開削トンネルの損傷状況および耐力把握のため の実験的研究

川西 智浩1·清野 純史2·井澤 淳3

¹正会員 京都大学大学院工学研究科助教(〒615-8530 京都市西京区京都大学桂船井交流センター) E-mail: kawanishi.tomohiro.6s@kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院工学研究科教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター) E-mail:kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.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:izawa@rtri.or.jp

兵庫県南部地震における神戸高速鉄道の大開駅の崩壊事例のように、開削トンネルの中柱・中壁がせん 断破壊した場合にはトンネル全体が崩壊し、大きな被害が生じるが、その他の部材が損傷した場合にトン ネル全体系がどのような破壊となり、耐力がどの程度減少するのかはまだ明らかになっていない。そこで 本研究では、中壁以外の部材として側壁を取り上げ、側壁が大きく損傷した場合におけるトンネル全体の 形状の破壊状況を把握するための基礎的検討として、鉄筋コンクリートを用いた1層2径間の開削トンネ ル模型を製作し、気中静的載荷試験を実施した。

Key Words : Cut and cover tunnel, static loading test, shear failure, side wall

1. はじめに

開削トンネルが地震時に大きく破壊した代表的な事例 として、神戸高速鉄道の大開駅が挙げられる¹⁾⁻³.この 事例は、中柱がせん断破壊を起こし、上床版およびその 上部の土による荷重を支え切れずにトンネル全体が崩落 したものであり、これを契機に開削トンネルにおいては 中柱の耐力が不足するとトンネル全体系の崩壊につなが ることが明らかとなり⁴、各鉄道事業者においては中柱 のせん断破壊防止を目的として、鋼板巻きや添え柱の設 置などの耐震対策が順次実施された.

このように、中柱が大きな損傷を受けた場合にトンネ ル全体系に及ぼす影響は明らかになっているが、一方、 開削トンネルにおいて中柱以外の部材が大きく破壊した 事例がこれまでにないことから、側壁や上床版などの部 材が破壊した場合に、トンネル全体系の形状が確保され るのか、あるいは耐力がどの程度維持されるのか、とい った問題についてはよくわかっていないのが現状である. また、既設開削トンネルの耐震診断を実施した場合には、 中柱だけではなく他の部材についても、計算された応答 値が定められた限界値を上回ったり、せん断耐力が不足 する判定がなされることも多いことから、設計地震動相 当,あるいはそれ以上の地震動による地震作用がトンネ ルに入力されることで、中柱以外の部材が大きな損傷を 受ける可能性は十分にあると言える.しかし、開削トン ネルは一般に不静定構造であることから、その構造の特 性を考慮すると、どこか一部材が破壊しても構造物とし ての形状は確保され、構造全体系としての安全性が確保 される場合も十分考えられる.

中柱を有する箱型トンネルの挙動解明や損傷および耐 力を把握するための実験的研究は、これまでにも多く実 施されている.遠藤ら⁵は、鉄筋コンクリート製ボック スラーメン構造物と地盤の非線形連成挙動の解明を目的 として、静的な地盤・構造物連成実験を行っている.大 友ら⁹は、大型振動台実験により鉄筋コンクリート製地 中構造物の塑性領域での変形挙動を把握する検討を行っ ている.これらの実験では、箱型トンネル部材の鉄筋降 伏が起こったり、多数の曲げひび割れが発生するなどの 損傷が発生しているが、部材がせん断破壊した場合の挙 動解明はされていない.石川ら⁷は、曲げ破壊型だけで なくせん断破壊型の鉄筋コンクリート製ボックスカルバ ート模型を製作して静的載荷試験を実施しているが、隔 壁、つまり中壁がせん断破壊を起こす破壊パターンであ り、中柱以外がせん断破壊を起こした場合の挙動把握ま



図-1 製作した開削トンネル模型の寸法(単位はmm)

 $25 \times 10 = 1.250$

<上床版>

表-1 トンネル部材の材料特性・配筋一覧

コンクリート		圧縮強度: 29.7(N/mm ²)
鉄筋 ※すべてD6 (SD295)	上下 床版	主鉄筋:50mm間隔 せん断補強筋:あり
	中壁	主鉄筋: 50mm 間隔 せん断補強筋:あり
	側壁	主鉄筋: 50mm 間隔 せん断補強筋:なし



