異高型複断面トンネルの横断方向地震時挙動に関する実験的検討

津野 究¹・鎌田 和孝²・佐名川 太亮³・小西 真治⁴
大塚 努⁵・今村 俊毅⁶・前川 宏一⁷

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: tsuno.kiwamu.00@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: kamada.kazutaka.17@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: sanagawa.taisuke.39@rtri.or.jp

⁴正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)
E-mail: s.konishi.r4r@tokyometro.jp

⁵正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)
E-mail: tsu.ootsuka@tokyometro.jp

⁶正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)
E-mail: k.sasaki.k4y@tokyometro.jp

⁷フェロー会員 東京大学 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)
E-mail: maekawa@concrete.t.u-tokyo.ac.jp

地下鉄の異高型複断面区間の耐震性については、横断方向の耐震性の検討方法が示されていないことから、模型実験により地震時の地盤変位に伴う挙動について検討した。まず、単線断面と異高型複断面の模型トンネルをせん断土槽に設置し、所定の位置まで模型地盤を作製した。ここで初期状態の断面力を把握し、一般的な開削トンネルの設計で得られる断面力分布の傾向と概ね一致していることを把握した。つぎに、せん断土槽を変形させることにより、模型を含む地盤に強制変位を作用させた。その結果、異高型複断面では中壁に大きな曲げモーメントとせん断力が発生するとともに、载荷方向によって変形モードが異なることを、ひずみ分布とも参照の上で把握した。

Key Words : model test, subway, multi-section tunnel, seismic performance, ground displacement

1. はじめに

地下鉄の駅間に位置する開削工法で施工された箱型トンネルの多くは1層2径間の構造であるが、上下2層構造の駅部との取付け部、トンネルの分岐箇所、留置線を設置する場合などにおいては、図-1に示すような上下線の上床版や下床版の高さが異なる異高型複断面の区間が存在する。鉄道構造物の耐震設計に関する標準¹⁾では、通常の箱型トンネルを対象とした動的解析法や応答変位法などが示されており、実務ではこれらの方法で横断方向の耐震性の検討が行われている。一方、異高型複断面トンネルについては、高速道路の類似構造物において一部検

討が行われている²⁾ことを除き、具体的に横断方向の耐震性を検討する方法が確立されていないのが現状である。地下鉄で供用している本構造形式のトンネルの横断方向の耐震性を検討するうえで、地震時の地盤変位に伴うトンネルの変形挙動と断面力を把握することが重要となる。

これに対して、数値解析により異高型複断面トンネルの地震時の挙動が検討された例^{3, 4)}があり、通常の箱型トンネルと異なる変形特性を示すことが確認されている。しかし、解析手法の妥当性を検証できる実験データが無いという課題がある。

トンネルの地震時の挙動をモニタリング等により把握することは困難であるが、模型実験により検討した事例

図-1 異高型トンネルの例

図-2 基礎の動静的載荷装置のモデル図

図-3 模型トンネル

がある。例えば、円形の形状が基本であるシールドトンネルについては、模型トンネルを設置した土槽を振動台で加振して縦断方向の挙動を検討した例^{5~7)}、横断方向の挙動を検討した例^{8~10)}、模型地盤をせん断変形させる静的載荷実験により横断方向の挙動を検討した例¹¹⁾などがある。また、馬蹄形状の山岳トンネルや分割式アーチトンネルを対象にした検討例^{12~14)}がある。これらのトンネルの地震時挙動を対象とした模型実験により、トンネルの地震時の動的挙動や地盤変位に伴う挙動が定性的に

把握されており、模型実験は有効な手段の一つであると考えられる。一方、箱型トンネルを対象としたものとして、沈埋トンネルの縦断方向挙動を検討した事例^{15, 16)}はあるが、横断方向の地盤変位に伴う挙動を検討した事例^{17, 18)}は限られており、これらは一般的な通常の箱型トンネルを対象としたものである。このように、異高型複断面トンネルのような複雑な形状のトンネルを対象に模型実験を実施した例は、著者らの知る限り見当たらない。

以上を踏まえて、本研究では、単線断面の箱型トンネルと異高型複断面トンネルを対象に、地震時の地盤変位の作用を模擬した静的載荷実験を行い、地盤変位に伴う横断方向の挙動を把握することを試みた。まず、模型トンネル設置後から模型地盤作成後までに発生した初期状態の曲げモーメント、及びせん断力について分布傾向を把握した。つぎに、せん断土槽を変形させることにより地盤変位を作用させ、模型トンネルに発生する曲げモーメントおよびせん断力分布を把握した。さらにひずみの積分値からたわみ量を逆計算し、模型トンネルに現れる特異な変形モードを把握した。

