

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：82114

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06220

研究課題名(和文) 地中構造物の累積損傷に対する構造の崩壊過程と地盤の変形解放の関連性の解明

研究課題名(英文) Relation between process of structure collapse and release of ground deformation energy

研究代表者

砂金 伸治 (ISAGO, NOBUHARU)

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所(つくば中央研究所)・研究員

研究者番号：10355878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：我が国では山岳道路トンネルが約10,000本が存在しているが、全てが健全な状態にあるわけではない。例えば当初は微細なひび割れが発生し、それが徐々に進行して最終的にせん断ひび割れを生じて破壊に至るような中～長期的にわたって変状が生じる場合や、大規模に衝撃的かつ急激に破壊、すなわち短期的に荷重が作用する場合等がある。本研究ではトンネルの挙動に関する計測結果をもとに、変状の時間的な変化や、トンネル模型を用いた載荷実験を行い、載荷の過程や補強材料の差異による破壊状況の把握を通じて、トンネル構造の検討を行うにあたって荷重や変形に加えて、変形に関連するエネルギー量を考慮することが望ましい可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Mountain road tunnels of approximately 10,000 tubes exist in Japan and all of them is not healthy situation. Some collapse modes are reported; the one is that the deformation of tunnel occurs over the middle to long time period such as the small cracks develop slowly and lead to the collapse with shearing cracks, and the other is that the collapse occurs suddenly at large scales by the acting load in short time period. The behavior of tunnel structure was grasped by the measurement result at an actual site over several years and the collapse mode was also examined through the model test considering the process of loading and the difference of the material for reinforcement of tunnel in this study. The result indicated the possibility that the energy volume relating to tunnel deformation should be considered, as well as the relation of load and displacement of tunnel structure and its load-bearing capacity when the tunnel structure is designed.

研究分野：工学

キーワード：トンネル 地山 変状 外力 変形エネルギー

1. 研究開始当初の背景

我が国では多数の地中構造物があり、例えば山岳道路トンネルでは約 10,000 本が存在しているが、これらすべてが健全な状態にあるわけではない。例えば膨張性を示す地盤にある場合は、トンネルにせん断ひび割れが発生し、表面からコンクリートがはく離する事例や、巨大な直下型地震の影響で鉄筋の露出やコンクリートが落下する事例が報告されている。

これらの事例を分析すると、当初は微細なひび割れが発生し、それが徐々に進行して損傷が累積し、最終的にせん断ひび割れを生じてコンクリートが破壊するもので、損傷の進行が比較的緩慢、すなわち中～長期的に変形が生じると予想される場合が 1 つには挙げられる。一方、地震力により構造が大規模に衝撃的かつ急激に破壊、すなわち極短期～短期的に荷重が作用したと予想される場合もある。

一方で、地中構造物の損傷の評価は、損傷した状況を把握し、その時点で考えられる「作用した外力の値と範囲」を推測し、その結果を用いて経験的・対処療法的に構造物の補強を行っている。そのため、構造物に与える外力や変位の時間的な影響は考えられていない。また、構造物自体が損傷し崩壊に至る過程も、応力の再配分が徐々に進んでいく場合と衝撃的に崩壊が生じる場合があると考えられるが、その崩壊過程は構造物や周囲の地盤の特性を受けると考えられるものの、その研究も地中構造物の分野では行われてこなかった。

2. 研究の目的

本研究では地中構造物、特にトンネル構造を対象として変位や荷重が作用する際に、中～長期的または極短期～短期的といった時間的な要素の影響が存在することを考慮し、その影響を地山側が保有するエネルギーに帰着する。一方、補修や補強を行っていない構造から、なんらか行っているものも含む種々の構造形態をもつ地中構造物が崩壊するまでに保有している過程の定義を行い、それを崩壊のポテンシャルを念頭に置くことを試みる。これらの対比結果をもとに、地中構造物の累積損傷に対するそれらのメカニズムを解明し、巨大な変位や荷重が作用した場合でも安全性を確保できる地中構造物の設計思想を摸索し、今後のトンネル構造の設計のあり方について検討することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 中～長期的に作用する外力に伴う崩壊事象に関する検討手法

