

2021年度 建設コンサルタツツ協会懸賞論文(学生論文)

【テーマ2】SDGs達成のために、土木技術はどのように貢献できるのか？

題名：カーボンニュートラルと降雨・地震被害縮小に資する
木炭盛土の実用化に向けた基礎的検討

氏名：岩田尚也

所属：富山大学都市デザイン学部都市交通デザイン学科

1.はじめに

本論文では、SDGs17の目標のうち、11「住み続けられるまちづくりを」における限られた資源かつ低コストで災害に強いまちづくりに寄与する技術、13「気候変動に具体的な対策を」における地球温暖化対策に寄与する技術の開発に関する研究を述べる。具体的には、我が国における大雨や短時間豪雨の発生増加や降雨により引き起こされた盛土被害に着目し、木炭を盛土に混合させることで盛土の被害減少を図る技術を提案する。そして、その技術の実現に向けた課題と解決方法を示した上で、木炭盛土による効果や社会的な影響をまとめたものである。

2.背景・現状の整理

近年、大雨や短時間豪雨の発生回数の増加に伴い、土砂崩れや地すべり等の土砂災害が多発している（図-2.1）¹⁻⁴⁾。2004年の新潟県中越地震のように、先行降雨により土の強度が低下した状態で地震が発生すれば、さらに被害は甚大なものとなる（写真-2.1）^{5, 6)}。

このような土砂災害を防ぐために、盛土では、降雨を盛土表面に設けた水路に流して盛土内に浸水しないようにする対策（地表水排除工）や、盛土内に横断管や集水井を設置して盛土内水位を一

定以下に保つ対策（地下水排除工）が講じられている⁷⁾。そして3.1で詳述するように、盛土の耐荷性能は、これらの排水設備が想定通り機能することを前提に照査されている。しかし、老朽化に伴う水路や横断管の破損や、落ち葉や土砂の堆積により（写真-2.2）、排水機能が低下し、降雨による盛土内水位の上昇を抑制できない事例が報告されている。さらに、排水設備から溢れ出た雨水が周辺地盤の侵食や空洞化、盛土法面の崩壊を引き起こすなど、排水設備が盛土被害を拡大していることも想定される⁸⁾。

排水設備の機能を確実に発揮させるためには、定期的な点検と清掃、必要に応じて補修補強が必要である。そのため、道路構造物に対しては道路法第四十二条に基づき、5年に1回の定期点検を行うことが定められている。しかし我が国には、道路盛土の他にも51,306カ所、面積で約10万haもの大規模盛土造成地が建設されている⁹⁾。さらに、道路盛土にも大規模盛土造成地にも指定されていない盛土もあり、点検場所が非常に多い。加えて、横断管や集水井は盛土の中に施工されており、点検が困難な構造である。以上より、全ての盛土の排水機能を維持することは、非常に難しい。

一方で、道路橋に対しては、平成29年に改定された道路橋示方書において、一部の損傷が橋全体の安全性に与える影響を拡大しないように代替性を考慮した対策を検討するなど、万が一の場合に備えたフェールセーフ機能について検討する必要性が定められている¹⁰⁾。

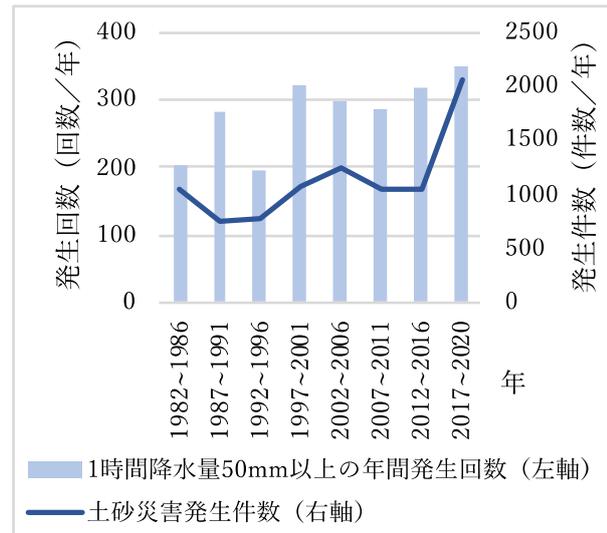


図-2.1 日降水量 200mm 以上の年間日数と土砂災害発生件数の推移^{1, 2, 3, 4)}

以上より、盛土の耐荷性能を維持するためには、万が一排水設備の機能が低下していた場合であっても、降雨により地下水位が上昇し、直ちに盛土の崩壊に至らないようにするための技術開発が必要であると考えた。



