トンネル覆エの大変形破壊挙動に関する 実験的考察

森田 倫先1·砂金 伸治2·西村 和夫3

¹正会員 中日本高速道路株式会社 東京支社 秦野工事事務所 (元首都大学東京) (〒257-0017 神奈川県秦野市立野台 1-4) E-mail: t.morita.ac@c-nexco.co.jp

²正会員 東京都立大学 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) E-mail: nisago@tmu.ac.jp

³正会員 東京都立大学(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) E-mail: knishi@tmu.ac.jp

山岳トンネルに大規模な地震の発生や膨張性地山に位置することなどにより大きな外力が作用し、トン ネルが大変形・破壊した事例が散見されているが、構造の挙動が非線形性を生じた後、破壊に至るまでの メカニズムは明らかになっていない部分がある.本研究では地山の単純せん断変形に伴う大変形をトンネ ル自体が受けた場合に関して、破壊に至るまで、または破壊後の挙動に与える種々の影響を簡便に把握す ることを可能とするために、簡易に模型実験が可能となる模型材料および載荷方法を開発した.また、開 発した手法を用いてトンネル覆工に大きな外力が作用したと想定した場合の実験を実施し、トンネルが大 変形を生じた際の破壊時の挙動を検討した.その結果、ひび割れの発生や崩壊に至るまでの過程を確認で き、覆工が大変形・破壊したメカニズムを簡便に把握できる可能性があることがわかった.

Key Words: tunnel, model experiment, shear deformation, load-bearing capacity

1. 序論

大規模な地震の発生や膨張性地山に位置することなど により当初の想定を超えた大きな外力が作用し、トンネ ルが大変形を生じたり、破壊に至る事例がある. 例えば 2016年に発生した熊本地震では、覆工コンクリートの 崩落や支保工の破断などの被害が報告された 1).また, 過去においては供用中に盤ぶくれが発生した事例や,施 工中にトンネルが著しい変形が発生し、 盤ぶくれや支保 工の破断といった大きな被害が発生している事例もある 2)~4). これらの事例においては種々の研究が行われ, 地震の発生に伴う外力の作用や、膨張性地山に位置する ことなどが原因のひとつとされ、トンネル構造の耐力や 力学的挙動に関して実験的にも解析的にも研究が行われ ている.しかしながら、特に大変形が生じ、それ以降か ら破壊に至るまでの挙動に関して一定の精度で再現性を 有する形での検証を行うことには限界があると考えられ る. その理由の一つとして、数値解析のモデル化や構成 則による制約,また,模型実験においては実験装置や用 いる材料等が限られていることなどが挙げられる.現在, 数値解析では有限要素法などの線形解析や非線形解析, 大変形を扱う場合には有限差分法が主流となっているも のの,例えばトンネルに関しては,覆工等にひび割れが 発生した後の大変形に伴う破壊挙動を再現することがで きる非線形解析を実務上で行われることは多くはない. また,模型実験においては、モルタルやコンクリート製 の模型を用いることが多いと考えられるが、それらの材 料に大変形を生じさせるためには適切な方法で、相応の 外力を安定的に、再現よく作用させる必要があり、実験 自体の手法や装置の載荷力といった様々な制約のため困 難であることが多い.

本研究では、トンネルの大変形時の破壊挙動に関する 検討を行うために、地山の単純せん断変形に伴う場合を 念頭におき、実験室レベルで簡易に模型実験ができる模 型材料および載荷方法を開発した.また、その手法を用 いてトンネル覆工を模擬した模型に過大な外力を作用さ せた場合の実験を実施し、トンネルが大変形を生じた際 の破壊時の挙動の把握を試みたとともに、これまでに得 られている知見との定性的な比較を行った.

