

各論

新たな締固め管理基準を用いた施工方法

三浦 亨* 三反畑 勇** Antoine Duttine***

1 はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震で崩壊した農業用フィルダム「藤沼ダム」の復旧に際しては、土構造物の要求性能の実現を目指して、飽和度管理を重視した新たな締固め管理基準を用いて盛土締固めの管理が行われた。これに続き、福岡県に建設された多目的ダムである「小石原川ダム」、新潟県に建設中の治水目的の「鶴川ダム」においても、飽和度管理を重視した現場締固め管理が行われている。これらについては本誌で2編の報文^{1),2)}で紹介されているため、本稿では藤沼ダムの事例³⁾について示す。

2 藤沼ダムの被災と強化復旧

2.1 概説

藤沼ダムは、福島県須賀川市にある農業用貯水池（藤沼湖、下流837haの灌漑に利用）の本堤（堤高18.5m、頂長133.2m）と副堤（堤高10.5m、頂長72.5mの土堰堤）からなるアースフィルダムであった。ダムは1937年4月に着工、戦時中の一時中断を経て1949年10月に完成したが、東北地方太平洋沖地震で決壊した。復旧工事では、旧堤体が崩壊した地震動を受けても修復が必要となるような変形が生じないことを目標に、適切なダム構造を採用するとともに旧堤体よりも確実に高品質な盛土の建設を計画した。盛土の施工では、盛土材の土質と含水比の管理、撒出し厚とGNSS（衛星測位システム）を用いた転圧回数管理⁴⁾、従来の締固め後の締固め度の下限値管理と含水比範囲の管理に加えて、新たに締固め度

D_c と飽和度 S_r の目標値を設定するとともに、締固め後の飽和度が最適飽和度 (S_r)_{opt}に一致するように管理した。

2.2 盛立材料と施工方法

2.2.1 盛立材料

復旧後の新堤体は、浸透水を速やかに堤外に排水できる構造とし、排水ドレーンを有する中心遮水型とした。復旧した藤沼ダムの主断面を図-1に、旧堤体と復旧堤体の諸元を表-1に示す。堤体基盤は、本堤では N 値20以上の地盤とし、旧堤体よりも掘り込んだ。

復旧堤体の盛立材料は、堤体を機能別に分類したゾーニングごとに選定した(表-2)。コアゾーン(遮水性ゾーン)の築堤材料は、遮水性の高い火山灰質粘性土に礫質土を混合し、遮水性の確保に加えて高い締固め度が得られやすく、過大な圧密沈下を生じぬ材料とした。堤体の大部分を占めるランダムゾーンは、安定性に重要な役割を持つことから、より高い締固め度が得られやすい材料を用いる必要があった。ダムサイトでは粒度組成のよい単独材料を確保することが困難であったため、旧堤体(砂質材料)または基礎掘削材(凝灰岩：白河層)に購入碎石(C-40)を混合して用いた。フィルターゾーンおよびロックゾーンは排水性材料であることから、硬質で長期安定性が得られる材料として購入碎石を用いた。

2.2.2 施工方法

日本国内のフィルダムの施工例も参考にして、盛土の締固めには19t級振動タンピングローラを用いた。現場転圧試験の結果を踏まえて、コア材、ランダム材いずれも撒出し厚さは30cmで、転圧回数は8回(4往復)とした。現場転圧試験の詳細は参考文献⁴⁾を参照されたい。

2.2.3 復旧堤体の新たな締固め管理基準値

復旧堤体は「崩壊した旧堤体よりも遥かに安定的で、東北地方太平洋沖地震と同レベルの地震動にも補修が必要な変形が生じない」という要求性能を実現するために、適切な構造形式で適切な盛土材を選択するとともに、十分な締固め工とその管理を設計・設定する必要があった。

