

3 4. 新型二軸攪拌混合機の開発とフィルダム堤体改修工事への導入

(株)フジタ建設本部土木エンジニアリングセンター機械部 ○ 三鬼 尚臣
(株)フジタ建設本部土木エンジニアリングセンター設計部 福島 伸二
(株)フジタ建設本部土木エンジニアリングセンター機械部 渋谷 光男

1. はじめに

築造年代が古いフィルダムやため池は老朽化に加えて、大規模地震の逼迫性や気候変動などの新たなリスクの顕在化によって早急な改修を必要とするものが多い。しかしながら、最近では堤体改修に必要となる良質な築堤土を現場近郊で入手することが困難になっており、また貯水池内に堆積した底泥土の外部廃棄処分も困難な状況にある。

砕・転圧盛土工法はこの問題を解決すべく開発されたもので、底泥土をセメント系固化材により固化改良して築堤土に活用し、堤体改修と底泥土の除去処分を両立させた環境負荷の少ない工法として注目されている。

従来方法では、トレンチャー型攪拌混合機を使用して底泥土の初期固化改良を行っているが、トレンチャー型の課題として、施工能力と耐久性の向上が求められていた。そこで新たに二軸回転型攪拌混合機：DAM(DoubleAxialMixing)機の開発を行い、大原ダム堤体改修工事（滋賀県）において、砕・転圧盛土工法の初期固化工程となる攪拌混合作業をDAM機によって実施した。

本稿では、DAM機の攪拌混合性能と耐久性について施工実績を示し、今後の展望について報告する。

2. 砕・転圧盛土工法の概要

砕・転圧盛土工法の概念図を図-1に示す。貯水池に堆積している底泥土とセメント系固化材を攪拌混合して「初期固化土」を生成する。一定の初期固化日数 t_s を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} に解砕して「解砕土」を生成する。解砕土を一定層厚 35cm 程度に敷均し転圧（この状態を「砕・転圧土」という）して築堤を行う。 t_s と D_{max} を適切に管理することで所要の強度と遮水性を有する築堤土を人工的に製造することが可能である。ダムサイト近傍での材料調達を可能にしたことで、経済的にも環境面においても優れた工法である。

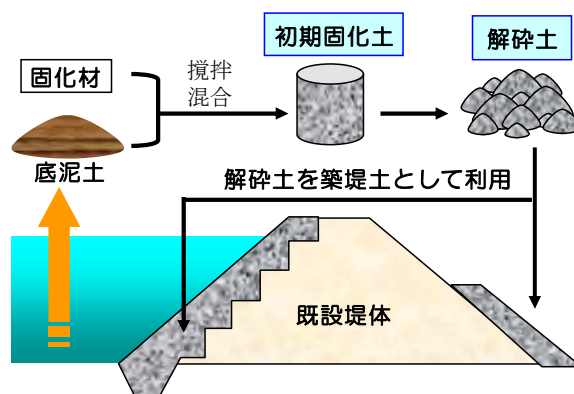


図-1 砕・転圧盛土工法の概念図

3. 砕・転圧盛土工法の施工方法

大原ダムの堤体改修工事では、池内の貯水を空にした後に、仮設工として工事用進入道路、固化ピットヤード、スラリープラントヤードを造成し、準備工として基礎トレンチと既設堤体の掘削を済ませてから、砕・転圧盛土工法による築堤を実施した。砕・転圧土の原料土には、底泥土に堤体掘削土を加えた混合泥土を用いた。図-2に仮設配置図を示す。