2. 実験概要

(1) 載荷装置および土槽

本実験は、鉄道総研が所有する「基礎の動静的載荷装置」¹⁹⁾を用いて地盤変位を模擬した静的載荷実験を行った。図-2に、本装置の概要図を示す。本装置は、No.1~6の6つの油圧ジャッキを搭載しており、独立して制御することが可能である。また、土槽は12段のせん断フレームから構成されたせん断土槽となっており、各フレームがリニアガイドにより独立に稼働するため、No.4~6のジャッキを操作することにより、地盤にせん断変形を生じさせることが可能となっている。土槽の内寸は、高さ2 950mm、幅2 000mm、奥行き2 000mmである。なお、No.1~3のジャッキは、杭頭部に任意の鉛直力、水平力、回転モーメントを作用させるものであるが、本実験では用いていない。

(2) 模型トンネル

図-3に示すような1層1径間の単線断面および異高型複断面の2種類の亚克力製の模型トンネルを作製した。異高型複断面については、2層1径間と1層2径間の中間の断面を選定した。亚克力の弾性係数値は3 443MN/m²である。模型トンネルの断面の縮尺は、実際の地下鉄トンネルの概ね1/12に対応している。実際のトンネルでは、部位によって部材厚さが異なることもあるが、本研究では条件を単純にするために、部材厚さを全ての部材で20mmとした。また、隅角部は溶剤で接着固定しており、

図-4 模型トンネルの外観 (Case2)

図-6 荷重ステップ

(a) 単線断面

(b) 異高型複断面

図-5 模型地盤およびトンネルの配置

ハンチを設けていない。模型トンネルの奥行きは、1 900mmである。模型トンネルの外観を図-4に示す。

(3) 模型地盤

図-5に模型地盤および模型トンネルの配置を示す。対象としている異高型複断面トンネルは複数箇所あり、地盤条件はトンネルにより異なり、縦断方向にも変化する

が、基本的な性状を把握することを目的とし、模型地盤については単純な条件を設定した。模型地盤は、東北硅砂6号 ($D_{50}=0.34\text{mm}$, $\gamma_{\text{max}}=16.9\text{kN/m}^3$, $\gamma_{\text{min}}=13.8\text{kN/m}^3$, $G_s=2.66$) を材料とした乾燥砂地盤とし、模型トンネルを土槽に設置後、300mmごとに撒き出しおよび転圧を行うことで、密度管理を行いながら作成した。模型地盤の相対密度は $D_r=70\%$ としている。また、模型トンネル下の空間については十分に砂を充填できないことから、砂を空気圧で吹き付ける装置²⁰⁾を用いて充填し、相対密度 D_r 70%程度を確保した。三軸圧縮試験 (CD試験) を拘束圧20, 40および60kN/m²の条件で行っており、粘着力 C_d は0.0kN/m²、内部摩擦角 ϕ_d は40.4°である。

模型トンネルは、土槽底面から1 400mmの位置に下端がくるように設置した。なお、No.4, No.5およびNo.6ジャッキの中心は、土槽底面から2 800mm, 2 000mmおよび1 200mm上に位置している。

(4) 荷重方法

実験では、せん断土槽を強制変形させることにより、地盤変位の作用を模擬した。ここでは、No.6ジャッキを固定し、No.4およびNo.5ジャッキの荷重変位量を2:1の割合で変位制御で荷重することで、トンネル底面より上方の地盤に一樣なせん断変形を発生させた。荷重方法は、多段階正負交番荷重方式を採用した。ここでは、図-6に示すように、正荷重と負荷重を1サイクルとし、これを繰り返して荷重した。また、荷重段階は、No.4およびNo.5ジャッキの荷重変位量を漸増させ、地盤のせん断ひずみ量を0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%および3.0%と漸増させた。せん断ひずみ量0.5%については5サイクル、それ以外の荷重変位量については3サイクルずつ繰り返して荷重を行っている。

(5) 計測項目

部材に発生する断面力を把握するため、図-5に示す模型トンネル中央の横断面にひずみゲージを取り付けた。ひずみゲージ設置箇所を図-7に示すが、単線断面では20箇所、異高型複断面では45箇所である。1部材当たり5箇所において、模型トンネル部材の内外面にひずみゲージを取り付けており、異高型複断面の中壁については、15箇所において部材の両側に取り付けている。

