

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04688

研究課題名(和文) 地盤材料として破碎コンクリートを活用するための再生化方法の確立

研究課題名(英文) Examination of recycling method of crushed concrete aggregate as a geomaterial

研究代表者

平川 大貴 (Hirakawa, Daiki)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：40372990

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：破碎コンクリート(コンクリート塊)の盛土材料としての活用に向けて、盛土からの六価クロムCr(VI)の溶出リスクを抑制できる再生化方法を検討した。この結果、再生化の過程で繰り返し通水することで環境基準値を満足できる程度までCr(VI)を除去できることを確認した。このような再生化方法とすることで破碎コンクリートは天然の砂礫材と同様に扱え、さらに再生化施設の土壤汚染の可能性も抑制できる。また、本課題では破碎コンクリートの施工管理についても検討した。破碎コンクリートに対しても締固め度Dc値に基づいた締固め管理を適用できるが、構築した盛土の安定性を保持するためには設定Dc値は高く設定することが望ましい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

破碎コンクリートは最も排出量が多い建設副産物であるが、盛土材としての活用は進んでいない。建設リサイクルの枠組みの保持のためにも、盛土材としての活用方法の確立が求められる。破碎コンクリートを盛土材として活用するためには、地盤材料としての工学的な特性の理解、およびCr(VI)の溶出への対応が必要となる。再生化方法は、コンクリート工学分野等ではあるが地盤工学分野では皆無である。一方、地盤工学分野では力学的特性に関する検討事例はあるが、Cr(VI)の溶出という環境性能～物理特性～力学特性を網羅した系統的な検討の事例は見当たらない。本課題で得られた知見は建設リサイクルの推進に寄与できる。

研究成果の概要(英文)：In order to use crushed concrete aggregate (CCA) as fill or backfill material, a recycling method of CCA that can suppress the elution of hexavalent chromium Cr(VI) from the embankment were investigated. As the result, it was confirmed that Cr(VI) could be effectively removed from CCA by repeatedly passing water. CCA can be treated in the same way as natural gravel materials as well as reducing the potential for ground contamination of the recycling facility by adopting this method.

In this research project, furthermore, the method of soil compaction management was examined. The compaction management based on the value of the degree of compaction Dc can be also applied to CCA, but it is desirable to increasing the Dc value to maintain the stability of the embankment.

研究分野：地盤工学

キーワード：破碎コンクリート 再生地盤材料 再生化方法 六価クロム 洗浄 施工管理 強度変形特性

### 1. 研究開始当初の背景

我が国は循環型社会システムの構築を目指しており、建設業界においては建設副産物の活用が求められている。本課題で対象とするコンクリート塊(以下、破碎コンクリートと表記)は建設工事現場から排出されたコンクリート塊を再生資源化施設で粉碎～粒度調整したもので、地盤工学的には粗粒土の粒径区分となる。破碎コンクリートは最も排出量の多い建設副産物で、建設リサイクルの枠組みにおいては「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。破碎コンクリートの再生資源化率は現状では約 99%と高い状態にあるが、その用途は路盤材に限定されていて盛土材料としての活用は進んでいない。また、大都市圏では構造物の解体量の増加によって破碎コンクリートの滞留が懸念されていて、新たな用途を確立しなければ建設リサイクルの枠組みに支障を来す恐れが危惧される。排出量に見合った活用方法は、盛土材料しかないのが実情である。

破碎コンクリートを盛土構造物の基本構成材として用いるためには、盛土材に求められる物理的・化学的・力学的性質を満足している必要がある。締め固めた破碎コンクリートは良好な力学的性質を有することが明らかになりつつあるが、「六価クロム Cr(VI)の溶出の可能性」と「施工管理の方法と留意点の有無」に関しては対応が求められる。Cr(VI)の溶出への対応方法の一つとして再生施設での除去があるが、コンクリート工学や建築工学分野での検討はあるものの、地盤工学分野での検討はなされていない。地盤工学分野では力学的特性に関する検討事例は少なからずあるが、具体的な施工管理の方法や留意点の集約には至っていない。盛土の構築に際して締め固め  $D_c$  値に基づいた締め固め管理が一般的であるが、この施工管理方法の破碎コンクリートへの適用性は不明瞭である。(再生)盛土材として破碎コンクリートを活用するためには、施工管理の方法と留意点の有無という基礎的知見の集約が必要である。

