

論文 再生骨材に伴い発生する副産微粉末を用いた改良土の固化強度とCr(VI)溶出量

黒田 泰弘^{*1}・内山 伸^{*2}

要旨：コンクリートのクローズドリサイクルの普及展開において、再生骨材製造時に副産する微粉末の再利用用途の確立は重要な課題である。本研究では、加熱すりもみ法で得られた微粉末を対象に、地盤改良工法への利用を模擬して室内配合試験を実施した。対象土の種類（砂、砂質土、シルト、ローム、粘土）、固化材の種類（微粉末、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、セメント系固化材）、対象土と固化材の配合量を変化させた固化体を作製して検討を行い、地盤改良の用途に応じて強度を確保しつつ、土壤環境基準にも適合する微粉末の適用条件を明らかとした。

キーワード：廃コンクリート、副産微粉末、地盤改良、固化強度、Cr(VI)溶出量

1. はじめに

廃コンクリートのリサイクル率は現在極めて高い水準にあるものの、そのほとんどが路盤材への利用であり、高度経済成長期に建設された構造物が更新時期を迎え、廃コンクリートの排出量の増加が予想されるなか、再利用用途の拡大は急務である。こうした中、再生骨材の製造技術の発展により、再生骨材を構造用骨材として一般のコンクリート構造に再利用するクローズドリサイクルが可能となっている¹⁾が、その普及展開にあたって、再生骨材製造時に発生する多量の副産微粉末（以下、微粉末と略記する）の再利用用途の確立が重要な課題となっている。

微粉末は、既往の研究²⁾において、セメント原料として有効利用できることが示されているが、現状ではその受け入れ態勢は十分でなく、経済的にも成立しがたい状況にある。このため、筆者らは地盤改良工法への適用を有望な用途と考え、加熱すりもみ法³⁾によって得られた微粉末を対象に種々の検討^{4),5)}を実施してきた。一方、微粉末のような副産物を処理、再利用する際には「環境安全性」を検証することが求められ、地盤材料に適用する際には、改良土からの

重金属類の溶出試験結果が環境庁告示 46 号法「土壤の汚染に係る環境基準」を満足しなければならない。本研究では、微粉末の地盤改良工法への利用を模擬した室内配合試験を実施し、地盤改良の用途に応じて強度を確保しつつ、土壤環境基準にも適合する微粉末の適用条件について検討を行った。

2. 地盤改良工法における微粉末の役割

2.1 浅層地盤改良

浅層地盤改良は、掘削工事に伴って発生する軟弱な土の性状改善、建築物周囲の埋戻し復旧、建設重機のための仮設地盤構築など多岐の用途があり、その施工は対象とする土（地盤）とセメントあるいはセメント系固化材を重機で混合攪拌する方法が一般的である。

表層改良で要求される一軸圧縮強さ qu は、地盤復旧程度から重機作業床の目的では、材齢 7 日で $100\sim 400\text{kN/m}^2$ 程度と想定され、事前の室内試験結果では、沖積粘性土あるいは砂質土の改良では必要な固化材量は 50kg/m^3 前後となる場合が多い。しかし、ごく少量の粉体と土とを均一に混合することは難しいため、実際の施工

*1 清水建設（株） 技術研究所主任研究員 工修（正会員）

*2 清水建設（株） 技術研究所副主任研究員 工博

ではその2倍の100kg/m³程度が添加されるケースが多い。また、シルトや粘土を多く含む軟弱土や高含水土では、物理的に攪拌が難しいことに加え、施工中に水の供給が断続的に行われるため、強度不足や局部的な高強度などの不均一による固化不良が発生しやすく、固化材の量をさらに増加しなければならない。

本研究では、微粉末の役割を、このような浅層地盤改良の施工上の不具合（攪拌の不均一、水分過多）を是正するために加える増量材と位置づけ、微粉末を合わせた固化材量を100～150kg/m³とし、室内配合実験を行うこととした。

