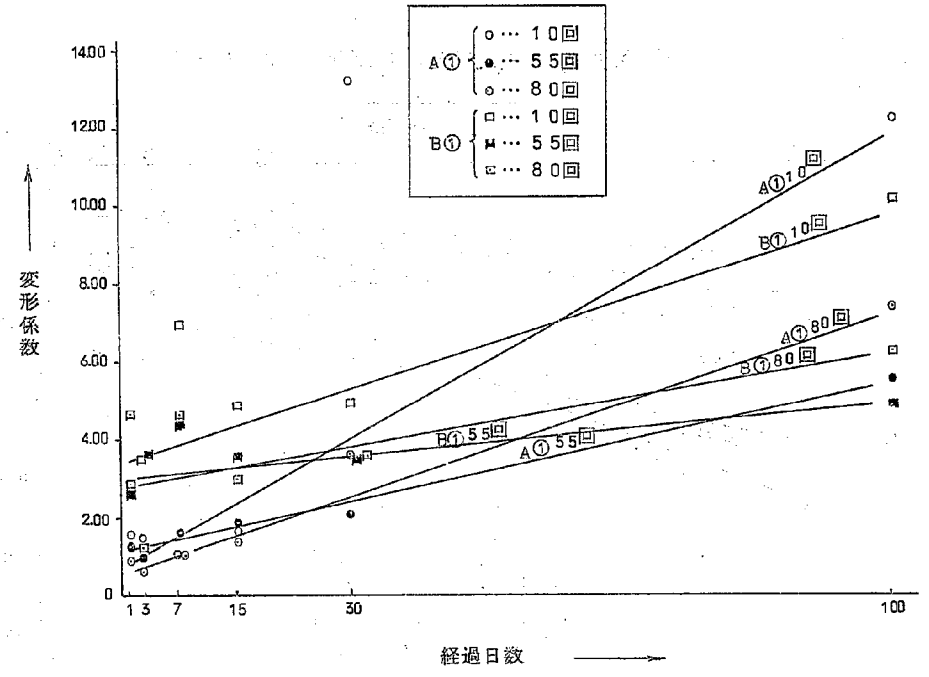
図－5－1　強度比の経時的変化



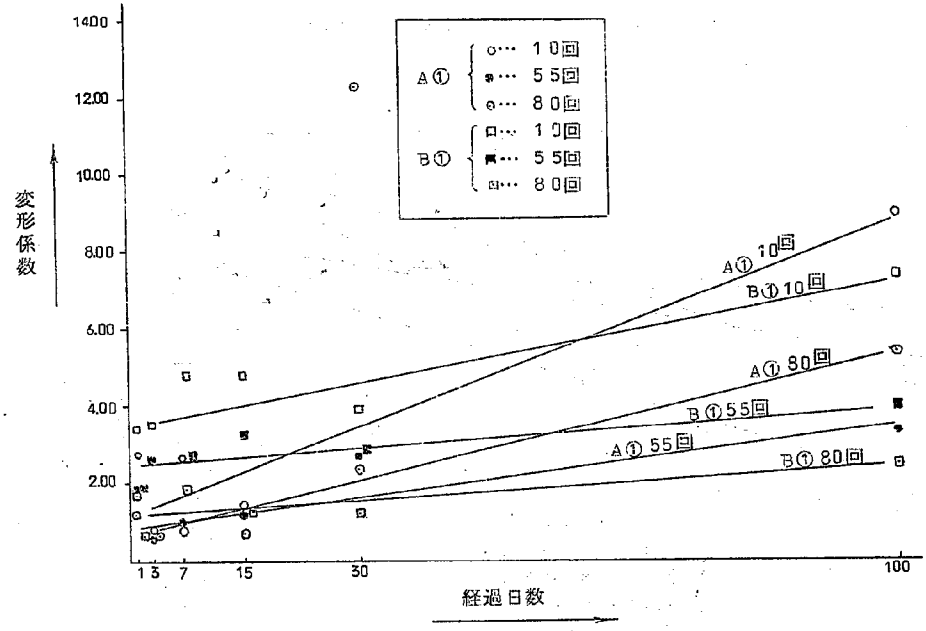
図－5－2　強度比の経時的変化

強度試験における応力ー歪曲線の１％と2.5％の歪点から変形係数を定めた数値は表ー４に示した通りであるが，とくに自然含水比の場合における変形係数について経時的な変化をみると，図ー６ー１～図ー６ー２のとおりである。

試料含水比の調整過程の相違によって変形係数の増加傾向に差がみられるようでもあるが，A①条件とB①条件の含水比の調整は表ー４でみられるように完全になされておらず，これから判断を下すことは無理のようである。



図－6－1　変形係数（1％歪）の経時的変化



図－6－2　変形係数（2.5%歪）の経時的変化

4－2　生石灰処理効果

4－2－1　基本的な土の性質の変化

基本的な土の性質が生石灰の添加によってどのように変わるかを調べた結果は，表－5，図－7－1～図－7－2，のとおりで，粒径加積曲線，突固め曲線は図－8のごとく変化するのがみられる。一般に生石灰処理土においては，混合割合の増加とともに突固め最大乾燥密度は低下し，最適含水比は大の方に移行するが，この結果における5％と10％の混合比率ではそのような傾向がはっきりしていない。10％の混合比率が過剰となっているためこのような結果を示すことも考えられる。

表－5　生石灰処理土の物理試験結果

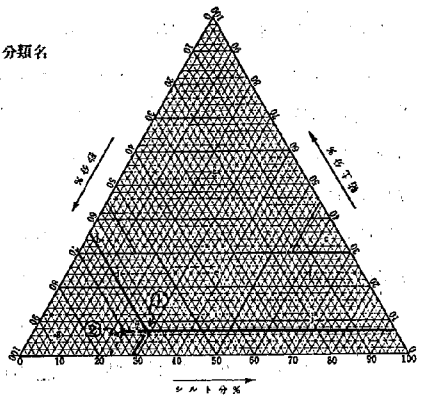
		単位	未処理土	CaO 5%添加	CaO 10%添加
比重			2.664	2.712	2.674
最適含水比		%	29.0	31.5	30.0
最大乾燥密度		g/cm³	1.43	1.396	1.396
粒度分析	レキ分	%	0	0	0
	砂分	%	36	67	56
	シルト分	%	28	26	37.5
	粘土分	%	36	7	6.5
	2000μフルイ通過分	%	100	100	100
	分類		粘土	砂質ローム	砂質ローム
コンシステンシー	液性限界	%	44.4	54.1	57.6
	塑性限界	%	33.6	42.9	46.8
	塑性指数		10.8	11.2	10.8
	流動指数		3.8	7.5	4.9

図−7−1 土の粒度試験結果

生石灰 5% 混合土

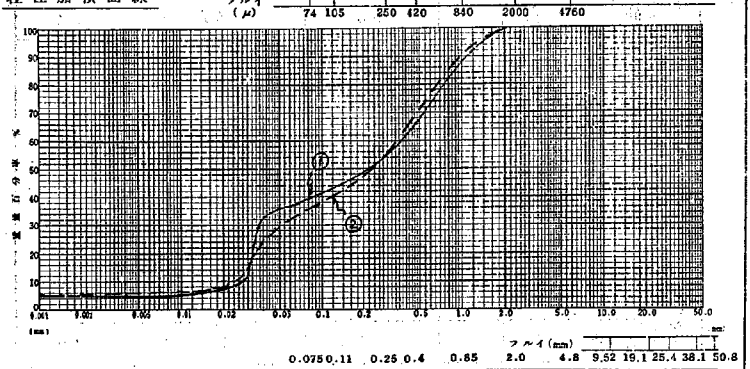
2000μフルイ通過試料の粒度による土の分類名

- a 粘土
- b 砂質粘土
- c シルト質粘土
- d 砂質粘土ローム
- e 粘土質ローム
- f シルト質粘土ローム
- g 砂
- ⓗ 砂質ローム
- i ローム
- j シルト質ローム



試料番号	レキ分 %	砂分 %	シルト分 %	粘土分 %	最大径 mm	60%径 mm	10%径 mm	均等係数	200μフルイ通過率%	40μフルイ通過率%	74μフルイ通過率%	三角座標上の記号	三角座標による分類	備考
①	0	64	29	7	2.00	0.34	0.026		100	65.28	39.19	h	砂質ローム	—— ①
②	0	70	23	7	2.00	0.39	0.023		100	63.56	35.01	h	砂質ローム	- - - ②

