

木くずを含む津波堆積物の再資源化

高橋弘 (工学博士) ※¹, 森雅人 (博士 (環境科学)) ※²

※¹ 所属 (東北大 (院) 環境科学研究科 教授 連絡先: 022-795-7394, htaka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp)

※² 所属 (ボンテラン工法研究会 事務局長 連絡先: 0233-32-0022, info@boterrain.jp)

1. はじめに

国土交通省では、迅速な復旧・復興に資する再生資源の宅地造成盛土への活用に向けた基本的な考え方を取りまとめ、木くず等有機物を含む津波堆積物の再資源化について下記に記す技術的指針を示している¹⁾。

『盛土材料に含まれる有機物が腐敗することにより盛土の沈下の原因となることがある。特に、混合状態の災害廃棄物から分別した土砂には木くず等の有機物が残存している可能性があることに留意が必要であり、過剰な有機物が残存している材料は、盛土材料として選定しないようにする必要がある。一般的には、土をよく締固めることで土中の有機物が腐敗するには不利な条件となることから、入念な締固めを実施することで対策が可能と考えられるが、現時点での知見では、盛土材料に含まれる有機物量と沈下量の関係を定量的に評価することは困難である。このため、今後、有機物と沈下量の関係を評価する指針や基準が定められた場合は、それに従うものとする。』

以上の技術的指針を踏まえ、本報では盛土構造物内の有機物の腐敗とその抑制方法、有機物を含むヘドロの再資源化事例および木くずを含む津波堆積物の再資源化事例について報告する。

2. 木くず等の有機物の腐敗

木くず等有機物にはリグニン (lignin) やセルロース (cellulose) が多量に含まれているため、土壌における有機物分解では糸状菌の役割が大きい。特に糸状菌の中でも担子菌には、リグニンやセルロースを強力に分解できるものが多い²⁾。

自然環境下で嫌氣的部位ではセルロースなどの高分子は異なる代謝系をもった細菌群の共同作業として分解を受け、嫌気性条件下で硫酸塩還元菌 (SRB 菌) とメタン細菌が分解の最終段階を担っている。

硫酸イオン (SO_4^{2-}) の存在下では硫酸塩還元菌が優先し、硫化水素 (H_2S) を発生させ、硫酸イオン (SO_4^{2-})

の非存在下ではメタン細菌が優先し、メタン (CH_4) を発生させる³⁾。

つまり、木くず等の有機物を分解し、最終的に気中にガス化放出するまでに関与する大まかな微生物は糸状菌 (担子菌) →硫酸塩還元菌およびメタン細菌となる。糸状菌 (担子菌)、硫酸塩還元菌およびメタン細菌の一般的な成育環境を表-1 に示す。

表-1 糸状菌、硫酸塩還元菌およびメタン細菌の一般的な成育環境

種別	糸状菌	硫酸塩還元菌	メタン細菌
生育条件			
温度	10°C~25°C	15°C~45°C	27°C~35°C
pH	4.0~6.0	6.5~8.0	6.5~7.5

表-1 に示すとおり糸状菌、硫酸塩還元菌およびメタン細菌は中温菌であり、水素イオン濃度 (pH) は 4~8 の中性生育菌であることが分かる。

メタン (CH_4) は、常温・常圧下で無色・無臭の気体であり、空気より軽く相対蒸気密度 (空気=1) は 0.555 である。

一方、硫化水素 (H_2S) は最も簡単な硫黄化合物である。空気より重く無色の水溶性の有毒な気体で、腐敗した卵に似た特徴的な強い刺激臭があり、目、皮膚、粘膜を刺激する。このため、「不快なおいの原因となり、生活環境を損なう恐れのある物質」として、悪臭防止法施工令第1条で「特性悪臭物質」に指定されており、700ppm を超えると即死するとされる⁷⁾。

3. 硫化水素抑制対策

盛土材料に含まれる有機物が腐敗し、ガス化することについては上述のとおりであるが、特に硫化水素 (H_2S) が発生した場合、空気より重いことで盛土のり尻に滞留した場合、付近住民の健康被害が懸念される。