3. 実験結果

(1) 初期状態

トンネル模型設置後から模型地盤作成後までに発生した初期状態の曲げモーメントを図-8に、せん断力を図-9に示す。ここで、図-8は、各々の計測点において、部材の内外面に貼り付けたひずみゲージより得られたひずみ値より曲げモーメントを算出し、これを直線で結んで作図している。図-9は、隣合う計測点のひずみ値よりせん断力を算出し作図している。なお、部材の名称は、図-10のように定義する。

図-7 ひずみゲージの取付け位置

単線断面について曲げモーメントやせん断力の分布をみると、一般的な開削トンネルの設計で得られる分布形状²⁾と概ね対応していることが確認できる。

異高型複断面についても、上床版および側壁の曲げモーメントは、単線断面と概ね対応している。また、異高型複断面の中壁の曲げモーメントを見ると、中壁上部は左側壁上部と、中壁下部は右側壁下部と、概ね対応している。一方、中壁中央部については、上床版（右側）や下床版（左側）との接続部に相当する上端および下端で、曲げモーメントが大きくなっていることが確認できる。

図-8 曲げモーメント図（初期状態）

図-9 せん断力図（初期状態）

図-10 部材の名称

異高型複断面のせん断力についても、曲げモーメントと同様の傾向が見られるが、中壁中央部では、部材全体に亘って比較的大きなせん断力が確認できる。

(2) せん断変位載荷時

a) 実験状況

せん断変位載荷時のジャッキ変位量を図-11 に示す。これより、No.4 および No.5 ジャッキの載荷変位量が概ね 2:1 となっていることが確認できる。

単線断面については、地盤のせん断ひずみ量 3.0% の 1 サイクル目の正載荷で、右側壁の最下端のひずみゲージの値が計測できなくなり、負載荷時に左側壁最下端の値が計測できなくなった。一方、異高型複断面については、地盤のせん断ひずみ量 2.5% の 1 サイクル目で側壁の最下端のひずみゲージの値が計測できなくなった。

載荷実験後に模型トンネルを取りだしたところ、図-12 に示す位置で図-13 に示すようなひび割れが発生していることを確認した。これらのひび割れは、側壁下端のひずみの値が大きくなった後に計測できなくなった段階で発生したものと推測される。

(a) 単線断面

(b) 異高型複断面

図-11 ジャッキの載荷変位量

b) 曲げモーメント

模型地盤作成後から地盤のせん断変位に伴い発生した曲げモーメントの分布を図-14 に示す。ここでは、各載荷段階の最終サイクル（地盤のせん断ひずみ量 0.5% については 5 サイクル目、その他については 3 サイクル目）の最大載荷変位時の結果を整理している。また、ひずみゲージの計測ができなくなる前の結果を整理しており、単線断面では地盤のせん断ひずみ量 2.5%，異高型複断面では地盤のせん断ひずみ量 2.0% までの結果を示している。

単線断面については、正載荷時では右下隅部に相当する下床版右端および右側壁下端、左上隅部に相当する上床版左端および左側壁上端で負の曲げモーメントが大きくなっている。

一方、負載荷時では、左下隅部に相当する下床版左端および左側壁下端、右上隅部に相当する上床版右端および右側壁上端で負の曲げモーメントが大きくなっている。このように、載荷側の下端隅部と載荷反対側の上端隅部で負の曲げモーメントが大きくなる傾向が確認できた。また、正の曲げモーメントが、側壁のスパン中央付近で大きくなっていることも確認できる。

(a) 単線断面

(b) 異高型複断面

図-12 ひび割れの発生位置

図-13 ひび割れの発生状況（異高型複断面、左側壁下端）

つぎに、異高型複断面についてみると、単線断面と同様に、載荷側の下端隅角部と載荷反対側の上端隅角部で負の曲げモーメントが大きくなる傾向が確認できる。また、中壁の曲げモーメントが大きくなる傾向が確認できる。正載荷では中壁中央部の上端と下端が、負載荷では中壁上部および中壁下部の上端と下端で、曲げモーメントが大きくなっており、載荷方向（正載荷と負載荷）によって異なる傾向となっている。

