

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13701

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18875

研究課題名(和文) ”弦”の振動理論に基づいてグラウンドアンカーの残存引張り力を知る

研究課題名(英文) Non-destructive evaluation of residual tension of ground anchor using resonance phenomenon

研究代表者

八嶋 厚 (YASHIMA, ATSUSHI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：90144394

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：グラウンドアンカー(以下、アンカー)は、自然斜面や切土、構造物等の安定化を図る目的で用いられる。アンカーおよび地盤の安定性を評価するためには、アンカーに作用している現状での緊張力を確認しなければならない。アンカーの残存緊張力は、リフトオフ試験や荷重計等で確認できるが、数多くのアンカーを、長期的・定期的に計測することは、費用面及び安全対策上困難である。本研究では、こうした課題を解決するために、模型実験と現場実証試験を通し、振動法を用いた新しい非破壊計測方法を提案した。その結果、ある程度の精度で、さまざまな定着タイプのアンカーの残存緊張力を推定することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

斜面の安定化のために用いられるグラウンドアンカーに働く現状での引張力を精度よく、簡易に、安価に推定する手法を開発した。これにより、グラウンドアンカーが施工された斜面の安定性評価が高精度で実施できるようになった。

研究成果の概要(英文)：A new method of non-destructive evaluation for residual tensile load of ground anchor has been developed. If the tendon tension part of a ground anchor is approximated by a “string” or “beam”, the frequency of its free vibration is determined by line density and tendon length of the PC steel and the operating tension. Although the free vibration of tendon tension part cannot be directly excited because it is in the ground, it is confirmed by a physical model experiment that the free vibration can be excited by applying a power at the extra length of anchor head. A series of field experiments was conducted by using a small vibrator and an accelerometer. A swept-frequency vibration was applied to the extra length of anchor head, and the vibration waveform was measured at the same position. The observed waveform was analyzed by running-spectrum analysis in order to find a resonance frequency which is used to calculate the residual tension load.

研究分野：地盤工学

キーワード：グラウンドアンカー 固有周波数 振動法 残存緊張力 スィープ加振

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

道路斜面や地すべり地では、地盤を縫付ける巨大構造物を目にすることがある。山岳地形に富んだ日本では、斜面を人工的に安定させるグラウンドアンカー工（以下：アンカーと呼ぶ）が頻りに採用される。アンカー工は、地盤の奥深くの定着部と地表面のアンカーヘッド部の間に緊張力を与え、地盤を締め付けることによって安定化を図る。

しかし、この構造物は永久ではない。人間が丁寧に維持管理し、健全な状態を次世代に引継がなければならない。斜面が再活動しようとする場合には、緊張力は上昇し、地盤が緩む時には、緊張力は下降する。したがって、アンカー工の維持管理において、残存緊張力を正確に知ることが、私たちの安全安心を守ることに直結する。

2. 研究の目的

残存緊張力を計測するために、大型ジャッキ等を用いたリフトオフ試験と呼ばれる大掛かりな試験が行われている。しかし、簡単な物理現象に基づいた手法によって残存緊張力の推定が可能となれば、より多数の、より高頻度でアンカー残存緊張力の把握が可能となり、アンカーのり面の維持管理の効率化・高度化が図れる。本研究では、上記の社会的要請に鑑み、“弦”振動という物理現象に着目した、独創的で簡易な非破壊試験法を提案するものである。

3. 研究の方法

緊張力が作用するアンカー鋼材の自由長部を、両端が固定された“弦”と考え、弦の振動周波数から緊張力を求めるというシンプルなモデルを考える。アンカー鋼材は長さのわりに細い部材なので、弦と考えることは妥当と判断した。したがって、線密度と長さが既知の鋼材において、弦の自由振動周波数を検出することができれば、簡単な式によって張力を求めることができる。課題は、自由長部が地中にあるため、直接振動を与えたり周波数を計測したりできない点である。そこで、アンカーヘッド余長部に、小型起振機を接着し、鋼材と直交する方向に振動を与える。振動は、10～200Hzの正弦波スイープ信号である。振動の検出には小型加速度計を用いる。受信波形のランニングスペクトル解析により、自由長部の共振周波数を検出し、自由長部に作用する緊張力を算出する。

