

高含水比火山灰質粘性土における生石灰処理

——土の化学的改良に関する研究（第2報）——

喜 田 大 三
中 田 禮 嘉

概 要

関東ロームのような高含水比火山灰質粘性土における道路施工では、特に練返しによる施工機械のトラフィカビリティーの低下および良質で安価な路床材料の不足などが大きな問題となっている。

その解決法の1つとして、生石灰処理による化学的改良工法を検討した。室内試験の結果、生石灰処理は単に脱水効果やボゾラン効果ばかりでなく、土中水の性質すなわちエネルギー状態をも著しく改善する効果もあることが判明した。さらに二つの現場試験から生石灰処理は上述の問題解決の有効な一手段であることが確認できた。

1. はじめに

わが国の高速道路建設は機械化されてきたが、関東ロームのような高含水比火山灰質粘性土では、施工機械のトラフィカビリティーの確保が重要な問題となっている。すなわち、練り返しによって関東ロームは軟弱化する。そこで、その軟弱化によるトラフィカビリティーの低下を最小限に防ぐため、数々の施工法が考案されてきたが、最近、その1つとして生石灰処理工法が注目されるようになった。

さらに、近年、全国的に良質で安価な路床材料が不足し、大きな問題となっている。そこで、豊富に存在する関東ロームを生石灰で化学的に改良し、それを路床材料として使用できるのではないかと考えた。

そこで、本報では、関東ロームの生石灰処理工法を取上げ、簡単な室内試験および現場試験を行なった。

なお、生石灰処理工法に関しては、既に研究されている¹⁾。それによれば、生石灰による土質改良の直接的効果は次の2つであるといわれている。すなわち、生石灰が土中水と反応して消石灰に変化する際の脱水効果と、消石灰と粘土鉱物との化学反応による各種鉱物の生成（ボゾラン）効果である。

さらに、筆者らは生石灰に上記以外の効果もあると推察した。すなわち、生石灰にはその脱水作用後に残っている土中水のエネルギー状態をも改良する効果があると推察した。いかえれば、その効果とは、不安定な高いエネルギー状態の土中水を安定な低いエネルギー状態のものにすることである。

さらに、この事象を第1報²⁾で述べた土中水の化学ポテンシャル指数 pF で説明すれば、次のようになる。

pF は次式で表わされる。

$$pF = \log P, \quad P = \mu_0 - \mu$$

ここで μ_0 は規準状態にある純水の化学ポテンシャル、そして、 μ は対象となる土中水の化学ポテンシャルである。したがって、 P は規準状態に対する化学ポテンシャルの低下量となる。

上式で、 μ_0 は生石灰とは無関係に一定である。しかし、 μ は生石灰処理で小さくなるので、当然、 P として pF は大きくなる。そのため、土の力学強度も増大するであろうと推論した。

2. 立川ロームの生石灰処理に関する室内試験

2.1. はじめに

生石灰処理工法では転圧が重要であるといわれているので、立川ロームを用いて、処理時の転圧の効果を室内試験から検討した。

なお、高含水比火山灰質粘性土は非晶質粘土鉱物のアロフェンから大部分構成されている。したがって、関東ロームの1種である立川ロームもアロフェンに富む土であるから、ここに得られた結果は他の類似の火山灰土についても適用できると考えた。

2.2. 試験体の作成

立川ローム（当技研内で採取）に規定量の生石灰を混ぜ、1晩そのまま放置後、規定回数の突固めを行なって、試験体（ $\phi 150 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ ）を作成した。

その際、生石灰は小野田セメント製ケミコライム（ $< 10 \text{ mm}$ ）を使用し、その混合割合は乾土内割0, 15, 30%であった。また、突固めは JIS A 1211 に準じて行なった。そして、転圧と関連させるため、突固め量

を Proctor の式からエネルギー換算した。

$$\text{Proctor の式} \quad E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V}$$

ここで E_c は突固めエネルギー (kg/cm^2)、 W_R はランマーの重量 (kg)、 H はランマーの落下高 (cm)、 N_B は層当りの突固め回数、 N_L は層の数、そして V は突固めた試験体の体積 (cm^3) である。

2.3. 測定項目と方法

(1) 自然含水比 (w_n) : 常法による。

(2) pF 水分量 : コーン指数測定後、遠心分離法にて測定した。すなわち、試料に pF 値 3.5 および 4.2 に相当する遠心力をかけた後、その試料の含水比を求め、これを pF 非分離水量として表示する。そして、自然含水比から pF 非分離水量を差引いた水分量を pF 分離水量とする (第1報, 2を参照)。

(3) コーン指数 (q_c) : KODAN 101の3.3~3.6および4に準ずる。すなわち、電動式コーンペネトrometerをほぼ 1 cm/sec の速度で試験体に貫入させ、コーンの底面が試験体の上面から 2.5, 5.0 cm 貫入した時のプルービングリング値の平均で表示する。測定は1つの供試体について2回行なう。測定箇所は試験体上面の直径を三等分した2点である。

(4) 単位体積重量 (γ_d, γ_t) : 常法による。

(5) 飽和度 (S_r) : 常法による。

2.4. 結果と考察

図-1に、突固めエネルギーの変化にともなうコーン指数 q_c の変化を示した。なお、2.2に説明したように、転圧と関連して突固め回数を突固めエネルギーに換算したものである。

さて、同図において、当然のことながら、生石灰量が増すにつれて q_c 値は大きくなっている。ところで、

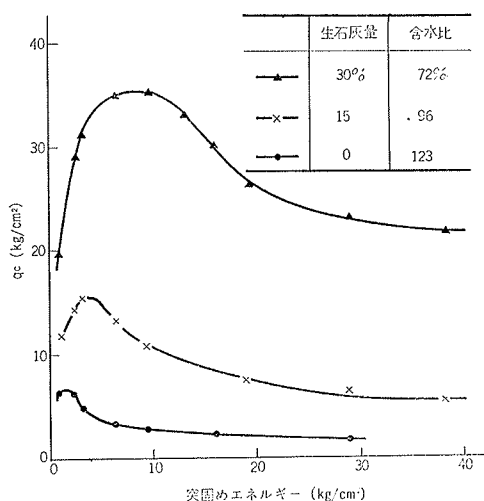


図-1 突固めエネルギーにともなうコーン指数 q_c の変化

生石灰処理のいかんにかかわらず、最大 q_c 値を得るのに最適の突固めエネルギーが存在し、この最適突固めエネルギーは生石灰量が増すほど大きくなることが認められた。いかえれば、生石灰処理時に転圧は重要であるといわれているけれども、過度の転圧はかえって土を軟弱化すること、また、生石灰量が多いほど、最大 q_c 値を得るのに大きな転圧力が必要であることを明らかにすることができた。もっとも、生石灰処理土では、より強いエネルギーで転圧しないと軟弱化しにくく、しかも、軟弱後の q_c 値は生石灰量が多いほどまさっている。