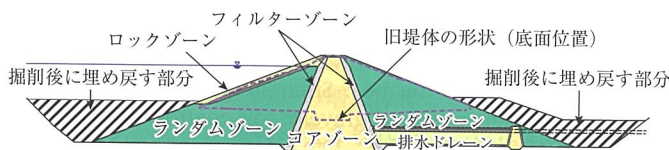


図-1 復旧した藤沼ダムの主断面

表-1 旧堤体と復旧堤体の諸元

	旧堤体	復旧堤体
堤高	18.5m	31.4m
堤頂長	133.2m	149.2m
堤体積	99,000m ³	230,000m ³

表-2 旧堤体と復旧堤体の盛土材料

旧堤体	復旧堤体	
コア(遮水性)ゾーン	粘性土と礫質土の混合材料	
細粒分質砂が用いられた砂質材料	ランダムゾーン	旧堤体または基礎掘削材と購入碎石(安山岩質)の混合材料
	フィルターゾーン	購入碎石(安山岩質)
	ロックゾーン	購入碎石(安山岩質)

* MIURA Tōru NTCコンサルタンツ(株) 東北支社 技術部 部長, 技術士(農業土木) 宮城県泉区泉中央1-7-1 スィング3階
 ** SANDANBATA Isamu (株)安藤・間 建設本部 技術研究所 土木研究部 主席研究員, 技術士(土質及び基礎) 茨城県つくば市刈間515-1
 *** Antoine DUTTINE (株)複合技術研究所 解析技術部 部長, Ph.D. 工博 東京都新宿区四谷1-23-6 協立四谷ビル5F

表-3 旧堤体での代表的物性値と復旧堤体に要求する物性値

		旧堤体 (上部盛土)	復旧堤体 (コアゾーン)
粒度組成	礫分	6.1%	20%以上
	細粒分	15.2%	25%以上
現場透水係数		$4.16 \times 10^{-4} \text{cm/s}$	$1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 以下
締固め度 $[D_c]_{1Ec}$		87.9%	最低値 95% 目標値100%
飽和度 S_r		65.5%	$(S_r)_{opt} - 5\% \sim (S_r)_{opt} + 5\%$ (目標値: $(S_r)_{opt}$)

* $(S_r)_{opt}$: 最大乾燥密度における飽和度

表-4 締固めにおける5つの管理境界⁵⁾

管理境界		土構造物の要求性能の実現に必要な物理特性			
		高い強度・剛性の確保	水浸時の強度低下・沈下抑制	遮水性の確保	過転圧の防止
締固め前の盛土材の管理境界	含水比 w	下限線: WL	○	●	○
		上限線: WU	●		
締固められた盛土の管理境界	締固め度 $[D_c]_{1Ec}$	下限線: DL		○	○
	飽和度 S_r	下限線: SL		●	
		上限線: SU	○		●

●: 要求項目の確保に非常に重要な管理境界
○: 要求項目の確保に重要な管理境界

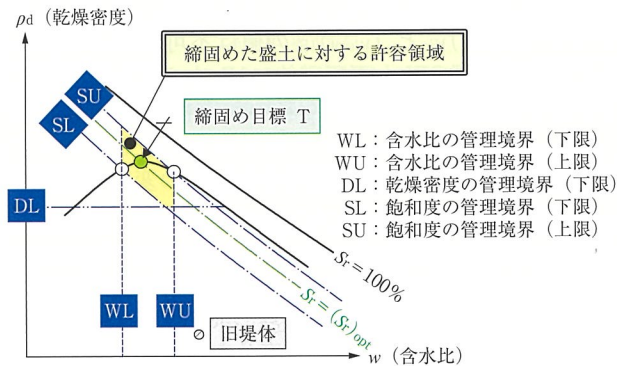


図-2 旧堤体の締固め状態と新堤体のコア材での (ρ_d, S_r, w) の総合管理の模式図

これまで農業用ため池では、 D_c の下限値と含水比 w の上・下限値による締固め管理が一般的であった。復旧設計計画当時(平成24年~25年)の土地改良事業設計指針「ため池整備」においても、盛土の締固め管理目標は『標準プロクター(締固めエネルギーレベルCELは1Ec)での ρ_{dmax} を基準とした $[D_c]_{1Ec}=90\sim95\%$ を設計密度とし、施工含水比は遮水性能の確保およびばらつきを考慮して最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ から湿潤側を施工含水比としている事例が多い』と記されていた。このことから、従来盛土の締固め度は本来下限値であるはずの $[D_c]_{1Ec}=90\sim95\%$ が目標値と置き換えられがちであり、施工含水比も確実に $(w_{opt})_{1Ec}$ より湿潤側となるよう設定されていた。このため盛土材料の含水比は絶えず高い状態となり、 $[D_c]_{1Ec}$ が許容最低値を超えていても、 S_r が100%に近い状態に近づいて過転圧が生じることを避けるために積極的な転圧が回避されて、良好な締固め状態が施工目標となりにくい状況にあった。

