

回転式破碎混合工法による 現地施工性確認試験について

札幌開発建設部 千歳川河川事務所 第2工務課 ○大川 智
八木 勝良
青木 康治

千歳川流域の堤体材料となる遊水地内掘削土は、掘削直後では高含水比で施工性が得られず、曝気乾燥による含水比の改善や粒度調整による土質改良が行なわれている。しかし、今後の遊水地掘削事業では、更に高含水な粘性土や泥炭が大量発生する見込みであり、曝気効果が十分に期待できないことによる整備事業スケジュールの遅れが懸念される。そこで、大規模処理能力を有する回転式破碎混合工法を用いて、粘土と砂の粒度調整を現地試験施工にて実施した。ここでは土質改良の効果と工法の適用性について報告するとともに、粘土と骨材廃棄岩の粒度調整および泥炭セメント改良土の固化破碎土利用についても簡易配合試験を実施したので、あわせて結果概要を示す。

キーワード：高含水比粘性土、土質改良、粒度調整、固化破碎、試験施工

1. はじめに

千歳川河川事務所管内では、石狩川の背水の影響を大きく受ける千歳川において、洪水のピーク水位を計画高水位以下となるよう、洪水調節容量が概ね5千万 m^3 の遊水地群を千歳川本支川に分散して整備する事業を行っている（図-1参照）。この遊水地の周囲堤整備や千歳川本支川の河川堤防整備に必要な盛土材料は、遊水地掘削に伴い発生する土砂を流用している。

この掘削発生土は高含水の粘性土であることから、その流用に際しては、一年程度仮置土し曝気を併用して石狩川本川の掘削工事で発生した砂と混合することで粒度の改善と施工性の確保に努めてきた。

しかし、工事が本格化する中で、砂の確保が困難となり、砂を購入せざるを得ない状況に移行してきており、当河川事務所ではより安価で効果的に施工性を確保する方法の検討を行っている¹⁾。

本報告では、高含水比粘性土の大規模な粒度調整による土質改良を行うために、処理能力の向上と仮置土期間の短縮に着目して、「回転式破碎混合工法」による試験施工を実施し、攪拌土品質の確認試験を行ったので、その結果について報告するものである。

また、ダム現場から発生する廃棄岩について、今後の有効活用の方向性を検討するための基礎資料を得ることを目的として、骨材廃棄岩と粘性土の攪拌混合試験を実施した。

さらに、今後の遊水地掘削によって大量発生する泥炭においても固化破碎土による有効活用を図るための基礎資料を得ることを目的として、他河川事務所との連携により高水敷の泥炭を用いた混合性能の確認と固化破碎土の材料特性を把握するための原位置および室内試験を実施したので

あわせて報告するものである。

なお、試験施工の実施は、通常期で最も厳しい条件下の施工時期を想定して10~11月とした。



図-1 遊水地整備事業位置図

2. 試験概要

(1) 試験プラント

回転式破碎混合法 (NETIS KT-090048-A) は、図-2 に示すように鋼製円筒内で高速回転する複数本のフレキシブルなチェーンの打撃力で、投入された地盤材料の破碎・細粒化と添加材料との均質な混合を同時に行うことができる工法である。

本工法の特長は、従来の地盤改良技術では対応が困難であった高含水比の塊状粘性土の細粒化(解砕)と砂や礫、あるいはセメントなどの添加材料との混合が一連のプラントシステムで可能なことにある。また、砂礫や岩塊等の破碎など、粘性土から岩塊までの広い範囲の地盤材料の破碎・混合を可能にするものである。

本試験施工では、次の3項目についての現地施工性確認試験を同一プラントで実施した。

- ①粘土と砂の粒度調整
- ②粘土と骨材廃棄岩の粒度調整
- ③泥炭のセメント改良土(固化破碎利用)

