

8. 建設発生土の活用に関する研究

— その2 土壁の調合による環境負荷低減効果の検証 —

Research on Utilization of Construction Soil Remnants

— Part 2 Verification of Environmental Load Reduction Effects through Mix Design of Earthen Walls —

福原 ほの花*1 荒木 朗*2 山崎 順二*3

要 旨

建設発生土は有効にリユースし得る資源であり、著者らは土に還せる土建材の研究開発に取り組んでいる。土壁には土のほかさまざまな硬化材、繊維材が用いられるが、土壁の調合が環境負荷低減効果に影響を及ぼすと考え、本研究では土の産地、硬化材および繊維材の異なる土壁のCO₂貯蔵量およびCO₂排出量を算定した。その結果、土の産地によりCO₂貯蔵量やCO₂排出量は大きく異なり、黒ボク土の正味のCO₂排出量はカーボンネガティブとなった。硬化材や繊維材の種類によってもCO₂排出量に差異が生じ、圧縮強度とCO₂排出量との間にはトレードオフの関係がみられた。環境負荷低減のためには、要求性能に応じた適切な材料の選択が重要であることを示した。

キーワード：建設発生土／土壁／CO₂貯蔵量／CO₂排出量／圧縮強度／トレードオフ

1. はじめに

建設発生土とは、地山の掘削により生じる自然由来の純良な土砂のことであり、建設工事に有効にリユースし得る資源である。建設発生土に関する既往研究として、リーラ²⁾は焼成した建設発生土をセメント系補助材料として再利用しており、ジンジュンら³⁾は建設発生土にセメントを混合した非焼成粘土煉瓦の物理的・機械的特性を調査している。土へのセメントの混合や焼成により物理的性質は向上する傾向にあるが、土の持つ吸放湿性や資源循環性が失われ、CO₂排出量も増加するため、土に還すことのできる調合設計が必要であると考えられる。

そこで著者らは、土に還せる建材として、既報^{4)~6)}において、版築工法による「還土ブロック(特許第7676190号)」や日干し煉瓦を模した「立体木摺土壁(特許第7723873号)」を開発し実装した事例について述べた。建設発生土を土に還せる調合で建材として活用することで、吸放湿性、蓄熱性、断熱性を活かした機能性の向上や、CO₂排出量の削減が可能である。加えて、土はCO₂を貯蔵する機能を持つため、カーボンニュートラル、あるいはカーボンネガティブの実現にも寄与する可能性がある。一方、土壁はあらゆる産地の土を用い、機能性向上のためにさまざまな混和材を調合して構築される。したがって、土壁の調合によってCO₂貯蔵量やCO₂排出量は変化すると考えられる。

そこで本研究では、建設発生土の建築への活用に向けて、土壁の調合、すなわち土の産地、硬化材および繊維材の種

類の違いによる環境負荷低減効果について検証するため、既報⁷⁾で用いた材料物性試験体の質量比を元にCO₂貯蔵量およびCO₂排出量を算定した。

2. 算定方法

2.1 CO₂貯蔵量

土壌に有機物がすき込まれると、土壌有機炭素(SOC)が蓄積されていき、大気中のCO₂が減少していくことから、土は木材と同じようにCO₂を貯蔵する性質を有するとされている⁸⁾。同時に、有機物の管理方法や温度が影響を与えるため、土の産地によってCO₂貯蔵量は異なる⁸⁾。そこで、既報⁷⁾と同様、浅沼組の作業所で採取した建設発生土である、愛知県瀬戸市、東京都文京区、広島県東広島市、愛知県南知多町、埼玉県寄居町の土に、北海道網走市、技術研究所周辺で採取した大阪府枚方市を加えた、写真-1に示す7産地の土についてCO₂貯蔵量を算定した。なお、本研究で用いたCO₂貯蔵量は土壌環境におけるSOCに基づく推定値であり、建材として使用された場合の長期的な炭素固定量を直接評価するものではないが、本研究においては材料間の相対比較指標として用いた。

