

赤黄色土の安定処理に関する土質化学的研究

喜田大三
辻博和

Geochemical Research on Chemical Stabilization of Red-Yellow Soil

Daizo Kita
Hirokazu Tsuji

Abstract

Red-yellow soil belts were encountered at Kashuya in Fukuoka Prefecture during construction work for the Kyushu Expressway. This red-yellow soil was of no use for subgrade materials. The geochemical research reported herein was conducted to study the stabilizing effects of lime and cement and the mechanisms of the stabilizations with lime and cement. The following results were obtained:

- (1) The soil can be effectively stabilized with 7.5% caustic lime or 7.5% cement yielding about 20 kg/cm² unconfined compressive strength with specimens cured for 21 days.
- (2) In case of lime stabilization, the lime reacts chemically with active aluminum oxide in the soil forming new crystalline minerals resulting in permanent cementing action between soil particles.
- (3) In case of cement stabilization, the cement itself forms continuous matrixes in the soil resulting in permanent cementing of soil particles.

概 要

九州縦貫高速道路の建設に際し、福岡県粕屋工区付近に、赤黄色土が多量に産出した。この赤黄色土は自然含水比付近(約50%)では非常に軟弱のため、盛土材料として使用することは不可能であった。そこで、生石灰とセメントによる安定処理について室内実験を行ない、安定処理効果を検討し、さらに、その作用機構を土質化学的手法を用いて究明しようとした。その結果以下のことが判明した。(1)生石灰・セメント両処理とも7.5%添加によって、21日強度で約20 kg/cm²の一軸圧縮強度が得られ、安定処理効果はともに顕著である。(2)生石灰による強度増加は、生石灰の消化等による含水比の低下と、石灰と土中に含まれる活性な Al₂O₃ との反応の結果生成した新たな鉱物の土粒子相互の結合効果とによる。(3)セメント処理による強度増加は、セメントの水和等による含水比の低下と、セメントが固化する際のセメント自身の土粒子相互の結合効果とによる。

1. まえがき

九州縦貫高速道路の建設に際し、福岡県粕屋工区付近に赤黄色を呈した粘性土が多量に産出した。この赤黄色土は自然含水比付近(約50%)では、非常に軟弱のため、盛土材料として使用することは不可能であった。

赤黄色土は九州の火山灰をかぶっていない台地・丘陵・山岳地帯(筑後平野・山鹿から菊地にかけて熊本県内・長崎県内など)に広く分布しており、その一般の特長は、脱塩基、脱珪酸作用を受けた結果、粘土鉱物や鉄・アルミニウムの R₂O₃ の生成が顕著であることがあげられる¹⁾。

この赤黄色土を盛土材として用いるためには、生石灰あるいはセメントによる化学的安定処理を行なうこ

とが有効と予想されたので^{2),3)}、生石灰とセメントによる処理について室内実験を行ない、安定処理効果を検討し、さらに、両者の安定処理の作用機構には、当然差異があろうが、従来その作用機構については系統的な研究がほとんど行なわれていないので、その作用機構を土質化学的手法を用いて、究明しようとした。

2. 供試試料

供試試料の特長および物理的性質を表一に示す。試料の自然含水比は50%であり、自然状態では、コン指数が2~3 kg/cm²であり、非常に軟弱であった。試料のコンシステンシーについては、液性限界が85.2%、塑性限界が26.3%で、塑性指数は58.9であり、日本統一分類によれば、「CH」高塑性の粘土と判定された。試料の土質化学的性質について述べると、試料

土色		pH		活性酸化物			構成鉱物	
湿润土	風乾土	H ₂ O	KC _f	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	粘土鉱物	一次鉱物
2.5YR4/6	5YR6/8	5.1	4.1	12.1	2.3	0.2	メタハロイサイト	石英
赤褐色	橙色			%	%	%	パーミキュライト	ギブサイト ヘマタイト