これらの項目の試験攪拌を行ったプラントシステムを写真-1に示す。

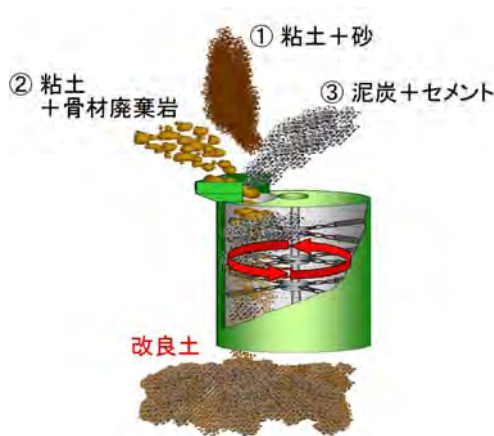


図-2 回転式破碎混合法概念図

プラント構成は、次のように大別される。

- ①地盤材料を安定的に供給する設備
- ②添加材料を貯蔵・供給する設備
- ③材料を計量するベルトコンベア
- ④材料を搬送・投入・排出するベルトコンベア
- ⑤材料等を破碎・混合する回転式破碎混合機本体
- ⑥セメント等の粉塵対策とした集塵機
- ⑦プラント全体の電源を供給する発電機

プラントは、定置式と移動式があり、施工条件によって選択される。

3. 粘土と砂の粒度調整

(1) 使用材料

北島地区遊水地の掘削粘土と管内工事で利用された代表的な砂の粒度分布を図-3に示す。

粘土は、細粒分含有率 $F_c=85\sim100\%$ 程度で自然含水比 $w_n=50\sim120\%$ 程度、コーン指数 $q_c=10\sim40\text{kN/m}^2$ 程度にある。

これを置土し1年程度の曝気することで $w_n=40\sim70\%$ 程度、 $q_c=120\sim200\text{kN/m}^2$ 程度に改善されるが、施工性の確保は困難であるため粒度調整による土質改良で発生土処理と盛土材料の確保が行われている。