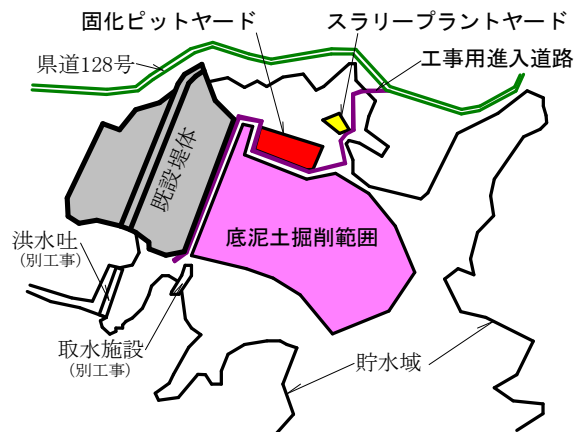


図-2 大原ダムにおける仮設配置図

砕・転圧盛土工法の施工は混合泥土の初期固化、解砕、築堤の各工程からなる。

(1) 初期固化工程

混合泥土の初期固化は、固化ピット内に底泥土、掘削土の順で原料土を投入し、固化材をスラリー化して添加しながら、DAM 機で攪拌混合を行う。目標強度や施工性に応じて、 $t_s=2\sim4$ 日間の初期固化を行う。写真-1 は固化材スラリープラントで施工規模から 2 組を準備した。写真-2 は DAM 機による初期固化状況である。

(2) 解砕工程

解砕工程は初期固化期間 t_s だけ経過した初期固化土をバケット式解砕機により掘削して最大粒径 $D_{max}=200\text{mm}$ で解砕しながら不整地運搬車に積込みを行うものである。

解砕機は、 0.8m^3 級バックホウをベースマシンとして、写真-3 に示す最大力 200kN の押土プレート装着した格子バケットをアタッチメントとしたもので、 D_{max} に合わせた寸法をもつ格子バケットで掘削した初期固化土を押土プレートにより格子間から押出して解砕・積込みを行うものである。写真-4 にバケット式解砕機による不整地運搬車への初期固化土の解砕・積込み状況を示す。

(3) 築堤工程

築堤工程は解砕土をバックホウで一層毎に撒出し、ブルドーザで一定層厚 $\Delta H=35\text{cm}$ 程度に敷均してから、 15t 級振動ローラにより、 $N=8$ 回転圧して 1 層ごとに築堤するものである。写真-5 に敷均し状況を写真-6 に転圧状況を示す。



写真-1 固化材スラリープラント (2 組)



写真-2 DAM 機による初期固化状況



写真-3 バケット式解砕機



写真-4 初期固化土の解砕・積込状況



写真-5 解砕土の敷均し状況



写真-6 振動ローラによる転圧状況

4. 新型二軸攪拌混合機（DAM 機）の開発

(1) 従来機の課題

底泥土の初期固化にはこれまでトレンチャー式攪拌混合機（攪拌翼をチェーンでつなぎ環状にして取り付け、これを上下に動かしながら回転して掘削攪拌する機械）を使用することが多かったが、施工能力およびメンテナンス上の課題があった。

施工能力については、日施工量が $200 \sim 250 \text{m}^3$ / 日と施工規模の小さいため池の改修には十分であっても、施工規模の大きいフィルダムの堤体改修には攪拌能力が不足することがある。

摺動部が多いため、攪拌翼の磨耗だけでなく、チェーン、スプロケット、ガイドローラなど磨耗による交換費用がかさむ、入り組んだ構造のため日々の清掃メンテナンスに時間が掛かるなど、メンテナンス上の課題もあった。

(2) 開発目標

攪拌性能を向上するため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通常のトレーラーによる運搬が不可能になり汎用性が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わかるように、底泥土に掘削土を混合したような砂礫分の多い混合泥土を固化するには攪拌トルクが不足する場合もある。そこで新型攪拌機はまったく新しい構造で、以下に示す 4 つの項目を開発目標とした。

- ① ベースマシンは 1.4m^3 級バックホウを使用する。
- ② 攪拌能力は $400 \sim 450 \text{m}^3$ / 日とする。
- ③ 攪拌部が構造的に頑丈である。
- ④ メンテナンス作業を簡素化する。

(3) DAM 機の概要

DAM 機による攪拌混合は深さ $2.5 \text{m} \times$ 幅 5.0m 程度の固化ピット内で行う。ベースマシン 1.4m^3 級のバックホウに装着し、攪拌部分を鉛直方向および前後方向に繰返し移動させながら、混合泥土とスラリー化した固化材を混合する。そのため図-3 に示す可動域を確保した。