生石灰量が多いほど土を締固めるのに大きな転圧力を要することは、図-2に示す突固めエネルギーと飽和度 S_r との関係からもいえる。図-2において、生

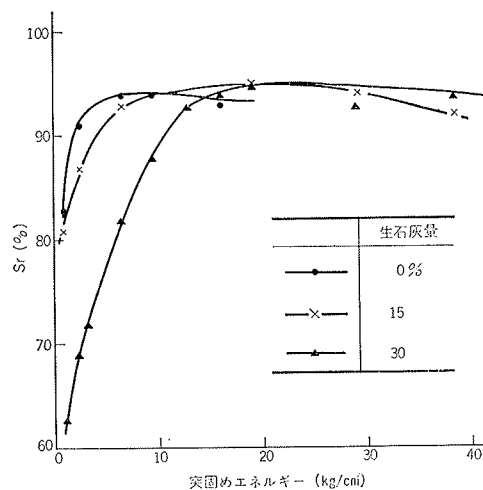


図-2 突固めエネルギーにともなう飽和度 S_r の変化

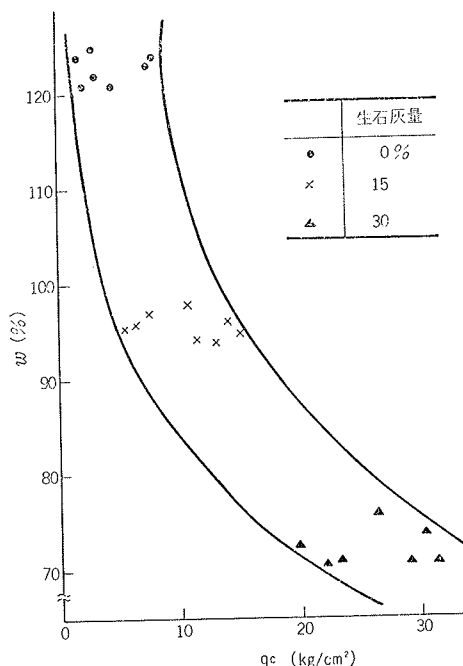


図-3 コーン指数 q_c と含水比 w との関係

石灰量が多くなると、 S_r が平衡に達するのに要する突固めエネルギーは大きくなっている。さらに注目すべきことに、図-1と図-2から、 S_r が平衡に達する直前に q_c 値は最大になることが判明した。

さて、生石灰処理にともなう土中水の量的、質的变化を検討する。

まず、コーン指数 q_c と自然含水比 w_n との関係を図-3に示した。同図に示したように、生石灰を混入することによって、 w_n は当然低下し、それによっても、 q_c 値は大きくなっている。

次に、pF 水分量の測定結果を表-1に示した。同表から明らかのように、生石灰量が多いほど pF 分離水量は減少した。このような pF 分離水量の減少が、前述のように、生石灰処理による q_c 値の増大ならびに最大 q_c 値を得るのに必要な突固めエネルギーの増加に、大いに関与していると推察される。また、表-1において、pF 分離水量および pF 分離水量/ w_n の比率が生石灰量15%と30%とで著しく違っていることは、図-1における q_c 値の大きな差と関係している

生石灰量		0%	15%	30%
自然含水比(%)		124	94	73
pF	分離水(%)	41	30	14
	非分離水(%)	83	64	59
4.2	分離水 自然含水比×100(%)	33	32	19
	分離水(%)	14	9	1
pF	非分離水(%)	110	85	72
	分離水 自然含水比×100(%)	11	10	1

(注) 試験体の突固めエネルギー(各処理共通) 1.19kg/cm²

表-1 生石灰処理による土中水の変化

と考えられる。以上のように、生石灰処理によって、土中水のエネルギー状態が工学的に好ましい方向に変化したと判断される。

2.5. まとめ

立川ロームを用い、特に、生石灰処理時の転圧効果について室内試験から検討した。その結果、次のことが判明した。

(1) 土の強度は突固めエネルギーを増すにつれて増大するが、過度の突固めによってかえって低下する。すなわち、土の最大強度を得るに最適の突固めエネルギーが存在する。

(2) 生石灰量が多いほど、土の最大強度は大きくなるが、同時により大きな最適突固めエネルギーを必要とする。

(3) 土の最大強度は飽和度 S_r が平衡になる直前に得られる。

(4) 生石灰処理によって土は軟弱化しにくくなるが、

軟弱化後の強度は生石灰量が多いほどまさっている。

(5) 生石灰量が多いほど、含水比は著しく減少するばかりでなく、土中水のエネルギー状態も工学的に好ましい方向に大きく変化する。

3. 愛鷹ロームの

生石灰処理(散布)工法の検討

—搬入路に関する現場試験—

3.1. はじめに

2章で述べたように、生石灰処理は高含水比火山灰質粘性土の強度を改良するのに有効である。そこで、当社が施工している東名高速道路愛鷹西工区において、搬入路に山砂利を使用する代りに、ロームの生石灰処理土が使えるかどうかを現場試験した。

その際、生石灰処理について、次のような項目を検討しなければならない。すなわち、(a) 原地盤の性質および状態、(b) 被処理土の土質、(c) 生石灰混入量、(d) 混入方式、(e) 転圧機種および回数、(f) 処理土の厚さ、(g) 天候、(h) 経済性など。

本試験ではこれらの項目を一応考慮して、特定の条件下において、愛鷹ロームを生石灰処理して作成した搬入路のトラフィカビリティーを検討した。あわせて、生石灰の効果、特に、土中水のエネルギー状態の改良効果について実証しようとした。

なお、愛鷹ロームは関東ロームの一種であり、愛鷹山麓に分布している。このロームは非晶質粘土鉱物アロフェンを主体にし、関東ロームのうちでもっとも自然含水比は高く(100~280%)、しかも、練り返しによってトラフィカビリティーの低下もきわめて大きいといわれている。

3.2. 試験の日程

現場試験は昭和42年2月2~8日の期間に実施した。表-2に作業および試験の日程を示し、期間中の天候も併記した。

月/日	天候	作業
2/2~2/29	雨	(雨量約70mm)
2/3	雨、曇	被処理土(地山)の γ_r, w_n 測定
2/4~2/8	晴	試験区作成(生石灰混合、バイブレーションローラー巻上げ)
2/4	"	平板繰返し積荷試験
2/5	"	走行試験(第1回)
2/6	"	試験区作成(前回の試験区を掘起しタイヤローラー転圧)
2/7	"	平板繰返し積荷試験
2/8	曇	走行試験(第2回)

表-2 現場試験の日程

3.3. 試験地および試験区規模

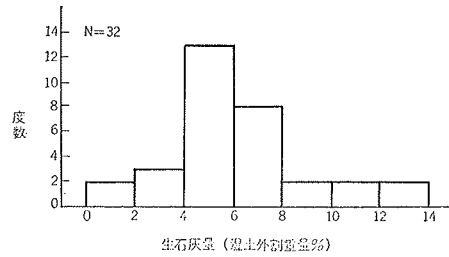
東名高速道路愛鷹西工区の STA. 567~568 の試験盛土内に図一4に示すような試験区を作成した。

なお、原地盤の地質はスコリア層（第1報、図一1参照）上部の有機質ローム（Walkley-Black法による測定では10.3%の有機物を含む）であり、その物理、力学的諸性質は次の通りである： w_n 198±11% ($\alpha=0.05$, 試料数18)； γ_t 0.40；Gs 2.85； q_c 測定 ($\alpha=0.05$, 測点17カ所) 深さ 0~10cm 3.6±0.6 kg/cm², 10~20cm 5.2±0.7, 20~30cm 7.5±1.1, 30~40cm 9.5±1.0。

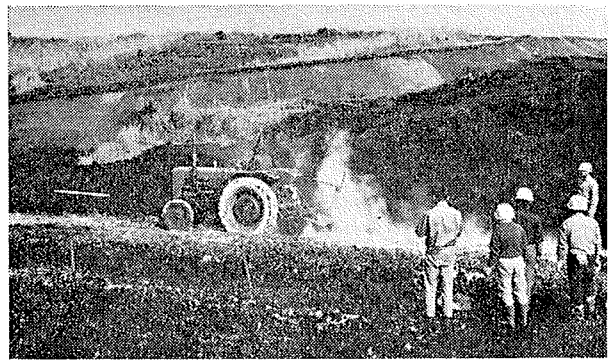
また、試験区作成前の原地盤の状況は次の通りである。盛土作業1月28日終了；転圧機種BD-11；1月28~30日に約70mm降雨。その際、2枚のビニールシート（各6m×30m）で試験区予定地を覆ったが排水は十分でなく、1月31日~2月2日の朝にはかなりの霜柱がたつた。そこで、試験区作成日（2月2日）の早朝、BD-11で霜柱を排除したが、その降雨による影響は無視できないと考える。

