

生石灰による土質安定処理に関する研究 (第1報)

齋藤二郎

西林清茂

Studies of Cohesive Soil Stabilized with Quicklime

Jiro Saito

Kiyoshige Nishibayashi

Abstract

It has been known from the past that use of quicklime, is effective for stabilization of soil. In the application of quicklime, there are the "Mixture Method" of mixing it with soil and the "Quicklime Pile Method". The absorption of water, expansion, and the heating action from the chemical reaction between quicklime and water in the soil are utilized in the principles of soil stabilization in both methods. In the case of the Mixture Method, the chemical reaction between slaked lime and clay minerals add to these effects to produce even more effect. Actually, however, there are still many unclarified points of design and planning are often determined empirically or based on testing. This report consists of the following two studies:

- 1) Stabilization effect of mixing silt, clay and quicklime, a practice not often seen in the past.
- 2) Stabilization effect of the Quicklime Pile Method.

This Part 1 deals with the effects of improvement in mixing of quicklime and clay.

概 要

従来から生石灰を土質安定に使用する方法は効果あるものとして知られていたが、生石灰の適用方法には土との混合方式と生石灰パイル方式とがある。いずれも改良原理は生石灰と土中水との化学反応による吸水、膨張、発熱反応を利用したものであり、混合方式の場合にはこの効果に加えて、消石灰と粘土鉱物との化学反応も加担してより一層の改良効果を発揮する。しかし、実際には種々の不明の点が多く、設計や施工計画も経験あるいは試験によって決定することが多い。

この論文は次の2つの研究から成り、今回はその1として生石灰と粘性土の混合改良効果について述べる。

- 1) 従来あまり行なわれていなかったシルト・粘土と生石灰との混合による改良効果
- 2) 生石灰パイル工法の改良効果

1. まえがき

生石灰混合による土質改良に関しては過去いくつかの実施例がある。しかし、これらはいずれもローム、灰土などの火山灰土を対象としたものであって、シルト、粘土のように粒径の非常に小さい粘性土との混合については数少ない。その理由は粘性土の含水比が非常に高いことと、生石灰混合方法においても施工機械の面から制限を受けていたことによる。しかし、生石灰の効果を最大限に発揮させるには混合方式が最も効果的であり、又、混合機械についても研究開発され始めている。今回の研究は粘性土に対しても改良効果を発揮すると予備実験にもとづいて行なったもので、含水比 $W=80\sim 100\%$ の粘性土と生石灰混合における

(i)混合土の含水比、粒度組成を中心とした物理性状の変化

(ii)石灰と粘土鉱物との鉱物化学反応効果

(iii)混合土の強度特性の変化

を中心に実験的に研究したものである。

2. 実験方法

2.1. 粘土試料

使用した粘土は東京湾海成粘土である。この粘性土を砂含有率を変化させて、試料調整した。

No. 1 試料 含水比 $W=80\%$ 、砂含有量 30%

No. 2 試料 含水比 $W=100\%$ 、砂含有量 10%

両試料の物理性状を表一に示す。

2.2. 生石灰混合土の作成

使用した生石灰は2~5m/m 範囲の粒径のものである。生石灰と粘土試料を攪拌混合するとただちに化学反応が発生するので、混合時間をできるだけ短縮し(10~15秒)、ただちにモールドに詰めて荷重板を当て、混合土の膨張を拘束している。

試験項目	粘土試料 No. 1	粘土試料 No. 2
比重 Gs	2.559	2.709
単位体積重量 γ_t (g/cm ³)	1.63	1.46
平均含水比 W (%)	80.3	99.8
間ゲキ比 e	1.830	2.721
飽和度 Sr (%)	100.0	99.3
2~0.42mmの粒子百分率	2	1.54
0.42~0.075mmの粒子百分率	29	9.95
0.075~0.005mmのシルト百分率	45	62.51
0.005mm以下の粘土百分率	24	26.00
0.001mm以下のコロイド百分率	15.5	6.00
最大粒径 (mm)	0.95	0.84
60%粒径 D ₆₀ (mm)	0.054	0.012
30%粒径 D ₃₀ (%)	0.0079	0.0053
10%粒径 D ₁₀ (mm)	—	0.0024
均等係数 U _c (D ₆₀ /D ₁₀)	—	5

