

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760378

研究課題名（和文）変形追従・過大外力吸収型トンネル構造のメカニズムに関する研究

研究課題名（英文）Mechanical behavior of tunnel structure with absorption mechanism

研究代表者

砂金 伸治 (ISAGO NOBUHARU)

独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ(トンネル) 主任研究員

研究者番号：10355878

研究成果の概要（和文）：

我が国の山岳部におけるトンネル建設では NATM による施工が行われているが、近年は地すべり地帯、膨張性地山、都市域の砂質地山などトンネルの変形が大きく生じる地山での施工例が増加しているとともに、将来的に発生が想定されている大規模地震に対する構造物の安全性確保も求められている。本研究は、経済性と安全性を兼ね備えたトンネル構造として、過大な変形に追従し、外力を吸収できる「柔なトンネル構造」を提示し、実験的・解析的な検討を通じて変形やひずみの緩和といった力学的挙動を解明した。

研究成果の概要（英文）：

Numbers of tunnel constructions under unfavorable ground condition have increased recently. Current tunnel structure itself cannot conform to large deformation when the large force from ground occurs and acts on the structure. The mechanical characteristics of the tunnel with the mechanism to assume to absorb the large force and/or displacement correspond to the deformation were examined in this study through model test and numerical analysis. Consequently, the existence of the mechanism influences on the relation between force and deformation, the position and occurrence load of cracks in structure and the strain over the structure is alleviated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：トンネル・外力・変形・覆工・変状

1. 研究開始当初の背景

(1) トンネルの支保構造

日本国内の山岳部におけるトンネルの建設では約30年前から NATM が採用されている。NATM では吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼アーチ支保工といった「支保工」と、支保工の内側に「覆工」と呼ばれるコン

クリート部材を施工し、これらを現場の状況に応じて適切に組み合わせた形の「トンネル構造」として構築されている。覆工は支保工を保護することによりトンネル全体の耐久性を向上させる機能や、外力の作用等の不確実な事象が発生した場合でも、構造全体の安定を保つ機能を担っている。

(2) トンネル補強のこれまでの考え方

生活の多様化に伴い交通・物流への依存が高まり、ネットワークを構築するために近年においてトンネルの建設本数が急速に増加している。それに伴い、地すべり地帯や膨張性の地山といった従来に比較して地山条件が不利な状況での施工事例も増加し、加えて、地下水位の比較的高い砂質地山などが多い都市域でも NATM が採用されてきている。これらの条件下での施工では支保工や覆工の規模を増大させて剛性の高い構造とすることにより、外力の作用に対応しているのが現状である。また、過去の大規模地震等では過大な外力の作用によってトンネル構造に被害が発生し、それによって通行止め等を余儀なくされた事例も見られている。しかしながら、そのような被害を防止するためにはトンネルの補強を行う必要があるものの、これまでの場合では対処療法的に覆工等を後から補強せざるを得ず、線状構造物であることからコストの極度の増大を招くことが多い。

(3) 特性曲線とトンネルの剛性

一方、地下構造物の力学的な挙動に関して「特性曲線」に基づく考え方がある。これは地山とトンネル構造の両者が、それぞれ力と変形の関係の「特性曲線」を有しており、それぞれの特性曲線が交差する点で外力(地山は外力として力をトンネル構造に与え、トンネル構造は外力を地山から受ける)と変形が決まるというものである。例えば地山やトンネル構造の変形を抑制したい場合は、トンネル構造を非常に強固にすればよいが、それだけトンネル構造に作用する外力は大きくなる。逆に地山やトンネル構造の変形を塑性の範囲に至らないまでといった、ある程度まで許容すれば、作用する外力を減少させることができ、トンネル構造の規模も小さくできる。しかし、上述したように外力の作用が想定以上に大きい地山条件や地震発生時などにおいては、地山の変形は想定よりも過大となる。現在のトンネル構造では過大な変形に追従できないため、構造自体が保有する剛性に対応する必要がある。言い換えれば、現在のトンネル構造は「剛なトンネル構造」であるため、支保工等の規模を大きくすることで外力に対応しなければならない。

