

産業副産物による化学的土質安定処理

鳥居和之*¹・川村満紀*²・榎場重正*³

概要 産業副産物による化学的土質安定処理の反応機構を理解する際に重要である消石灰安定処理，セメント安定処理およびポゾラン・水硬性材料が使用された安定処理における反応過程および反応生成物の特徴について述べるとともに，産業副産物の土質安定材および路盤・盛土材料としての適用例について紹介した。

キーワード：土質安定処理，産業副産物，反応機構，ポゾラン反応，エトリンガイト

1. まえがき

近年，土木・建築工事が大型化し，かつ対象とする地盤が多様化するにともない，土粒子間に化学的結合力を与えることによって安定処理効果を得る化学的改良方法が，速効性，適用性，および経済性などの点で改めて見直されている。これまで化学的安定処理工法における大きな欠点であった土と安定材との不均一性および高含水比の有機質土に適用する場合の改良効果に関する問題は，高性能の攪拌混合機械および適用範囲の広い土質安定材の開発により克服され，最近，化学的安定処理工法が各地で普及している。

化学的安定処理は，ソイルセメントおよびソイルライムとして道路の路床および路盤の改良（締固めによる浅層地盤の改良）に比較的多く適用されてきた。最近では化学的安定処理の適用範囲はかなり拡大し，深い基礎地盤の改良（締固めをともなわない深層地盤の改良），超軟弱地盤の表層改良，ヘドロまたはスラッジの固化処理，および斜面や水路の侵食防止などへも積極的に利用されている。このように，化学的安定処理における対象土および改良目的は多種多様であり，期待される改良効果も，せん断強度の増加，圧縮性の減少，および動的性状の改善といった力学的性状の改良ばかりでなく，化学的安定処理の適用場所に応じて，耐侵食性および耐久性の改良，透水性の改善など広範囲にわたっている。

土質安定材は，従来はポルトランドセメント，石灰，およびアスファルトなどに限られていたが，改良効果の増大と経済性の改善を目的として，2種類以上の土質安定材の組合せや新しい土質安定材の開発が活発に行われている。さらに，産業副産物の中でも，排脱石膏，高炉

スラグ，転炉スラグ，石炭灰，カーバイト滓，および赤泥などは，それらの化学成分および鉱物組成から，セメントや石灰と組み合わせて使用することにより土質安定材として有効に利用できる。また，石炭灰，高炉スラグ，転炉スラグおよび焼却灰などの産業副産物を適度な含水状態で締め固めた場合，それらが含有する成分間に生ずるポゾラン反応または含有鉱物の水和反応の進行にともない，強度の発現が期待できる。したがって，これらの産業副産物は，環境保全等の理由により採取が困難になった天然土砂の代替として，路盤および盛土材料に利用することも可能である。

本稿では，最近その有効利用に関する技術開発が望まれている産業副産物の化学的土質安定処理材を用いる場合の適用性および適用例について述べ，その際の反応および反応生成物の特徴を解説する。

2. 土質安定処理の反応機構からみた分類

土質安定処理に利用される安定材は多数開発されているが，経済性，適用実績，および安定処理における強度発現機構から考えると，消石灰およびセメントが代表的かつ基本的なものである。消石灰およびセメント安定処理における主要な反応は，それぞれポゾラン反応およびセメントの水和反応であるが，両安定処理の強度発現および反応機構における基本的な原理は共通しているものと考えられる。また，産業副産物による土質安定処理の効果は，安定処理の強度発現および反応機構の特徴から，表-1に示すように分類できる。第1に，石炭灰および赤泥などのシリカおよびアルミナ質材料の添加による石灰安定処理におけるポゾラン反応の促進を利用するもの，第2に，排脱石膏などの硫酸塩化合物の添加によるエトリンガイトの生成反応を利用するもの，第3に，高炉水砕スラグの潜在水硬性と転炉スラグのセメントと同様な水和反応を利用するもの，が挙げられる。

*1 正会員 金沢大学講師 工学部土木建設工学科

*2 正会員 同上 教授 工学部材料開発室

*3 正会員 同上 教授 工学部土木建設工学科

表一 産業副産物による土質安定処理の効果

種類	化学成分・鉱物組成	主要な反応	適用が可能な土質条件
排煙脱硫石膏	二水石膏 (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	エトリンガイトの生成反応 (初期強度の発現)	高含水比および有機質の粘性土, ヘドロ, スラッジ
高炉水砕スラグ粉末	CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO (ガラス相が主体)	石灰およびセメントの刺激による潜在水硬性の発揮 (長期強度の発現)	砂質土, 粘性土
転炉スラグ粉末	CaO, Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , MgO (結晶相 β-C ₂ S, C ₂ F, ブスタイト, f-CaO)	転炉スラグ中の β-C ₂ S 相の水和反応および f-CaO 相と粘土とのポゾラン反応 (長期強度の発現)	砂質土, 粘性土
フライアッシュ	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO (ガラス相が主体)	フライアッシュによるポゾラン反応の促進 (長期強度の発現)	砂質土, シルト質土
赤泥	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	赤泥によるポゾラン反応の促進 (長期強度の発現)	砂質土, 粘性土
カーバイト滓	CaO	カーバイト滓中の石灰分と粘土とのポゾラン反応 (長期強度の発現)	粘性土
焼却灰 (石灰系)	CaO, Fe ₂ O ₃	焼却灰中の石灰分と粘土とのポゾラン反応 (長期強度の発現)	粘性土

土質安定材として利用されるポルトランドセメント、消石灰および産業副産物の粒径および粒子形状を写真-1に示す。この場合、処理土中における均一な分散・混合性の確保、ならびに高炉水砕スラグおよび転炉スラグのもつ潜在水硬性および水硬性を有効に活用するためには、産業副産物はセメントと同程度まで粉砕することが必要になる。次に、土質安定処理のそれぞれの反応機構について述べる。

2.1 ポゾラン反応を利用する安定処理

消石灰安定処理における消石灰と粘土間の反応は、消石灰と土との混合直後に生ずる反応と、長期間にわたって継続する反応とがある。前者は、粘土粒子表面でのイオン変換および凝集化であり、後者は、消石灰と粘土間のポゾラン反応と消石灰の炭酸化反応である。消石灰