1) 検討手法

本節では中～長期的に作用する外力に伴うトンネルの崩壊事象を把握することを目的

的に、矢板工法によって建設されたトンネルにおいて、変位の発生状況や地山挙動に関して観察・計測を行い、得られた計測結果を基に変位の進行を分析した内容について述べる。

2) 計測対象トンネル

図-1 に計測の対象としたトンネルのイメージを示す。対象トンネルは、過去よりトンネル内で顕著な盤ぶくれ区間が存在するとの情報があつたトンネルであり、延長 915m と報告される 2 車線の廃道の道路トンネルである。本トンネルでは顕著な盤ぶくれの区間が 3 ヶ所存在し、それぞれ ~ と称する。当時の資料によれば、盤ぶくれ区間 との地質は第三紀の泥岩、区間 は凝灰質砂岩、また、設計覆工厚は盤ぶくれ区間 とで 60cm、区間 で 40cm との記録があつた。盤ぶくれ区間 ~ において遠望目視によって覆工の状況を観察した結果、盤ぶくれだけではなく、覆工にひび割れや曲げによる圧縮状態の損傷が生じる「圧ざ」、せん断破壊が多く発生し、一部には漏水がみられることも判明した。

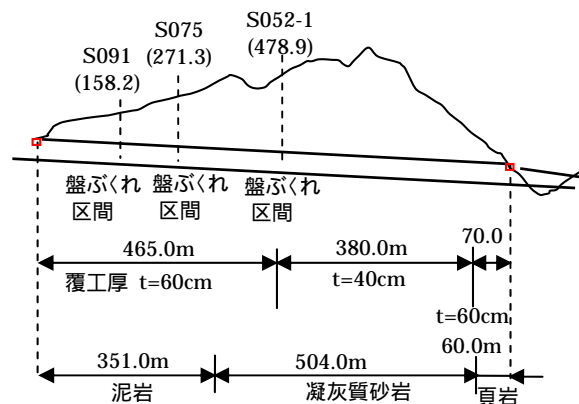


図-1 対象トンネル

3) 計測データの収集・分析

図-1 に示した区間 ~ に対して 7 年間にわたって、計測や調査によりデータを収集し、対象トンネルの変形の分析を行った。なお、計測・調査は概ね毎年 10 月～11 月に実施している。

地山特性に関する調査として、2 年目の時点で区間 において深度 15m の水平方向および鉛直方向 2 ヶ所の 66mm のボーリングを実施した。また採取したコアを用いて一軸圧縮強さ、ヤング率等の項目に加え、浸水崩壊度や膨張性粘土の有無などを把握する為の岩石試験を行った。加えて、鉛直方向のボーリング孔内に変位計を 6 点設置し、2 年目以降の地中変位を計測した。さらに、トンネル全体の挙動を把握する目的で、区間 ~ 内の 1 断面ずつで内空変位(上半水平方向)を計測するとともに、その区間で路面の縦断方向の変位を水準測量にて計測した。

(2) 極短期～短期的に作用する外力に伴う崩

壊事象に関する検討手法

1) 検討手法

本節では極短期～短期的に作用する外力に伴うトンネルの崩壊事象を把握することを目的に、覆工コンクリートがせん断破壊されて断裂し、落下に至るまでの過程を模擬する要素実験を無筋、鉄筋による補強、鋼繊維による補強の各コンクリートについて実施し、コンクリート部材が断裂された後に鉄筋や鋼繊維の抵抗力などが落下を防止する効果について確認した。

2) 実験概要

図-2 に示すように実験で用いる供試体は全て同じ形状寸法とした。形状は載荷装置の制約からアーチではなく直線とし、寸法は覆工模擬部の長さを 80cm とし載荷方向に対して厚さを 35cm、奥行きは 50cm とした。また、せん断破壊を誘導するために覆工模擬部の両端に曲げ変形を抑制するための厚さ 70cm の固定部を設けて鋼棒で締め付けた。表-1 に示すようにコンクリートは覆工に使用される無筋、鉄筋による補強および鋼繊維による補強の 3 種類のコンクリートを用いて、各種 2 体ずつの供試体を作成した。なお、鋼繊維による補強コンクリートについては混入率 0.3% の 2 体に加えて 0.5% の供試体を 1 体作成した。