比重	自然含水比	コンシステンシー				粒径分布				突固め	
		LL	PL	PI	Ac	2~0.2~0.02~0.002 μ				最適含水比	最大乾燥密度
2.81	50.0%	85.2%	26.3%	58.9%	1.02	0	14	28	58	37.6%	1.26 g/cm ³

表一 供試土の特長と物理的性質

は、脱塩基、脱珪酸作用を富に受けており、pHは5.0付近にあり雰囲気は強酸性である、さらに、R₂O₃の生成も顕著であり Fe₂O₃を12.1%、Al₂O₃を2.3%含んでいる、また、2 μ 以下の粘土も58%と多量に含んでいる。その主要粘土鉱物はメタハロイサイトであり、他に、パーミキュライトもわずかながら含んでいる。また、一次鉱物としては、石英・ギブサイト・ヘマタイトを含んでいる。

3. 安定処理効果の検討

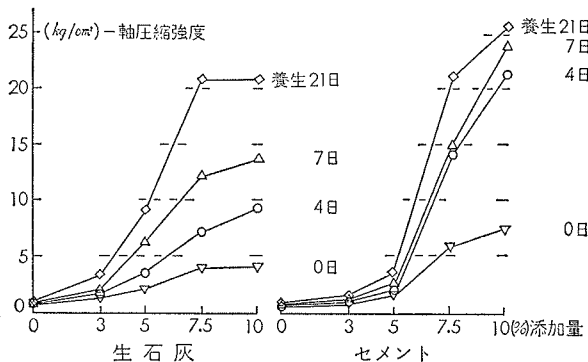
3.1. 実験項目と実験方法

自然含水比の土について、生石灰あるいはポルトランドセメントをそれぞれ3%・5%・7.5%・10%（乾土外割り重量）ビニール袋中で添加混合し、一晩そのまま放置後、モールド（ ϕ 50mm×H100mm）に1.15kgのランマーで3層25回突固め、供試体を作成した。供試体は、突固め後、室温20°C湿度80%の恒温室でモールドのまま養生し、突固め直後（0日後）、4日後・7日後・21日後の各試料について、モールドから脱型し、以下の実験に供した。

(1) 一軸圧縮強度 ヒズミ制御法で測定する。

(2) 含水比・コンシステンシー 一軸圧縮試験終了後、それぞれ JIS 方法にて測定する。

(3) 粒径分布 一軸圧縮試験終了後、2mm 以下



図一 生石灰セメント処理による一軸圧縮強度の変化

に砕き、音波処理15分、往復振とう30分後、分散剤としてカルゴンを添加し、ピペット法にて測定する。

3.2. 実験結果と考察

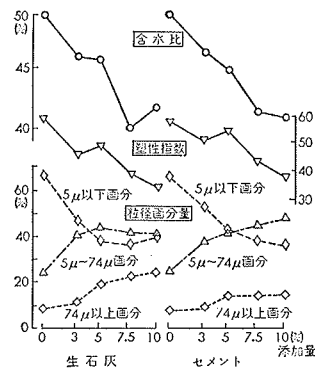
まず、生石灰あるいはセメントの添加量の変化に対する一軸圧縮強度の変化を図一に示す。

両処理とも、7.5%添加によって、21日強度で約20 kg/cm²の強度が得られ、安定処理効果が顕著に認められた。

しかし、生石灰処理とセメント処理による強度の発現状況を比較すると、両者は非常に異なっている。すなわち、生石灰処理については、添加量そして養生日数が増えるのに対応して、ほぼ比例的に強度増加がみられるのに対して、セメント処理では、上記の傾向が認められず、3%・5%添加では養生日数が増えても強度は余り上がらないにもかかわらず、7.5%添加によって養生4日後で、著しく強度増加している。しかも、その強度は生石灰7.5%添加養生4日後の強度と比較して2倍近い。

