

研究課題名・研究番号 = コンクリート解体微粉の地盤材料としての品質保証に関する研究

研究期間 = 2003-2004

代表研究者名 = 黒田泰弘 (清水建設)

共同研究者名 = 内山 伸 (清水建設)

研究目的 = 都市部では、高度経済成長期の建設された建造物の更新による廃コンクリートの増大に対し、現状の路盤材への再利用は限界に達しており、資源である骨材の有効利用の観点からもコンクリート分野での骨材リサイクル技術の確立が急務である。近年、再生骨材の製造技術の開発が進み、構造用コンクリートへ適用できる高品質再生骨材の製造が可能となった。しかし、その普及展開には、付着セメント分を除去する過程で発生する多量のコンクリート解体微粉（以降、微粉末と略記）の有効利用技術の確立が不可欠である。

筆者らは高品質再生骨材の製造技術の一つである加熱すりもみ法で得た微粉末が高い粉末度と弱い自硬性を有することに着目し、地盤材料としての適用を進めているが、今後の展開において有価物化は必須の条件と考えられる。微粉末を有価物として売買するには相応の品質とその保証ができなければならず、微粉末の固化性能を明らかとし、環境安全性を保証することが求められる。したがって、微粉末の再水和メカニズムの解明と土壌環境への六価クロムの溶出特性の把握は重要な研究課題であり、本研究の主目的とした。

研究方法 = 1. 微粉末の再水和メカニズムおよび六価クロムの溶出特性の検討

骨材を含まない硬化セメントペーストを破砕し、炭酸化（大気中の二酸化炭素によるコンクリートの経年変化を想定）や加熱処理温度を変え、加熱処理温度の違いや炭酸化の有無が、セメント水和物の分解やクリンカー鉱物の再合成に与える影響について検討した。また、破砕片を粉砕して微粉末を製造し、微粉末スラリーを練り混ぜ、スラリー硬化体の固化強度を測定するとともに、再水和物の化学分析を行い、微粉末の再水和メカニズムについて検討した。さらに、中性化（炭酸化）が進んでいる経年コンクリートを用い、加熱処理温度を変え、コンクリート微粉末を製造し、その再水和についても検討した。

また、環境安全性に関しては、加熱処理や炭酸化処理を行った硬化セメントペーストから得た微粉末および微粉末スラリーの硬化体に関して、六価クロム溶出量の検討を行うとともに、再資源化施設から入手した再生砕石（破砕コンクリート塊）に含まれるコンクリート微粉末からの六価クロム溶出特性についての検討を行った。

2. 微粉末を用いた改良土の固化強度と六価クロムの溶出の検討

地盤改良工法（浅層地盤改良と深層地盤改良）への微粉末利用を模擬した室内配合試験を行った。試験では、対象土の種類（砂、砂質土、シルト、ローム、粘土）、セメントの種類（普通ポルトランドセメント：OPC、高炉セメント B 種：BB、セメント系固化材：HK）、微粉末とセメントの配合量を変化させた。微粉末とセメントの配合量は、浅層地盤改良で 100～150kg/m<sup>3</sup>、深層地盤改良で 250kg/m<sup>3</sup> とし、微粉末とセメントの比率を変え、土を混合した固化体に対して、六価クロム溶出量、クロム含有量および固化強度を調べ

た。その結果をもとに、地盤改良の用途に応じて強度品質を確保しつつ、土壤環境基準にも適合する微粉末の添加量、適用条件などについて検討した。

## 結果と考察 = 1 . 微粉末の再水和メカニズムおよび六価クロムの溶出特性

(1) 100 以上の加熱処理微粉末は低いながらも強度発現した。400 以上の加熱処理微粉末にクリンカー鉱物  $C_3A$  の再合成が確認できること、また 400 以下の再水和物においてエトリンガイトの生成を確認できることから、100~400 の加熱処理微粉末は主に脱水したアルミネート相の再水和によって強度発現しているものと考えられる。

(2) 500 以上の加熱処理微粉末は 400 までのものと比較すると、明らかに高い強度発現をした。500 以上の加熱処理微粉末にクリンカー鉱物  $C_2S$  の再合成が確認されたこと、再水和物において  $C_2S$  が水和して放出したと考えられる  $Ca(OH)_2$  の増加を確認できることから、500~600 の加熱処理微粉末は主に再合成した  $C_2S$  の水和によって強度発現しているものと考えられる。

(3) 促進炭酸化を行ない、加熱処理した微粉末は、炭酸化処理を行わないものと比較して高い強度発現をした。C-S-H の一部は炭酸化によって分解し、シリカゲルを生成することから、このシリカゲルが加熱後、低含水シリカゲルとなり、再水和時には  $Ca(OH)_2$  とポゾラン反応して、より高い強度を発現したものと推察される。

(4) OPC 試料より BB 試料の方が加熱処理温度にかかわらず全体に強度発現が大きかった。BB 試料は非加熱でもわずかな強度発現があり、未水和スラグの影響が示唆される。

(5) 中性化(炭酸化)が進んでいる経年コンクリートから得た微粉末を製造し、再水和強度を調べた結果、シリカゲルのポゾラン反応によると思われる比較的高い強度発現が確認された。実用レベルでも加熱処理以降の微粉末の吸湿を抑えることで強度発現性能を向上できる可能性が示された。