CO₂貯蔵量の算定には、土壌のCO₂吸収「見える化サイト」⁹⁾を用いた。算定の際、場所、作物残渣の処理と緑肥、堆肥と化学肥料の投入量について入力する必要があるが、今回は施肥については考慮しないこととするため、7産地で同値を入力した。土の深さは30cm程度と想定して算定し、単位をt-C/haからkg-CO₂/m³へ変換した値を用いた。

*1 技術研究所建築材料研究グループ 兼 GCD グループ *2 技術研究所建築材料研究グループ *3 技術研究所

2.2 CO₂ 排出量

本研究では、土壁の材料として土、硬化材および繊維材に着目する。硬化材は写真-2に左から示す MgO、石灰および苦汁といった3種類の無機系硬化材と、つまた、でんぷんといった2種類の有機系硬化材の計5種類とし、それぞれ枚方産の土に対し、質量比で10%、10%、10%、1%、0.5%混合した。繊維材は写真-3に左から示す藁スサ、おがくず、竹繊維の3種類とし、それぞれ枚方産の土に対し、質量比で3%、10%、5%混合した。なお、混合割合は、施工性を考慮した最大量としている。

本研究では、各材料の比較検討を行う視点から、エンボディドカーボンのうちアップフロントカーボンの資材製造段階（施工を除く A1 から 3）における CO₂ 排出量を評価対象とした。土壁を構成する各材料の質量に、産業技術総合研究所 (AIST) が開発した環境負荷原単位データベース (IDEA) の排出原単位⁹⁾を乗じて合算し、積上げ式により算出した。

なお、産地ごとの土の原単位や繊維材の原単位が存在しなかったため、土は「珪藻土」の原単位、繊維材は「木くず」の原単位を用い、土の産地および繊維材の種類による違いについては質量比で比較することとした。このように、原単位の制約から代替値を用いているため、絶対値ではなく相対比較に主眼を置いた評価としている。

3. 算定結果

3.1 土の産地が CO₂ 貯蔵量および CO₂ 排出量に与える影響

表-1に、土壌の CO₂ 吸収「見える化サイト」⁸⁾において表示された土壌の分類、CO₂ 貯蔵量および原単位を用いて算定した CO₂ 排出量を示す。網走および文京の土は「黒ボク土」、瀬戸、寄居および東広島の土は「未熟土」、南知多および枚方の土は「褐色森林土」に分類された。CO₂ 貯蔵量を比較すると、産地による差異が認められ、黒ボク土に分類された土の CO₂ 貯蔵量は -50g-CO₂ 前後と特に多い結果となった。最も CO₂ 貯蔵量の多かった文京の土は、木材（スギ）の製材と比較すると 1/3 程度であった。

図-1に土の CO₂ 貯蔵量、CO₂ 排出量および正味の CO₂ 排出量を、図-2に土壌分類別の CO₂ 貯蔵量と CO₂ 排出量の関係を示す。図-1において、黒ボク土に分類された網走および文京の土に着目すると、CO₂ 貯蔵量は前述の通り多く、CO₂ 排出量は比較的少ない（図-2において左下に位置している）ため、正味の CO₂ 排出量はカーボンネガティブとなった。一方、未熟土および褐色森林土に分類された土はカーボンニュートラルとはならず、正味の CO₂ 排出量は +10~30g-CO₂ であったことから、産地により土の CO₂ 貯蔵量および CO₂ 排出量は大きく異なることがわかった。



写真-1 7産地の土



写真-2 5種類の硬化材



写真-3 3種類の繊維材

表-1 土壌の分類と CO₂ 貯蔵量・排出量 (g-CO₂)

土の産地	土壌の分類	貯蔵量	排出量
網走	多腐植質普通アロフェン質黒ボク土	-49.5	28.28
文京	多腐植質普通アロフェン質黒ボク土	-57.9	21.77
瀬戸	典型普通未熟低地土	-17.9	38.94
寄居	典型普通未熟低地土	-17.9	27.82
東広島	典型普通陸成未熟土	-11.3	41.35
南知多	中粗粒質普通褐色森林土	-15.0	43.76
枚方	中粗粒質普通褐色森林土	-12.6	41.52
木材	-	-155.3	7959