粒径加積曲線

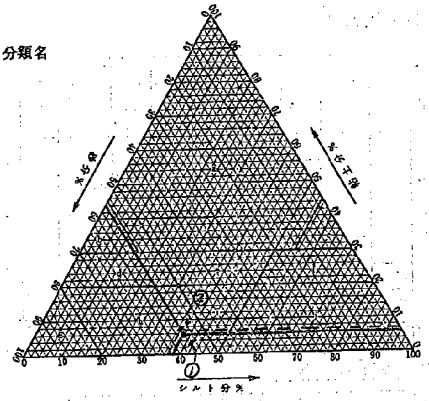


図－7－2 土の粒度試験結果

生石灰 10 % 混合土

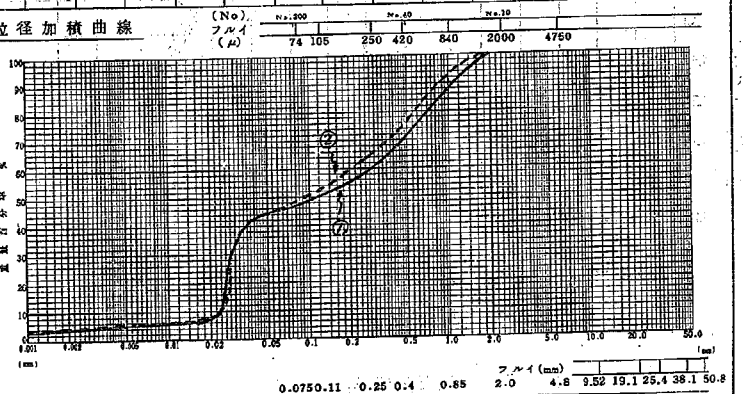
2000μフルイ通過試料の粒度による土の分類名

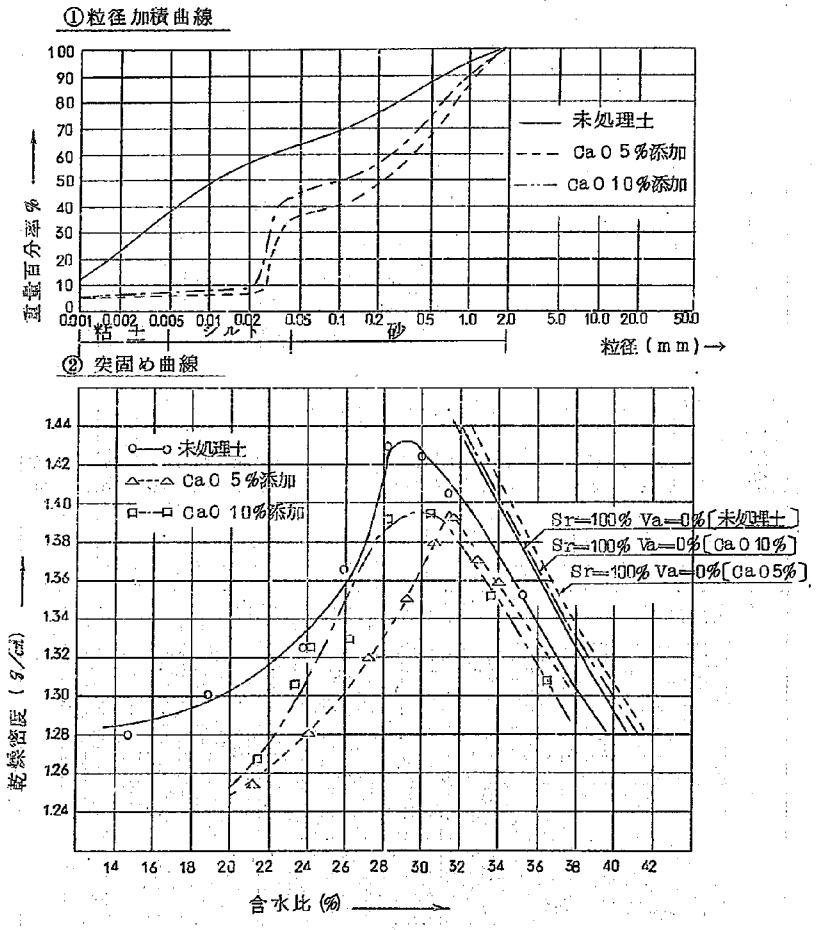
- a 粘土
- b 砂質粘土
- c シルト質粘土
- d 砂質粘土ローム
- e 粘土質ローム
- f シルト質粘土ローム
- g 砂
- ⓗ 砂質ローム
- i ローム
- j シルト質ローム



試料番号	レキ分 %	砂分 %	シルト分 %	粘土分 %	最大径 mm	60%径 mm	10%径 mm	均等係数	2000μフルイ通過率%	420μフルイ通過率%	74μフルイ通過率%	三角図表上の記号	三角図表による分類	備考
①	0	56	38	6	2.00	0.28	0.026		100	67.98	46.39	h	砂質ローム	—— ①
②	0	56	37	7	2.00	0.22	0.020		100	70.27	47.25	h	砂質ローム	- - - ②

粒径加積曲線





図－8　生石灰処理土の変化

4－2－2　処理後の経過時間と含水比の変化

処理後の2日と7日を経た時点において調べた含水比の変化は表－6および図－9に示すとおりである。

混合法による場合は2日以内に吸水反応が終了して含水比が一定値に達しているとみられるが，パイル法による場合は7日以降でもまだ反応がすすんでいるものと察せられる。

生石灰添加による土の含水量の低下は，主としてCaO の消化による化学反応およびその際の発熱による蒸発に起因するものと考えられる。その他パイル法による場合においては，生石灰パイルの吸水，膨張による水分のしぼり出し効果が間接的な作用として考えられる。

生石灰の吸水反応は次により表わされる。

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15.1\ \mathrm{Kcal/mol}$$

分子量　56.1　　18.0　　74.1

気化を考えない場合の反応後の含水量は次による。

$$W_2 = \frac{W_{W_2}}{W_S + W_{Ca} + W_W - W_{W_2}} \times 100$$

$$= \frac{W_1 - 0.32\,Ca}{100 + (1 + 0.32)\,Ca} \times 100 \qquad (1)$$

ここに　W_1：反応前の含水量　(%)

W_2：反応後の含水量　(%)

Ca：土の乾燥重量に対する生石灰重量割合(%)

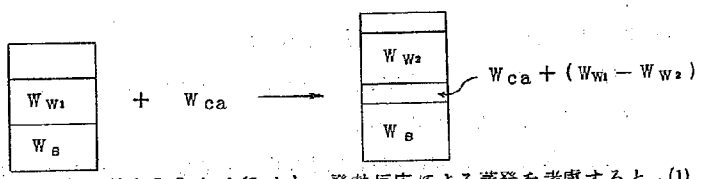
W_{W_2}：反応後の水分重量(g)

W_S：土粒子の重量(g)

W_{Ca}：生石灰重量(g)

W_{W_1}：反応前の水分重量(g)

W_{W_2}：反応後の水分重量(g)



水の気化熱を596cal/g とし，発熱反応による蒸発を考慮すると，(1)式は次のとおりとなる。

$$w_2' = \frac{w_1 - 0.32\,Ca - \left(\frac{15100}{56.1} \times \frac{1}{596}\right) Ca}{100 + 1.32\,Ca} \times 100$$

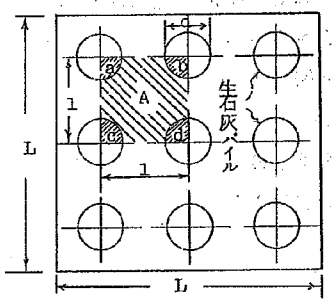
$$= \frac{w_1 - 0.77\,Ca}{100 + 1.32\,Ca} \times 100 \qquad (2)$$

生石灰パイルの膨張量は，生石灰の比重を約3.3，消石灰の比重を約2.2とすると，

$$\frac{\frac{74.1}{2.2}}{\frac{56.1}{3.3}} \fallingdotseq 2$$

容積比で約2倍の膨張量が見込まれる。

ここで(2)式を用いて生石灰の添加量に対する含水比の低減を計算してみると，表－6あるいは図－9に示したものとなる。ただし，パイル法における生石灰の添加率は，パイル間隔などから考えると，次のように補正した方が実際に近いと思われ，低減含水量の計算においてはこの値を用いた。



