

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20246079

研究課題名(和文) 固結力が小さな地山内のトンネルの地震時破壊挙動とその対策法に関する研究

研究課題名(英文) Fundamental study on seismic stability of tunnels in weakly cemented soil and its countermeasures

研究代表者

日下部 治 (KUSAKABE OSAMU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40092548

研究成果の概要(和文)：

地震時においてトンネル被害が想定される比較的固結力が小さな地山を対象として、①地震動に伴うせん断変形を受ける土被りが小さなトンネル、②地震により大きな地圧を受けるトンネル、③下部基盤層の断層変位に伴う変形を受ける堆積地盤中のトンネル、の地震時挙動を調べるための各種模型実験手法を開発し、それを用いた実験と数値解析を行うことにより、地震時のトンネル構造部と地盤の相互作用を含めた地震時安定性を明らかにするとともに、その耐震補強法の提案を行った。

研究成果の概要(英文)：

Tunnels in weakly cemented or no-cemented soils are susceptible to damages by ground motions or displacements caused by earthquake. In order to investigate complicated seismic soil-structure interaction of such tunnels, various model testing techniques has been developed, such as an active type shear box and a fault simulators. Three specific conditions were considered in this study, namely, 1) shallow tunnels which are subjected to shear deformation of grounds, 2) Tunnels in weak ground which is subjected to large earth pressure, and 3) tunnels in an alluvium subjected to fault displacement. From the model test results and numerical simulation, typical deformation and failure mechanism of these tunnels are scrutinized and effective countermeasures against them are discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2009年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2010年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
年度			
年度			
総計	34,400,000	10,320,000	44,720,000

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：地震、NATM、埋設管、地盤変形、断層、堆積層、遠心模型、重力場模型

1. 研究開始当初の背景

(1) 一般に地上構造物に比べて地下構造物の

耐震性は高いと考えられ、地上構造物に比べると地震被害例は少ないが、これまでも直下型地震や関東大震災のような大規模地震に

においてトンネル被害は報告されている。特に、兵庫県南部地震と新潟県中越地震では新幹線トンネルに大きな被害が生じた。地震による既往のトンネルの被害は、図-1に示すような3つのパターンに分類される。即ち、坑口などの小土被り区間に生じやすいせん断変形に伴う被害、地質不良区間における地圧増加による被害、断層のずれによる被害である。この3パターンのうち前者2つは、強度の弱い軟岩の破碎帯や固結力の弱い第三紀後期あるいは洪積堆積層における被害であり、このような地山は大深度都市トンネルが建設される地盤でも想定される。また、このような堆積層下に断層が存在する場合、断層のずれに伴い堆積層に生じるせん断帯によりトンネルが被害を受けることも想定される。

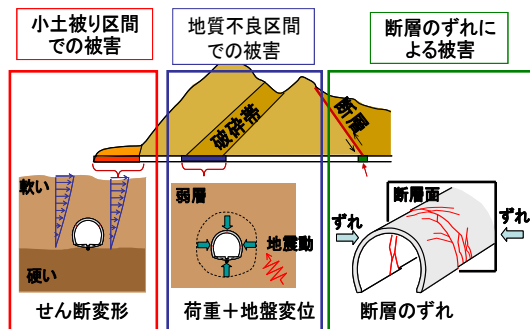


図-1 地震による山岳トンネルの被害パターン
(橋ら、17回トンネル工学研究発表会(2007))

(2) 上記被災パターンはトンネルと地盤の相互作用の問題であり、地盤の地震前の初期応力、地震時の地盤の動的、或いは永久変形、それによりトンネルが受ける外力は、地盤の強度、剛性といった特性に大きく依存する。このような状況下におけるトンネルの地震時挙動は極めて複雑なものであり、ほとんど未解明な状況にある。これらの被災パターンと地山特性に応じた地盤とトンネルの地震時挙動の解明は、今後発生が予想される、海洋型の巨大地震、直下型の大地震に対する合理的なトンネル構造物の耐震設計、耐震補強方法の確立に必要不可欠である。

(3) このような背景のもとシールド工法、都市NATMの耐震性の必要性は、土木学会トンネル標準示方書でも強調されているものの耐震設計の確立には、多様な地盤条件と幾何学的制約条件における地盤と構造物の相互作用に関する詳細なメカニズムの把握が必須であり、現在でも明確かつ合理的な耐震設計法は確立されていない。

