

# 盛土材料としての破碎コンクリートの工学的性質と再生化手段の検討

## A study on engineering properties and recycling method of crushed concrete aggregates as a geomaterials

21N3100058L 渡邊 一矢 (地盤工学研究室)  
Kazuya WATANABE / Geotechnical Lab.

**Key Words :** crushed concrete aggregate, recycled geomaterial, mechanical property, hexavalent chromium

### 1. はじめに

我が国では循環型経済社会システムの構築を目指しており、建設分野では建設副産物の活用が求められている<sup>1)</sup>。コンクリート塊(以下、破碎コンクリートと表記)は最も排出量の多い建設副産物で、「原材料として利用の可能性があるもの」と位置付けられている<sup>1)</sup>。破碎コンクリートは再生工場で粉碎され、クラッシュランの粒度に調整される。破碎コンクリートは、現状では路盤材として活用が主で、盛土材としてはほぼ用いられていない。この理由は、「物性が未解明なために設計・施工条件の設定ができないこと」と「六価クロムCr(VI)の溶出の可能性」が挙げられる。これらは力学的特性/環境特性と個別の論点となるが、その要因は破碎コンクリート粒子が「ペーストと骨材の複合構造体」であることに起因する。ペーストは多孔質で、その内部にはセメントに由来するCr(VI)が含まれる。本研究では盛土材としての活用に向けて、市販の3種類の破碎コンクリートを用いてそれらの工学的性質(粒子の特性、締固め特性および強度変形特性)を把握するとともに設計・施工上の留意点を整理した。また、盛土からのCr(VI)溶出を防ぐ方法として、再生化の過程で通水洗浄を行うことの有効性を検討した。

### 2. 使用材料と研究概要

3種類の破碎コンクリートは試料A, B, Cと表記する。試料A, Bは同一の再生工場で別時期に生産されたものである。いずれの試料も原粒度はRC-40であるが、突き固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)や三軸圧縮試験を行うために最大粒径 $D_{max}=19\text{ mm}$ のせん頭粒度に再調整した(図-1)。また、図-2に各試料の概要を示す。破碎コンクリート粒子は骨材とペーストで構成される複合構造体であることが見て取れる。ペーストは多孔質で粒子破碎しやすい。一般的に顕著な破碎特性を有する土は盛土材には用いられない。粒子破碎性はスレーキング特性の有無で判定される。乾湿繰返しを行って粒子の安定性を調べたところ、本研究で用いた3試料いずれもスレーキング特性はなかった(図-1)。これより粒径区分に基づいた強度値(例えば、礫質土の設計用値 $\phi=$

$35^\circ$ )を満たしていれば、破碎コンクリートは力学的には盛土材として活用できることになる。検討した試料の強度定数(粘着力 $c$ , 内部摩擦角 $\phi$ )は $1.0E_c$ —最大乾燥密度 $\rho_{tmax}$ の密度状態(締固め曲線は後述)、三軸試験(CD試験)で試料A(20kPa,  $44.8^\circ$ ), 試料B(14kPa,  $51.1^\circ$ ), C(30kPa,  $45.4^\circ$ )と十分に高く、潜在的な強度値にも問題は無い。したがって、破碎コンクリートを盛土材として用いるうえでの力学的な論点は、

- ・密度比 $D_c$ 値による施工管理方法の適用の可否
  - ・設定 $D_c$ 値等の留意点の有無
- となる。

一方、セメントに含まれるCr(VI)は微量で水溶性であることが知られている<sup>2)</sup>。水溶性であるために、含有量は微量であっても一時的に濃縮して盛土から溶出する可能性が危惧される。本研究では3試料のペーストの化学組成を蛍光X線分析(検量線法)で求めており(表-1)、全Cr量はいずれの試料でも微量であることを確認して

