

尾道層群粘土の石灰安定処理特性

松尾 新一郎*・富田 武満*・田辺 和康*

Lime-Stabilized Properties of Onomichi-Clay

Shin-ichiro MATSUO, Takemitsu TOMITA
and Kazuyasu TANABE

ABSTRACT

The lime stabilization tests were performed to investigate the effects of treating on the physico-chemical and strength characteristics of Onomichi clay subjected to lime addition. The trace of treatment effects were made clarify by X-ray diffraction, unconfined compression, consistency test, and etc.

The main results obtained are as follows; (1) The increase in strength of the clay for the lime stabilization treatments is attributed to the permanent cementing action between soil particles of the new crystalline minerals which are formed in consequence of the chemical reaction of the lime and activated Al_2O_3 and SiO_2 in the soil; (2) $CaCO_3$ has been little effect with regard to increments of the strength; (3) It was found that the optimum mixed ratio have been related to the consistency; (4) Unconfined compression test make used of a index of the treatment effects; (5) A change of integrated intensity for montmorillonite obtained by the X-ray diffraction test could relate ions exchange with pozzolanic reaction.

1. 諸 言

尾道層群粘土は、図-1に示すように尾道の北部から福山西部にかけて分布している山砂利層を一部含み、大部分が軟弱な粘土層である。礫質は広島花崗岩を基盤として、花崗斑岩、流紋岩、粘板岩、チャートなどからなっているが風化が激しくてこわれやすい。

この尾道層群粘土による被害は、大正14年と昭和51年の台風に伴う集中豪雨などの誘引によって地すべりや崩壊が発生し、県道、農道、田畑などに多大な被害を与えている。また附近には民家もあり危険度Aの指定を受けている。近年では宅地造成、道路工事、農地開発などによる土木事業や農業再整備事業などが山岳地へと発展することにより、土質条件の悪い地盤を避けることは不可能となってきた。この土は、湿潤状態では泥状化が起り、乾燥状態では固結度が高くリッパーの効かない非常に扱いに

くい土質である。

そこで、筆者らはこの尾道層群粘土の土質改良に石灰安定処理を行ない、その効果の発現度及び反応機構の解明に努めた。

石灰安定処理は1940年代から欧米などで使用され始め、わが国においては1962年より研究開発がなされてきた⁽¹⁾。石灰安定処理は対象土によって異なった反応特性を示すが、一般に知られている強度発生メカニズムについて簡単に述べてみると次の通りである。イオン交換作用 (Ca^{2+} が粘土表面に吸着) による凝集化、ポズラン反応 (粘土鉱物の Si^{4+} や Al^{3+} が Ca^{2+} と反応) による新しい化合物の形成、炭酸化作用 (石灰が空気中の CO_2 と反応) による固結作用などが土の性質を改良し強度発現に寄与するといわれている⁽²⁾⁽³⁾。

このような物理化学的性質を考慮した研究については、松尾・上村⁽⁴⁾、松尾・宋⁽⁵⁾ などによってポズラン反応生成物の追跡、石灰処理土の構造的研究がなされている。同様に、浅川⁽⁶⁾らはカオリン系粘土と