### 2. 研究の目的

本課題の目的は、セメント系固化材等の添加材を混合することなく破碎コンクリートをそのまま再生地盤材料として使う用途を想定し、以下の2項目について検討することにある；

1)再生化施設での Cr(VI)の除去方法

2)施工管理の方法と留意点

上記 1)に関して、セメントに含有する Cr(VI)は微量・水溶性であるため、粒度調整後に繰り返し通水することで環境基準値を満たす程度まで Cr(VI)を取り除ける可能性がある。この方法が有効であれば、盛土からの Cr(VI)の溶出問題を解決でき、さらに再生化施設での土壤汚染の可能性の抑制も実現できる。

一方、上記 2)は締め固め管理方法に関する論点である。盛土の構築に際しては、一般的には含水調整を行うとともに締め固め  $D_c$  値に基づいた品質管理を行う。例えば道路盛土では、含水状態は最適含水比  $w_{opt}$  付近として、 $D_c=90\%$ を下限值とする施工管理を行う。破碎コンクリートにおいては盛土材としての活用がないためにこの  $D_c$  値に基づいた締め固め管理方法が適用できるかが不明瞭である結果、盛土材としての活用を妨げている感がある。本課題では目的 1)を検討した後、 $D_c$  値管理方法の適用性および施工管理上の留意点の有無を検討する。

### 3. 研究の方法

市販の計3種類の破碎コンクリート(試料 A, B, C)を用いて、土粒子の物理的特性(粒子構造や粒子形状、スレーキング特性の有無、等)―化学的特性(ペーストの化学組成、Cr(VI)の溶出量と溶出特性、等)―力学的特性(締め固め特性、強度変形特性)の情報を集約した。用いた破碎コンクリートの粒度はほぼ等しいが、Cr(VI)溶出量、締め固め曲線および応力-ひずみ関係は異なる。Cr(VI)溶出量(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：JISA 0102)は試料 A：0.035 mg/l、試料 B：0.063 mg/l、試料 C：0.048 mg/l と環境基準値(水道水質基準：0.050 mg/l)

