

戦-21 山岳トンネルの耐震対策技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：真下英人，水川雅之，日下敦

【要旨】

これまで山岳トンネルは、経験的に地震の被害を受けにくいと言われてきたが、兵庫県南部地震や新潟県中越地震では、比較的規模の大きい覆工の崩落を伴うような被害が発生したトンネルが見られた。このような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被害発生メカニズムを解明し、耐震対策が必要となるトンネル条件と効果的な耐震対策を確立する必要がある。本年度は、昨年度までに実施した静的数値解析では再現が困難であった被害形態を対象に、動的数値解析と模型振動実験を実施した。
 キーワード：山岳トンネル，地震被害，動的解析，模型実験

1. はじめに

トンネルは地盤中に構築され、周辺地盤との相互作用で安定を保ち、地震時も周辺地盤と一体となって挙動することから一般に地震には強く、特に、開削トンネルやシールドトンネルに比較して地盤の良いところに非開削で構築される山岳トンネルにおいては、過去の経験からも地震の被害を受けにくいと言われてきた。しかし、平成 7 年 1 月の兵庫県南部地震や平成 16 年 10 月の新潟県中越地震では、数は限られるものの比較的規模の大きい覆工の崩落を伴うような被害を受けた山岳トンネルがあった。これは、地震の大きさ、地山条件、トンネルの構造などによっては、比較的良好な地山に構築される山岳トンネルでも地震による被害を受ける可能性があることを示唆している。このような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被害発生メカニズムを明らかにし、耐震対策が必要となるトンネルの条件および効果的な耐震対策の方法とその設計法を確立する必要がある。

昨年度は、新潟県中越地震により被災した山岳道路トンネルの被害状況と被害発生要因に関する調査・分析を行い、山岳トンネルの地震による被害は、

- ・不安定な斜面内や不良地山区間など、地山の悪い区間
- ・活断層と交差する等、地震で動いた断層近傍
- ・地震発生以前に既に変状が発生していた区間（背面空洞を含む）
- ・坑口部

といった、これまでも地震の被害を受けやすいと指

摘されていた条件において被害が発生した事例が多数を占め、その形態は図-1 に示す 5 タイプに大別されることが分かった。また、新潟県中越地震では、これまでの地震で大きな被害が認められなかった比較的土被りの大きい軟質な地山において、覆工コンクリートの崩落等の大きな被害を伴う、TYPE-II（和南津トンネル）と TYPE-III（木沢トンネル）の形態を呈する被害が発生した。

これらの被害のうち、TYPE-III の木沢トンネルについては、現地調査により剛性が大きく異なる地質の境界面にトンネルが位置することが分かり、それらを忠実にモデル化することで、地震荷重を慣性力として作用させる静的 FEM 解析（応答震度法）により変状を概ね再現できることが明らかとなった。

本年度は、静的数値解析では再現し得なかった被害形態に関する知見を得ることを目的として、TYPE-II の和南津トンネルをモデル化した動的数値解析と、軟質地山トンネルを模擬した模型振動実験を実施した。