* 土木工学科

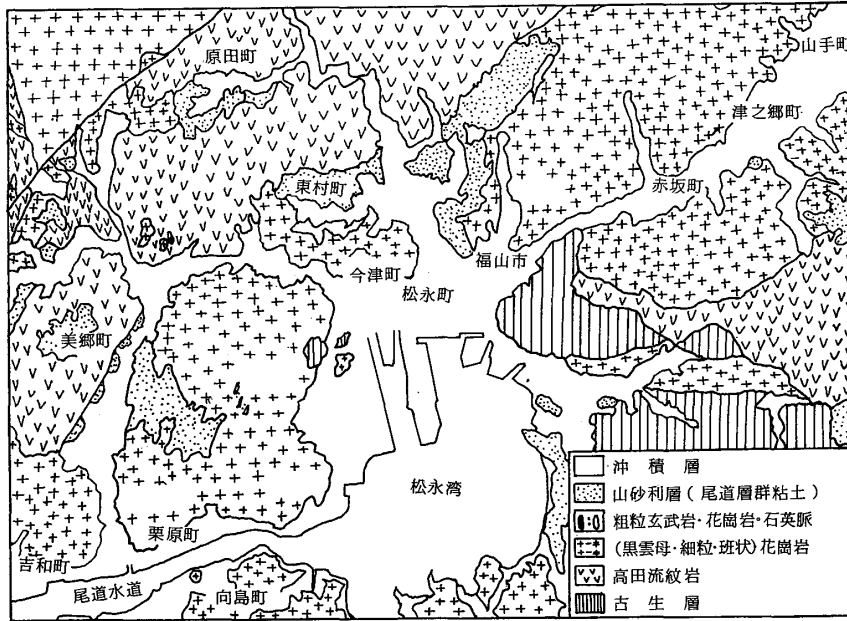


図-1 広島県東部の地質図

人工ポゾラン物質を対象にポゾラン反応と強度特性とを関連づけて検討している。また、Eades⁽⁷⁾らは天然粘土ではポゾラン反応生成物の同定が困難として標準粘土を用いて追跡を行なっている。その他、有泉⁽⁸⁾による石灰安定処理機構の解説がある。以上の研究論文は反応生成物をミクロ的に観察し、処理効果の判別を行なっている。反応生成物の同定法としてX線回折が一般に用いられているが、反応生成物の解析パターンが構成鉱物、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、および CaCO_3 などの回折線と重複するため、定量化するのは非常に困難である。

ポゾラン反応はコロイドシリカとコロイドアルミナと石灰との反応であることから、反応の進行に応じて粘土鉱物に影響を与えるものと考えられる。本研究では、粘土鉱物(モンモリロナイト)と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応に対して、養生日数と養生方法の影響ともなう変化を、X線回折法、原子吸光分析法によって明らかにした。また、工学的特性ではコンシステンシー試験と一軸圧縮試験により、土の性質と強度特性を求めて処理効果の追跡を行なうとともに、養生条件(温度、湿度、水分保持)が反応に及ぼす影響についても解明する。

2. 尾道層群粘土の鉱物組成と物理化学的特性⁽⁹⁾

2.1 構成粘土鉱物

粘土鉱物の同定はX線回折分析により行った。試料作製は74 μm フルイ通過試料約300gをトールピーカーに入れ、過酸化水素水により有機物処理をし、無定方位法(粉末粒子)と定方位法(沈降法に

よって2 μm 以下の粒子を捕集)で行なった。また、無処理試料のX線回折曲線のみからの鉱物組成の同定をすることは難しく、熱処理と薬品処理を用いて同定を行った。

図-2は無処理、図-3は熱処理と薬品処理のX線回折図である。一次鉱物としては石英と長石を含有し、二次鉱物は、無処理試料で15.49 \AA のピークがエチレングリコール処理により16.97 \AA に移動していることと、熱処理によりピークが13.58 \AA (100 $^{\circ}\text{C}$)、10.04 \AA (450 $^{\circ}\text{C}$)へ変化することからモンモリロナイトと考えられる。7.18 \AA と3.58 \AA のピークはカオリナイト鉱物で、カオ