当河川事務所管内における砂の大半は、火山灰質粗粒土であることから、自然含水比が一般的な砂に比べてやや高い傾向にある。

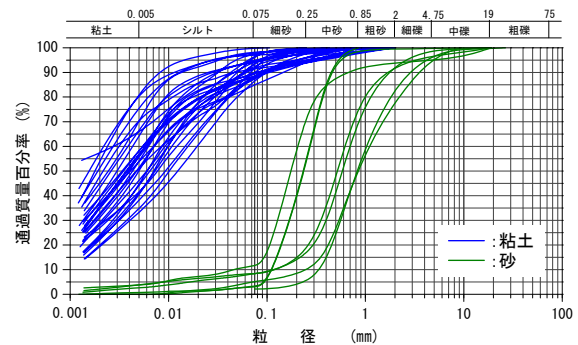


図-3 北島地区遊水地掘削粘土と千歳川河川管内工事で利用される砂の粒径加積曲線

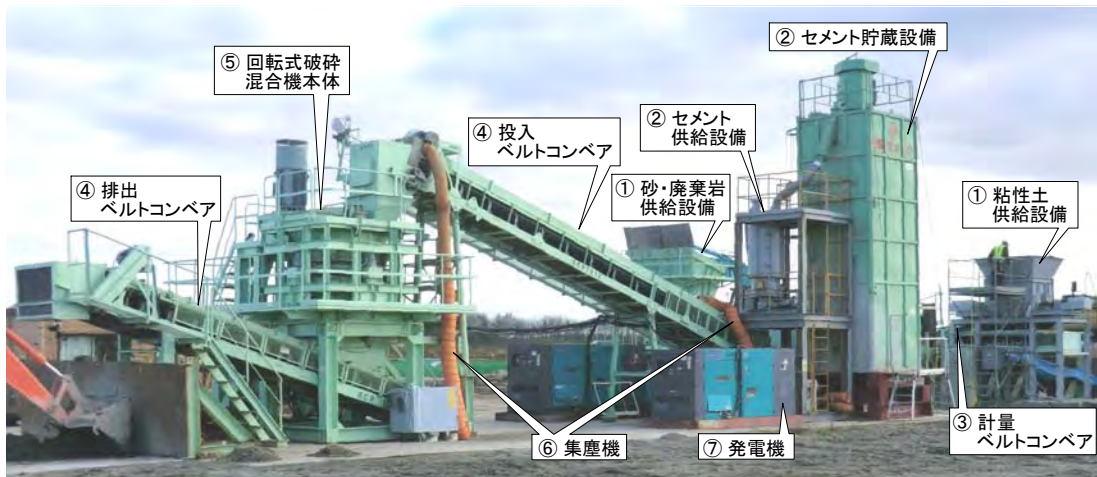


写真-1 回転式破碎混合法プラント

(2) 簡易配合試験

現地施工性試験に先立ち、粘土 C と砂 S の性状把握と実機による簡易配合試験を C : S = 1 : 1.0 ~ 1 : 1.6 (体積比) にて実施した。

使用材料の含水比は、粘土が $w = 64\%$ 程度で、砂が $w = 16\%$ 程度といずれも高い状態にある。

図-4 は、攪拌材料と簡易配合試験で得られた粒度分布を示したもので、攪拌土は $F_c = 25 \sim 35\%$ 程度の範囲にある。

図-5 は、攪拌土の締固め特性(乾燥密度 $\rho_d \sim$ 含水比 w) と締固め試験に併用したコーン指数試験(コーン指数 $q_c \sim$ 含水比 w) 結果を示したものである。

同図の $\rho_d \sim w$ の関係からは、砂の配合割合の増加に伴い最大乾燥密度 ρ_{dmax} が大きく、最適含水比 w_{opt} が小さくなり、 $q_c \sim w$ 曲線も締固め特性に依存し左側にシフトしており、配合割合に応じて材料特性が変化することが示される。

また、 $q_c \sim w$ 関係に見られるように、 q_c は材料の含水状態で急激に変動しており、わずかな含水比の変化で施工の可否に大きく影響する。

施工性の指標である q_c 値は、施工機械によって要求値は異なるが、通常の施工性を確保するための q_c は 400 kN/m^2 以上²⁾ が目安となることから、札幌開発建設部では現場における目標値として $q_c \geq 400 \text{ kN/m}^2$ を採用している。

しかし、曝気乾燥に適した施工時期であることや攪拌場や盛土場で曝気可能なヤード状況である場合等には、現場状況に応じて協議を行い $q_c \geq 350 \text{ kN/m}^2$ を採用している。

より確実な施工を実施するためには、事前の配合試験によって含水比による性状変化を把握しておくことが重要である。

(3) 曝気養生と簡易試験盛土

簡易配合試験で使用した地山粘土の含水比は、採取深度で異なるようで、当初想定した含水比 ($w = 64\%$ 程度) よりも高く $w = 65 \sim 75\%$ であり、特に掘削対象深度の上半分は、液性限界 ($w_L = 71\%$) 付近の非常に不安定な含水状態であった。

このように攪拌材料の含水比が高いため、攪拌直後において転圧不可能であったことから、仮置き養生により含水比を低下させながら簡易的な試験盛土を実施した。

図-6 は、7t 級ブルドーザ 4 回転圧時の w と ρ_d の関係をプロットしたものであるが、 w の低下によって同一エネルギーにおいて締固めやすくなり ρ_d が増大する(密実になる)傾向が示される。

図-7 は、 w と q_c の関係をプロットしたもので、4 回転圧のデータとともに、敷均し時(含水比が高く転圧できない状態)のデータを参考に白抜きで示している。

転圧可能な状態では w の減少に伴い q_c は増大する傾向が示されるが、敷均し時の q_c は $40 \sim 50 \text{ kN/m}^2$ 程度であった。

仮置き養生日数とコーン貫入抵抗値を図-8 に示す。仮置き放置のみでは含水比の改善が見られないことから、養生 7 日目以降は強制曝気(バックホウによる掻き起こし)を実施し、施工性を得るまで含水比を低下させている。

