

ブロック積み覆工トンネルの押し抜き に対する模型載荷実験

岡野 法之¹・舟橋 孝仁¹・小島 芳之¹・朝倉 俊弘²

¹正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: nokano@rtri.or.jp

²正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

既往の震災被害事例の分析より、ブロック積み覆工における典型的震災被害パターンとしては、トンネルアーチの押し抜きと地山のせん断変形に伴うアーチ肩部のひび割れ(圧ざ)があることを把握した。本報告では、前者のトンネルアーチの押し抜きに対して、被害メカニズムを解明するため、三次元れんが積み覆工模型を用いて押し抜き模型実験を行った。

模型実験により、れんが積み覆工の押し抜きを再現でき、以下の知見を得た。①れんが積み覆工は、背面空洞がない場合、無筋コンクリート覆工の場合と比較して、ぜい性的な押し抜き破壊はみられない。②背面空洞がある場合、無筋コンクリート覆工が局所的な押し抜きであるのに対し、れんが積み覆工は、押し抜き範囲が広範囲に及ぶ。③背面空洞を有するれんが積み覆工は、れんが層間の剥離に伴い急激な耐力低下を引き起こす。

Key Words : tunnel, masonry lining, punching shear model test, voids of behind the lining

1. はじめに

1880 年、我が国初の鉄道山岳トンネルが供用されてから約 130 年が経過し、現在、JR 各社で供用されている山岳トンネルは、約 3,700 本、総延長で約 2,200km に及ぶ。そのうち半数以上は戦前に建設されており、覆工材質としては無筋コンクリートが大半を占めるものの、昭和初期まで用いられていた石、れんが、コンクリートブロックによるブロック積み覆工トンネルも相当量存在する。

一方、地中構造物であるトンネルは、一般に、地震に強い構造物であると言われているが、ブロック積みトンネルは、関東地震により甚大な被害を受け、その後、兵庫県南部地震等でも中程度の被害を受けている。

現在のところ、このようなブロック積みトンネル覆工の地震時挙動、地震時の破壊メカニズムは未解明な部分が多く、また、合理的な耐震対策工に関する設計法も確立されていないことから、今後、ブロック積みトンネルに対する地震被害の軽減のためにも、地震被害メカニズムの解明および効果的な対策工の確立が必要であると考えられる。

筆者らは、ブロック積み覆工トンネルの力学挙動を解明するために各種検討¹⁾を進めてきているが、本研

究では上記課題を解決すべく、ブロック積み覆工の典型的な震災被害パターンを整理するとともに、模型実験により震災被害パターンを再現することにより地震被害メカニズムの解明を行なうこととした。

本報告では、三次元れんがトンネル覆工模型を用いてブロック積みトンネルの震災被害パターンの一つであるトンネルアーチの押し抜きを模型実験により再現し、その破壊メカニズムおよび力学的性能の把握を行うとともに、過去の研究²⁾で明らかにされている無筋コンクリート覆工における押し抜き破壊メカニズムとの違いについて比較して考察を加えたので報告する。

2. ブロック積みトンネルの震災被害

山岳トンネルの地震被害事例については、吉川³⁾、朝倉ら⁴⁾により収集、分析がなされている。本研究では、それらの資料を基にブロック積み覆工トンネルの地震被害事例を分析した。

その結果、供用中のトンネルのほとんどがれんが積み覆工であった 1923 年当時に発生した関東地震では、多くのトンネルで甚大な被害を受けた。その被害形態は、坑口部の破壊や覆工の大きなずれなど様々であったが、