安定処理における強度発現は、消石灰と粘土間のポゾラン反応が主要なものであるとされており、したがって、処理土中の粘土分の存在が不可欠のものとなる。

消石灰安定処理では、添加された消石灰の一部が処理土中の間隙水に溶解することにより、比較的初期のうちに間隙水は石灰で飽和された状態になり、強アルカリの状況下で粘土鉱物が徐々に侵食されることによって、溶出したシリカおよびアルミナと消石灰との化学反応により、不溶性のケイ酸石灰水和物、アルミン酸石灰水和物、および加水ゲーレンイト水和物などの

反応生成物が生成される。消石灰処理土の内部組織を写真-2に示す。

写真に示すように、ポゾラン反応の過程で微細な生成物が多数生成する粘性土を使用した消石灰処理土では、砂質土の場合よりも長期にわたり大きな強度発現が得られる。

消石灰安定処理のポゾラン反応過程および生成される反応生成物の種類は、粘土鉱物の種類〔カオリン鉱物(カオリナイト, ハロイサイト, アロフェン), モンモリロナイト鉱物および雲母族鉱物〕によって相違する¹⁾。また、消石灰安定処理では、土中に存在する非晶質物質もポゾラン反応に重要な役割を果たしており、非晶質物質の化学組成およびその量によっても石灰安定処理におけるポゾラン反応過程が相違することが明らかにさ

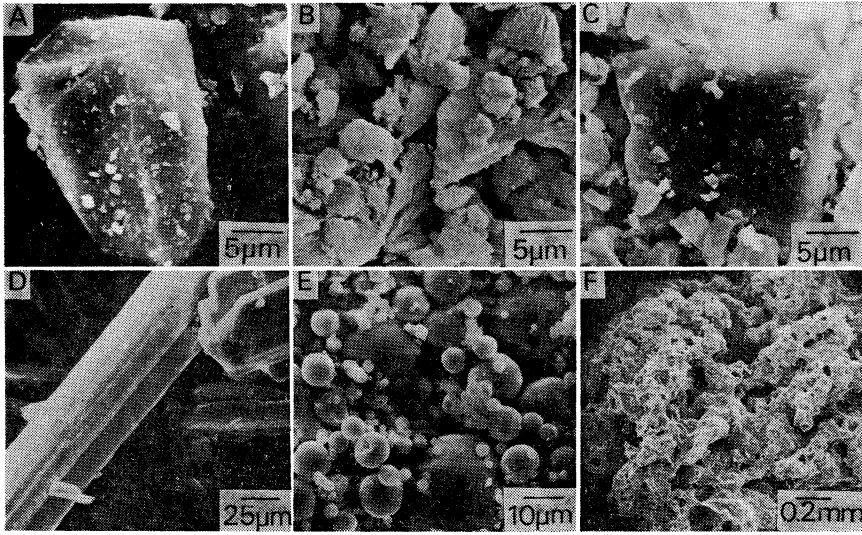
Chemical Soil Stabilization with Industrial By-Products

By K. Torii, M. Kawamura and S. Hasaba

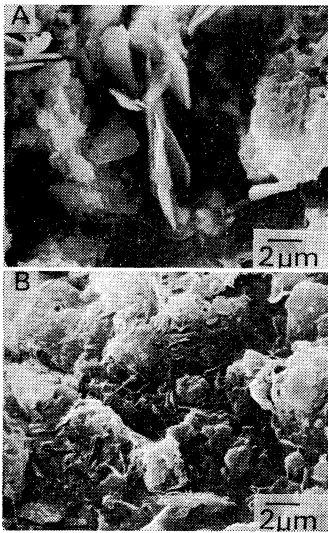
Concrete Journal, Vol. 24, No. 2, pp. 8~17, Feb. 1986

Synopsis Recently, chemical soil stabilizations are actively adopted for the improvement of the soft ground on which the road and the foundation for offshore structures will be constructed. The industrial by-products such as gypsum, coal ashes, blastfurnace slag and basic oxygen furnace slag can be used effectively for the soil stabilization. In this paper, the characteristics of soil stabilizations with various industrial by-products are discussed from the viewpoints of the types of reaction products which are responsible for the development of strength in the stabilized soils.

Keywords : soil stabilization, industrial by-products, reaction mechanisms, pozzolanic reaction, ettringite



写真—1 ポルトランドセメント、消石灰および産業副産物の粒子形状
 [A: 普通ポルトランドセメント, B: 消石灰, C: 高炉水砕スラグ粉末, D: 排煙脱硫石膏,
 E: フライアッシュ, F: 炉底灰]



写真—2 消石灰処理土（添加量 20%）の SEM 像
 (A: 砂質土, B: 粘性土, 28 日材令)

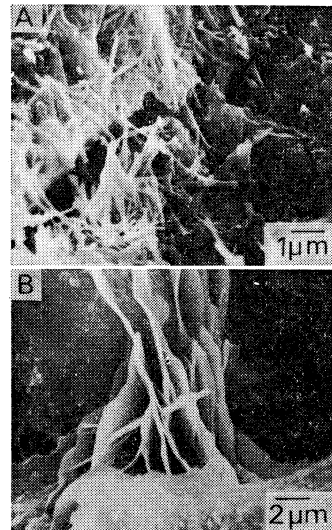
れている⁹⁾。

2.2 エトリンガイトの生成反応を利用する安定処理

消石灰—石膏安定処理の反応過程は、粘土鉱物から供給されるアルミナと石灰、石膏との間で生ずるエトリンガイトの生成反応が主要なものである^{9)~10)}。消石灰—石膏—粘土間の反応過程では、粘土鉱物から溶出されるアルミナの量と処理土の消石灰および石膏の含有量との平衡に関連して、高硫酸塩型のエトリンガイト ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$)、低硫酸塩型のモノサルフェート水和物 ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 7\sim 12\text{H}_2\text{O}$)、および消石灰—粘土間のポズラン反応生成物の生成が確認されてい

る。一般に、安定処理土中において消石灰および石膏の含有量が高い場合にはエトリンガイトが生成するが、消石灰と比較して石膏の含有量が低い場合にはモノサルフェート水和物が生成することが報告されている⁹⁾。