表一 粘土試料の物理性状

このような操作を行った理由は混合土の強度特性を求めるためで、物理特性のみの場合は拘束しなくても良い。生石灰の混合率は1, 3, 5, 10, 15, 20%の6通りであり、試験材令は、
No. 1 試料 1, 3, 7, 14, 21日
No. 2 試料 1, 3, 7, 14, 21, 28, 60日
である。

3. 混合土の物理特性変化

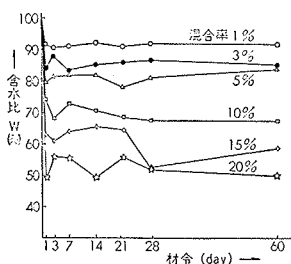
3.1. 混合土の含水比変化

混合土の含水比低下は材令1日目ではほぼ終了し、それ以後はあまり変化していない。このことは粒径5m/m程度の生石灰と間隙水との反応は非常に短時間で進行することを意味している。又、当然であるが、生石灰混合率の高いもの程含水比の低下割合は大である。生石灰混合率と含水比低下の関係を図一1に示す。No.2 試料の場合、1% 混合土でも8%, 20% 混合土では50%も低下している。

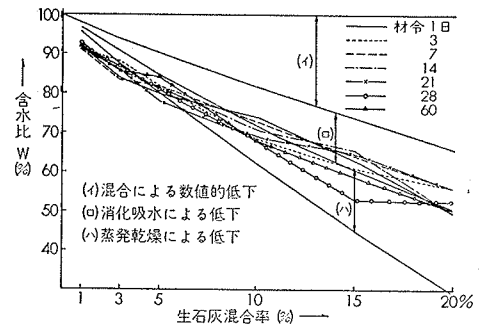
生石灰混合による含水比低下要因としては

- 1) 生石灰の消化吸水反応による低下
- 2) 生石灰の発熱による蒸発乾燥による低下
- 3) 生石灰混合による数値的低下

の3つが考えられる。上記の各含水比低下量は理論的に算出することができる。図一2は各混合土の含水比低下量の実測値と理論値の比較を試料 No.2 について



図一1 生石灰混合率と含水比の変化



図一2 含水比変化の実測値と理論値の比較

示したものである。この実験では混合土をモールドに充填した後、ビニールで完全密封した上、湿度90~100%の養生室に入れていたため、蒸発乾燥による含水比低下はわずかであったと予想したが、実測値は理論値より若干低下しているのみで平均的な値であった。試料 No. 1 の場合には自然放置したため蒸発乾燥の影響が大きくあらわれている。

生石灰混合による含水比低下要因のうち、混合による数値的低下が最も大きく、消化吸水による低下はその1/2程度である。又、蒸発乾燥による含水比低下は実際施工ではあまり期待できない。

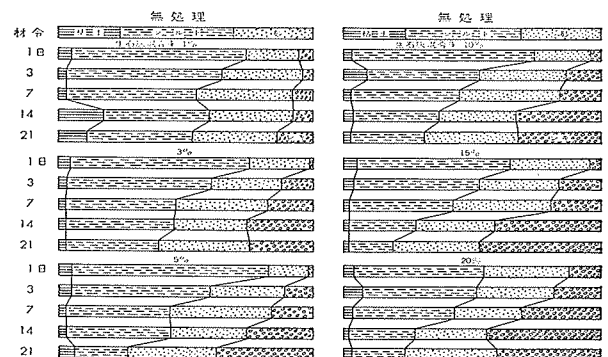
3.2. 混合土の粒度組成変化

生石灰を粘性土に混合すれば粒度組成が変化し、全体的に粒径は大の方向に移行する。この現象は消石灰と粘土鉱物との鉱物化学反応によって新しい反応生成物が生成されたり、物理化学的反応による団粒化作用によるものと推測される。

図一3は各生石灰混合率の材令に伴う粒度組成の変化を示したものである。この結果によると、

- (i) 生石灰混合率が高くなるにしたがって、粒径が大になる。
- (ii) 材令が長期になるにしたがって、粒径が大となる。

すなわち生石灰の混合によって混合土の粒径は全体



図一3 混合土の粒度組成変化 (No. 1 試料)