A部分はa，b，c，d，によって影響を受けるものとすると，この部分の添加率n′は次のとおりとなる。

$$n = \frac{N \times \frac{\pi}{4} d^2 \times G_{ca}}{(L^2 - N \times \frac{\pi}{4} d^2) \times \gamma_d} \times 100,$$

$$n' = \frac{\frac{\pi}{4} d^2 \times G_{ca}}{(l^2 - \frac{\pi}{4} d^2) \times \gamma_d} \times 100$$

$$n' = \frac{(L^2 - N \times \frac{\pi}{4} d^2)}{N \times (l^2 - \frac{\pi}{4} d^2} \times n \qquad (3)$$

ここに

n ： 全試料についての添加率 (%)

n' ： A部分についての添加率 (%)

N ： パイル本数

G_{ca} ： 生石灰の単位体積重量 (g/cm³)

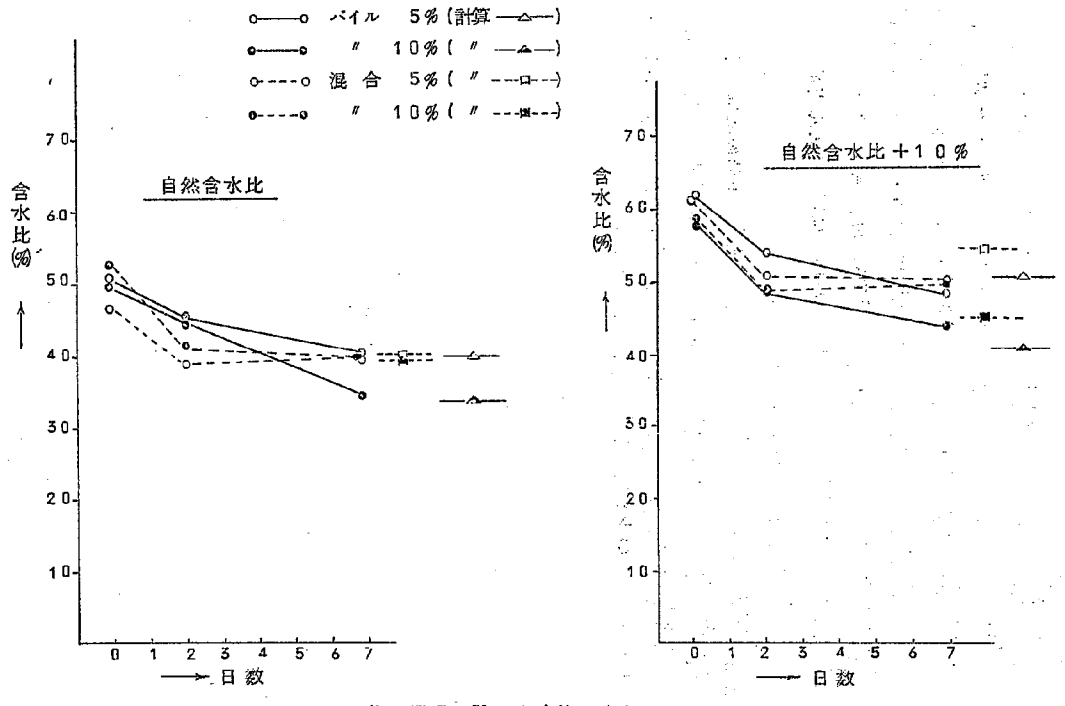
γ_d ： 土の乾燥密度 (g/cm³)

(3)式により全試料添加率5%を条件とした場合のA部分の添加率は7.8%に，同様に10%を条件とした場合のA部分の添加率は13.2%に相当する。

生石灰処理後の含水比は計算によるものと非常によく一致しており，計算で添加率に応じた低減含水量を推定できることを意味している。

表－6　処理後の含水比変化

含水比条件	処理方法	混入率(%)	初期含水比(%)	2日後含水比(%)	7日後含水比(%)	計算含水比(%)
自然含水比	パイル	5	50.5	45.2	40.2	40.3
		10	49.4	45.6	34.4	33.4
	混合	5	46.5	38.8	40.3	40.0
		10	52.5	41.5	40.1	39.6
自然含水比＋1.0%含水比	パイル	5	62.1	53.9	48.4	50.9
		10	58.6	48.6	44.2	41.3
	混合	5	62.3	50.6	50.0	54.8
		10	58.9	48.9	49.6	45.2



図－9　処理後の経過時間と含水比の変化

4－2－3　処理後の経過時間と温度変化

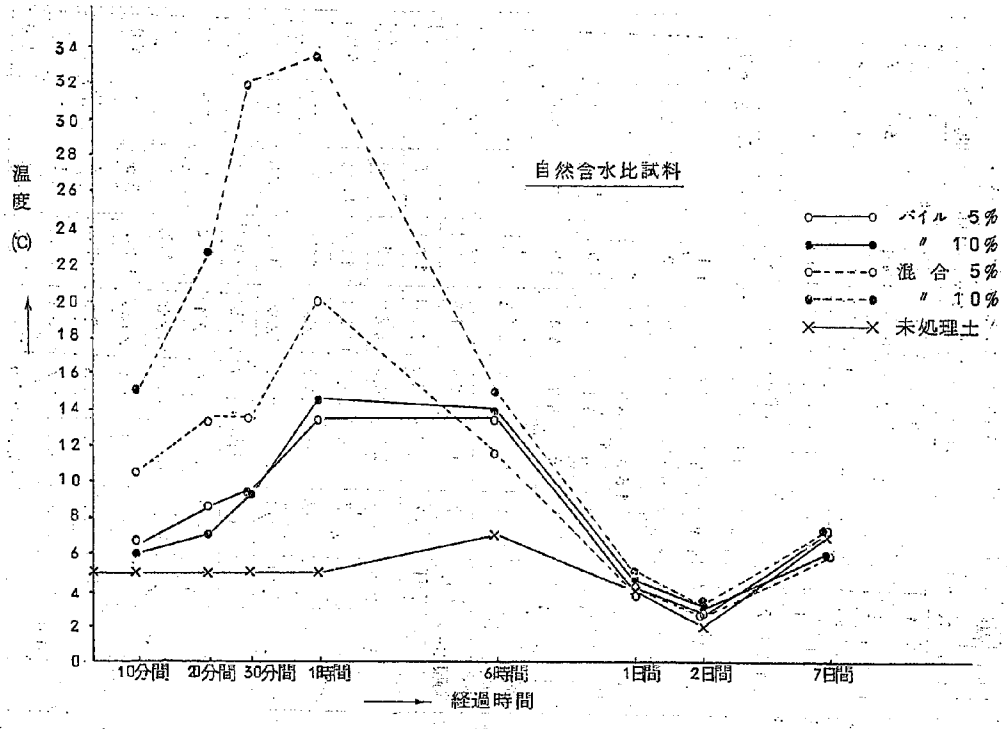
生石灰処理後の発熱反応による経時的な温度変化を調べた結果は，表－7および図－10－1，図－10－2に示すとおりである。

試料の初期含水比あるいは処理方法に関係なく，処理後1時間位で最高温度となっているのがみられ，1日以内で処理前の温度まで下っている。したがって温度変化だけからみると1日以内に反応がほとんど終了するものと考えられる。