従って、著者らはまず、硫化水素発生抑制対策について検討した。井上⁸⁾の研究結果から、津波堆積物に

キーワード: 津波堆積物、木くず等の腐敗、ガスの発生、ボンテラン工法、高アルカリ環境、再資源化

含まれる木くず等有機物が最終分解し、高濃度硫化水素が発生するためには、表-2 に示す硫化水素発生条件が全て満足される必要があると考察される。換言すると、下記5条件のうち一つでも満足させない状態を作り出せば高濃度の硫化水素は発生しないことになる。

表-2 硫化水素発生条件

①硫酸塩 (S イオン) の存在
②硫酸塩還元菌 (SRB 菌) が存在する
③硫酸塩還元菌が増殖するに足る有機物の存在
④硫酸塩還元菌が増殖するに適切な環境が保持されている
⑤発生した硫化水素ガスを捕捉する物質が存在しない

3.1 硫化水素発生確認試験

実験では硫化水素発生抑制効果の検討に先立ち、表-2 に示す硫化水素発生条件に従い環境を整え、硫化水素の発生を確認した。

本実験に用いた装置の概略図および実験開始前 (0 日目) と実験終了時 (40 日後) のサンプルの様子を図-1 に示す。硫酸塩還元菌は酸素のない環境 (酸化還元電位が-100mV 以下) で生育できるので、ガラス瓶にゴム栓でしっかり蓋をし、ガラス瓶内を窒素で充填することにより実験環境内を嫌気性に保持した。ゴ

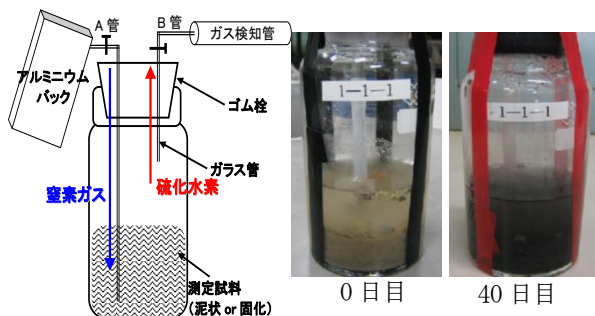


図-1 実験装置概略図, 0 日目および40 日目の試料

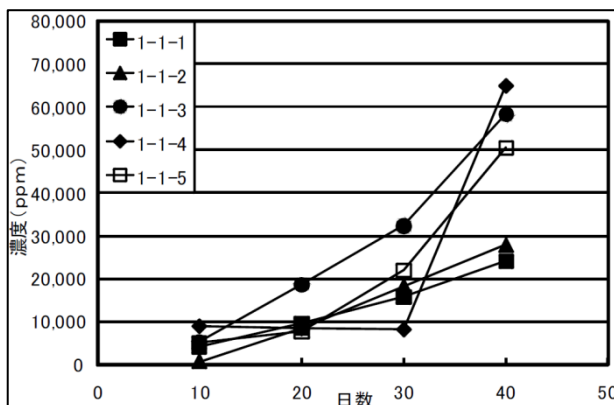


図-2 硫化水素濃度と日数との関係

ム栓には、ガラス管が2本設置されており、ガラス管を通して硫化水素濃度を測定した。

図-2 に硫化水素濃度と日数との関係を示す。その結果、日数の経過とともに硫化水素濃度は増加し、60,000ppm (致死量700ppm) を超える硫化水素の発生を確認した⁹⁾。

3.2 硫化水素発生抑制試験

硫化水素発生条件のうち①~③の条件を崩すことはほぼ不可能に近い。そこで、④に注目して「硫酸塩還元菌が増殖するに適切な環境」を pH の観点から変化させて硫化水素ガスの発生抑制手法について検討した。

実験では、硫酸塩還元菌の生育環境 pH を 9, 10, 11 に調整し、pH 毎の硫化水素発生濃度を測定した。その結果を図-3 に示す。この図に示されるように、pH が増加するにつれて発生する硫化水素濃度は減少し、特に pH11 に調整した試料では硫化水素が検出されず、高い抑制効果が確認された⁹⁾。つまり、盛土内部に含まれる木くず等有機物の腐敗 (ガス化) を抑制するには、相当の期間盛土内部の水素イオン濃度 (pH) を 11 以上に保持することが重要な課題となる。