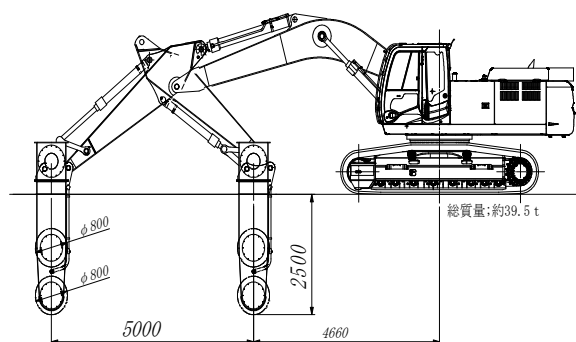


図-3 DAM 機を装着した固化改良機

DAM 機の攪拌部は、図-4 に示すような門型のフレーム構造となっており、攪拌用の回転軸を上・下 2 段に配置している。駆動モータは門型フレームの上部に取り付けており、2 本の回転軸に対して 2 つの駆動モータで個別に駆動する方式とした。固化材の噴射口は下段の回転軸付近に 2 箇所設けており、均質な混合攪拌が可能な構造となっている。（写真-7）

攪拌翼は耐久性に優れるパドル型と、攪拌の均一性に優れるチョッパー型の 2 種類とし、上・下段の回転軸で使い分けることとした。下段軸は攪拌部を底泥土中に押し込むため、パドル型のみを使用することにした。上段軸には混合泥土の性状に応じてパドル型あるいはチョッパー型のうち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のように攪拌抵抗が大きい場合にはパドル型を、高含水比な底泥土のように攪拌抵抗が低い場合にはチョッパー型を選択できるようにした。

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・逆回転できるようにした。また、回転速度は掘削攪拌を伴う下段軸を低速回転（最大 56rpm ）、攪拌抵抗が小さい上段軸を下段軸の約 1.3 倍の高速回転（最大 71rpm ）とした。

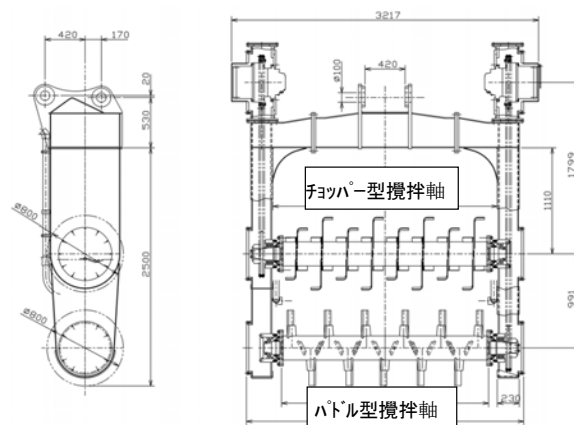


図-4 DAM 機攪拌部構造図

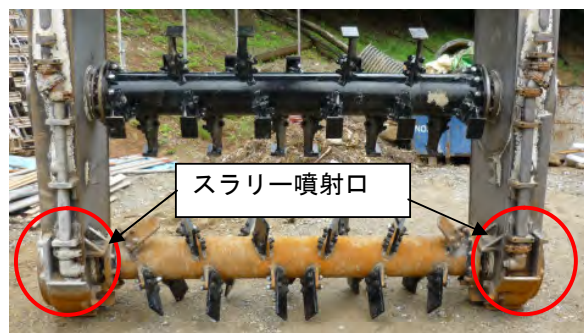


写真-7 攪拌軸およびスラリー噴射口

写真-8 に DAM 機を施工重機に取付けた状況を示す。



写真-8 DAM 機取付状況

5. DAM 機の攪拌性能確認試験

(1) 攪拌速度の影響

DAM 機に要求される性能として、均一な初期固化が可能であることを確認するため、攪拌速度を変えた試験施工を実施した。試験施工は図-5 に示した幅 5m×長さ 10m×深さ 2.5m の固化ピットを準備し、長さ 2m 毎に 5 列に区分した P1～P5 のエリアでそれぞれ攪拌時間を変更して攪拌混合した。

固化材の添加量は室内配合試験を事前に行い、目標とする一軸圧縮強度を 706kN/m^2 とし、このときの固化材添加量 126kg/m^3 が得られた。現場配合強度は、室内試験時の混合条件と現場での混合条件の相違を補正するため、室内配合試験の 1.5 倍の割増し強度 1059kN/m^2 、このときの固化材添加量から 168kg/m^3 を現場配合量として決定した。