このような諸問題を踏まえ、復旧藤沼ダムでは前述した要求性能を実現するため、近代の重機転圧でより高い締固め効果が得られる新たな締固め管理基準を検討して取り入れることとした。特にコア材料では低い透水係数を確保し、ランダム材では浸水飽和時のコラプス沈下と強度低下を防ぐため、盛土の D_c と S_r の規定を重視した。 D_c 値の管理は、近年のフィルダムでの管理に倣って、締固め度 $[D_c]_{1Ec}$ の許容最低値(管理基準値)を95%と設定した。さらに性能・品質を重視するために、従来は管理値として設定されなかった「施工目標値」を $[D_c]_{1Ec}=100\%$ と定め、実際の平均値がこの値に達するように

表-5 堤体の締固め管理で設定した管理境界値

管理項目	盛土材	コア材 (撤出し厚: 25cm) (転圧回数: 8回)	ランダム材 (撤出し厚: 5cm) (転圧回数: 8回)
含水比下限値: WL		$(w_{opt})_{1Ec} - 1.0\%$	$(w_{opt})_{1Ec} - 1.0\%$
含水比上限値: WU		$(w_{opt})_{1Ec} + 2.0\%$	$(w_{opt})_{1Ec} + 1.0\%$
締固め度下限値: DL		$[D_c]_{1Ec}$ の95%	$[D_c]_{1Ec}$ の95%
飽和度下限値: SL		$(S_r)_{opt} - 5\%$	$(S_r)_{opt} - 15\%$
飽和度上限値: SU		$(S_r)_{opt} + 5\%$	$(S_r)_{opt} + 6\%$

・転圧回数は19t級タンピングローラによる数値
・ランダム材は旧堤体材と購入碎石の混合材料の場合の数値

施工することにした。 S_r 値の管理では、いずれのCELでも最大乾燥密度が得られる最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ を S_r の目標値として定め、目標品質に応じた管理範囲を設定した。現場透水係数は遮水性ゾーンでは $1 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 以下とし、これを実現させるための盛土の飽和度領域を設定した。復旧堤体(コアゾーン)に要求する物性値を旧堤体(上部盛土)と比較して表-3に示す。

飽和度の上限値管理を行えば、高飽和状態での過転圧と土の強度低下を避けることができる。また、締固め度の下限値管理とともに飽和度の下限値管理を行えば、低飽和で低乾燥密度の状態での締固められた場合での透水係数が高すぎ、土の浸水による強度低下・コラプス沈下が大きい状態を確実に避けることができる。さらに、従来の管理方法と比べて、低めの含水比と高いCELで施工することによって、より高い乾燥密度で十分低い透水係数を実現できる。具体的には、図-2に示すようにコア材でもよく締固めれば $S_r=(S_r)_{opt}$ の状態でも十分低い透水係数と十分高い強度・剛性が得られ、ランダム材でも $S_r=(S_r)_{opt}$ の締固め状態が最適となることから、下記のように飽和度の管理範囲は目標品質に応じて $(S_r)_{opt}$ を基準にして設定した。

最適含水比 $(w_{opt})_{1Ec}$ よりも乾燥側の含水比を許容下限値WLとすること、および施工目標値 $[D_c]_{1Ec}=100\%$ を設定することについては様々論議された。要求性能の実現を目標に、盛土材の土質、 w 、CELの目標値からの乖離とばらつきを抑制するための5つの管理境界⁵⁾を系統立てて整理すると(表-4)、これらの管理境界の物理的・工学的な意味と目的が明確となり、復旧ダムでの盛土の管理基準として採用されることとなった。

これらの5つの管理境界値は、室内混合試験、現場混

表-6 実施工での品質管理試験の項目と頻度

	定期管理 (施工前)	日常管理 (施工後)	
	コア材, ランダム材	コア材	ランダム材
含水比試験 (JIS A 1203)	1回/午前・午後 (3試料/回)	1回/日 (3孔)	1回/週 (3孔)
粒度試験 (JIS A 1204)	ストックパイル 1バッチごと (3,000m ³ 程度ごと)	1回/日 (3孔)	1回/週 (3孔)
締固め試験 (JIS A 1240)	ストックパイル 1バッチごと (3,000m ³ 程度ごと)	—	—
現場密度試験 (JGS 1611) (突砂法)	—	1回/日 (3孔) (φ200mm)	1回/週 (3孔) (φ300mm)