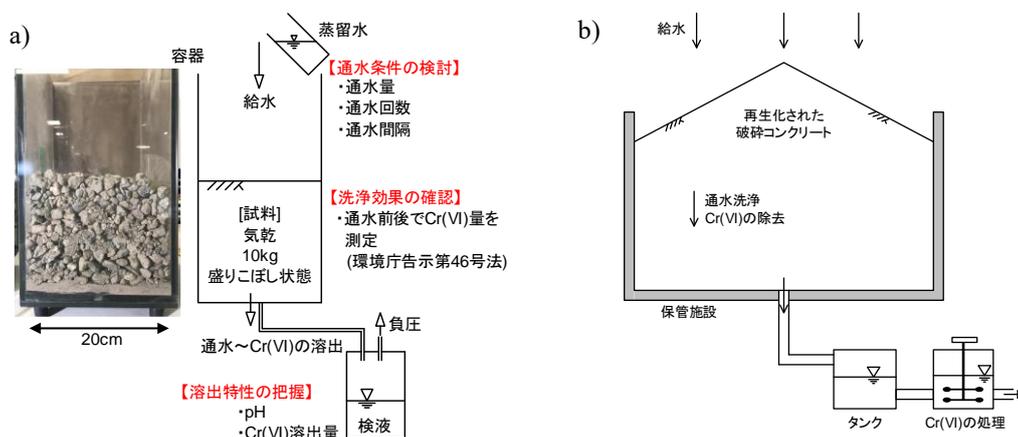


図-1 通水洗浄試験の概要；a)小型試験，b)再生工場を模擬した通水試験

を超えるものもあるが、低濃度という点では一致している。また、力学的特性も定量的には差があるが、いずれもスレーキング特性はなく、締固めエネルギー $1.0E_c$  (約  $550 \text{ kJ/m}^3$ )  $\cdot D_c=100\%$  の状態で内部摩擦角 $\phi$  (三軸試験, 飽和, CD 条件)は  $35^\circ$  を大きく超える。すなわち、検討したいいずれの破碎コンクリートも盛土材に求められる力学的特性を満たしており、目的 1)&2)が対応できれば盛土材としての活用の目途が得られることになる。

目的 1)に関しては、まず小型の通水洗浄試験 (図-1a)を行って繰り返し通水による Cr(VI)の除去の可否、効果的に Cr(VI)を除去するための通水条件 (通水量, 通水間隔, 通水回数)を調べた。見出した通水条件に対して、再生工場を模擬した通水試験 (図-1b)を行い、領域に寄らずに洗浄効果が得られるかを確認した。再生工場を模擬した通水試験 (図-1b)は、小型通水洗浄試験 (図-1a)の4倍の規模で実施している。

目的 2)においては、道路盛土を想定し、締固めエネルギー $1.0E_c$  (約  $550 \text{ kJ/m}^3$ )において  $D_c$  値の変化に伴う強度変形特性と最大偏差応力値の推移を系統的な三軸試験を実施して調べた。これらの結果から「 $D_c$  値に基づいた締固め管理方法の適用性」の可否を判定するとともに、施工管理上の留意点について考察した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 再生施設での六価クロム Cr(VI)の除去方法

小型試験結果から、通水洗浄は破碎コンクリートから効果的に Cr(VI)を取り除く方法であることが確認された。小型通水洗浄試験 (図-1a)結果の例を図-2~3に示す。図-2は通水回数3回、通水量は固液比 10:4、通水間隔3日での結果であり、給水条件および破碎コンクリートを通じた水から測定した pH と Cr(VI)溶出量の推移をまとめて示している。図-3はこの条件での洗浄効果で、洗浄効果は通水後の破碎コンクリートに対して環境庁告示第46号法での Cr(VI)量の減少量で判定している。図-2~3から得られる重要な知見を以下に列挙する；

- ・破碎コンクリートに含有する Cr(VI)は水溶性であるため、水に触れると容易に溶出する。
- ・ペーストに含まれる Cr(VI)は微量であるため、通水を繰り返すことで Cr(VI)を除去できる。給水量は1回あたり固液比で 10:1 もしくは 10:2 の少量で十分で、自由流下で通水できる。
- ・セメントは強いアルカリ性である結果、中性の

