

フィルダムへの砕・転圧盛土工法の適用 — 二軸回転型攪拌混合機(DAM)の開発 —

北島 明 福島 伸二^{*1}
土佐内 優介

概 要

老朽化したフィルダムやため池の堤体改修（補強や漏水防止）に貯水池内に堆積した底泥土を所要の強度と遮水性をもつように、固化改良して築堤土に利用することができる砕・転圧盛土工法^{1), 2)}が適用されている。現在、砕・転圧盛土工法における底泥土の初期固化には汎用性のあるバックホウをベースマシンに利用したトレンチャー型混合攪拌機が使用されることが多いが、この機械は築堤規模が大きいフィルダムの堤体改修には攪拌能力が不足する問題がある。

本稿では、トレンチャー型機に代わる築堤規模の大きいフィルダムの堤体改修にも対応できる攪拌能力を有する新しい二軸回転型攪拌混合機（DAM : Double Axial Mixing）の概要と、その攪拌混合性能を実施レベルで確認した結果を報告するものである。

Development of double axial mixing method to repair damaged embankments using cement-mixed muddy soil

Abstract

Most of old fill-type dams have led to sediment build-up in reservoirs, causing pollution and loss of reservoir capacity. In general, this sediment has a high-water-content and is made up of very soft clayey soil. We have developed a new method to repair the damaged embankment by using a mixture of this sediment and cement. Up to now, the muddy soil and cement have been mixed using a trencher type mixture machine, which is fine for small ponds. But trencher type mixers have insufficient capacity for large-scale fill-dams. In this paper, we report on use of the double axial mixing method, and its use under actual site conditions.

キーワード： 固化材混合 現場試験 底泥土
堤体改修 均一性 強度

*1 建設本部 土木エンジニアリングセンター

§1. はじめに

老朽化したフィルダムやため池の堤体改修（補強や漏水防止）に貯水池内に堆積した底泥土を所要の強度と遮水性をもつように、固化改良して築堤土に利用することができる砕・転圧盛土工法^{1),2)}が適用されている。現在、砕・転圧盛土工法における底泥土の初期固化には汎用性のあるバックホウをベースマシンに利用したトレンチャー型混合攪拌機が使用されることが多いが、この機械は築堤規模が大きいフィルダムの堤体改修には攪拌能力が不足する問題がある。

本稿では、トレンチャー型攪拌混合機に代わる、築堤規模の大きいフィルダムの堤体改修にも対応できる攪拌能力を有する新しい二軸回転型攪拌混合機（DAM：Double Axial Mixing）の概要と、その攪拌混合性能を実施工レベルで確認した結果を報告するものである。

§2. 砕・転圧盛土工法の概要

砕・転圧盛土工法^{1),2)}は、図1に概念的に示すように、池内に堆積した底泥土をセメント系固化材の添加により所要の強度と遮水性を有する築堤土に固化改良して、堤体の補強や漏水防止のためのコアゾーンやシェルゾーンを築堤するものである。攪拌混合機は幅約5m×深さ2~3m×長さ約25mのピット内で底泥土にスラリー化した固化材を添加・混合した固化処理土、いわゆる初期固化土を準備するのに使用される。築堤は一定の初期固化日数 t_s だけ経過させた固化途上にある初期固化土を規定の最大粒径 D_{max} で解砕してから、通常の築堤土の場合と同様に均一に撤出し、一定層厚に敷均してから規定回数 N 回だけ転圧して行う（この状態にある固化処理土を砕・転圧土という）。堤体表層部は法面垂直方向に厚さ50cm程度の覆土を設けるのを基本とするが、覆土は砕・転圧土部の乾・湿繰返しによる劣化防止、高アルカリ水の溶出防止、そして張芝などの植栽の基盤層とするためである。