2.2 深層地盤改良

深層地盤改良は、本設構造物の基礎、地盤の補強など湾岸地域や沖積地盤での地下工事で広く使われる建設地業である。このうち、地下掘削工事の止水山留め壁として用いられるソイルセメント壁の施工は、機械を用いてセメントスラリーを地中に注入しながら地盤を攪拌し、円柱状の固化体（ソイルセメント）を連続的に構築するものである。

ソイルセメント壁に使われるセメントスラリーの一般的な材料とその配合は、改良土体積1.0m³あたりセメント250～280kg、ベントナイト10～30kg、水粉体比2.0～2.2、置換率65～72%程度である。これらの配合値は、施工性（材料攪拌性、応力材挿入性）を重視して、経験的に求められた数値である。そのため、ソイルセメントの固化強度は、掘削時の地盤の側圧から計算される必要な値（一軸圧縮強さ $qu=400\sim600$ kN/m²）に対して2～5倍過大となっている場合が多い。

本研究では、微粉末の役割を、深層地盤改良における施工性の確保と過大な強度を抑制するために加えるセメントの置換材と位置づけ、微粉末を合わせた固化材量を250kg/m³とし、室内配合実験を行うこととした。なお、微粉末を使用した場合、セメントスラリーの見掛けの粘性が増加し、材料分離抵抗性が増すため、ベントナイトは使用しないこととした。

3. 実験の概要

3.1 使用材料

一般的な原位置土として、砂、砂質土、シルト、火山灰質粘性土（以下、ロームと称する）、粘土の5種類を選定した。いずれも関東地方にある建設現場から採取したものである。表-1に土試料の土質試験結果を示す。

固化材としては、普通ポルトランドセメント（OPC）、高炉セメントB種（BB）、地盤改良用固化材（HK）および微粉末を用いた。表-2に建設年代の異なる微粉末の諸特性と微量成分の溶出試験結果を示す。微量成分の溶出量で土壤環境基準を上回ったのは比較用のBBを含め、Cr(VI)溶出量のみであった。なお、微粉末Eを用いたペースト硬化体の固化強度が最も低く、Cr(VI)溶出量が土壤環境基準を上回ることから、これを今回の試験に用いることとした。

表-1 土試料の土質試験結果

| 項目 | 砂 | 砂質土 | シルト | ローム | 粘土 |
|------------------------|---------|-------|-------|---------|-------|
| 密度(g/cm ³) | 2.687 | 2.726 | 2.758 | 2.587 | 2.661 |
| 粒度 | 礫分(%) | 0.5 | 0 | 2.9 | 0 |
| | 砂分(%) | 85.1 | 58.9 | 31.7 | 14.1 |
| | シルト分(%) | 10.5 | 26 | 36.8 | 63.7 |
| | 粘土分(%) | 3.9 | 15.1 | 31.5 | 19.3 |
| 自然含水比(%) | 5.3 | 43.3 | 63.4 | 86.8 | 75.9 |
| 液性限界(%) | | 41.6 | 67.1 | 111.9 | 71.0 |
| 塑性限界(%) | | 19.6 | 33.5 | 63.7 | 33.5 |
| 強熱減量(%) | 3.3 | 3.9 | 6.7 | 17.8 | 6.2 |
| pH | 7.7 | 7.0 | 6.9 | 7.3 | 7.6 |
| 土質分類 | 細粒分混砂 | 細粒分質砂 | シルト | 火山灰質粘性土 | 粘土 |

表-2 微粉末の諸特性と微量成分の溶出量

| 種類* | 密度(g/cm ³) | 比表面積(cm ² /g) | 固化強度** (kN/m ²) | | 微量成分の溶出量 (mg/L) | | | | |
|-------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------|-----------------|--------|--------|--------|---------|
| | | | 1週 | 4週 | カドミウム | 鉛 | Cr(VI) | 砒素 | 総水銀 |
| 微粉末A (1930) | 2.50 | 4,870 | 110 | 280 | <0.001 | <0.005 | <0.04 | <0.005 | <0.0005 |
| 微粉末B (1960) | 2.43 | 5,930 | 230 | 740 | <0.001 | <0.005 | 0.04 | <0.005 | <0.0005 |
| 微粉末C (1970) | 2.50 | 5,660 | 890 | 1,840 | <0.001 | <0.005 | <0.04 | <0.005 | <0.0005 |
| 微粉末D (1970) | 2.49 | 6,520 | 520 | 1,010 | <0.001 | <0.005 | <0.04 | <0.005 | <0.0005 |
| 微粉末E (1970) | 2.46 | 6,280 | 50 | 110 | <0.001 | <0.005 | 0.13 | <0.005 | <0.0005 |
| 高炉B種 | 3.04 | 3,970 | 23,600 | 50,100 | <0.001 | 0.005 | 0.57 | <0.005 | <0.0005 |
| 土壤環境基準 | | | | | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.0005 |