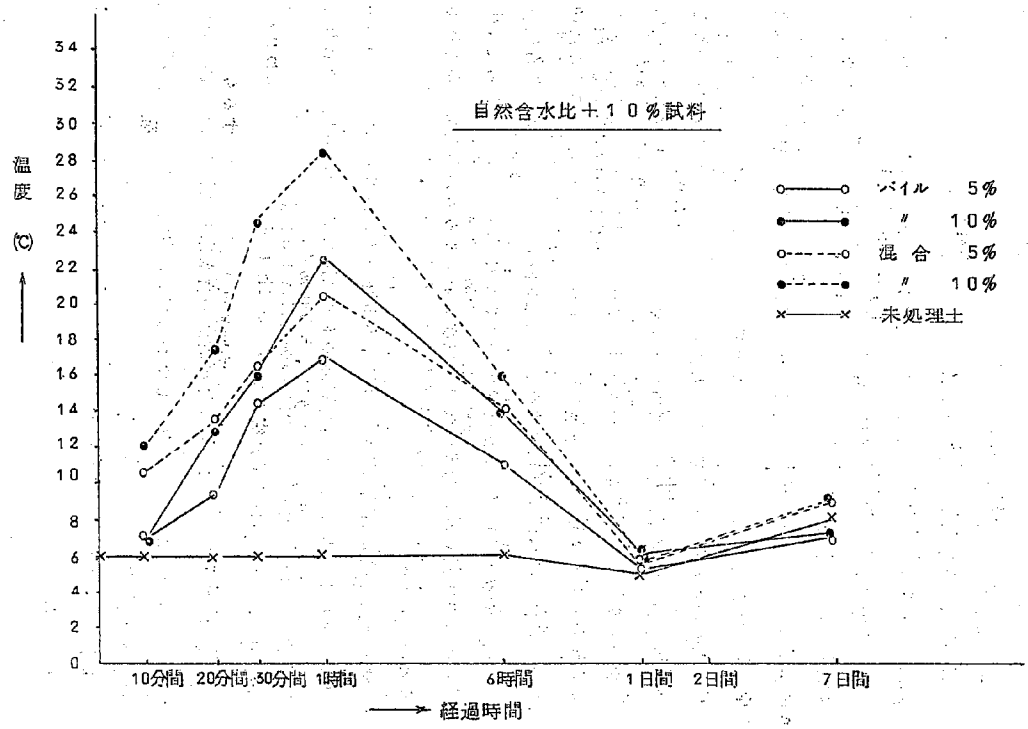
パイル法によるものでは混合法による場合よりも最高温度は低く，温度変化からみても反応効率の悪いことがうかがえる。含水量の多い場合にはパイル法による場合でも温度上昇の傾向は混合法に似かよった形をなしており，含水量の少ない場合に比して有効であることがわかる。

表－7　処理後の温度変化

初期含水比(%)	処理方法	混入率(%)	試験数	経過時間ごとの温度（℃）							
				10分間	20分間	30分間	1時間	6時間	1日間	2日間	7日間
（自然含水比）	パイル	5	1	7	9	10	14	13	4		—
			2	6	8	9	13	14	4	3	7
			平均	6.5	8.5	9.5	13.5	13.5	4.0	2.5	7.0
		10	1	5	6	9	14	13	4	3	—
			2	7	8	10	15	15	5	3	6
			平均	6.0	7.0	9.5	14.5	14.0	4.5	3.0	6.0
	混合	5	1	11	15	15	20	11	4	2	—
			2	10	12	12	20	12	4	3	6
			平均	10.5	13.5	13.5	20.0	11.5	4.0	2.5	6.0
		10	1	14	23	31	33	15	5	3	—
			2	16	22	33	34	15	4	3	7
			平均	15.0	22.5	32.0	33.5	15.0	4.5	3.0	7.0
	未処理土（初期温度5℃）		1	5	5	5	5	7	4	2	7
（自然含水比＋10(%)）	パイル	5	1	7	11	16	18	11	5	—	—
			2	7	8	13	16	11	5	—	7
			平均	7.0	9.5	14.5	17.0	11.0	5.0	—	7.0
		10	1	7	10	15	21	14	6	—	—
			2	7	16	17	24	14	6	—	7
			平均	7.0	13.0	16.5	22.5	14.0	6.0	—	7.0
	混合	5	1	11	13	17	21	14	6	—	—
			2	10	14	16	20	14	5	—	9
			平均	10.5	13.5	16.5	20.5	14.0	5.5	—	9.0
		10	1	12	15	23	25	16	6	—	—
			2	12	20	26	32	16	5	—	9
			平均	12.0	17.5	24.5	28.5	16.0	5.5	—	9.0
	未処理土（初期温度6℃）		1	6	6	6	6	6	5	—	8



図—１０—１　処理後の温度変化



図－１０－２　処理後の温度変化

4－2－4　処理後の経過時間と強度の変化

混合法あるいはパイル法によって処理した場合の経時的な強度の変化は，表－8に示すとおりである。

コーンペネトロメータ試験によった関係上，コーン指数11以上のものは測定不能としたが，図－11－1，図－11－2によっても明らかなように，混合法によるものは6時間位でパイル法によるものの7日後の強度に相当している。

パイル法によるものでは含水量の多い場合の方が強度増加の速さは大となっている。また未処理土でもかなりの強度増加がみられる。

生石灰処理後においては長期にわたって消石灰による効果があらわれるものと思われるが，加えた突固めエネルギーとの関係について試験した結果を表－9に示す。さきの図－3－1～図－3－6においてこの結果を加えて示したが，これによると生石灰処理したC①，C②の条件のものは初期の1日目位においては単に試料の含水比を減じたA③，A④の条件のものと比べて密度は幾分低いが強度においては大差がない。したがって，生石灰添加直後における効果は試料の減水効果によるものが大であるとみることができる。

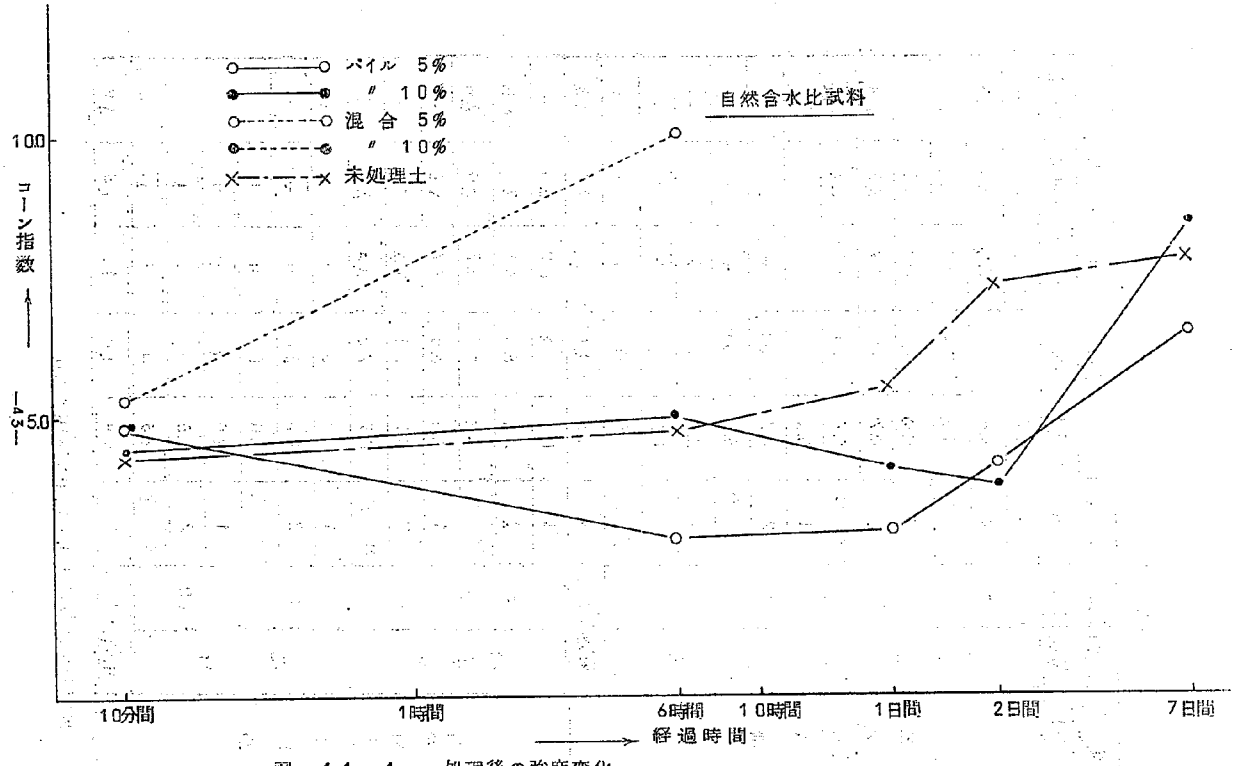
表－9の結果から明らかなように，55回あるいは80回の突固めエネルギーを与えたものは10回突固めのものに比して消石灰効果と思われる強度増加の傾向が大であり，大方の強度には15日間位で達するものとみられる。