砕・転圧土では初期固化日数 t_s と解砕・転圧後の日数 t_{cc} を合せた $t=t_s+t_{cc}$ が全固化日数になり、 t_s は解砕・転圧後の再固化強度に影響し、 t_s が短いほど転圧直後の強度が低いが、その後の強度発現が大きい。また、 D_{max} は強度と透水性に影響し、 D_{max} の大きい砕・転圧土ほど強度と透水性が高くなる。したがって、砕・転圧土により所要の強度と遮水性を有する堤体を築造するには t_s と t_{cc} 、 D_{max} を適切に管理することが必要となる。

従来、単なる底泥土に固化材を添加しただけの固化処理土（初期固化土に相当）は、強度を固化材添加量の加

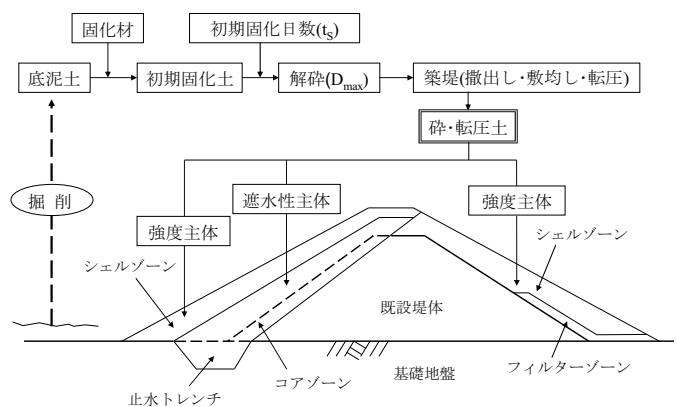


図1 砕・転圧盛土工法の概念図

減により容易に制御できるものの、通常の築堤土に比較すると破壊時のひずみが小さく脆性的なひずみ軟化型の応力～ひずみ特性を示し、既設堤体との間の極端な強度や変形性の相違に起因したクラックが生じやすく貯水用の堤体には使用できなかった。砕・転圧盛土工法は、固化処理土を築堤土に利用する場合の問題点を、一定日数 t_s だけ初期固化させた底泥土を固化途上中に解砕して通常の築堤土と同様に転圧して築堤すると、再固化時の応力～ひずみ特性が通常の築堤土と似たひずみ硬化型になる性質を利用して既設堤体との密着性（なじみ）を良くしたものである。

§3. 新型攪拌混合機の開発目標

現在、砕・転圧盛土工法における底泥土の初期固化に使用しているトレンチャー型機は、ベースマシンに山積み1.4m³バックホウを使用し、複数の攪拌翼を取り付けたキャタピラーを縦にして、固化対象土中に鉛直に押し込みと引抜きを繰り返して深さ方向の均一に混合するもので、約200~250m³/日の攪拌能力を有している。ため池の堤体改修工事では築堤規模が小さく、この程度の攪拌能力であれば施工能力が不足することはない。しかしながら、フィルダムの堤体改修では築堤規模が大きく、効率的な施工のためにはさらに高い攪拌能力が要求されることが多い。

トレンチャー型機をそのまま大型化する方法も考えられるが、ベースマシンが大型化して通常のトレーラーでは運搬不可能になり汎用性に損なわれてしまう問題がある。また、トレンチャー型機は、もともとヘドロのような超軟弱土の固化を目的に開発されてきた経緯から、堤体改修で使用することもある砂礫分を多く含む泥土