3.4. 試験区作成

(1) 生石灰処理区 試験地付近から掘削、運搬した愛鷹ローム（第1報、図一1中の下部層上に相当。鉍物組成は3.5.2に後述。）に、生石灰（小野田セメント製ケミコライム、<20mm）約6.3%（湿土外割）を混合した。図一5に生石灰の混合割合の分布を示した。

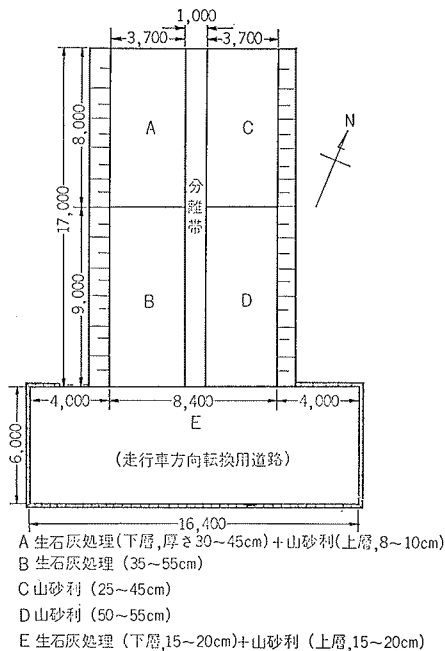


図一5 生石灰の混合割合の分布



図一6 生石灰の混合状況

白煙は生石灰が土中水と発熱反応して生じた湯気である



図一4 試験区規模

試験区作成の作業内容を表一3に示した。混合機械の混合能力から2層に分けて、それぞれ被処理土のま

作業	機種	備考
掘削	パワーショベル	
↓		
運搬	6tダンプ	積載量約2.8cm ³ /回、所要時間約10分/回
↓		
まき出し	バケットドーザー	まき出し量約2m ² /回、まき出し厚約30cm、所要時間約1分/回
↓		
生石灰運搬	(人夫)	所要時間約1.5分/袋
↓		
生石灰散布	(人夫)	
↓		
混合	農耕用トラクター(クボタ)	能力1,000m ² /hr以上、混合深度30cm以内、混合回数5回
↓		
掘削・運搬	上と同じ	
↓		
まき出し・生石灰	上と同じ	
↓		
運搬・散布	上と同じ	
↓		
混合	上と同じ	
↓		
転圧	バイブレーションローラー (Bomag, BW-75型)	ロール巾75cm、走行速度1.5km/hr、仮転圧(2回)、一晚放置後再混合し本転圧(3回)した
↓		
掘起し	湿地ブルドーザー	
↓		
転圧	タイヤローラー	10t、転圧20回

表一3 試験区作成の作業内容 (生石灰処理区)

まき出し	バケットドーザー ショベルドーザー	
↓		
転圧	バイブレーションローラー (Bomag, BW-75型)	仮転圧2回, 本転圧3回
↓		
掘起し	湿地ブルドーザー	
↓		
転圧	タイヤローラー	転圧回数10回

表一4 試験区作成の作業内容 (山砂利)

き出し、および生石灰の混合を行なった。図-6に生石灰の混合状況を示した。

(2) 山砂利区 静岡県安居山産の山砂利を使用した。試験区作成の作業内容を表-4に示した。

3.5. 測定項目

(1) 走行試験および力学試験と関連して、ワダチ沈下量、コーン指数(q_c)、自然含水比(w_n)、単位体積重量(γ_t, γ_d)、飽和度(S_r)などの測定および平板繰返し載荷試験を行なった。

(2) 土質化学試験に関連して、生石灰混入量、pF水分量、水素イオン濃度(pH)などの測定および鉱物分析(X線分析および示差熱分析)を行なった。

3.6. 試験結果と考察

3.6.1. 走行試験による転圧効果の確認 前章で述べた室内試験から、生石灰処理土が最大強度を得るのに最適の転圧力が存在することが判明した。したがって、生石灰処理土における転圧はトラフィカビリティーに大きく影響することが推定された。この転圧の効果を以下に述べる走行試験の結果からも確認した。

第1回の走行試験は、バイブレーションローラーで転圧(図-7)した搬路で行なった。しかし、それでは転圧は不十分であることが判明した。そこで再び、その搬路を掘起して、より大きな転圧力を有するタイヤローラーで転圧(図-8)した搬路について、第2回の走行試験を行なった。図-9に走行試験の状況を示した。

(1) 第1回の走行試験(バイブレーションローラー転圧の搬路)