安定処理土におけるエトリンガイトおよびモノサルフェート水和物の代表的な生成状況を写真—3 に示す。エトリンガイトの結晶形態は、 $1\mu\text{m}$ 程度の微細な結晶から数 $10\mu\text{m}$ 程度の比較的大きな針状結晶までさまざまであり、安定処理土中では三次元的に絡み合っ



写真—3 安定処理土中におけるエトリンガイトおよびモノサルフェート水和物の生成状況
 (A: エトリンガイト, B: モノサルフェート水和物)

数 10 μm 程度の比較的大きな板状結晶として存在し、安定処理土中ではカードハウス状の構造が認められる。土質安定処理におけるエトリングサイト生成の役割としては、エトリングサイトの生成時に土中の水分を結晶水として固定することによる処理土の含水比および間隙比の低下と、針状結晶の絡み合いによる土粒子間の結合力の増大とが考えられる。

アルミン酸硫酸石灰水和物は、各種複塩化合物 (Al_2O_3 の一部が Fe_2O_3 により、 SO_4 が CO_3 , SO_3 , および CrO_4 により置換された複塩化合物が確認されている) を生成することが可能であり、各種複塩化合物の生成は、ヘドロおよびスラッジ処理における重金属の固定化の問題に関連して重要である⁷⁾。また、エトリングサイトの生成により安定処理効果を期待する場合には、セメントまたは石灰による安定処理とは異なり、有機物などが存在する時にも水和反応があまり阻害されないという特徴も認められる⁸⁾。

2.3 水硬性材料による安定処理

セメント処理土の強度発現および反応過程は、砂質土を対象とする場合には、セメントモルタルと本質的に相違することがないとされている⁹⁾。一方、セメントの主要な鉱物である C_3S および $\beta\text{-C}_2\text{S}$ の水和反応過程では、 C-S-H ゲルとともにかなり多量の水酸化カルシウムも生成される。したがって、粘土鉱物を多く含有する粘性土を対象とする場合には、セメントの水和反応過程で生成した水酸化カルシウムと粘土鉱物との間で、二次的な反応としてイオン交換、石灰の吸着、および石灰と粘土との間のポズラン反応が同時に進行することになり、セメントの水和反応過程で生成した C-S-H ゲルによる固結作用とともに、セメントと粘土鉱物との相互作用がセメント処理土の強度発現において重要な役割を果たす。このようなセメントと粘土鉱物との反応過程およびその結果生成する反応生成物は、石灰安定処理の場合と同様に、粘土鉱物の種類によって相違することが確認されている^{10), 11)}。

セメント処理土の内部組織を写真-4に示す。セメント処理土の強度発現は主としてセメントの水和反応過程での C-S-H ゲルの生成によるものであり、 C-S-H ゲルの絡み合いによる網目構造の発達にもない個々の土粒子が連続的に結合され、緻密な土粒子構造が形成されることによってセメント処理土の強度の発達が得られるものと考えられる。セメントの水和反応に及ぼす粘土粒子の影響については、安定処理土中におけるセメントの水和反応の進行が非常に細かい粘土粒子によって抑制される場合と促進される場合とがあることが指摘されている^{12), 13)}。また、セメント処理土では、土壌中の有機物(アルカリ、酸の可溶成分であるフミン酸およびフルボ

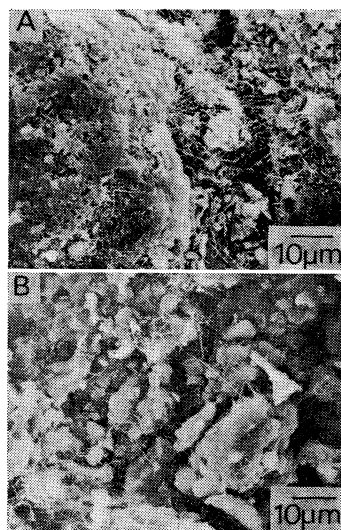


写真-4 セメント処理土(添加量 10%)のSEM像
(A: 砂質土, B: 粘性土)

酸)の存在によりセメントの水和反応が阻害されることも知られている¹⁴⁾。

3. 産業副産物による土質安定処理効果と問題点

土質安定処理に使用する土質安定材は比較的多量であることから、土質安定材は入手が容易であり、かつ安価であることが必要であり、このため、各種産業副産物の土質安定材としての利用が、主として経済性の点から積極的に検討されている。現在、土質安定材として利用されている産業副産物としては、石炭灰、排脱石膏、および高炉水砕スラグなどが代表的なものである。

3.1 石炭灰を利用した土質安定処理

石炭灰の土質安定材としての利用については、アメリカでは石灰-フライアッシュ安定処理工法として広く適用されており、道路の路盤改良に数多くの施工実績が残されている。消石灰-フライアッシュ安定処理におけるフライアッシュの役割は、消石灰とフライアッシュとの間のポズラン反応によるものと、フライアッシュが処理土中の間隙を充填することによるフィラー材料としての締固め密度の増大によるものが考えられる。

土質安定材として使用するフライアッシュは、ポズラン材料としての性能が大きなものほど好ましいが、フライアッシュの添加による強度特性の改善効果は、適用する土質の種類および消石灰とフライアッシュとの混合比率により大きく相違する。砂質土を使用した消石灰-フライアッシュ処理土の強度特性を図-1に示す。消石灰-フライアッシュ安定処理は、比較的良好なポズラン反応性を示す粘性土よりも、ポズラン反応に携わる粘土分