* ()は微粉末の原料となったコンクリート構造物の建設年代

** W/P=50%の微粉末ペースト硬化体の一軸圧縮強さ

3.2 配合および改良土の作製方法

(1) 浅層地盤改良

浅層改良土の配合条件を表-3に示す。全ての対象土に対し、微粉末とセメントを 75kg/m^3 ずつ加えた。また、砂とシルトに関しては、微粉末とセメントを 50kg/m^3 ずつ加えた配合、微粉末のみ 300kg/m^3 加えた配合についても検討した。

試料作製は、自然含水状態の土試料に、乾燥した粉体状態のセメントと微粉末を添加し混合して行った。このとき、最終的な混合状態が適切になるよう土質ごとに加水調整した。最終含水比の目安は、砂と砂質土は約 25%、シルトと粘性土はそれぞれの土の塑性限界とした。供試体作製は、砂と砂質土の場合は 4 層突き固めとし、シルト、ローム、粘性土は、オーバーコンパクションを避けるため詰込み処理とした。

(2) 深層地盤改良

深層改良土の配合条件を表-4に示す。全ての対象土に対し、改良土に内割で微粉末 50kg/m^3 、セメント 200kg/m^3 とした。また、砂とシルトに対しては、微粉末 100kg/m^3 とセメント 150kg/m^3 とした配合およびセメントのみを 250kg/m^3 とした配合についても検討した。

試料作製は、セメントと微粉末と水からなるスラリーをホバートミキサで練り混ぜ、さらに自然含水状態の土を加え、混合して行った。セメントと微粉末の合計量と水粉体比の値を固定し、土に対するスラリーの置換率を一定にした。供試体は 2 層に分け、流し込み処理により作製し、気泡を除くため、軽いタッピングを行った。

3.3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法は表-5のとおりである。改良土の溶出試験には、材齢 7 日の一軸圧縮強さ試験終了後に粗砕し、温度 20°C 、相対湿度 60% の恒温恒湿室で約 1 週間かけて風乾としたものを用いた。また、Cr(VI)の定量は、ジフェニルカルバジド吸光光度法 (JIS K 0102 65.2.1) によった。なお、硫酸を加えてからジフェニルカルバジドを加えるまでの時間は土木学会の案⁷⁾を参考に 1 分とした。

表-3 浅層改良土の配合条件

| 浅層改良 | セメント、セメント系固化材(kg/m^3) | | |
|----------------------------|----------------------------------|----|----|
| | 0 | 50 | 75 |
| 微粉末 (kg/m^3) | 50 | ○ | |
| | 75 | | ◎ |
| | 300 | ○ | |
| 備考 | ◎: 砂、砂質土、シルト、ローム、粘土 ○: 砂、シルト | | |

表-4 深層改良土の配合条件

| 深層改良 | セメント(kg/m^3) | | |
|----------------------------|-----------------------------------|-----|-----|
| | 150 | 200 | 250 |
| 微粉末 (kg/m^3) | 0 | | ○ |
| | 50 | ◎ | |
| | 100 | ○ | |
| 備考 | ◎: 砂、砂質土、シルト、ローム、粘土 ○: シルト、ローム | | |

表-5 試験項目および試験方法

| 試験項目 | 試験方法 | 備考 |
|-----------|--|----------------------|
| 一軸圧縮強さ | JIS A 1216 | 改良土について材齢7日と材齢28日に試験 |
| Cr(VI)溶出量 | 環告46号による溶出試験 JIS K 0102 65.1.2による分析 | 使用材料および改良土について試験 |
| Cr含有量 | 63環水管127号による分解 JIS K 0102 65.1.2による分析 | 使用材料について試験 |