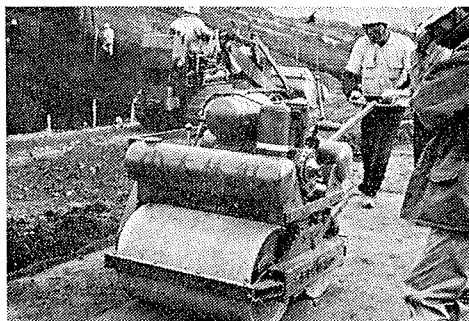


図-7 バイブレーションローラーによる転圧

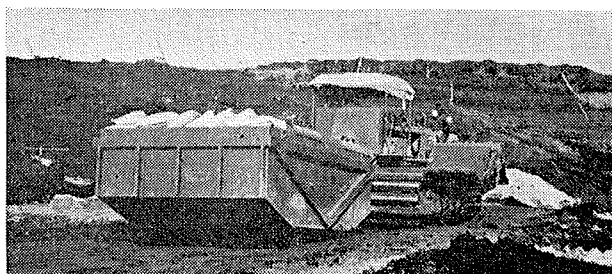


図-8 タイヤローラーによる転圧

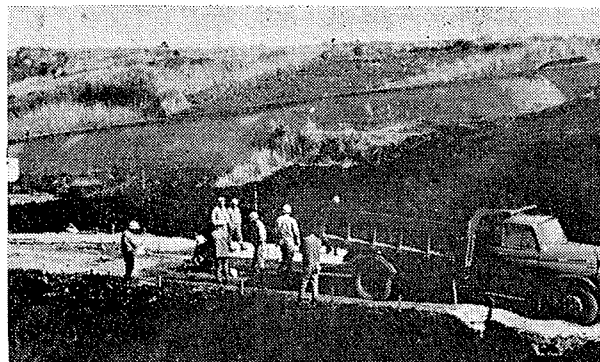


図-9 走行試験

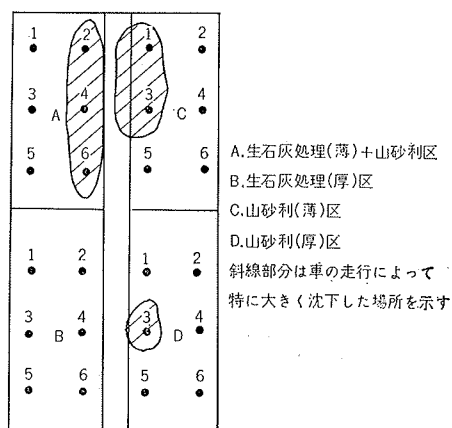


図-10 ワダチ沈下量の測点

測点	走行回数	走行回数						
		0	1	3	10	11	21	31
A	1	0.0 ⁰	0.4	1.2	—	—	—	—
	2	0.0	2.0	5.0	—	—	—	—
	3	0.0	1.1	2.3	—	—	—	—
	4	0.0	4.0	34.9	—	—	—	—
	5	0.0	1.0	3.6	—	—	—	—
	6	0.0	3.3	6.6	—	—	—	—
B	1	0.0	1.3	4.9	12.8	—	—	—
	2	0.0	2.8	6.1	11.8	—	—	—
	4	0.0	2.1	8.9	15.7	—	—	—
	4	0.0	2.6	7.3	10.7	—	—	—
	5	0.0	0.6	—	—	—	—	—
	6	0.0	2.8	—	—	—	—	—
C	1回で走行不能、ワダチ沈下量15cm以上							
D	1	0.0	—	—	—	3.1	5.1	7.6
	2	0.0	—	—	—	1.9	2.7	2.2
	3	0.0	—	—	—	5.0	12.9	18.2
	4	0.0	—	—	—	1.2	1.5	1.3
	5	0.0	—	—	—	—	—	—
	6	0.0	—	—	—	—	—	—

表-5 第1回走行試験のワダチ沈下量

走行回数	コーン指数(q_c (kg/cm ²)) ($\alpha=0.05$)			
	0~10cm	10~20	20~30	30~40
0回	12.7±2.7	12.3±0.9	12.6±3.2	8.7±0.5
1	13.3±1.2	13.5±1.4	11.3±2.0	8.2±0.8
3	13.3±0.6	15.0±1.8	13.2±0.9	10.4±1.7
10	11.9±2.3	15.7±2.7	13.2±1.5	9.8±0.5

(注) 転圧機種 バイブレーションローラー (Bomag, BW-75型)
 転圧回数 5回
 走行車 川西製6tダンプトラック、積載時の重量 10t
 空気圧 前輪4.9kg/cm² (70psi), 後輪5.6kg/cm² (80psi)

表-6 第1回走行試験時の走行にともなうコーン指数 q_c の変化 (B区)

走行によるワダチの沈下量は同一ワダチ上をダンプトラックに走行させ、図-10に示した地点での沈下量をレベル測量した。また、走行跡の q_c を測定した。

ワダチ沈下量および q_c の測定結果を、それぞれ表-5、表-6に示した。

走行できた回数は、A区では3回、B区では10回、C区では1回、そしてD区では31回であった。このように走行回数が少なかった原因は次のように考えられる。(a) 原地盤がきわめて悪いにもかかわらず、盛土厚は薄かったこと(たとえばA-2, 4, 6, C-1, 3, D-3の各地点)。(b) 後述するように転圧が不十分であったこと。

(2) 第2回の走行試験(タイヤローラー転圧の搬路)試験法は第1回の走行試験の場合と同じである。

ワダチ沈下量および q_c の測定結果をそれぞれ表-7、表-8に示した。

測点	走行回数	走行回数					
		0回	6	10	20	30	50
A	1	0.0cm	4.5	4.9	—	—	—
	2	0.0	7.5	13.7	—	—	—
	3	0.0	1.9	2.8	—	—	—
	4	0.0	3.6	6.0	—	—	—
	5	0.0	2.1	2.8	—	—	—
	6	0.0	6.4	10.1	—	—	—
B	1	0.0	4.4	5.8	8.9	13.8	—
	2	0.0	1.8	2.5	4.1	5.1	—
	3	0.0	2.8	3.7	5.7	7.8	—
	4	0.0	2.8	3.2	2.8	3.8	—
	5	0.0	6.9	8.9	8.0	15.0	—
	6	0.0	1.5	2.0	1.9	5.4	—
C	1回で走行不能						
D	1	0.0	—	—	1.2	1.9	1.5
	2	0.0	—	—	4.0	5.2	7.2
	3	0.0	—	—	1.5	2.4	3.0
	4	0.0	—	—	1.1	1.4	2.3
	5	0.0	—	—	1.8	2.2	2.5
	6	0.0	—	—	1.0	1.3	1.8
	7	0.0	—	—	2.7	3.1	13.7
	8	0.0	—	—	1.2	3.5	4.7

表-7 第2回走行試験のワダチ沈下量

走行回数	コーン指数 q_c (kg/cm ²) ($\alpha=0.05$)			
	0~10cm	10~20	20~30	30~40
0回	21.8±2.9	15.9±2.0	14.9±1.4	14.4±2.1
6	19.8±3.1	15.4±3.3	14.3±1.6	14.2±2.6
10	19.5±1.9	16.6±2.0	14.7±1.5	12.2±2.0
20	18.7±2.7	16.7±2.1	13.5±1.7	11.7±2.1
30	18.1±1.2	14.9±2.7	13.8±2.9	10.8±3.8

(注) 転圧機種 タイヤローラー(10t)
 転圧回数 20回
 走行車 第1回(表-6)と同じ

表-8 第2回走行試験時の走行にともなうコーン指数 q_c の変化 (B区)

生石灰処理(B)区では、走行回数が30回目でスリップしたため31回目以上の走行を取止めた。山砂利(D)区では50回以上も走行が可能であった。しかしながら、本試験でも原地盤の影響を強く受け、前回の

試験のときと同じところが大きく沈下した。

B区における q_c 値は走行回数が増大するにつれて減少する傾向があるが、その程度は統計的に有意なものではなかった。

以上の走行試験と同時に測定した γ_t , γ_d , S_r の値を図-11に示した。

同図から、それら測定値は転圧の程度に大きな影響を受けることが明らかである。すなわち、バイブレーションローラー転圧

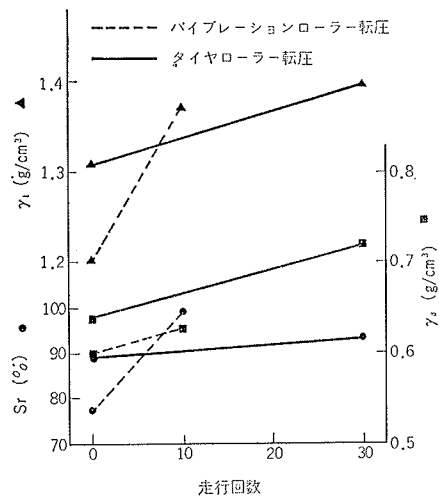


図-11 走行にともなう湿油密度 γ_t 、乾燥密度 γ_d 、飽和度 S_r の変化 (B区)

ションローラー転圧の搬路では、測定値は走行にともない大きく変化した。しかし、タイヤローラー転圧では、その変化はきわめて少しであった。前述の室内試験の結果(図-2)から、バイブレーションローラーの場合の転圧は不十分であり、一方、タイヤローラーの場合の転圧はほぼ十分であったと判断される。しかしながら、以上の結果から、両転圧機種の優劣を論議することができない。なぜなら、それら値は同じ条件の下で転圧された搬路における試験から得られたものでないからである。

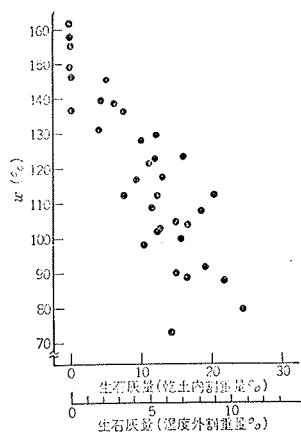
いずれにしても、生石灰処理は愛鷹ロームのトラフィックビリティを著しく改善することが判明した。その際、より大きなトラフィックビリティを得るためには、転圧が重要であり、飽和度が平衡になる直前まで転圧しなければならない。