写真-1 関東地震によるれんが積み覆工の震災被害例⁵⁾

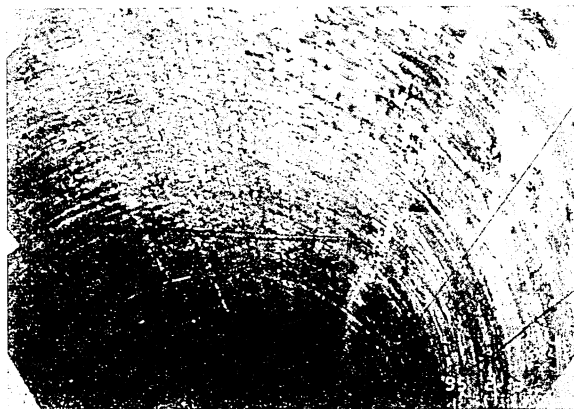


写真-2 兵庫県南部地震によるコンクリートブロック積み覆工の震災被害例⁶⁾

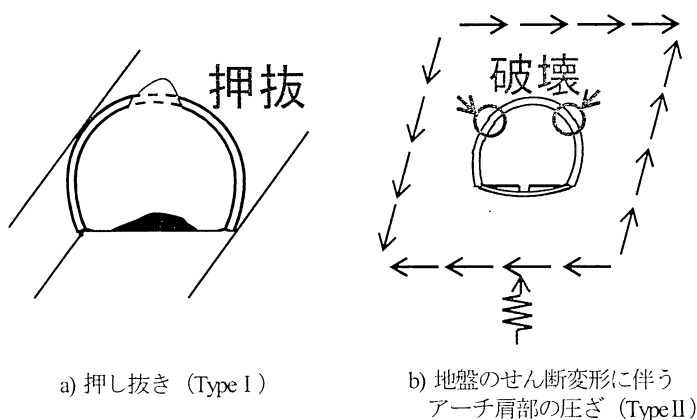


図-1 被害ブロック積みトンネルの典型的な震災被害

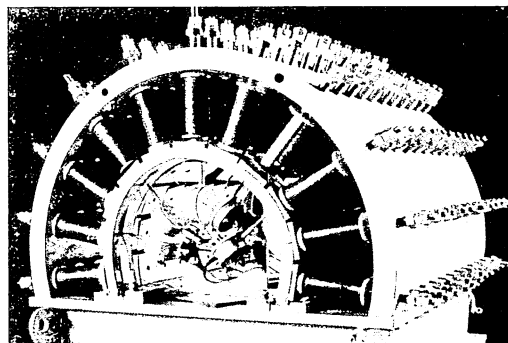


写真-3 縮尺 1/30 トンネル覆工模型実験 載荷装置

土被りが大きくなく緩みの生じやすい地山では、写真-1⁵⁾、図-1 a) に示すようなトンネルアーチの押し抜き破壊 (Type I) が多く見られた。

一方、兵庫県南部地震では、ブロック積み覆工トンネルの崩壊といった甚大な被害は見られなかったが、坑口部を除けば、写真-2⁶⁾、図-1 b) に示すようなトンネル周辺地盤のせん断変形に伴うアーチ肩部の圧さ (Type II) の発生が確認されている。

本稿では、これら2つの典型的な震災被害パターンのうち、トンネルアーチの押し抜き破壊 (Type I) に着目し、以降に示す、押し抜きを模擬したトンネル覆工模型載荷実験を実施した。

3. 模型載荷実験

(1) 実験装置^{例えば1)}

実験には写真-3に示す新幹線標準断面を想定した縮尺 1/30の小型トンネル覆工模型載荷実験装置¹⁾を用いた。本装置は、載荷用ボルト、載荷板 (55×55mm)、反力

板 (55×55mm)、トンネル周辺地山を模擬した地盤ばね材、反力フレームからなっている。また、これらはトンネル縦断方向にも配置されており、延長方向に長いトンネル模型を用いて三次元挙動を模擬した実験が実施可能である。

載荷装置以外は円筒形ゴムの地盤ばね材を取り付け、反力板を覆工模型に接触させることにより覆工周辺の地山を模擬し、変形量に対応する反力を覆工模型に与えられるようになっている。

(2) 実験ケース

トンネルアーチ部の押し抜きが模擬できるように実験は三次元とし、覆工模型の天端中央部を鉛直に載荷した。本稿で述べる実験ケースを表-1に示す。

Case1は構造欠陥等が無いもの、Case2およびCase3は背面空洞の存在を模擬したケースで、トンネル延長がCase2は320mm、Case3は640mmとした。また、鉄道総合技術研究所が過去に実施した無筋コンクリート覆工を模擬したモルタル模型のケースについても併せて示し²⁾、比較する。

表-1 実験ケース

Case No	模型材質	欠陥	模型延長
1	れんが 2層	なし	320mm
2		背面空洞	640mm
3			
4	モルタル	なし	320mm
5		背面空洞	