4. 研究成果

(1) 模型実験による振動法の検証

実際のアンカー自由長部は地中であって、直接加振・測定することができない。まず、自由長部の振動を「直接計測できる環境」を整えて、小型模型実験及び実物大模型実験を実施した。まず、弦と梁の振動が混在すると考えられる模擬アンカーを用いた小型模型実験を実施した。ここでは、自由長部の卓越振動周波数が模擬アンカーに作用する引張力によってどのように変化するかを詳しく調べた。

次いで、実大アンカー材料を用いた模型実験を実施した。ここでは、次のような段階的な実験計画により、新しい振動法の確立を目指した。つまり、①自由長部を直接起振した自由振動は弦の理論固有振動を示すか、②余長部での小型パイプレータによるスイープ加振で、自由長部の自由振動を励起できるか、③自由長部の加振によって、その固有振動周波数を余長部で観測できるか、そして最後に、④余長部での小型パイプレータによるスイープ加振で、自由長部の固有振動周波数を余長部で観測できるか、を明らかにした。段階④が満足できれば、アンカー自由長部が土中に埋まっている実際のアンカーのり面における計測が可能となる。

① 模擬アンカーによる小型模型実験

余長部を加振することで自由長部の自由振動を励起できるのかを判断するため、地盤を石膏でモデル化し、模型実験を行った。実験で用いたアンカーのPC鋼材は、ステンレス製M10全ねじボルトで模擬することとした。長さは650mm、線密度は0.54kg/mである。自由長部の長さは570mmとした。模型の左端部を地表付近のアンカー頭部と考え、六角ナットを締めることで鋼棒に張力を与え、右端部に設置したセンターホール型ロードセルで荷重を計測した。余長部を鋼球で打撃して振動を与え、自由長部に励起される振動を、石膏にレーザーが届くように孔を開けて、レーザードップラー振動計で非接触計測した。荷重は1kNから10kNまで1kN刻みで行い、除荷についても同じく1kN刻みで行った。模型実験における時刻歴波形記録のフーリエスペクトルを図1に示す。なお、どちらも最大振幅で正規化している。

実際のアンカーに比べて梁としての振動挙動が卓越したが、自由長部の固有振動周波数と緊張力との間には、緊張力がゼロ近くでは誤差が若干大きいものの、仮定した算定式により載荷荷重ごとの固有振動周波数が算定できることがわかった。

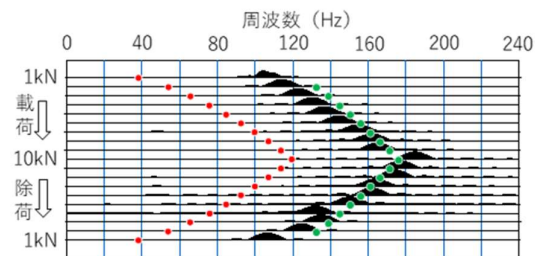


図1 模型実験におけるレーザードップラーのフーリエスペクトルと算定固有振動周波数

② 実物大アンカー模型実験
自由長部加振／自由長部受振

模型実験は、鋼製の4,000kN反力台を用いて実施した。実際のアンカーは、地中の定着部では地山にグラウトされるが、模型では鋼材の両端を地上のアンカーヘッド部と同様に定着させ、一方をジャッキで載荷し、他方に荷重計を設置して緊張力を測定した。

模型では、自由長部のPC鋼線が気中に露出しており、加振・受振を直接行うことができる。実験には、定着タイプの異なる3種類のアンカーを用いた。くさび定着タイプアンカー-VSL E5-3、ナット定着タイプアンカー-SEEE F60UA、およびくさびナット定着タイプアンカー-SFL-3である。各アンカーへの載荷は6段階(①②③④⑤)で行った。最大荷重(⑤)は降伏引張り力の0.9倍(0.9Tys)程度とし、次に(④)許容アンカー力(Ta)、そしてその2/3程度(③)、1/2程度(②)、1/3程度(①)の緊張力を段階的に与えることとした。またアンカーを実験架台にセットした時点をも①とした。センターホールジャッキによって①～⑤の順に載荷し、所定の緊張力に達したら、緊張力を保持する間に測定を行った。