なお、走行試験に先立ち、平板繰返し載荷試験を行なったが、原地盤の悪影響が出て、その結果を十分解析することができなかった。

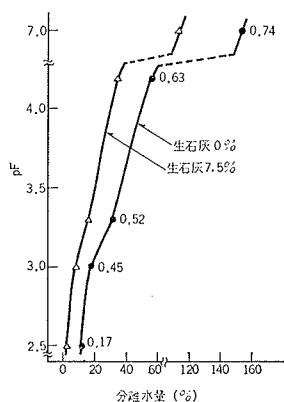
3.6.2. 土質化学試験による生石灰処理の効果の確認

前述した室内試験結果から明らかであるが、本試験においても、生石灰の混入により含水比は減少した。

すなわち、生石灰処理前の平均含水比(地山)は 154



図一12 生石灰処理による含水比 w の変化



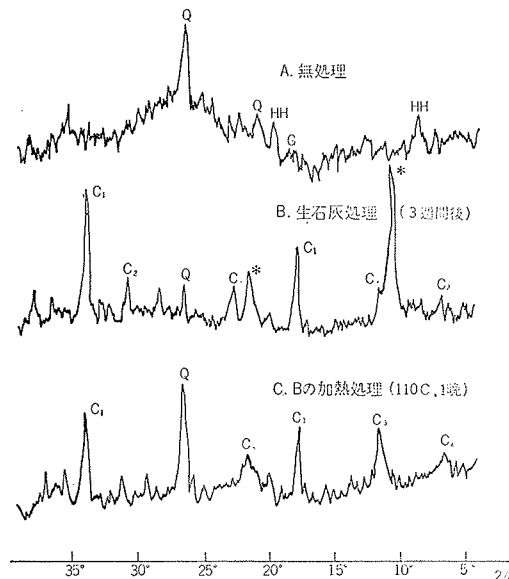
図一13 生石灰処理による pF 分離水量の変化の一例
(注) 図中の数字は各 pF における分離水量の比 (処理土/無処理土) を示す

%であったが、これに約6.3% (湿土外割重量) の生石灰を混合することにより、含水比は平均113%に低下した。しかしながら、実際には図一5に示したように、生石灰は均一に混合されていない。したがって、図一12に示したように、処理した搬路の含水比でも非常にバラツキがみられた。したがって、今回の試験における混合方法では不十分であることがわかり、今後、均一な混合が行なえるような方法を考案しなければならない。

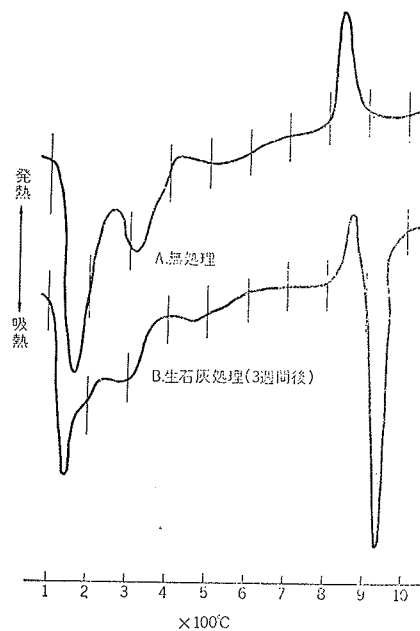
また、生石灰の混入によって土中水のエネルギー状態は著しく改善された。その1例を図一13に示した。同図から明らかのように、処理土の pF 分離水量は無処理土のそれに比べて著しく減少した。しかも、その場合、無処理土に対する生石灰処理土の分離水量の割合は、pF 値7 (含水比に相当) において0.74であるが、pF 値の低下につれてより一層小さくなっている。この事象は、1章で述べた推論、すなわち、生石灰処理によって低 pF の (高エネルギー状態の) 土中水が、高 pF の (低エネルギー状態の) 土中水に移行するという推論が妥当であることを実証するものである。要するに、生石灰処理は単に含水比を迅速に低下させるばかりでなく、土中水のエネルギー状態をも著しく改良するのである。

次に、生石灰処理にともなう鉱物組成の変化を、図一14の X線分析結果ならびに図一15の示差熱分析結果から説明する。

X線分析 (図一14, A) によれば、無処理土すなわち被処理土を構成する鉱物の大部分は非晶質の粘土鉱物アロフェンであり、一部分は 1:1 型結晶質粘土鉱物の加水ハロイサイトおよび造岩鉱物の石英であることが判明した。さらに示差熱分析 (図一15, A) によ



図一14 X線回折曲線 (愛鷹ローム生石灰処理)
Q: 石英, HH: 加水ハロイサイト, G: ギブサイト
C: 水酸化カルシウム, C₂: 加水ゲレーサイト, C₃: 炭酸化したアルミニウム酸カルシウム水和物, 水: 本文参照



図一15 示差熱分析曲線 (愛鷹ローム生石灰処理)

れば、ギブサイトも検出された。

一方、生石灰処理土では、処理3週間後に分析したのであるが、きわめて多種類の新しい鉱物が生成した。すなわち、X線分析 (図一14, B) によれば、加水ゲレーサイト ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)、アルミニウム酸カルシウム水和物の炭酸化したもの ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)、および $10.6^\circ (2\theta)$ 鉱物などが生成した。なお、加熱処理 (図一14, C) によって $10.6^\circ (2\theta)$ のピークを示す結晶

鉱物は消滅したので、結合力がきわめて弱い水分子を吸着したアルミン酸カルシウム水和物の一種であると推定した。示差熱分析(図一15, B)でも、新しく生成した鉱物の脱水による吸熱ピーク(180~480°C)および炭酸カルシウムを含む鉱物の分解による吸熱ピーク(930°C)が観察された。

これら生成鉱物はセメント鉱物と類似した性質を有し、そして処理土の力学強度を増大させると推察される。しかし、現在、処理土の力学強度と生成鉱物の種類あるいはその量との関係は未解決であり、今後の研究課題である。

3.6.3. 経済性の検討

各試験区は非常に小規模であるため、それぞれの試験区作成に要した諸経費を算出し比較することはあまり意味がない。

しかし、参考までに生石灰と山砂利の材料費を比較する。山砂利は当現場渡りで ¥1,200/m³ (当時の価格)である。一方、生石灰は当現場渡りで ¥5,600/t (当時の価格)であるので、湿土外割重量で5%混入すると ¥364/m³, 10%では ¥768/m³, そして15%では ¥1,092/m³ となる。

近年、砂利や碎石が不足してきている折、材料費だけに関していえば、生石灰処理は非常に有利である。しかしながら、生石灰処理にはその他の諸経費を必要とするので、今後さらに本工法を施工的に詳しく検討した上で、経済性を論議しなければならない。

3.7. まとめ

東名高速道路のうち当社が施工している愛鷹西工区において、工事用搬入路に愛鷹ロームの生石灰処理土が使えるかどうかを、現場試験から検討を行ない、次の結果を得た。

- (1) 生石灰処理は愛鷹ロームのトラフィカビリティを著しく改善することができた。
- (2) 処理時の転圧は特に重要であり、その転圧は飽和度(S_r)が平衡になる直前まで行なう必要があった。
- (3) 生石灰処理によって、含水比ばかりでなく土中水のエネルギー状態も、工学的に好ましい方向に大きく変化した。
- (4) 被処理土の主成分は非晶質粘土鉱物のアロフェンであるが、生石灰処理3週間後に鉱物分析すると、石灰と土との各種反応生成鉱物が検出された。
- (5) 経済的には、材料費に関する限り、同時に比較試験を行なった山砂利よりも、生石灰処理は有利であった。しかし、生石灰処理時のその他諸経費を今回の試験では検討することができなかった。