逆に考えれば、トンネル構造が変形に追従し、外力や変位を吸収できる形を取ることが出来れば、トンネル構造に作用する外力または変位を減少させることができ、結果的に負担可能な外力または変位は増加することになる。以上の観点より、経済性や施工性に留意しながらもトンネル構造の安全性を確保するためには「剛なトンネル構造」のあり方を根本的に見直す考え方もある。

2. 研究の目的

過大な変形に耐えうるトンネル構造を構築するためには「剛なトンネル構造」よりも、構造的にシンプルな形で変形に追従し、過大な外力を吸収できるトンネルの構造(以降「柔なトンネル構造」と称する)の提案が不可欠である。本研究では実験的手法等を通じて「柔なトンネル構造」の力学的なメカニズムを解明してその考え方の確立を図るものである。

初めに「剛なトンネル構造」に対して構造物の変形・耐荷性能・破壊モードに関するデータを得るための模型実験を実施する。引き続き「柔なトンネル構造」に対して同種の実験を実施し、両者の結果を比較する。さらに、数値解析等で実験結果の妥当性を評価することにより、構造の耐荷力評価および破壊のメカニズムを探り、「柔なトンネル構造」の考え方を提示する。

3. 研究の方法

本研究では写真-1 に示す土木研究所の二次元載荷試験装置を使用し、過大な外力が作用すると想定した場合のトンネル構造の挙動に関して検討を行った。実験土槽は内寸が1.3m 四方、高さが0.3m である。実験土槽の中央部にトンネル構造を模擬したモルタル製の供試体を設置し、その外側に模型地山を作製して反力フレームの1面からジャッキ2本を使用して載荷を行った。

模型地山は土槽に標準砂を空中落下させて行う方法で模擬し、投入した砂の密度を管理した。また、実験ではトンネル構造を模擬したモルタル製の供試体を使用した。図-1 に供試体の概略の寸法、および表-1 に供試体の仕様を示す。なお、本研究では図-1 内に斜字で示すように供試体の右側のスプリングラインの部分をも度とし、反時計回りに角度を定義した。モルタル供試体は2車線トンネル相当断面の概ね1/20の大きさで形状を模擬し、アーチ部は外径が600mm、厚さが20mm、奥行きが295mmの単心円を基本として作製した。

本研究では、現在の通常の状況で構築され

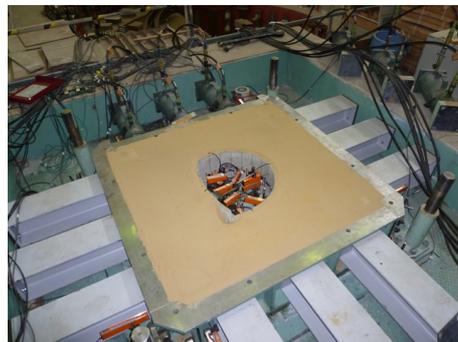


写真-1 二次元載荷試験装置の概要と実験の状況

表-1 実験ケース一覧

ケースNo.	インバート	吸収機構	荷重
1-1	なし	なし	鉛直
1-2	なし	なし	鉛直
2-1	あり	なし	鉛直
2-2	あり	なし	鉛直
3	あり	25度, 155度	鉛直
4	あり	25度, 90度, 155度	鉛直
5	あり	なし	水平
6	あり	25度, 155度	水平
7	あり	25度, 90度, 155度	水平

ているトンネル構造を「剛なトンネル構造」と称することとし、剛なトンネル構造に対して「吸収機構」を配置した「柔なトンネル構造」を考え、剛なトンネル構造と柔なトンネル構造の挙動の比較を行った。吸収機構としては棒状の合成ゴムを準備し、後述する実験ケースに応じて供試体の 25 度、90 度、155 度のうちの所定の位置に挿入した。

また荷重の作用方向はトンネル構造に外力が作用する場合の例として、鉛直方向荷重または水平方向荷重の 2 種類を想定して実験を行った。

4. 研究成果

(1) 鉛直方向荷重が作用する場合

図-2 にトンネル供試体に鉛直方向荷重が作用する場合のジャッキによる可動壁への作用荷重と供試体の鉛直方向の変形量を示す。供試体はインバートのないケース 1-1、1-2 およびインバートのある標準的なケースであるケース 2-1 で破壊を生じてジャッキによる荷重が不可能になり、また、ケース 2-1 と同仕様のケース 2-2、吸収機構を 2 箇所設けたケース 3 および吸収機構を 3 箇所設けたケース 4 ではジャッキの最大荷重に至るまで破壊を生じてジャッキによる荷重が不可能となることはなかった。