初めの方で検討したように，この程度の含水比の試料では強度回復という現象はないものと考えられ，したがってこの強度増加は消石灰のみの効果と考えられる。

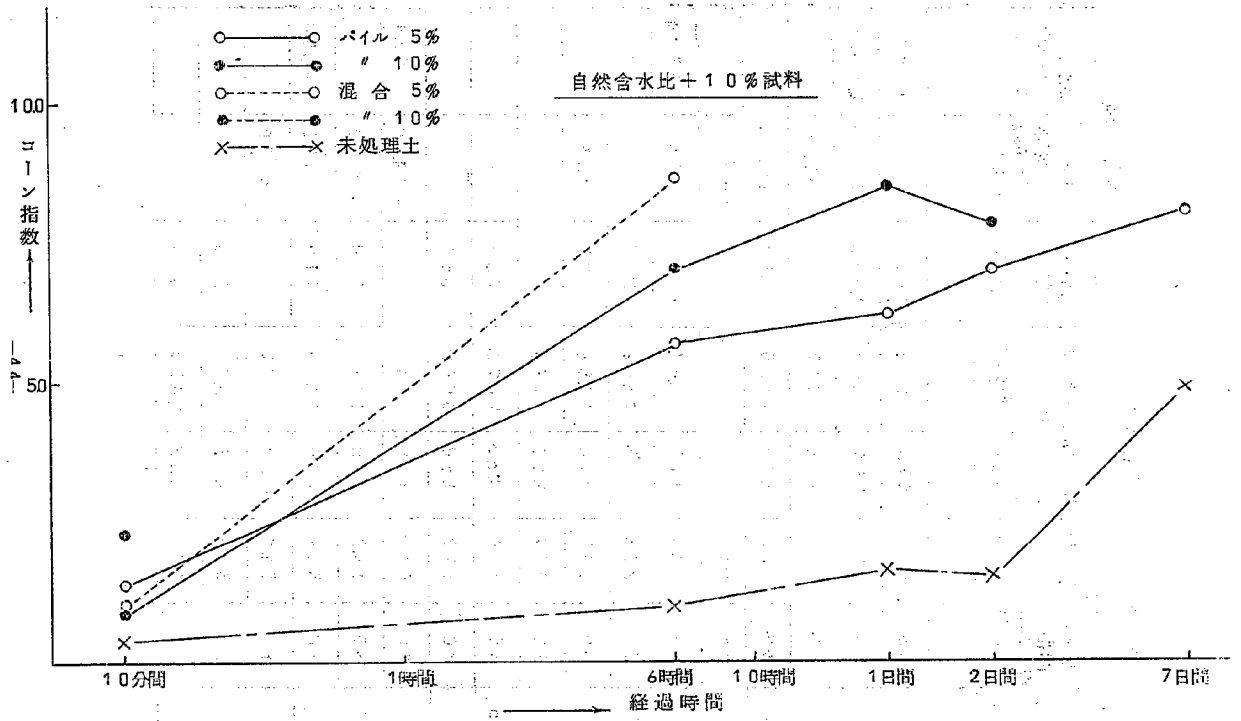
表－8　処理後の強度変化

初期含水比(%)	処理方法	混入率(%)	試験数	経過時間ごとのコーン指数				
				10分間	6時間	1日間	2日間	7日間
自然含水比	パイル	5	1	4.7	2.7	2.6	4.6	—
			2	4.8	2.8	3.2	3.6	6.5
			平均	4.8	2.8	2.9	4.1	6.5
		10	1	4.0	4.0	3.0	3.5	—
			2	4.7	6.0	4.9	3.8	8.4
			平均	4.4	5.0	4.0	3.7	8.4
	混合	5	1	5.8	+	+	+	—
			2	4.7	10.0	+	+	+
			平均	5.3	10.0	+	+	+
		10	1	4.4	+	+	+	—
			2	5.2	+	+	+	+
			平均	4.8	+	+	+	+
	未処理土		1	4.3	4.7	5.5	7.3	7.8
自然含水比＋10%	パイル	5	1	0.7	5.4	6.2	6.4	—
			2	2.1	6.0	6.1	7.6	8.0
			平均	1.4	5.7	6.2	7.0	8.0
		10	1	1.0	6.8	7.7	8.2	—
			2	0.7	7.1	9.3	7.3	+
			平均	0.9	7.0	8.5	7.8	+
	混合	5	1	1.2	8.6	+	+	—
			2	0.8	8.6	+	+	+
			平均	1.0	8.6	+	+	+
		10	1	2.0	+	+	+	—
			2	2.5	+	+	+	+
			平均	2.3	+	+	+	+
	未処理土		1	0.4	1.0	1.6	1.5	4.9

表中の＋記号は11.0以上を意味する。



図－11－1　処理後の強度変化



図－11－2　処理後の強度変化

表－9－1　強度試験結果

試験条件　C①

経過日数(日)	突固め回数(足ぶみ回数)(回)	含水比 w (%)	乾燥密度 rd (g/cm³)	一軸強度(コーン指数) q (Kg/cm²)	初期強度に対する比 q/q0	1.0% ひずみ変形係数 E 1.0	2.5% ひずみ変形係数 E 2.5
0	10						
	55	30.0	1.33	5.52	1.000	28.70	128.28
	80	32.4	1.34	5.52	1.000	200.90	215.20
3	10	29.9	1.08	4.47		32.60	
	55	30.2	1.35	15.65	2.84	1236.60	
	80	29.6				810.90	
7	10	31.4	1.15	4.81		71.30	117.00
	55	28.3	1.33	15.62	2.83		
	80	29.5	1.40	15.56	2.82	15.30	
15	10	33.7	1.13	4.92			
	55	34.4	1.33	26.96	4.88		
	80	32.9	1.38	30.60	5.54		
30	10	33.5	1.08	4.44		424.00	53.4
	55	34.2	1.30	11.57	2.10	1144.60	
	80	30.9	1.35	11.85	2.15	961.20	440.00
100	10	31.8	1.30	4.27		339.70	
	55	32.6	1.35	15.72	2.85		
	80	30.9	1.37	20.74	37.6		

表－9－2　強度試験結果

試験条件　C②

経過日数（日）	突固め回数（足ぶみ回数）（回）	含水比 w (%)	乾燥密度 γ_d (g/cm^3)	一軸強度（コーン指数） q (Kg/cm^2)	初期強度に対する比 q/q0	1.0% ひずみ変形係数 E 1.0	2.5% ひずみ変形係数 E 2.5
0	10						
	55	26.2	1.16	2.10	1.000	89.0	
	80	26.8	1.30	7.11	1.000	31.70	250.24
3	10	27.5					
	55	25.9	1.27	12.02	5.72	12.88	
	80		1.41	20.14	2.83	199.85	
7	10	27.9	1.09	4.90		377.90	
	55	27.1	1.35	28.64	13.64	2834.80	
	80	24.6	1.37	25.85	3.64	2556.80	2074.00
15	10	23.4	1.05	5.32		369.60	
	55	25.4	1.26	19.93	9.49	1961.40	
	80	24.0	1.35	31.95	4.49	3171.00	
30	10	29.9	1.15	6.90		686.90	
	55	30.0	1.33	35.20	16.76	3503.9	
	80	29.6	1.31	34.60	4.87	3445.00	
100	10	29.4	1.12	3.40		324.70	
	55	30.5	1.28	36.16	17.22	3646.4	
	80	30.0	1.30	43.35	6.10	4412.00	

5. 検討結果のまとめ

この試験によって，土のこねかえしと強度回復性状，生石灰処理の方法およびその効果について，大まかな事項を知ることができたが，それらをまとめてみると次のとおりである。たゞし，試験土が限られているので一般的にどの土についても云えるかどうかは今後さらに多くの試験が必要とされる。

◎ こねかえした土の強度回復について

(1) こねかえし効果は土の含水量に大いに関係するが，自然含水比付近から多い含水量において顕著となるようである。

(2) こねかえした土の経時的な強度回復の割合は，こねかえしの程度に応じた大きさで見られる。しかし，ある限界以上のこねかえしをしたものにおいては，そのこねかえしの程度にあまり関係なく一定の強度回復性状を示す。

(3) 一度こねかえされて強度の低下した土が，こねかえしを受けない土の強度（密度を基準として比較）に達するまでには相当長期間（この試験では100日間でも達しなかった）を要する。