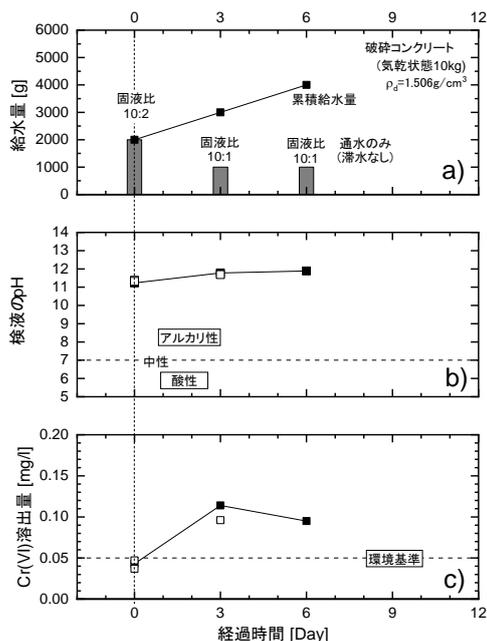


図-2 小型通水試験結果の例 (試料 B) : a)給水条件, b)通過した水の pH, c)Cr(VI)溶出量

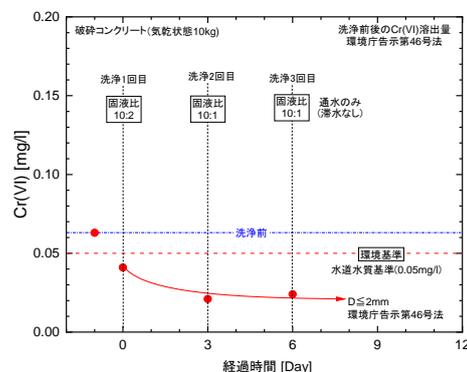


図-3 小型通水試験結果の例 (試料 B) : 洗浄効果

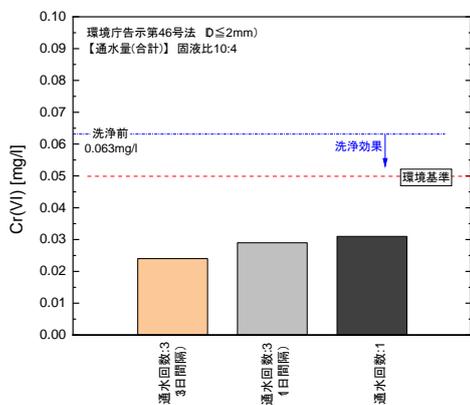


図-4 洗浄効果に及ぼす通水回数と通水間隔の影響 (試料 B)

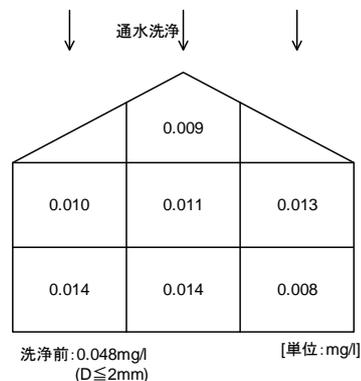


図-5 再生工場を模擬した通水試験結果の例 (試料 C) : 領域の違いによる洗浄効果

水でも破砕コンクリートと接触するとアルカリ性となる。Cr(VI)はアルカリ環境下では再吸着しない。

同じ破砕コンクリートに対して総通水量を質量比 40%(固液比 10:4)で一定として、通水回数と通水間隔を変化させた時の洗浄効果を調べた結果を図-4 に示す。図-4 より、総通水量が同じであっても分割して通水させた方が効率よく Cr(VI)を洗い流すこと、通水間隔はある程度あけた方が良いことが確認できる。通水間隔は、多孔質構造であるペースト内部に水が浸透し、Cr(VI)が表面上に出てくるのに時間を要するためと考えられる。通水間隔は、検討した中では3日が最も洗浄効果が高かった。洗浄の効率化は総通水量の最小化となり、経済性にも直結する。

次に、再生工場を模擬した通水試験(図-1b)によって領域に寄らずに洗浄効果が得られるかを確認した結果の例を図-5 に示す。見出した通水条件(通水回数3回、3日間隔、総通水量40%、自由流下)ですべての領域で良好な洗浄効果が得られた。

上記の結果は、現在の再生化の過程に通水洗浄の工程を追加することで地盤材料として活用できる破砕コンクリートを製造できることを示している。一方で、再生化施設では破砕コンクリートは野積みで保管される場合が多い現状では、雨水浸透によって Cr(VI)の溶出が危惧されることが明らかとなった。本課題で検討した通水洗浄を加えた再生化方法は、再生化施設の地盤環境問題への対策にもなり得る。