正載荷と負載荷で中壁の曲げモーメントが大きくなる部位が異なっている理由として、負載荷については、中

壁下部の下端と中壁上部の上端が、負の曲げモーメントが大きくなる載荷側の下端隅角部および載荷反対側の状態隅角部に位置することから、曲げモーメントが大きくなったものと考えられる。

c) セン断力

模型地盤作成後から地盤のせん断変位に伴い発生したせん断力を図-15に示す。

単線断面については、載荷側の下端隅角部と載荷反対側の上端隅角部でせん断力が大きくなる傾向が確認できた。

図-14 曲げモーメント図（載荷時）

図-15 セン断力図（載荷時）

異高型複断面についても、単線断面と同様に、載荷側の下端隅角部と載荷反対側の上端隅角部でせん断力が大きくなる傾向が確認できる。これに加えて、正載荷では中壁中央部、負載荷では中壁上部および中壁下部でせん断力が大きくなる傾向が確認でき、載荷方向によって異なる傾向が見られる。

d) 変形モード

トンネル模型に設置したひずみゲージより得られたひずみの値から曲率を計算し、これをもとにたわみを求めて、変形図を作成した。単線断面については地盤のせん断ひずみ量2.5%，異高型複断面については地盤のせん断ひずみ量2.0%の結果を図-16に示す。ここでは、変形量を1 000倍にして図示している。これより、トンネル模型もせん断変形しており、地盤の変位に追従して挙動している傾向があることが確認できる。

4. まとめ

本研究では、単線断面の箱型トンネルと異高型複断面トンネルを対象に、静的載荷実験により地震時の挙動を検討した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- ・せん断土槽に模型トンネルを設置し、模型地盤にせん断変位を与えることにより、耐震設計で用いられる応答変位法等のプッシュオーバー解析の状態を模擬する実験方法を提案した。
- ・初期状態のモーメント分布およびせん断力分布は、一般的な開削トンネルの設計で得られる傾向と概ね一致していることが確認できた。
- ・地盤のせん断変位に伴い、載荷側の下端隅角部と載荷反対側の上端隅角部で負の曲げモーメントが大きくなる傾向を把握した。また、異高型複断面では、中壁の曲げモーメントが大きくなり、正載荷では中壁中央部の上端と下端が、負載荷では中壁上部および中壁下部の上端と下端で大きくなっており、載荷方向によって異なる傾向が見られることを把握した。
- ・地盤のせん断変位に伴い、載荷側の下端隅角部と載荷反対側の上端隅角部でせん断力が大きくなる傾向を把握した。また、異高型複断面では、正載荷では中壁中央部で、負載荷では中壁上部および中壁下部でせん断力が大きくなり、載荷方向によって異なる傾向が見られることを把握した。
- ・ひずみ値からトンネル模型の変形を計算することにより、トンネル模型が地盤の変位に追従して挙動している傾向があることを確認した。

(a) 単線断面（地盤のせん断ひずみ量2.5%）

(b) 異高型複断面（地盤のせん断ひずみ量2.0%）

図-16 変形図（載荷時）

なお、異高型複断面トンネルの特徴として、横断面の形状が複雑であることに加えて、トンネル縦断方向に形状や地盤条件が変化することが挙げられる。また、異高型複断面トンネルは施工法も複雑であり、土留めなど仮設物の残置や掘削による地盤の乱れの影響があることも想定される。これらの影響については、今後数値解析により検討し、実務に活用していくことを考えているが、本実験の模型地盤作成時（常時）およびせん断変位載荷時のシミュレーションを行い手法の検証を行う必要があると考えている。