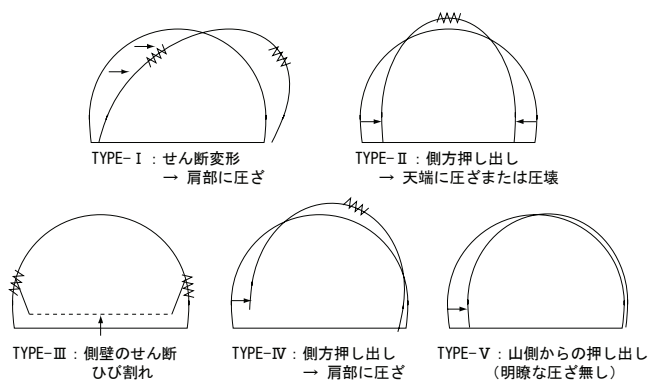


図-1 地震被害を受けたトンネルの変形モード

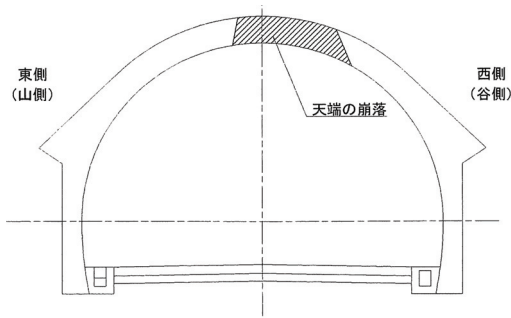


図-2 和南津トンネル被害状況図
(長岡側坑口から 100 m 付近)

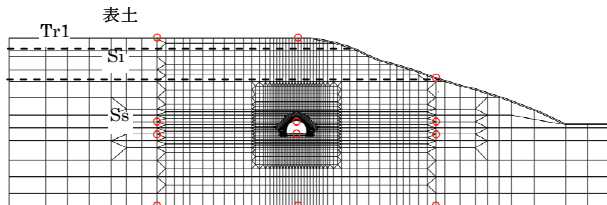


図-3 解析モデル

表-1 解析物性値

	変形係数 E (kN/m ²)	せん断弾性波 速度 Vs(m/s)	ポアソン 比 ν	単位体積重 量 (kN/m ³)
表土	3,500	160	0.49	18
段丘堆積層 Tr1	65,000	430	0.4	22
砂質シルト岩 Si	86,000	490	0.4	22
シルト混じり細粒砂岩 Ss	100,000	540	0.4	22
覆工コンクリート	22,000,000	2000	0.2	23

2. 動的数値解析による地震時挙動の検討

ここでは、和南津トンネルの地震被害を再現することを目的とし、時刻歴応答解析による二次元 FEM 動的解析を実施した。

2.1 和南津トンネル地震被害の概要

和南津トンネルは、矢板工法により建設された全幅 9 m の 2 車線道路トンネルで、周辺地山は DII 地山相当の軟質なシルト質砂岩により構成されている。主な被害としては長岡側坑口から 20~110 m の区間で天端部において縦断方向に圧ざあるいはせん断破壊によると思われる覆工コンクリートの剥落が発生し、特に長岡側坑口から 90~107 m 区間 (土被り約 40 m) では天端部において幅約 2~6 m のコンクリート塊が崩落した (図-2 参照)。

2.2 解析条件

解析モデルを図-3 に、採用した物性値を表-1 示す。地山はせん断弾性係数のひずみ依存性を考慮した非線形材料、覆工コンクリートは解析ソフトの制約から線形材料とした。地山のせん断弾性係数のひずみ依存性は、洪積砂質土の動的変形特性¹⁾を Ramberg-Osgood

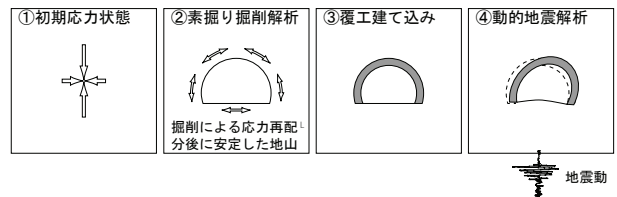


図-4 解析のステップ

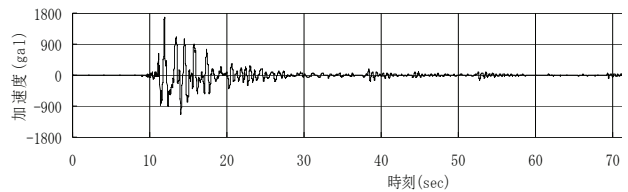


図-5 解析に用いた入力地震波
(JR 新川口の工学基盤面波形)