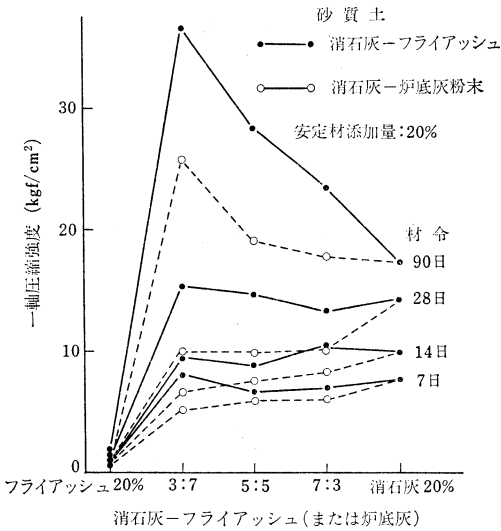


図-1 砂質土を使用した消石灰-フライアッシュ（または炉底灰粉末）処理土（添加量 20%）の一軸圧縮強度と混合割合の関係

が不足するシルト質土または砂質土において適している。砂質土を使用した処理土では、添加された消石灰が粘土への吸着またはポゾラン反応によって消費されることが少ないために、比較的少ない消石灰添加量との組合せの場合でも、写真-5 に示すように、フライアッシュのポゾラン反応過程が期待できる（15）、（16）。消石灰-フライアッシュ処理土におけるポゾラン反応は、石灰安定処理の場合と同様に養生温度が 10°C 以下の低温では遅延され、養生温度が 40°C 以上の高温では急速に進行することが知られている（17）。したがって、消石

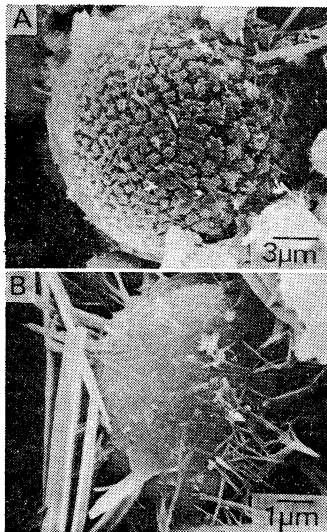


写真-5 砂質土を使用した消石灰-フライアッシュ処理土（添加量 20%，消石灰/フライアッシュ=1，90 日材令）の SEM 像

灰-フライアッシュ安定処理は、寒冷地には適しておらず、また施工時期の選択も重要になる。

3.2 排脱石膏を利用した土質安定処理

排脱石膏は消石灰（またはセメント）と組み合わせて使用することにより、道路における路床・路盤の改良およびヘドロ・スラッジの処理などへ幅広く活用することが可能である。消石灰（またはセメント）-石膏処理におけるエトリンガイトの生成反応では、前述したように消石灰および石膏の添加時における粘土鉱物からのアルミナ分の溶出が重要である。したがって、本方法による化学的安定処理は、アルミナ分の多い化学組成で、石灰反応性の大きい粘土鉱物をもつ土質（例えば、アロフェン、ハロイサイトを含有する関東ロームなどの火山灰質粘土）が対象土として有効であることが指摘されている（5）、（6）。一方、エトリンガイトの生成時にアルミナ分の不足するような土質については、高炉水砕スラグ粉末、石炭灰および焼却灰などの産業副産物をアルミナ供給源として添加することにより、さらに大きな安定処理効果が期待できる。

消石灰-排脱石膏-高炉スラグ処理土の強度特性を図-2 および 3 に示す。排脱石膏および高炉スラグを使用した安定処理では、消石灰と粘土間の反応やセメントの水和反応とともに、初期材令においてエトリンガイ

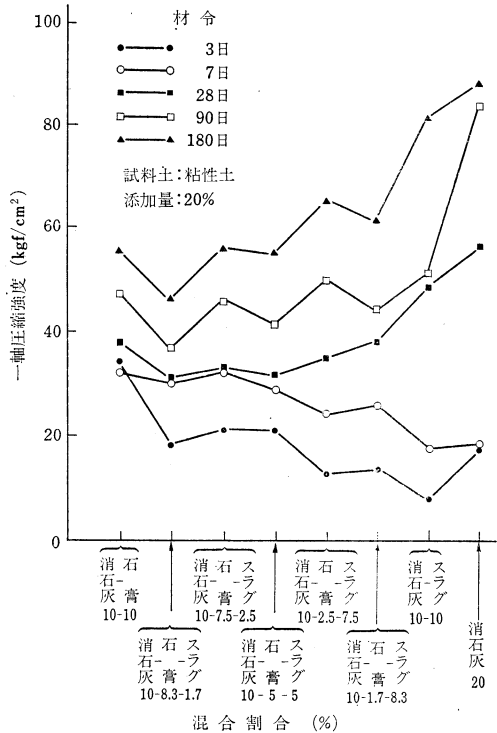


図-2 消石灰-排脱石膏-高炉スラグ処理土（試料土：粘性土，添加量 20%）の一軸圧縮強度と安定材の混合割合の関係

トの生成反応が、長期材令においては高炉スラグの水硬性の発揮が、処理土の強度発現に大きく寄与する。このため、石膏と高炉スラグとの混合比率により、石膏の多い場合には初期強度の発現が著しく、高炉スラグの多い場合には長期にわたる強度増加が認められる。また、エトリンガイトの生成による処理土の膨張は、土粒子間の構造や処理土中における水分の供給状態だけでなく、エトリンガイトの生成量および形態とも密接な関係があり、砂質土を使用した処理土では、比較的良く発達したエトリンガイトが土粒子間の空隙を押し広げ、図-3に示すように過度の膨張により強度低下が発生することもあるため、注意する必要がある。排脱石膏および高炉スラグを使用した安定処理のように多種類の安定材を混合使用する場合には、適用する試料土の物理的・化学的性質や安定材の混合割合によって処理土において生成する反応生成物の種類や生成量が相違し、それにともない処理土の強度発現性も大きく変化することから、土質条件および処理土に要求される強度発現に応じて適切な安定材の混合割合を選択することが重要である。