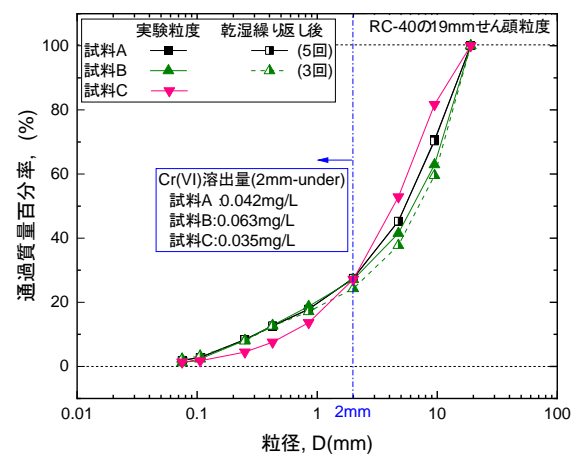


図-1 実験粒度

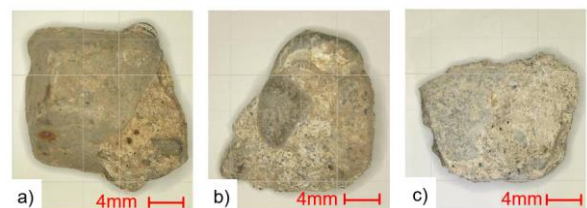


図-2 粒子の概要 : a)試料A, b)試料B, c)試料C

表-1 試料 A, B, C のペーストの化学組成

[単位: 質量%]

	ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr
試料A	12.31	53.68	9.22	3.16	16.48	1.48	0.45	1.54	1.05	0.29	0.05	0.08	0.006
試料B	10.07	55.26	8.88	3.58	17.45	1.63	0.48	1.22	1.11	0.36	0.07	0.10	0.005
試料C	10.38	54.58	11.72	4.66	13.49	1.62	0.34	2.12	1.00	0.46	0.10	0.10	0.006

いる。全 Cr の大部分は安定的な 3 価の状態にあると考えられているが、3 価 : 6 価の定量的な関係を把握することは難しい。

破砕コンクリートからの Cr(VI) 溶出量は環境庁告示第 46 号法による検液作成条件、ジフェニルカルバジド吸光光度法 (JISK 1210) で測定される。本研究で用いた試料では、試料 A : 0.042 mg/L, 試料 B : 0.063 mg/L, 試料 C : 0.035 mg/L と試料 B のみ環境基準値 (=0.05 mg/L) を上回った。これら 3 試料では、試料 A・C は特段の対応をしないで盛土材として用いることができる一方、試料 B は溶出抑制への何らかの対応が求められる。経済的で効果的な方法が確立できれば、破砕コンクリートの(再生)盛土材としての活用の目途が得られる。この方法としては「封じ込め」と「浄化」の 2 つの方向性があるが、本研究では浄化に注目した。破砕コンクリートは工場製品であることを踏まえ、再生化の過程で通水することによる Cr(VI) の洗浄について検討・提案した。

### 3. 力学特性

検討した 3 試料の締固め試験 (JISA 1210, A-b 法) 結果を図-3 に示す。ρ<sub>dmx</sub> 値は試料 A : 1.845 g/cm<sup>3</sup>, 試料 B : 1.792 g/cm<sup>3</sup>, 試料 C : 1.660 g/cm<sup>3</sup> と天然の礫質土よりも小さい。これは、多孔質構造のペーストが粒子の一部を構成する破砕コンクリートの特徴的な特性である。また、締固め曲線の形状は山が低く、試料 C のように上側に凸の特性を示さない場合もある。この原因は、破砕コンクリート粒子の形状が角張っていること、ペーストの表面粗度が高いことが複合的に反映された結果であろう。

一方、ρ<sub>dmx</sub> 値が小さいことから、取り得る D<sub>c</sub> 値の幅も小さくなる可能性がある。例えば、試料 B の D<sub>c</sub>=90% 値は ρ<sub>ti</sub>=1.613 g/cm<sup>3</sup> となるが、この密度値を実現する E<sub>c</sub> 値は非常に小さくなると推測され、この場合は不十分な施工管理条件を許容することになりかねない。破砕コンクリートの粒子の特徴(複合構造体、ペーストは多孔質で高い表面粗度を持つ)を踏まえ、構造物に求められる剛性・強度を發揮できる土粒子構造を構築するための施工管理条件を見出す必要がある。このためには D<sub>c</sub> 値~強度変形特性の関係性の把握が求められる。本研究では系統的な三軸圧縮試験を行い、D<sub>c</sub> 値~強度変形特性を調べた。