Satoshi Ookawa, Katuyoshi Yagi, Kouji Aoki

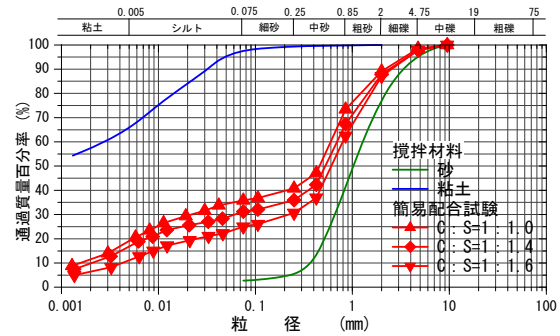


図-4 攪拌材料と簡易配合試験の粒径加積曲線

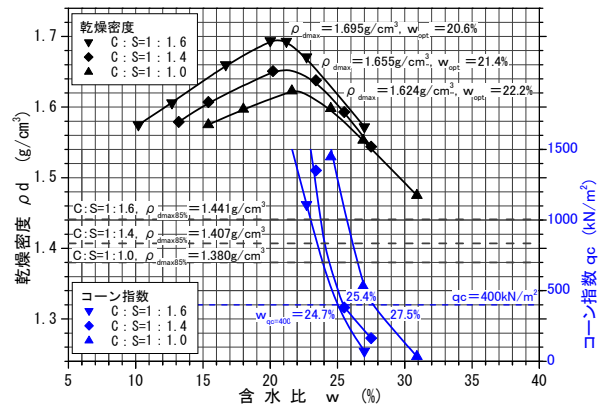


図-5 締固め特性と施工性の目安 ($w \sim \rho_d$, $w \sim q_c$ 関係)

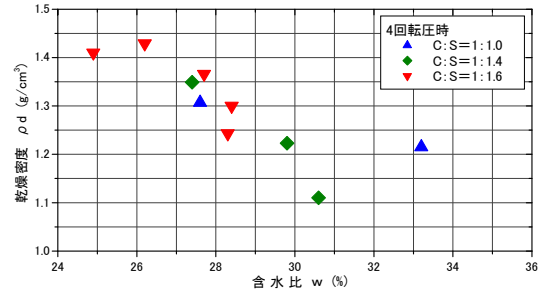


図-6 転圧時の攪拌土の含水比と乾燥密度の関係

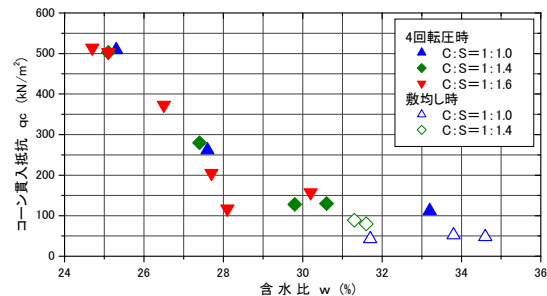


図-7 転圧時の含水比とコーン指数の関係

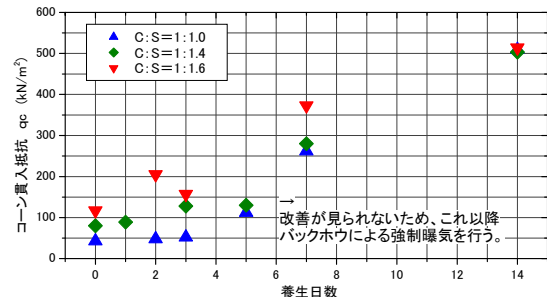


図-8 養生日数とコーン貫入抵抗値

なお、砂の配合割合が高いほど、強制曝気による改善効果の発現が高い傾向を示すようで、試験が可能となる曝気養生期間の最も短いC:S=1:1.6配合において試験盛土を実施した。

(3) 試験盛土(C:S=1:1.6)