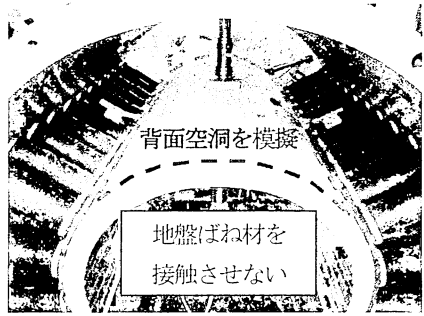


写真-4 背面空洞の模擬

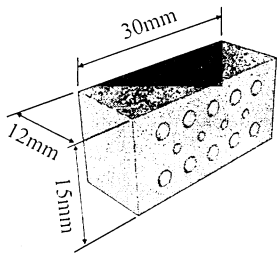


図-2 れんが単体寸法

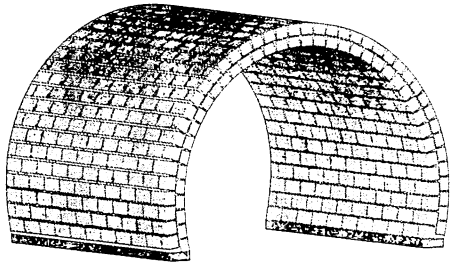


図-3 れんが積み覆工模型試験体
(模型延長 320mm の場合)

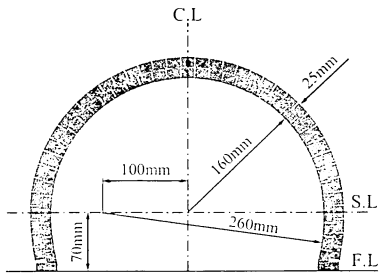


図-4 試験体の断面寸法

表-2 れんがおよび目地材の物性値

材料	圧縮強さ	記事（供試体寸法等）
れんが	10.7 N/mm ²	載荷面：12 mm ×15 mm
	10.9 N/mm ²	載荷面：12 mm ×30 mm
	37.5 N/mm ²	載荷面：15mm ×30 mm
目地材	4.5 N/mm ²	供試体寸法：20 mm ×20 mm ×40 mm

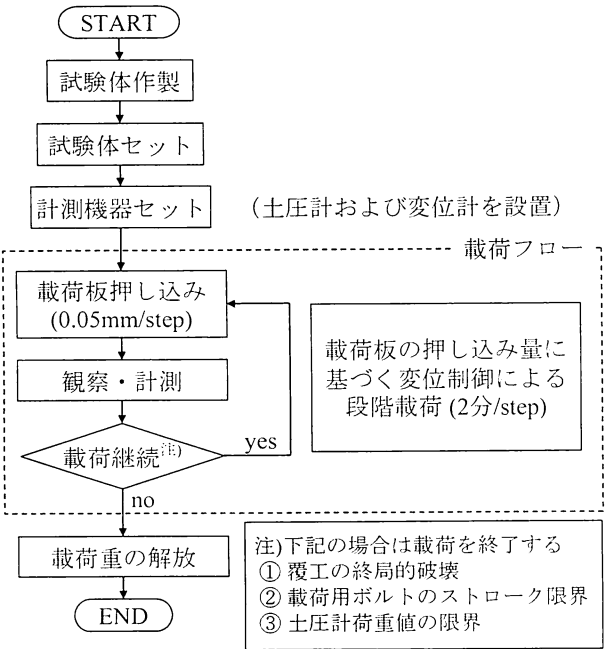


図-5 載荷実験のフロー

実験では、写真-4 に示すように、地盤ばね材を覆工模型背面に設置しないことで背面空洞を模擬し、覆工模型の中央部分を載荷することで、背面空洞が存在する場合の押し抜き状況を再現した。ここで、背面空洞の範囲は、約 90° とした。

(3) 模型の作製

実際の鉄道トンネルにおけるれんが積み覆工のれんがの積み方は、アーチ部は例外なく「長手積み」、側壁部はほとんどが「イギリス積み」である⁷⁾。

本研究において作製したれんが積み覆工模型（以下、「れんが模型」と示す）は、側壁部をイギリス積みにすることは多大な労力を要することと、今回の載荷パターンでは側壁の積み方が実験結果に大きな影響を及ぼさないと推察されることから、図-2 に示すれんが単体の 15mm×30mm の平面がトンネル内側に向くように設置し、図-3 に示すように全周長手積みにより積み上げた。

れんがの層数は全ケースにおいて、図-4 の試験体の断面寸法に示すとおり、2 層巻きの巻厚 25mm とした。れんがの間の目地は、穀物由来（でんぷん質）の接着剤を使用した。モルタルの模型は全周一体構造で巻厚は 20mm、モルタルの一軸圧縮強度は約 25N/mm² である²⁾。表-2 にれんがおよび目地材の物性値を示す。