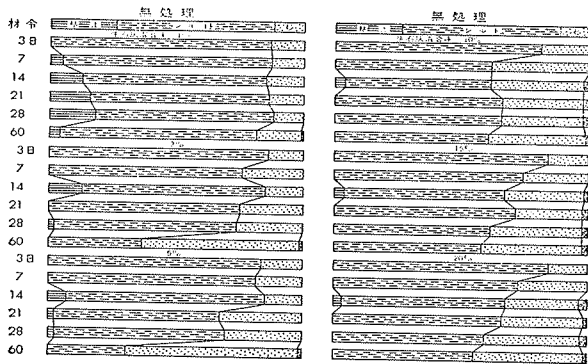


図-4 混合土の粒度組成変化(No. 2 試料)

的に大となる性質を示す。

しかし、その程度は対象とする粘性土によって効果
が変化する。No. 1 試料は砂分を30%程度含んでいる
が、各混合土は砂分の増加はもとより、当初は含まれ
ていなかったレキ分の発生とその増加が著しい。砂
とレキ分の合計は図-5 に示すように生石灰混合率の
増加にしたがって増大し、しかも材令によって著るし
く増大する。これらの増加はシルト分の減少によっ
ており、粘土分の変化は小さい。

図-6 は D_{60} , D_{10} の変化を示したものである。
まず、 D_{60} の変化を見れば、材令 7 日程度までは徐々
であるが、混合率の高い15%, 20%のものは材令 7 日
~14日、混合率 5%, 16%のものは材令14~21日にか
けて急激な増大を示す。しかし、粒径 D_{10} の値の変化
は D_{60} に比較すれば小さく、わずかの増加にとどまる。

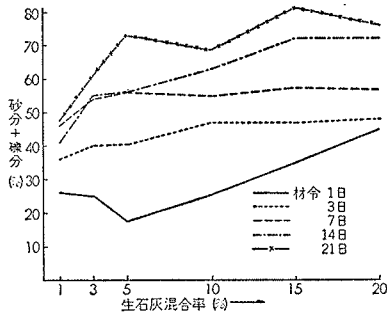


図-5 混合土の粒径74 μ 以上成分(No. 1 試料)

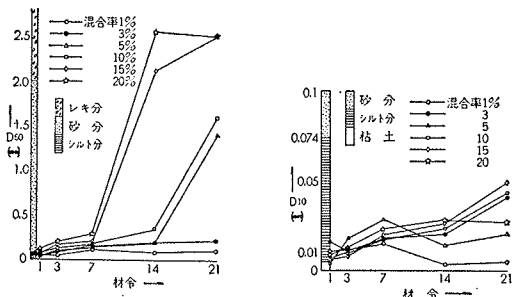


図-6 混合土の D_{60} , D_{10} の変化(No. 1 試料)

これは粘土分の変化が小さいことに起因する。 D_{60} お
よび D_{10} が上記のような性状を示すために、均等係数
 U_c の値も混合率の低いものは別としても全体的に大
きく増加する。このように砂分30%を含む試料 No. 1
の場合の粒度組成の変化は大きい、この原因は生石
灰と粘土鉱物との化学反応生成物の発生よりも団粒化
現象が大きく影響していると考えられる。このことは
以下に述べる砂分10%程度の粘性土に対する生石灰混
合土の粒度変化特性からも推測できる。ただし、この
団粒化も通常の粒度分析試験では十分破壊されること
のない強固なものである。

砂分10%を含む試料No. 2 の混合土の粒度組成は試
料No. 1 と同様に生石灰混合率、材令の増加につれて
全体的に粒径が大になる傾向を示す。しかし、その増
大の程度は試料No. 1 に比較するとはるかに小さく、
図-4 に見られるように、砂分が増加し、粘土分、シ
ルト分が減少する。しかし、レキ分の増加はわずかだ
である。図-7 は粒径74 μ (砂分) 以上の成分の組成変
化である。No. 1 試料と同様、粒径 D_{60} , D_{10} の変化を
図-8 に示す。この値を見ても、No. 1 試料ほどの変
化を示していないことがわかるが、それでも D_{60} の粒
径の増大は著しい。