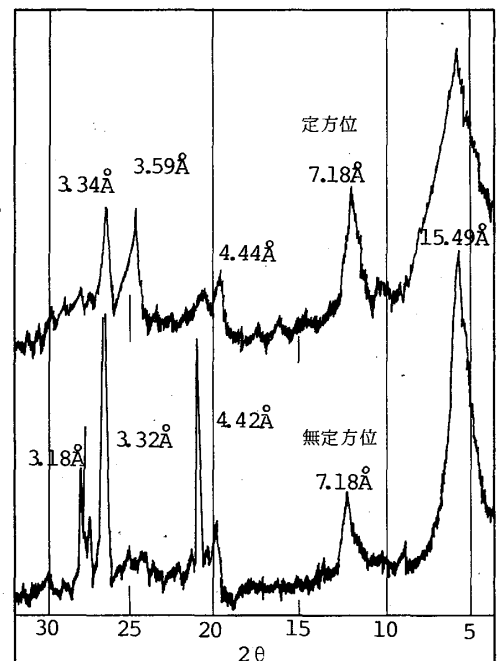


図-2 無処理試料のX線回折パターン

リナイトとメタハロイサイトの存在が考えられるが、塩酸処理による変化がないことから大部分はカオリナイトであろう。

以上の回折結果より、構成粘土鉱物はモンモロロナイト、カオリナイト、ハロイサイトを含有し、造岩一次鉱物として石英と長石を含んでいる。また、

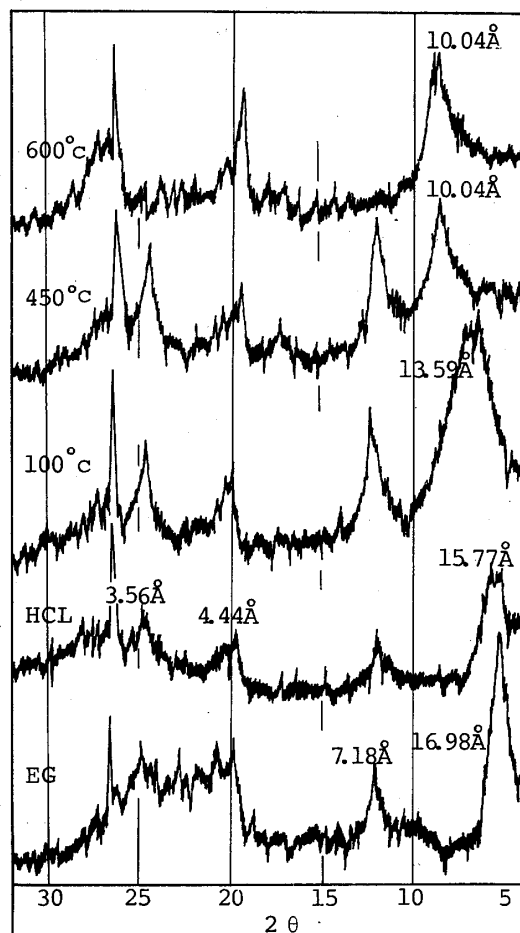


図-3 処理試料のX線回折パターン

各鉱物間の定量分析を回折線基底線からのピーク高さにより求める簡便法を用いて含有率を表示すると、石灰：長石：モンモロロナイト：（その他の鉱物）＝50：15：25：10となっている。

2.2 物理的および物理化学的特性

物理試験は土質試験法⁽¹¹⁾により行ない、物理化学的試験は土壌養分分析法⁽¹²⁾に従って測定を行なった。但し化学分析のうちで、塩基置換容量の測定については松尾・富田の方法によった⁽¹³⁾風乾試料2gを蒸留水でよく洗浄した三角ろ斗に入れ、塩化カルシウム1規定溶液を約250CC加えて土中のカチオンをCa⁺⁺と置換させる。つぎに遊離している過剰のCa⁺⁺をメチルアルコールおよび蒸留水で充分洗浄する。さらに吸着Ca⁺⁺を抽出するために、酢酸アンモニウム1規定溶液をろ液が約300CCになるまで加える。抽出液中のCa⁺⁺量を測定したのが塩基置換容量(C.E.C.)である。

尾道層群粘土の自然含水比は22%であり、乱さない状態での強度が1.5 kgf/cm²と小さく、非常に軟弱な土質である。このような軟弱な尾道層群粘土と比較検討するために、比較的安定な圧縮性の小さい花崗岩質マサ土と圧縮性の大きいモンモロロナイト系粘土(クニゲルV₁)を用いた。

その物理的性質と化学的性質を表-1と2に示す。尾道粘土の物理性は、液性限界が40.8%、塑性指数は22.1%と小さく粒度分類によれば粘土ロームに判定され、一般的な土質と考えられる。化学的性質は、他の二種の試料(マサ土、モンモロロナイト)と比較して、塩基飽和度が29%と小さくpH値

表-1 物理的性質

試料の種類	比重 Gs	コンシステンシー限界			土質分類				
		LL	PL	PI	レキ	砂	シルト	粘土	粒土分類
尾道粘土	2.67	40.8	18.7	22.1	0	42.0	35.3	22.7	粘土ローム
モンモロロナイト	2.73	43.4	30.6	40.3	0	3.0	9.8	87.2	粘土
マサ土	2.63	24.5	16.2	8.3	0	70.8	13.2	16.0	粘土ローム

表-2 化学的性質

試料の種類	C E C (meq/100g)	置換性塩基 (meq/100g)				塩基飽和度(%)	pH	
		K	Na	Ca	Mg		H ₂ O	KCL
尾道粘土	16.24	0.36	0.27	2.67	1.43	29.13	5.37	3.83
モンモロロナイト	56.08	1.10	16.05	7.90	9.97	62.00	8.85	7.69
マサ土	9.84	0.28	0.21	1.96	0.81	33.13	5.71	4.39

が4.0付近にあり雰囲気としては強酸性を示していることから酸化作用を受けているものと推測される。また、塩基置換容量(尾道粘土; 16.24 meq/100g)の値からみて風化が著しく、酸性条件下での生成が推定される。

3. 尾道粘土の石灰処理特性

3.1 試料作成と実験方法

実験に用いた試料は福山大学構内の尾道粘土であり、試料条件は室内で自然乾燥させた後、2000 μ mフルイを通過した試料を用いた。また、安定剤としては良質な水酸化カルシウム(純度95%)を使用している。