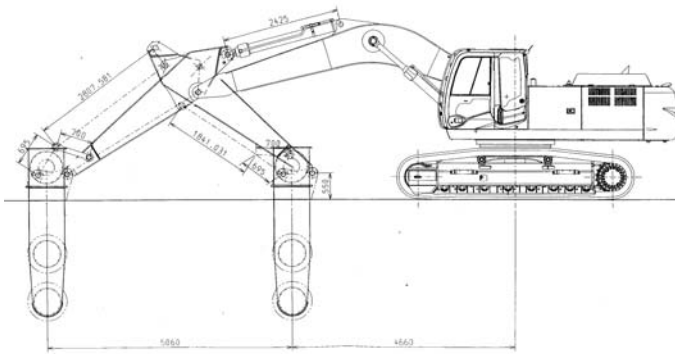


図2 DAMの全体図

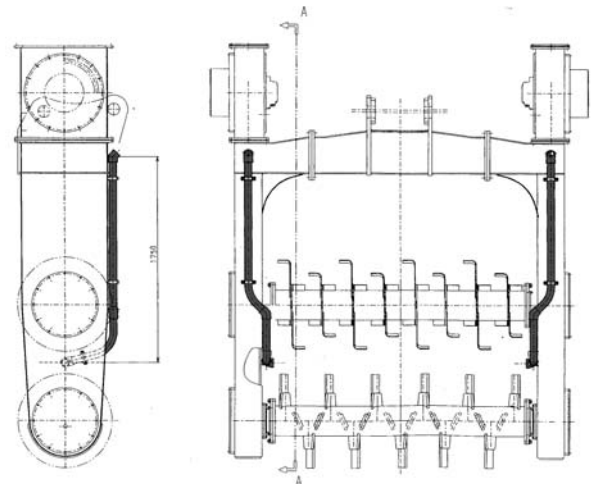


図3 攪拌部アタッチメント

を固化するには攪拌トルクが不足する場合もあることや、攪拌部の破損や故障が発生しやすいなど、さらに耐久性に優れた機械も必要とされている。

そこで、以上の要求に答えられる攪拌能力が高く、耐久性に優れた新型の攪拌混合機を開発することになった。新型機は、

- ① 現行のトレンチャー型機と同じベースマシン（山積み 1.4m³級）を使用する
- ② 攪拌能力は 450～500m³/日程度とする
- ③ 深さ 3m まで均一な混合ができる
- ④ 攪拌部が構造的に頑丈であることを目標として開発した。

§4. 新型攪拌混合機(DAM)の概要

新型機による攪拌混合は深さ 2.5m 程度のピット内の固化対象泥土にスラリー化した固化材を均一に添加できるように、トレンチャー型機と同様に、攪拌部をピット内に鉛直方向の押込みと引抜きを繰り返す形式とした。DAM 機の攪拌部は、攪拌能力は攪拌部の押込み範囲（幅×奥行き）と深さにより決まることから、図3に示すように、攪拌深さ 2.5m、攪拌範囲 2.17m×0.9m とした門型ミキシングフレームに攪拌翼を一定間隔で取り付けられた回転軸を上・下段2段に装着したものである。

攪拌翼は耐久性に優れたパドル型と、攪拌の均一性に優れたチョッパー型の2種類とし、上・下の回転軸で使い分けることとした。写真1にはDAMのミキシングフレーム部分を示す。下軸には攪拌部を固化対象泥土中に押し込む際に必ず掘削攪拌を伴うため頑丈で単純な構造のパドル型のみを使用することにした。上軸には固



写真1 DAMの攪拌混合部

化対象泥土の性質に応じて両者から選択するものとし、砂礫分のような粗粒子を含む底泥土、あるいは掘削土等を加えた混合泥土では攪拌抵抗が高い泥土ではパドル型、高含水比な底泥土ではチョッパー型というように変えることにした。

攪拌軸の回転方向は、攪拌中の抵抗を少なくするためや、多様な攪拌パターンが達成できるように、上・下軸がそれぞれ独立に正・逆回転できることとした。また、回転速度は掘削攪拌を伴う下軸を低速回転（最大 56rpm）、攪拌抵抗が小さい上軸を下軸の約 1.3 倍の高速回転（最大 71rpm）とした。上・下の回転翼の正・逆回転は攪拌泥土が上・下軸間を交差状に移動するようにして回転翼周辺を均一に攪拌できるように、また攪拌翼部を上・下方向移動の繰り返しにより深さ方向にも均一に攪拌ができるようにした。