4. 混合土の鉱物組成

生石灰を粘性土と混合させれば、さきに述べたよう
に消化吸水、発熱反応などの化学反応によって粘性土
の含水比を低下させ土質改良効果を発揮するとともに、

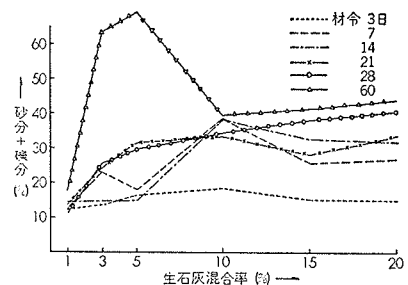


図-7 混合土の粒径74 μ 以上成分(No. 2 試料)

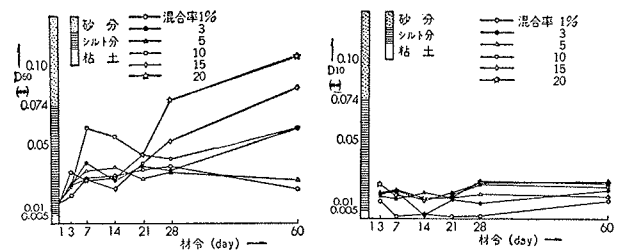


図-8 混合土の D_{60} , D_{10} の変化(No. 2 試料)

粒度組成変化に見られるように、生石灰反応後の消石灰と粘土鉱物との反応による新しい生成鉱物の存在が推測される。

図-9は No. 2 試料の無処理土と混合土のうち、材令7日、45日、77日のX線分析結果を示したものである。

その結果によると、No.2 試料は全体的に結晶性の高い粘土鉱物からなっており、粘土鉱物としてハロイサイト（少量）カオリナイトを、また二次鉱物として石英、長石を含んでいる。

この試料に混合率10%の生石灰を加えると、材令によって次のような新しい反応物が生成される。

(i) 材令7日目……粘土試料中に含まれる間隙水と生石灰とが反応して水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) の生成が認められる。

(ii) 材令45日目……粘土試料中の非晶質物質であるアルミナゲル、ケイ酸ゲル（ガラス質）と反応して生成する物質、アルミン酸カルシウム水和物 (C₄AH₁₃=4CaO·Al₂O₃·13H₂O) が認められる。また、空気中の炭酸ガスと反応して生成する炭酸カルシウム (CaCO₃) が認められる。

(iii) 材令77日目……この時点に達すると、生石灰処理土の強度発現の一因といわれている加水ゲーレンイト (C₂ASH₈=2CaO·Al₂O₃·SiO₂·8H₂O) が顕著に認められる。その他にも名称は明らかでないが新しい結晶物の生成が認められる。

以上のように、生石灰混合土は、材令の経過とともに、鉱物化学的反応を生じ、新しい反応生成物を造り出す。この現象が、生石灰の消化吸水反応が終了した後に徐々に発生し、混合土の粒度組成の変化および次に述べる強度特性に直接的な影響を与えているものと推測することができる。