エトリンガイトの生成反応による安定処理は、石灰やセメント単独では安定処理が困難である高含水比または有機質の土にも適している。また、エトリンガイトは多

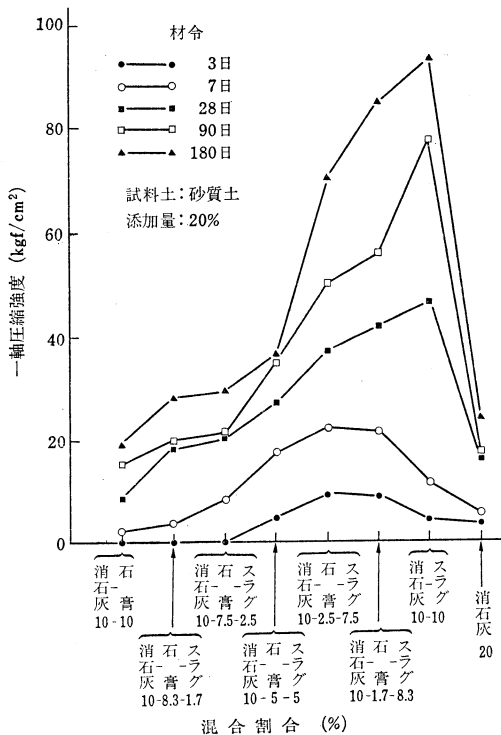


図-3 消石灰-排脱石膏-高炉水砕スラグ処理土（試料土：砂質土、添加量 20%）の一軸圧縮強度と安定材の混合割合の関係

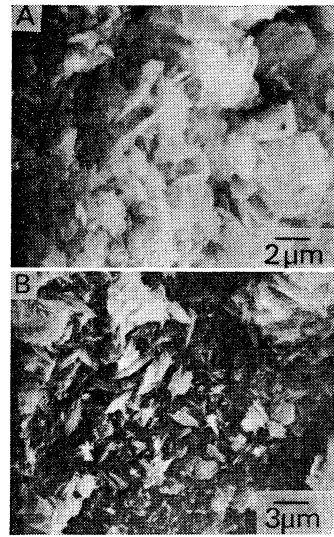


写真-6 消石灰-高炉水砕スラグ処理土（添加量 20%，消石灰/高炉水砕スラグ=1）の SEM 像（A：砂質土，28 日材令，B：粘性土，28 日材令）

量の水分を結晶水として取り入れるとともに、重金属を固定する能力をもつので、ヘドロやスラッジ等の処理への適用も期待できる。しかし、安定処理土中において生成したエトリンガイトの長期安定性（乾燥・湿潤の繰返し、凍結融解作用および空気中の炭酸ガスによる影響）に関しては不明な点が多いようであり、今後、これらの点について解明することが必要である。

3.3 高炉水砕スラグ、転炉スラグを利用した土質安定処理

高炉水砕スラグおよび転炉スラグは、セメントと同様に石灰、シリカ、およびアルミナが主要な成分であり、両スラグには潜在水硬性および水硬性を示す鉱物が含有されているので、それらの鉱物の水和反応過程において安定処理効果が期待できる。高炉水砕スラグの水和反応の特徴は、アルカリ成分の刺激により水和反応が一度開始されると、その後の反応は高炉スラグ中の成分によって独自に進行することにある。高炉水砕スラグの水和反応過程は刺激材の種類とその量により調整が可能であり、比較的容易に初期における強度発現を遅延できることから、改良地盤の接合部の一体化と施工性の向上が要求される海底軟弱地盤を対象とした深層混合処理用安定材として注目されている^{18),19)}。高炉水砕スラグの刺激材としては、消石灰、普通ポルトランドセメント、および中庸熱ポルトランドセメントが使用されているが、適用する土質の石灰吸着能力およびポゾラン反応性を考慮して、長期においても高炉スラグの水和反応が持続できるように安定材の混合割合を決定することが必要になる。消石灰-高炉水砕スラグ安定処理では、石灰の刺激による高炉水砕スラグの水和反応過程において、写真一

6に示すように C-S-H ゲル，加水ゲーレンイト水和物，およびアルミン酸石灰水和物が生成する。

一方，転炉スラグは鋼の品種，副原料の装入量，および吹練などの条件が各製鋼工場において相違することから，化学成分や鉱物組成の変動が高炉スラグの場合と比較して大きい。転炉スラグの鉱物組成は， β - C_2S 相， C_2F 相，およびブスタイト相が主要なものであり，塩基度が大きい場合には，これらの鉱物相以外に C_3S 相および比較的多量の f -CaO 相も認められる。したがって，転炉スラグによる土質安定処理では，比較的多量に含有されている遊離石灰により，石灰安定処理の場合と同様なポズラン反応が進行するとともに，粉碎することによって転炉スラグの活性を高めた場合には，写真-7に示すように水硬性鉱物である β - C_2S 相の水和反応過程で生成した C-S-H ゲルによってセメント安定処理と同様な処理効果も期待できる²⁰⁾。