特に吸収機構を有しているケース 3 およびケース 4 に関しては、ケース 2-1 やケース 2-2 と比較すると、ケース 3 では同一の荷重で変形量が小さくなっており、ケース 4 では大きな差が見られない。図-2 の荷重と変形の関係からケース 3 およびケース 4 ではケース 2-1 やケース 2-2 よりも見かけ上の剛性が高くなっていると考えられる。しかし、作用荷重が大きくなった段階では荷重と変形の曲線の傾きに差が見られず、模型地山のみで実施した荷重と変形の傾きと比較するとほぼ同一の傾向をとることから、模型地山の变形特性の影響を大きく受けていることも推察される。なお、水平方向の断面の収縮に関しては、吸収機構を有するケース 3 およびケース 4 は大きな差異が認められず、ケース 2-1 およびケース 2-2 に比較して同一の荷重で変形量が小さくなる結果が得られた。ケース 3 およびケース 4 では、鉛直方向荷重の作用により本

来はアーチ部より側壁の部分へ伝達される力が吸収機構によって減じられることにより供試体が広がる方向での変形が小さくなると推察される。

次に、図-3 にケース 2-2、ケース 3 およびケース 4 の各点の荷重が 300kN の場合のひずみの変化の傾向を示す。なお、25、90、155 度の黒線は吸収機構が存在する場合のその位置を示す。これより、今回計測した点に関しては、吸収機構を配置したケース 3 やケース 4 の 25 度および 155 度付近といった側壁

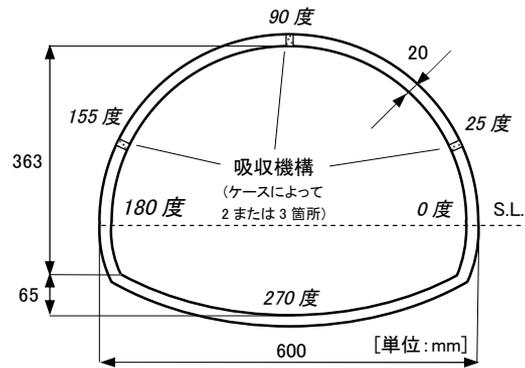


図-1 供試体の概略寸法と角度の定義

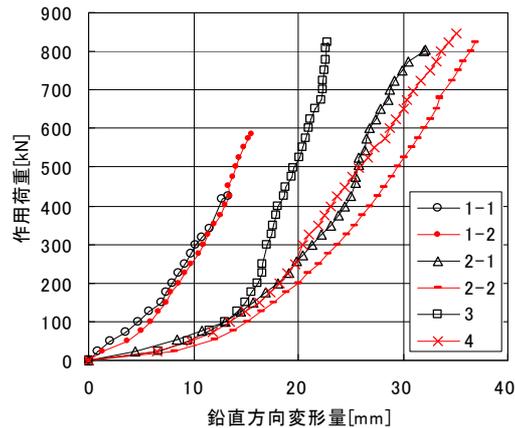


図-2 鉛直方向変形量(鉛直方向荷重)

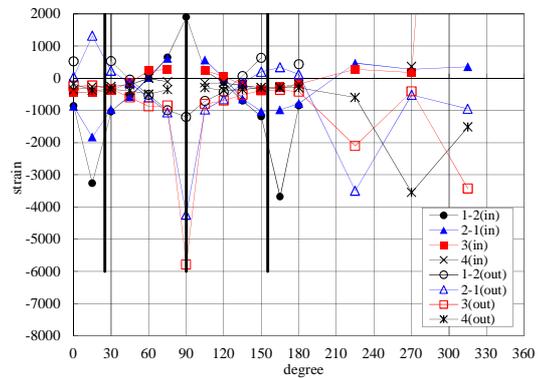


図-3 ひずみの断面内での変化(鉛直方向荷重)