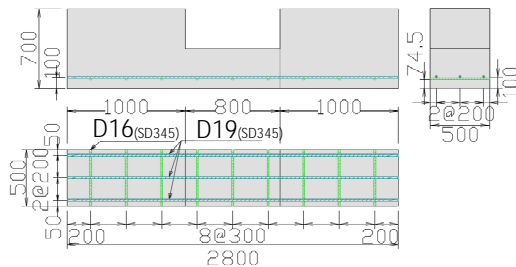


図-2 供試体の例

また、載荷装置は 2 000kN までの載荷重と 300mm のストロークが可能なものを用いた。載荷は鉛直下方に行い、載荷過程における制御については表-1 に示すように CASE1, 3, 5 では供試体が破壊されて落下する瞬間的な現象について、可能な限り実際に近い再現をして観察する目的から、荷重制御により載荷装置の動きを止め「極短期～短期的に作用する外力に伴う崩壊事象」を再現していると仮定した。また、CASE2, 4, 6, 7 では荷重と変位の関係を確認するために変位制御により載荷した。これらのケースが前節に示した「中～長期的に作用する外力に伴う崩壊事象」を再現していると仮定した。

測定項目は荷重と変位とし、荷重は載荷装置からの出力を記録した。変位は変位計を 2 つの観察面における覆工模擬部の両端と中心位置の計 6 箇所に設置して測定した。なお、端部の変位計に破壊の影響を受けたケースがあり、本実験では中心位置の変位量で結果をまとめた。

表-1 実験ケース

CASE	使用材料	
	コンクリート	補強材料
1: 無筋 (荷重制御 変位制御)	22.5-15-40	-
2: 無筋 (変位制御)		
3: 鉄筋 (荷重制御 変位制御)		
4: 鉄筋 (変位制御)		
5: 鋼繊維0.3% (荷重制御)	24-18-20	スチールファイバー L=60mm, =0.75mm ³
6: 鋼繊維0.3% (変位制御)		混入量W=28.6kg/m ³
7: 鋼繊維0.5% (変位制御)		スチールファイバー L=60mm, =0.75mm ³ 混入量W=46.5kg/m ³

4. 研究成果

(1) 中～長期的に作用する外力に伴う崩壊事象に関する検討結果

地山の挙動と特性の関連性を把握するために、区間におけるボーリングによる結果と変形挙動ならびに変状現象との関連性について考察した。図-3 にボーリングおよび岩石試験結果に基づく区間の地質構成および 2～7 年目における地中変位計測結果を示す。前述したように、既往資料から区間においては凝灰質砂岩が大部分を占めることが予想されたが、ボーリング結果より、覆工コンクリートや路盤の背面では断層粘土や断層角礫が認められ、粘土鉱物としてスメクタイトや緑泥岩、雲母類が確認された。また、路盤より下方向約 8m、側方向約 2m は無水掘進が可能なほど岩石が粘土状を呈しており、側方向より下方向が水の存在により緩んでいる可能性が高いことを確認した。

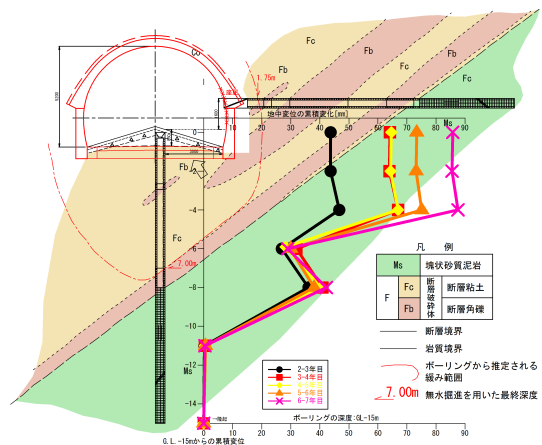


図-3 地質構成および地中変位

図-4 に鉛直ボーリングにおける各深度ごとの岩石試験結果と既往文献における膨張性地山の判定指標を示す。断層粘土(深度 3.8m 付近)においては、浸水崩壊度試験の結果では区分 D (原形をとどめない) となり、一軸圧縮強さ 0.13MN/m²、変形係数 6.03MN/m² とスレーキング現象が顕著にみられ、液性限界 110.8%、塑性指数 91.7%と地下水や湧水に