図-2 製作した開削トンネルの配筋(鉄筋はすべてD6, 寸法単位:mm)

ではなされていない. 曽良岡ら⁸の実験でも同様に隔壁 がせん断破壊した場合の挙動を対象としている.また, 鉄筋コンクリート製地中構造物の実験はこの他にも静 的・動的を問わず多数実施されている⁹⁻¹⁴が、中柱への ひずみの集中を解明する研究や土圧の解明に関する研究 など、中柱以外の部材が大きく損傷しない研究である他, 中柱を有しない地中構造物を対象としているものが多い.

そこで本研究では、中柱以外の部材として側壁を取り 上げ、側壁がせん断破壊した場合におけるトンネル全体 系の破壊状況や耐力を把握するための基礎的検討として, 鉄筋コンクリートを用いた1層2径間の開削トンネル模

型を製作し、気中静的載荷試験を実施した.

2. 静的載荷実験の概要

(1) 製作したトンネル模型

静的載荷実験に用いる開削トンネル模型の寸法を図-1 に示す.トンネル模型本体部の寸法は幅1.6m×縦0.95m であり,奥行きは1mである.また,中壁の厚さは0.1m, その他の部材厚さは0.15mである.またトンネル下床版 にはトンネルを固定するために、左右にそれぞれ250mm



図-3 静的載荷試験の状況



図-5 トンネル下床版位置の変位計測

の出っ張りを設けている.

次に、開削トンネル模型の部材の配筋を図-2に、材料 特性を表-1にそれぞれ示す.別途コンクリートの圧縮試 験を実施したところ、圧縮強度は29.7(N/mm²)であった. また、主鉄筋およびせん断補強筋にはD6(SD295)を用い ており、今回の検討では側壁をせん断破壊させることを 目的として、側壁にはせん断補強筋を配置していない.

(2) 実験方法

次に,静的載荷実験の状況を図-3に示す.下床版を床 に固定し,左側壁の上方をアクチュエーターで右方向に 静的載荷する.載荷においては,奥行き方向に均一に載 荷できるよう,図-4に示すような載荷治具を用いること とした.また,トンネルの上載荷重を模擬するために, トンネル上部に計20(kN)のインゴットを載せた.

そして、アクチュエーターを1~2mmずつ静的載荷し ていって、その都度損傷状況をチェックするものととも に、アクチュエーター位置の荷重と変位を計測すること により、開削トンネルの損傷過程とトンネルの耐力との 関係を整理することとした.ただし、トンネルは下床版 位置にて固定しているものの、載荷によりわずかにトン ネルがずれる可能性があるため、図-5に示すようにトン ネル下床版の手前側および奥側にターゲットを設置し、 レーザー変位計を用いてトンネル下床版位置の変位を計



図-4 アクチュエーター先端の載荷治具



図-6 トンネルの荷重-変位関係と損傷状況の関係

測することとした.そして,式(1)により算定した変位D をトンネルの相対変位とし,この相対変位とアクチュエ ーター位置の荷重を用いて,トンネルの荷重-変位関係 を整理することとした.

$$D = D_A - (D_{L1} + D_{L2})/2 \tag{1}$$

ここで、 D_A : アクチュエーターで計測されたトンネル の変位(mm)、 D_{LI} 、 D_{L2} : レーザー変位計で計測されたト ンネル下床版位置の変位(mm)

なお本実験では、トンネル下床版位置だけでなく、上 床版位置および上下床版の中間位置にもターゲットを設 置してレーザー変位計による変位計測を試みているが、 ひび割れの拡大に伴いターゲットのズレおよび落下が発 生したため、これらの変位計測結果は実験結果の整理に 用いていないことを付記しておく.