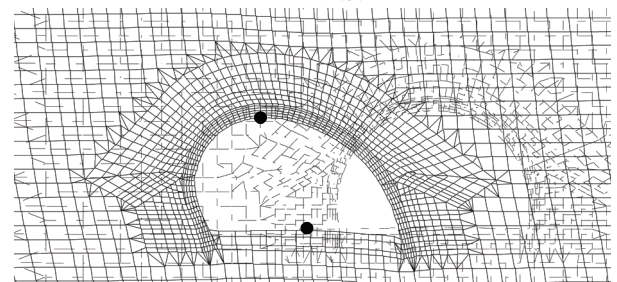
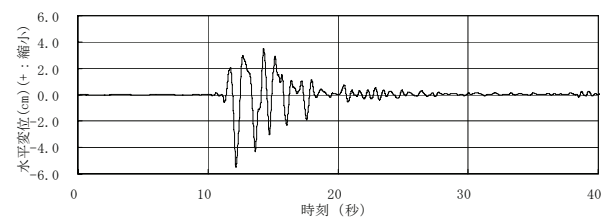


図-6 覆工天端～底部の水平相対変位の
時刻歴波形と最大時(12.15 秒)の変位図

モデル^{2),3)} (RO モデル) でモデル化することで表現した。解析のステップは、トンネルが掘削された際の掘削解放応力に伴う初期せん断を考慮するため、①初期応力解析、②掘削解析、③覆工建て込み、④地震時動的解析の順に進めた (図-4 参照)。入力地震動は、和南津トンネルの近傍で観測された JR 新川口の EW 方向 (和南津トンネルの横断方向に相当) の地震観測記録を観測位置の基盤面に引き戻した波形 (図-5 参照) を用いた。

2.3 解析結果

図-6~8 に覆工内空の相対変位の時刻歴波形と、それが最大値を示した時の変位図を示す。これらの相対変位はほぼ同じ時刻に最大値を示している。また、図-6 に示すようにトンネルは地震時に全体としてせん断変形を受けるが、図-7,8 に示すように次第に残留変位が蓄積し、最終的に覆工は左右壁間水平方向に 4.6 mm 程度、上下壁間鉛直方向に 5.3 mm 程度内空が縮

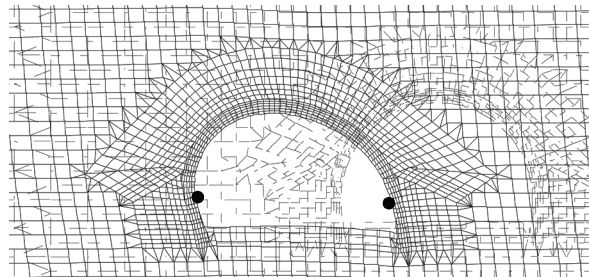
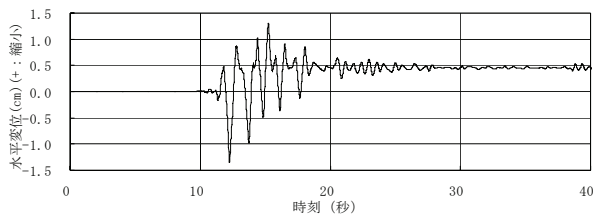


図-7 覆工右側～左側の水平相対変位の時刻歴波形と最大時(12.25秒)の変位図

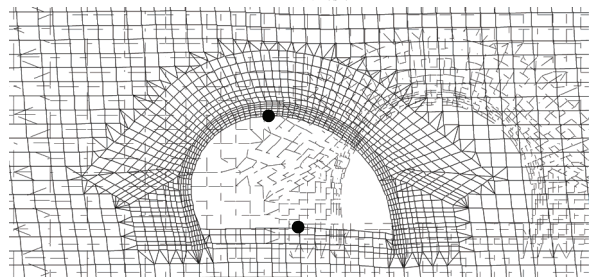
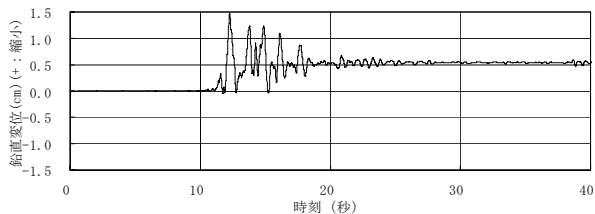
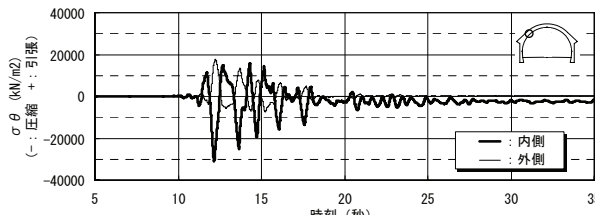