つぎに、含水比・コンシステンシー・粒径分布の変化について述べる。まず、測定結果を図二に示す。含水比については、両処理とも、生石灰の消化・セメントの水和等によって、添加量の増加にほぼ対応して低下している。コンシステンシーについても、同様に添加量の増加に対応して、液性限界が減少し、塑性限界が増大し、結果として、塑性指数が減少している。粒径分布については、両処理とも、添加量の増加に対応して、5 μ 以下画分が減少し、5 μ ~74 μ 画分が増加し、粒度組成の改良がなされているが、両処理の大きな違いとしては、生石灰処理によって74 μ 以上画分の増加量が、セメント処理と比較して大きいことがあげられる。このことは、生石灰処理による団粒形成効果がセメント処理の場合より大きいことを示している。以上のように、生石灰処理とセメント処理とでは、一

軸圧縮強度の発現状況あるいは粗粒分の増加状況に大きな差異が認められることから、当然のこととして、生石灰とセメントの作用機構は大きく異なっていると考えられる。



図二 処理土の物理的性質の変化（養生21日後）

4. 安定処理における作用機構の究明

4.1. 実験項目と実験方法

(1) 鉱物学的検討 X線分析 分析装置：島津製作所製の自記X線回折装置(GX-3B)型。測定条件：CuK α (Ni), 40KV, 20mA, 2°/mm。試料調整：一軸圧縮強度試験終了後、試料を風乾し、乳バチで十分粉碎したのち、定方位試料とする。示差熱分析 分析装置：島津製作所製の自記示差熱分析装置(DT-2A型)。測定条件：中性物質 α -Al₂O₃, 雰囲気大気中。試料調整：X線分析の場合と同様。電子顕微鏡観察 分析装置：日本電子製スーパースコープ(JEM-30B型)。測定条件：電子加速電圧30KV。試料調整：X線分析と同様に試料を調整したのち、薄い懸濁液を作成し、これをカーボン蒸着したコロジオン膜上にのせ、風乾後検鏡する。

(2) 活性酸化物の定量 自然含水比の土について、生石灰を5%・10%・20%（乾土外割り重量）ビニール袋中で添加混合し、そのまま養生し、養生7日後と21日後の試料について、Mehra-Jactsson法⁴⁾によって、活性酸化物を3回抽出する。抽出されたSiO₂とAl₂O₃について、それぞれ原子吸光光度計（島津製作所製AA-600型）で定量し、その含量をもって、活性なSiO₂とAl₂O₃の含有量とし無処理土の乾土当りに換算した。

(3) 形態観察 生石灰とセメントをそれぞれ添加した試料について、一軸圧縮試験用とは別に供試体を作成し、養生後、土塊をそのまま風乾し、突固め方向に垂直な面(H面)と平行な面(V面)とについて、走査型電子顕微鏡（島津製作所製SMU-3型）によって形態観察を行なう。

(4) 水中沈定容積の測定 容量100mlの栓付シリ

ンダーに風乾土を5gとり、生石灰とセメントをそれぞれ乾土外割り当り3%・5%・7.5%・10%・20%加え、蒸留水で100mlにし、1分間振とうしたのち、静置する。静置後、0日(直後)・4日・7日・21日養生し、ふたたび、1分間水平振とうし静置し、水中沈定容積を測定する。

4.2. 実験結果と考察

(1) 鉱物学的検討 まず、X線回折曲線を図-3に示す。無処理土では、粘土鉱物としてメタハロイサイトのピークが7.4Å・3.6Åに、パーミキュライトのピークが14.23Åに、さらに、一次鉱物として石英、ヘマタイトのピークがそれぞれ4.26Å・3.34Åと3.66Åに認められる。生石灰処理によって、上記のピーク以外に、アルミン酸カルシウムの水和物(CaO・Al₂O₃・10H₂O)のピークがわずかにあらわれ⁵⁾、石灰と土の含有成分とが反応し、新しい鉱物が生成していることを示唆している。しかし、セメント処理の場合には、新しいピークは見い出せない。