このため，転炉スラグによる安定処理は，セメント安定処理の場合と同様に，粘性土よりも砂質土において有利に働く。図-4に，砂質土に適用した例を示す。図に

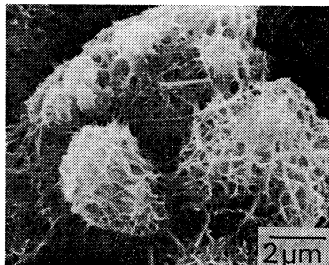


写真-7 転炉スラグ粉末ペースト試料（水・転炉スラグ比 40%，180 日材令）の SEM 像

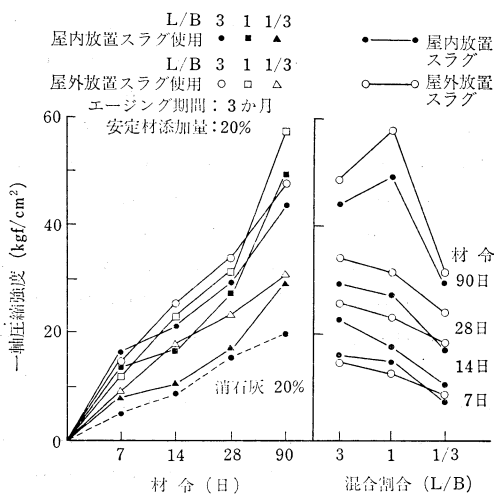


図-4 砂質土を使用した消石灰-転炉スラグ処理土の材令にともなう一軸圧縮強度の変化（添加量 20%，L：消石灰，B：転炉スラグ）

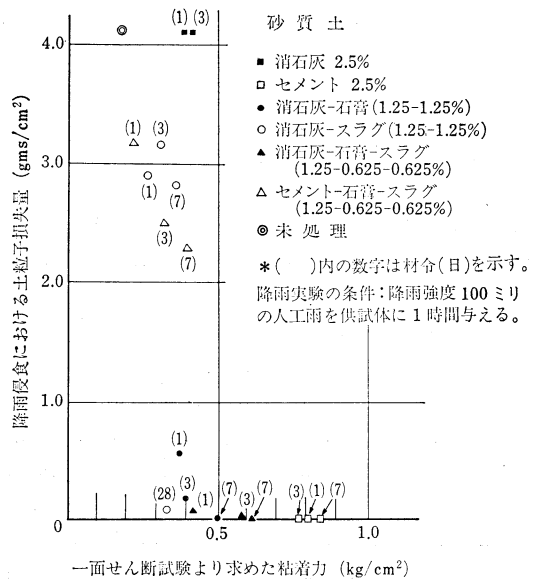


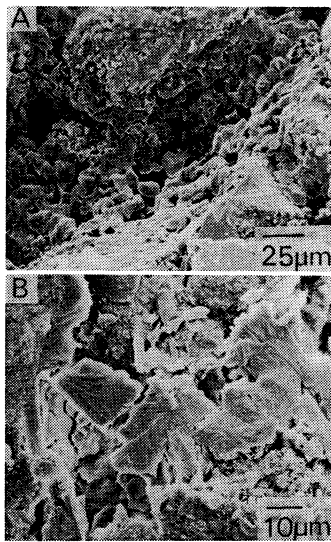
図-5 砂質土を使用した各種安定処理土の土粒子損失量と粘着力の関係

示すように，砂質土を使用した消石灰-転炉スラグ処理土では，転炉スラグの水和反応過程で長期材令における強度特性が大きく改善される。また，転炉スラグは f -CaO 相の風化崩壊が問題となるが，粒径を細かくすれば，その悪影響は認められなくなる。

3.4 産業副産物を利用したのり面安定処理

降雨によって発生するのり面侵食および表層崩壊を防止するためには，土壤に少量の安定材を添加し，締め固めることによって，土粒子集合体の構造を雨滴の衝撃に対して抵抗性を大きくし，雨水の土中への浸透を減ずることが有効である²¹⁾。土質安定材の添加によるのり面安定処理は，マサ土，シラスなどののり面の侵食防止，水路構造物のライニング，および河川堤防の浸透防止に幅広く適用することが可能である。

安定材の添加によってもたらされた土粒子間の平均的な結合力の変化と耐侵食性との関係を図-5に示す。砂質土を使用した安定処理土（添加量：2.5%）では，処理土の粘着力と降雨侵食試験における土粒子損失量の間には比較的良好な関係が認められる。砂質土の場合 0.4 kg/cm² 以上の粘着力が得られれば，降雨強度 100 ミリ程度の降雨の侵食に対しては十分抵抗できる。砂質土および粘性土のいずれの場合も，2.5%程度セメントの添加により，初期段階から降雨侵食を完全に抑制できる。また，消石灰添加による降雨侵食の抑制効果は，セメント添加と比較してゆっくりと増進する。粘土含有量の多い土に対して十分な養生期間が確保できる場合には，セメント添加と同程度の抑制効果が期待できる。セメント（または消石灰）の添加による降雨侵食に対する



写真—8 セメントおよび消石灰処理土の降雨侵食を受けた供試体表面の SEM 像 (A: 砂質土, セメント 2.5 %, 1 日材令, B: 粘性土, 消石灰 2.5 %, 7 日材令)

抵抗性の増大は写真—8 に示すようであり, セメントの水和反応過程および消石灰と粘土との間のポズラン反応により, 雨滴の衝撃によっても破壊されない, 連続的に結合された土粒子構造が形成されるためである。

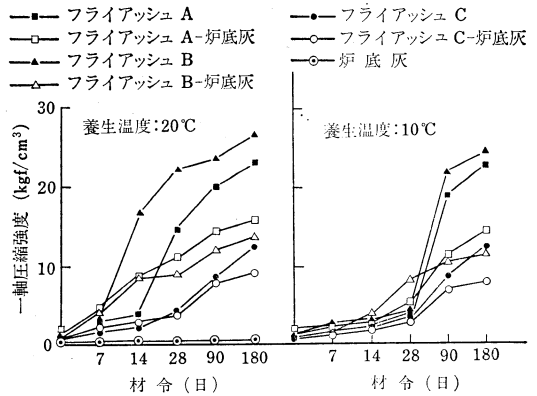
一方, 産業副産物である排脱石膏および高炉スラグをのり面安定処理に適用する場合には, 土質条件に応じて適切なセメント(または消石灰)と石膏, 高炉スラグとの混合割合を選択することが重要である。排脱石膏および高炉スラグによるのり面安定処理の効果は, エトリンガイトの生成により緻密な土粒子構造が形成されることによるものである²³⁾。今後の課題としては, 施工現場の状況により, 植生工との併用の可能性, 長期間にわたる安定処理土の侵食防止効果の確認, および斜面を対象とした場合の効率的な締め固め方法の開発などが挙げられる。

4. 産業副産物の路盤・盛土への利用可能性と問題点

近年, 産業副産物を多量に有効利用する方法として, 道路の路盤・盛土材料への適用が検討されている。産業副産物を路盤・盛土へ利用する場合には, 土質材料としての性質(物理的性質, 締め固め性状および強度特性)と有害物質の溶出などの環境への影響について十分に確認しておくことが必要である。路盤・盛土材料としての利用が検討されている産業副産物としては, 石炭灰, 焼却灰, および鉄鋼スラグなどが挙げられる。

4.1 土質材料としての石炭灰

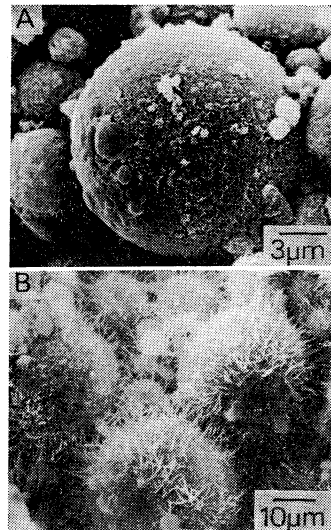
締め固めた石炭灰の工学的諸性質は, 石炭灰の締め固め性状によって大きく変化する。したがって, 石炭灰を土