また、メタン細菌の水素イオン濃度 (pH) における生育環境も中性生育菌と確認されているため、pH を 11 以上に保持することでメタンガスも高い抑制効果が期待される。

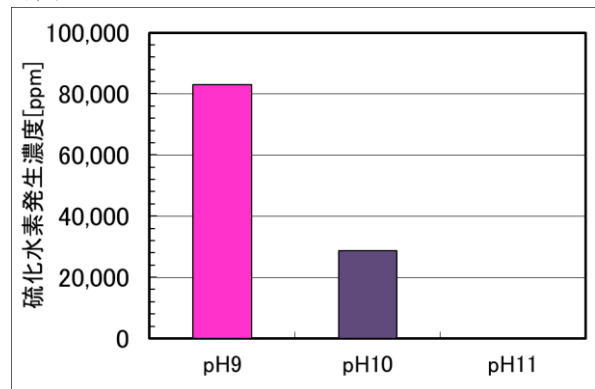


図-3 水素イオン濃度 (pH) と硫化水素発生濃度の関係

4. ボンテラン改良土のアルカリ保持性能試験

泥土を有効利用する際、一般的な工法としてセメントや石灰等の固化材を添加・混合する安定処理工法がある。一方、著者らが開発したボンテラン工法とは、従来盛土としての使用が不適とされてきた有機物を含む泥土に、繊維質系泥土改良材「ボンファイバー」と固化材を投入・攪拌することにより、取扱い性の向

上（ハンドリング）・高耐久性および高耐震性等の機能を付加して、これらを積極的に地盤材料に再資源化する工法である。現在、全国で約370件、53万 m^3 の実績を得ている。

4.1 乾湿繰返し試験

改良土の耐久性を評価するため、表-3 に示す独立行政法人土木研究所が規定した乾湿繰返し試験に準拠し、安定処理土とボンテラン改良土に対して乾湿繰返し試験を実施した。

その結果、図-4 に示すとおり安定処理土はサイクルの進展に伴い、乾燥収縮により亀裂が発生して劣化したが、ボンテラン改良土は図-5 に示すとおり乾湿繰返しを受けても劣化せず、極めて高い耐久性を示すことが確認された。また、図-6 に示すように安定処理土はクラックから改良土内部のアルカリの溶出が長期にわたり生じ、改良土内部の中性化が懸念される。一方、ボンテラン改良土は図-7 に示すようにクラック

表-3 乾湿繰返し試験方法

試験方法			
試験項目	供試体	乾湿1サイクル	確認項目
乾湿繰返し試験	$\phi 5 \times 10$ cm	40°C炉乾燥2日 20°C水浸1日 の合計3日	・所定サイクル終了後、一軸圧縮試験(JIS A 1216)の実施 ・各サイクルの乾燥後、水浸後の供試体の状況観察、写真撮影



安定処理土の乾湿繰返し試験状況
(2 サイクル終了時、 $W_0=105\%$)

安定処理土はクラックが発生し、2 サイクル終了時にほとんどの供試体が崩壊した。

図-4 乾湿繰返し試験結果（安定処理土）



ボンテラン改良土の乾湿繰返し試験状況
(10 サイクル終了時、 $W_0=105\%$)

ボンテラン改良土は乾湿繰返しを受けてもすべての供試体においてクラックの発生が無い

図-5 乾湿繰返し試験結果（ボンテラン改良土）

クが生じないために、改良体内部からの長期にわたるアルカリ等の溶出懸念がない。すなわち、ボンテラン改良土内部は高アルカリ環境を長期間保持することが確認された¹⁰⁾。