終りに、本試験に対して当社東名沼津工事々務所から多くの便宜を計っていただいた。また、日本道路公団ならびに小野田セメント(株)の関係者各位より有益な助言を賜った。記して謝意を表します。

4. 立川ロームの生石灰処理(散布)工法の検討

—下部路床材としての適否に関する現場試験—

4.1. はじめに

近年、良質で安価な路床材が入手しがたくなってきた。特に、関東平野を縦横断して建設される道路の場合、この問題は非常に深刻である。

そこで、豊富にある関東ロームに生石灰を混入し、関東ロームの工学的諸性質を改善した処理土が、下部路床材として使用できるかどうかを小規模な現場試験から検討した。

さて、路床材料に要求される性質は次のようである。³⁾

- 1) 舗装を通して受ける交通荷重を、大きい変形を起こさずに支持するに十分な強度をもつこと。
- 2) 舗装を均一に支持すること。
- 3) 長期にわたって安定していること。

本試験は、主として1), 3)を目的に行なったものである。

なお、長期にわたって良質な路面を維持するためには、当地域では冬季において凍結・融解が生じない材料でなければならない。そこで、試験は年間で一番寒い時期を選んで行なった。

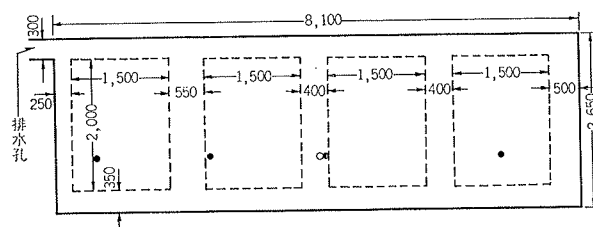
4.2. 試験法概要

(1) 試験区

当技研内の野外実験場で、図一16に示すような4試験区を作成した。

試験区作成の作業内容を表一9に示した。

被処理土は立川ロームである。その鉱物組成は、4.3.4に後述するように、非晶質粘土鉱物のアロフェン



図一16 試験区規模と配置図

● 地中最高最低温度計の位置 ○ 地表最高最低温度計の位置

を主体とする。さらに、被処理土の含水比 w_n は約120%, 単位体積重量 γ_d は 0.53 g/cm³, 比重 G_s は 2.75, 塑性指数 PI は 94% などである。

月日	作業	機種	備考
1月19日 (晴)	掘削	(人夫)	表土
	掘削	(人夫)	被処理土
	生石灰運搬 散布・混合	(人夫)	生石灰<10mm
	仮転圧	テニス用コンクリート・ローラー	5回転圧
1月20日 (晴)	再混合	(人夫)	
	本転圧	バイブレーションローラー	CVR406, ロール巾640mm 総圧力(線圧)通常9.4kg/cm 5回転圧
	測定器設置	—	地中最高低温度計(深さ20cm)

表一9 試験区作成の作業内容

生石灰処理は散布法で行なった。生石灰の混合割合は乾土内割で 0.0, 7.0, 11.0, および 16.0% であった。

また、各試験区ともバイブレーションローラーで 5 回ずつ転圧した。

(2) 試験項目およびその他

- (a) 気象観測 (天気, 気温, 湿度)
- (b) 試験区表面の観察
- (c) 地中, 地表温度 (最高・最低) の測定

(a)~(c) は原則として、毎日午前10時に測定、観察する。測定期間は昭和42年1月21日~4月6日である。

(d) コーン指数 q_c , 含水比 w_n の測定

測定は、各試験区を25に小分割し測定ごとにそれらの1つをランダムに選択して、原則として午前10時に行なった。 q_c の測定状況を図一17に示した。測定回数は1月中は2日に1回、2月中は週に2回、3月中は週に1回である。

(e) 鉱物組成の分析

随時、生石灰処理土をX線分析した。



図一17 コーン指数 (q_c) の測定

4.3. 試験結果と考察

4.3.1. 霜柱の観察 霜柱が生長するには、地中温度が 0°C 以上で水分を含み、しかも気温が 0°C 以下になることが必要である。また、関東ロームのように、土の粒度があまり均一でないことも必要である⁴⁾。

さて、試験期間中の最低温度は外気温では -10.0°C 、地表では -11.5°C であったが、地中では全期間を通じてどの試験区も 0°C 以下になることがなく、最低でも 2.2°C であった。したがって、気象から判断すると、各試験区とも霜柱が生長するのに適した条件におかれていたことになる。

事実、試験区作成の翌朝、無処理区では約 1 cm の霜柱を観察したが、処理区では全く観察しなかった。その後、無処理区に顕著な霜柱がたつにもかかわらず、処理区ではしばらくの間たななかった。しかし、処理土の表面が自然条件によって乱され、霜柱がたつようになった。その場合、生石灰量が多い区ほど霜柱の発生が遅れ、もっとも生石灰量が多い16%区で約1カ月後に霜柱を観察した。

このように、処理区では試験区作成後しばらくの間霜柱がたななかった理由として、次の二つが考えられる。

- 1) 生石灰処理によって土の粒度が変わる⁵⁾。
- 2) 土中水に石灰が溶け、土中水の凝固点が無処理のものよりも低くなる。

しかし、しばらくしてから、処理区で霜柱が発生するようになったのは次の理由によると推察される。

処理区は雨水、雪にさらされ、また、凍結・融解が徐々に進行した結果、特にその表面は荒され、土の構造破壊が起こり、土の粒度は再び元のようになる。さらに、土中の石灰が雨水や雪の融解水によって流失し、土中水の凝固点が上昇した。

以上の観察および考察結果から、生石灰処理土の構造が破壊し粒度が変化する、また、土中水中の石灰濃度が薄まることがない限り、霜柱はたないと判定される。

4.3.2. 含水比 w_n , コーン指数 q_c の経時的変化

各処理区における w_n および q_c の経時的変化をそれぞれ図一18, 図一19に示した。なお、この場合、各試験区において深さごとの測定値を平均している。さて、試験区は自然条件下におかれているために、これら測定値は変動するけれども、全期間にわたって、生石灰量が多い区ほど w_n は低く q_c 値が高い傾向が認められた。なお、生石灰量 (%) 0, 7, 11, 16の各区において、全期間の q_c 値 (kg/cm^2) を平均するとそれぞれ 9.3, 12.3, 15.4, 19.6 であった。