2. 研究の目的

上述の多くの要因の中で本研究は、地震時においてトンネル被害が想定される比較的

固結力が小さな地山を対象として、①地震動に伴うせん断変形を受ける土被りが小さなトンネル、②土被りが大きく地震により大きな地圧を受けるトンネル、③下部基盤層の断層変位に伴う地盤変形を受けるトンネルの地震時挙動をphysical modeling (物理模型) とnumerical modeling (数値模型) の面から詳細に調べ、その地震時安定性を明らかにするとともに、その耐震補強法の提案を目的としている。

3. 研究の方法

(1) 土被りが小さなトンネルの挙動：

地震時、せん断変形が卓越する比較的土被りが小さいトンネルの変形・破壊挙動を調べるために、図-2に示すアクティブ型せん断土層を用いて一連の遠心模型実験を行った。この装置は、東工大所有のMark III Centrifuge用に設計・製作されたもので、実験は主として50gの遠心加速度場で行った。実験では、土試料として乾燥珪砂、小さな固結力を人工的に持たせた珪砂を用い、NATMトンネルをモデル化(図-3)し、土被り厚さ、トンネル模型のトンネルとインバート部との固定条件について検討した。一様なせん断変位を地盤に繰り返し入力し、トンネル外周方向の曲げ、軸力、半径方向の土圧、トンネルの鉛直、水平方向変位をひずみゲージ、土圧計、変位計を用いて計測し、繰返しを受けることによるトンネルに作用する外力の変化とそれに伴う変形について詳細に調べた。せん断土層実験に加えて、振動実験を行い、応答変位法のような擬似静的なモデルを用いて地中構造物の地震時の挙動を評価することの妥当性についても検討した。

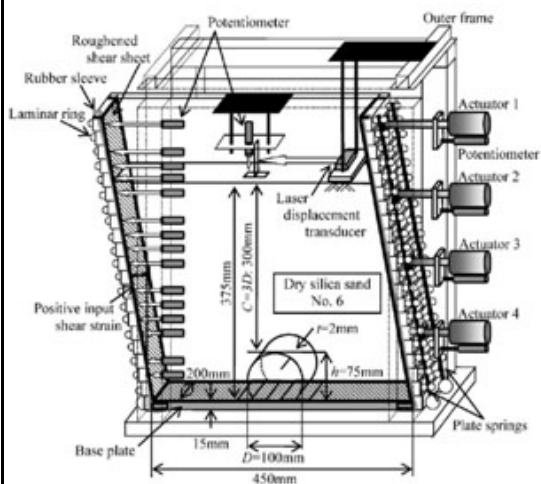


図-2 アクティブ型せん断土層を用いたトンネル実験

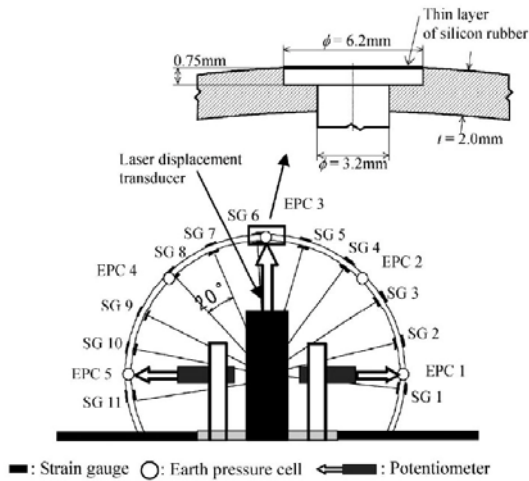


図-3 モデルNATMトンネルの計測の詳細

(2) 地質不良地山における山岳トンネル：

被害事例が多い矢板工法によるトンネルと新設トンネルとしてのNATMを対象として、地質不良区間のトンネルが地山変位を受ける状況下での破壊過程を再現し、地震対策工の検討における地山とトンネル覆工の相互作用の設定のための知見を得ることができる模型実験装置の開発し、それを用いた実験を行った。

図-4,5は実験に用いた装置と模型寸法である。ここでは、トンネル模型は新幹線トンネル断面の1/50であり、低強度モルタルを用いて地山を再現した。地山変位をトンネル水平、鉛直方向から一様（2次元的）、及び局所的に作用させ、覆工の変形、破壊（特に、圧ざ）挙動について詳細に調べた。さらに、対策工としてインバート、繊維補強コンクリート、EPSを用いた緩衝材の効果についても、数値解析結果を含めて検討した。