実験結果は図2のようにまとめることができる。ここでは、複数の鋼線を有するアンカーについては、平均値で示した。理論値と実測値は概ね1:1の関係となるため、3種類のアンカーとも、自由長部の固有振動は弦の固有振動とみなして良いと考えられる。弦としての振動が卓越していたことが、このことからわかる。また、載荷による自由長部の伸びによる固有振動周波数の変化は0.5%未満であり、その影響は無視し得ることがわかった。したがって、初期の自由長がわかれば、残存緊張力が変動しても、固有振動周波数から算定される緊張力の誤差は大きくはない。

余長部加振／自由長部受振

実際のアンカー自由長部は地中にある。したがって、自由長部を直接加振することはできない。ここでは、余長部を加振することによって、自由長部に固有振動を励起することができるかを検討した。余長部に小型バイブレータを取付け、PC鋼より線と直交する方向に振動を与えた。自由長部で励起された振動を、自由長中央部に設置した小型加速度計で測定した。与えた振動は、10～50Hzを55秒間で線形的に増加させる正弦波スイープ信号とした。受振は、自由長部の中央付近に設置した加速度計で60秒間の波形記録を取得した。

余長部のバイブレータおよび自由長部の加速度計記録のスペクトログラムの一例を図3に示す。3種類のアンカーの代表的な記録例を示す。それぞれの左図より、バイブレータにより線形的に周波数が増加するスイープ加振が行われていることがわかる。右図の破線はスイープ周波数の変化を示しており、スイープ周波数が自由長の固有振動周波数に達すると自由長部が振動し始め、一定の周波数(図中に記載)で振動が継続していることがわかる。この周波数は前項で述べた自由長の固有振動周波数とほぼ一致する。以上のことから、自由長部に弦の固有振動を励起するためには、本研究で用いた低い周波数から高い周波数へ線形的に増加させる正弦波スイープ加振が有効であることがわかった。

自由長部加振／余長部受振

ここまで、自由長部の固有振動を自由長中央部に設置した小型加速度計により測定してきた。実際のアンカー自由長部は地中にある。したがって、自由長部の振動を加速度計により直接測定することはできない。ここでは、自由長部に正確に励起された固有振動を、余長部で受振するこ