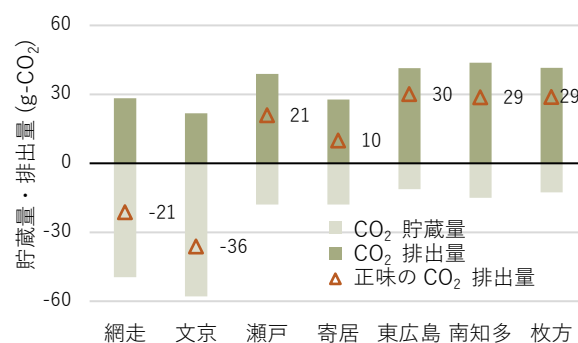


図-1 土の CO₂ 貯蔵量および CO₂ 排出量

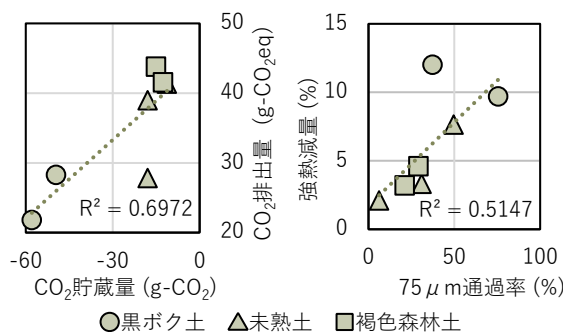


図-2 貯蔵と排出の関係 図-3 粒度と強熱減量

図-3 に土の粒度分布の特性を表す 75 μm 通過率と強熱減量 (=有機物量) の関係を土壤分類別に示す。黒ボク土の強熱減量が特に大きい値となっており、有機物を多く含むことがわかる。黒ボク土は有機物を多く含むことで SOC が蓄積されやすく、CO₂ 貯蔵量が増加した可能性が考えられる。

以上の結果から、土の産地によって CO₂ 貯蔵量や CO₂ 排出量は異なり、正味の CO₂ 排出量がプラスになる場合とカーボンネガティブになる場合があることがわかった。

3.2 硬化材の種類が CO₂ 排出量に与える影響

図-4 に硬化材別の CO₂ 排出量および圧縮強度を示す。硬化材として土に MgO や石灰を混合すると、土のみの場合と比較して CO₂ 排出量は増加し、その他の材料については減少した。土をブロック状にして組積することを想定してコンクリートブロック (CB) と比較すると、最も CO₂ 排出量の多い MgO よりも CB の方が 1.5 倍程度大きい値となっており、土壁の環境負荷低減効果を確認できた。

圧縮強度は 0.1~1.4N/mm² 程度と差がみられた。版築に関するガイドライン¹⁰⁾において、圧縮強度の基準値は 1.0N/mm² とされているが、今回の試験体では MgO のみが基準を超え、つのまたは基準値と同程度であった。

CO₂ 排出量と圧縮強度の関係について、無機系材料 (MgO、石灰、苦汁) は圧縮強度の向上に伴い CO₂ 排出量が増加しており、CO₂ 排出量と圧縮強度の間にトレードオフの関係がみられた。一方、有機系材料 (つのまた、でんぷん) も加えるとその関係は緩やかになり、無機系材料に比べて CO₂ 排出量が少ないにも関わらず、圧縮強度は土のみの場合と同程度か向上していた。

以上の結果から、要求性能に応じて硬化材を使い分けることによる環境負荷低減の可能性が示された。

3.3 繊維材の種類が CO₂ 排出量に与える影響

図-5 に繊維材別の CO₂ 排出量、圧縮強度および熱伝導率を示す。繊維材を混合した場合、いずれの材料も土のみの場合に比べて圧縮強度は低下するが、熱伝導率および CO₂ 排出量は低減できることがわかった。一方で、一般的に断熱材として用いられるロックウールと比較すると、断熱性能は劣り、おがくずを用いた調合以外は CO₂ 排出量が多くなった。また、無機系硬化材の場合と同様に、圧縮強度と CO₂ 排出量との間にはトレードオフの関係が認められたことから、環境性能と構造性能の両立が設計上の制約条件となる可能性が考えられる。