・本堤のコア材：57,000m³，ストックパイル19バッチ
 ・本堤のランダム材：80,000m³，ストックパイル24バッチ
 ・副堤のコア材：10,000m³，ストックパイル4バッチ
 ・副堤のランダム材：31,000m³，ストックパイル10バッチ

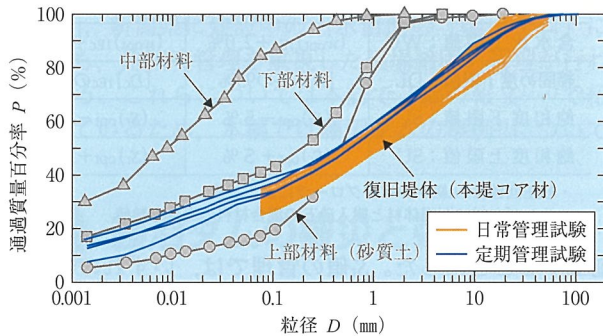


図-3 崩壊した旧堤体の上部・中部・下部材料及復旧堤体 (本堤コア材) の粒度分布の比較

合試験，現場転圧試験によって表-5のように設定した。また，図-2中には旧堤体の締固め状態と対比したコア材料の管理境界範囲をあわせて示した。この管理手法は藤沼ダムで初めて採用され，後に小石原川ダム¹⁾，鶴川ダム²⁾の建設においても引き継がれ，その有効性はより詳細に確認されている。

2.3 施工管理の項目と頻度

品質管理試験は，施工前のストックパイルから採取した試料を対象とした定期管理と，施工後に盛立場所から採取した試料を対象とした日常管理を，表-6に示す頻度で実施した。5つの管理境界 (表-5) の数値は，定期管理の試験結果に基づいてストックパイルごとに設定した。なお，現場での転圧の位置と回数 (原位置でのCEL) の管理は，タンピングローラにGNSS (衛星測量システム) を取り付けて実施し，山間部でのGNSS計測障害を避けるために現場基準局を設置した⁶⁾。

2.4 品質管理試験結果

施工管理試験⁴⁾の結果，コアゾーン，ランダムゾーン，フィルターゾーン，ロックゾーンのすべての管理において，管理基準値を満足したことを確認した。図-3に示すように，復旧本堤のコア材は旧堤体の上部材料よりも，均等係数 U_c が大きく細粒分含有率 F_c が多いことが分かる。また，本堤の定期管理と日常管理では，ほぼ同じ粒度試験の結果が得られた。しかし，全工程で見れば，粒

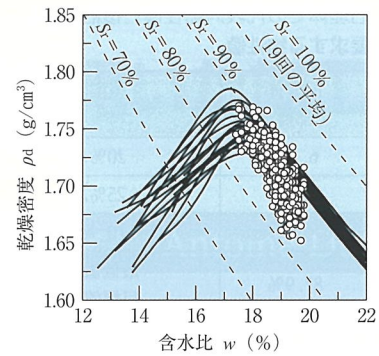


図-4 コアゾーン全定期管理試験 (剪頭粒度試料) のまとめ

度分布は不可避免的に変動した。その結果，図-4に示すように ($\rho_{dmax})_{IEc}$ と ($w_{opt})_{IEc}$ の値は不可避免的に変動した。また，現場CELも不可避免的にIEcからずれて変動するため，現場締固め状態 (ρ_d, w) と室内締固め状態 ($(\rho_{dmax})_{IEc}, (w_{opt})_{IEc}$) との相対的な関係もずれて変動する。一方，($S_r)_{opt}$ は粒度分布とCELの変動に鈍感なことを設計段階で確認し，それを一定値の目標値として締固め土の S_r を管理した。工事完了後には ($S_r)_{opt}$ の一定性が高いことも確認した。そして実施工では，現場CELをできるかぎり一定に管理したので，($S_r)_{opt}$ (一定) に基づく S_r 管理によって粒度分布の変動へ有効に対処できた。