5. 混合土の強度特性

混合土は含水比が低下し、しかも粒径大に移行する

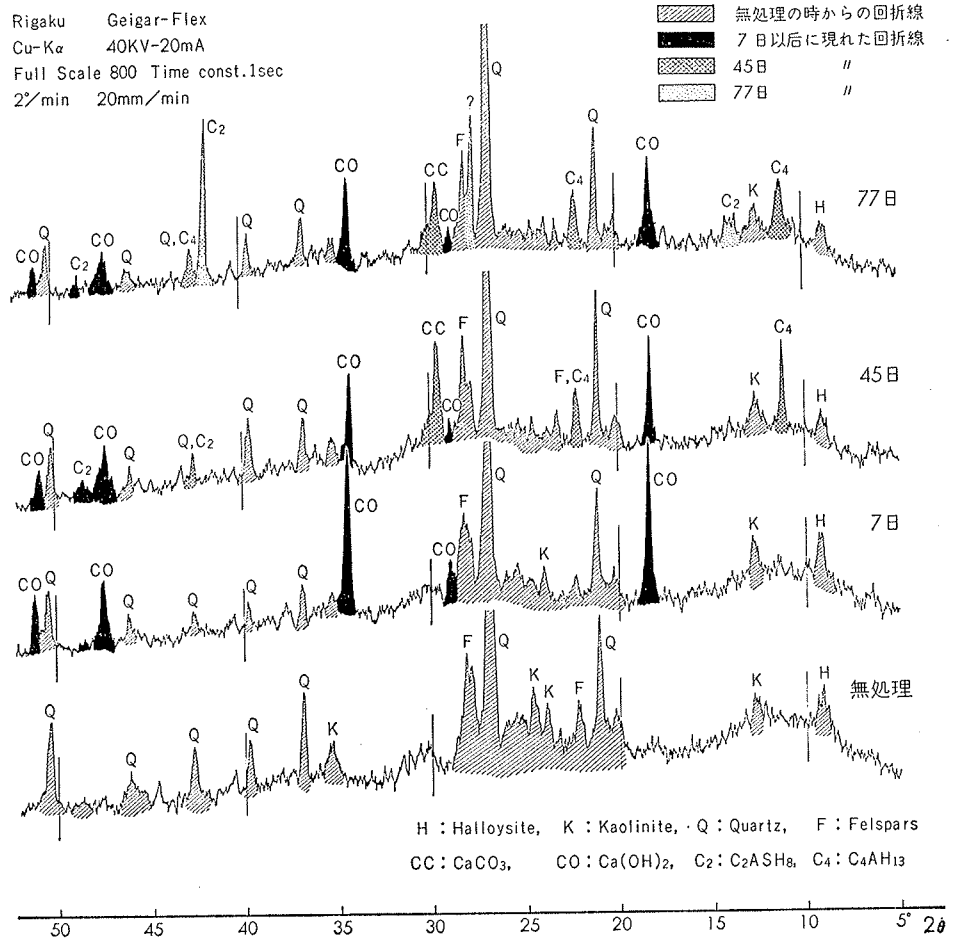


図-9 混合土のX線回折分析結果（材令変化……No. 2 試料）

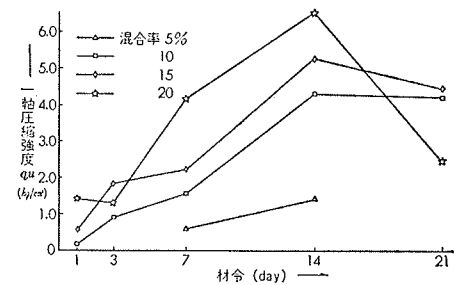


図-10 混合土の一軸圧縮強度変化 (No. 1 試料)

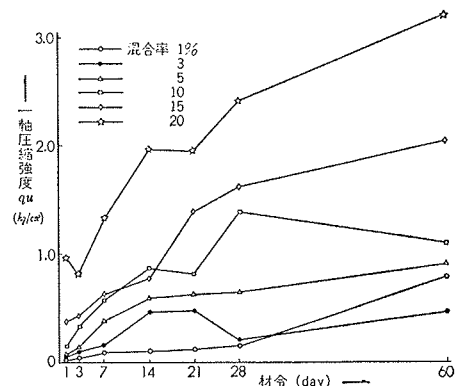
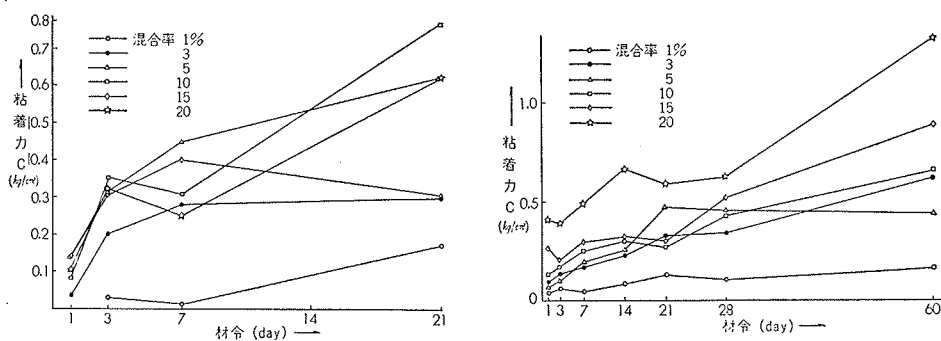
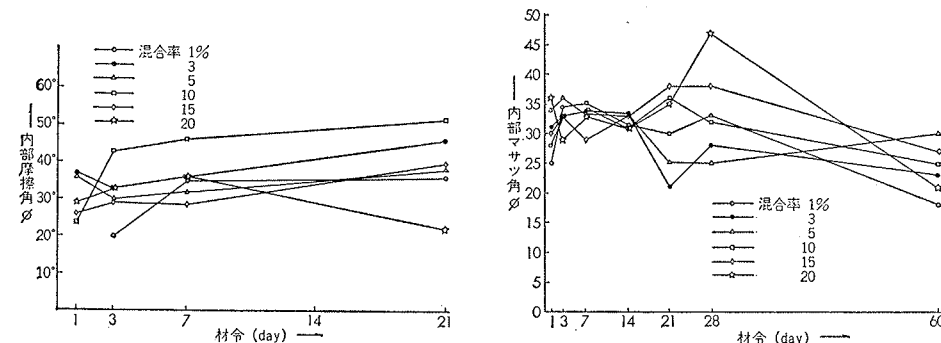