(4) 土の含水比の調整過程の相違（自然含水比のまゝのものと一度乾燥させた後再度自然含水比まで加水調整したもの）による強度ならびに変形係数の経時的な回復性状の差はなさそうである。

◎ 生石灰処理効果について

(1) 生石灰混合処理土における吸水反応過程を，含水比の変化，発熱温度変化強度変化などから総合的にみると，添加後数時間で極度に達し，1日以内にほとんど反応が終了するものと判断される。この過程は，土の当初の含水比条件，生石灰添加率の5%と10%の相違にあまり関係しない。

(2) 生石灰パイル法によるものは混合法によるものに比して吸水反応効率は悪く，7日間を過ぎてもいくらかの反応は継続しているものと考えられる。

しかし発熱温度変化は混合法と同じく１日以内で止んでいる。

(3) 生石灰パイル法によるものは含水比の多い条件の方が有効であり，パイル径が大きくて土との接触面積の大なるもの程有効である（生石灰添付率５％のパイル径は５cm，１０％のパイル径は７cmであり，この両者の比較で判断しているので添加率の多少が関係していることも考えられる）。

(4) 生石灰処理土の低減含水量はある程度計算で推定できる。

(5) 生石灰処理土を充分なエネルギーをもって締固めたものは，消石灰効果による強度の増大が期待できる。この効果が終了するまでには長時間を要するが，強度からみた大方の終了時点は１５日間位であると思われる。

6. あとがき

この試験によって得られた成果は現場に適用され，とくに生石灰パイル工法がパイル打込み機械の開発によって試みられた。即効性の点で混合法に劣るが，実際問題としてこの種の土に生石灰を混合することは難しく，従来生石灰処理効果はわかっていても方法がないままに実施される例が少なかったように思われる。交通開放後の現在まで宇都宮国道工事々務所とともに長期にわたる安定性を調査しているが，とくに密度，含水量の経時的な変化を重点に測定中である。

この試験は，永盛部長，伊勢田室長の指導のもとに，施工研究室神保技官，千葉工大生であった長谷川君，月成君の協力により実施されたものであるが，色々な面で宇都宮国道工事々務所の多大の助力を得ていることについてここに感謝致します。

施工研究室　　渡　部　　務
金　刺　敏　朗

矢板バイパス工事では，本試験結果などを参考にして生石灰混入率が5%と決定され，粘土の約3,200m^3の土量がパイル工法によって生石灰処理された。工事に際しては，現場試験も種々行なわれたが，その詳細が「瀬端，斎藤　：　生石灰を用いた路床土安定処理について，道路建設，昭和42年12月号」に報告されている。その他このようにして生石灰処理された盛土の密度，含水量の経時的変化とこの工法をとった場合の経費について，附録として参考に供した。

〔附　録〕

(A)　生石灰処理盛土の密度，含水量の経時変化

生石灰処理を行なった盛土の経時的な状態の変化を知るために，盛土施工後一定期間ごとに密度，含水量の測定を行なった。

なお，比較の意味をもって，測定対象とする盛土は生石灰処理盛土ならびにそれと同材料で無処理の盛土および異材料で無処理の盛土の表－1の3種とした。

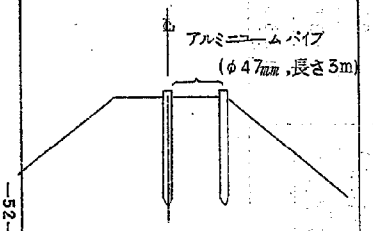
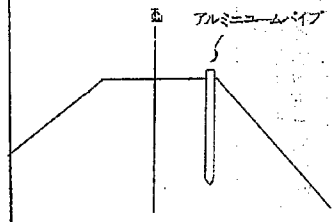
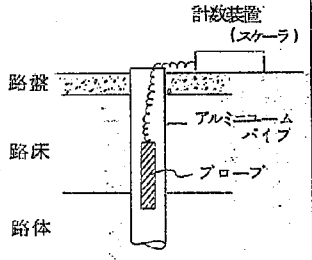
(1)　測定位置および方法

盛土における測定位置ならびに測定方法は表－2のとおりである。

表－1　調査盛土

盛土区分	土質分類	自然含水比(%)	突固め特性 最大乾燥密度(g/cm³)	突固め特性 最適含水比(%)	比重	コンシステンシー 液性限界(%)	コンシステンシー 塑性限界(%)	コンシステンシー 塑性指数(%)	生石灰処理の有無	盛土および舗装構成
A	粘土	42～59	1.508	26.4	2.641	37.9	29.3	8.6	有（土取地山にパイル打設） 50cm　生石灰パイル 15φcm　65cm ケーシング長さ 230cm 生石灰添加割合 5 %	舗装 400, 300, 200 路床 @200×5 路体 500 150 500 150 切込砕石 切込砂利 生石灰安定処理または切込砂利安定処理 掘削土 砂 掘削土 砂
	処理後（砂質ローム）	—	(1.396)	(31.5)	(2.712)	(54.1)	(42.9)	(11.2)		
B	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	無	〃
C	粘土質ローム	82～110	1.346	33.4	2.640	55.8	36.6	19.2	無	〃

表－2　測定位置および測定方法

測定位置	測定計器	測定方法	備考
 A．C 盛土共通  B盛土　（路肩2本）	γ線密度計（日立RMB型） 挿入型プローブ及びスケーラ 線源　Cs^{137} 10cm ○中性子水分計（日立RMB型） 挿入型プローブ及びスケーラ 線源　Am－Be　30cm	 上図に示した要領で路盤表面より，12.5cm間隔で深さ2.5mまでの$^{カウント}/_{min}$を往復計測した。	B盛土の測定位置については，盛土の中心部に切込砂利が多くパイプの打込みが出来なかったためである。

(2) 測定結果

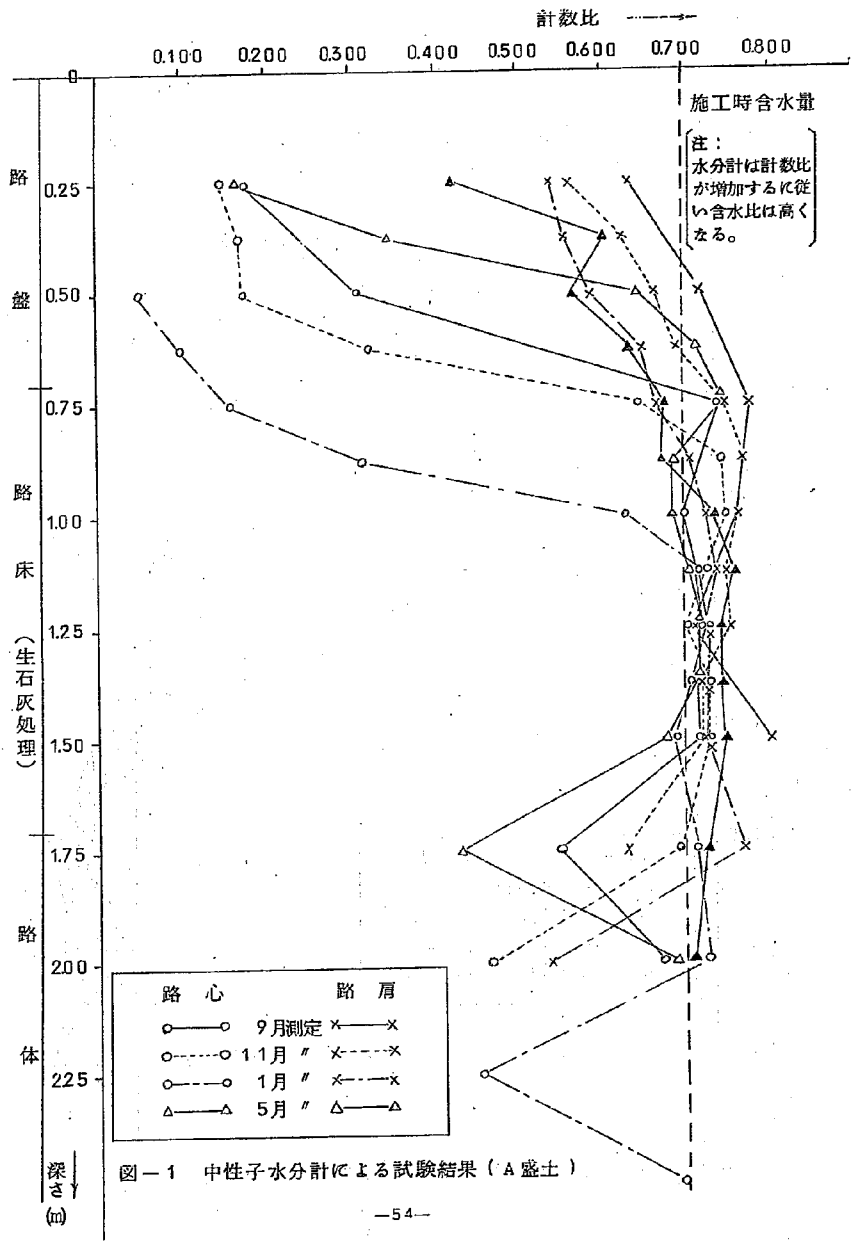
盛土施工後から交通開放となるまでに4回にわたって測定した結果を図－1～図－6に示す。この結果からは，いずれの盛土にもあまり大きな変化のないことがわかるが，生石灰処理盛土はとくに安定していることがみられる。測定は現在も継続しており，とくに交通開放後（昭和43年10月交通開放）の変化がどのようになるかを調査中である。