2.5 新しい締固め管理による高い締固め度の実現

図-4中の多数の○印は，本堤コアで測定した全データである。これら測定データはすべて D_c と S_r の管理基準値を満足しているが，施工中に不可避免的に生じる盛土材の土質のばらつきのためIEcに対する締固め曲線がばらつき，また現場での土質，CELと含水比の偏りとばらつきのために現場締固め状態 (○印) が偏りばらついている。

図-4でのデータの偏りとばらつきの要因は，次の2つと考えられる。

- ① 定期管理試験では，それぞれのストックパイルのバッチから採取した代表試料を用いて室内締固め試験を行うが，バッチ間での土質の相違による異なった締固め曲線が得られる。
- ② それぞれのバッチの施工では，個々の地点と締固め層での土質，含水比およびCELが偏りばらつくため，日常管理試験で測定した締固め状態 (ρ_d, w) は定期管理試験で得た締固め曲線に対して偏りばらつく。

このため，偏りとばらつきのあるデータを共通の締固め曲線を基準とした等価なデータ群に変換することによって，①の要因をなくした全体の締固め度状態を得て (図-5)，②の要因を検討した。A試料の締固め状態 (○) は，図-4に示す定期管理試験での現場締固め状態のデータポイントを，等価なデータ群に再プロットしたものである。このデータのばらつきは，各バッチ内での現場での土質，CELと w のばらつきによるものである。また，全体的に締固め目標T ($(\rho_{dmax})_{IEc}, (w_{opt})_{IEc}$) よりも湿潤側で低い乾燥密度に偏っている。この偏りは F_c が増加すると大きくなった。この偏りは，現場で (ρ_d, w) 状態を測定した試料と締固め曲線を求めた代表試料の間の何らかの理由による系統的な乖離によって生じた

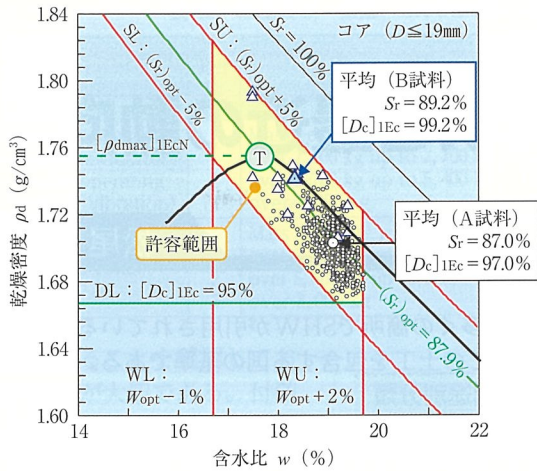


図-5 コアゾーンでの全定期管理試験（剪頭粒度試料）で得た現場締固め状態の共通の締固め曲線に対するプロット

と考えられた。このため、この乖離の影響を排除して D_c 値を精度よく求めるため、新たに締固め確認試験として現場締固め状態を計測した地点から試料を採取して、室内締固め試験(1Ec)を行った締固め曲線を得て、それに対して現場締固め状態をプロットした(図-5のB試料)。これはコアゾーン、ランダムゾーンの両者で実施した。

図-5を見ると、バッチ間の土質のばらつきと現場試料と室内締固め試験の間の土質の乖離の影響を排除したB試料の締固め状態は、平均として設定した締固め目標Tにかなり近い。これはランダムゾーンでも確認した³⁾。このことから、復旧堤体の締固め状態は目標どおりに良好であり、高品質な盛土が実現できたと評価できた。

3 耐震性能の評価

日本堤が崩壊した地震動に対しても安定で主要な修復が必要となるような変形が生じない、という復旧堤体の要求性能を確認するために、完成した新堤体の締固め状態に基づいた盛土材料の変形・強度試験を実施し、旧堤体の安定解析と同様に、①地震応答解析、②Newmark-D法による残留変形解析(図-6)、③準静的FEMによる剛体すべり以外の残留変形解析を行った⁷⁾。新本堤の降伏震度は入力震度よりも低くならず、すべり変位 δ は0 cm、準静的非線形FEM解析による天端中央での最終残留沈下は7 cmと非常に小さく、新堤体の耐震性は旧堤体よりも遥かに高く、旧堤体が崩壊した地震動を受けても修復が必要となるような残留変形は生じないことを確認した。

