

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K06297

研究課題名（和文）宇宙線ミュオン粒子を用いた農業用水路トンネルの補強の評価手法の確立

研究課題名（英文）Establishment of Evaluation Method for Reinforcing Irrigation Tunnels Using Cosmic Ray Muons

研究代表者

柴田 俊文（Shibata, Toshifumi）

岡山大学・環境生命自然科学学域・准教授

研究者番号：30342546

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本申請課題では、地盤や構造物を透過した宇宙線ミュオン粒子を測定して密度を推定する。そして、数値解析と模型実験を併用してトンネル覆工と地山の相互挙動を明らかにし、耐震補強工法を考慮するため、この相互作用を数値解析で再現する。宇宙線ミュオン粒子による密度推定では、実験室内とロックフィルダムで実験を行い、ミュオン検出によって換算した密度の精度を確認した。地山とトンネル覆工をモデルとした載荷実験に対する数値解析では、剛体ばねモデル（RBSM）を用い、載荷板変位、内空変位量、載荷荷重、モデル全体の変形状況、ひび割れ発生状況などについて数値妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験室といったコンクリート構造物やロックフィルダムといった土構造物を対象に透過した宇宙線ミュオン粒子を測定して密度を推定した。事前に測定していた値（理論値）と比較することで、その適用性と問題点について整理を行った。また、耐震補強工法を考慮するためトンネル覆工と地山の相互挙動の把握を行った。その際、数値解析にRBSMを用い、模型実験の結果と比較し、載荷板変位、内空変位量、載荷荷重、モデル全体の変形状況、ひび割れ発生状況などについて数値妥当性を確認した。これらの結果により、土木構造物の維持管理に対するミュオン調査の適用性と、RBSMによるトンネル覆工と地山の挙動評価の適用性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, cosmic ray muons that penetrate the ground and structures are measured to estimate density. The interaction between tunnel linings and the ground is clarified using a combination of numerical analysis and model experiments to consider the seismic reinforcement methods. For the density estimation using cosmic ray muons, experiments both in the laboratory and at a rockfill dam were conducted, and the accuracy of the density converted by muon detection is verified. In the numerical analysis of load experiments modeling the ground and tunnel linings, Rigid Body Spring Model (RBSM) is used to verify the numerical validity concerning the displacement of the loading plate, the internal displacement, the loading force, overall deformation of the model, and the crack occurrence conditions.

研究分野：地盤工学

キーワード：農業用水路トンネル 宇宙線ミュオン粒子 多方向載荷試験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

農業用水路トンネルは、大規模な地震が発生した際や震源から近距離にあるものは大きな損傷を受けることが指摘されており、東北地方太平洋沖地震の際にも水路トンネルの被害が報告されている。一方、南海トラフ地震や首都直下地震が高い確率で発生することは広く知られており、内閣府の国家強靱化対策や農林水産省の土地改良長期計画の一環として、農業用水利施設の耐震化が進められている。特に、我が国では農業用水路トンネルが 2,000km 以上に及ぶため、トンネルの大規模地震に対する対策が喫緊の課題となっている。大規模地震による損傷は、平常時の地圧に地震によるせん断波が加わることで生じ、その発生場所は断層や破碎帯といった地質不良区間が多い。そのため、地質不良区間の密度情報を得て分布状況を把握し、作用する荷重を推定して耐震補強工法を考慮することが重要となる。

地盤調査法には弾性波探査や電気探査を含め、様々な探査手法がある。これらの探査手法は、対象区域の深度と精度の間に関係があり、例えば、高精度な地中レーダ探査は探査深度が浅いという特徴がある。その一方で、宇宙線に由来する高エネルギー粒子であるミュオンの高い透過性を利用して、物体の透視・可視化を行う技術が発展している。ミュオン探査は、弾性波探査と地中レーダ探査の精度の低い区間を埋める非破壊探査手法として期待されている(図-1)。

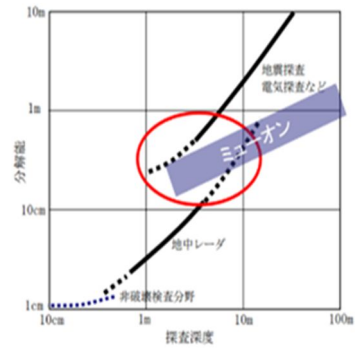


図-1 探査深度と分解能の関係

2. 研究の目的

本研究の目的は、地震によるトンネルの被害が発生する地質不良区間の情報を得るため、宇宙線ミュオンによる探査を用い、高い精度で地盤の密度を得ることである。また、宇宙線ミュオン粒子探査で得られた密度などの情報から作用する荷重を推定して耐震補強工法を検討するため、地山とトンネル覆工を考慮した載荷試験を行い、数値解析により載荷荷重とトンネル覆工の変状の関係を評価することを目的とする。