つぎに、示差熱曲線を図-4、図-5に示す。無処理土では、130°Cに吸着水の脱水、320°Cにギブサイトの分解、590°Cにハロイサイトのメタカオリンへの転移等による吸熱ピークがみられ、さらに、950°Cにメタカオリンの構造破壊による発熱ピークもみられる。

これに対して、生石灰処理の場合には、新しく生成されたと推定されるアルミン酸カルシウムの水和物の結晶水の脱水による吸熱ピークが220°Cと280°Cにみられ⁶⁾、このピークは、添加量が増えるのに対応して、より明確になっている。さらに、7.5%添加の場合について、養生日数ごとと比較すると、養生日数が増えるに従って、ピークは明瞭になってきている。ところが、セメント処理の場合には、X線分析の結果と同様

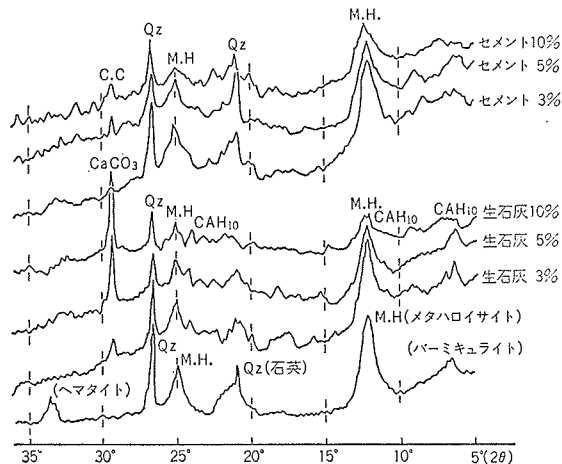


図-3 生石灰・セメント処理土のX線回折線(養生21日後)

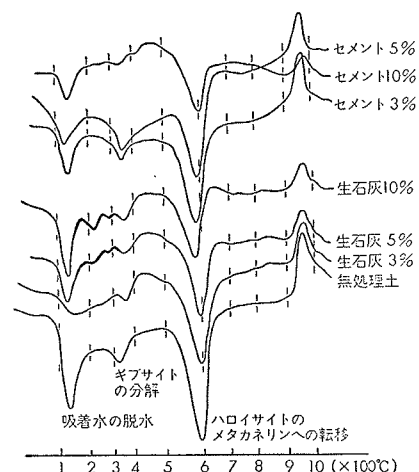
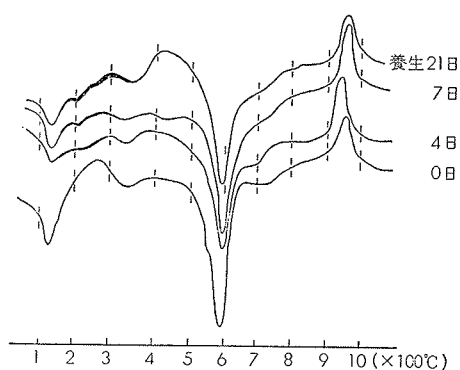


図-4 生石灰・セメント処理土の示差熱曲線(養生21日後)

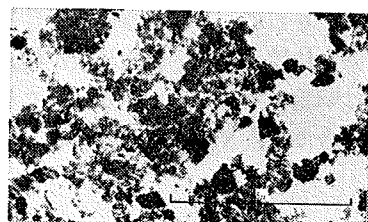


図一五 生石灰処理土の示差熱曲線 (生石灰7.5%添加)

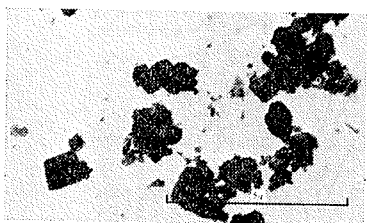
に、無処理土と比較して、明確な変化を認めることができない。

つぎに、新しく生成されたとと思われる鉱物の存在を確認するために、電子顕微鏡観察を行なったところ、生石灰処理において、その存在を明確に認めることができた、すなわち、無処理土(写真一1)に見られたメタハロイサイト等の不定形の細かい結晶が、添加量の増加に伴って減少し、新たに生成された角々しい形状をした鉱物が増加している。特に、10%添加の場合には、新生鉱物が大半を占めている(写真一2)。しかし、セメント処理の場合では、10%添加したものでも無処理に見られた不定形の細かい結晶が多数残存している(写真一3)。