表1 固化ピット内の各列の攪拌時間

ピット区分	攪拌時間 T (min.)	各ピットのスラリー量 $V_{sl}(m^3)$	攪拌速度 ($m^3/hr.$)	スラリー供給量 ΔQ ($\% / min.$)
P1	12	5.546	125	462 (2×231)
P2	15		100	370 (2×185)
P3	20		75	277 (2×139)
P4	30		50	185 (2×92)
P5	40		37.5	139 (2×69)

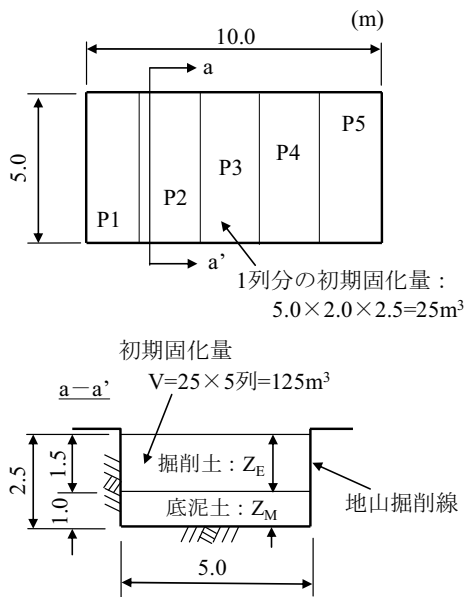


図4 固化ピットの形状



写真2 DAMによる攪拌状況

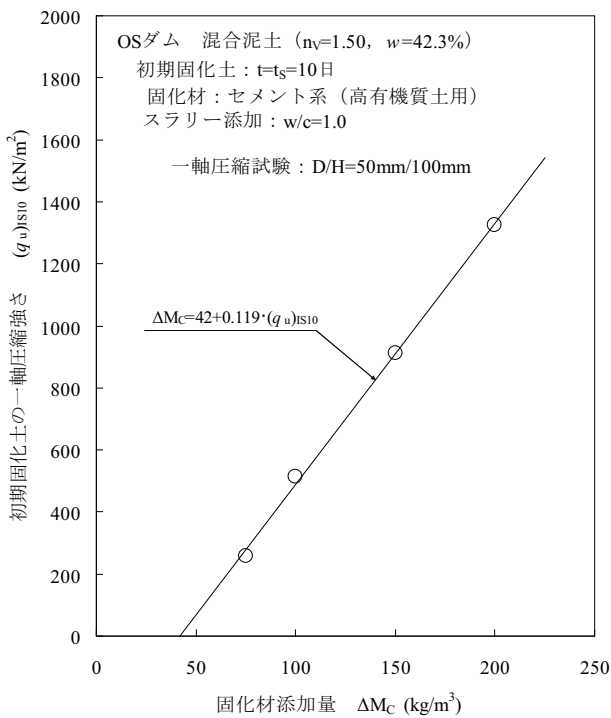


図5 室内配合試験による $(q_u)_{IS10}$ と ΔM_C の関係

§5. 攪拌性能確認のための試験施工

DAMの攪拌性能は以下に示すような試験施工を実施して調べた。

1) 攪拌速度の影響

実施工で想定する攪拌速度において均一な初期固化ができることを確認するために、攪拌速度の影響を調べるための試験施工を行った。試験は堤体改修工事中のSOダムの池敷内地盤に、図3に示すような、幅5m×長さ10mで深さ2.5mの矩形溝による固化ピットを設けて実施した。ピット内には固化対象土として、池内に堆積した底泥土を $Z_M=1.0m$ 、既設堤体土を $Z_E=1.5m$ で投入して混合泥土を準備した(混合比 $n_v=Z_E/Z_M=1.50$)。固化ピットは図に示すように2m幅の5列に分け(1列 $25m^3$)、各列で攪拌速度を変えた。