2. 実験概要

(1) 実験装置

実験では図-1 に示す実験装置を使用した、本装置は 長方形に固定された反力フレームと、反力フレーム側板 上部の左右2ヶ所に取り付けられた載荷棒, さらに載荷 棒で押すことで長方形から平行四辺形に変形する土槽か ら構成されている.載荷棒による土槽の変位が、模擬地 山を通してトンネル模型に単純せん断変形を与えること が可能であり、特に動力等は使用しない構造となってい る. 模擬地山を設置する土槽の寸法は幅 500mm×高さ 560mm×奥行き 100mm である. 覆工模型は図-2 に示す ように土槽側板から 2D (D:トンネル径),また,土槽底 板から模型天端までは形状によって模型高さが異なるた め、天端を基準として 3D となる位置に設置することを 基本として実験を行った.載荷棒は反力フレーム側板の 土槽底面から高さ 455mm の位置に取り付けられており、 ねじ式で1回転あたり1mm ずつ土槽側板を強制変位さ せることができる.これは、地山のせん断ひずみの約 0.2%に相当する値となっている、載荷は載荷棒で模擬 地山及び覆工模型に強制変位を与えて実験を行う.変位 は最大で 65mm(地山のせん断ひずみとして約 14.4%相 当)まで与えることができる.載荷は装置の構造から変 位制御に相当すると考えられる.

(2)実験材料

a) 模擬地山

模擬地山の材料としてアルミ棒積層体を用いて未固結 粒状体の地山モデルと仮定した.アルミ棒積層体の特徴 として,それ自体の材料で自立するため,装置の前後面 を壁体で支える必要がなく,試料と前後の壁面間の摩擦 が皆無であること,アルミ棒の比重や内部摩擦角が一般 の砂に近い結果となっていること,扱いやすく,繰り返 し使用しても物性変化がほとんどないと考えられるため 再現性が高いことなどが挙げられる.**表-1** に模擬地山 の諸元を示す.

アルミ棒の寸法および重量混合比については、アルミ 棒を地山材料とする既往の研究 ⁹を参考にし、直径 1.6mm と 3.0mm のものを重量混合比で 3:2 の割合とな るよう混合した.単一粒径のアルミ棒による地山では、 地山内に粒子が規則配列となる大きな領域がいくつかで き、この領域境が弱線となり節理系岩盤のような滑りを 生じる.この規則列の滑りが全体の挙動を支配し、未固 結粒状体地山の挙動にならないため、弱線となる規則配 列の境界の除去するために 2種類の径を混合し、不規則 配列の地山となるようにした.

b) 覆工模型

実験装置の載荷力の制約から、覆工模型は低強度な材





図-2 実験装置概要

表-1 模擬地山の諸元

材質	アルミ合金
長さ	100 mm
直径	$\Phi_1 = 1.6 \text{ mm} : \Phi_2 = 3.0 \text{mm}$
重量比	$\Phi_1:\Phi_2=3:2$
単位体積重量	21.4 kN/m ³
粘着力	0 N/mm ²
内部摩擦角	30°

表-2 塗壁材の成分および模型材料物性

成分	木粉	51%
	じゅらく土	28%
	繊維質材料	8%
	セルロース系接着剤	7%
	粉末顔料その他	6%
模型 材料	圧縮強度	0.4MPa
	引張強度	0.06MPa
	弾性係数	42MPa

料で作製する必要があったため、モルタルやコンクリー トに代わる新たな材料として木粉や土、接着剤などを含 有する塗壁材に、豊浦砂と水を質量比1:8:4で混合し たものを使用した.使用した塗壁材の成分および模型材 料の物性値を表-2に示す.物性に関しては、練り混ぜ 等の状況によって特性にばらつきを生じやすいと考えら れたため,試験回数を複数回確保することとし,一軸圧 縮試験および割裂引張試験によりそれぞれの値を算定し た.その結果,本材料は非常に低強度であるため,載荷 力が小さな実験装置でも破壊挙動を確認することが可能 となっている.

c) 実験ケース

覆工はトンネル断面を閉合し、真円に近づけるほど軸 力が卓越し、発生する曲げモーメントは小さくなるため 耐力は向上すると一般的な知見が既に得られている.馬 蹄形でトンネルの安定が保たれることが多いが、トンネ ルに大きな荷重が作用する考えられる場合にはインバー トが採用されるほか、膨張性地山等など地山が著しく悪 い場合にはインバートの曲率半径を小さくし、より真円 に近づけるか真円にするといった対策が行われている.

そこで、本研究では覆工とインバートといったトンネ ル構造全体の破壊を追跡することに念頭を置き、インバ ートの構造半径比を小さくすることや、インバート増厚 によりトンネルの耐力を上げた場合、大変形時の挙動に どのような影響を与えるのかを確認するため、インバー トの構造半径比とインバート厚をパラメータに実験ケー スを設定した.実験ケースを図-3に示す.