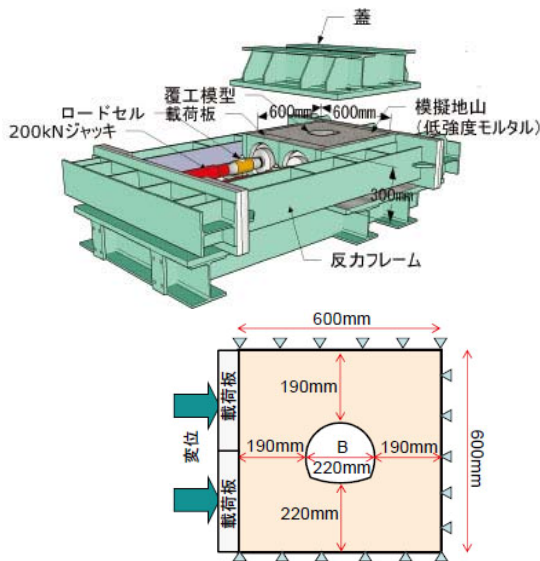


図-4 地山一様変形導入装置と模型概要

(3) 断層変位を受ける堆積層内のトンネル構造物の挙動：

直下型大地震では、振動のみならず断層変位による大きな地盤変形によって構造物が被害を受ける。堆積地盤中の断層変位の進展、それに伴う地盤変形は、多くの要因の影響を受けることが考えられるが、限られた実観測データからではそれらについて必ずしも明確なものとはなっていない。本研究では遠心模型断層シミュレータを新たに開発した。この断層シミュレータは、大深度部の拘束圧を再現する目的で地盤表面にゴムバックを介してサーチャージ圧（最大 500kPa）まで作用することができる。傾斜角 60°は一定で、50g 場で最大 30mm（実物換算 1.5m）の正断層、逆断層変位を地盤下部から入力できる。

これを用いて、断層タイプ、拘束圧、岩盤と堆積層の境界面の摩擦条件が縦ずれ断層の変位進展に与える影響について検討した。更に、各条件の下で地中埋設管に対する実験

（図-5）も行い、PIV解析（Particle Image Velocimetry）より求めた地盤変位とひずみゲージにより計測した埋設管の変形挙動より、断層変位を受ける地盤と埋設管の相互作用について検討した。

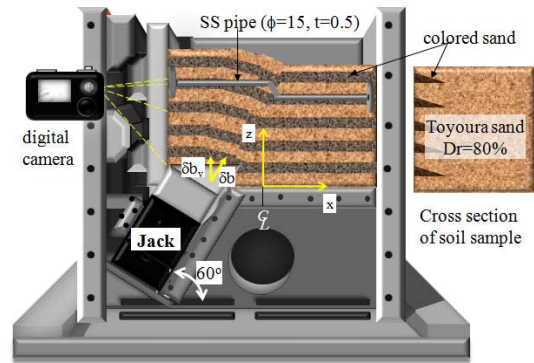


図-5 断層実験装置の概要

4. 研究成果

(1) 土被りが小さなトンネルの挙動：

地震動によるせん断変形を受けるトンネルの挙動として以下の結論を得た。即ち、

① せん断土層実験から得られた静的な繰返しせん断を受ける地盤内のトンネルの挙動（トンネル覆工の周方向の曲げモーメント、軸力）は、動的振動実験で得られたものと類似しており、応答変位法のような擬似静的なモデルを用いて地中構造物の地震時の挙動を評価することの妥当性を確認した。

② 土被り/径比（C/D）が3程度の比較的浅いトンネルでも振動前のトンネル覆工土圧は、アーチ作用によりNATM設計で想定する

緩み土圧相当の土圧が作用する。しかし、この初期土圧はせん断履歴を受け、地盤のアーチ作用が減少することにより増加する(図-6)。つまり、地震等のせん断履歴により、設計で仮定している初期外力分布が変化する可能性があり、浅いトンネルの設計では初期土圧として全土圧を仮定することが必要である。

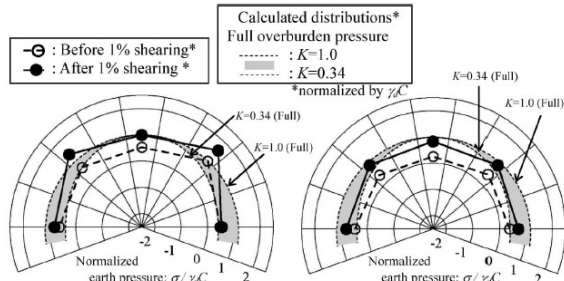


図-6 せん断前後のトンネル土圧の変化 (図中 σ , γ_d , C , K は、それぞれトンネル土圧、土の単位体積重量、土被り厚、水平土圧係数)