試験盛土は、先に示した曝気養生後の攪拌土(C:S=1:1.6)を用いて7t級ブルドーザにて転圧した。

転圧回数と締固め度Dcの関係を図-9に、この時のコーン貫入抵抗を図-10に示す。

Dcおよびqcは、4~6回転圧で概ね一定になる傾向で、にあり、適切な含水状態で盛土品質を十分満足することが可能であることが示された。

ただし、良好に転圧された層に対して含水比が高い材料を敷均した予備試験において、下の層を含めて全体が施工困難な状態になることを確認している。ヤードの制約から含水比が高い材料を盛土場にて曝気する場合には、施工時期に考慮した施工工程を検討する必要があると考える。

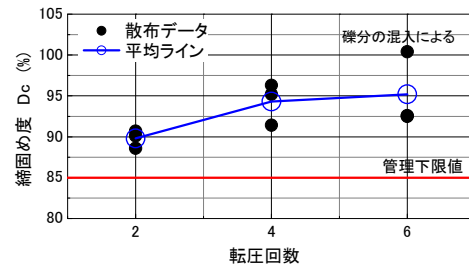


図-9 試験転圧回数と締固め度の関係

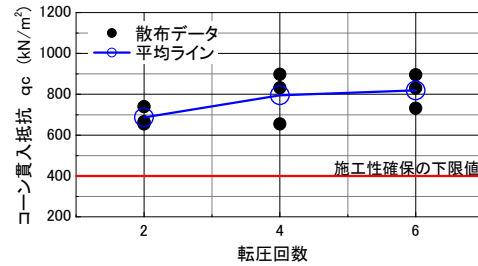


図-10 試験転圧時のコーン貫入値

4. 粘土と骨材廃棄岩の粒度調整

(1) 使用材料

先に示した北島地区遊水地の掘削粘性土に対して、回転式破碎混合工法を用いてダム現場で発生した骨材廃棄岩を粒度調整材料に適用できるかを検討した。

攪拌材料の粒度分布を図-11に示す。同図には、骨材廃棄岩の代表試料を回転式破碎混合プラントに単独で通過させ、破碎前と破碎後の粒度をあわせてプロットしている。

通常、盛土材料は、施工時のまき出し厚の制限から、最大寸法が10~15cm以下が望ましいとされている³⁾。

骨材廃棄岩は、構成粒度が粘土分から粒径300mm以上の人頭大の巨石よりなるため、単独では土工材料への適用が困難な材料である。

試験に用いた骨材廃棄岩は、回転式破碎混合工法の機械的制約から、200mmを超える粗石および巨石を除外した。

骨材廃棄岩の破碎効果は、図-11に示されるように礫分が破碎され、砂分が増加する傾向が確認された。

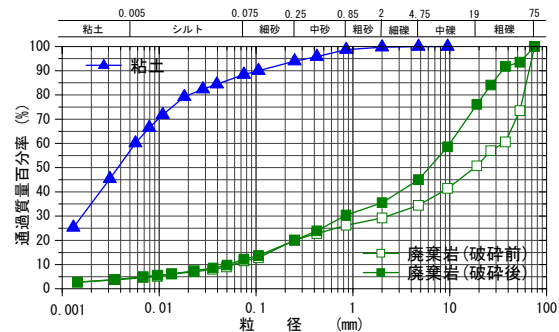


図-11 攪拌材料と骨材廃棄岩の粒径加積曲線

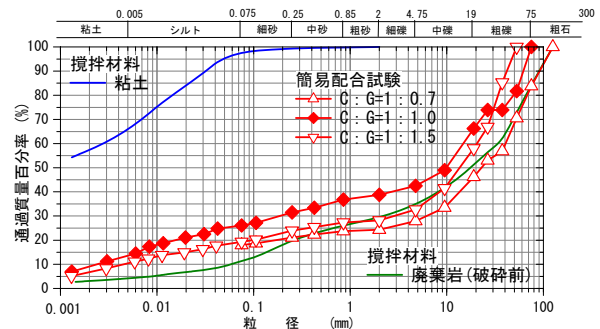


図-12 攪拌材料と簡易配合試験の粒径加積曲線

(2) 混合性

簡易確認試験における配合割合は、C:G=1:0.7, 1:1.0, 1:1.5(体積比)で実施した。

図-12は、攪拌材料と簡易配合試験で得られた粒度分布を示したもので、攪拌土はFc=20~30%程度の範囲にある。

C:G=1:1.0および1:1.5は、良好な混合状況と施工性が確保できる材料特性を確認したが、C:G=1:0.7は、石分の含有が多く、施工性の確保も困難である結果を得た。