試料作成は、Ca(OH)₂を乾燥重量に対して2%、4%、6%、8%、10%添加混合した後、初期含水比を17.5%(最適含水比)付近に調整し、ニーディングコンパクション法(10kgfのパネエネルギー、3層で各層20回)によってモールド内に締固めた。

実験方法は、5種の添加試料に対して3種類の養生方法(気乾-20℃、密封-パラフィンシール-20℃、湿潤-20℃・90%RH)を組合せた15種類の試料について、1日、3日、7日、28日、90日の各養生後、強度試験と機器分析を行なう。なお、測定条件については次のように統一した。

a) X線回折

試料は74 μ mフルイを通過したものを乳鉢により細粒化し、指頭に感じぬ程度のもを測定用試料とした。

測定条件は、Target; Cu, Voltage; 40 KV, Current; 24 mA, Count Range; 500 C.P.S., Time Constant;

1 sec. で分析を行なう。

b) 原子吸光分析

Ca(OH)₂処理試料5gを蒸留水でよく洗浄した三角ろ斗に入れ、これにアルコールおよび蒸留水の混合液でろ液が約250CCになるまで抽出した液中のCa²⁺イオン量が遊離Caイオン量、さらに酢酸アンモニウム1N溶液でろ液が約250CCになるまで抽出した液中のCa²⁺イオン量が吸着Caイオン量になる。反応に寄与したCaイオン量は、添加したイオンから遊離と吸着Caイオン量を差し引いたものである。

c) 一軸圧縮試験

JIS A1216 による方法で、載荷速度を1.0 mm/minのヒズミ制御によって行ない、土のせん断強度を求めた。

d) コンシステンシー試験と粒度試験

一軸圧縮試験終了後、JIS A1205, 1206(コンシステンシー試験) JIS A1204(粒度試験)の試験方法に基づいて行なった。

3.2 石灰処理土の反応生成物⁽¹⁴⁾

3.2.1 X線回折特性

図-4, 5, 6は3種の養生(気乾, 湿潤, 密封)におけるモンモリロナイト鉱物とCa(OH)₂の養生日数の経過にともなう平均積分強度を示したものである。

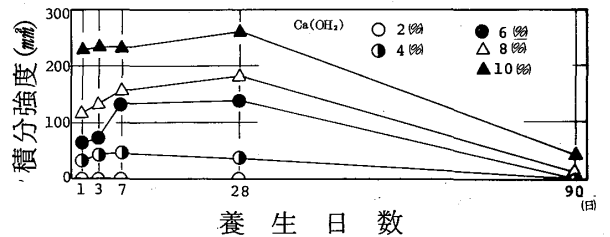
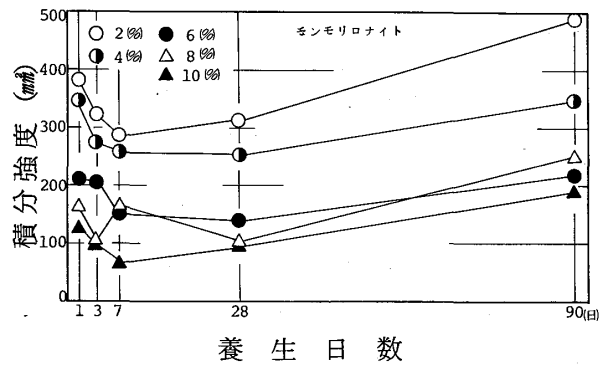


図-4 積分強度と養生日数(気乾養生)

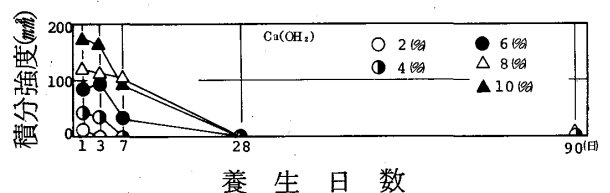
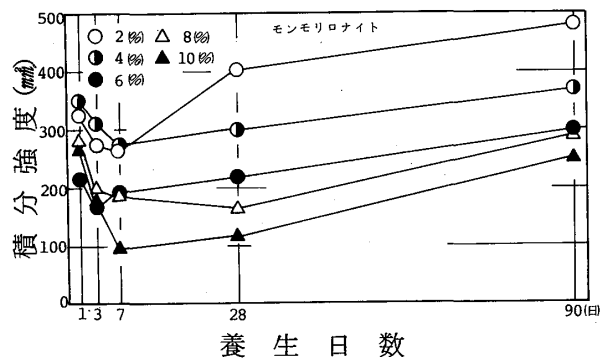


図-5 積分強度と養生日数(湿潤養生)