③ せん断時トンネル覆工に発生する断面力は、トンネル覆工側壁部とインバートの接合条件の影響を強く受ける。ピン構造ではトンネル肩部で大きな軸力が発生し、剛結構造では結合近傍で極端に大きな曲げモーメントが発生する。これらの違いは、接合部の拘束力の違いによるトンネル変形の差によるものと考えられる。特に、ピン結合の場合、変形しやすいため、変形が集中する方向に大きな土圧を受け、結果として軸力が大きくなる(図-7)。

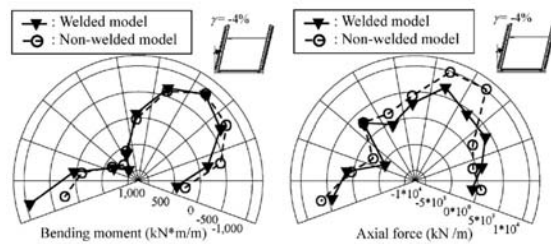


図-7 せん断時のトンネル覆工断面力

④ 固結力の影響については、固結があるケースでは、信頼できる土圧計測が難しく、相互作用を詳細に検討することが難しい。しかし、トンネル覆工断面力からは、固結力がある地盤の場合、せん断時のモーメントの増分は、固結力がない地盤に比べ小さくなり、緩み領域(アーチ作用)が、せん断中も一定程度維持されていることが推察される。

(2) 地質不良地山における山岳トンネル：
大規模地震時、地質不良地山において山岳トンネルが受ける地山変位に対するトンネル覆工の変形破壊挙動、更にはその対策につ

いて以下の結論を得た。即ち、

① 背面空洞を持つトンネルが水平方向に変位を受けると、天端で圧が生じ、背面空洞がないトンネルが鉛直方向に変位を受けると、側壁打ち継ぎ目で圧が生じる。また、局所変位を作用すると輪切り状のひび割れによりブロック化および剥落が生じる。

② 背面空洞により変状が生じやすくなる。また、インバートによりトンネルの剛性が向上し、トンネル内空変位、特に盤膨れを抑制することができる(図-8)。剛性の増加により覆工の負荷が増加するため、大きな地山変位が予想される場合は応力集中により圧等の変状が生じやすくなり、そのための対策が必要となる。

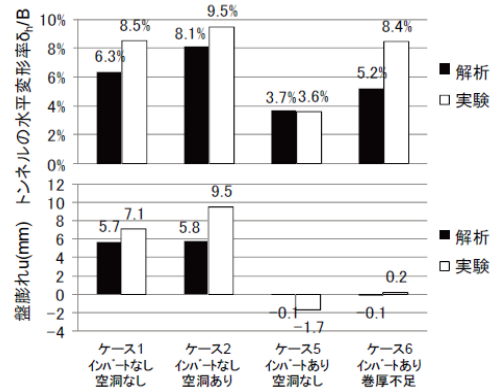


図-8 トンネルの水平変形率、盤膨れ量の比較 (図中、 B はトンネル幅)

③ 繊維の混入により覆工のじん性が向上し、ひび割れを分散させ、ひび割れ幅を小さくすることが可能となる。また、一樣変位、局所変位どちらにも適用性がよい。(図-9)

④ 吹き付けコンクリートと覆工との間に緩衝材を設置することにより覆工の変形を低減しひび割れを抑制できる。しかし、一樣変位の場合、変位方向と直角方向にも緩衝材を設置すると、その部分の地山からの反力が覆工に効果的に作用せず、内面に圧が生じやすくなる。しかし、局所変位では、この圧は生じにくい。

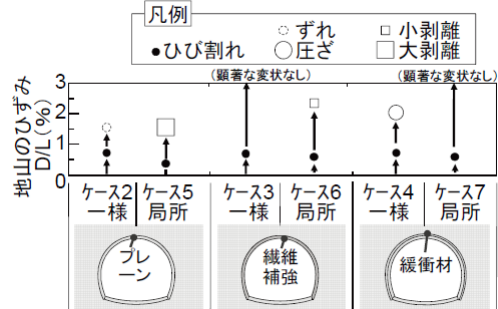


図-9 変状が発生する時の地山ひずみ(水平載荷) (図中、 D は入力変位、 L は地山模型幅)