よる影響で塑性化しやすい地山であることが確認された。また、CEC 試験結果より膨張性の特徴を示しやすい交換性ナトリウムが多く含まれおり、膨張性地山の判定指標項目の殆どが基準値以上の結果となった。

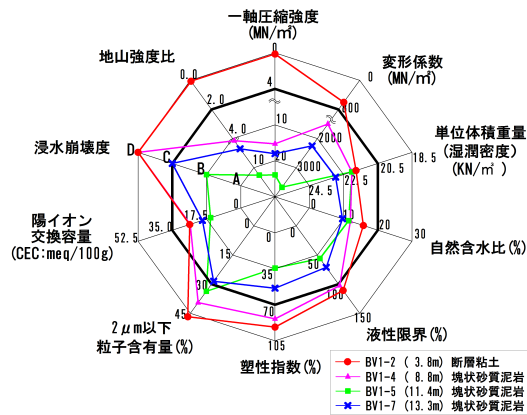


図-4 膨張性地山の判定指標

鉛直方向の地中変位の計測結果(図-3)より、2~7年目の6力年における累積地中変位量は、深度 2.0m で 85.52mm, 深度 4.0m で 87.5mm, 深度 6.0m で 28.94mm, 深度 8.0m で 42.24mm, 深度 11.0m で 0.43mm を観測した。地表から深度 8.0m の領域で著しい変位が発生しており、この領域には断層粘土または断層角礫が分布しており、深度 8.0m より深部に位置する塊状砂質泥岩が分布する領域では微小の変位しか計測していない結果となった。

図-5 に経年別の地中変位速度を示す。ボーリングを実施後(1~2年目)、深度 4.0m で最大地中変位速度 46.3mm/年を計測し、その後1年間毎に 20.0mm/年, 0.1mm/年と収束傾向にあったが、5年目以降に 9.3mm/年, 11.5mm/年と増加傾向に転じており、深度 6.0m 以下の浅部では同様の傾向がみられる。また、深度 6.0m 以上の深部においては、2~3年目に変形は見られるものの、3年目以降は収束しており、殆ど変形がみられない。

本地山は、岩石試験結果からも地下水や湧水による影響で塑性化しやすい地山であることが確認されており、ボーリングを行った直後に局所的に地山が乱されたり、掘削時に水を使用したことによる影響によって、ボーリング孔周辺の地山の変形が促進された可能性がある。また、深度 4.0m~6.0m の範囲で最大地中変位速度を計測しており、時間の経過とともに増加が継続していることが分かる。一部の断層粘土部が継続して変形していることは、浸水崩壊度等が関連し、地下水の影響を受けていることが推察される。

以上より、特に区間における実際の変形速度を比較すると、側壁の収縮より盤ぶくれの方が顕著であることが確認でき、粘土状を呈している地山の厚さに関連して変形が生

じ、坑内での変状の発生に至っていると考えられる。加えて、側壁部に湧水も確認されることから、水による影響を継続的に受けている可能性があり、それによって変形が継続していることも考えられる。また、これらの概略的な傾向は別途計測した覆工コンクリートのはく落数の推移の傾向にも一致していることが考えられた。すなわち、外力作用に伴う変形が、変状のはく落を促進させている可能性が高いと考えられ、今後も継続して計測を行い、これらの関係性に注視する必要がある。本研究の結果より中長期的に作用する外力によってトンネルが崩壊する場合には、はく落を伴い、エネルギーの累積と解放を繰り返しながら進行していくものと考えられる。