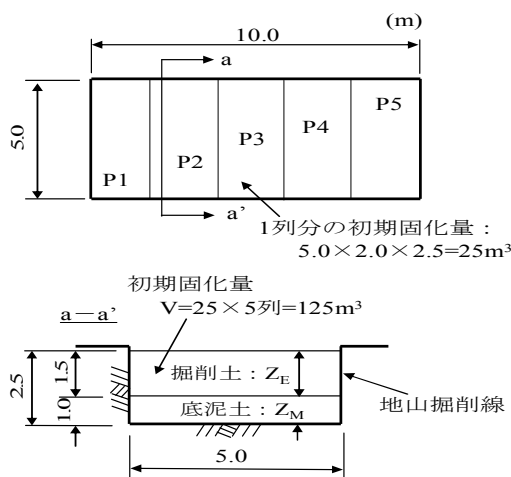


図-5 攪拌性能試験、固化ピットの形状

固化ピットの区画 P1～P5 において攪拌時間を $t=12\sim 40$ 分として攪拌速度を $150\sim 37.5\text{m}^3/\text{h}$ の範

囲で変化させた。固化材添加流量も攪拌時間に合わせて変化させ、配合量がトータルで一定になるように攪拌混合を実施した。（表-1）

表-1 固化ピット内各区画の攪拌時間

ピット 区分	攪拌時間 t (min)	攪拌速度 (m^3/h)	固化材 添加流量 (l/min)
P1	12	150	462
P2	15	100	370
P3	20	75	277
P4	30	50	185
P5	40	37.5	139

ピット内の各列の強度を調べるために、固化材を添加した直後のまだ固まらない状態にあるうちに、ピット内各列の深さ約 50cm に内径 $D=75\text{mm}$ 長さ $H=150\text{mm}$ の真鍮製シンウォールチューブを4箇所埋設、翌日掘り出して採取し、上・下端面を整形して供試体を準備した。供試体は試験室に保管し、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 と攪拌時間 t の関係を図-6 に示す。図中には目標強度と現場室内強度比に相当する割増し強度の範囲を示してある。図から、攪拌時間が増加するほど、強度のばらつきが少なくなり、平均強度がやや増加する傾向にある。攪拌速度が $100\text{m}^3/\text{h}$ をこえると目標強度を下回る箇所が発生していることが分かった。この結果から実施工では10%の余裕を考慮して、攪拌速度の最大値を $90\text{m}^3/\text{h}$ で管理することとした。

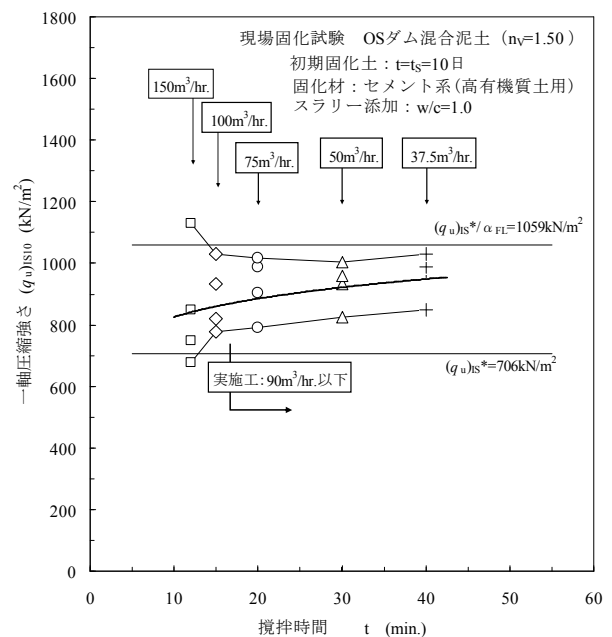


図-6 攪拌時間と初期固化強度の関係

(2) ピット内の固化強度の均一性

固化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、平面内の各位置と、深さ方向の強度分布を調査した。

図-7に示す幅5m×長さ16m×深さ2.5mのピット内で一定の攪拌速度75m³/hにより攪拌混合し、ピット平面内の各位置A1～A8と、ピット中央部の位置Bから供試体を採取して一軸圧縮試験を行った。