図-2 検出ユニット

3. 研究の方法

(1) 宇宙線ミュオンの測定装置の評価

ミュオン測定装置は、図-2 に示すシンチレータと光電子増倍管からなる検出ユニットに、測定ユニットとパソコンを接続したもので構成される。検出ユニットは二部あり、シンチレータを通過したミュオンが微弱な光として抽出され、光電子増倍管で電気信号に変換されたものが測定ユニットでカウントされる。また、これら二部の検出ユニットは背中合わせにフレームに取り付けられており、それぞれのシンチレータの直径は 17.5 cm、距離は 100 cm である。両方のシンチレータを通過したミュオンを測定することで、ミュオンの侵入方向を確認することができる。特定の方向に配した二部の検出ユニットを同時に通過した「単位時間・単位面積・単位立体角あたりのミュオン計数」(=フラックス) から、その方向にある物体の平均面密度を得ることができる。両者の関係については、三宅の式(式(1))で表すことができる。

$$I = \frac{A}{h+H} (h \sec \theta + a)^{-\alpha} \exp(-\beta h \sec \theta) \quad (1)$$

ここで、 I はフラックス、 h は面密度 (hg/cm^2)、 θ は天頂角 (真上をゼロとして水平を 90 度としたときの角度 ($^\circ$))、 A 、 H 、 a 、 α および β はパラメータであり、それぞれ $A=174$ ($/\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}$)、 $H=400$ (hg/cm^2)、 $a=11$ (hg/cm^2)、 $\alpha=1.53$ および $\beta=8 \times 10^{-4}$ (cm^2/hg) とする。なお、単位 sr は単位立体角を表す。本研究では、実験室内とアースフィルダムでミュオンの測定を行う。

(2) トンネルの模型実験と数値解析

図-3 および図-4 に模型実験装置の概略図、模型の寸法と計測位置を示す。鋼製の外枠の中に、幅 960mm、高さ 960mm、奥行 400mm のモルタル製の地山をセットし、巻厚 20mm、

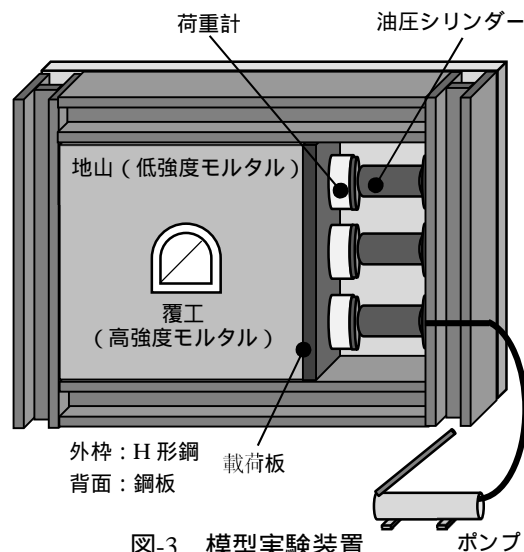


図-3 模型実験装置

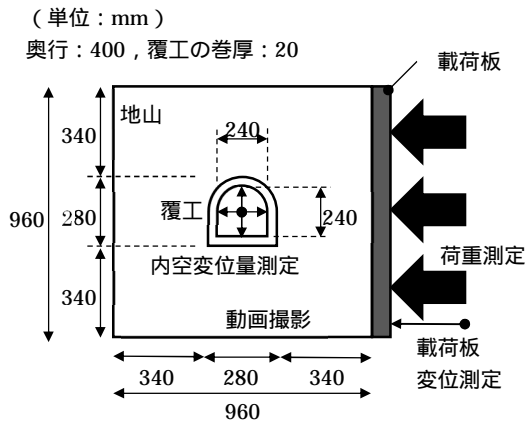


図-4 模型の寸法と計測位置

表-2 解析パラメータ

	地山	覆工
ポアソン比 ν	0.2	0.2
粘着力 c	$4.28 \times 10^6 \text{ N/m}^2$	$6.63 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
内部摩擦角 ϕ	30°	30°
圧縮強度 F_c	8.56 N/mm^2	23.2 N/mm^2
引張強度 F_t	1.37 N/mm^2	3.32 N/mm^2
圧縮限界ひずみ ϵ_{cu}	1.13×10^{-3}	5.54×10^{-3}
せん断弾性係数 G	$5.04 \times 10^8 \text{ N/m}^2$	$2.08 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
ひび割れひずみ ϵ_{cr}	-1.81×10^{-4}	-6.64×10^{-4}
せん断ひずみ γ_u	0.004	0.004
引張限界ひずみ ϵ_{cr0}	-3.62×10^{-4}	-1.328×10^{-3}