C:G=1:0.7配合において石分が多い理由は、粘土の配合割合が多いため、破碎混合のエネルギーが石の破碎ではなく粘土に吸収されたことによるものと想定される。

(3) 攪拌土製造試験

C:G=1:1.0の配合割合で攪拌土製造試験を実施した。

図-13に攪拌土の締固め特性(乾燥密度 ρ_d ~含水比w)と締固め試験に併用したコーン指数試験(コーン指数qc~含水比w)結果を示す。

攪拌土は、比較的高い再現性を示し、骨材廃棄岩は破碎され盛土材料として利用可能な粒度に改善されていた。

しかし、使用した粘土の含水比は80%程度と非常に高い状態で、製造された攪拌土の含水比も高いため、強制曝気による含水比改善後に試験盛土を実施した。

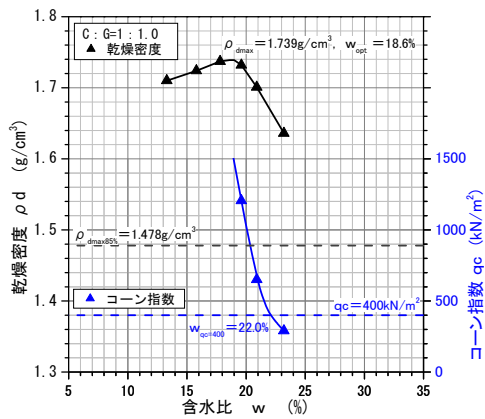


図-13 含水比 w ～乾燥密度 ρ_d , コーン指数 q_c 関係

(4) 試験盛土

試験盛土で得られた転圧回数と締固め度の関係を図-14に示す。締固め度は、4回転圧以上で管理基準下限値 ($D_c = 85\%$) を満足する結果を得た。

D_c は、4～6回転圧で概ね一定になる傾向にあり、適切な含水状態で盛土品質を十分満足することが確認された。

図-15にコーン貫入抵抗を示す。礫障害や高い読み値を除いて整理したがこの場合のコーン貫入抵抗値は、やや過小評価するものとする。石・礫分を含有する盛土材料は、施工性に関する評価管理が今後の課題である。