三軸試験の供試体はφ100×高さ 200 mm である。全ての

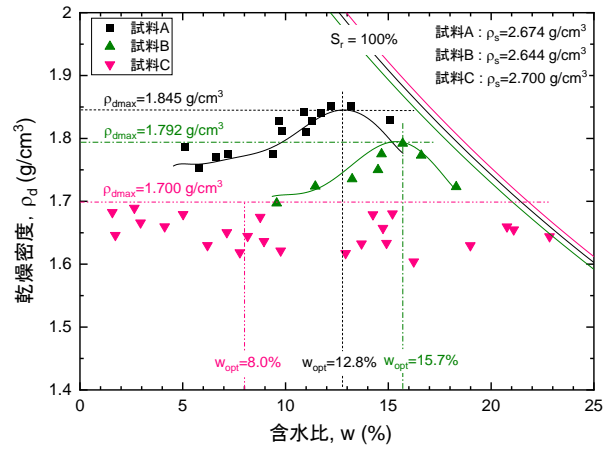


図-3 締固め曲線(A-b 法)

供試体は 1.0E<sub>c</sub> の w<sub>opt</sub> に含水調整し、JISA 1210 の A 法のランマーを用いて突固めて作成した。落下回数を変化させることで所定の D<sub>c</sub> 値となるように供試体を作成した。飽和化後、K=0.5, 有効拘束圧 σ<sub>3</sub>=40 kPa で異方圧密して排水条件で軸圧縮した。

D<sub>c</sub> 値の変化に伴う強度変形特性の差異を図-4 に示す。

図-4 は主応力比 R (=σ<sub>1</sub>/σ<sub>3</sub>) - 軸ひずみ ε<sub>a</sub> - 体積ひずみ ε<sub>v</sub> 関係で、試料ごとにまとめた。また、各試料の最大主応力比 R<sub>max</sub> を算出し、D<sub>c</sub> 値に対して整理した結果を図-5 に示す。図-4~5 から得られる重要な知見を以下にまとめる；

- 1) 撒きだし時での D<sub>c</sub> 値は約 85% であり、D<sub>c</sub>=90% の密度状態は 0.1~0.2 E<sub>c</sub> で実現する (図-5)。
- 2) D<sub>c</sub>=90% の密度状態は総じて緩く、3 試料いずれにおいてもせん断過程でダイラタンシー挙動は強くない (図-4)。
- 3) D<sub>c</sub>=約 94% を境に強度増加率は異なる (図-5)。D<sub>c</sub>>約 94% の密度状態では、D<sub>c</sub> 値の増加に伴って体積膨張挙動が強く表れて剛性・強度値は加速的に増加する (図-4)。

上記の結果は、破砕コンクリートにおいても天然の砂礫材と同様に、D<sub>c</sub> 値管理が適用できることを示している。しかしながら、道路盛土等で一般的に設定される D<sub>c</sub>=90% の密度状態は、破砕コンクリートにおいては総じて緩く、締固めで構築した土粒子構造は強くない。土粒子構造の模式図を図-6 に示す。D<sub>c</sub><約 94% のように締固めが不十分な場合、破砕コンクリート粒子の接触