幅員 240mm，高さ 240mm のほろ型のトンネル覆工を地山の中央に設置して，摩擦を低減するために地山と外枠背面の鋼板との間に PTFE シートを 2 枚挿入する．次に，右側面から荷重を作用させる．その際，土被りによる鉛直方向の土圧は塑性圧よりも小さいと仮定し，載荷は水平方向のみとする．地山の右側面には載荷板を接触させた状態で設置し，荷重計を介して 3 個の油圧シリンダー（最大載荷荷重 300kN）により載荷板に荷重を作用させる．また，載荷板には接触式変位計，トンネル覆工には非接触式変位計を設置し，載荷板変位と鉛直方向と水平方向の内空変位を計測する．さらに，地山とトンネル覆工のひび割れの発生状況を確認するため，デジタルビデオカメラで供試体全体を撮影する．なお，地山は低強度モルタル（ $w/c=63\%$ ，単位セメント量 351kg/m^3 ，単位水量 222 kg/m^3 ，単位細骨材量 $1,044 \text{ kg/m}^3$ ，細骨材密度 2.61g/cm^3 ，細骨材粗粒率 2.85），トンネル覆工は，高強度モルタル（ $w/c=45\%$ ，単位セメント量 751kg/m^3 ，単位水量 338 kg/m^3 ，単位細骨材量 $1,095 \text{ kg/m}^3$ ，細骨材密度 2.60 g/cm^3 ，細骨材粗粒率 2.59）を使用し，早強ポルトランドセメントにより作製している．表-1 に，地山とトンネル覆工に用いたモルタルの圧縮試験と割裂引張試験の結果を示す．

次に，数値解析手法について記述する．本研究では，剛体ばねモデル（RBSM：Rigid Body Spring Model，以後 RBSM と称す）を用いる．RBSM は要素自身を剛体と仮定し，要素間にばねを設けて解析を行う手法である．解析結果がメッシュ分割に依存するといった特徴があるが，ひび割れの進展を良好にシミュレートするといった長所がある．本研究では，表-2 に示すパラメータを用い，模型実験で用いた地山とトンネル覆工をモデル化して解析を行う．

表-1 圧縮試験および割裂引張試験の結果

	地山	覆工
割線静弾性係数 E	1.21 kN/mm^2	5.00 kN/mm^2
圧縮強度 F_c	8.56 N/mm^2	23.2 N/mm^2
引張強度 F_t	1.37 N/mm^2	3.32 N/mm^2
圧縮限界ひずみ ϵ_{cu}	1.13×10^{-3}	5.54×10^{-3}
ポアソン比 ν	0.20	0.20