(5) 骨材廃棄岩の適用性

粒径 200mm 程度までの骨材廃棄岩は、破碎混合されることによって、粒度調整材料として有効に活用できる。

粘土の含水比が高い場合には、強制曝気により攪拌土の含水比改善を行う必要がある。最適な含水状態では試験盛土によって良好な施工性を確認している。

良好な破碎混合効果を得るためには、骨材廃棄岩を $C : G = 1 : 1.0$ 程度以上の割合とする必要があると考えられる。

これは、 $C : G = 1 : 0.7$ の骨材廃棄岩の少ない配合では、破碎効果が減少する傾向を示したことによる。

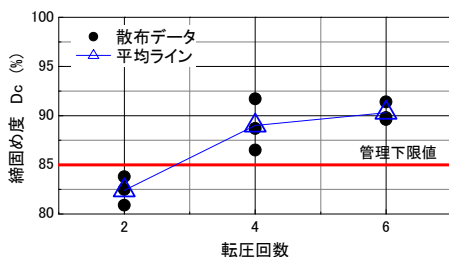


図-14 試験転圧回数と締固め度の関係

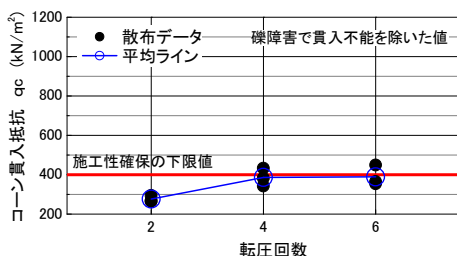


図-15 試験転圧時のコーン貫入抵抗値

5. 泥炭セメント改良土の固化破碎土利用

(1) 使用材料

試験に用いた泥炭は、夕張川 KP0/5 左岸高水敷において、バックホウ掘削により採取し、土質試験を実施した。

泥炭の自然含水比は、480～620%程度を確認している。

湿潤密度は、地山 GL-2.1m で $\rho_t = 1.026 \text{ g/cm}^3$ 、ヤード内搬入置き時に $\rho_t = 1.010 \text{ g/cm}^3$ である。

固化材である高炉 B 種セメントの添加量は、泥炭の湿潤密度の 20% 及び 32% 重量の 2 ケースで実施した (過年度他河川事務所と同一条件⁴⁾)。

(2) 試験攪拌状況

混合性については、フェノールフタレインによる試薬反応からは、両添加量において固化材は改良土全体に均一に混合されているが、特に 32% 添加量では、良好に混合されていることが確認された(写真-2 参照)。

攪拌混合後は、バックホウによりヤード整形し、7 日間放置後し固化後に破碎を実施した。



写真-2 試薬反応による混合性確認(32%添加量)

(3) 固化破碎土の材料特性

固化破碎土の締固め特性と締固め試験に併用して実施したコーン指数試験結果を図-16に示す。

同図から目標 q_c 値 (施工性) を得る改良土の含水比の目安は、添加量 20% で 169% 程度、添加量 32% で 146% 程度である。

養生 1 日後の固化土の含水比は、添加量 20% で 190～200% 程度、添加量 32% で 150～160% 程度であることが確認された。

このことから、固化土の含水比が高く通常の施工性を確保することは困難であることが示される。

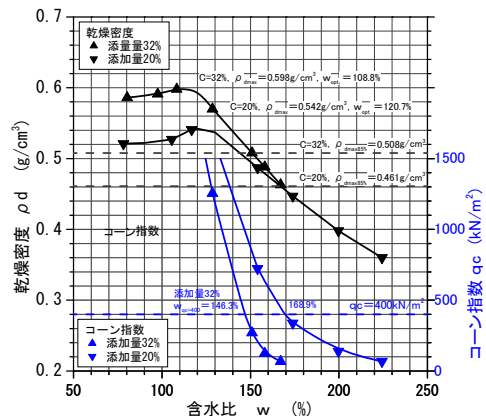


図-16 含水比 w ～乾燥密度 ρ_d , コーン指数 q_c 関係

図-17は、養生日数と含水比の関係をプロットしたものであるが、養生7日を経ても含水比の有意な変化は確認されないことから、固化材の反応は、攪拌混合後1日以内にほぼ終了しているものと考えられる。

透水性に関しては、試験盛土で得られた締固め度に調整した透水試験の実施によって、いずれの配合においても難透水性を十分確保するものであった。

(4) 試験盛土

試験盛土は、7t級ブルドーザ3往復転圧と、ブルドーザ3往復+バックホウ1往復転圧を実施した。

図-18は転圧条件と締固め度の関係をプロットしたものであるが、全ての転圧条件において管理下限値 ($D_c=85\%$)を下回る結果を得た。

締固め度が小さい理由として、改良土の含水比 w_n が施工性を得る含水比の目安 $w_{qc}=400$ よりも大きいことが挙げられる。特に添加量20%改良土は、 $w_n/w_{qc}=400$ ($\approx 200/169$)が1.1~1.2程度にあることが、締固め効果が得られないものと考えられる。

一方、添加量32%改良土は、 $w_n/w_{qc}=400$ ($\approx 160/146$)が1.0~1.1程度にあるため、締固めエネルギーに応じた締固め効果がある程度得られているものと考ええる。