ケース1は基本ケースとして、一般的な2車線道路トンネル相当の約1/100のスケールで、インバート部の構造半径比(インバート部 R/上半アーチ部 R)を30Rとしたものである。そこからインバートの構造半径比を小さくし、ケース3は2.0Rに、ケース5は1.5Rとした。ケース6はインバートの曲率半径を上半アーチと同じにまで小さくした外径100mmの真円である。

ケース2およびケース4はケース1とケース3に対し て、構造半径比を変えないままインバートを増厚したケ ースで、インバート部を5mmから8mmに増厚したもの である.

模型の奥行きは模擬地山であるアルミ棒の長さ 100mm に合わせて各ケースとも 100mm とした.また, インバートと側壁部の打継ぎ目のない模型とした.

(4) 実験手順

図-4 に実験フローを示す. 模型材料はモルタル系材 料と異なり,水を揮散させて硬化する材料であるため, 炉乾燥させ模型を作製した.また,模型の設置に当たっ てはアルミ棒を土槽全体に積み上げる際に,過大な荷重 が作用し,模型が変形・崩壊するのを防ぐために,模型 作製時に使用した型枠を模型内側に入れた状態でアルミ 棒を積み上げ,載荷開始直前に脱型することとした.載 荷は反力フレーム右側板に取り付けた載荷棒で行い,土 槽側板を 30秒間隔で 1mm ずつの強制変位を与えた.上 述したように本装置では最大で 65mm(地山のせん断ひず み約 14.4%)の変位を与えるまで行い,模型が崩壊した



図-3 実験ケース







図-5 断面変形量の計測項目

場合,それ以上の変位は与えなかった.

(5) 計測項目

ひずみゲージは模型外側に 45°間隔で各 1 点貼り付 け、模型に生じるひずみの計測を行った.また、画像解 析ソフトによりアルミ棒に取り付けたマーカーを追尾し、 模型の断面変形量を計測した.マーカーは模型断面に 45°間隔で設置した.断面変形量の計測結果は画像解析 用マーカーの 2 点間距離の増加率で比較した.本研究に おける各計測項目の定義を図-5 に示す.また、目視に より模型のひび割れ等の変状を観察した.内側のひび割 れは実験中の観察によって行ったが、外側のひび割れは、 供試体の両端部を観察して位置を特定し、発生時の変形 量を記録し、破壊後の供試体の状況から進展方向を類推 する方法とした.

3. 実験結果

(1) ひび割れおよび崩壊挙動

図-6 に模型のひび割れ観察結果を示す.上半アーチ は地山のせん断変形に追従し、いずれのケースも 45 度 方向付近に曲げひび割れが発生した.下半部のひび割れ は、ケース 1~3 とケース 4~6 で異なる傾向が見られた. ケース 1~ケース 3 はインバート部の隆起が発生し、イ ンバート中央部にひび割れが発生した.ケース 4~ケー ス6はインバート部の隆起は発生せず、地山のせん断変 形に追従し変形したため、45 度方向に曲げひび割れが 発生した.インバートの曲率半径を小さくするとともに 増厚を行ったケース4は、インバートの剛性が高くなっ ていると考えられることから、インバート部にひび割れ や変形が発生せず、隅角部にひび割れが発生した.

ひび割れ発生後さらに大きな地山のせん断ひずみを与 えると、すべてのケースで模型が崩壊した.崩壊時の状 況を図-7 に示す.インバート部の隆起したケース 1~3 は、インバートが跳ね上げられるように崩壊した.せん 断変形したケース 4~ケース 6 は模型内側から発生した ひび割れが外側にまで貫通後、崩壊した.

図-8 に各ケースの模型にひび割れ・崩壊発生時の地 山のせん断ひずみをまとめたものを示す.