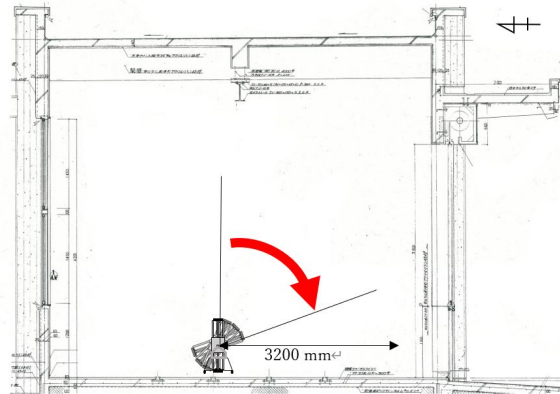


図-5 水利実験棟の実験概要

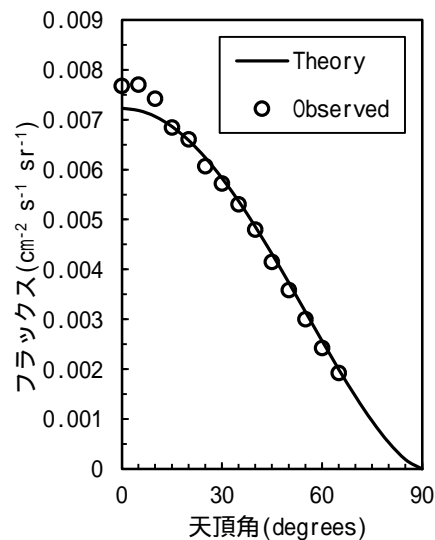


図-6 測定値と理論値のフラックスの比較

4. 研究成果

(1) 実験室でのミュオン測定

ミュオン測定装置の基礎的な検出性能を把握するため 図-5 に示すように実験室内でミュオンの測定を行った。約2か月間ミュオン飛来数を測定し、測定結果に補正を加え、理論値と比較した 図-6 にフラックスを用いて比較した結果を示す。図より平均して誤差率は3.4%となり、特に天頂角 15~65 度で理論値に近い値が得られた。また測定数から天頂角ごとの実験室の建屋のコンクリート厚みを算出したところ、天頂角 30~65 度で実際の厚みの変化と同じ挙動をとっていることが確認できた(図-7)。

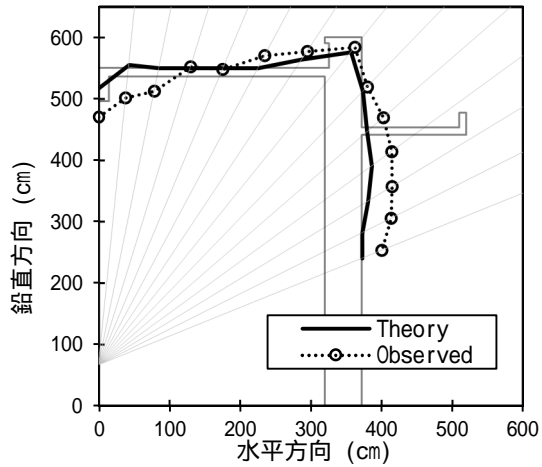


図-7 測定値と理論値の比較
(建屋の厚み)

(2) フィルダムでのミュオンの測定

次に、広島県に位置する M ダムにてミュオンの測定を行う。本ダムは、堤高 49.7m、堤頂長 250m、堤体積 535 千 m³、総貯水容量 1,308 千 m³、有効貯水容量 1,186 千 m³ の中心遮水ゾーン型ロックフィルダムで、堤体は 5 種類のゾーンで構成されている。図-8 にダムの内部構造と測定角度(天頂角)、表-3 に各ゾーンの築堤材料及び試験値密度等を示す。また、ミュオンの測定は、図-8 下部に位置する監査廊で行うこととする。上流側・下流側に対して天頂角 0 度から 60 度まで 10 度毎に、ダムを透過したミュオン飛来数の測定を行い、実測値から算出した密度と理論値(事前に試験で得た値)を比較することでミュオン探査の適用可能性を検討する。

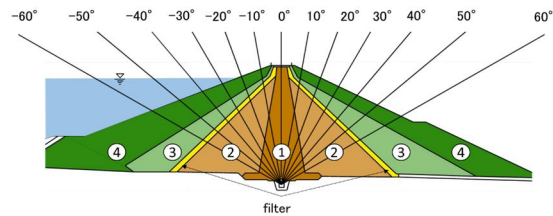


図-8 フィルダム断面と計測角度(天頂角)

表-3 各ゾーンの材料と密度

凡例	ゾーン名称	ゾーン区分	築堤材料	理論値密度(g/cm ³)
	Zone 1	遮水性ゾーン	マサ土	2.07
	Zone 2	遮水性ゾーン	マサ土	2.08
	フィルターゾーン	フィルターゾーン	粒度調整碎石	1.97
	Zone 3	透水性ゾーン	風化花崗岩	2.11
	Zone 4	透水性ゾーン	花崗岩	2.14

表-4 に測定によって得られた実測値と理論値を示す。上流側の天頂角は負の値で示しており、また、理論値の密度の算出ではダムが常に満水位であるとして計算した。表-4 から分かるように-60~50 度で理論値と実測値がよく一致していることが分かる。その誤差率は5%以内であり、測定の精度として十分であると考えられる。一方で天頂角が最大の時、すなわち上流側-60 度、下流側 60 度の誤差率を比較すると、下流側の方の値が大きいことが分かる。これは図-8 より、60 度付近で下流側堤体一部が斜面ではなく平面の構造をしているため、理論値密度の算出に影響を及ぼしていることが原因だと考えられる。また、上流側では堤体内部に水が浸透しているが、本研究では密度の算出において浸透を考慮していないため、理論値が実際よりも過小になっていると考えられる。