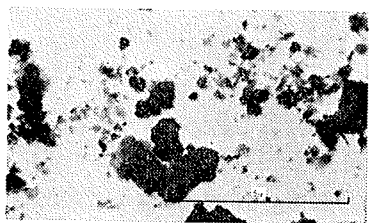
以上の鉱物学的検討の結果を総合すると、生石灰処理では、新しい鉱物(アルミン酸カルシウムの水和物)が生成されているのに対し、セメント処理では、新し



写真一1
無処理土の電子
顕微鏡写真
×4000



写真一2
生石灰処理土の電
子顕微鏡写真
×4000



写真一3
セメント処理土の
電子顕微鏡写真
×4000

い鉱物の生成が認められないことが明らかになった。

(2) 活性酸化物の定量 まず、定量結果を表一2に示す。活性な SiO_2 については、生石灰の添加そして養生日数が増えても、その含有量に変化がみられず、石灰と活性な SiO_2 はほとんど反応していないと推定される。これに対し、活性な Al_2O_3 については、無処理土で2.28%含んでいたものが、生石灰の添加量が5%・10%・20%と増えるのに対応して、そして養生日数が7日・21日と経過するのに対応して、その含有量が逐次減少し、生石灰を20%添加し21日養生したものでは1.51%と無処理における含有量の約6割にまで減少している。

現在、筆者らは石灰と反応するであろう土の含有成分のより一層正確な定量法を検討中であるが、以上のように、生石灰の添加によって、土の含有成分である活性な Al_2O_3 の含有量が減少していることと、先の(1)で判明した結果とから総合すると、生石灰処理においては、添加された石灰と土に含まれている活性な Al_2O_3 とが反応し、その結果新しい鉱物(アルミン酸カルシウムの水和物)が生成され、しかも、その生成量は石灰の添加量が増えるに従い、また養生日数が増えるに従って、増加していることが判明した。

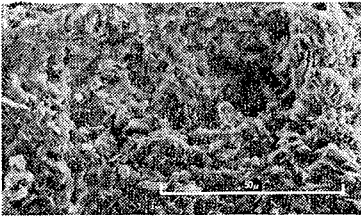
上記の新生鉱物の生成量の状況は、先の章で明らかになった生石灰の添加量、養生日数の変化に対する一軸圧縮強度の増加状況と対応していることから、生石灰処理による増加には、新たに生成した鉱物による土粒子相互の結合効果が大きく支配していると推定される。

活性酸化物	養生日数	生石灰添加量			
		0%(原土)	5%	10%	20%
Al_2O_3	7日	2.28	2.10	2.13	1.74
	21日	—	2.12	1.66	1.51
SiO_2	7日	0.19	0.13	0.12	0.14
	21日	—	0.12	0.12	0.13

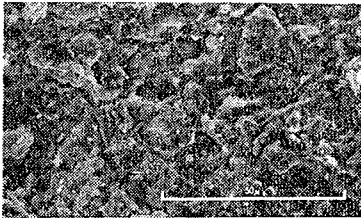
表一2 生石灰処理土中の活性酸化物量

(3) 形態観察 無処理土と生石灰・セメントを7.5%添加し21日養生後の処理土についての走査型電子顕微鏡写真を写真一4～写真一6に示す。生石灰処理土の形態はモヤモヤした広がりのある土粒子が幾重にも重なっている状態(写真一5)であり、無処理土における細かい土粒子が無規則に重なっている状態(写真一4)とはまったく異なっている。このことは先の(1)(2)から判明したことの妥当性を示している。