また、応答変位法等のプッシュオーバー解析の状態を模擬した実験を行ったが、実際の動的挙動と異なること

も考えられることから、振動台を用いた実験を行い比較したいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，耐震設計，丸善，2012.
- 2) 長田光正，市村強，堀宗朗，並川賢治，土橋浩，山田岳峰，小原隆志，滝本邦彦：分合流部を有する大型道路トンネルの三次元地震応答解析，土木学会論文集A1，Vol.68, No.4, I-855-I-866, 2012.
- 3) 小西真治，辻貴大，尾上豊弘，川上幸一，西垣祐弥，前川宏一：地下鉄箱型トンネルの異高型複断面部の耐震性能，第50回地盤工学研究発表会講演集，pp.1581-1582, 2015.
- 4) 辻貴大，小西真治，西垣祐弥，尾上豊弘，前川宏一，今村俊毅：異高型複断面トンネルの結合位置が耐震性能に与える影響の検討，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，I-189, 2015.
- 5) 和佐勇次郎，吉田幸司，田中努：軟弱地盤中のシールドトンネルの地盤および覆工剛性急変部の耐震設計法，土木学会論文集，No.510/VI-26, pp.69-79, 1995.
- 6) 何川，小泉淳：地震動が軸直角方向に作用する場合のシールドトンネルの模型振動実験とその応答解析，土木学会論文集，No.624/III-47, pp.145-164, 1999.
- 7) 何川，小泉淳：地震動が軸方向に作用する場合のシールドトンネルの模型振動実験とその応答解析，土木学会論文集，No.624/III-47, pp.165-181, 1999.
- 8) 室谷耕輔，羽矢洋，西村昭彦，横溝文行，大保直人：単円・複円形シールドトンネルの模型振動実験概要および実験結果，トンネル工学研究論文・報告集，第8巻，pp.395-400, 1998.
- 9) 水野光一郎，小泉淳：シールドトンネル横断方向の耐震設計法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.687/III-56, pp.107-123, 2001.
- 10) 永谷英基，山田岳峰，五十嵐寛昌，高橋章浩：複断面トンネルの繰返しせん断時の応答特性，第37回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1777-1778, 2002.
- 11) 竹内幹雄，井戸田芳昭，高橋忠，三澤孝史：シールドトンネルの断面内地震時応力低減効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.483/I-26, pp.107-116, 1994.
- 12) 植村靖美，岩崎喬夫，梶川正義，川村淳一，中野雅弘，松原勝巳：分割式アーチトンネルの耐震性向上に関する実験的研究（その2），第24回地震工学研究発表会論文集，pp.801-804, 1997.
- 13) 日下敦，砂金伸治，森本智，真下英人，角湯克典：模型振動実験による地震におけるインバートの効果に関する一考察，トンネル工学報告集，第19巻，pp.205-209, 2009.
- 14) 野城一栄，小島芳之，宮林秀次，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，Vol.65, No.4, pp.1062-1080, 2009.
- 15) 田村重四郎，岡崎孝夫：沈埋トンネルの模型振動実験，地震工学研究発表会講演概要，Vol.11, pp.25-28, 1971.
- 16) 中野拓治，田淵民雄，青木義典：沈埋トンネルと地盤の相互作用に関する実験的研究（第2報），港湾技術研究所報告，Vol.12, No.2, pp.85-108, 1973.
- 17) 岩楯 敏広，楠 博典，林家祥，田中努：地下鉄構造物の地震時挙動に関する模型実験と数値シミュレーション，第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp.481-484, 1999.
- 18) 佐藤博，大島義隆，大川尚哉：開削トンネル上床版の地震時周面せん断力低減による側壁直土圧への影響と免震効果に関する研究，土木学会論文集F1，Vol.71, No.1, pp.14-28, 2015.
- 19) 神田政幸，西岡英俊，山畑栄，高橋一人，甲斐輝雅：鉛直力・水平力・モーメントおよび鉛直変位・水平変位・回転角による載荷制御可能な基礎構造物の載荷試験装置の開発，第40回地盤工学研究発表会発表講演集，2005.
- 20) 津野究，森本亘，伊藤和也，村田修，日下部治：遠心模型実験により把握した地下鉄振動の伝播性状，土木学会論文集C, Vol.63, No.1, pp.13-23, 2007.
- 21) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，開削トンネル，丸善，pp.46, 2001.

(2016.5.16 受付)

EXPERIMENTAL RESEARCH ON SEISMIC BEHAVIOR OF SUBWAY MULTI-SECTION TUNNEL IN TRANSVERSE DIRECTION

Kiwamu TSUNO, Kazutaka KAMADA, Taisuke SANAGAWA, Shinji KONISHI,
Tsutomu OTSUKA, Toshiki IMAMURA and Koichi MAEKAWA

This research carries out model tests to investigate the behavior of multi-section cut-and-cover subway

tunnels with the shear displacement of surrounding ground caused by seismic motion, which has not been fully investigated. A multi-section model tunnel as well as a general box type one is installed in a soil vessel and it is found that the sectional force corresponds to those obtained by tunnel design. Then, shear displacement is applied to the model ground and the test results show that the bending moment and shear force are comparatively large in the center wall, the tendency is different among the loading direction and the model tunnels are deformed according to the shear deformation of model ground.