の部分では全圧縮の状態となっており、ケース 2-1 やケース 2-2 とは大きく異なる傾向となっている。特に、実際の現象においても吸収機構近傍でのモルタル供試体の圧縮破壊が観測されており、ひずみの計測結果の傾向と合致した。また、ケース 3 やケース 4 では、ひずみの値の変化が一部を除けば、全体的に平滑になっていると考えられ、全体としてひずみの低減が見られる可能性がある。さらに、ケース 4 の吸収機構を 3 箇所配置した場合は、インバート部分では引張ひずみが生じたものの、アーチ部分では引張ひずみは生じない結果が得られている。ただし、今回の吸収機構の接合は簡易な手法によるものにとどまっていることや、部材全体にわたってのひずみの減少の度合い、および吸収機構近傍のひずみや応力状態についてさらなる検証が必要である。

また、図-4 にひび割れ発生時の荷重や代表的なひずみに達した時点での荷重やその他

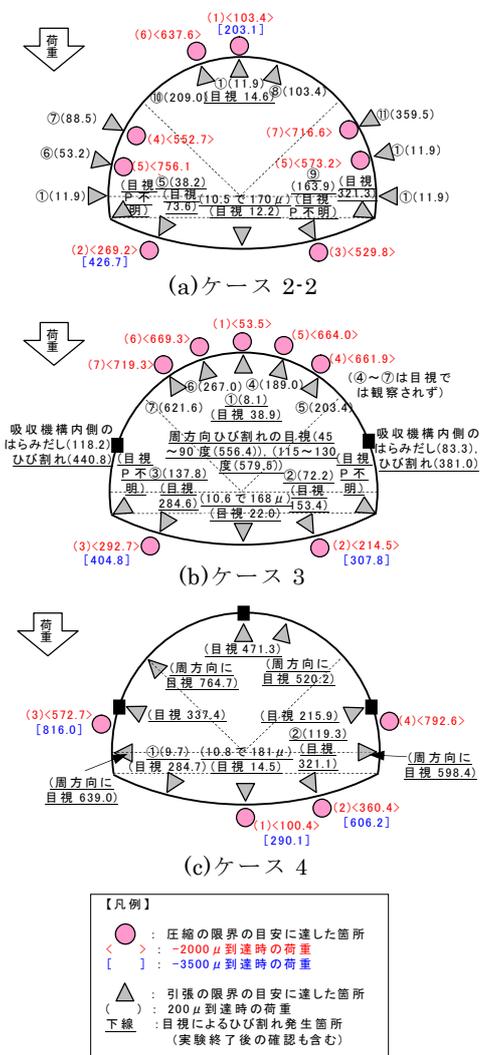


図-4 ひび割れ等の発生状況(鉛直方向荷重)

の現象の推移を示す。なお、荷重の継続中に目視によって観察されたひび割れは原則として内面側にとどまり、外面側のひび割れは実験終了後に確認されたものである。これよりひび割れの発生に関しては、特にケース 3 では天端とインバートでのひび割れの発生が観察されたが、吸収機構が存在している側壁では引張に起因すると考えられるひび割れは観察されなかった。ひび割れの発生順は天端・インバートがほぼ同時であり、両者とも曲げ圧縮の状態が発生したと考えられる。ただし、吸収機構の付近で合成ゴムがつぶれてはらみ出す形になり、その部分で供試体が圧縮破壊を生じ、それに伴ったせん断ひび割れが発生した。最終的には天端とインバートで圧縮の限界に達している箇所が見られている。さらに、ケース 4 では引張によるひび割れはインバート部分だけで見られ、それ以外の内面におけるひび割れは荷重が大きくなってからのせん断破壊によるものと考えられるもののみが観察された。

(2) 水平方向荷重が作用する場合

引き続き、水平方向荷重が作用する場合の検討として図-5 に鉛直方向の変形量を示す。なお、供試体は全てのケースで破壊を生じ、ジャッキによる荷重が不可能になった。供試体の形状はケース 5, 6, 7 がそれぞれケース 2, 3, 4 に対応するものである。