写真-2.1 新潟県中越地震による盛土崩落⁶⁾ 写真-2.2 横断管の破損・土砂の堆積⁸⁾

3.盛土の耐荷メカニズムと課題解決方法の提案

3.1 盛土の耐荷メカニズム

盛土の地震時破壊形態は、沈下、円弧すべり、盛土天端の縦割れ破壊、のり尻拡幅による伸長などに分類される。一方で、いずれの破壊形態に対しても、基本的な抵抗要素は盛土材料の摩擦、または粘着力である¹¹⁾。写真-2.1に示したような事例を含め、降雨による盛土の破壊の要因は、盛土内の地下水位の上昇に伴う有効応力の低下であると考えられる。また、盛土内に貯水されることにより盛土の質量が増加することで、滑り破壊を起こす要因となる荷重や、地震時の慣性力といった作用側の特性が増加することも考えられる。

すなわち、排水設備は、盛土内の地下水位を上昇させないことで、盛土の有効応力の低下と盛土の質量の増加を抑制するための装置といえることができる。盛土の設計は、排水設備により盛土の有効応力の低下や質量の増加が想定範囲内に留まることを前提に行われていると考えられる。

3.2 提案する課題解決方法

以上より、排水設備の機能が低下した場合であっても、盛土の崩壊を阻止、または損傷規模の縮小を実現させるためには、有効応力の低下と質量の増加を抑制すればよいと考えた。そこで本研究では、盛土内に水を吸収する材料を混合することで、有効応力の低下と質量の増加を抑制することを試みる。すなわち、排水設備の機能不全により盛土内の地下水位が上昇して有効応力が減少するところを、盛土に混合させ

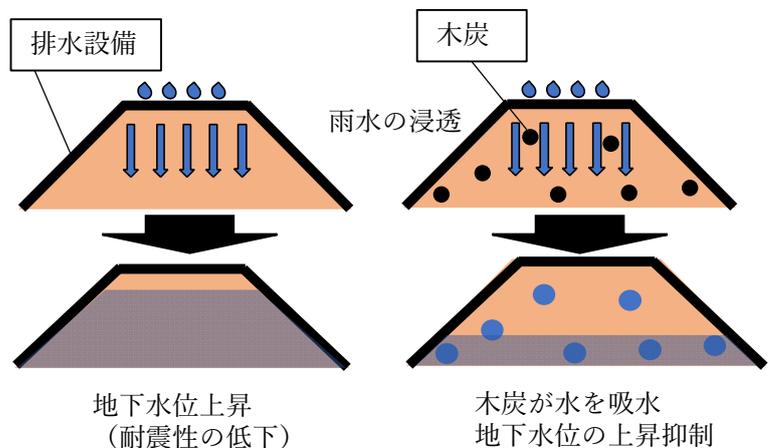


図-3.1 盛土に木炭を混合することの効果
(左：通常盛土（排水機能低下時）、右：木炭盛土)

機能不全により盛土内の地下水位が上昇して有効応力が減少するところを、盛土に混合させ

た吸水材が浸透した雨水を吸水することで盛土内の地下水位の上昇を抑え、有効応力の減少を抑制することが可能になると考えた（図-3.1）。

4.木炭混合土を実用化するために確認すべき事項と検証方法

吸水特性を有する材料としては、木炭や瞬間吸水材（セルドロン）¹²⁾、高吸水性樹脂などが開発されている。しかし、セルロースを主成分とするセルドロンは、時間経過とともに土の中で生分解される低環境負荷性の材料である。また、高吸水性樹脂においても、保水効果の持続性がないことが指摘されている¹³⁾。このように、セルドロンや高吸水性樹脂は持続性が短いため、供用年数が長い盛土では適さないと考えた。そこで本研究では、木炭に着目した。木炭は主成分が炭素であるため、土の中においても生分解され難い材料である¹⁴⁾。さらに、5で詳述するように地球温暖化対策に貢献する環境に配慮した材料である。また、安価で容易に入手できるという特徴も有する。