図—6 締め固めたフライアッシュおよびフライアッシュ—炉底灰混合物(フライアッシュ/炉底灰=1)の材令の経過にともなう圧縮強度の変化

質材料として利用する際には, 締め固め密度や含水比の管理を厳重に行う必要がある^{23), 24)}。石炭灰の中で大きな発生量を占めるフライアッシュおよび炉底灰は, それぞれシルトおよび砂に類似した土質材料としての性質をもっている。また, フライアッシュは, 適度な水分が存在する条件下で締め固めた場合には, 炉底灰の場合とは異なり, 材令の経過にともないかなり大きな強度発現が得られるという, 他の土質材料にはみられない特徴がある。

締め固めたフライアッシュの材令の経過にともなう圧縮強度の変化を 図—6 に示す。締め固めたフライアッシュの強度発現性は, フライアッシュ自身のポズラン反応性に支配されることから, フライアッシュの物理的・化学的性質によって強度発現の状況が大きく相違する。また, 養生温度は締め固めたフライアッシュの強度発現に



写真—9 締め固めたフライアッシュの SEM 像 (A: 無添加, 28 日材令, B: 消石灰—石膏 10 % 添加(消石灰/石膏=1), 28 日材令)

大きな影響を及ぼし、図-6 に示すように養生温度が低下すると強度発現が遅延する傾向が認められる。このような締め固めたフライアッシュの強度発現は、フライアッシュ中に少量含有されている遊離石灰および無水石膏とフライアッシュ中のアルミナ分との反応により、フライアッシュの粒子表面においてエトリンガイトが生成されることによるものである。また、締め固めたフライアッシュの強度発現を促進し、耐久性の良好な路盤および盛土として利用するためには、少量の化学安定材を添加して締め固めることが有効である。フライアッシュを安定処理する際には、消石灰（またはセメント）を単独で添加するよりも、消石灰（またはセメント）と石膏を組み合わせて添加する方が処理効果が大きくなり、写真-9 に示すように、フライアッシュは比較的少量の安定材の添加によりエトリンガイトの生成が促進され、大きな強度発現が期待できる²⁵⁾。

4.2 土質材料としての焼却灰

焼却灰には、下水の処理によって発生する汚泥を焼却した下水汚泥焼却灰と、都市ごみを焼却したごみ焼却灰とがある。このうち下水汚泥焼却灰は、下水汚泥の脱水時に添加される凝集剤の種類により、石灰系焼却灰（凝集剤として石灰・塩化第二鉄を使用）と、高分子系焼却灰（凝集剤としてポリアクリルアミドなどを使用）とに分類される。下水汚泥焼却灰の化学成分は焼却温度および焼却方式によっても多少相違するようであるが、石灰系焼却灰では石灰分（30 % 程度）および鉄分（10～15 %）が多く、高分子系焼却灰ではシリカ分（40～50 %）が多いという特徴が認められる²⁶⁾。焼却灰は締め固めにより粒子破砕が一部に認められるが、砂状の粒径分布をもつことから、比較的良好的な締め固め性状を示すことが確認されている。また、石灰系焼却灰を締め固めた場合には、焼却灰中のシリカ、アルミナ分と石灰分とのポズラン反応過程で材令の経過にともなう強度発現も期待できる。

一方、都市ごみ焼却灰は、都市の生活環境を反映して、都市地域によってその物理的・化学的性状が大きく異なるとともに、空かんなどの金属片や水銀、クロムなどの重金属が含有されているのが特徴である。したがって、都市ごみで焼却灰を処理する場合には、有害物質の溶出を防止することが必要になる。溶出がみられる場合には、セメントなどにより固化処理することが望ましい。

4.3 路盤材料としての鉄鋼スラグ

道路の路盤材料としては、高炉徐冷スラグが古くから利用されている。近年、高炉徐冷スラグのもつ水硬性および剛性の大きな強化路盤としての機能が評価されており、高炉スラグ路盤の水硬性を高めるために、高炉水砕スラグとの混合や石灰、転炉ダストなどの添加が検討さ

れている。高炉スラグ路盤の強度発現に影響を及ぼす要因は、高炉スラグの物理的・化学的性質（化学成分、ガラス量、粒度分布、微粉末量）、養生条件（温度、含水状態）、および締め固め条件（締め固め度、粒子の破砕性）が挙げられる。高炉スラグ路盤において水和反応を長期間にわたって継続させるためには、アルカリ成分の存在、十分な水分の供給と空気中の炭酸ガスからの遮断が必要とされている²⁷⁾。

一方、転炉スラグは、組織が硬質かつ緻密であり、骨材としての強度および耐摩耗性が大きいという路盤材料としての優れた性状が認められる。その反面、塩基度の大きな転炉スラグは十分な水分が供給される環境下においては風化崩壊しやすいという欠点をもっている。このことが、転炉スラグの道路路盤への適用において大きな障害になっている。転炉スラグの風化崩壊現象（ふけ）は、スラグ中に未滓化の状態で存在する f -CaO 相の体積膨張が主原因と考えられており、スラグ中の f -CaO 量とともに、 f -CaO の結晶形態が風化崩壊性と密接な関係があることが報告されている²⁸⁾。転炉スラグの風化崩壊を軽減する対策としては、高炉スラグなどの安定な材料と混合する方法も有効であるが、実用的には転炉スラグを一定期間野外に放置し、風化崩壊が終了した後に使用する方法（エージング処理）が有利である²⁹⁾。このことから、転炉スラグの路盤材料としての実用化では、転炉スラグの品質管理、風化崩壊性の判定基準、および風化崩壊性の効率的な軽減方法など、解決すべき問題が残されている。

5. あとがき

省資源・省エネルギーおよび環境問題に関する諸情勢を考慮すると、産業副産物の土質安定処理への有効利用については、今後とも積極的に対処していかなければならない。産業副産物の土質安定処理への利用においては、セメント原料やコンクリート用材料の場合のような化学成分および物理的性質についての厳しい品質基準は必要ではない。したがって、環境に影響を及ぼす有害物質を含有しないことが確認されれば、低品質の産業副産物でも、土質安定材および路盤・盛土材料としては有効かつ多量に利用することが可能である。近年、道路の路盤および軟弱地盤の改良に各種化学的土質安定処理を適用する機会が急速に増大しているが、化学的土質安定処理をさらに一層普及させるためには、土質安定材の強度発現および反応機構について十分に解明される必要がある。さらに、土質安定処理における合理的な配合・設計の方法、および実際の施工における経済性および施工性についても検討されることが望まれる。