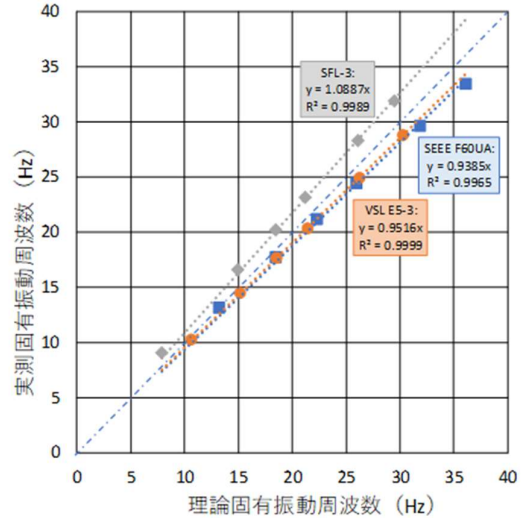


図2 「自由長部加振／自由長部受振」実験のまとめ

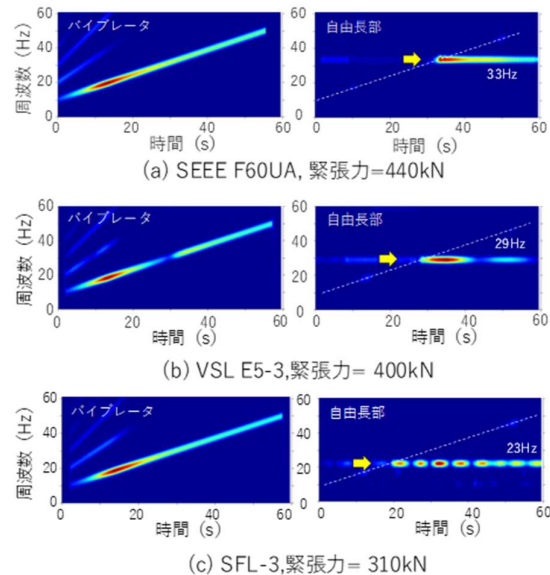


図3 余長部加振／自由長部受振のスペクトログラムの一例

とができるかを確認した。自由長部で励起された振動を、余長部に設置した小型加速度計で測定した。計測結果の一例として、SEEE アンカーの緊張力①の段階の結果を図4に示す。左図は自由長部のスペクトログラムであり、右図が余長部の小型加速度計で受信された加速度記録のスペクトログラムである。図より、打撃の瞬間(図中↑)から、自由長部の固有振動が励起され、ほぼ同時に、余長部でも同じ周波数の振動が検出されたことがわかる。以上より、余長部の固有振動は、定着部を介して、余長部に伝達され、その振動が小型加速度計により測定できることがわかる。

余長部部加振／余長部受振

実際のアンカー自由長部は地中にある。したがって、自由長部において加振および受振することはできない。本項における模型実験では、振動法を用いたアンカー残存緊張力測定方法の実用化を目指す最終過程として、余長部のみでの加振・受振で自由長部の固有振動周波数を検出するかを確認した。

ナット定着タイプアンカーSEEE F60UA を用いた実験結果の一例を図5に示す。図の上段が自由長部に設置した加速度計記録のスペクトログラムであり、すべての記録で明瞭なスペクトルピークが見られる。これは、スイープ加振周波数が自由長部の固有振動周波数と一致した時に励起された自由振動によるものであり、自由長部を弦と考えた時の理論固有振動周波数にほぼ一致する。図の下段は、アンカー頭部の余長部先端に接着した加速度計記録のスペクトログラムである。それぞれのスペクトログラムには、スイープ加振による周波数の時間変化が見られるが、その振幅は時間(周波数)によって異なっている。その中で、自由長部の固有振動周波数と一致する周波数で振幅が大きくなる共振現象が観測されることを期待した。各図中に黄色矢印で「共振点」として示した周波数は、上段の自由長部のスペクトログラムで検出されたスペクトルピークの周波数付近を指している。共振振動周波数から推定した緊張力は、実際の載荷緊張力とよく一致した。