以上の結果から、土に繊維材を混合すると圧縮強度は低下するが、断熱性能は向上し、CO₂ 排出量も減少するため、木材などと組合せて強度不足を補いながら使用すること

により環境負荷低減に寄与する可能性が示された。なお、本論文では、繊維材の詳細な原単位が存在しなかったため、3種類とも同一の原単位を用いて混合質量の違いにより比較しているため、今後の更なる原単位の整備が求められる。

3.4 硬化材および繊維材の材料物性と CO₂ 排出量

図-6 に、硬化材および繊維材の圧縮強度と CO₂ 排出量との関係を、土のみの場合を原点としたときの差の値を用いて示す。圧縮強度と CO₂ 排出量は概ね比例する傾向がみられた。土のみの場合と比べて、苦汁は低圧縮強度で CO₂

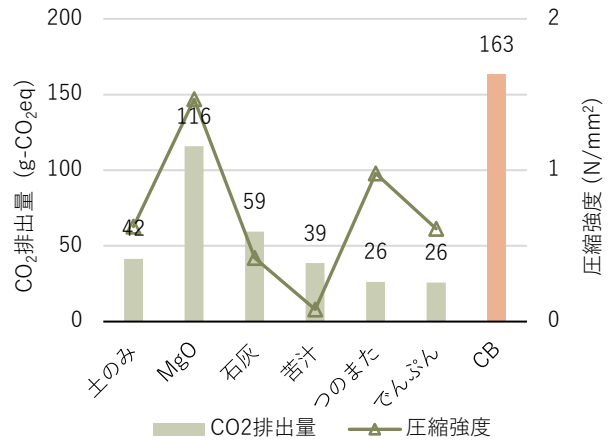


図-4 硬化材別の CO₂ 排出量と圧縮強度

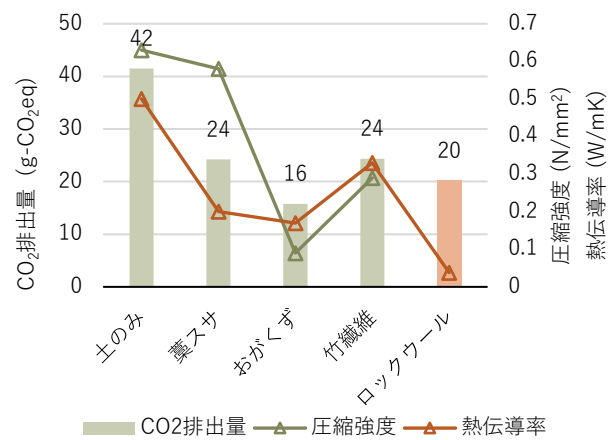


図-5 繊維材別の CO₂ 排出量と圧縮強度・熱伝導率

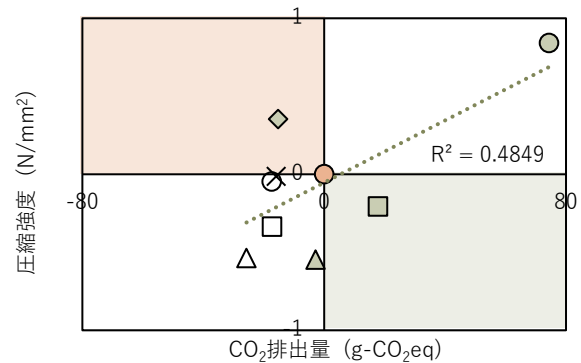


図-6 CO₂ 排出量と圧縮強度の関係

排出量は多く（同図中右下、緑の網掛範囲）、つのみまたは高圧縮強度で CO₂ 排出量は少ない結果となり（同図中左上、赤の網掛範囲）、本検討条件においては土への混和材としてつのみが最も有効であった。

既報⁷⁾における材料実験での体積収縮率、圧縮強度、熱伝導率の結果も踏まえ、材料物性と CO₂ 排出量について表-2 にまとめる。各材料で長所・短所が存在するため、要求性能に応じた適切な材料の選択により土壁の環境負荷低減が可能になると考えられる。