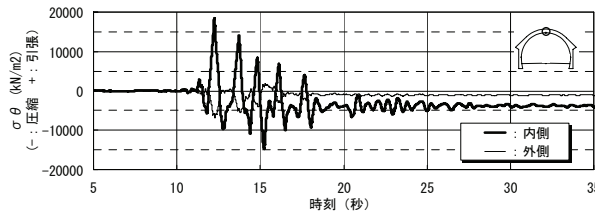
図-8 覆工天端～底部の鉛直相対変位の時刻歴波形と最大時(12.28秒)の変位図

小していることが分かる。この覆工の残留変形は、掘削に伴うせん断剛性低下を受けている周辺地山に、地震時の繰り返しせん断による残留ひずみが生じたために発生したものである。

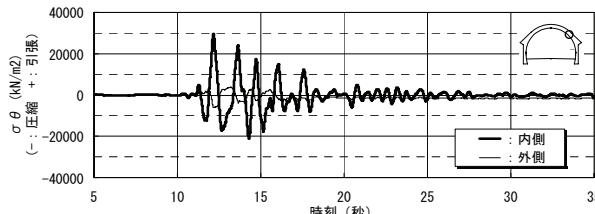
図-9 に覆工の内側と外側に発生する円環方向の応力の時刻歴波形を示す。図-9 に示すように、地震時の覆工の肩部、天端部に発生する円環方向の応力はともに内側と外側で正負が逆となる傾向が見られ、覆工に曲げ変形が生じていることが分かる。応力の最大値は、圧縮、引張ともに肩部で発生しているが、天端部においても覆工コンクリートの圧縮強度の 18 N/mm^2 に迫る 15 N/mm^2 程度の圧縮応力が発生していることが分かる。また、天端部には地震動により発生した周辺地山の残留ひずみが蓄積したことによるものと思われる圧縮応力が残留していることが分かる。



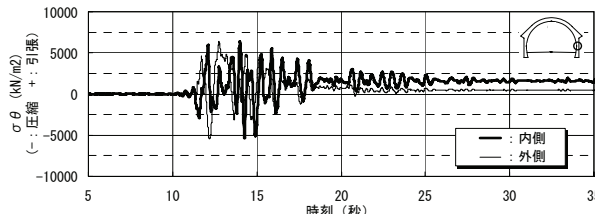
(a) 左肩部



(b) 天端部



(c) 右肩部



(d) 右側部

図-9 覆工に生じる円環方向応力の時刻歴波形

2.4 解析の結論

以上の解析により、和南津トンネルは地震動により全体としてせん断変形を受け、覆工の肩部だけではなく、天端にも大きな曲げが発生することが確認された。また、非線形性を持つ周辺地山に、地震時に繰り返しせん断が作用すると、覆工内空を縮小する方向の残留変位が次第に蓄積され、これにより覆工アーチ部に残留応力として軸圧縮力が発生することが解析により示された。これらの現象は、応答震度法による静的弾性解析では見られなかったものであり、地山の非線形性を考慮した動的解析により発生したものと考えられる。また、本解析では覆工の初期応力を考慮しなかったが、今後、地震動が作用する前の覆工に発生していた応力状態を加味することで、和南津トンネルの主な被害要因のひとつと考えられる天端の全圧縮によるせん断破壊が再現できる可能性があると考えられる。