図-11 混合土の一軸圧縮強度変化 (No. 2 試料)



図一12 混合土の粘着力(材令変化)



図一13 混合土の内部マサツ角(材令変化)

粒度組成変化が発生するために、当然強度増加現象が発生する。

この強度増加程度を調べる方法としては、混合土の生石灰混合率および材令の長期化に伴って砂分以上の成分を多く含む砂質土の様相を示すので、粘性土の強度試験に用いる一軸圧縮試験だけでは不十分と考え、直接セン断試験も実施した。

一軸圧縮強度 q_u は、当初ほとんど0に近い値であったものが生石灰を混合することによって強度増加し、強度増加の程度は生石灰混合率の増加によることはもちろんのこと、材令による影響が大であり、砂分30%の試料No. 1では材令14日でピークに達し砂分10%の試料 No. 2では材令60日でも増大傾向を示す。

又、粘着力の変化も図一12に示すように同様の増加傾向であり、粘着力だけで見ると No. 1, 2 試料ともほぼ似かよった値を示す。

つぎに、混合土の粒度組成のうち砂分以上の成分が増加したことによって最も顕著な変化を示すと思われた内部マサツ角 ϕ は通常の粘性土では見られない大きな値を示し、しかも、生石灰混合後短時間(1~3日)でほとんどの混合土が $\phi=30^\circ$ に近い値を示した。し

かも3日以降の内部マサツ角の変化は小さく、No. 2 試料の場合は若干の低下をも示す。混合土の内部マサツ角が初期時点で急激に大となるのは生石灰が消化吸水反応して変化した消石灰になるところが大と思われる。すなわち、消石灰粉末(乾燥状態)の内部マサツ角は $\phi=44^\circ$ もあり、反応した直後ではまだ砂あるいはレキ状を呈しているため、混合土のセン断試験でもその影響が強く出ているものと思われる。しかし、この消石灰も間隙を水で満たされると粘性土の性状を示すことから、No. 2 試料の材令14~28日以降の内部マサツ角の低下も納得される。

この時点の粘着力は内部マサツ角とは逆に増加している。

以上のような混合土の強度増加特性は

- (i)生石灰の吸水反応による含水比低下
- (ii)生石灰の吸水膨張反応による間隙比の減少
- (iii)石灰と粘土鉱物との化学反応

によると考えられ、(i)の吸水反応は材令による含水比低下に見られるように初期材令で完了しているので、初期強度増加に貢献し、中間材令では吸水膨張反応と鉱物化学反応が、そして、長期的には鉱物化学反応が強度発現に寄与しているものと思われる。

6. あとがき

生石灰混合による土質安定効果はシルト、粘土などの粘性土にも十分効果あることが認められ、とくに粒度組成の改善については興味ある結果が得られた。現在、粘性土地盤への生石灰混合機械も開発研究されているので、将来、有効な粘性土地盤改良工法になることも考えられる。この実験研究にあたっては当技術研究所へ出向している横山基礎K. K. 内山氏の尽大なる協力を得たことを附記し感謝の意を表します。