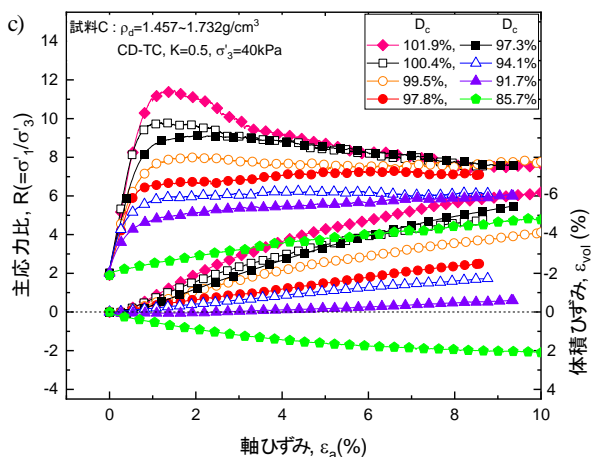
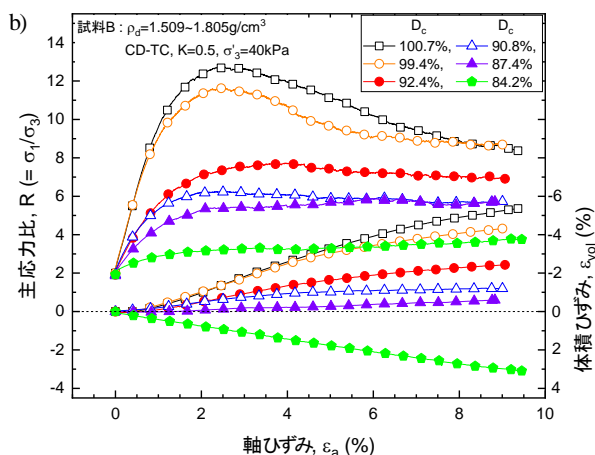
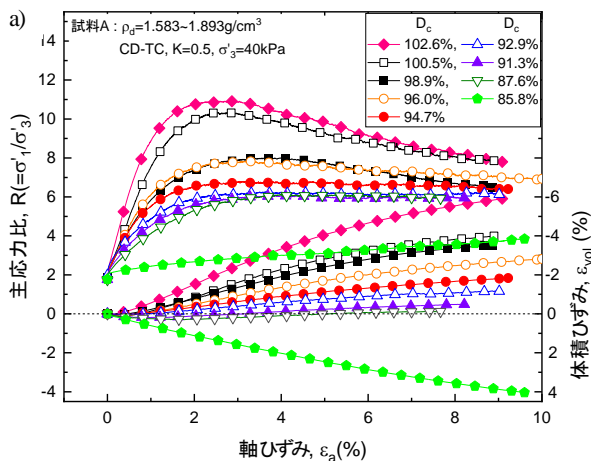


図4  $D_c$  値の変化に伴う強度変形特性の差異；a) 試料 A, b) 試料 B, c) 試料 C

状態は点接触に近いと考えられる。粒子表面のペースト部分は粗度がが高く、ペースト同士の接触による摩擦力で強度を担っていると考えられる(図-6a)。一方、与えた  $E_c$  が大きくなって  $D_c$  値が増加すると、土粒子間の接点数が増えるとともに、土粒子は面接触の状態に近づくと考えられる。土粒子の接点数の増加は負荷過程では正のダイランシー挙動の発現につながり、点接