(4) 載荷方法

載荷は覆工模型天端中央部の載荷板1箇所を鉛直下向きに行った。図-5に載荷実験のフローを示す。

載荷ステップは、1ステップ2分で行い、載荷板の押し込み量(0.05mm/step)に基づく変位制御による段階載荷を行った。また、1ステップの間に載荷、計測、観察を実施し、載荷が継続できなくなるまで繰り返し行った。観察および計測項目は、試験体の目視観察、荷重、内空変位（9箇所）とした。

4 実験結果

(1) ひび割れの発生状況

Case1～Case3 において覆工に生じたひび割れ状況（覆工内面および妻部のひび割れ展開図）を次頁の図-6 に示す。なお、覆工内面のひび割れ展開図は、覆工内面を下から見上げた時の図である。また、比較のため図-7 に無筋コンクリート覆工を模擬したモルタル模型にお

ける欠陥なしおよび背面空洞ありの場合の覆工内面のひび割れ展開状況も併せて示す。

Case1～Case3 のいずれにおいても、トンネル内空側天端部においてトンネル縦断方向に①曲げひび割れが発生した。Case1 では曲げひび割れが発生した後、1 層目と 2 層目の目地部において②層間剥離が生じた。層間剥離は妻部にまで達し、試験体全長にまで及んでいることがわかる。層間剥離と地山側肩部における曲げひび割れが繰り返し発生した後、載荷箇所の直下を中心とする③放射状ひび割れが生じた。その後、無筋コンクリート覆工の場合のように、完全な押し抜き破壊までには至らないものの、れんが積み覆工においても押し抜き破壊モードになることが確認された。

一方、Case2 においては、天端部の①曲げひび割れ発生後、地山側肩部（背面空洞と地山の境目）においてトンネル縦断方向に曲げひび割れが生じた後、Case1 と同様に②層間剥離が発生した。Case2 においても層間剥離は試験体全長にわたり生じていることが確認でき、層間剥離が生じた後は、載荷とともにひび割れ幅が拡大し、Case1 でみられた放射状ひび割れは確認できず、最終的には写真-5 に示すように、ほぼ背面空洞の範囲でトンネル縦断方向にわたり破壊が生じた。これは、れんが積み覆工において、背面空洞がある場合の局所的な載荷では、その影響範囲が Case2 の試験体延長（L=320mm）よりも大きく広範囲であったためと考えられる。