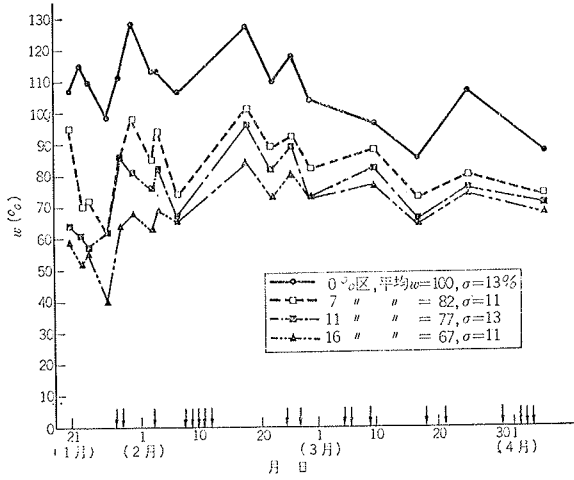


図-18 処理区における含水比 w の経時的変化
(注) 矢印は雨天, 積雪日を示す

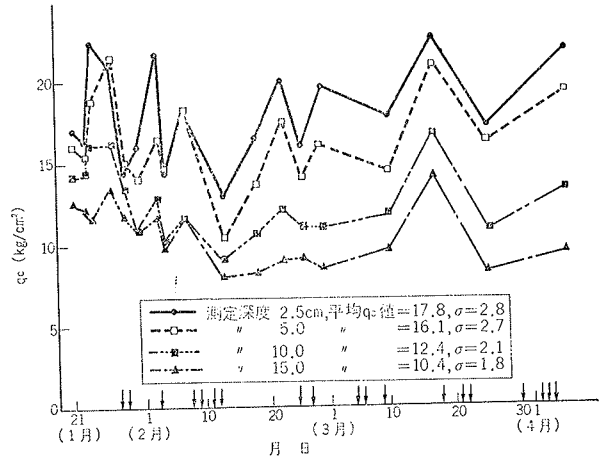


図-21 深度方向のコーン指数 q_c の経時的変化
(注) 矢印は雨天, 積雪日を示す

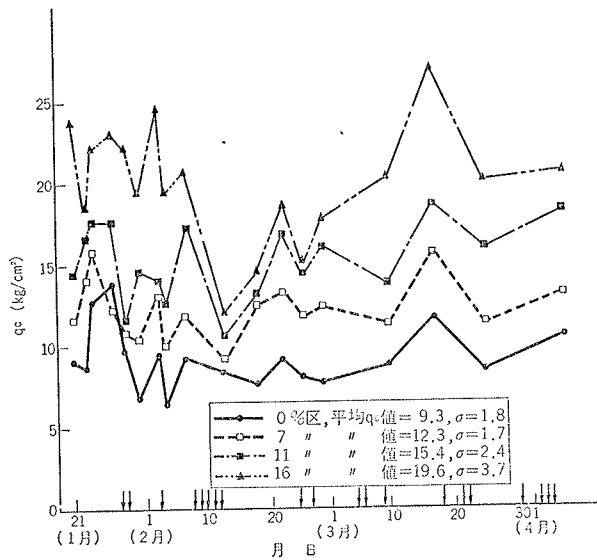


図-19 各処理区におけるコーン指数 q_c の経時的変化
(注) 矢印は雨天, 積雪日を示す

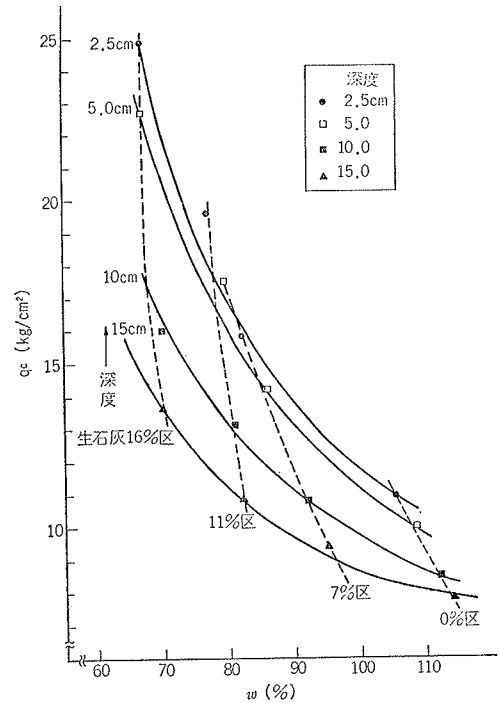
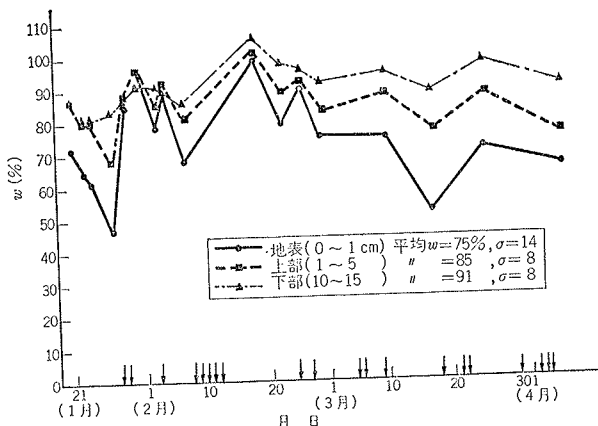


図-22 各処理区, 深度における含水比 w とコーン指数 q_c との関係



9-図-20

図-20 深度方向の含水比 w の経時的変化
(注) 矢印は雨天, 積雪日を示す

なお, 図示しなかったが, 各深さにおける w_n および q_c 値の変動は各処理区間で明瞭な差を認めることができなかった。そこで, 各処理区とは無関係に深度別に w_n および q_c の測定値を平均し, その経時的変化をそれぞれ図-20, 図-21に示した。いずれの図も表層ほど天候による影響を受けやすいことを示している。しかも, 全期間にわたって, 表層ほど w_n は低く q_c 値は大きい傾向が認められた。そして, 深度 (cm) 2.5, 5.0, 10, 15 において, 全期間の q_c 値 (kg/cm^2) を平均するとそれぞれ 17.8, 16.1, 12.4, 10.4 であった。

さらに、各処理区および深度別に、全調査期間の w_n および q_c の測定値をそれぞれ平均し、それらの関係を図-22に示した。同図において、生石灰量にともなう q_c 値の増大は表層において著しく、深層において著しくない。いかえれば、生石灰量が多い区ほど深度方向の q_c 値に大きな差がみられた。このような現象は、次のことを示唆している。

2章の室内試験の結果から、最大強度を得るためには、生石灰量が多い区ほどより一層大きな転圧力が必要であることがわかってきた。しかし、本現場試験では、都合上、各試験区とも同一の方法つまりバイブレーションローラーで5回転圧したが、3.6.1で前述したようにその転圧力は弱いので、生石灰量が多い区ほど転圧が不十分であった。したがって、生石灰量が多い区ほど、深度方向の q_c 値に大きな差がみられたのである。そこで、本試験区で深度方向の q_c 値の差を小さくするためには、生石灰量が多い区ほどより一層強力な転圧を行なわなければならない。

4.3.3. 材質試験 日本道路公団では、下部路床の材質を規定している⁶⁾。それによれば、塑性指数PI値は30%以下、水浸CBR値は5%以上となっている。

さて、本現場試験では、生石灰量0, 7, 11, 16%の各区において、PI値はそれぞれ94, 68, 57, 43%であり、また、水浸CBR値はそれぞれ2.8, 5.1, 6.0, 8.0%となっている⁷⁾。すなわち、PI値は上述の規定値に達していないが、CBR値は規定に達している。ただし、別に行なった室内試験の結果、生石灰量20%でPI値は規定に達することがわかった。