以上より、本章では、木炭を混合した土（木炭混合土）を用いた盛土（木炭盛土）を実用化するための課題と、その課題を解決するための検証方法について述べる。

4.1 木炭混合土を適用するために必要な検証事項

課題1 土の中における木炭の吸水性

木炭盛土の実用化のためには、混合させる木炭の量を設計しなければならない。そのために、木炭がどの程度の水を吸うのか、その吸水性はどのような条件に依存するのかを明らかにする必要がある。

木炭の吸水性は、実験などにより、材料や製造方法による吸水能力の違いも含めてほぼ解明されている（図-4.1）¹⁵⁾。しかし、これらの知見はいずれも気中で確認されたものであり、保水性が高い地盤中での木炭の吸水性は明らかではない。木炭混合土を盛土材料として適用するためには、木炭が土の中という環境下で、どの程度の水を吸収できるのかを明らかにする必要がある。また、この吸水量は土の空隙率や木炭の大きさなどによっても変わる可能性がある。以上より、木炭の吸水量は、木炭や盛土材料のどのような特性にどの程度依存するのかなど、木炭混合土の吸水性を明らかにする必要がある。

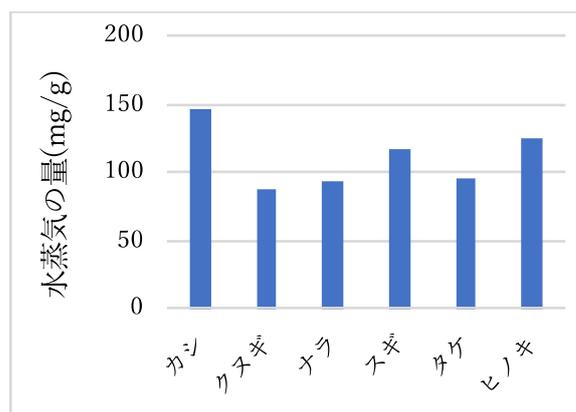


図-4.1 相対湿度 90%における木炭の原材料による吸水能力の違い¹⁵⁾

課題2 木炭を土に混合させることによる粘着力や摩擦力、変形特性への影響

土の粘着力は、粘土などのように比表面積が極めて大きい場合に土粒子表面の電気化学的な力によって水分子と土粒子が引き合うことで生じる。また摩擦力は、土粒子同士の噛み合いによって生じる。さらに、粘着力や摩擦力は地震時のような繰返し荷重や粒子内に含まれる水分量によっても異なり、加えて盛土に用いる材料の強度としては、最大強度だけでなく残留強度の評価も必要になると考えている。

このように土粒子間に発生する力は土粒子の大きさや形状、作用などの環境条件に依存するものの、木炭混合土において期待できる力やその値は明らかではない。また、変形特性も確認された例がない。

実際の設計においては室内試験などで強度定数や変形特性を推定することになると考えられるが、木炭混合土による盛土の可能性を検討する現時点においては、少なくとも一定の強度定数や変形特性を有することを確認しておく必要があると考える。そこで、木炭混合土の強度定数や変形特性は、どのような条件（木炭の大きさや量、形状、吸水量、環境条件など）にどの程度依存するのかを明らかにする必要がある。

課題3 木炭混合土を用いた場合の盛土の耐震性や破壊形態への影響

上記の2つの課題を検証した結果、一定の吸水能力や強度定数、変形特性が確認された場合、材料レベルでの特性はほぼ明らかになると考える。しかし、木炭盛土として用いる場合には、材料特性だけではなく、盛土としての耐震性や破壊形態も確認しておく必要がある。