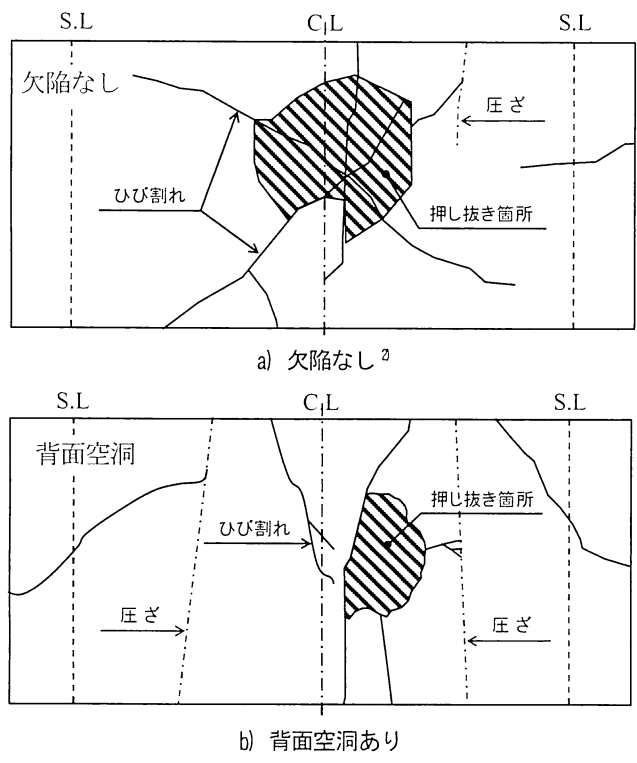


図-7 無筋コンクリート覆工におけるひび割れ展開状況

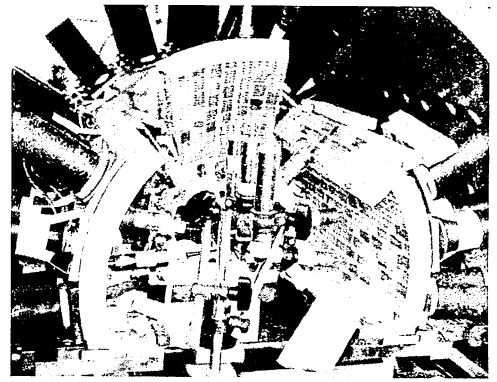


写真-5 Case2における破壊状況

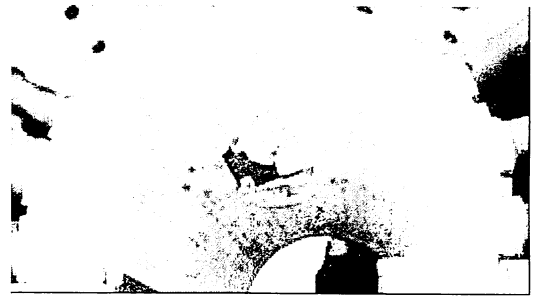


写真-6 Case3における押し抜き破壊状況

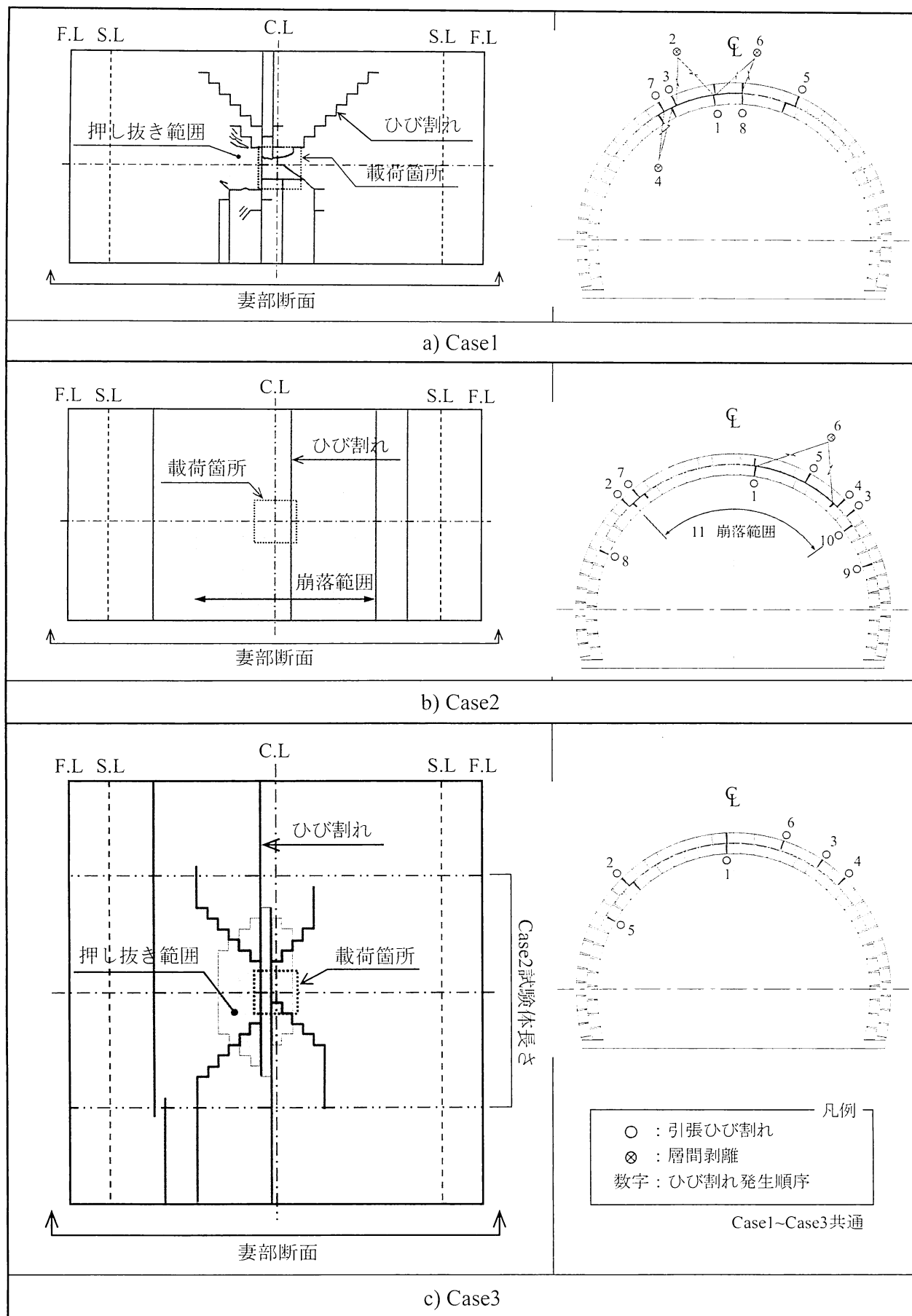
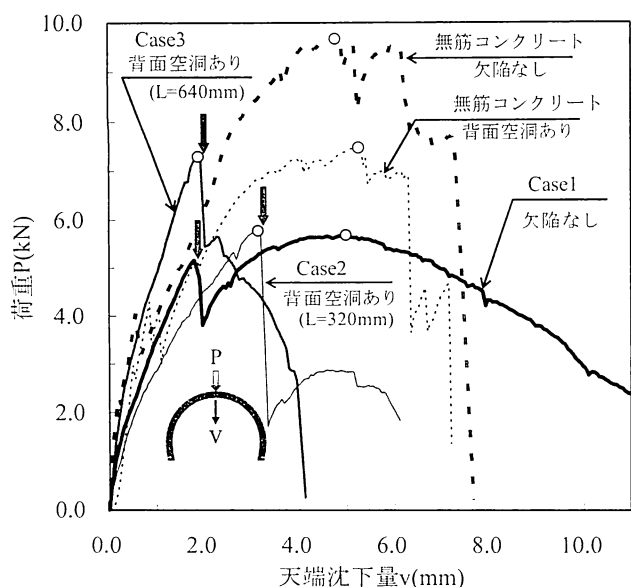