固化材は底泥土のような高含水比軟弱土の固化に適したセメント系(高有機質土用)を使用した。混合泥土の固化強度特性は固化材添加量 ΔM_C (kg/m^3)を変えて

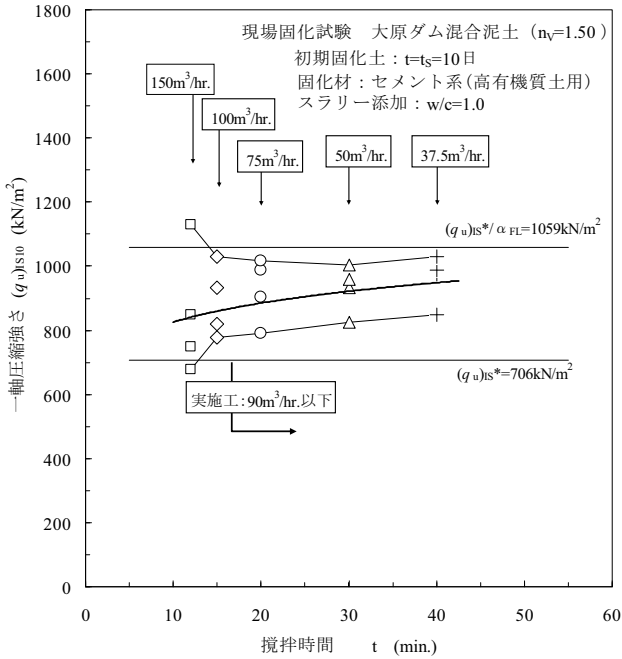


図6 攪拌時間が初期固化強度に及ぼす影響

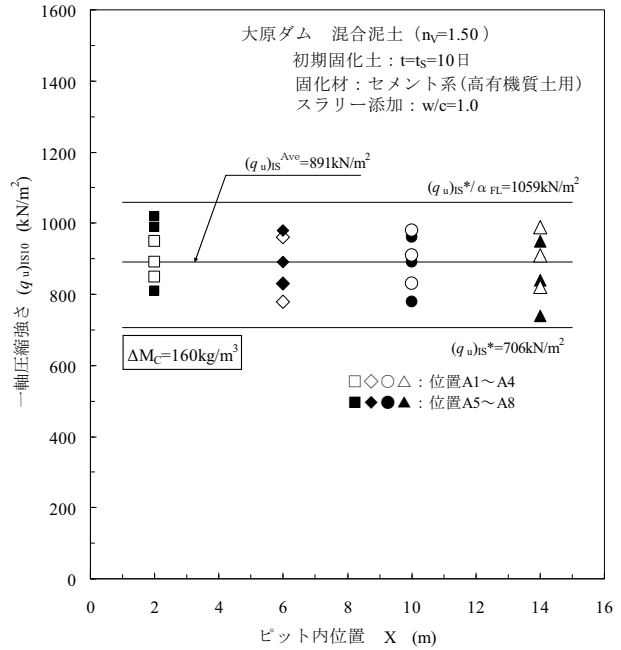


図8 固化ピット内の強度の空間的な変動

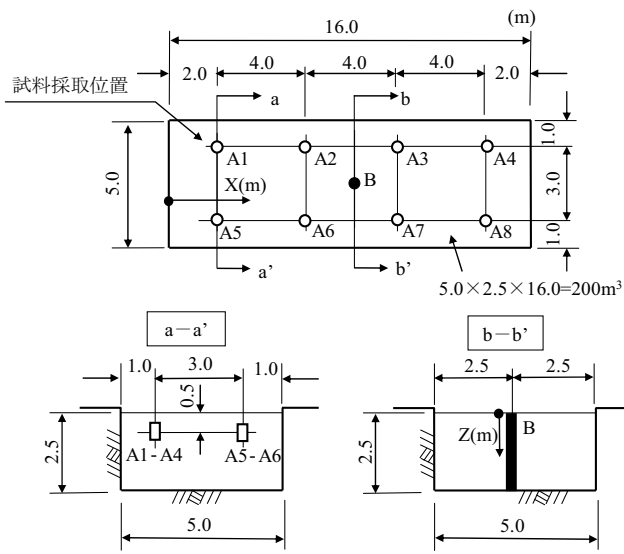


図7 ピット内の強度の空間的変動を調べるための試験

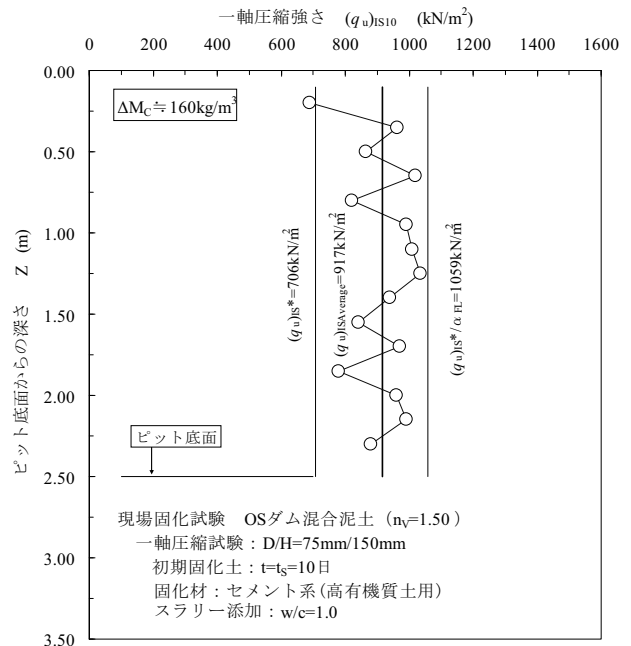


図9 固化ピット内の強度の深さ方向の変動

実施した室内配合試験により調べ、図5に示すような一軸圧縮強さ $(q_u)_{IS10}$ (固化材添加後 $t=10$ 日目) と ΔM_C の関係を調べた。 $(q_u)_{IS10}$ と ΔM_C の関係は直線

$$\Delta M_C = 42 + 0.119 \cdot (q_u)_{IS10}$$

によりほぼ近似できる。目標とする一軸圧縮強さ $(q_u)_{IS}^*$

は $(q_u)_{IS}^* = 706 \text{ kN/m}^2$ に設定し、これを現場で達成するための添加量 $\Delta M_C = \Delta M_C^*$ は、上式の $(q_u)_{IS10}$ に $(q_u)_{IS}^*$ を現場・室内強度比 $\alpha_{FL} = 1/1.5$ により割り増した室内配合強度 $(q_u)_{IS}^* / \alpha_{FL}$ を代入して