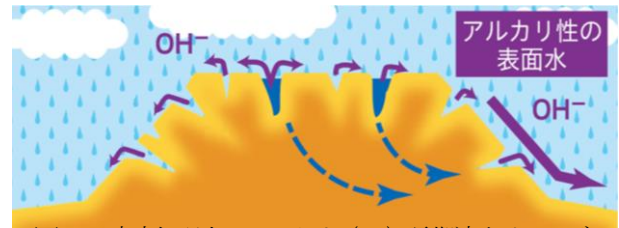


図-6 安定処理土のアルカリ (OH⁻) 長期溶出イメージ



図-7 ボンテラン改良土のアルカリ環境長期保持のイメージ

4.2 人工降雨試験

図-8 に人工降雨機および試料状況を示すが、締固めの有無およびセメント添加量を変化させたボンテラン改良土に人工降雨機により 50 年相当の降雨を与えた後、改良土内部の pH を測定した。図-9 に降雨年数と改良土 pH の関係を示すが、締固め無しの試料は改良土内部の pH が徐々に低下してしまうが、締固めを実施した試料ではセメント添加量に拘わらず改良土内部の pH は 11 程度となり、高アルカリ環境を保持することが確認された¹¹⁾。

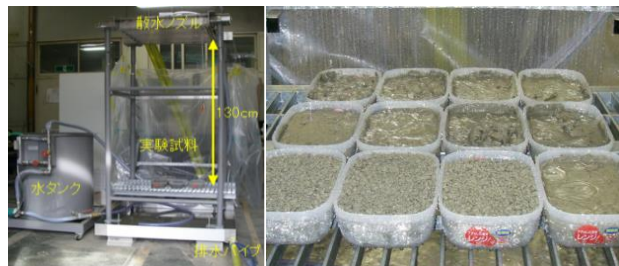


図-8 人工降雨機および試料状況

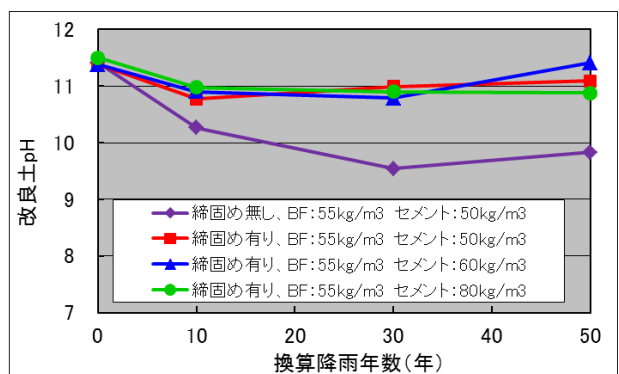


図-9 降雨年数と改良土 pH の関係

4.3 酸性雨模擬試験

酸性雨によるボンテラン改良土の pH 変化を確認するため、図-10 に示すとおり、約 160 年分の降雨量に相当する酸性雨を模擬した溶液にセメント添加量を変化させたボンテラン改良土を 7 日間浸漬させた後、改良土内部の pH を測定した。図-11 に浸漬日数と改良土 pH の関係を示すが、締固め無しの試料は改良土内部の pH は徐々に低下し最終的には pH=10 を切ってしまうが、締固めを実施した試料ではセメント添加量に拘わらず改良土内部の pH は 11 程度となり、高アルカリ環境を保持することが確認された¹²⁾。



図-10 供試体と試験状況

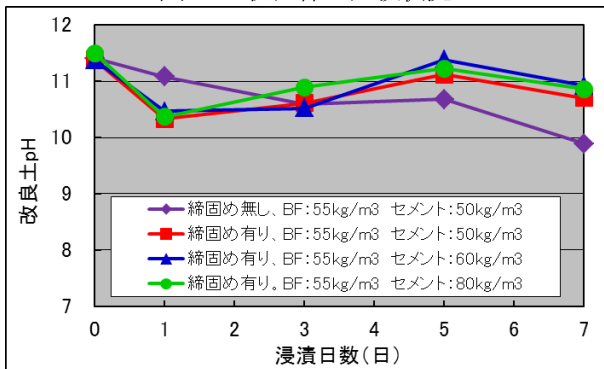


図-11 浸漬日数と改良土 pH の関係

4.4 第三者機関による現地確認

平成 14 年にボンテラン工法で施工した現場において、技術審査証明委員会(委員長：東京大学・山富二郎教授)による現地確認が行われ、改良土の内部状況が調査された(図-12)。その後も定期的に現地審査が行われたが、ボンテラン改良土中のボンファイバーは約 12 年間全く劣化しておらず、改良直後とほぼ同じ状態で繊維質系泥土改良材「ボンファイバー」(古紙破砕物)が存在することが確認された¹³⁾。