インバートの構造半径比を変えたケース1,3,5および6の比較に関しては、最初のひび割れが発生する時期 に着目すると、インバート部の隆起によりインバート中 央部がひび割れたケース1およびケース3に比べて、隆 起しなかったケース5・ケース6はやや大きな地山のせん断ひずみでひび割れが発生している.また、崩壊時の 地山のせん断ひずみは小さい順に真円であるケース6が 最も大きくなっている.このことから、インバートの構



安温:000周17年1月の地面のと70月0977(初) 実線:模型内側,破線:模型外側のひび割れ 模型外側はひずみの値から推定

図-6 ひび割れ展開図

造半径比を小さくし,真円に近づけるほどトンネルの耐 荷力は向上することが本実験からも確認でき,定性的な 再現性を有すると考えられる.また,ケース1およびケ ース3は、インバート部の隆起が発生したことにより、 トンネルのリング構造が成立しなくなったため、小さな 地山のせん断ひずみで崩壊が発生したと考えられる.ケ ース3はケース1と比較してインバートの構造半径比が 小さく、隆起の発生後、トンネルのリング構造が失われ るまでにより大きな変形が必要だったため、より大きな 地山のせん断ひずみまで崩壊しなかったと考えられる. さらに、ケース5およびケース6は地山のせん断変形に 追従し、楕円形に大きく変形したものの、軸力が伝達さ れていたと考えられるため、崩壊に至るまでにより大き な地山のせん断ひずみを要したと考えられる.

続いてインバートの増厚を行ったケース2およびケー ス4と、増厚をしていないケース1およびケース3の比 較に関しては、いずれもインバートの増厚により大きな 地山のせん断ひずみまで変状が発生しなかったことが分 かる. このことは、インバートを増厚し、剛性が向上す ることで模型全体の剛性が向上し、ひび割れや崩壊の発 生が抑制されたと考えられる、ただし、ケース4はケー ス2に比べて崩壊時の地山のせん断ひずみが小さくなっ ている.このことから、インバートの構造半径比を小さ くするとともに増厚し、インバートの剛性のみが局所的 に上がった場合、上半アーチや隅角部など他の箇所が相 対的に弱部となり、トンネルの耐力の向上につながらな い可能性がある. そのため、インバートの剛性を上げる 場合、トンネル構造全体の剛性を上げることを検討する 必要があることが本実験結果からも再現できることが分 かる.

(2) 断面変形量

断面変形量の計測結果は画像解析用マーカーの2点間 距離の増加率で比較した.

図-9 に地山のせん断ひずみと図-5 に示した定義に基 づく 1-5 間距離増加率の関係を示す.本指標は実務にお ける天端沈下と路盤の隆起量に関連する指標であると考 えられる.図より、いずれのケースも地山のせん断ひず みが大きくなるにしたがって 1-5 間距離は同等もしくは 減少している. インバート部の隆起が発生したケース 1 ~3 と発生しなかったケース 4~6 で異なる傾向を示し ている.ケース 1~3 は隆起が発生したため、1-5 間距離 は大きく減少している. インバート比を小さくした4ケ ースでは、真円に近づけるほど減少率は小さい. また、 増厚をしたケース 3~4 は、それぞれケース 1 およびケ ース3に比べて減少は抑制されており、増厚により変形 が抑制される効果が見て取れる. ケース 4~6 は盤ぶく れが発生しなかったため、マーカーの上下方向の変化は 小さい. ケース 4 はΔ/H=9.0%付近から急に減少してい るが、インバートの変形は確認されなかったため、上半 アーチの変形が急に大きくなったことによるものである.

図-10 に地山のせん断ひずみと 3-7 間距離増加率の関係を示す.本指標は実務における内空変位に関連する指標であると考えられる.地山のせん断ひずみが大きくなるにしたがって,ケース 1~4 では 3-7 間の距離は増加している.ケース5とケース6は多少の増減はあるものの,ほぼ変化せず一定の距離を保っていた.



隆起が発生したケースの水平方向の2点間距離はいず れも増加していることから,鉛直方向からの荷重が大き く,上下から押しつぶされるような変形をしていた.

図-11 に 1-3 間距離増加率を、図-12 に 1-7 間距離増加 率を示す.本指標は実務における斜測線の変形計測結果 に関連する指標であると考えられる.1-3 間距離増加率 は、上半アーチの変形が大きかったケース 4 のみ Δ /H=6.0%付近から他のケースに比べてやや増加している が、その他の 5 ケースはおおむね同じ傾向が見られた. また、上半アーチから崩壊した 3 ケースはいずれも増加 率 10%程度で崩壊している.1-7 間距離増加率について も、ケース 4 のみ他のケースとやや異なる傾向を示し ているが、他の 5 ケースはおおむね同じ程度の減少量 であることがわかる.これらのことから、上半アーチ はいずれのケースも変形モードに大きな違いは見られ なかった.