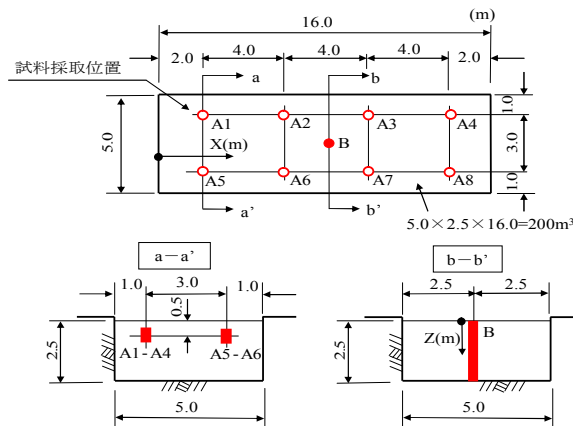


図-7 ピット内の固化強度の均一性比較

図-8にピット内の平面的な強度の変動を調べた試験結果を示す。試料採取位置A1～A4の結果を白抜き記号(□◇○△)により、A5～A8の結果を黒塗り記号(■◆●▲)によりそれぞれ表示している。各位置の強度分布は、目標範囲内にあることがわかる。また、図-9に深さ方向の強度分布を示す。こちらも強度はすべて目標強度範囲であることが確認できた。

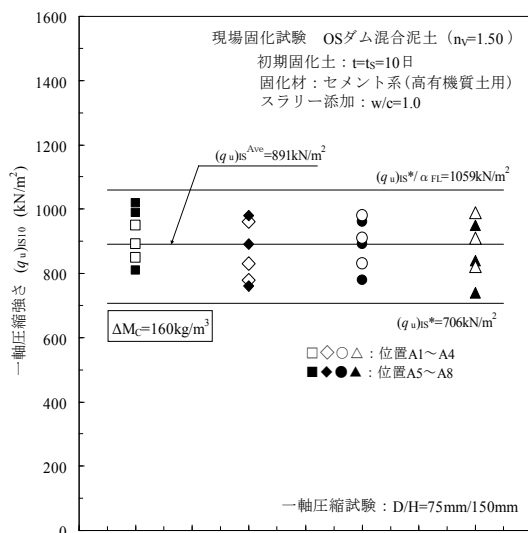


図-8 固化ピット内の平面的な強度の分布

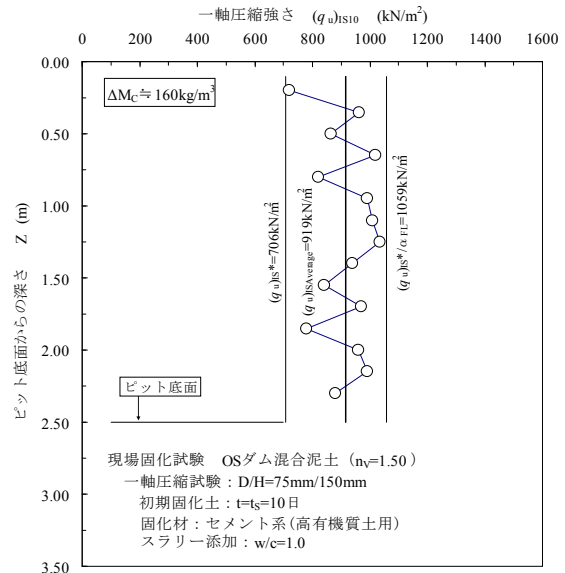


図-9 固化ピット内深さ方向の強度分布

6. DAM機の施工実績

試験施工によってDAM機の攪拌性能を確認し、初期固化工程に導入した。実施工で用いた固化ピットは幅5m×長さ20m×深さ2.5mとし(図-10)、1列分の改良幅を2mとして25m³毎に初期固化を行う。攪拌速度90m³/hを目安に1列毎の攪拌時間を17分以上と規定し、スラリー供給流量を設定して配合管理を行った。1日の施工量は固化ピット2つ分に相当する500m³を目安とした。