図-7 右側壁・隅角部の曲げひび割れの発生



図-8 左側壁・中壁の曲げひひ割れの発生



図-9 曲げひび割れの進展

3. 実験結果

式(1)により算定される変位Dとアクチュエーター位置 の荷重の関係と、各荷重-変位関係位置におけるトンネ ル模型の損傷状況を、図-6に示す.実際の載荷では供試 体の状況確認のために1~2mmおきにアクチュエーター の制御を止めており、細かな荷重低下がその度に起きて いるが、図-6ではピーク値のみを抽出して荷重-変位関係を作成している.

まず、変位が約5.5mm(変形角:約6/1000)になった 時点でトンネル自体が載荷方向に1mm程度スライドした ため、その際に状態を確認したところ、左上隅角部、右 下隅角部、右側壁に曲げひび割れを確認した(図-6の①、 および図-7).載荷が進むにつれて、左側壁や中壁にも



図-10 左側壁のせん断ひび割れの発生と進展

曲げひび割れが発生した(図-6の②,および図-8).左 右側壁の曲げによる損傷が進行する形でトンネルが変形 していったが荷重は増加し続け,変位が約29mm(変形 角:約31/1000)の時点で最大荷重点に達した.その後さ らに載荷を続けたところ,曲げ変形が進行したが(図-6 の③,および図-9),全体系の耐力はそれほど減少する ことなく変形が増大していった.

そして変位が約65mm(変形角:約68/1000)の時点で 左側壁にせん断ひび割れが発生し(図-6の④,および図 -10(a)),これに伴いトンネル全体系の荷重がピーク時 の7割程度にまで減少した.載荷が進むにつれて図-10(b)に示すようにせん断ひび割れの幅が大きくなって いき,最終的にはひび割れが貫通したが,トンネル全体 系の荷重はほとんど減少せず,図-6の⑤および図-11に 示すように、変位が約82mm(変形角:約86/1000)に達 しても、全体系が崩壊することはなかった.

4. 考察

本実験では、中壁の厚さを側壁に比べて薄くすること で中壁の曲げに対する変形性能を高めており、それに加 えてせん断補強筋を中壁に配置することでせん断破壊も 防止している.一方、側壁については比較的厚い部材と するとともにせん断補強筋を配置しなかったことで、載 荷の初期段階では曲げによる損傷が起こるものの、変形 が進むにつれて左側壁がせん断破壊を起こす結果となっ た.

中壁がせん断破壊を起こした場合,大開駅のように中 壁による支えがなくなり,上部からの荷重を支えきれな くなってしまうが,本実験のように側壁がせん断破壊を



(a) 正面側



(b) 裏側 図-11 載荷終了時のトンネル模型

起こしても中壁が崩壊しなければ、ある程度上床版やその上方の荷重を支えることができ、トンネル全体系の崩壊は免れることがわかった.また、水平荷重に対する耐力は、側壁がせん断破壊することで低下するものの、一定の残存耐力を有することも確認できた.ただし、実際の開削トンネルでは、トンネル周辺に土が存在しており、その土による土圧および抵抗がさらに加わるため、側壁がせん断破壊した場合のトンネルの荷重-変位関係と損傷状況の関係は、周辺の土にも影響を受ける可能性があることに注意する必要がある.

5. まとめ

本研究では、兵庫県南部地震の大開駅のように中柱の せん断破壊によりトンネル全体系が崩壊する事例とは別 の破壊形態、つまり中柱以外の部材がせん断破壊した場 合にトンネル全体系に及ぼす影響を検討するために、中 柱以外の部材として側壁を取り上げ、側壁がせん断破壊 した場合におけるトンネル全体系の破壊状況や耐力を把 握するための基礎的検討として、鉄筋コンクリートを用 いた1層2径間の開削トンネル模型を製作し、気中静的 載荷試験を実施した.その結果、側壁がせん断破壊して も中柱が大きく損傷しなければ、上方からの荷重を支え ることができてトンネル全体系の崩壊を免れることがで き、水平荷重に対する耐力もある程度残存することが確 認できた.

既設開削トンネルでは中壁の補強,あるいは添え柱の 設置が容易な一方,側壁の耐震対策には制約が伴うため に補強が実施されていないケースも多い.その結果,中 壁のみ耐震対策を実施した場合に側壁がせん断により損 傷する破壊形態になることは十分考えられる.したがっ て、今後は本実験の結果を踏まえて、側壁が弱点箇所と なるトンネルの安全性について評価方法の検討を行い、 実際のトンネルの安全性の評価,あるいはより危険な開 削トンネル箇所の抽出に活かしていきたいと考えている.