(6) OPC を用いた加熱処理温度が 500~600 の微粉末でのみ、土壤環境基準 0.05ppm を超える六価クロムの溶出が確認された。加熱処理温度が 400 以上になると、セメント水和物の構造自体の崩壊が始まるため、これ以上高温で加熱されるほど六価クロムの溶出量が増加したと推察される。なお、300 までの加熱であれば、ほとんど影響はないと考えられる。なお、BB 試料からの溶出はほとんど認められなかった。

(7) OPC の再水和物で 500 加熱処理のもののみ土壤環境基準 (0.05ppm) を超え、600 加熱処理のものからの六価クロム溶出は少なかった。500 加熱では、600 加熱ほど  $C_2S$  が再合成されていないため、緻密な C-S-H が形成されていないだけでなく、不溶性の無水石膏が多く、AFt 相もほとんど生成していないことが原因として考えられる。

(8) 再生砕石からコンクリート微粉末のみをふるい分け、溶出試験した場合、非加熱であっても六価クロム溶出量が環境基準 0.05ppm を上回るケースがあった。比表面積が大きくなり、セメント付着分も多くなるだけでなく、微粉末自体の炭酸化も進んでいるためと考えられる。

## 2 . 微粉末を用いた改良土の固化強度と六価クロムの溶出

(1) 浅層改良におけるセメント種類と土質による改良土の固化強度の変化は、セメント種類別では全ての土質で  $HK > OPC > BB$  の順になり、土質別では全てのセメントで砂 > 粘土 > シルト > 砂質土 > ロームの順になった。

(2) 材齢 7 日の目標  $q_u=100 \sim 400kN/m^2$  の浅層改良で、強度品質を満足する材料配合の下限値は、ロームを除いて  $HK75kg/m^3 + 微粉末 75kg/m^3$  であった。

(3) 深層改良における土質による強度変化は、全てのセメントで砂 > 粘土 > シルト > 砂質土 > ロームの順になった。

(4) 材齢 28 日の目標  $q_u=400 \sim 600\text{kN/m}^2$  の深層改良で、強度品質を満足する材料配合の下限値は、全ての土質で  $\text{BB}150\text{kg/m}^3 + \text{微粉末 } 100\text{kg/m}^3$  であった。

(5) セメント量が増加すれば改良土の  $\text{Cr}^{6+}$  溶出量も増え、セメント量が同じならば、単体の  $\text{Cr}^{6+}$  溶出量が多いセメントを使うほど改良土の  $\text{Cr}^{6+}$  の溶出量も増加した。

(6) 土壤環境基準 ( $0.05\text{ppm}$ ) を満足する浅層改良の材料配合は、砂では微粉末のみ使用可能で、その量は  $100 \sim 300\text{kg/m}^3$  であった。セメントは BB のみを添加可能で、その量は  $50\text{kg/m}^3$  以下であった。砂質土、シルト、粘土では全ての材料および  $150\text{kg/m}^3$  以下の配合を用いることができた。

(7) 深層改良における土質とセメントの種類による  $\text{Cr}^{6+}$  溶出量変化は、全てのセメントでローム > 砂 > 砂質土 > シルト > 粘土の順になり、セメントの種類別では、セメント単体の  $\text{Cr}^{6+}$  溶出量の傾向と同様に OPC > BB であった。

(8) 深層改良の一般的な固化材量  $250\text{kg/m}^3$  では、固化材に BB あるいは BB と微粉末を使用すれば、いずれの土質でも、土壤環境基準 ( $0.05\text{ppm}$ ) を満足した。

(9) 改良土の構成材料単体の  $\text{Cr}^{6+}$  溶出量と乾燥質量比から求めた計算値と測定値を比較した結果、土質とセメントの組合せで以下の関係が認められた。

砂、ローム (全てのセメント) ; (測定値) =  $4 \times$  (計算値)

砂質土、シルト、粘土 (OPC) ; (測定値) (計算値)

砂質土、シルト、粘土 (OPC 以外); (測定値) (計算値)

したがって、個々の材料の  $\text{Cr}^{6+}$  溶出量と土の物理定数 (湿潤単位体積重量、含水比) から、改良土の  $\text{Cr}^{6+}$  溶出量 (上限値) を概ね把握できる可能性が得られた。

(10) ロームおよび砂のセメントによる地盤改良では、セメントと土の硬化反応の過程で、土またはセメントが潜在的に持つ  $\text{Cr}^{3+}$  で、 $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{6+}$  反応が喚起されて、 $\text{Cr}^{6+}$  溶出量が増加する可能性が示唆された。なお、ロームに関しては固化強度が低いと、火山灰質粘性土に含有されるアロフェンが影響していることも考えられる。

結論 = 再生骨材製造時に発生する微粉末の再水和メカニズムを明らかとするとともに、六価クロムの溶出特性を把握した。さらに、対象土の種類や地盤改良の用途に応じて強度品質を確保しつつ、土壤環境基準にも適合する微粉末の添加量、適用条件などについても明らかにした。