盛土の耐震性や破壊形態も、木炭混合土の吸水性や強度定数、変形特性と同様に木炭の量や大きさ、形に依存すると考えられるが、盛土の中のどこに木炭を入れるのかによっても異なってくると考える。例えば、木炭を盛土の下端のみに入れた場合は、盛土の天端部では木炭の吸水や地下水位の上昇による質量の増加はなく、地震による慣性力は増加しない可能性がある。また、柱状の木炭を基礎地盤から盛土の上部まで入れた場合は、木炭のせん断抵抗力も期待できると考える。

以上より、課題1, 2で確認した吸水性や強度定数、変形特性を踏まえて、木炭盛土として用いる場合には、使用する木炭の特性や入れ方によって耐震性や破壊形態がどのように変わるのかを明らかにする必要がある。そして、最適な木炭の大きさや形状、配置方法などを決定する方法を提案し、木炭盛土の建設方法を示したい。

4.2 検証方法

4.1で述べた三つの課題に対して、以下のような方法で確認することを想定している。

検証方法1 吸水試験の実施

土の中における木炭の吸水性は、水を供給した木炭混合土から排出される水の量を計測する吸水試験（図-5.2.1）を実施することで確認することができる。ここで実験条件として木炭の大きさや形状、木炭の量等の木炭の諸元、土粒子寸法や締固め度などの盛土の材料的な条件を変化させて実験を行い、木炭混合土の吸水量の変化を確認する。そして、これらの条件と木炭混合土の吸水能力の関係を定量的に評価する評価式を作成し、混合させる木炭の量や大きさなどを設計できるようにしたい。

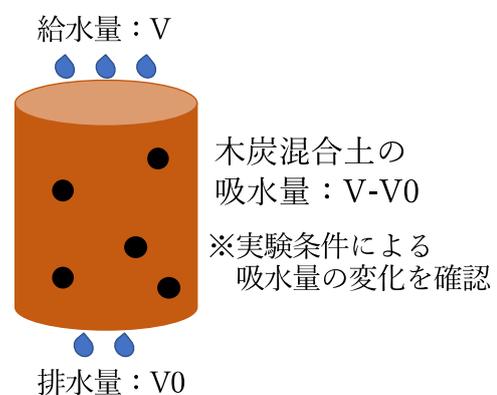


図-5.2.1 吸水試験

検証方法 2 三軸圧縮試験、繰返し三軸試験の実施

木炭混合土の強度定数や変形特性は、三軸圧縮試験や繰返し三軸試験で確認することができる。実験条件としては、吸水試験と同じものを想定している。

実験結果を整理し、これらの条件と木炭混合土の強度定数や変形特性の関係を定量的に評価する。そして、木炭混合土が一定の強度定数や変形特性を有していることを確認するとともに、木炭の諸元等の条件から強度定数や変形特性を推定する式を提案したい。

検証方法 3 振動台実験、大型木炭盛土の降雨実験の実施

木炭混合土を用いた場合の盛土の耐震性や破壊形態への影響は、木炭盛土を用いた振動台実験や大型木炭盛土の降雨実験を実施することで確認することができる。この実験条件として木炭の諸元や盛土材料などの材料的な条件のほか、木炭を配置する位置を考えている。

それぞれの実験ケースで計測される、加振時の木炭盛土の変位量や応答加速度、降雨の浸透特性、盛土の破壊形態などを考察し、材料的な条件や木炭の配置方法に応じた耐荷メカニズムを明らかにする。さらに、盛土の耐震性を定量的に評価するための方法（盛土天端の沈下量を推定する式など）を提案し、混合する木炭の諸元や木炭の配置する位置などを設計できるようにしたい。

5. 木炭混合土を用いた盛土による効果・影響

4.2 で述べた検証によって木炭混合土の盛土への適用性が確認でき、設計に必要な情報が明らかになれば、盛土の設計において、排水設備の損傷が原因となる崩壊に対して代替性を考慮するといった配慮が可能となり、盛土の安全性が向上する。