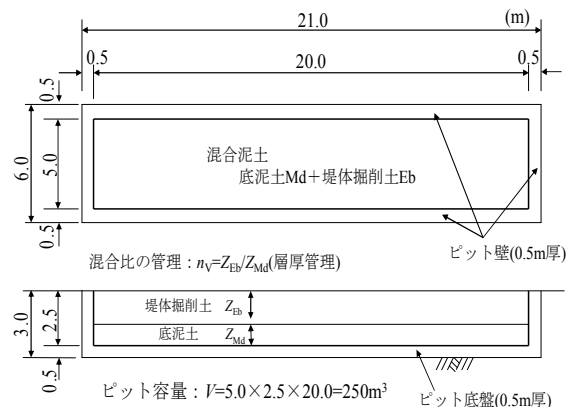


図-10 固化ピットの形状

月別の固化処理量を表-2に示す。施工中に攪拌羽根の交換を1回実施しており、第1セットの施工量は10,651m³、第2セットの施工量は27,464m³、トータル38,115m³の初期固化改良をDAM機によって実施した。

表-2 月別固化処理量

稼働月	攪拌羽根第1セット		攪拌羽根第2セット	
	月計 (m ³)	累計 (m ³)	月計 (m ³)	累計 (m ³)
4月	2,285	2,285		
5月	4,942	7,227		
6月	3,424	10,651		
6月			2,086	2,086
7月			9,720	11,806
8月			12,836	24,642
9月			2,822	27,464

写真-9 に羽根交換時の状況を示す。攪拌羽根の交換作業は羽根 1 枚につき 4 箇所のボルトを取外して、取り替えるだけの作業であるため、容易に交換作業が行える。交換作業は羽根総数 37 枚を 2 名で半日程度であった。攪拌軸やフレーム部材の損耗箇所はほとんど認められなかった。損耗部材としては、攪拌翼と回転軸取付部の土砂シールのみで済むため、メンテナンス工程はトレンチャー型と比較して簡素化が図れている。



写真-9 DAM 機の攪拌羽根交換状況

羽根磨耗量は 1000m³ あたり 2mm 程度であった。表-3 に磨耗量の実績を示す。

表-3 DAM 機の羽根磨耗量実績

	施工量 m ³	磨耗量 mm	磨耗率 mm/1000m ³
第1セット	10,651	26	2.44
第2セット	27,464	46	1.67
合計	38,115	平均 36	平均 2.06

稼働時間の平均は 6.5 時間で、従来のトレンチャー方式と比較すると施工後の清掃作業に要する時間が 0.5 時間短縮されたため、施工量の日平均は 500m³/日以上以上の結果が得られた。表-4 に施工実績を示す。

表-4 施工実績（日平均および時間平均）

月	月別 施工量	稼働日	日平均 m ³ /日	時間平均 m ³ /h
4月	2,285	5	457.0	76.2
5月	4,942	10	494.2	82.4
6月	5,510	11	500.9	83.5
7月	9,720	18	540.0	83.1
8月	12,836	23	558.1	85.9
9月	2,822	5	564.3	86.8

DAM 機の開発目標として掲げた攪拌能力を上回る結果を得ることができ、品質においても十分な攪拌性能を有することが確認できた。耐久性およびメンテナンス性も向上し、砂礫分を多く含む混合土の固化処理にも対応できることが実施工において確認できた。

7. おわりに

二軸攪拌混合機（DAM 機）の開発経緯と大原ダム堤体改修工事における施工実績を報告した。開発目標とした攪拌性能を有し、品質においても均質な攪拌混合が可能であることが確認できた。

耐久性やメンテナンス性の向上を図るため、従来とはまったく異なる構造を採用し、構造の簡素化によって清掃時間を短縮できたことは結果的には大きなメリットであった。特に大規模なフィルダムの改修工事になるほど施工期間も長くなるため施工性、経済性の面で優位な攪拌混合装置であると考える。

DAM 機は砕・転圧盛土工法の初期固化工程に使用する目的で開発されたものであるが、砕・転圧盛土工法に限定されるものではなく一般の土壌改良工事への適用も可能である。今後の展望としてガソリンスタンド跡地におけるベンゼン除去工事など汚染土壌改良への適用など、適用範囲の拡大を図っていきたいと考える。

- 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—砕・転圧盛土工法によるため池堤体改修—，設計・施工指針(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—堆積土・発生土を有効活用したフィルダムのリニューアル技術—，設計・施工・積算指針(案) (2009)