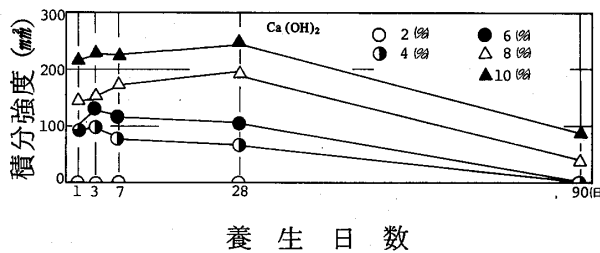
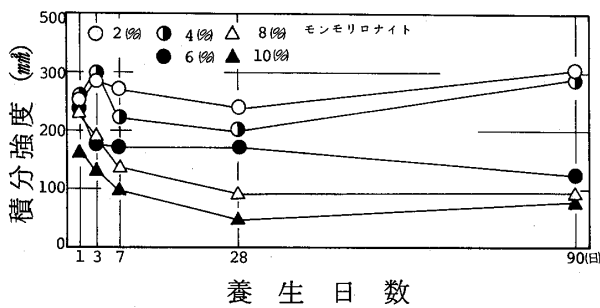


図-6 積分強度と養生日数(密封養生)

1) 気乾養生(図-4)

モンモリロナイトの積分強度変化をみると、各試料ともに養生7日から28日前後まで減少し、その後次第に増加傾向を示している。このような養生初期における積分強度の減少は、過剰の Ca^{++} がモンモリロナイトの層間に浸入して結晶格子が破壊され低下したと思われる。その後の増加は、結晶格子の破壊にともなって可溶性のシリカやアルミナが溶出され、表面に吸着している Ca^{++} との反応でケイ酸石灰水和物 ($\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 素) とアルミン酸石灰水和物 ($\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ 素) の二次的な反応生成物の形成によって増加したものと考えられる。即ち、養生初期の低下は早期反応によるイオン交換作用であり、その後の増加は長期養生におけるポズラン反応生成物によるものと推察される。つぎに $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の添加割合とモンモリロナイトの積分強度との関係を見ると、添加割合が少ないものほど積分強度の増加率が大きくなっている。これは少量の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ では結晶格子の破壊が起こらず、 Ca^{++} の吸着作用の影響によって著しい増大を示したものと解釈すべきであろう。この点については、Eades⁽¹⁵⁾ らによるソイラムに関する研究、川村⁽¹⁶⁾ らによるソイルセメントの研究によっても指摘されている。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の 2.63 \AA の積分強度は、養生28日までは増加し、その後かなり急激な低下を示し90日養生では8%と10%添加試料を除く全ての試料が消失している。このような積分強度変化は、二次的な反応生成物の形成と CaCO_3 の発生が微妙な影響を及ぼしている。

2) 湿潤養生(図-5)

湿潤養生におけるモンモリロナイトの積分強度変化は、図-4の気乾養生とよく似た傾向を示しているが、7日養生以後の積分強度が気乾養生に比べて増加している。これは、湿潤養生では炭酸化作用が非常に活発なため、ポズラン反応と炭酸化による水和作用とが同様な傾向で進行することによって増加したものと思われる。また、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の積分強度が養生28日までに全て消失しているが、これも CaCO_3 の著しい増加によって起こったものと考えられる。

3) 密封養生(図-6)

モンモリロナイトの積分強度が他の養生に比べて小さく、養生90日における積分強度が2%と4%試料の場合は 300 mm^2 に対し、6%、8%及び10%試料は約 100 mm^2 の値を示している。(気乾・湿潤養生では、2%、4% - $350 \sim 500 \text{ mm}^2$ 、6%、8%、10% - $200 \sim 300 \text{ mm}^2$)。また、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は図-4の気乾養生と同様な傾向で進行しているが、密封養生にともなう低下割合が少ない点で異なっている。これはイオン交換作用とポズラン反応のみによる積分強度変化の現われである。