## (2) 施工管理の方法と留意点

本課題では系統的な三軸圧縮試験を実施し、道路盛土を想定して基準エネルギー(1.0E<sub>c</sub>)での D<sub>c</sub> 値に基づいた締め固め管理方法の適用性、および施工管理上の留意点の有無を検討した。三軸供試体の直径は 100 mm で「突固めによる土の締め固め試験(JIS A 1210)」と一致しており、D<sub>c</sub> 値の推移はランマーの落下回数で調整している。三軸試験で得られた応力-ひずみ関係の例を図-6 に示す。図-6 は締め固めエネルギー0E<sub>c</sub>(撒きだし状態)~1.0E<sub>c</sub>(D<sub>c</sub>=100%)の範囲内において締め固めの程度の上昇による破砕コンクリートの強度変形特性の推移を示している。図-6 より、D<sub>c</sub> 値の増加に伴って破砕コンクリートの剛性・強度が改善されていく様子が見て取れる。各供試体の強度値を D<sub>c</sub> 値で整理した結果を図-7 に示す。図-7 から、破砕コンクリートにおいても D<sub>c</sub> 値に基づいた締め固め管理が適用できることが確認できる。しかしながら、道路盛土など多くの盛土で一般的な施工管理条件 D<sub>c</sub>=90%は、破砕コンクリートでは総じてゆるい状態にある。本課題で検討した破砕コンクリートでは D<sub>c</sub>=90%の密度状態は 0.1~0.2E<sub>c</sub> で実現できる。破砕コンクリートは潜在的には高い剛性・強度が得られることから、構築した盛土の安定性を保持するためには D<sub>c</sub> 値を高く設定することが望ましい。

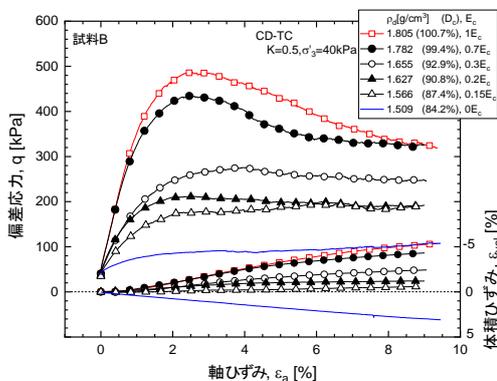


図-6 締め固めた破砕コンクリートの強度変形特性の例(試料 C)

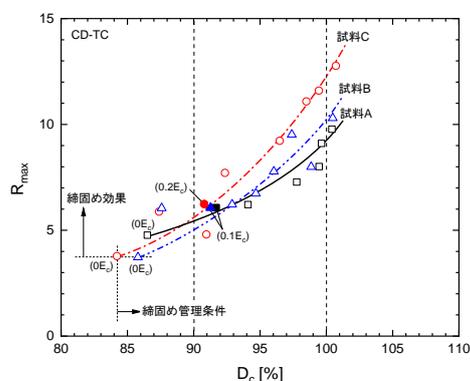


図-7 D<sub>c</sub> 値の増加に伴う破砕コンクリートの強度増加

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡邊一矢, 平川大貴
2. 発表標題 盛土材としての破砕コンクリートの締固め管理方法の考察
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊一矢, 平川大貴
2. 発表標題 盛土材料としての破砕コンクリートの再生化方法の検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水谷駿介, 渡邊一矢, 平川大貴
2. 発表標題 再生工場を想定した破砕コンクリートの通水洗浄の方法の検討
3. 学会等名 第19回地盤工学会関東支部発表会 (GeoKanto2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平川大貴
2. 発表標題 通水洗浄による破砕コンクリートの再生化方法の検討
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊一矢, 平川大貴, 池田昴史, 金子智哉
2. 発表標題 盛土材として活用するための破碎コンクリートの再生化方法の検討
3. 学会等名 第18回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下村実袖, 平川大貴
2. 発表標題 再生地盤材料としての破碎コンクリートとしての再生化方法の検討
3. 学会等名 第17回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関