参 考 文 献

- 1) Eades, J.L. and R.E. Grim : Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization, Highway Research Board, No. 262, pp. 51~63, 1959
- 2) Diamond, S., J.L. White and W.L. Dolch : Transformation of Clay Minerals by Calcium Hydroxide Attach, Proc. the 12th Natio. Conf. on Clays and Clay Minerals, pp. 359~379, 1963
- 3) Cavalho, J.B. : Amorphous Materials and Lime Stabilized Soil, Proc. of 10th Int.Conf. Soil Mech. and Found. Eng., pp. 761~764, 1981
- 4) 有泉昌・大場正男 : アロファン質粘土の消石灰-石膏による化学的処理方法に関する研究(5), 土木研究所報告, No. 119, pp. 83~103, 1963
- 5) 有泉昌・牧隆正 : アロファン質粘土の消石灰-石膏による化学的処理方法に関する研究(6), 土木研究所報告, No. 122, pp. 35~60, 1964
- 6) 柳場重正・川村満紀・鳥居和之 : 排煙脱硫石膏および高炉水砕スラグを使用した安定処理土における反応生成物と強度特性, 土木学会論文報告集, No. 320, pp. 77~88, 1982
- 7) 丸田俊久・内田郁夫 : カルシウムサルフォアルミネート系セメントによる有害金属の固定化, セメント技術年報, Vol. 32, pp. 116~119, 1978
- 8) 久楽勝行・三木博史 : 土中のフミン酸が土質改良効果に及ぼす影響, 土木技術資料, Vol. 26, No. 8, pp. 3~8, 1984
- 9) Handy, R.L. : Cementation of Soil Minerals with Portland Cement or Alkalis, Highway Research Board, No. 198, pp. 55~64, 1958
- 10) Michell, J.K. and S.A.E. Jack : The Fabric of Soli-Cement and its Formation, Proc. of the 14th Natio. Conf. on Clay and Clay Minerals, pp. 279~305, 1966
- 11) 川村満紀・柳場重正・杉浦精治 : 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, 土木学会論文報告集, No. 169, pp. 31~43, 1969
- 12) Croft, J.B. : The Influence of Soil Mineralogical Composition on Soil Stabilization, Geotechnique, Vol. 17, No. 2, pp. 119~135, 1967
- 13) Bezruk, V.M. : Soil Cement Mixes—A New Structural Material, Dorizdat, Gushosder-MVD-USSR, pp. 143~172, 1950
- 14) 大場正男・藤崎邦弥 : 土壤有機物がセメントの硬化に及ぼす影響, セメント・コンクリート, No. 237, pp. 2~8, 1966
- 15) Chu, T.Y., D.T. Davidson, et al. : Soil Stabilization with Lime-Fly Ash Mixtures, Highway Research Board, No. 108, pp. 102~112, 1955
- 16) 川村満紀・鳥居和之・柳場重正 : 石炭灰の土質安定処理への有効利用, 第 15 回 日本道路会議特定課題論文集, pp. 91~93, 1983
- 17) Terrel, R.E., et al. : Soil Stabilization in Pavement Structures, A User's Manual, Vol. 2, Federal Highway Administration Department of Transportation, 1979
- 18) 佐藤和義・小西英一郎 : 改良土の強度発現に及ぼすスラグの効果, セメント技術年報, Vol. 38, pp. 520~523, 1984
- 19) 斉藤聡・白井克己 : 普通ポルトランドセメントとスラグ系セメントを用いた改良土の硬化特性, セメント技術年報, Vol. 38, pp. 524~527, 1984
- 20) Kawamura, M., S. Hasaba, K. Torii and N. Nicho : Effective Utilization of L.D. Converter Slag as a Soil Stabilizer, Proc. of 2nd Australian Conf. on Engineering Materials, pp. 285~296, 1981
- 21) Kawamura, M. and S. Diamond : Stabilization of Clay Soils against Erosion Loss, Clays and Clay Minerals, Vol. 23, No. 6, pp. 444~451, 1975
- 22) 川村満紀・鳥居和之・柳場重正 : 排煙脱硫石膏および高炉水砕スラグの有効利用を目的とした安定処理土の降雨侵食特性, 土木学会論文報告集, No. 329, pp. 105~116, 1983
- 23) DiGioia, A.M. and W.L. Nuzzo : Fly Ash as Structural Fill, Journal of ASCE, Vol. 98, pp. 77~98, 1972
- 24) 山本康博・田中榮喜知・大木隆二 : 石炭灰の物理的工学的性質について, 電力土木, No. 183, pp. 41~48, 1983
- 25) 鳥居和之・川村満紀・柳場重正 : 締固めた石炭灰における反応生成物と強度に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集(投稿中)
- 26) 国土開発技術センター : 廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書, 1982
- 27) 野村高照・徳永良邦・榎戸恒夫 : 高炉水砕スラグの硬化特性とその抑制策, 製鉄研究, No. 301, pp. 19~28, 1980
- 28) 成田貴一・尾上俊雄・高田仁輔 : 転炉スラグの風化崩壊機構について, 鉄と鋼, Vol. 64, No. 10, pp. 68~77, 1978
- 29) M. R. カルマチュリヤ・内田一朗・出光隆 : 転炉スラグの路盤材への利用について, 土木学会論文報告集, No. 282, pp. 101~113, 1979

≪ 図 書 案 内 ≫

JCI-R1 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)

A 4 判・137 ページ/定価 3 500 円(会員特価 3 200 円)・送料 350 円

●申込先:(社)日本コンクリート工学協会「書籍販売係」

〒102 千代田区麹町 5-7 TBR ビル 708 号

電話 (03) 263-1571 (担当:上野)

<申込方法> 書籍名・送付先を明記のうえ,前金にてお申込みください。