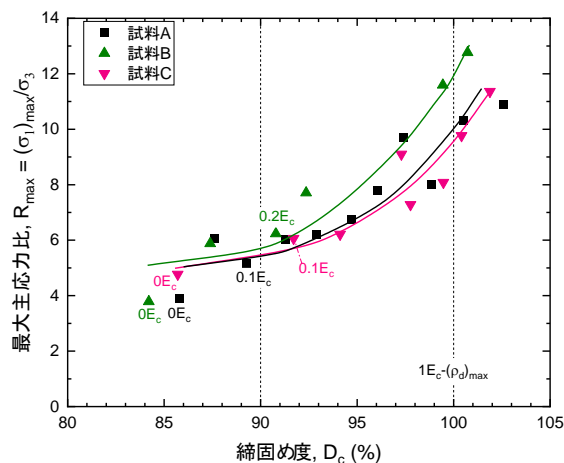


図5  $R_{max}$ — $D_c$  値の関係

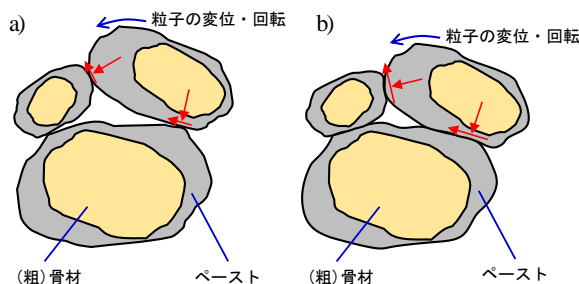


図6 土骨格構造の模式図；a) 締固めが不十分な場合, b) 締固めが十分な場合

触から面接触への推移はせん断変形過程での効果的なインターロッキング特性が期待できる。

以上より、破碎コンクリートの施工への品質管理条件は  $D_c=100\%$  など高い値を設定することが望ましい。また、強固な土骨格を構築するためには、薄い撒き出し層厚の設定とともに、転圧回数の設定など工法規定の併用も必要と考えられる。

#### 4. 再生工場を想定した繰返し通水洗浄試験

破碎コンクリートに含まれる  $Cr(VI)$  は微量であること、この  $Cr(VI)$  は水溶性であること、破碎コンクリート粒子はスレーキング特性を有しないこと、破碎コンクリートは工場製品であることを踏まえ、破碎コンクリートの環境特性の改善方法として本研究では通水洗浄を検討・提案した。再生化の過程で水を通してすることで環境基準値を満足する程度まで  $Cr(VI)$  を破碎コンクリートから取り除く。この方法の予備的な検討として 10 kg の破碎コンクリートに対する溶出試験を行った結果、3 日間隔を目安に計 3 回以上の通水を行うことで効果的に  $Cr(VI)$  を洗浄できる知見を得ている<sup>3)</sup>。本節では紙面の都合上、再生工場を想定した繰返し通水洗浄試験結果を示す。通水洗浄する試料は保有量に余裕がある試料 A を用いた。通水試験の概要を図-7 に示す。40 kg の試料 A をアクリル製の容器(幅 381 × 奥行 296 × 高さ 254 mm)内