通常の施工性を得るためには、泥炭含水比の事前低下若しくは、添加量を増やす必要があると考える。

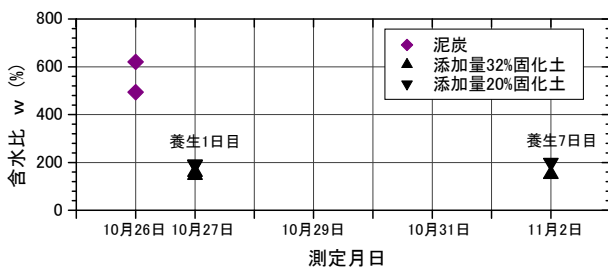


図-17 固化土養生日数と含水比の関係

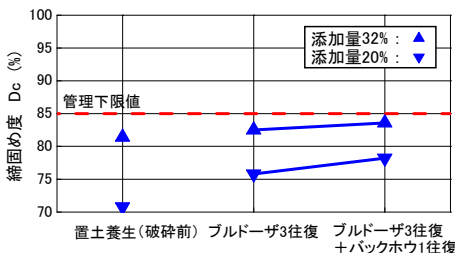


図-18 試験条件と締固め度

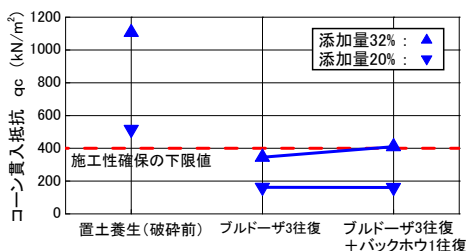


図-19 試験条件時のコーン貫入抵抗値

6. おわりに

今回の確認試験においては、実施時期が雨と低温が続く厳しい条件下であるとともに、攪拌材料である粘土および泥炭の含水比が高い条件下での試験施工であったが、回転式破碎混合工法は、全ての配合において改良土が安定的に製造できた。

以下に各試験の結果と問題点を取りまとめる。

(1) 粘土と砂の粒度調整

- 攪拌直後の攪拌土は、含水比が高い状態であったが、運搬可能であった。
- $C:S=1:1.6$ では、強制曝気併用の7日養生で、 $q_c=373\text{kN/m}^2$ の施工可能な材料に改善されたが、天候状況によっては改善効果が期待できないことが懸念される。
- 試験施工は、小規模 ($W \times D = 5 \times 25\text{m}$) で比較的良好な結果を得るが、大規模 ($30 \times 45\text{m}$) では異なる結果を得た。
- 盛土は、含水比の高い材料で層を重ねると良好な盛土下層を含めた全体が悪化する傾向が見られた。

(2) 粘土と骨材廃棄岩の粒度調整

- 廃棄岩に対して有効な破碎効果が確認された。
- $C:G=1:1.0$ 配合で良好な性状であることを把握した。
- 骨材廃棄岩の運搬や対応粒径を超える巨石の破碎でコストが増大する問題がある。
- 攪拌土品質に大きく影響を与えるため、事前に骨材廃棄岩の性状を把握しておく必要がある。

(3) 泥炭セメント改良土の固化破碎利用

- 改良土の混合性は良好であった。
- しかし、改良土の含水比が高く、所定の締固め度を得ることはできなかった。
- 添加量を増やすことが可能であれば、更なる改善が期待される。

今後は、高含水比粘土を対象とした現地試験施工を曝気乾燥効果が期待される施工時期である5~7月に実施し、回転式破碎混合処理工法の適用性について検証して行く予定である。

参考文献

- 1) 楠見 嘉和, 高村 章, 若林 英樹: 河川堤防に用いる高含水比粘性土の石灰安定処理について, 第54回北海道開発技術研究発表会, 2010年2月。
- 2) (財)土木研究センター, (独)土木研究所編著: 建設発生土利用技術マニュアル第3版, p.27~34, 2004年9月。
- 3) (財)国土技術研究センター: 河川土工マニュアル, p.66, 2009年4月。
- 4) 石井 克己, 高嶋 守仁, 林 隆幸: 固化処理した泥炭の試験盛土について(第1報), 第54回北海道開発技術研究発表会, 2010年2月。