表-2 硬化材・繊維材の物性と CO₂ 排出量

分類	材料	収縮抑制	強度増進	断熱性向上	CO ₂ 排出量削減
硬化材	MgO	○	○	△	×
	石灰	○	△	○	×
	苦汁	×	×	×	△
	つのみ	×	○	△	○
	でんぶん	×	△	△	○
繊維材	藁スサ	×	△	○	○
	おがくず	×	×	○	○
	竹繊維	×	×	○	○

4. まとめ

本研究では、建設発生土の建築への活用に向けて、土壁の調合の違いによる環境負荷低減効果について検証するため、CO₂ 貯蔵量および CO₂ 排出量を算定した。本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 7 産地の土の CO₂ 貯蔵量を比較した結果、黒ボク土に分類された網走および文京の土の CO₂ 貯蔵量が大きく、木材の 1/3 程度の貯蔵が可能であることが明らかとなった。黒ボク土は正味の CO₂ 排出量が約-50g-CO₂ とカーボンネガティブになったが、未熟土および褐色森林土では+10~30g-CO₂ となったことから、産地により土の CO₂ 貯蔵量および CO₂ 排出量は大きく異なることがわかった。これは、黒ボク土が有機物を多く含むことで土壌有機炭素が蓄積されやすいことが一因であると考えられる。
- (2) 土に、硬化材として MgO や石灰を混合すると、土のみの場合と比較して CO₂ 排出量は増加し、その他の材料については減少した。CO₂ 排出量と圧縮強度の関係について、無機系材料は圧縮強度の向上に伴い CO₂ 排出量が増加するというトレードオフの関係にあるが、有機系材料はその関係を緩やかにすることがわかつ

た。

- (3) 土に繊維材を混合すると、いずれも土のみの場合と比べて圧縮強度は低下するが、熱伝導率および CO₂ 排出量は低減できることがわかった。圧縮強度と CO₂ 排出量の間にはトレードオフの関係が認められた。
- (4) 硬化材および繊維材の材料物性と CO₂ 排出量との関係について、土のみの場合と比べて苦汁は低圧縮強度で CO₂ 排出量は多く、つのみまたは高圧縮強度で CO₂ 排出量は少ない結果となり、本検討条件においては土への混和材としてつのみが最も有効であった。各材料で長所・短所が存在するため、要求性能に応じた適切な材料の選択により土壁の環境負荷低減が可能になると考えられる。

[謝辞]

本研究は、日本設計の木野内剛さん、柳井崇さんのご協力のもとで行っている。ここに感謝の意を表す。

[参考文献]

- 1) 梅澤孝助：建設発生土をめぐる現状と課題，国立国会図書館調査と情報-ISSUE BRIEF-, No.53, 2021 / 2) Li Ling et al.: Recycled Excavation Soils as Sustainable Supplementary Cementitious Materials: Kaolinite Content and Performance Implications, Materials 2024, 17, 2289, <https://doi.org/10.3390/ma17102289>, 2024 / 3) Jinjun Xu et al.: Properties of using excavated soil waste as fine and coarse aggregates in unfired clay bricks after dry-wet cycles, Case Studies in Construction Materials, Vol.17, 2022 / 4) 山崎順二，加藤猛，荒木朗，森浩二，古東秀文，山内豊英：現場発生土を使用して製造した「還土ブロック」の改修工事への実装，浅沼組技術研究報告，No.33, 2021 / 5) 福原ほの花，山崎順二，加藤猛：垂水産の建設発生土を活用した還土ブロックのオフィスエントランスへの適用，浅沼組技術研究報告，No.35, 2023 / 6) 福原ほの花，山崎順二，木野内剛：畑の土を用いた立体木摺土壁の開発および実装に関する研究 その1 土の性質および材料物性に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.1295-1296, 2024 / 7) 福原ほの花：建設発生土の建材への活用に関する研究その1 産地・工法および混和材の違いが土壁の性質に与える影響，浅沼組技術研究報告 No.36, 2024 / 8) 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構：土壌の CO₂ 吸収「見える化」サイト，<https://soilco2.rad.naro.go.jp/>（アクセス日：2025年12月19日） / 9) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST): Inventory Database for Environmental Analysis (IDEA), Version 3.5.1. AIST, 2021 / 10) Peter Walker et al.: RAMMED EARTH Design and construction guidelines, p.100, 2005