4.5 木くずおよびボンファイバーの長期安定性についてのまとめ

上記確認試験の結果、ボンテラン改良土は乾湿繰返し耐久性が高く、改良土にクラックが入らないことから改良土内部は高アルカリ環境を長期間保持することが確認された。また、自然環境による長期的な安定性を検証するため、人工降雨試験と酸性雨模擬試験を



図-12 採取試料の目視確認

実施した結果、約 50 年相当の降雨および約 160 年相当の酸性雨に暴露されても、改良土内部は高アルカリ環境を保つことを確認した。

したがって、施工時にセメントや石灰等のアルカリ系固化材を均一に混合し、十分に転圧・養生を施したボンテラン改良土内部は、長期間高アルカリ環境を保持するため、ボンファイバーおよび木くず等は分解せず、ガスの発生や減容化が発生しないことが明らかになった。

5. 有機物が混入したヘドロの再資源化事例

5.1 浜尾遊水地での施工例

浜尾遊水地築堤事業は東北地方整備局福島河川国道事務所発注の工事であったが、図-13 に示すとおり遊水地内に有機質の軟弱土(ヘドロ)が堆積していることから、再資源化工法を広く公募することになった。その結果、本工法が採用され、平成 14 年 12 月に河川



図-13 施工状況(浜尾遊水地)
左:有機質土, 右:平成 14 年築堤完了



図-14 平成 25 年撮影ボンテラン改良土による施工箇所

堤防が完成した。図-14に示すとおりポンテラン改良土を堤体盛土に利用した箇所では、平成14年完成以来、12年間ガスの発生および沈下・クラック等の被害は一切確認されていない。

5.2 芳賀池地区造成工事での施工例

福島県郡山市内の住宅街にあるため池の「芳賀池」は、堆積したヘドロの悪臭に周辺住民から多くの苦情が寄せられていた。そこで、郡山市では悪臭の原因であるヘドロの処理に本工法を採用し、平成16年に親水公園の盛土材として人工地盤を造成した(図-15)。

その後、悪臭は無くなり、現在芳賀池公園として周辺住民の憩いの場となっている(図-16)。



図-15 施工状況(芳賀池地区造成工事)
左:ヘドロ堆積状況,右:平成16年人工地盤完成



図-16 ポンテラン改良土による親水公園

6. 津波堆積物の再資源化事例

ポンテラン改良土は高い耐久性・耐震性などの特徴を有することから、社会的・学術的に高い評価を得ている。特に改良土内部は相当の期間、高アルカリ環境を保持することが可能であることから有機質泥土の再資源化の実績も多数有している。また、過去の施工事例において有機物の腐敗と盛土の沈下現象は一切確認されていない。このような本工法の有効性が高く評価され、これまでに木くず等有機物を含む津波堆積物の再資源化工法としてポンテラン工法が採用されてきている。以下施工事例を紹介する。

6.1 砂押川河道掘削工事

東日本大震災の津波が、宮城県多賀城市の二級河川「砂押川」を遡上し、大量の津波堆積物が河道を閉塞して河川の流下断面の確保が困難となった。そこで、河道を掘削し、掘削した津波堆積物を再資源化し、改良土を堤体盛土に再利用するため、ポンテラン工法が設計採用された。

《施工概要》

- ・発注者:宮城県仙台土木事務所
- ・総処理量:24,700m³ ・含水比:60%
- ・目標強度:第2種改良土($q_c=800$ kN/m²)
- ・強熱減量:4.73%(原泥)→7.11%(改良土)
(ボンファイバーを25kg/m³添加)