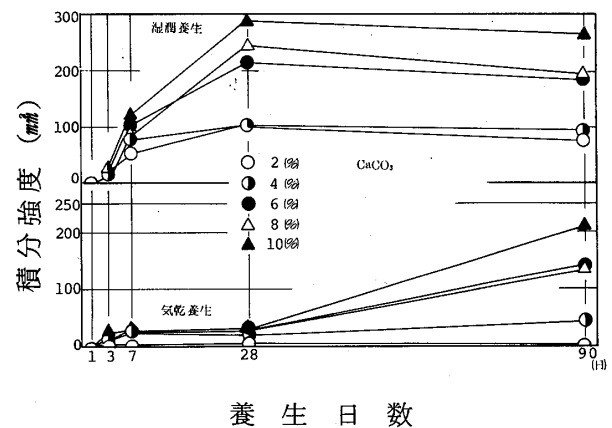


図-7 積分強度と養生日数

図-7は CaCO_3 (3.04 \AA) の積分強度と養生日数との関係を示したものである。

気乾養生の場合は、積分強度が養生80日以後から増大している。一方、湿潤養生では養生初期から28日前後まで増加を示しその後は定常状態となっている。逆に 2.63 \AA の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に対する積分強度が、気乾養生では28日以後から低下傾向を示し、湿潤養生においては養生28日で全て消失している状況が観察される。これは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CO_2 との反応により CaCO_3 が生成されることによって、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の

消失とCa(OH)₂の発生が起こったことを明示している。また、密封養生の場合は空気中のCO₂との接触をさけているので発生がみられない。この影響によってCa(OH)₂の積分強度の低下割合が小さく、アルカリ刺激効果の特続を暗示していることから、長期養生では他の養生に比べポズラン反応に寄与する依存度が大きいことを示している。

以上の結果より、モンモリロナイトとCa(OH)₂の積分強度の変化によって処理効果の定量化が可能となる。また、養生方法の影響によってイオン交換作用とポズラン反応生成物の発現度が異なっているが、これはCaCO₃の依存度によるものと思われる。

3.2.1 反応イオン特性

Ca(OH)₂と土との反応結果、Caイオンがどのような傾向を示すか調べた結果が図-8である。

この図より、気乾・湿潤養生の場合は養生28日間でCa⁺⁺が活発な反応を示し、28日前後をピークに定常状態を示している。また密封養生では積

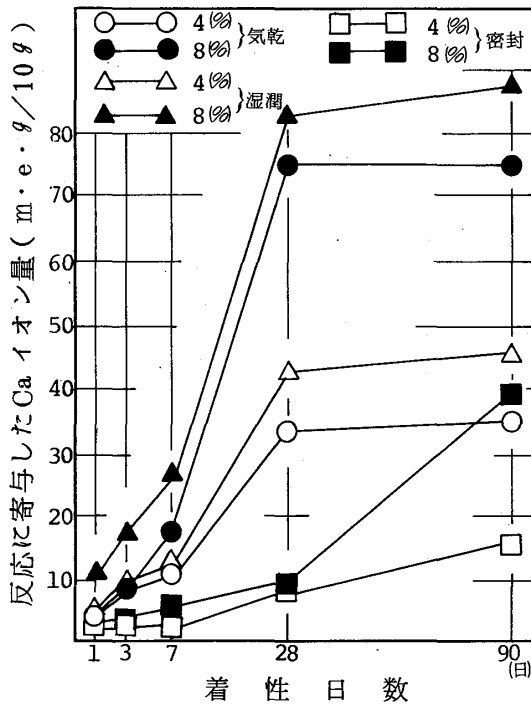


図-8 反応Ca⁺⁺量と養生日数

分強度が他の養生に比べて半分にもみないが養生日数とともに積分強度が増加を示している。この密封養生の場合はポズラン反応生成物に寄与したCaイオン量と考えられるが、気乾・湿潤養生はCaCO₃の相互作用による影響が考えられるので、ポズラン反応生成物のみによる積分強度変化と関連づけることはできない。このことについては今後の課題とする。

3.3 石灰処理土の工学的諸特性

3.3.1 コンシステンシー特性と粒度特性

図-9は石灰添加率と塑性指数の関係を示している。図示していないが未処理試料の塑性指数は21.5と高い塑性度を示しているが、石灰処理により塑性の変化が著しく、添加割合が増すほど塑性指数が減少傾向を示している。しかしある添加割合をこえるとPI曲線は横ばい状態になり、密封・気乾養生では6%、湿潤養生では4%添加でその傾向がみられる。また、各試料とも養生7日以後の塑性変化は小さく、養生90日では塑性を示さない(NP)。

図-10は未処理と石灰処理試料の養生28日のものの粒径加積曲線を示す。この図より、未処理試料の粘土分の含有パーセントは23%に対し、処理試料は粘土分が全てシルト・砂分の含有パーセントに変化し、土質名も粘土ロームから砂質ロームに変わる。