図-5 より吸収機構の有無と鉛直方向の変形量に大きな差は見られないが、ケース 5 とケース 6 を比較すると、ケース 6 がケース 5 よりも強度が小さかったにもかかわらず、破壊荷重は増加している。また、ケース 5 とケース 7 を比較しても、吸収機構が存在するケース 7 で破壊荷重が上昇する結果が得られた。このことは吸収機構の存在により、破壊荷重が増加する可能性があることを示唆している。

また、図-6 および図-7 にケース 5~7 の荷

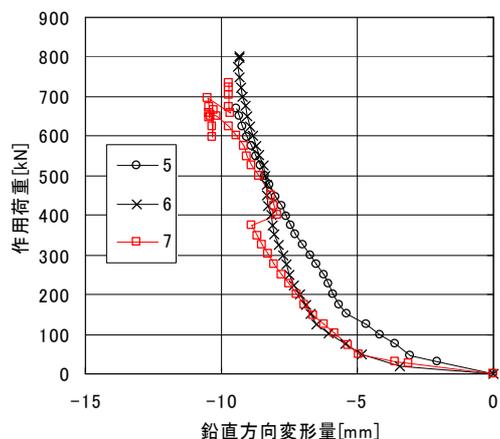


図-5 鉛直方向変形量(水平方向荷重)

重が 300kN の場合のひずみの変化の傾向、および目視によって観察されたひび割れの発生状況を示す。

図-6 より、吸収機構を配置した場合でもケース 6 ではひずみの減少の度合いが小さい。ただし、ケース 6 は供試体の強度が小さいことからその影響がないかどうかの検証が必要である。ケース 7 ではケース 5 に比較すれば、全体的にはひずみは小さくなっているが、180 度の側壁のように逆に大きめに現れている部分もある。

また図-7 よりケース 5 では内面側の側壁でひび割れの発生が観察され、ひずみから想定すると天端付近の背面でひび割れが生じたと考えられる。ひび割れの発生順は、目視では載荷側ではない側壁(0 度側)→載荷側の側壁(180 度側)となっていたが、ひずみが 200 μ に達した荷重はほぼ同一であった。なお、実験の継続中ではインバートにひび割れは観察されず、供試体の破壊は 0 度の付け根で折れるような形で発生した。また、ケース 6 ではひび割れの発生は側壁で確認されたが、それよりも先にひずみが 200 μ に達したのは天端部の外面側であった。圧縮破壊が生じている箇所がケース 5 に比較して多く存在し、破壊はケース 5 とは異なり、全体がせん断破壊を生じるような形と、インバートで全断面圧縮による破壊を生じるような形となった。さらに、ケース 7 では側壁にひび割れが観察された以外では大きな変化は見られず、断面に対して斜め横断方向にせん断ひび割れが進展するとともに、吸収部での圧縮によるひび割れを生じ、最終的には 180 度の付け根で折れるような形で破壊を生じた。

以上より、剛なトンネル構造と柔なトンネル構造を比較した場合、ひび割れの発生位置が変化するが、ひずみの発生量の減少する傾向は鉛直方向荷重が作用する場合よりは顕著には見られなかった。このことから、荷重の作用方向によっても吸収機構の存在により期待できる変位や外力の吸収等の効果が異なることが推察される。

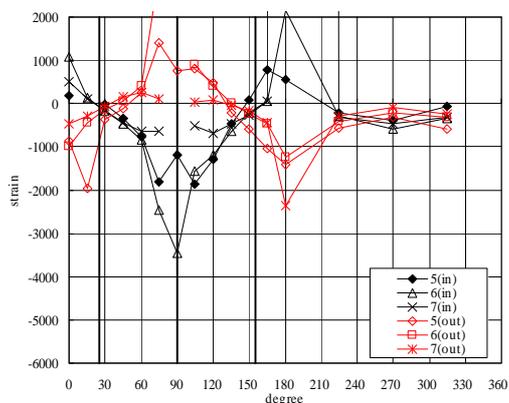
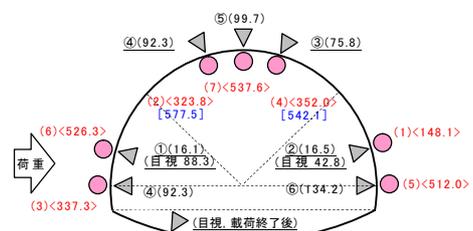