(3) 生石灰処理工法における経費

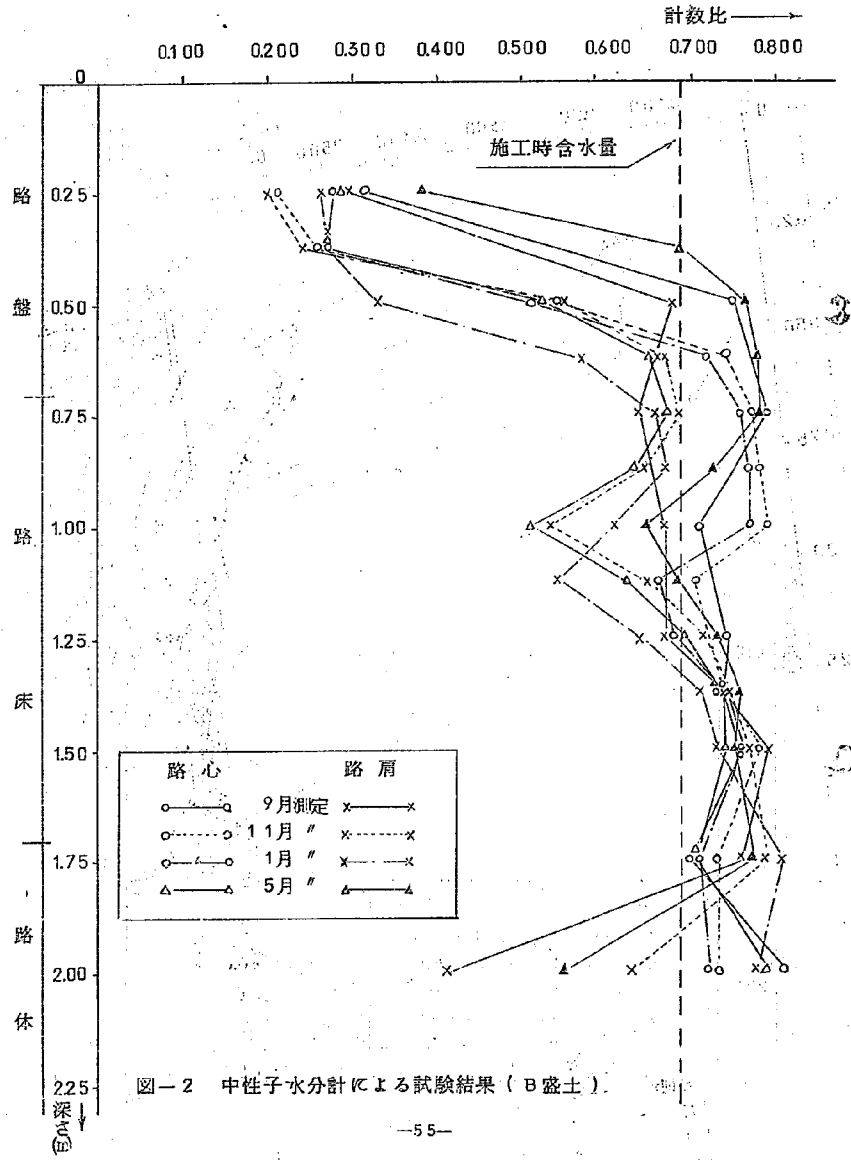
この処理工法における経費の概算を表－3に示す。

表－3　1.0 m^3当りの費用の概算

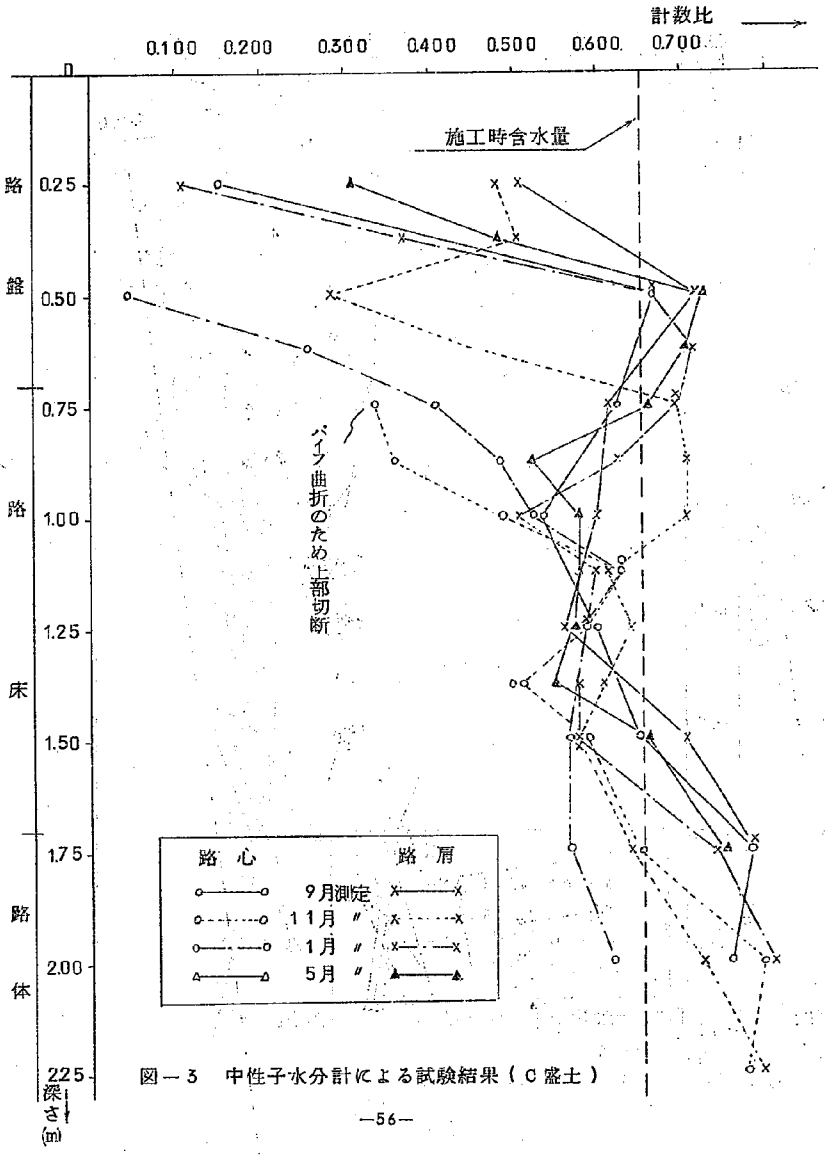
費　　目	単　価（円）
生石灰打込み（機械開発費，機械費含）	425
掘　削，混　合　（バックホウ）	165
運　　搬　（ダンプトラック）	145
敷均し，転圧（ブルドーザ，タイヤローラ）	90
生石灰（土の乾燥重量比の5％使用）	405
計	1.230