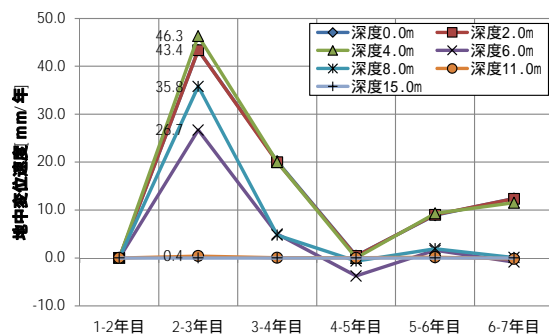


図-5 地中変位速度

(2) 極短期~短期的に作用する外力に伴う崩壊事象に関する検討結果

実験を行った結果の一例として、鉄筋による補強コンクリートで行った CASE3 と CASE4 の結果を図-6 に示す。

CASE3 では荷重制御により破壊時の変位の増加が連続的に進む設定としたため、図に示すように荷重と変位の採取値は少ない。しかしながら、CASE3 と CASE4 の過程は概ね一致していた。CASE3 では荷重が 650kN, 変位が 1.0mm に達した時点で載荷面両端部から斜め下方に向けてひび割れが発生した。その後、荷重が 750kN, 変位が 1.5mm に達した時点で覆工模擬部をおおよそ3等分する位置に下面から鉛直方向に 2 本のひび割れが発生した。荷重を増加する過程でこれらのひび割れの幅には増加傾向は見られないまま、最大荷重が 1900kN, 変位が 4.9mm に達した時点で覆工模擬部の左側端部において鉛直方向のせん断破壊が発生し、ほぼ同時に右側端部にも鉛直方向のせん断破壊が発生した。その後はブロック化した覆工模擬部がほぼ水平状態を保持したまま押し下げられた。この動きが止まった時点の測定値は荷重が 305kN で変位が 140.3mm となり、ブロック化した覆工模擬部は鉄筋により吊り下げられた状態で空中に留まっていた。この状態から更に載荷盤を押し下げると荷重は 400kN まで上昇した後に一定して変位のみが増加した。変位が 153.7mm

に達すると荷重が 197kN まで急減し、再び荷重が 200kN 程度でほぼ一定したまま変位のみが増加する状況となり 191.4mm に達した時点から荷重が低下し始めた。その後、変位が 207.2mm、荷重が 100kN に達した時点で載荷盤が供試体に接触するため実験を終了した。この時点においてもブロック化した覆工模擬部は空中に留まっていた。

また、CASE4 では開始時点から変位制御により 0.001 ~ 0.05mm/sec の変位速度で載荷して、せん断破壊発生後の荷重と変位の関係などを確認した。最大荷重が 1935kN で、変位が 4.6mm に達すると荷重の減少と変位の増加が急激に進み、変位が 9.0mm で右端部に鉛直方向のせん断破壊が生じた。続けて変位が 20.4mm に達すると左端部にもせん断破壊が生じて荷重は 600kN 程度まで急減した。その後、ブロック化した覆工模擬部は水平を保った状態で押し下げられるが、荷重は 600kN 程度で一定したまま変位のみが増加した。変位が 88.7mm に達した時点で供試体から大きな音が発生し、同時に荷重が 370kN まで急減した。その後は再び荷重が 400 ~ 500kN の間で一定したまま変位のみが増加する状態となり、変位が 155.1mm に達した時点で被りコンクリートの一部が剥がれて鉄筋が現れ、ブロックが吊り下げられた状態で荷重が 260kN となった。更に押し下げると変位が 192.5mm に達しても落下せず、この時点で載荷板と供試体の固定部が接触するため終了した。

以上より、CASE4 を中～長期的に作用する外力の場合、また、CASE3 を極短期～短期に作用する外力の場合と想定すれば、耐力に達するまでの挙動の差異は顕著であったとは言えなかった。一方で、耐力に達した以降は若干の差が認められるものと考えられる。このことは、単に耐力で構造を検討するのではなく、外力の影響も加味し、構造物が吸収できるエネルギーを考慮することで、より合理的な設計が可能になる可能性があると言える。しかしながら、今回は部材を用いた模型実験であり、実際には地山の状況等にも影響を及ぼされると考えられることから、さらなる検証が必要であると言える。