図-6 Case1~Case3におけるひび割れ展開状況



(図中の○は最大荷重位置, △は圧ぎ発生位置, ↓は第1層間剥離発生)

図-8 荷重と天端沈下量との関係

そこで、試験体延長を Case2 の 2 倍 ($L=640\text{mm}$) とした試験体を用いて Case3 を行なった。Case3 のひび割れ展開状況より、試験体を長くしても天端部および肩部の曲げひび割れはトンネル縦断方向に生じ Case2 と同じであることがわかる。しかしながら、妻側まで層間剥離はみられなかった。また、Case2 で確認できなかった放射状のひび割れは、Case3 では載荷箇所直下を中心として発生していることが展開図より確認できる。放射状のひび割れが進展した後、試験体は、Case1 および無筋コンクリート覆工（背面空洞あり）に比べ、広範囲に押し抜き破壊を生じていることがわかる。その状況を写真-6 に示す。このことは、れんが積み覆工は、無筋コンクリート覆工と異なり目地を有するため、変形を目地で吸収することにより、無筋コンクリート覆工よりも柔な構造であると言え、荷重に対する力の伝達が無筋コンクリート覆工よりも広範囲になるものと考えられる。

一方で、写真-6 に示す破壊形態は、写真-1 に示した状況によく似た破壊形態であることがわかる。また、Case3 のひび割れ展開図に Case2 の試験体長さを示したが、これによると、背面空洞を有する場合の局所的載荷による押し抜き影響範囲は、載荷位置からトンネル縦断方向に約 $0.5D$ (D : 試験体外径) ではないかと推定され、その範囲付近までは層間剥離も生じているのではないかと考えられる。

(2) 荷重－変位関係

図-8 に荷重と覆工内面天端沈下量との関係を示す。参考として図中には、三次元実験における無筋コンクリート覆工（欠陥なし、背面空洞あり）の結果も併せて示す。

す。

これによると、Case1～Case3 のいずれのケースにおいても、層間剥離が生じると荷重が急激に低下することがわかる。Case1 では、層間剥離後においても荷重の増加が確認でき、層間剥離後に最大荷重を示すが、Case2 および Case3 では、層間剥離後の Case1 ほどの荷重増加はみられず、層間剥離が発生する直前に最大荷重を示していることがわかる。しかしながら、最大荷重値としては、Case1、Case2 とともに大差なかった。

また、Case1 は最大荷重到達後、徐々に荷重の低下が見られ、背面空洞の有無によらずぜい性的な破壊をおこす無筋コンクリート覆工のように、れんが積み覆工ではぜい性的に破壊する傾向はみられなかった。