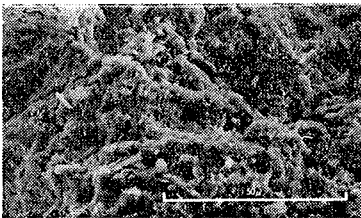
これに対して、セメント処理土の形態は無処理土と比較して変化が認められない(写真一6)。



写真一4
無処理土の走査型
電子顕微鏡写真
×400



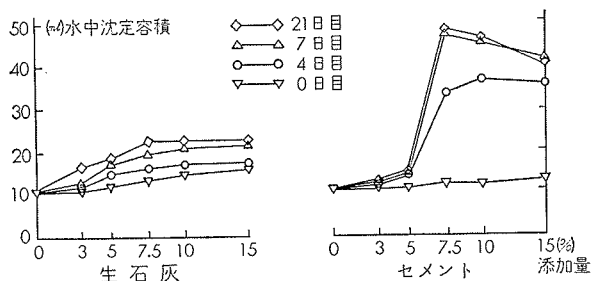
写真一5
生石灰処理土の走
査型電子顕微鏡写
真×400



写真一6
セメント処理土の
走査型電子顕微鏡
写真×400

(4) 水中沈定容積の測定 測定結果を図一6に示す。この水中沈定容積の変化は、図一1に示した一軸圧縮強度の変化と非常によく対応している。特に、セメント処理の場合に明瞭で、7.5%添加によって養生4日以後に著しい水中沈定容積の増加がみられ、このことは、一軸圧縮強度の変化とまったく一致している。この水中沈定容積の増加は、セメントを7.5%添加し養生4日したのち、はじめて、セメントが土粒子相互を結合する機能を持ち始め、土粒子の堆積構造をカードハウスの構造に到らしめた結果によるものと考えられる。

上記のことと先の(1)(3)の結果とから総合すると、セメント処理においては、生石灰処理にみられたような新しい鉱物の生成はみられず、その増加には、セメント自身による土粒子相互の結合効果が大きく支配しているものと推定される。



図一6 生石灰・セメント添加による水中沈定容積の変化

5. まとめ

九州縦貫高速道路の建設に際し、福岡県粕屋工区付近に、赤黄色土が多量に産出し、この赤黄色土は、非常に軟弱なため、盛土材として使用することは不可能であった。そこで、この赤黄色土を対象として、生石灰とセメントによる安定処理について室内実験を行ない、その作用機構を、土質化学的手法を用いて、究明し以下のことが判明した。

(1) 生石灰・セメント両処理とも7.5%添加によって、21日強度で約20 kg/cm²の一軸圧縮強度が得られ、安定処理効果がともに顕著に認められた。

(2) 生石灰処理による強度増加は、生石灰の消化等による含水比の低下と、石灰と土中に含まれる活性なAl₂O₃との反応の結果生成した新たな鉱物(アルミン酸カルシウムの水和物)の土粒子相互の結合効果とによることが判明した。

(3) セメント処理による強度増加は、セメントの水和による含水比の低下と、セメント自身の固化の際の土粒子相互の結合効果とによることが判明した。

なお、本報告で、赤黄色土の化学的安定処理について明らかになった生石灰あるいはセメントの作用機構は他の土質の土にも適用できると考えられる。

おわりに、本報告の一部は第8回土質工学研究発表会において発表したことを併記しておく。

参考文献

- 菅野一郎：日本の主要土壌型の生成分類学的研究 II 赤黄色土，九州農試彙報，7，187～306
- N. B. Schomarker and R. E. Aufnuth：Burma Soil-A Study of The Effect of Lime and Cement on Paddy and Laterite Material, Technical Report M-6, March (1971)
- 喜田大三他：灰土(九州)の土質化学的諸性質と石灰安定処理，粘土科学，Vol. 9, 22～40 (1969)
- O. P. Mehra and M. L., Jackson；Clay and Clay Minerals, 317～327 (1960)
- F. M. Lea and C. H. Desch；The Chemistry of Cement and Concrete, 609 (1956)
- S. J. Schneider；J. Am. Ceram. Soc. 42, 184, (1959)