$$\Delta M_C^* = 42 + 0.119 \times 700 \times 1.5 = 168 \text{ kg/m}^3$$

のように算定した。 ΔM_c^* に相当する水・セメント比 $w/c=1.0$ のスラリーをスラリープラントにより各列毎の攪拌速度に応じて DAM に供給した。ピットに送るスラリー量 V_{SL} は、ピット内の混合泥土の体積 V に対する固化材質量を $M_c = \Delta M_c \cdot V$ 、スラリー質量を $M_{SL} = M_c \cdot (1+w/c)$ 、固化材密度を $\rho_c (=3.12t/m^3)$ 、スラリー水質量を M_{CW} とすると、固化材の体積 $V_c = M_c / \rho_c$ とスラリー水の体積 $V_{CW} = M_{CW} / \rho_w$ (ρ_w : 水の密度) から $V_{SL} = V_c + V_{CW}$ となるから

$$\begin{aligned} V_{SL} &= \Delta M_c \cdot V \cdot \{1/\rho_c + (w/c)/\rho_w\} \\ &= 0.168 \times 25 \times (1/3.12 + 1.0/1.0) = 5.546m^3 \end{aligned}$$

となる。

攪拌速度は2組のスラリープラントにより表 1 に示すようにピット内区画 1 列 $25m^3$ の攪拌時間を $t=12\sim 40$ として $125\sim 37.5m^3/hr$ の範囲で変えた。写真 2 には DAM による固化材の攪拌混合状況を示す。