5. 結論

ブロック積み覆工の地震被害メカニズムの解明を目的に、過去の地子被害事例を分析するとともに、1/30 小型トンネル覆工模型実験装置を用いて、れんが積み2層覆工模型の押し抜き載荷実験を実施した。以下に得られた知見を示す。

- (1) ブロック積みトンネルの典型的な震災被害パターンは、トンネルアーチ部の押し抜き破壊、周辺地山のせん断変形に伴うトンネルアーチ肩部のひび割れ（圧ぎ）の2パターンである。
- (2) 新幹線標準断面の縮尺1/30の小型トンネル覆工模型載荷実験により、れんが積み覆工の押し抜き現象をシミュレートできることを確認し、その力学挙動を把握した。
- (3) 背面空洞がある場合、無筋コンクリート覆工が局所的な押し抜き破壊であるのに対し、れんが積み覆工は、押し抜き破壊の範囲が広範囲に及ぶ。このことは、れんが積み覆工は無筋コンクリート覆工と異なり、変形を目地で吸収するため、無筋コンクリート覆工よりも柔な構造であると言え、荷重に対する力の伝達が無筋コンクリート覆工よりも広範囲になるためと考えられる。
- (4) れんが積み覆工の場合、れんが層間での剥離に伴い急激な荷重低下を引き起こす。これは、無筋コンクリート覆工には見られない特有の現象である。背面空洞がある場合は、層間剥離の発生する直前が最大荷重となっており、変形性能が小さい。上述のように、れんが積み覆工は無筋コンクリート覆工より柔で変形しやすい構造であるため、背面空洞の存在により地盤反力が得られないと、変形性能が大きく低下することを示している。

(5) (4)に関連し、れんが積み覆工で背面空洞がない場合は、今回の実験条件では、層間剥離により一時的な荷重低下は見られたものの、荷重のピークはその後に見られ、ぜい性的な押し抜き破壊には至らなかった。

6. おわりに

れんが積み覆工トンネルを模擬した覆工模型載荷実験により、れんが積み覆工における震災被害パターンの1つである押し抜き現象を再現することができた。しかしながら、トンネルの断面形状や目地の状況の違いが、押し抜き破壊に対する影響範囲や力学特性等に及ぼす影響の把握は、ブロック積み覆工トンネルの地震被害メカニズムの解明にとって重要であり、その様な検討も実施していきたいと考えている。

また、今後、押し抜き以外の震災被害パターンである地山のせん断変形に伴う肩部の圧ざに関して、模型実験等によりそのメカニズムの解明を行なう予定である。

謝辞：本実験の模型作製においてご協力頂いたジェイアール総研エンジニアリング(株)の川上義輝氏に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 岡野法之, 津野究, 小島芳之, 朝倉俊弘: ブロック積み覆工トンネルに関する実験的研究, トンネル工学研究論文・報告集第12巻論文(9), pp.61-68, 2002.11
- 2) 野城一栄, 小島芳之, 藤井大三, 川上義輝: 欠陥を考慮したトンネル覆工の押し抜き模型実験, トンネル工学論文集, 第14巻, pp.123-130, 2004.11.
- 3) 吉川恵也: 鉄道トンネルの震災事例調査, 鉄道技術研究報告, No.1123, 1979.
- 4) 朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄: 山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.27-38, 2000.
- 5) 鐵道省: 大正十二年鐵道震害調査書, 1927.
- 6) 土木学会: トンネル工学委員会阪神大震災現地調査団調査報告書, 1995.3.
- 7) 小野田滋: 我が国における鉄道用煉瓦構造物の技術史的研究, 鉄道総研報告, 特別第27号, 1998.11

MODEL TESTS ON PUNCHING-SHEAR LOAD TO MASONRY LINING TUNNELS

Noriyuki OKANO, Takahito FUNAHASHI, Yoshio KOJIMA
and Toshihiro ASAKURA

There are some earthquake damage patterns in the block masonry lining tunnels. A punching shear failure of the tunnel roof and a cracking at the arch shoulder caused by shear deformation are main. In this study we performed punching shear model tests using masonry model lining in order to elucidate the damage mechanisms. We were able to reproduce the punching shear failure by punching shear model tests, and understand the following points. If there is no void behind the lining, there is no brittle fracture for punching to brick masonry lining though the brittle fracture generate to unreinforced concrete lining, and so on.