図-6 ひずみの断面内での変化(水平方向荷重)

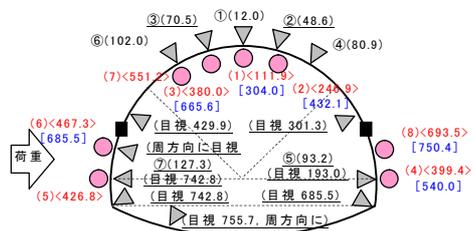
(3)まとめ

トンネルが剛な構造である場合と柔な構造である場合の両者を考え、それぞれの場合の変形性能や耐荷力といった基本的な力学的特性の差異および挙動のメカニズムの解明を試みた結果、以下の知見が得られた。

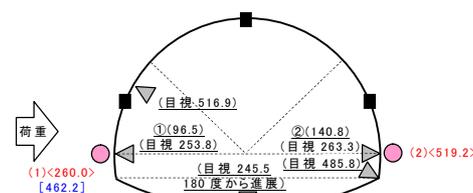
- ①吸収機構を配置することにより、荷重と変形量の関係は、配置しない場合に比較して大きく異なり、構造に発生する変形を吸収できる可能性がある
- ②荷重の作用方向と吸収機構の配置との関連性、また、地山の挙動による影響を考慮に入れることにより変形を吸収する効果の傾向を把握できる可能性がある
- ③吸収機構を配置することにより、ひび割れの発生位置が変化し、ひずみの発生量も構造全体では緩和される
- ④吸収機構を配置することにより、その近傍では圧縮破壊を生じる現象が見られたように、全体的にひずみが緩和されても、局



(a)ケース 5



(b)ケース 6



(c)ケース 7

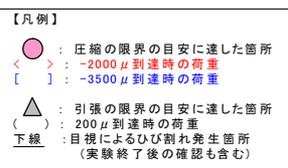


図-7 ひび割れ等の発生状況(水平方向荷重)

所的にひずみの集中等が現れる場合がある

本研究により得られた結果はトンネル工学においては先駆的な内容であると考えられ、特に過大な外力が作用する場合のトンネル構造のあり方の観点からは従来までの画一的な考え方とは異にするものと考えられる。国外においては可縮性支保に関する研究が実施されつつあるが、本研究のように地震力等を念頭においた覆工に対する反映を試みている点の研究は稀少であり、発展が見込めるものであると考えられる。

今後は吸収機構や地山の特性を考慮し、それら相互の考え方を精査するとともに、荷重の作用方向による影響を検討し、さらに詳細な数値解析等を行うことによりメカニズムの解明を図った上で、実施工への適用性に関する検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- (1) 砂金 伸治, 真下 英人, 日下 敦他 2 名, 過大変形に対応するトンネル構造に関する実験的考察, トンネル工学報告集, 査読無, 第 20 巻, pp.129-136, 2010.11
- (2) Isago, N., H.Mashimo, A.Kusaka, et.al., Behavior of tunnel structure with high performance to excessive deformation, ITA-AITES World Tunnel Congress 2011 Proceedings, 査読有, pp.507-516, 2011.5
- (3) Isago, N., A.Kusaka, H.Mashimo et al., Tunnel structure with absorption mechanism against excessive force and deformation, Proc. of ITA-AITES World Tunnel Congress & 38th General Assembly, 査読有, CD-ROM, 2012.5

〔学会発表〕(計3件)

- (1) 砂金伸治, 過大変形に対応するトンネル構造に関する実験的考察, 土木学会トンネル工学研究発表会, 2010年11月
- (2) Nobuharu Isago, Behavior of tunnel structure with high performance to excessive deformation, ITA-AITES World Tunnel Congress & 37th General Assembly, 25 May, 2011, Helsinki, Finland
- (3) Nobuharu Isago, Tunnel structure with absorption mechanism against excessive force and deformation, ITA-AITES World Tunnel Congress & 38th General Assembly, 21 May, 2012, Bangkok, Thailand

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

砂金 伸治 (ISAGO NOBUHARU)

独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ(トンネル) 主任研究員

研究者番号: 10355878