表-4 実測値と理論値の比較

上流			
天頂角 (deg)	密度 (g/cm ³)		
	理論値	実測値	誤差率 (%)
-60	1.745	1.810	3.76
-50	1.857	1.939	4.41
-40	1.944	2.010	3.43
-30	2.021	2.104	4.1
-20	2.091	2.123	1.52
-10	2.084	2.146	2.97
下流			
天頂角 (deg)	密度 (g/cm ³)		
	理論値	実測値	誤差率 (%)
60	2.084	2.315	11.1
50	2.089	2.179	4.29
40	2.094	2.125	1.52
30	2.098	2.080	0.86
20	2.103	2.013	4.31
10	2.099	2.040	2.82
0	2.077	2.030	2.23

(3) RBSM によるトンネルの数値解析

図-4 で示した実験に対し、RBSM により数値解析を行う。入力には荷重制御を仮定し、左端の境界条件を水平方向(左右方向)固定とし、荷重計で得られた実験値(図-9)を入力値として解析を行う。なお、鉛直方向内空変位は覆工上部と下部の鉛直方向(上下方向)変位の差、水平方向内空変位は覆工左側と右側の水平方向変位の差から求めることとし、載荷板変位は、荷重が作用している地山右端の中央の値を用いる。図-10 および図-11 に実験値(Experiment#1