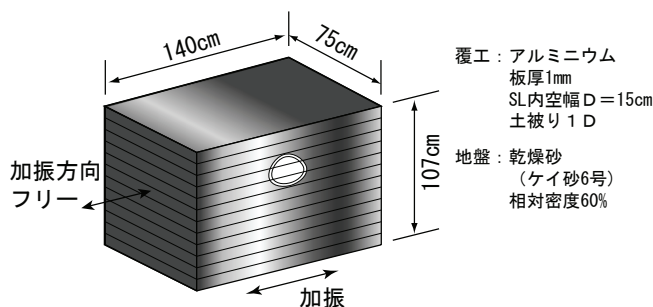


図-10 振動実験の供試体概要

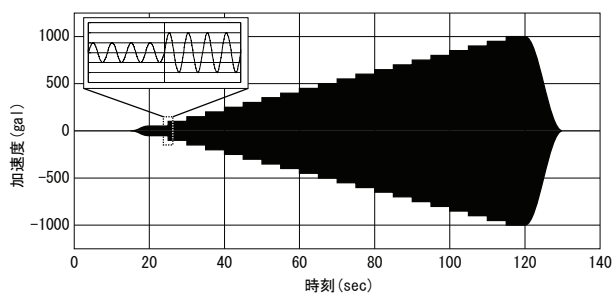


図-11 入力波形

3. 模型振動実験による地震時挙動の検討

ここでは、軟質地山に構築された土被りの小さい山岳トンネルを模擬した模型を用い、振動実験を行った。

3.1 実験の概要

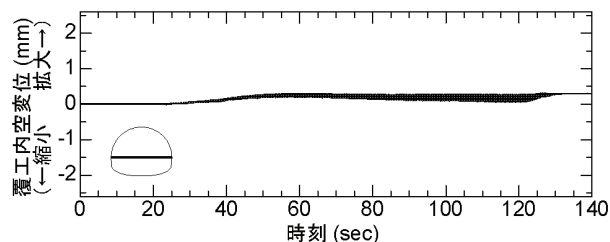
実験は、加振方向の変位を拘束しないせん断土槽中に、図-10 に示す山岳トンネルを模擬した供試体を作製し、下面から正弦波を入力することにより行った。

地盤は、軟質地山として乾燥砂（ケイ砂6号）を用い、相対密度60%で作製した。トンネル覆工はSLでの内空幅 D が15cmでインバートを有する構造とし、1mm厚のアルミニウム板で模擬した。土被りは1 D とした。なお、支保工については地盤模型の剛性に含まれているものと見なし、ロックボルト等の支保工は設置していない。

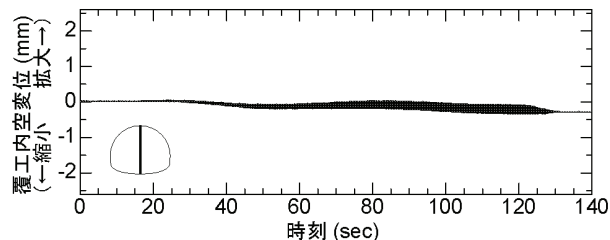
入力振動は、事前に行ったスイープ加振で得られた模型の固有振動数である14Hz（弱振時：50gal）と4Hz（強振時：500gal）の正弦波の2パターンとした。実験では、振動数は固定し、図-11 に示すように50galから1000galまで5秒ごとに50galずつ加速度を増加させた。

3.2 実験結果

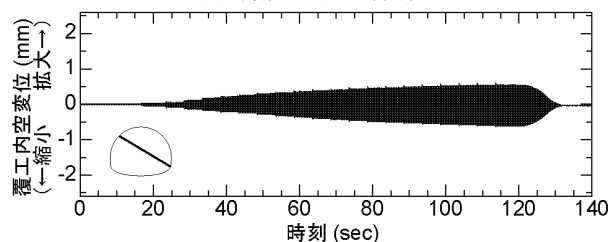
図-12 は、弱振時の固有周期である14Hzで加振した場合の内空変位の応答時刻歴である。加振によりトンネルはせん断変形を生じ、斜め方向の伸縮が卓越した。入力加速度の増加にともない、ほぼ比例して内空