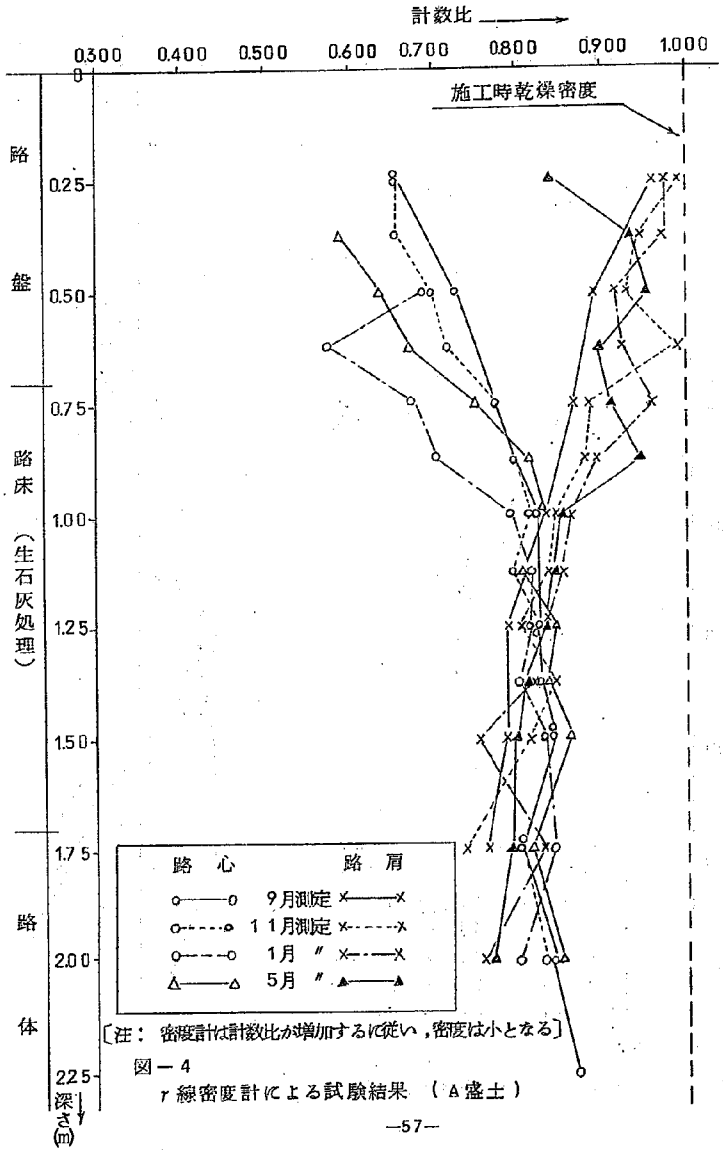
図－1　中性子水分計による試験結果（A盛土）



図—2　中性子水分計による試験結果（B盛土）



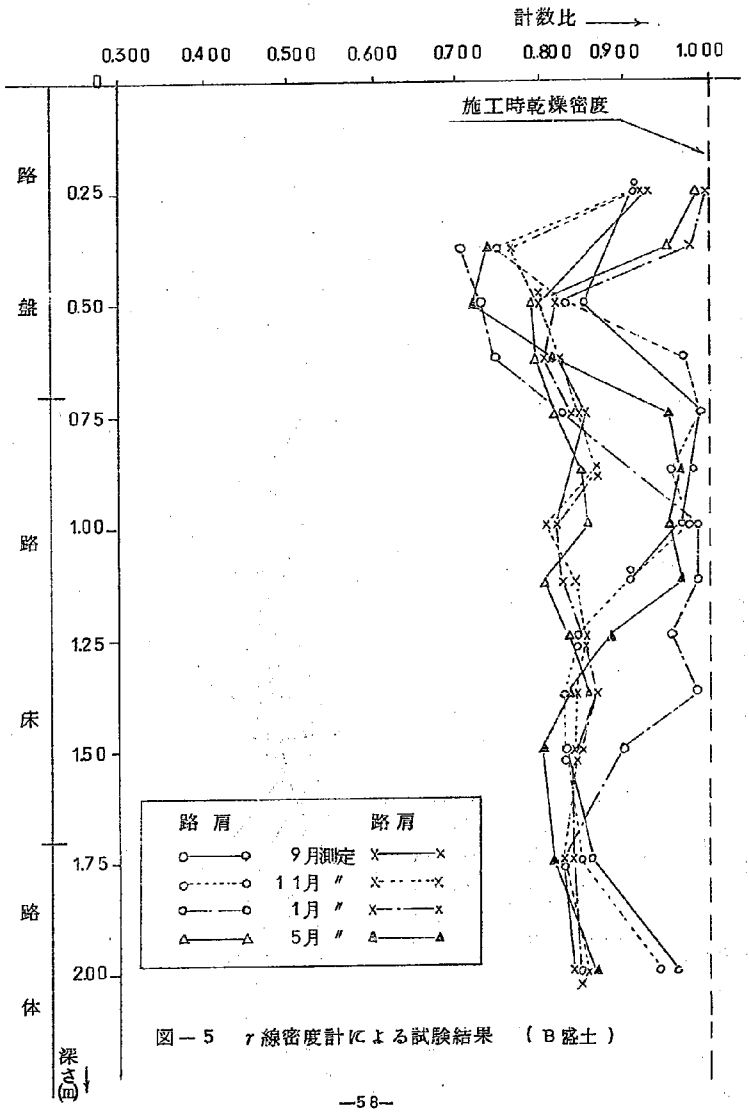
図—3　中性子水分計による試験結果（C盛土）



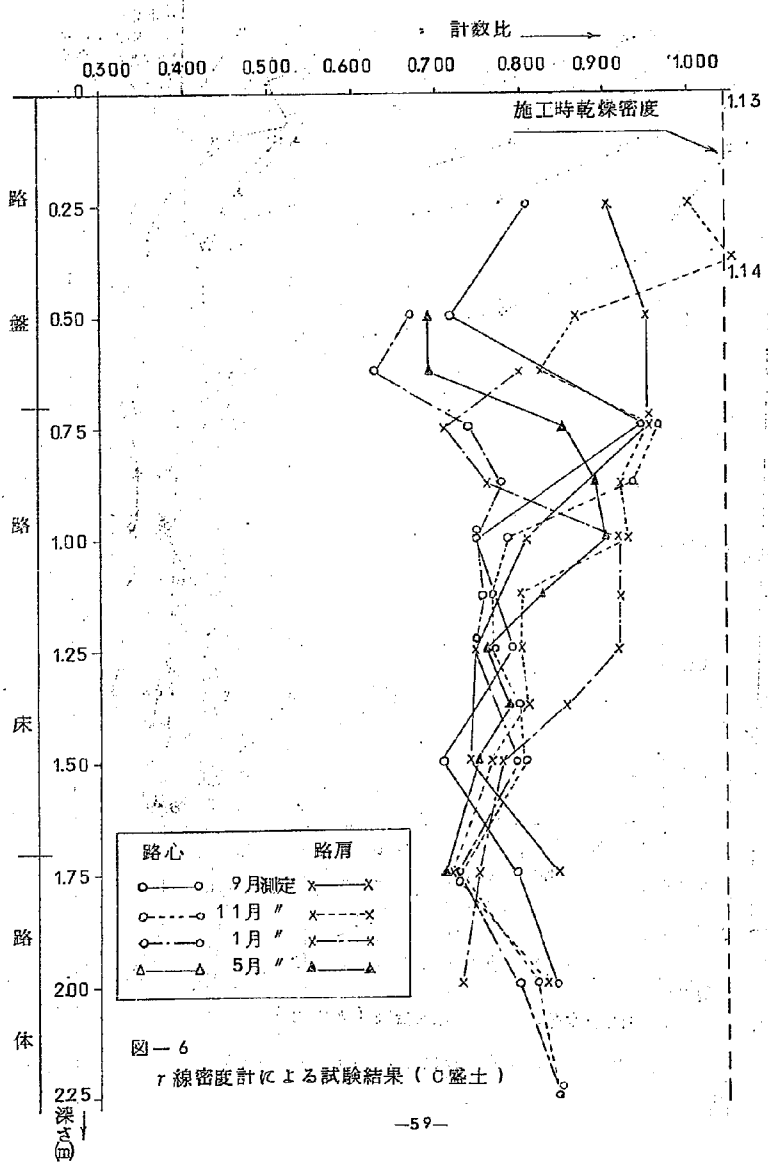
〔注：密度計は計数比が増加するに従い，密度は小となる〕

図－4

γ線密度計による試験結果（A盛土）



図－5　γ線密度計による試験結果　（B盛土）



図－6
γ線密度計による試験結果（C盛土）