4 おわりに

藤沼ダムの旧本堤と旧副堤は、今日の社会的要求と技術レベルから見るとダム構造と盛土材料、締固めが不適切であったため、東北地方太平洋沖地震で崩壊した。これらの復旧に当たり、適切な構造の建設と適切な盛土材

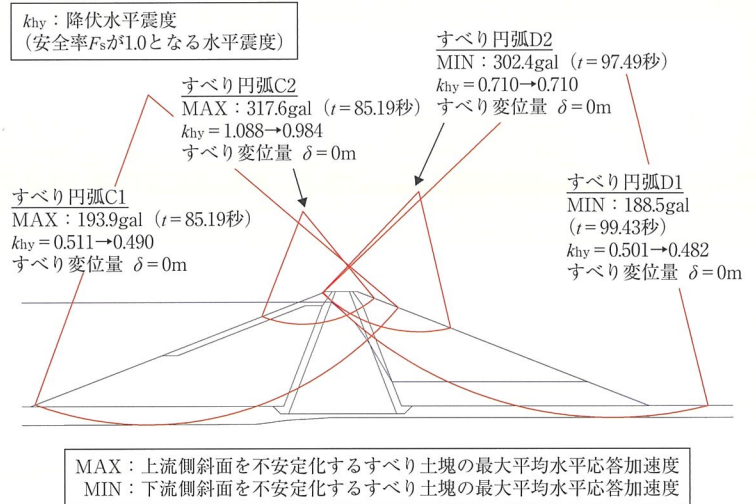


図-6 Newmark-D法による剛体円弧すべり解析結果図

の選択に加えて、新しい合理的な盛土締固め管理を行って確実に高品質な盛土の実現を目指した。

新しい締固め管理法では、含水比の許容下限値を従来よりも下げて、高い締固めエネルギーで高い乾燥密度を目指して十分に高い強度・剛性と十分に低い透水係数を実現した。その結果、施工含水比は従来よりも下がったが、飽和度の許容下限値を規定して、乾燥密度と飽和度が低くてコラプス変形が大きく透水係数が高くなる状態を確実に排除した。また、1Ecでの締固め曲線の頂点を締固め目標とし、その状態をほぼ実現できた。締固め目標における飽和度(最適飽和度)は、土質と締固めエネルギーの変動に鈍感であるため、これらの現場での不可避的な変動には、最適飽和度を目指す飽和度管理によって対処できた。その結果、効果的に盛土の品質を管理できた。

旧堤体の崩壊を再現したNewmark-D法による剛体すべり解析と準静的FEMによる剛体すべり以外の残留変形解析によって、新堤体は旧堤体が崩壊した地震動を受けても高い安定を保つことが確認された。

参考文献

- 1) 坂本博紀, 小林弘明: フィルダムコアゾーンの施工における新たな締固め管理事例, 基礎工(特集: 盛土締固め管理の新たな展開), Vol. 48, No.11, 2020.
- 2) 石黒健: 鶴川ダム建設工事におけるコア材の飽和度管理を重視した現場締固め管理, 基礎工, Vol. 48, No.11, 2020.
- 3) 三浦亨, 龍岡文夫, 田中忠次, 毛利栄征, 石本敏樹, 三反畑勇: フィルダムでの飽和度管理を重視した締固め実施例, 第54回地盤工学研究発表会, pp. 931~932, 2019.
- 4) 渡辺浩樹, 田中忠次, 龍岡文夫, 毛利栄征, 山岸明広, 三反畑勇, 三浦亨, 矢崎澄雄: 福島県藤沼ダムの強化復旧における新堤体の施工, 基礎工, Vol. 46, No.3, pp. 85~91, 2018.
- 5) 龍岡文夫, 平川大貴: 総説 盛土の締固めの新たな展開と展望, 基礎工, Vol. 48, No.11, 2020.
- 6) 永井裕之, 野田翔兵, 兵動太一, 菊池喜昭, 龍岡文夫: 加速度応答値に基づく盛土の品質指標の即時推定法, 基礎工, Vol. 48, No.11, 2020.
- 7) DUTTINE Antoine, 龍岡文夫, 田中忠次, 毛利栄征, 石本敏樹, 三浦亨: 農業用フィルダムの地震時安定性に対する締固めの効果の評価例, 第54回地盤工学研究発表会, pp. 933~934, 2019.