また、木炭は二酸化炭素固定能力に優れた材料であり、例えば黒炭の場合は重量比率で75%以上の炭素を固定できる。つまり、木炭を活用できる場面が増えれば増えるほど、大気中の二酸化炭素の削減が可能になる^{16,17)}。以上より、木炭混合土を用いた盛土は、地球温暖化対策として環境面からも社会に貢献できる土木技術であると言える。

6. 結論と展望

本論文で提案した木炭盛土は、SDGs17の目標に紐づく169のターゲットのうちの、11.bに示されている大雨や短時間豪雨の増加といった都市の気候変動に対するレジリエンスの強化に貢献できる技術である。また、13.2に示されている地球温暖化への対応を国の政策や戦略、計画に反映することにも貢献できる。さらに、木炭は容易に確保できる資源であるため先進国のみならず、11.cに示されている後発開発途上国における現地の資材を用いた持続可能かつ強靱な建造物の整備の支援にも貢献できる。土木を学ぶ者として、「誰一人取り残さない」というSDGsの理念を心に留めて、土木技術が世界に貢献できることを模索しながら、これからも土木分野を学んでいきたい。

参考文献

- 1)国土交通省気象庁, 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化 :
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
- 2)国土交通省砂防部, 平成18年の土砂災害 :
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h18dosya/h18dosya-houkoku.pdf>
- 3)国土交通省砂防部, 平成21年の土砂災害 :
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h21dosha/h21doshasaigaiyou.pdf>
- 4)国土交通省砂防部, 令和2年の土砂災害 :
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2doshasaigai.pdf>
- 5)新潟県土木部砂防課, 新潟県中越地震と土砂災害 :
<http://npdas.pref.niigata.lg.jp/sabo/5ec49bc4a1e2b.pdf>
- 6)国土交通省:都市・地域整備局都市・地域安全課, 都市・地域防災対策推進室, わが家の宅地安全マニュアル, 2009
- 7)新潟県上越地域振興局農林振興部, 【上越東】地すべり対策事業 :
https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/jouetsu_norin/jhn-nouson-jisuberi.html
- 8)一般社団法人建設コンサルタンツ協会近畿支部公共土木施設の維持管理に関する研究委員会, 公共土木施設の維持管理に関する研究委員会報告書, No. 12-1, 2012
- 9)国土交通省, 全国に51,306カ所の大規模盛土造成地の存在が明らかに!~全国すべてで大規模盛土造成地マップが公表されました~ :
https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi06_hh_000049.html
- 10)国土交通省, 道路橋示方書, 2017
- 11)大木基裕, 関雅樹, 永尾拓洋, 中野正樹: 鉄道盛土における5つの地震時破壊形態の実験検証と合理的な耐震補強の提案, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 69, No. 2, pp. 174-185, 2013
- 12)青木あすなろ建設株式会社, 瞬間吸水材(セルドロロン)
<https://www.aaconst.co.jp/technology/environment/celldoron/>
- 13)高橋正通, 柴崎一樹, 仲摩栄一郎, 石塚森吉, 太田誠一: 林業・緑化分野における高吸水性高分子樹脂の利用, 日林誌, 100巻, 6号, pp. 229-236, 2018
- 14)日本バイオ炭普及協会, 土壌炭素貯留用バイオ炭用語解説 :
<https://biochar.jp/cms/wp-content/uploads/2019/10/土壌炭素貯留用バイオ炭用語解説ver1.pdf>
- 15)Ikuo Abe, Mitsunori HITOMI, Nobuo IKUTA, Isao KAWAFUNE, Ken-ichiro NODA, Yoshiya KERA : Humidity-Control Capacity of Microporous Carbon, 生活衛生, Vol. 39, No. 6, pp.333-336, 1995
- 16)いい炭ドットコム, 炭は地球温暖化に効果大! :
<https://www.i-sumi.com/hpgen/HPB/entries/53.html>
- 17)一般社団法人全国燃料協会, 木炭の規格 :
<http://www.zen-nen.or.jp/pdf/mokutankikaku.pdf>