(3) 断層変位を受ける堆積層内のトンネル構造物の挙動：

下部岩盤に縦ずれ断層が発生し、その変位が上部堆積層へ伝搬する過程を再現する模型実験より、以下の結論を得た。即ち、

① 下部岩盤の断層近くから最初に生じた断層面は、地盤途中で進展が止まり、新たな断層面が複数生じ、その発生位置、発生個数によって地盤変形が決まる。(図-10)

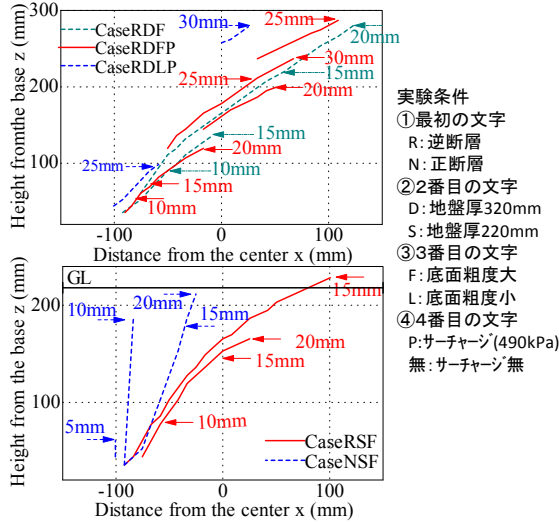


図-10 下部断層変位に伴う破壊面の進展状況 (図中の矢印の数字は、その位置まで進展した入力断層変 δb : 図-5参照)

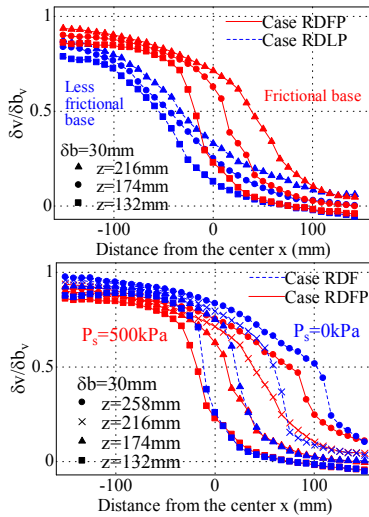


図-11 地盤内の鉛直変位分布 (図中 δb_v は、入力断層変位の鉛直成分)

② 上記逆断層変位における破壊面の伝播は、上載圧力、及び岩盤と堆積層の境界の条件の影響を強く受け、上載圧力が大きくなり、岩盤と上部堆積層の境界の粗度が小さな場合は、岩盤の変位に対する地盤の変位が小さくなり、鉛直変位量も小さくなる(図-11)。一方、土被り厚が浅い場合、上記岩盤と堆積層の

境界条件の違いが地盤変形に与える影響は少ない。

③ 地盤中に生じる不等変位領域の幅は、逆断層変位に比べて正断層変位では狭く、一方、破壊面の傾斜は、正断層変位では急になる。

④ 土被り圧が大きく地盤剛性に対する管の相対剛性が小さい場合、変形の及ぶ範囲は狭いが、管には大きなモーメント、曲げ変形が生じる(図-12、13)。相対沈下の幅が狭い場合、同じ土被り圧であっても管には局所的なモーメントが生じ、破壊を生じる可能性が高くなる。

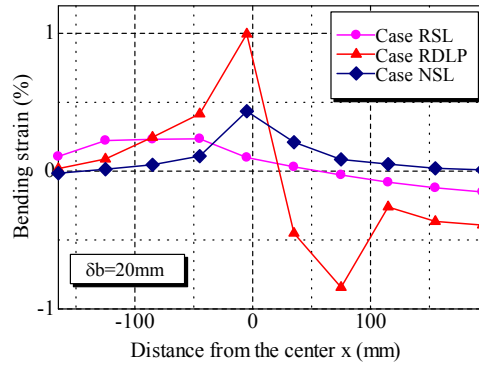


図-12 埋設管に生じた曲げひずみ分布

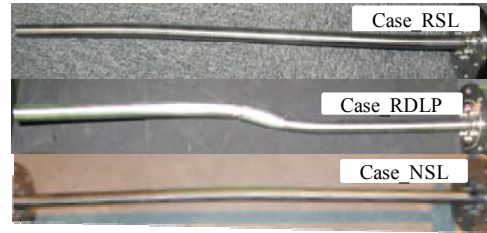


図-13 埋設管模型の変形破壊状況

⑤ 縦ずれ断層変位の場合、鉛直変位と水平変位の局所的な変化が生じ、埋設管は軸力と曲げ荷重を受け、結果として土被りが浅い場合は座屈に近い破壊形態となる可能性がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