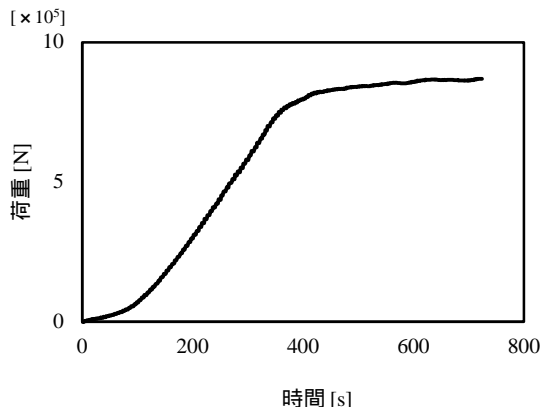


図-9 载荷荷重

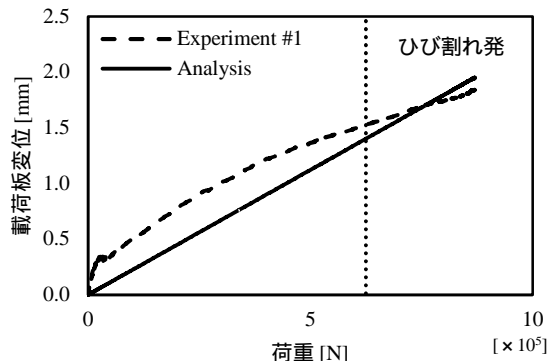


図-10 载荷板変位の比較

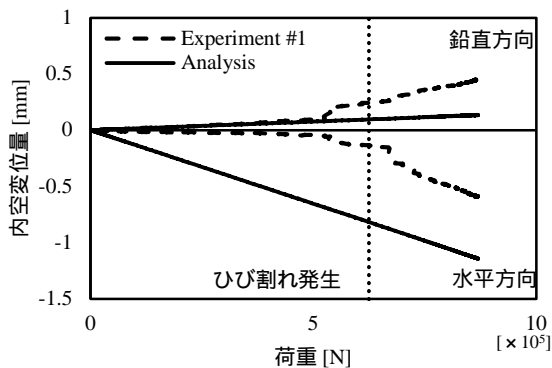


図-11 内空変位量の比較

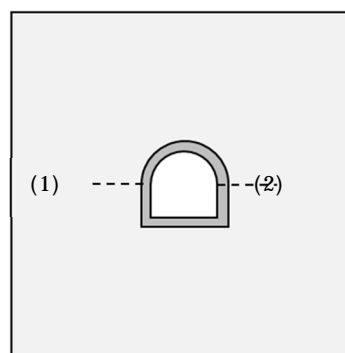


図-12 実験におけるひび割れ発生位置

で表示)と RBSM の結果(Analysis で表示)を示す。ここで、図中の点線は、デジタルビデオカメラによる撮影で確認された供試体の表面のひび割れの発生荷重を表している。図-10 より、载荷板変位は最大で 0.37mm 程度の差が生じているものの、実験値とほぼ同じ解析結果が得られていることが確認できる。図-11 では、鉛直方向の内空変位量について、荷重が $5.25 \times 10^5 \text{N}$ となるまで、実験値と解析値がほぼ一致している。一方、荷重が $5.25 \times 10^5 \text{N}$ より大きくなると、両者の違いが大きくなっており、実験終了時の荷重 $8.69 \times 10^5 \text{N}$ の際には、実験値と解析値との間に 0.32mm の差が生じている。垂直バネの圧縮側では、圧縮強度に至るまで線形で仮定した構成モデルを用いており、引張側の応力解放に至る過程も線形で仮定している。ここで、内空変位量の評価に用いている覆工の上部と下部は圧縮応力が作用し、覆工のスプリングラインにひび割れが生じていることから、覆工の構成モデルが鉛直方向の内空変位量の実験値と解析値の差を大きくしているものと考えられる。一方、水平方向の内空変位量は、実験値が载荷直後から微増傾向を示しているのに対し、数値解析では大きく増加しており、実験終了時(荷重 $8.69 \times 10^5 \text{N}$)の値も 0.56mm の差がある。水平方向の内空変位量は、覆工の左右両端の 2 点の変位の差から求めたものであり、これら 2 点は载荷板からの距離が異なり変形量も異なることから、実験値と解析結果で差が生じたものと考えられる。

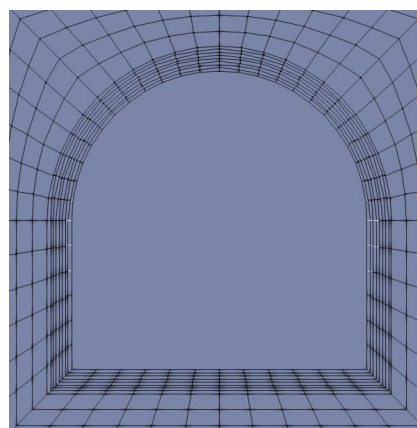


図-13 解析におけるひび割れ発生位置

次に、図-12 および図-13 に実験と数値解析におけるひび割れ位置を示す。ここで、図-10 と図-11 で示したひび割れ発生の点線は、図-12 の(1)と(2)に発生したひび割れに対応している。図-12 と図-13 を比較すると、数値解析では実験と同様、スプリングライン周辺にひび割れが生じている。しかしながら、数値解析では実験と異なり、複数個所にひび割れが生じているのが確認できる。また、解析で得られたひび割れの長さは最大で 10mm となっており、実験値(図-12 の(1)が 90mm、(2)が 150mm)と比較すると過小評価していることがわかる。その一方で、ひび割れが発生する荷重では実験値で $6.24 \times 10^5 \text{N}$ 、解析値で $6.48 \times 10^5 \text{N}$ となっており、良好な一致を確認することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 田本敏之, 柴田俊文, 西村伸一, 珠玖隆行	4. 巻 317 (91-2)
2. 論文標題 RBSMによる塑性圧が作用する農業用水路トンネルの模型実験の解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_239-I_247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.91.I_239	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 柴田俊文, 高橋 健, 金子周平, 西村伸一, 珠玖隆行
2. 発表標題 ミュオン探査を用いたフィルダムの密度の推定
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 健, 柴田俊文, 西村伸一, 金子周平, 珠玖隆行
2. 発表標題 宇宙線ミュオンによるフィルダムの堤体材料密度の同定
3. 学会等名 第72回農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 曹 秋雨, 柴田俊文, 西村伸一, 珠玖隆行
2. 発表標題 軟岩地山を模擬した農業用水路トンネルの載荷実験
3. 学会等名 第76回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黄 農偉, 柴田俊文, 西村伸一, 珠玖隆行
2. 発表標題 特定載荷における軟岩地山を模擬した農業用水路トンネルの変形・破壊性状に関する研究
3. 学会等名 第77回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 健, 柴田俊文, 西村伸一, 珠玖隆行
2. 発表標題 ミュオグラフィを活用したフィルダムの内部探査
3. 学会等名 第78回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 健, 柴田俊文, 西村伸一, 珠玖隆行
2. 発表標題 ミュオン探査による湛水時のフィルダムの密度の推定
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高橋 健, 柴田俊文, 西村伸一, 珠玖隆行
2. 発表標題 ミュオン探査で得たフィルダムの密度と試験値との比較
3. 学会等名 第73回農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	西村 伸一 (Nishimura Shinichi) (30198501)	岡山大学・環境生命自然科学学域・教授 (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------