4. 結論

本研究では、地山の単純せん断変形に伴うトンネル の大変形時の破壊挙動に関する検討を行うために、実 験室レベルで簡易に模型実験ができる模型材料および 載荷方法を開発し、トンネルが大変形を生じた際の破 壊時に至る挙動の把握を試みた.その結果、以下の結 論が得られた.

1) 模型材料として塗壁材,豊浦砂,水を主体とし た新たな材料を使用し模型実験を行ったところ,ひび 割れや崩壊といった変状のメカニズムを簡便に再現し, 確認することができた.このことから,新材料は実験 室レベルで行う模型実験に用いる覆工材料として適用 可能であると考えられる.

2) 実験結果より、インバートの曲率半径を小さく することや増厚をすることで、ひび割れや崩壊の発生 に要する地山のせん断ひずみが大きくなることが再現 できた.このことから、地震や膨張性地山による外力 が想定される場合に、インバートの曲率半径を小さく することや増厚を行うことでトンネル全体の耐荷力が 向上し、被害を軽減することができると考えられ、こ れまでに得られている定性的な知見と合致していると 考えられる.

3) 実験結果より、トンネルの耐荷力を向上させる 方策として、インバートの剛性を上げる場合、上半ア ーチや隅角部など、他の箇所がインバートに比べて相 対的に弱部とならないよう、トンネル構造全体の剛性 を上げることを検討する必要がある.また、その際に 盤ぶくれが発生する変形モードから、地山のせん断変 形に追従し、45 度方向にひび割れが発生する変形モー ドへと変わるなど、大変形時に変形のモードが変わる ことを考慮することが望ましいといった知見が得られ た.

以上より,模型実験では,これまでの実績等によっ て得られているトンネルが破壊した結果とも定性的に 一致していると考えられ,本研究の実験手法を用いる ことによりトンネルの破壊メカニズムを簡便に把握す ることが可能であると考えられる.



一方で、与える荷重のレベルが例えば地震時の検討で 想定されている値よりは大きいと考えられるせん断ひず みを模擬地山に与えているなど、検証すべき課題がある と考えられる.これらの改善または実験時の特性の把握 を行っていくとともに、構造の挙動が非線形性を示した 後や、破壊直前に至るまでの力学的なメカニズム、また は破壊に伴って得られると考えられる耐荷力を算定する 手法や定性的に留意すべき観点について、種々の影響を 考慮した検討も行う必要がある.

参考文献

- 国立研究開発法人土木研究所 道路技術研究グルー プトンネルチーム:土木研究所資料 山岳トンネル の地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書, 2017.3
- 2) 下村哲雄,北岡治,天野淨行,高橋孝二:トンネル インバート設置区間の供用後における盤膨れと地質, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.413-414,

2014.9

- 3) 荒川大輔,楡井賢司,今野秀一:蛇紋岩地質の強大 な地圧による変状について 一般国道 40 号音威子 府村音中トンネル,第 59 回(平成 27 年度)北海道 開発技術研究発表会,2015.
- 4) 小林暁,松久浩,佐々木博一,堀田靖文,掛田浩司, 大塚智久,竹花大介:蛇紋岩地質の強大な地圧によ る変状について 一般国道 40 号音威子府村音中ト ンネル,北海道土木技術会トンネル研究委員会,ト ンネル技術研究会論文集,pp.25-34, 2015.2
- 5) 村山朔郎:砂層内局部沈下部のかかる垂直土圧,京 大防災研究所年報,第11号, pp.123-138, 1968.

(2020.8.7 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON LARGE DEFORMATION AND FRACTURE BEHAVIOR OF TUNNEL LINING

Tomohiro MORITA, Nobuharu ISAGO and Kazuo NISHIMURA

Some cases of tunnel with large deformation and collapse were found because huge external force has acted on the structure by the occurrence of a large earthquake or being located in swelling or squeezing ground. However, the mechanism to the collapse after the structure shows non-linear behavior was unclear. A model material and simple loading method that can reproduce model experiments were developed for the purpose of making it possible to easily understand the behavior of tunnel before and after the collapse due to large deformation. The test to examine the collapse mechanism in large deformation was done and the results showed that the process of crack development and the mechanism of large deformation of structure could be easily grasped and qualitative tendency was in accordance with the past results and experiences.