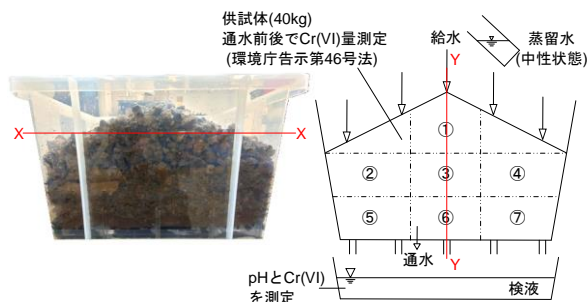


図-7 再生工場を想定した通水洗浄試験の概要図

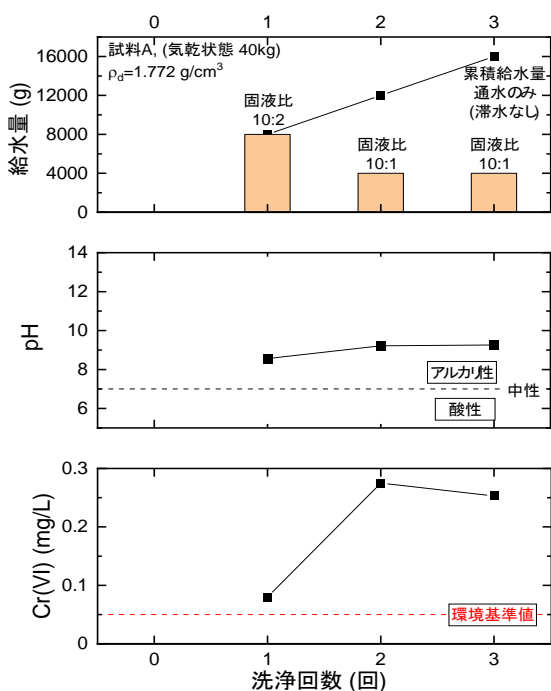


図-8 累計給水量と検液特性

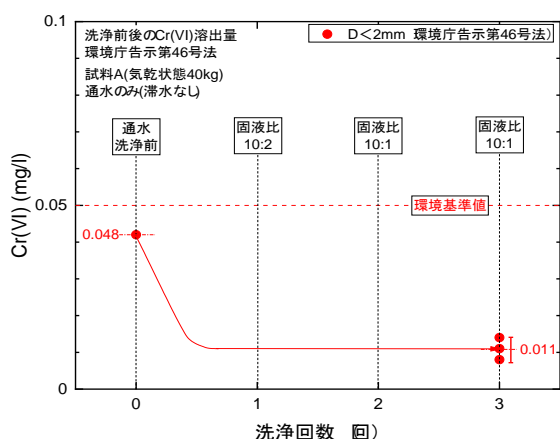


図-9 通水による洗浄効果

に盛りこぼした。再生工場で野積みされている破碎コンクリートの保管状態を再現するため、破碎コンクリートの頂上の傾斜角は安息角程度になるよう整えた。通水は中性状態の蒸留水を3日間隔で、上から流した。

通水後の水は検液として回収し、pHとCr(VI)溶出量を計測した。通水量は初回通水時のみ固液比10:2、試料A:40kgに対し蒸留水:8kgとし、2回目以降は固液比10:1で通水を繰り返した。初回のみ通水量が多いのは試料全体に蒸留水を行き渡らせるためである。洗浄効果は通水後試料からのCr(VI)溶出量で判断し、環境庁告示第46号法およびジフェニルカルバジド吸光光度法で計測した。計測は環境庁告示第46号法が定める粒径 $D < 2\text{mm}$ 以下の粒子に対して行った。また容器内部の場所による洗浄効果の違いも検討するために、容器中央断面(X-X)について図-7に記載する①～⑦番で区画分けし区画ごとのCr(VI)溶出量を測定した。

累計給水量と検液特性を図-8に示す。検液は常に $\text{pH} = 8.6 \sim 9.3$ のアルカリ性である。Cr(VI)はアルカリ環境下で再吸着しないため<sup>4)</sup>、溶出したCr(VI)はそのまま洗い流せる。またCr(VI)溶出量は最大0.275 mg/Lであり、洗浄試料に対して少ない通水量でCr(VI)が集中して溶出するため、洗浄効率は高く経済的である。

図-9に洗浄効果を示す。通水洗浄前のCr(VI)溶出量、容器全体での平均溶出量、合計7区画のうち最大および最小溶出量の4点をプロットしている。3回通水後の平均溶出量は0.011 mg/Lである。また、最大溶出量は0.014 mg/L、最小溶出量は0.008 mg/Lであり、平均溶出量と区画別の溶出量に差がほとんどない。以上より、通水洗浄は経済的で効果的な方法であり、再生化にあわせてCr(VI)を除去することで施工現場では天然材料と同様な管理を行うことができる。

## 5. まとめ

破碎コンクリートの盛土材としての活用に向けて、工学的性質および再生化方法について実験的に検討した。その結果、破碎コンクリートの強度値は盛土材の設計用値を満足すること、天然の地盤材料と同様に $D_c$ 値管理が適用できることを確認した。一方、破碎コンクリートでは $1.0E_c \cdot D_c = 90\%$ の密度状態では強固な土骨格は構築できないため、設定する $D_c$ 値は $D_c = 100\%$ など高い値を設定することが望ましい。また、Cr(VI)の溶出问题への対応として、再生化の過程での通水洗浄は効果的な方法である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：建設リサイクル推進計画2020～「質」を重視するリサイクルへ～、2020。
- 2) 高橋茂：セメントに含まれる微量成分の環境への影響、セメント・コンクリート、No.640, pp.20-29, 2000。
- 3) 渡邊一矢ら：盛土材料としての破碎コンクリートの再生化方法の検討、第77回土木学会全国大会、III-331, 2022。
- 4) 環境省：化学物質の環境リスク評価、第10巻、2012。