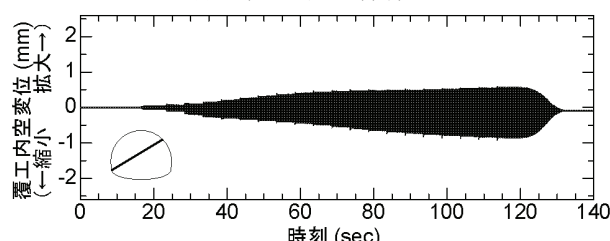
(a) 水平方向の伸縮



(b) 鉛直方向の伸縮



(c) 斜め方向の伸縮 1



(d) 斜め方向の伸縮 2

図-12 14 Hz 加振時の覆工内空変位の時刻歴応答

変位の振幅も増加した。

図-13 は、強振時の固有周期である4Hzで加振した場合の内空変位の応答時刻歴である。4Hz加振においては、14Hz加振と同様に斜め方向の伸縮が卓越しているものの、約60秒（入力振動の加速度400~450gal）以降では変位が急激に増加するとともに、トンネルが鉛直方向、水平方向ともに大きく伸縮する変形モードも観測された。

図-14 は、4Hz加振時において、トンネル天端の圧縮ひずみが最大となった102.53秒におけるトンネル覆工のひずみ分布を示したものである。この図から、曲げに起因するものではあるが、天端部にも大きな圧縮ひずみが発生していることが分かる。しかし、肩部では天端部を上回るひずみが発生しており、本実験では斜め方向の伸縮が卓越し、それにもなつて肩部にひずみが集中していることがうかがえる。

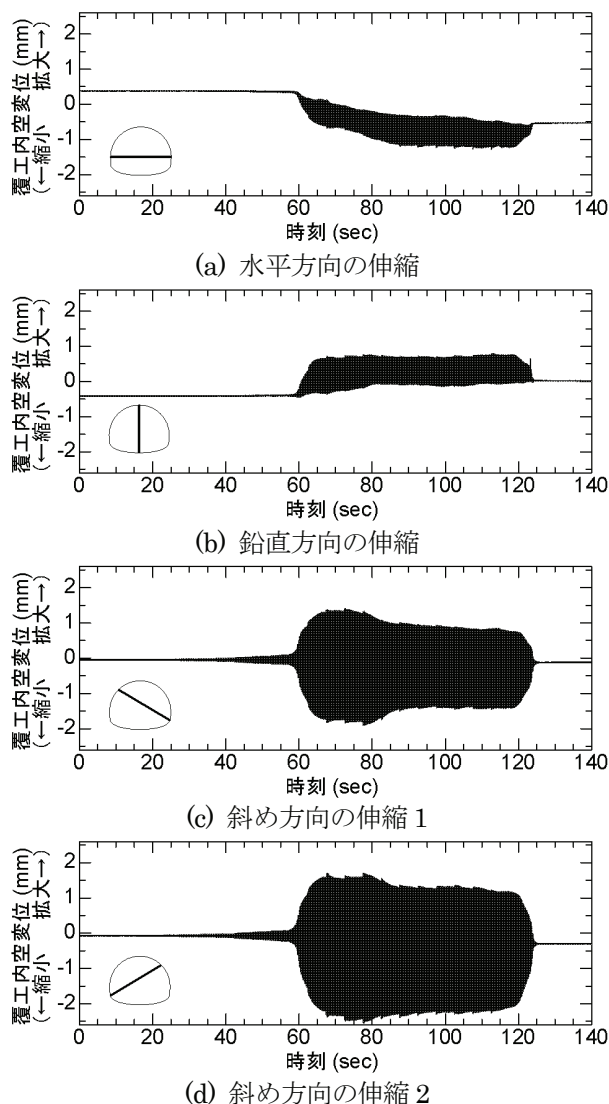


図-13 4 Hz 加振時の覆工内空変位の時刻歴応答

なお、模型製作時に発生した乾燥砂の自重に起因する覆工上半の初期ひずみは高々60 μ 程度（図-14は初期ひずみを除去した値）であり、地盤作製時に覆工に発生している初期応力を加味しても全圧縮による大きな応力を再現できるとは考えにくい。