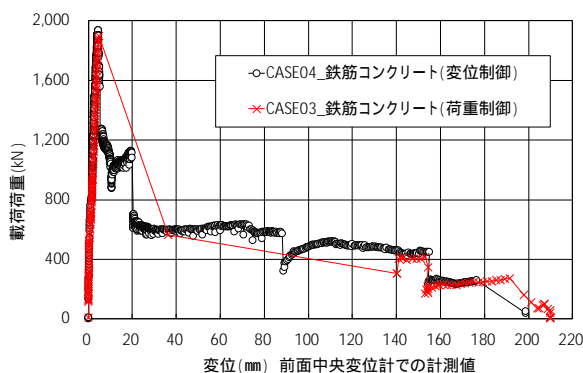


図-6 鉄筋コンクリートの実験結果

また、鉄筋による補強以外に、無筋(CASE2

など)、鋼繊維による補強コンクリート(CASE7 など)の実験を行っている。この結果を図-7 にまとめて比較する。最大荷重は鉄筋による補強コンクリートが最も大きく 1935kN、続いて鋼繊維による補強コンクリートが 1220kN で無筋コンクリートが 888kN であった。地震時に作用する荷重は不明ではあるが、比較すれば鉄筋による補強は大規模なせん断破壊を抑制する一定の効果を有すると考えられる。また、最大荷重時の変位を比較すると、無筋コンクリートの変位が 15mm であるのに対して鉄筋、鋼繊維による補強コンクリートでは 5mm 程度でありせん断破壊が発生するまでは補強効果により変形が抑制されていると考えられる。

次に、せん断破壊発生後の過程では、コンクリートは破壊面で分離しており、載荷重に抵抗する力としては補強材の引張、せん断抵抗力およびコンクリート塊の接触部分から伝達される支持力や摩擦力などが考えられる。これを踏まえて、せん断破壊後の無筋コンクリートと鋼繊維による補強コンクリートの挙動を確認すると明確な差は見られない。また、実験後に破壊面を観察すると鋼繊維のほぼ全てが付着切れしていることが別途確認されており、せん断破壊面がずれていく過程で補強効果が失われる可能性が示唆される。更に、覆工模擬部の落下時点の変位についても無筋コンクリートと鋼繊維による補強コンクリートの間には有意な差は確認できなかった。これらの検証から、せん断破壊発生後の鋼繊維による補強の効果は限定的であると考えられる。

一方で、鉄筋による補強コンクリートは無筋コンクリートや鋼繊維による補強コンクリートとは大きく異なる挙動を示した。特にせん断破壊発生後の挙動に特徴があり、荷重が保持されて段階的に減少する。変位が 20 ~ 88mm の区間では 600kN、88 ~ 155mm の区間では 400 ~ 500kN、155 ~ 176mm の区間では 260kN を保持しながら変位のみが増加した。この過程では変位 88mm の時点で大きな音の発生に伴って荷重が急減し、この現象は鉄筋の断裂が 1 箇所確認されていたことと合致する。これらの結果は鉄筋の引張強度、定着力および延性がせん断破壊面における鉄筋の抵抗力を確保し、鉄筋による補強コンクリートはせん断変形に対する追随性を高めていることを示唆している。また、変位が 150mm 程度では落下せず、荷重が 260kN で保持されていた。その後、更に変位を増加させ 200mm 程度に達しても落下せず、鉄筋による補強は落下防止効果を大きく有することが確認された。

以上より、中～長期的に作用する外力の場合で考えると、補強材によって耐力に差異が出ることに加え、耐力に達した以降でも、エネルギーの吸収に影響を及ぼすことから、耐力による比較にとどまらず、部材の種類を考慮に入れた上での検討が必要になることが

分かる。

本研究の結果より中長期的に作用する外力によってトンネルが崩壊する場合には、耐力の比較に加え、耐力に達した以降のエネルギーの吸収が部材によって大きく異なることが考えられ、耐力以降の考慮によって合理的な設計の確立の可能性が示唆される。すなわち、外力の作用過程や補強材料の差異による破壊状況の把握を通じて、トンネル構造の検討を行うにあたって荷重や変形に加えて、変形に関連するエネルギー量を考慮することが望ましい可能性があると考えられる。

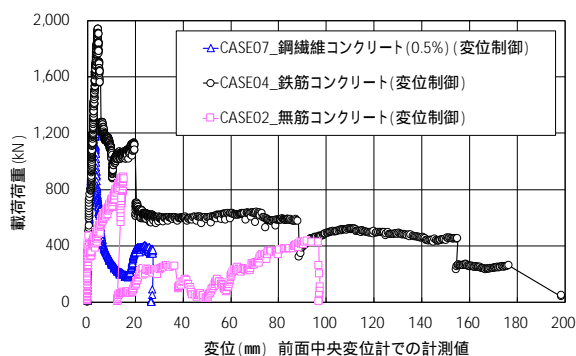


図-7 補強材による差異

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11 件)