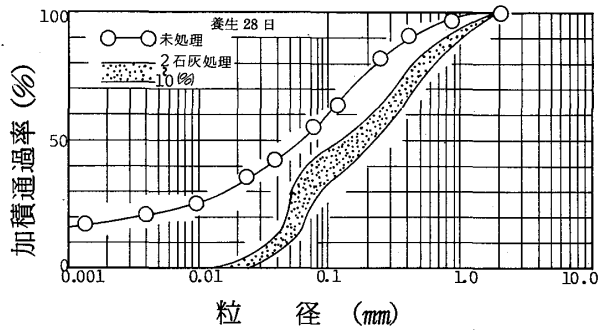


図-10 粒径加積曲線

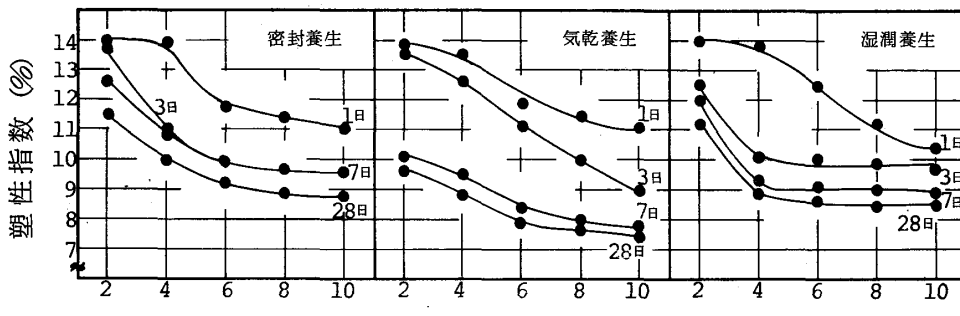


図-9 塑性指数と石灰添加率

以上のことから、石灰処理（反応生成物）と未処理（未反応物）との塑性指数の差が反応量のパラメーターであり、PI曲線が横ばい状態となる点が最も効率のよい最適添加量と考えられる。また、7日養生以降の塑性変化が小さいことより、早期反応によるイオン交換作用のみで土の塑性は限界に達することを示唆している。

粒度試験結果より、石灰処理によって粘土分がシルトや細砂などの大きいベッド構造に凝集し団粒化が進み、前述のコンシステンシー特性で述べているような非塑性的な土質となっている。

3.3.2 強度特性

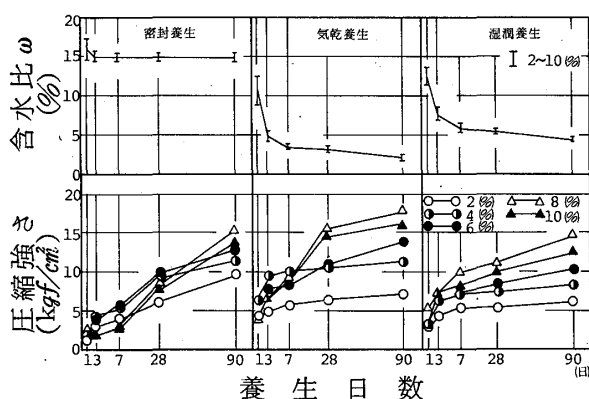


図-11 圧縮強さと養生日数

図-11は養生条件と配合割合の違いが強度特性に及ぼす影響について調べたものである。この図から、密封養生では、配合割合のいかんを問わず養生日数の経過ともなって強度増加を示している。気乾養生の場合は配合割合の高いものほど強度が高く、密封養生と比べて養生初期における強度増加は大きい。28日養生以後の強度は緩慢となっている。湿潤養生の場合には、養生7日までは気乾養生と同様な傾向で増加しているが、7日養生以後における強度増加の割合は小さい。

次に含水比と強度特性との関係に注目すると、養生初期（1週まで）の強度特性に及ぼす影響は反応生成物のみならず、含水比の低下割合によって相当に異なっている。即ち、気乾・湿潤養生は含水比の著しい低下によって強度は高くなっている。一方密封養生の場合には多少低下しているが、初期含水比（17.5%）とほぼ同じであり、気乾・湿潤養生に比べ強度が小さな傾向を示している。したがって初期強度は含水比の影響が大きな役割を果たしているものと思われる。

このように養生条件の影響によって特徴的な傾向を示している。そこで前述までの反応生成物の結果と関連づけてさらにくわしく考究すると、次のこと

がいえよう。

気乾・湿潤養生では、空気中のCO₂の影響により一種の中和反応を起こしてアルカリ刺激効果が低下し、ポゾラン反応に必要なCa⁺⁺量が不足することにより、長期養生にわたる強度が緩慢となる。特に湿潤養生ではCaCO₃が活発なためその傾向が著しい。逆に密封養生の場合は、炭酸化が起こらずかなりのCaイオンで飽和されているものと考えられる。すなわち、密封養生ではイオン交換作用とポゾラン反応が強度特性に直接的な影響を与え長期養生にともないその効果を示すものと考えられる。