4. 実験結果および考察

4.1 一軸圧縮強さ

(1) 浅層地盤改良

材齢 7 日の改良土の一軸圧縮試験結果を図-1に示す。微粉末 75kg/m^3 とセメント 75kg/m^3 を添加した改良土の一軸圧縮強さは、セメント種類別では全ての土質で $\text{HK} > \text{OPC} > \text{BB}$ 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。ローム改良土の一軸圧縮強さは、最も強度発現の大きい HK でも $q_u = 100\text{kN/m}^2$ と低かったものの、その他の土質では一般的な用途での材齢 7 日の目標強度 $q_u = 100 \sim 400\text{kN/m}^2$ を概ね満足した。

一方、微粉末 50kg/m^3 とセメント 50kg/m^3 を添加した改良土の一軸圧縮強さは、微粉末 75kg/m^3 とセメント 75kg/m^3 を添加した場合より低下したものの、砂に関しては目標強度を満足する強度レベルであった。なお、微粉末のみの添加では、 300kg/m^3 を添加しても十分な強度発現は得られなかった。

(2) 深層地盤改良

材齢 28 日の改良土の一軸圧縮試験結果を図-2に示す。微粉末 50kg/m^3 とセメント 200kg/m^3 を混入した改良土の土質による強度変化は、全

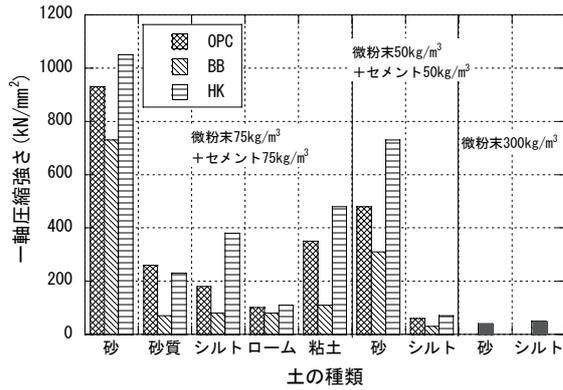


図-1 浅層改良土の固化強度(材齢 7 日)

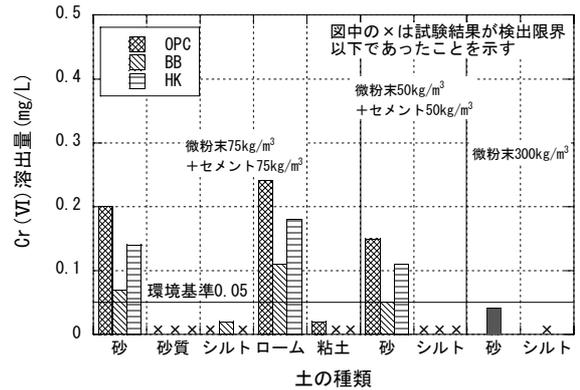


図-3 浅層改良土からの Cr(VI)溶出量

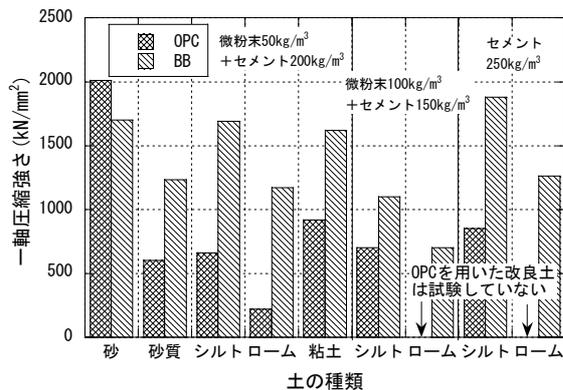


図-2 深層改良土の固化強度(材齢 28 日)