① S. Shibayama, J. Izawa, A. Takahashi, J. Takemura, & O. Kusakabe, Observed behaviour of a tunnel in sand subjected to shear deformation in a centrifuge, Soils & Foundations, 50(2), 281-294, 2010.4 (査読有)

② 野城一栄, 小島芳之, 新井泰, 岡野法之, 竹村次朗, 圧縮破壊後の軟化を考慮した無筋コンクリート山岳トンネル覆工の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集C, 65(4),

1024-1038, 2009.12 (査読有)

③野城一栄, 小島芳之, 深沢成年, 朝倉俊弘, 竹村次朗, 地質不良区間における山岳トンネルの地震被害メカニズム, 土木学会論文集C, 65(4), 1045-1061, 2009.12 (査読有)

④野城一栄, 小島芳之, 宮林英次, 西藤潤, 朝倉俊弘, 竹村次朗, 地質不良区間における新設山岳トンネル用地震対策工の適用性, 土木学会論文集C, 65(4), 1062-1080, 2009.12 (査読有)

⑤S. Shibayama, J. Izawa, A. Takahashi, T. Yamada, H. Nagatani, N. Ohbo & O. Kusakabe, A comparative study between dynamic shake table test and shear box test in a centrifuge, Int. J. Physical Modelling in Geotechnics, 9(2), 23-31, 2009.6 (査読有)

[学会発表] (計 12 件)

①J. Takemura, Y. Ishii, Y. Hara & O. Kusakabe, Centrifuge model test of fault rupture propagation in alluvial deposit, 8th Int. Conf. Urban Earthquake Eng., pp. 285-292, Tokyo, 2011.3 (査読有)

②S. Shibayama, A. Takahashi & O. Kusakabe, Effect of arch action on pseudo-static response of urban mountain tunnel at relatively shallow depth in soft ground, 8th Int. Conf. Urban Earthquake Eng., pp. 285-292, Tokyo, 2011.3 (査読有)

③J. Takemura, Y. Ishii & O. Kusakabe, Development of a fault simulator in a centrifuge and preliminary study on a buried pipe subjected to a fault differential displacement, Proc. 3rd Asia Conf. Earthquake Engineering, Bangkok, P-104 (査読有)

④石井幸恵, 関栄, 井澤淳, 竹村次朗, 断層変位を受ける地中埋設管の遠心模型実験, 第45回地盤工学研究発表会, 松山, 2010.8 (査読無)

⑤K. Yashiro, J. Saito, T. Iura & J. Takemura, Seismic damages of mountain tunnels in Japan and case studies, 7th Int. Conf. Urban Earthquake Eng., pp. 375-380, Tokyo, 2010.3 (査読有)

⑥S. Shibayama, J. Izawa, A. Takahashi, J. Takemura & O. Kusakabe, Pseudo-Static

Seismic response of urban mountain tunnel in sand, Proc. 6th Int. Conf. Urban Earthquake Eng., pp. 561-566, Tokyo, 2009.3 (査読有)

⑦S. Shibayama, J. Izawa, J. Takemura & O. Kusakabe, Effect of Fixity of Tunnel end on the Earth Pressure Change due to Ground Deformation, Proc. 6th Regional Symp. on Infrastructure Development RSID6, Bangkok, GEO-20, 2009.1 (査読有)

⑧O. Kusakabe, J. Takemura, A. Takahashi, J. Izawa & S. Shibayama, Proc. 12th Int. Conf. International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 1459-1474, Goa, 2008.10 (査読有)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日下部 治 (KUSAKABE OSAMU)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 40092548

(2) 研究分担者

竹村 次朗 (TAKEMURA JIRO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 40179669

高橋 章浩 (TAKAHASHI AKIHIRO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 40293047

井澤 淳 (IZAWA JUN)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 70345388

竹山 智英 (TAKEYAMA TOMOHIDE)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 00452011

(3) 連携研究者

野城 一栄 (YASHIRO KAZUhide)
鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部・主任研究員
研究者番号: 70425932

吉迫 和生 (YOSGISAKO KAZUO)
鹿島建設(株)・研究技術開発本部技術研究所・主任研究員
研究者番号: 80416742