3.3 実験の結論

これらの結果から、模型実験において、強振時固有振動数と大きく異なる振動数の振動が作用した場合は、1000 gal 程度の加速度が作用してもトンネルに大きな変形は生じないことが分かった。一方、強振時固有振動数に近い振動数の振動が作用した場合は、トンネルの変位が急激に増加するとともに、トンネルのせん断変形にともなう斜め方向の伸縮に加えて、鉛直方向と水平方向の伸縮も発生することが分かった。

また、軟質地山中のトンネルに強振時固有振動数に近い強い振動が作用すると、全圧縮とはならないもの

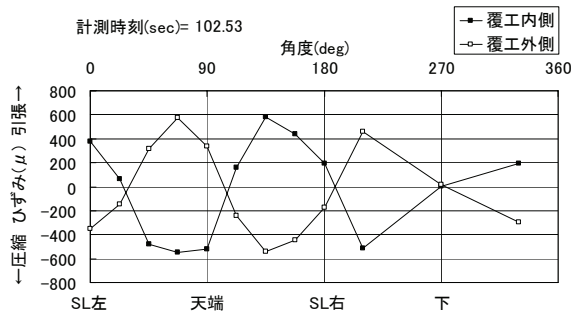


図-14 天端内側圧縮ひずみ最大時のひずみ分布

の曲げに起因する大きな圧縮ひずみ为天端部に発生する可能性があることが示唆された。ただし、肩部では天端部を上回るひずみが発生しており、この現象は坑口部などでみられるTYPE-Iの被害形態に近いものと思われる。

4. まとめ

本年度は、軟質地山中のトンネルを対象として、天端部における圧さあるいはせん断破壊によるはく落・崩落の発生を再現することを目的として、動的数値解析と模型振動実験を実施した。その結果、軟質地山中に構築されたトンネルに強い地震動が作用した場合は、トンネルのせん断変形に加え、水平方向と鉛直方向に伸縮する変位が発生し、天端部では曲げに起因する大きな圧縮ひずみが発生するとともに、水平方向の内空が縮小する残留変位が発生することが明らかとなった。これらは昨年度実施した応答震度法による静的弾性解析では見られなかった現象であり、このような挙動は地盤の非線形性を考慮した動的解析や動的実験により得られたものと考えられる。しかし、天端部で全圧縮によるせん断破壊を生じるような被害形態の再現には至らなかったため、今後、数値解析モデルや模型実験において、地震動が作用する以前の土圧の作用による覆工の初期応力を考慮する等の改良が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：地盤の地震時応答特性の数値解析法、土木研究所資料、第1778号、1982年。
- 2) Jennings, P. C.: Periodic Response of a General Yielding Structure; Cohesive Soils, Proc. ASCE, EM2, pp131-163, 1964.
- 3) 龍岡文夫, 福島伸二: 砂のランダム繰り返し入力に対する応力~歪間歇のモデル化について(1), 精算研究, 30巻, 第9号, pp. 356-359, 1978年。

RESEARCH ON EARTHQUAKE-PROOF TECHNOLOGY FOR MOUNTAIN TUNNEL

Abstract: Mountain tunnel have been considered as strong structure against earthquake. However, a few tunnels were damaged with collapse of lining in recent earthquake and the mechanism has not been clarified. In order to minimize those damages, condition to need countermeasure and effective countermeasure should be established by clarifying the collapse mechanism. This year, dynamic analysis with non-linear ground material and oscillation experiment with reduced-size model are examined to investigate behavior of tunnel in soft ground because it is difficult to reproduce the seismic damage with elastostatic analysis method.

Keywords: mountain tunnel, seismic damage, dynamic analysis, oscillation experiment