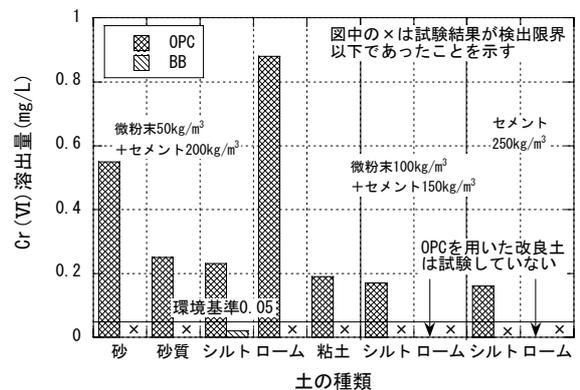


図-4 深層改良土からの Cr(VI)溶出量

表-6 使用材料の Cr(VI)溶出量と Cr 含有量

| 項目 | Cr(VI)溶出量 (mg/L) | Cr含有量 (mg/kg) | 項目 | Cr(VI)溶出量 (mg/L) | Cr含有量 (mg/kg) |
|-----|------------------|---------------|-----|------------------|---------------|
| 微粉末 | 0.13 | 76 | 砂 | <0.02 | 110 |
| OPC | 0.71 | 159 | 砂質土 | 0.02 | 67 |
| BB | 0.53 | 78 | シルト | <0.02 | 146 |
| HK | 0.58 | 84 | ローム | <0.02 | 202 |
| | | | 粘土 | 0.04 | 170 |

でのセメントで砂>粘土>シルト>砂質土>ロームの順になった。これは浅層改良と同様の結果である。

また、微粉末を 100kg/m³、BB を 150kg/m³ とし、セメント量を減らしたケースでは、最も強度の低いローム改良土でも qu=699 kN/m² という一軸圧縮強さが得られており、材齢 28 日の目標強度 qu=400~600kN/m² を満足するものであった。このことは、強度面では通常の深層改良の配合から、BB の量を 100kg/m³ 程度まで微粉末に置換できる可能性があることを示すものである。

4.2 六価クロム溶出量

(1) 使用材料

使用材料の Cr(VI) 溶出量と Cr 含有量の測定結果を表-6 に示す。微粉末の Cr(VI) 溶出量は 0.13mg/L で、セメント (0.53~0.71mg/L) の 1/4~1/6 であった。また、対象土からの溶出量はそれより小さく<0.02~0.04mg/L であった。

一方、Cr 含有量は微粉末で 76mg/kg であり、BB とほぼ同じであったが、OPC の Cr 含有量は 159mg/kg と、比較的高いレベルのものであった。対象土の Cr 含有量は 67~202mg/kg で、固化材と同等か、幾分高い値であった。なお、対象土の Cr(VI) 溶出量と Cr 含有量との間には特に関係は認められなかった。

(2) 浅層改良土

改良土からの Cr(VI) 溶出量の測定結果を図-3 に示す。微粉末 75kg/m³ とセメント 75kg/m³ を添加した改良土で、土壤環境基準 (0.05mg/L) を上回る Cr(VI) 溶出量が認められたのは砂とロ

ームの改良土であり，その他の土質では検出限界以下 ($<0.02 \text{ mg/L}$) のものがほとんどであった。なお，Cr(VI)溶出量が多い砂の改良土でも，微粉末を 50kg/m^3 ，BB を 50kg/m^3 としたケースで Cr(VI)溶出量を 0.05 mg/L まで減らせ，固化材量を減ずることで必要な強度を確保しつつ，環境基準を満足することが可能なことがわかった。また，微粉末のみ 300kg/m^3 添加したケースではシルトだけでなく，砂でも環境基準を下回った。

一方，ロームの改良地盤は他の土質に比べ，強度発現が悪いだけでなく，Cr(VI)溶出量も環境基準を満足できなかった。ロームに含まれるアロフェンの影響⁸⁾が一因として考えられる。

(3) 深層改良土

改良土からの Cr(VI)溶出量の測定結果を図-4 に示す。OPC 改良土の Cr(VI)溶出量は，試験を行った全てのケースで土壤環境基準を超えており，ローム>砂>砂質土>シルト>粘土の順であった。一方，BB 改良土の Cr(VI)溶出量は全てのケースで土壤環境基準を満足するものであった。なお，ロームの OPC 改良土の Cr(VI)溶出量は 0.88mg/L であったが，この数値は OPC 単体の値 (0.71mg/L) や土の値 ($<0.02\text{mg/L}$) より大きなものであった。