図-17に示すとおり土砂ピットで雑物除去した後改良し、築堤造成工事までの期間をブルーシートで品質の低下が起こらないようにして仮置き(図-18)を行っている。



図-17 砂押川での土砂ピットでの雑物除去状況



図-18 砂押川におけるブルーシートを用いた仮置き状況

6.2 石巻漁港西港浚渫工事

東日本大震災により発生した津波堆積物は、石巻漁港内の航路を塞ぎ、地域の基幹産業である水産加工業にも大きな打撃を与え、港湾内の浚渫は喫緊の課題となっていた。ところが、浚渫された津波堆積物は卵の腐った腐敗臭(H_2S と思われる)を伴うヘドロ状であり、安定処理工法では運搬性が確保出来ないため、本

工法が採用された。

《施工概要》

- ・発注者：宮城県東部地方振興事務所
- ・総処理量：5,000m³ ・含水比：70%
- ・強熱減量：8.10%（原泥）→11.98%（改良土）
（ボンファイバーを37.5kg/m³添加）

浚渫船により浚渫した津波堆積物を土砂ピットに投入してボンテラン工法で改良した(図-19)。改良土は仮置き場まで即時運搬され、0.7m³級バックホウにより締固めが行われた(図-20)。仮置き後のボンテラン改良土は、腐敗臭が無くなり、硫酸塩還元菌の増殖を抑制し、硫化水素発生防止対策として有効であることが実証された。

さらに、災害復旧等の迅速な対応が求められる現場においての有効性が確認された。



図-19 石巻西港におけるボンテラン改良状況



図-20 養生1日で0.7m³級BHによる締固めが可能

6.3 その他の津波堆積物再資源化工事

- 1) 塩竈市寒風沢地区災害廃棄物処理業務
・発注者：塩竈市 ・総処理量：4,000m³
- 2) 庶野漁港災害復旧工事（応急）
・発注者：北海道建設部・土木
・総処理量：7,000m³
- 3) 冬島漁港機能強化工事
・発注者：北海道胆振総合振興局
・総処理量：3,800m³

4) 早川東海岸外災害復旧工事

- ・発注者：宮城県仙台地方振興事務所 農村整備課
- ・総処理量：1,500m³

5) 平成23年度災害廃棄物処理業務 環災第1-261号（亘理名取ブロック（名取処理区））

- ・発注者：宮城県 ・総処理量：2,000m³

6) 平成24年度社河川復興4-A05号砂押川河道掘削工事

- ・発注者：宮城県仙台土木事務所（施工中）

7) 平成24年度 県債311地震災1049-001号高城川河川災害復旧工事

- ・発注者：宮城県仙台土木事務所（施工中）

7. むすび

ボンテラン工法は、木くず等有機物を含む津波堆積物の再資源化工法として最適であり、これまでに複数の実施工の実績も有する。本工法の特徴を広く発信し、被災地の復興に貢献して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省 都市局 都市安全課：迅速な復旧・復興に資する再生資材の宅地造成盛土への活用に向けた基本的考え方，pp1-9，2012.3.
- 2) 服部勉，宮下清貴：土の微生物学，養賢堂，pp57-58.
- 3) 同上 pp63-64.
- 4) 同上P13.
- 5) 井上雄三：安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染防止対策に関する研究，(独)国立環境研究所，P8.
- 6) 佐藤禎一：嫌気処理装置を効率的に運転する最適な環境づくり，栗田工業株式会社 KCR センター
- 7) 井上雄三：安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染防止対策に関する研究，(独)国立環境研究所，pp2-3.
- 8) 同上P8.
- 9) 金濱弘和，高橋弘，森勇人，森雅人，西村宏之：廃石膏ボードを利用した土質改良に関する研究—硫化水素の発生抑制技術について—，pp2-6.
- 10) 森雅人，高橋弘，熊倉宏治：繊維質固化処理土の乾湿繰り返し試験による耐久性に関する実験的研究，資源・素材学会 資源・素材学会誌「資源と素材」2005 2,3, Vol.121, pp.1-7
- 11) 金濱弘和：廃石膏ボードを利用した新しい土質改良工法に関する研究，東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻 高橋弘研究室 修士論文 pp73-83.
- 12) 同上 pp96-99.
- 13) (一財)先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明報告書ボンテラン工法，2010.12, pp79-84.