最後に、イオン交換による凝集化作用と炭酸化による固結作用のどちらが強度特性に寄与するかという問題は今後の課題とし、長期養生の強度特性においては、粘性土を対象とする場合は炭酸化作用は弊害をきたしている。しかし、砂分を多く含んだ土質に対しては有効とする論文もある。

4. 結 言

本論は広島県東部にかけて分布している尾道層群粘土（特殊土）を対象に、石灰安定処理による処理効果の追跡を物理化学的性質と強度特性とを関連づけて検討を行った。

本論で得られた主要な成果をとりまとめると次のとおりである。

尾道層群粘土の基礎特性

(1) 尾道粘土の生成時代は植物化石（柳、樫）を少量含んでいることより洪積世と考えられる。また、堆積環境は植物化石の産出より陸成層で河川による堆積物である。

(2) 鉱物組成を定性的に示すと、Ca型のモンモリロナイトを主成分としてカオリナイト、メタハロイサイト鉱物を含んでいる。

石灰安定処理による反応生成物

X線回折分析により以下のことが判明した。

(1) イオン交換作用とポゾラン反応生成物の進行状況は、モンモリロナイトの(001)ピークの積分強度変化により推定可能であることが認められた。

(2) また、最も経済的な石灰添加量が、養生1～2週のモンモリロナイトの積分強度変化より明らかとなる。

(3) 炭酸カルシウムの生成は養生温度と湿度の影響を受けやすい。

工学的特性の変化から

(1) Ca(OH)₂処理によってコンシステンシーが変化する。その状況は複雑であるがイオン交換作用と密

接な関係があることが判明した。

- (2) コンシステンシー試験は、簡易的な配合割合量の指針として利用できる。
- (3) 初期養生の強度特性は、イオン交換と炭酸化の相互作用によって強度増加を示す。
- (4) 長期養生の強度増加は、含水量とポゾラン反応生成物が密接に関連している。
- (5) 炭酸カルシウムの生成は、長期養生の強度特性には悪影響を与えている。

謝辞 広島県東部の地質に関して色々と御助言をいただいた、福山大学鷹村楯教授に深謝の意を表する。

【 参考文献 】

- 1) 松尾新一郎 (編) : 土質安定工法と基礎工法, 鹿島出版, p.212, 1981.
- 2) 松尾新一郎 (編) : 土質安定工法便覧, 日刊工業新聞社, pp. 217 ~ 218, 1976.
- 3) 日本石灰協会土質安定処理工法委員会 : 石灰による土質安定処理工法, 山海堂, 1970.
- 4) 松尾新一郎, 上村克己 : ポゾラン反応生成物の追跡, 第 3 4 回土木学会年次学術講演会概要集, pp. 163 ~ 164, 1979.
- 5) 松尾新一郎, 宋永焜 : X 線および電子顕微鏡による石灰安定処理土の構造的な研究, 土木学会論文報告集 1 9 3 号 pp. 59 ~ 68, 1971.
- 6) 浅川美利他 : ポゾラン反応と強度特性について, 第 1 1 回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 501 ~ 504, 1976.
- 7) Eades, J. L. and Grim, R. L.: *Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization*, H. R. B. Bull, 262, pp. 51 ~ 63, 1960.
- 8) 有泉晶 : 石灰安定処理の機構, 土質工学会誌「土と基礎」, Vol. 25, No. 227, pp. 9 ~ 15, 1977.
- 9) 松尾, 富田, 田辺 : 尾道層群粘土の物理化学的特性および石灰安定処理特性, 第 3 4 回土木学会年次学術講演会概要集, pp. 259 ~ 260, 1979.
- 10) 粘土ハンドブック編集委員会編 : 粘土ハンドブック, 技報堂, pp. 432 ~ 436, 1967.
- 11) 土質工学会編 : 土質試験報, 土質工学会,
- 12) 土壌養分測定法委員会編 : 土壌養分分析法, 養賢堂,
- 13) 松尾新一郎, 富田武満 : 斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, 日本材料学会誌 Vol. 19, No. 205, pp. 53 ~ 58, 1970.
- 14) 富田, 田辺 : 尾道層群粘土の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 処理による反応特性に関する研究, 第 3 5 回土木学会年次学術講演会概要集, pp. 259 ~ 260, 1980.
- 15) 既出 7), pp. 51 ~ 63.
- 16) 川村満紀 他 : ソイルセメントにおける粘土鉱物とセメントの相互作用の役割, 土木学会論文報告集, 1 6 9 号 pp. 31 ~ 43, 1969.