DAM により固化材を添加してから攪拌混合の終了直後のまだ固まらない状態にあるうちに、各列のピット内の約 $50cm$ 深さに内径 $D=75mm$ 長さ $H=150mm$ の真鍮製シンウォールチューブを 4 個埋設し、翌日掘り出して、上・下端面を整形して、乾燥しないようにビニールシートで保護して試験室に保管し、10 日目に一軸圧縮試験を実施した。

試験から得られた強度 $(q_u)_{IS}$ と攪拌時間 t の関係を図 6 に示す。図中には、目標強度 $(q_u)_{IS}^*$ と現場室内強度比 α_{FL} に相当する割増し強度 $(q_u)_{IS}^* / \alpha_{FL}$ の範囲を示してある。図から、攪拌時間が増加するほど、最大・最小の強度範囲が少なくなり、平均強度がやや増加する傾向にあること、攪拌速度が $100m^3/hr$ 以下であれば強度の目標範囲内になるように初期固化できることがわかる。

2) ピット内の固化強度の空間的変動

ピット内の各位置で均一な初期固化ができることを確認するために、図 7 に示す幅 $5m \times$ 長さ $16m \times$ 深さ $2.5m$ のピット内で混合泥土に固化材を一定の攪拌速度 $75m^3/hr$ により添加混合し、ピット平面内の各位置 A1～A8 と、ピット中央部の位置 B から試料を採取して $t=10$ 日後に一軸圧縮試験を実施した。平面内位置 A1～A8 からの供試体試料は、まだ固化しないうちに約 $50cm$ 深さに埋設したシンウォールチューブにより採取した。また、ピット中央部の位置 B ではまだ固まらないうちに埋設した塩ビパイプ US80 (外径 $\phi 80mm \times 2mm \times$ 長さ $250mm$) により深さ方向の連続供試体試料を採取し、長さ $150mm$ 毎に切断した。

図 8 は試験結果を示し、試料の採取位置 A1～A4 における $(q_u)_{IS10}$ を白抜き記号 ($\square \diamond \circ \triangle$) により、A5～A8

における $(q_u)_{IS10}$ を黒塗り記号 ($\blacksquare \blacklozenge \bullet \blacktriangle$) によりそれぞれ示している。各位置の $(q_u)_{IS10}$ は偏りがなく、目標範囲内にあることがわかる。

図 9 には位置 B の深さ方向の強度変動を示す。図から、地表面を除いて深さ方向での強度はすべて目標強度範囲内にあることがわかる。地表面での強度がやや低いのは外気温度の影響 (外気温度の変化は $5\sim 17^\circ C$ であった) と思われる。

§6. おわりに

本稿では、砕・転圧盛土工法により規模の大きいフィルダムの堤体改修を行う場合にも対応できる攪拌能力をもつように新たに開発した二軸回転型攪拌混合機 (DAM) の概要と、その攪拌混合性能を実施工レベルで実施した確認試験結果を報告した。試験結果によると、新型機は開発目標とした攪拌能力を有し、底泥土を均一に固化できることが確認できた。

DAM は砕・転圧盛土工法の底泥土の初期固化の大規模施工に対応する目的で開発されたものであるが、底泥土の固化処理だけに限定されるものではなく、トレンチャー型機が適用できる一般の地盤改良工事にも適用できるものである。

参考文献

- (1) (社)農業農村整備情報総合センター：ため池改修工事の効率化、一砕・転圧盛土工法によるため池堤体改修一、設計・施工・積算指針(案)、2006.
- (2) (社)農業農村整備情報総合センター：砕・転圧盛土工法によるフィルダム堤体改修、一堆積土・発生土を有効利用したフィルダムのリニューアル技術一、設計・施工・積算指針(案)、2009.

ひとこと

DAM は本格的フィルダムである大原ダムの改修工事で実際に使用しており、工事を通して問題点を洗い出しさらなる改良を加えて行くとともに、今年台頭してきた鶴、大和、藤川ら新人の成長は焦らずに見守って行きたいと思えます。



北島 明