参考文献

- 阪神淡路大震災調査報告編集委員会:阪神淡路大震 災調査報告 土木構造物の被害 第2章 トンネ ル・地下構造物,土木学会,1996.
- 佐藤工業株式会社:神戸高速鉄道東西線 大開駅災 害復旧の記録, 1997.
- 3) 土木学会関西支部:大震災に学ぶ-阪神淡路大震災 調査研究委員会報告書-, Vol.II, 1998.
- 4) 矢的照夫,梅原俊夫,青木一二三,中村晋,江嵜順一,末富岩雄:兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析,土木学会論文集, No.537/I-35, pp.303-320, 1996.
- 5) 遠藤達巳,青柳征夫,片平冬樹:鉄筋コンクリート 製地中構造物への限界状態設計法の適用に関する研 究-地盤と構造物との非線形連成実験とその解析-, 地震工学研究発表会講演概要, Vol.21, pp.445-448, 1991.

- 6) 大友敬三,末広俊夫,河井正,金谷賢生:鉄筋コン クリート製地中構造物の耐震性能照査法の開発(その1)大型振動台実験に基づく塑性変形評価とその 適用,日本地震工学シンポジウム論文集,Vol.11, pp.1097-1102,2002.
- 7) 石川博之,末広俊夫,金津努,遠藤達巳,松本敏 克:鉄筋コンクリート製地中構造物の変形性状と損 傷状態に関わる実験的考察,地震工学研究発表会講 演論文集, Vol.26-2, pp.885-888, 2001.
- 8) 曽良岡宏,足立正信,本田国保,田中浩一:地中ボ ックスカルバートの変形性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, pp.1123-1128, 2001.
- 9) 武田篤史,樋口俊一,大内一,後藤洋三:RC地中 構造物の大地震時の破壊挙動,地震工学研究発表会 講演論文集, Vol.25-1, pp.485-488, 1999.
- 10) 伊藤浩二,大野了,松田隆:鉄筋コンクリート製地 中構造物の遠心力模型振動実験と解析,土木学会地 震工学論文集,Vol.27, No.200, 2003.
- 11) 橘泰久,佐藤誠,秋山伸一,荒添正棋:実際に使用 されてきた地中構造物の地震時耐力・変形性能に関 する研究-その1 載荷実験に基づく非線形挙動の検 討,地震工学研究発表会講演論文集,Vol.26-2, pp.889-892, 2001.
- 佐藤泰,三浦篤,岩楯敞広,飯野貴嗣,木村良章: 模型振動実験による地中構造物の地震時挙動の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部(B), Vol.52, pp.916-917, 1997.
- 13) 渡辺啓行,末広俊夫:地中ダクトの側壁動土圧に関 する実験的検討,土木学会論文集,No.432/I-16, pp.155-163, 1991.
- 14) 渡辺和明,志波由紀夫: 箱型地中構造物の地震時挙動と耐震計算法に関する実験的検討,土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol.49, pp.858-859, 1994.

(????.?.?受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON FAITURE BEHAVIOR AND STRANGTH OF CUT AND COVER TUNNEL

Tomohiro KAWANISHI, Junji KIYONO and Jun IZAWA

As shown in the case of collapse of the Daikai Station of the Kobe Rapid Transit Railway when the 1995 Kobe Earthquake occurred, it is clear that a share failure of center pillar of a cut and cover tunnel causes a collapse of a whole tunnel. However, it has been not clarified how severe damages of members except a center pillar influence the degree of collapse of a whole tunnel. In this research, we focused on a side wall as a member except a center pillar and conducted a static loading test using a RC cut and cover tunnel model in order to grasp a process of failure and strength when the side wall of the tunnel sustained severe damage. As a result, it was clarified that the severe damage of side wall by bending failure did not influence the strength of the whole tunnel, and the shear failure of side wall did not caused the complete collapse of cut and cover tunnel.