(4) 計算値との比較

改良土の Cr(VI)溶出量を，配合を指標にして比較することは難しい。そこで，各改良土の配合から求められる構成材料(セメント，微粉末，土)の実質的な乾燥質量比を指標に，Cr(VI)溶出試験結果を整理することにした。

表-7は，工法毎，土毎に算出した改良土の単位乾燥質量あたりの材料質量配合比である。ここで，土の含水比は土質試験値を用い，砂と砂質土の湿潤単位体積重量を 1.80g/cm^3 に，シルト，ローム，粘土の湿潤単位体積重量を 1.65g/m^3 に仮定した。計算の結果，固化材の乾燥質量比は土質の違いによって，6~9% (100kg/m^3)，8~14% (150kg/m^3)，26~51% (250kg/m^3) となった。

図-5 と図-6 は，Cr(VI)溶出量の計算値と測

表-7 改良土中の土と固化材の乾燥質量比

| 土 (含水比) | 改良工法 | 固化材配合量 (kg/m^3) | 乾燥質量比 (%) | |
|-----------|------|----------------------------|-----------|----------------|
| | | | 土 | 固化材 (セメント+微粉末) |
| 砂 (5%) | 浅層 | 100 | 94 | 6 |
| | | 150 | 92 | 8 |
| 砂質土 (43%) | 浅層 | 150 | 89 | 11 |
| | 深層 | 250 | 54 | 46 |
| シルト (63%) | 浅層 | 100 | 91 | 9 |
| | | 150 | 87 | 13 |
| | 深層 | 250 | 63 | 37 |
| ローム (86%) | 浅層 | 150 | 86 | 14 |
| | 深層 | 250 | 47 | 53 |
| 粘土 (75%) | 浅層 | 150 | 86 | 14 |
| | 深層 | 250 | 49 | 51 |

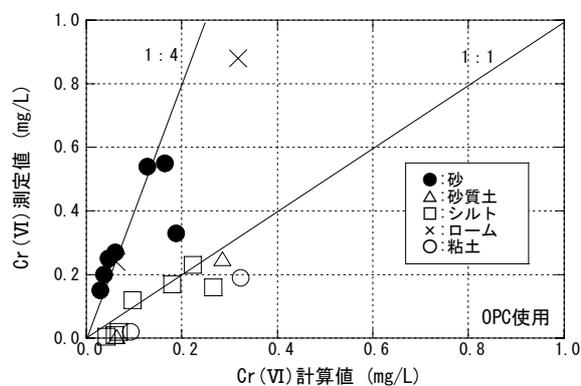


図-5 Cr(VI)溶出量の計算値と測定値の関係 (OPC 改良土)

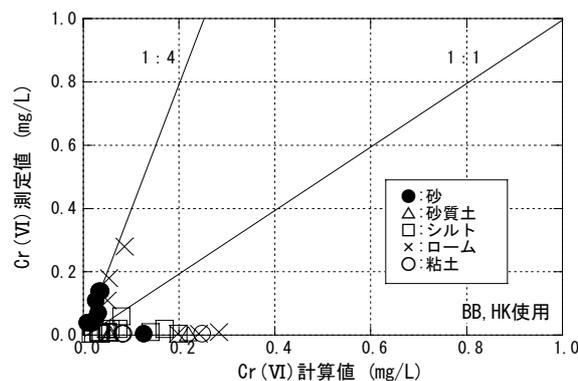


図-6 Cr(VI)溶出量の計算値と測定値の関係 (OPC 以外の改良土)

定値の関係である。計算値は，改良土の乾燥質量比と材料単体の Cr(VI)溶出量から算術的に求めた。なお，測定値のうち，検出限界以下の値 (<0.02 と表記) は一律に 0.005mg/L とした。