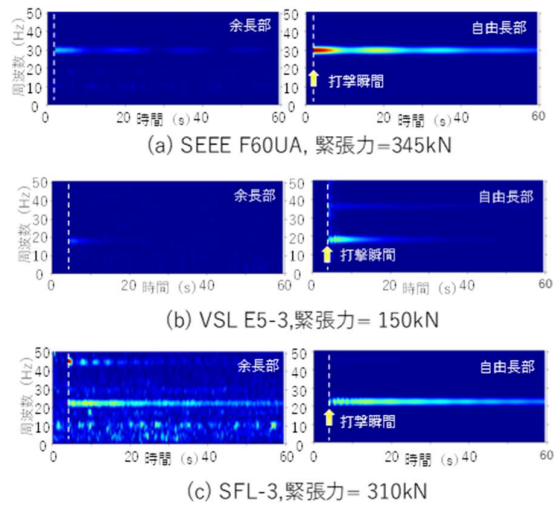


図4 自由長部加振データのスペクトログラムの例

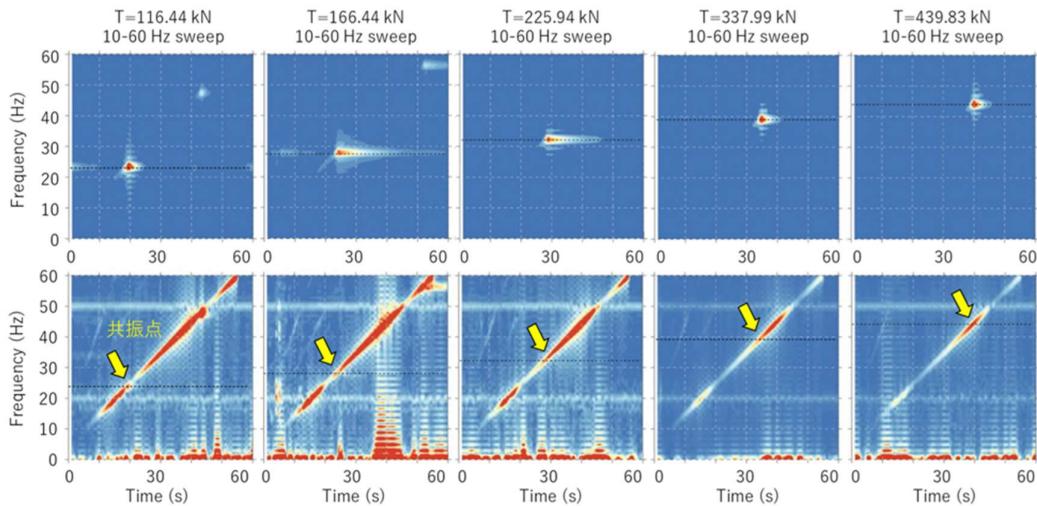


図5 自由長部(上)および余長部(下)のスペクトログラム

(2) 現場計測による振動法の検証

実際の既設アンカーへの適用にあたっては、自由長部は地中であって測定ができないため、アンカー頭部のPC鋼線余長部を利用した。前章までに説明したように、余長部に小型バイブレータを設置し、時間とともに周波数が徐々に増加するスイープ信号を与えて、鋼線を直角方向に加振した。余長部に設置した小型加速度計で振動を測定すると、加振周波数が自由長部の固有振動周波数に一致したところで共振によって振幅が大きくなるので、この共振周波数を固有振動周波数と考えた。

① くさび定着タイプアンカーへの適用

リフトオフ試験によって残存緊張力が判明している4本のアンカーについて、試験計測を実施した。計測対象としたアンカーは、VSL(くさび定着タイプ)E5-4であり、PC鋼より線の本数は4本、線密度は3.096kg/m、自由長部の長さはずべて4.0mであった。計測を行った4本

のアンカーの設計緊張力はすべて 341.9kN であったが、直近のリフトオフ試験による残存引張り力は、それぞれ 255kN、309kN、392kN、517kN となっていた。これらの値から、弦の振動を仮定した式を用いれば、自由長の固有振動周波数は 36~51Hz の範囲と予測された。

これまでと同様に、余長部の PC 鋼より線に直接小型バイブレータを設置し、同一の鋼より線に設置した小型加速度計で振動計測を行う方法とした。与えた振動は、スイープ振動で、その周波数帯域は、あらかじめ推定された弦の固有振動周波数を含む広帯域のものとした。

図 6 に残存引張り力と共振周波数の関係を示す。各アンカーにはそれぞれ 4 つの測定値があるのですべて示し、その平均値を赤実線で表示した。残存引張り力と共振周波数には明瞭な正の相関がある。設計自由長 4.0m を使って計算した理論共振周波数を理論値 A として●印で示した。残存引張り力が高くなると、共振周波数の理論値と実測値の乖離が大きくなる。また、

No. 3 アンカーの 1 本の鋼より線の共振周波数だけが他よりもかなり低い値を示していることがわかる。今回、固有振動周波数の推定にアンカーの設計自由長を用いたが、リフトオフ試験によって得られる変位増加に対する荷重増加の比 $\tan \theta$ によって求められる逆算自由長を用いることで、理論値と実測値の乖離が改善されるのではと考えた。リフトオフ試験の $\tan \theta$ から求められる逆算自由長（図中の青数字）を使って計算した理論共振周波数を、理論値 B として白抜き赤丸（○印）で示した。