4.3.4. 鉱物組成の変化 冬季の自然条件下で、生石灰が土と反応して、鉱物組成が変化していく状況をX線分析で追跡し、次のことが判明した。

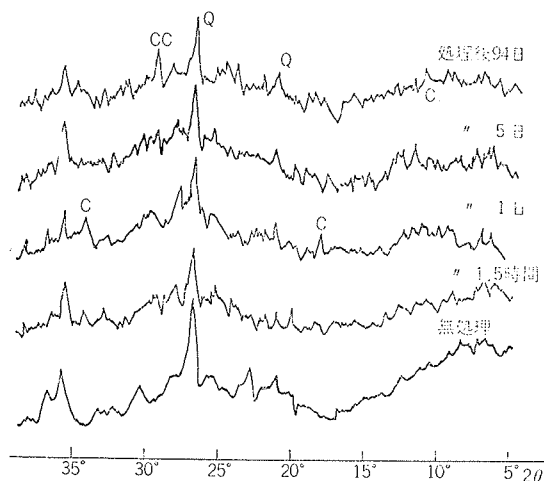


図-23 X線回折曲線(7%区)
Q:石英, C:水酸化カルシウム, CC:炭酸カルシウム
C₄:アルミン酸カルシウム水和物

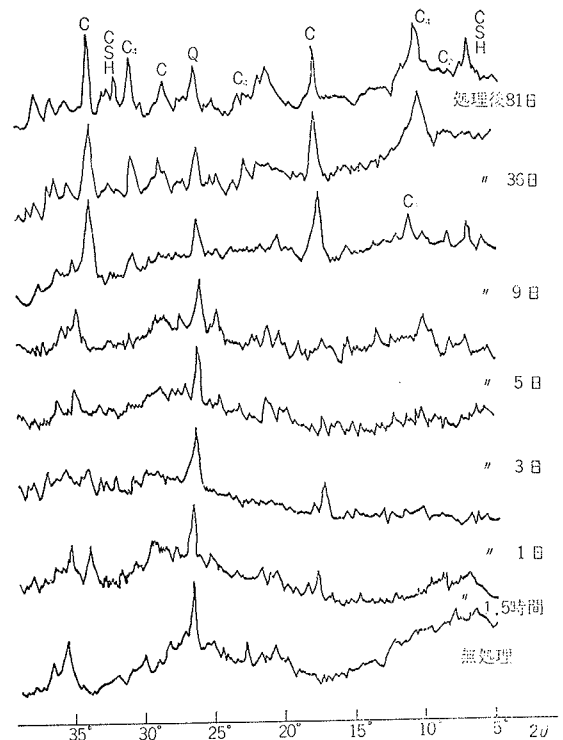


図-24 X線回折曲線(11%区)
Q:石英, C:水酸化カルシウム, C₂:加水ゲーレンナイト
C₃:炭酸化したアルミン酸カルシウム水和物, C₄:アルミン酸カルシウム水和物, CSH:ケイ酸カルシウム水和物

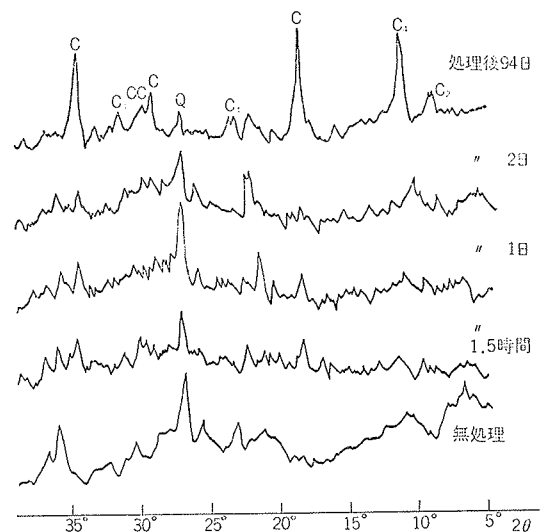


図-25 X線回折曲線(16%区)
Q:石英, C:水酸化カルシウム, CC:炭酸カルシウム
C₂:加水ゲーレンナイト, C₄:アルミン酸カルシウム水和物

被処理土の主要鉱物は非晶質粘土鉱物のアロフェンであるが、生石灰処理によって各種の鉱物が経時的に生成した。しかも、これら鉱物の生成状況が各処理区間で異なっており、生石灰量が多いほど鉱物は早くしかも多量に生成した。

すなわち、図-25に示すように16%区では、処理1.5時間後、すでに水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)やアルミン酸カルシウム水和物(α-4CaO・Al₂O₃・13

H₂O) が生成し、その量は日数が経過するにつれて多くなっている。そして、処理94日後では加水ゲーレンナイト (2CaO・SiO₂・Al₂O₃・8H₂O) の生成が認められた。図—24に示すように、11%区では、ゆっくりではあるけれども、16%区と同様な鉱物が生成していた。たとえば、アルミン酸カルシウム水和物は処理5日後に確認された。また、図—23に示すように、7%区では生成鉱物の種類は少なく、しかも、その生成はより一層ゆっくりしていた。たとえば、アルミン酸カルシウム水和物は処理94日後の分析で確認できた。

4.4. まとめ

下部路床材として立川ロームの生石灰処理土の適合性について、当技研の野外実験場で小規模な現場試験を行ない、検討した。

その結果、生石灰処理土は下部路床材として使用できることを、次の理由から結論した。

(1) 生石灰処理土が冬季長期にわたって自然条件に直接さらされない限り、霜柱はたたない。

(2) 生石灰処理土の強度 (q_e) は、自然条件下において、長期にわたって維持される。

(3) 主として、生石灰量を適切に管理すれば、水浸 CBR 値および PI 値は日本道路公団の規定に達する。

なお、施工と関連して、生石灰量が多くなるほど大きな転圧力を必要とすることを再び指摘した。

また、冬季の条件下で、生石灰と立川ロームとの反応を X線分析で追跡し、生石灰量が多いほど、その反応が早く進み、より多くの鉱物が生成することを確認した。

最後に、本試験は日本道路公団東京支社、東京川越工事々務所の依頼で行なったものである。本報文をここに発表させていただくことを許可されたことに感謝いたします。

5. おわりに

高含水比火山灰質粘性土の関東ローム地帯における道路施工では、特に、練返しによる施工機械のトラフイカビリティの低下および良質で安価な路床材料の不足などが大きな問題となっている。

この問題に対処するため、本報では生石灰処理工法を取上げ、関東ロームの立川および愛鷹ロームについて簡単な室内試験および現場試験を行ない、以下の結果を得た。

2章の室内試験では、立川ロームを用い、特に生石灰処理時の転圧効果について検討した。その結果、土の最大強度を得るためには生石灰量を増すほどより大

きな最適突固めエネルギーを必要とし、また、最大強度は飽和度 S_r が平衡に達する直前に得られることが判明した。さらに、生石灰量が多いほど土中水のエネルギー状態が改良されることを実証した。

3章では、工専用搬入路に愛鷹ロームの生石灰処理土が使えるかどうかを現場試験から検討した。その結果、生石灰処理によってトラフイカビリティは著しく改善されることがわかった。さらに、2章で判明した処理土における転圧の重要性ならびに土中水のエネルギー状態の改善を確認することができた。

4章では、下部路床材として立川ロームの処理土の適合性について現場試験から検討した。その結果、生石灰量および転圧などを適切に管理すれば、処理土を下部路床材として使用できることが判明した。あわせて、生石灰処理によって生成する鉱物について論議した。

参考文献

- 1) たとえば、石田：生石灰による土性改良試験について (中間報告)、第1回土質工学研究発表会講演集 (1966); 松田, 工藤, 土屋, 槻山, 綿貫: 関東ロームの生石灰による安定処理の可能性について、第1回土質工学研究発表会講演集 (1966); 稲田, 土肥, 小崎, 波木: 生石灰による土質および地盤の改良について、土と基礎, 15, (1967), 5
- 2) 喜田, 中田: 高含水比火山灰質粘性土における土中水エネルギー測定の意義——土の化学的改良に関する研究 (第1報) ——, 本所報, 149
- 3) 稲田, 土肥: 道路土工の調査から設計・施工まで、鹿島出版会, (1966)
- 4) 岩波理化学辞典 増訂版, (1965), 605
- 5) 岩田, 但馬, 小川: 石灰による関東ロームの安定処理, 日本道路公団試験所報告, (1965)
- 6) 日本道路公団: 高速自動車国道設計要領, (1967)
- 7) 日本道路公団東京支社, 梶谷調査工事(株): 東京川越道路 土質および路床材料試験報告書, (1967)