OPC を用いた改良土では土質毎に比例関係が認められた。砂，ロームでは計算値の 4 倍程度

であり、砂質土、シルトでは 0.1mg/L 未満を除いて計算値とほぼ等しいか、計算値以下であった。OPC 以外の改良土では、砂とロームは一部（深層改良土）を除いて OPC 改良土と同様に、測定値は計算値のおよそ 4 倍となったが、砂質土、シルト、粘土では、計算値より遥かに小さく、土壤環境基準以下となった。

なお、土質によりこうした差を生じた原因の解明については今後の課題である。

5. 結論

対象土の種類（砂、砂質土、シルト、ローム、粘土）、固化材の種類（微粉末、普通ポルトランドセメント：OPC、高炉セメント B 種：BB、地盤改良用固化材：HK）、対象土と固化材の配合量を変化させて、室内配合試験を行った。主な試験結果は以下に示すとおりである。

(1) 浅層改良における改良土の一軸圧縮強さは全ての土質で、HK>OPC>BB の順であり、土質別では砂>粘土>シルト>砂質土>ロームの順であった。また、材齢 7 日の目標強度 $qu=100\sim400\text{kN/m}^2$ を満足する材料配合を、ロームを除く対象土で明らかとした。

(2) 深層改良における改良土の一軸圧縮強さは全ての土質で、BB>OPC の順であり、土質別では浅層改良と同様に、砂>粘土>シルト>砂質土>ロームの順であった。また、材齢 28 日の目標強度 $qu=400\sim600\text{kN/m}^2$ を満足する材料配合を全ての対象土で明らかとした。

(3) 固化材の Cr(VI) 溶出量は OPC>HK>BB>微粉末の順で、試験に用いた微粉末の Cr(VI) 溶出量はセメントの 1/4~1/6 の値であった。

(4) 浅層改良の場合、Cr(VI) 溶出量は砂とロームで土壤環境基準を上回った。ただし、砂の場合には BB を用い、添加量を減らすことで、必要強度を確保しつつ、環境基準を満足できることがわかった。

(5) 深層改良の場合、OPC 改良土の Cr(VI) 溶出量は、試験を行った全てのケースで土壤環境

基準を超えたが、BB 改良土の Cr(VI) 溶出量は全て土壤環境基準を満足するものであった。

(6) 改良土から溶出した Cr(VI) の測定値と、構成材料単体の Cr(VI) 溶出量と乾燥質量比から求めた計算値とを比較した結果、以下の関係が認められた。

- ・ 固化材の種類によらず、砂、ロームの改良土の測定値は、計算値の約 4 倍となった。
- ・ OPC を用いた砂質土、シルト、粘土の改良土の測定値は、計算値とほぼ同等となった。
- ・ OPC 以外の固化材を用いた砂質土、シルト、粘土の改良土の測定値は、計算値より遥かに小さく、土壤環境基準以下となった。

謝辞：本研究は環境省の平成 15 年度廃棄物処理等科学研究費補助金 (K1509) により行われました。ここに記して、厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 黒田泰弘ほか：コンクリート資源循環システムを適用した建築工事—サステナブルコンクリートの施工—、コンクリート工学 Vol. 40, No. 2, pp. 64-70, 2002
- 2) 田中久順ほか：廃コンクリートの微粉を混合したセメントの物性、pp. 326-327, 第 55 回セメント技術大会要旨, 2001
- 3) 古賀康男ほか：原子力発電所解体コンクリートからの骨材の分離技術、放射性廃棄物研究 16, No. 2, pp. 17-25, 1996
- 4) 内山 伸ほか：加熱すりもみ処理した解体コンクリート微粉の固化特性、土木学会第 57 回年次学術講演会 III-307, pp. 73-74, 2002
- 5) 内山 伸ほか：加熱・磨砕処理したコンクリート微粉を用いる深層混合処理工法、基礎工 7 月号, pp. 62-65, 2003
- 6) 島 裕和ほか：再生骨材微粉を混和した高流動コンクリートの諸性質 第 3 報 (その 1)、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 671-672, 2001
- 7) 土木学会：コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題、コンクリートライブラリー, 2003. 05
- 8) 細谷俊夫：セメント系固化材と六価クロム、材料, Vol. 51, No. 8, pp. 933-942, 2000