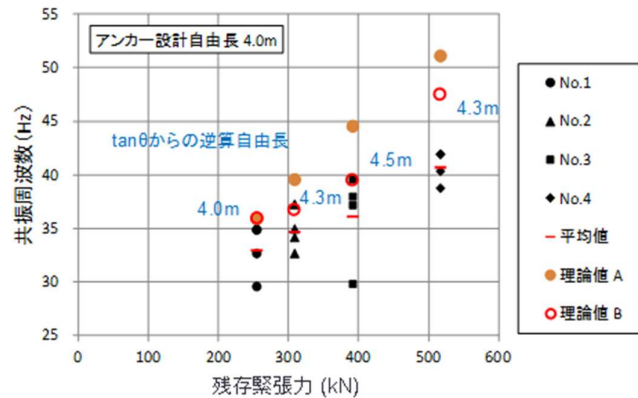


図 6 残存緊張力と共振周波数の関係

逆算自由長は 4.0~4.5m と設計自由長よりも長い場合、理論値 B は理論値 A より低く、実測値の上限値と同程度の値を示すことがわかった。このことから、自由長部の固有振動周波数は、緊張力と見かけの自由長の影響を受ける可能性があることがわかった。

② ナット定着タイプアンカーへの適用

ナット定着タイプのアンカーに対し、本研究による測定手法の検証を行った。対象としたアンカーは SEEE F70UA, SEEE F100UA で、2015 年度リフトオフ試験実施済み 3 本、2020 年度リフトオフ試験実施予定 2 本のアンカーを対象とした。

表 1 に、予測していた共振周波数、実測した共振周波数、推定した残存緊張力、アンカー定着時緊張力、リフトオフ時緊張力についてまとめた。残存緊張力は、提案式により推定した。

表 1 予測・実測共振周波数、推定・定着時・リフトオフ時緊張力

アンカー番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
定着時緊張力(kN)	317.0	317.0	360.4	360.4	360.4
リフトオフ時緊張力(kN)		310.0	344.0		380.0
ξ	28.3	28.0	54.1	55.3	56.8
予測共振周波数(Hz)	43.8	43.4	14.5	14.8	15.2
実測共振周波数(Hz)	45.1	44.8	14.3	14.7	15.1
推定緊張力(kN)	336.8	332.7	334.5	353.5	373.0
本手法による緊張力比	1.06	1.05	0.93	0.98	1.04
リフトオフ試験による緊張力比		0.98	0.95		1.05

アンカー番号 No. 5 については、予測共振周波数に近い箇所を読み取った。緊張力比は定着時に対するリフトオフ試験による緊張力との比、本手法による推定緊張力との比を表している。定着時に比べ若干の過緊張、緊張力の低下はあるが、定着時緊張力と本手法で推定した緊張力はよく一致した。また、リフトオフ時緊張力と推定した緊張力についても概ね一致し、特にアンカー番号 No. 3、No. 5 では若干の差はあるがリフトオフ時緊張力と非常に近い値となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 0件）

1. 著者名 A.Yashima, H.Saito, K.Aoike, M.Yamazaki, Y.Sone and T.Wachi,	4. 巻 1
2. 論文標題 Non-destructive Evaluation of Residual Tension of Ground Anchor using resonance Phenomenon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Desiderata Geotechnica	6. 最初と最後の頁 221-226
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 斎藤秀樹・山崎 充・八嶋 厚	4. 巻 24
2. 論文標題 グラウンドアンカー残存引張り力の非破壊測定方法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 検査技術	6. 最初と最後の頁 26-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 名波一輝・八嶋 厚他
2. 発表標題 実物大グラウンドアンカー模型による緊張力の非破壊評価実験（1）
3. 学会等名 地盤工学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斎藤秀樹・山崎 充・八嶋 厚他
2. 発表標題 実物大グラウンドアンカー模型による緊張力の非破壊評価実験（2）
3. 学会等名 地盤工学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斎藤秀樹・山崎 充・八嶋 厚他
2. 発表標題 グラウンドアンカー残存引張り力の非破壊評価方法に関する実物大模型実験
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A.Yashima and T.Hara
2. 発表標題 Probabilistic Safety Assessment of Existing Ground-Anchored Slope during Earthquake
3. 学会等名 2nd International Symposium on Seismic Performance and Design of Slopes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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