- 1) 日下敦, 河田皓介, 砂金伸治: 地震時における山岳トンネルの変形モードと作用荷重, 土木技術資料, No.6, Vol.57, pp.24~27, 2015.6
- 2) Isago, N., Kawata, K., Kusaka, A. and Ishimura, T.: Long-term deformation of mountain tunnel lining and ground under swelling rock condition, Proceedings of the ISRM regional symposium EUROCK 2015 & 64th Geomechanics colloquium, USBpp.39-44, The Austrian Society for Geomechanics, 2015.10
- 3) Isago, N., Kawata, K., Kusaka, A. and Ishimura, T.: Long-term deformation of mountain tunnel lining and ground under swelling rock condition, Geomechanics and Tunneling, pp.380-386, No.5, Volume 8, 2015.10
- 4) 淡路勤太, 砂金伸治, 日下敦, 河田皓介: 山岳トンネルの時間依存性挙動の簡易評価手法, 土木技術資料, No.10, Vol.57, pp.34~37, 2015.10
- 5) Kusaka, A., Kawata, K. and Isago, N.: Tunnel Deformation Mode and Loading Magnitude During Large Earthquake, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2016, USBpp.1-9, No.605, 2016.4
- 6) 岸田展明, 日下敦, 砂金伸治: 山岳トンネル覆工の破壊時荷重における覆工形状の影響に関する数値解析的検討, 土木学会

トンネル工学報告集, No.26, pp.1~8, 2016.11

- 7) 日下敦, 岸田展明, 砂金伸治, 河田皓介: 山岳トンネルにおける覆工背面空洞の裏込め注入材の剛性と効果に関する一考察, 土木学会トンネル工学報告集, No.26, pp.1~7, 2016.11
- 8) 吉岡知哉, 砂金伸治, 石村利明: 膨張性地山における既設トンネルの変状メカニズムと変状の進行に関する考察, 第 14 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 一般社団法人岩の力学連合会, No.61, pp.1~6, 2017.1
- 9) Isago, N., Ishimura, T. and Morimoto, S.: Long-term durability of permanent lining concrete in mountain tunnel, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2017, USB, No.14743, 2017.6
- 10) Kusaka, A., Kishida, N., Isago, N. and Kawata, K.: Influence of stiffness of back-fill grouting material for void above tunnel lining upon load-bearing capacity of tunnel structure, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2017, USB, No.14844, 2017.6
- 11) 小出孝明, 砂金伸治, 日下敦: 覆工コンクリートの破壊過程に関する実験的考察, 土木学会トンネル工学報告集, No.27, pp.1~14, 2017.11

[学会発表](計 5 件)

- 1) 河田皓介, 日下敦, 砂金伸治: 鉛直荷重用時の山岳トンネル覆工の挙動に関する実験的考察, 平成 27 年度全国大会第 71 回年次学術講演会, pp.217-218, 2015
- 2) 日下敦, 岸田展明, 砂金伸治: 小土被り山岳トンネルの覆工設計における地盤反力係数の算定方法に関する一考察, 平成 28 年度全国大会第 72 回年次学術講演会, pp.805-806, 2016
- 3) 岸田展明, 日下敦, 砂金伸治: 地山のせん断変形を想定した山岳トンネルの覆工破壊時の荷重に関する検討, 平成 28 年度全国大会第 72 回年次学術講演会, pp.799-800, 2016
- 4) 小出孝明, 砂金伸治, 日下敦, 岸田展明: 覆工コンクリートのせん断変形に対する追従性の確認, 平成 29 年度全国大会第 73 回年次学術講演会, pp.731-732, 2017
- 5) 小出孝明, 砂金伸治, 日下敦: 地山からの過大な変形に対する覆工コンクリートの追従性に関する実験的考察, 第 32 回日本道路会議, No.6006, 2017.10

6. 研究組織

(1) 研究代表者

砂金 伸治 (ISAGO NOBUHARU)

国立研究開発法人土木研究所 道路技術研究グループ(トンネル) 上席研究員

研究者番号: 10355878