

各種欠陥を有する山岳トンネル覆工の 変形破壊挙動に関する研究

水谷 真基¹・野城 一栄²

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル研究室（〒185-85404 国分寺市光町2-8-38）
E-mail:mizutani.masaki.05@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル研究室（〒185-85404 国分寺市光町2-8-38）
E-mail:yashiro.kazuhide.40@rtri.or.jp

欠陥を有する山岳トンネル覆工の保有耐力および変形性能を確認することを目的として，縮尺1/5のトンネル覆工模型実験装置による載荷実験を実施した．欠陥を有する覆工として，軽度の材料分離，著しい材料分離，低強度コンクリート，初期ひび割れ，コールドジョイントを設定し，鉛直荷重を与えて載荷実験を行った．実験の結果，これらの構造欠陥によって変状の発生順序や破壊の形態に大きな差異は生じないこと，著しい材料分離，初期ひび割れ，コールドジョイントを設けたケースでは，これらが弱点となり，トンネルの剛性や耐力が，健全な場合と比べて大きく低下することがわかった．

Key Words: tunnel, tunnel lining, loading test, model experiment, lining defect

1. はじめに

既往の研究により山岳トンネルの覆工は大きな変形や荷重に耐えられることが知られている（例えば文献^{1,2)}）．しかし，矢板工法により施工されたトンネルにおいては，当時の施工技術に起因して覆工に様々な欠陥が生じている場合がある．このような構造的初期欠陥を有するトンネルにおいては，健全な覆工と比べ変形性能や耐力が小さくなる恐れがある．

そこで筆者らは，縮尺1/5の大型覆工模型実験装置を用いて，欠陥を有する覆工として，軽度の材料分離，著しい材料分離，低強度コンクリート，初期ひび割れ，コールドジョイントを設定し，鉛直荷重を与えて載荷試験を行い，変状の発生順序や破壊の形態，剛性や耐力について調べた．

は地盤ばねを模擬した油圧シリンダ付きの皿ばねが配置されている．載荷用油圧ジャッキで供試体に変位を与え

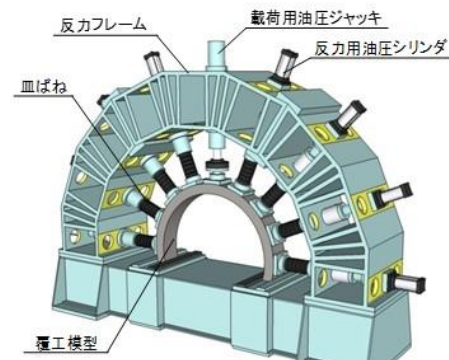


図-1 大型トンネル模型実験装置³⁾

表-1 覆工模型実験装置の諸元

構成部材	項目	諸元
載荷用油圧ジャッキ	最大載荷重	500kN
	最大載荷圧	5.6MPa
	ストローク	250mm
反力用油圧シリンダ	寸法	内径 125 mm
	ストローク	200mm
皿ばね	寸法	外径 200mm/内径 102mm 厚さ 12mm
	ばね係数	3,000kN/m
	地盤反力係数	16MN/m ³ (洪積層相当)

2. 模型実験

(1) 模型実験装置

模型実験では大型トンネル覆工模型実験装置³⁾（図-1）を用いた．実験装置の縮尺は新幹線複線標準断面の1/5相当であり，載荷用油圧ジャッキ，反力用油圧シリンダ，反力フレーム等から構成されている．覆工模型の周辺に

ると覆工が変形するが、覆工が外側（皿ばね側）に初期状態から変位した場合は、変位に相当する反力が皿ばねから与えられる。これにより、覆工と地盤の相互作用を模擬することができる。覆工模型実験装置の諸元を表-1に示す。本試験装置は、縮尺を1/5とすることにより実験装置を比較的規模の小さいものに抑えて実験の負担を減らしつつ、材料については実際のトンネルで使われているものと同様のものを使えるようにしてあるため、実物に近い変状が模型に生じるように工夫がしてある。

実験に使用した覆工模型の供試体の寸法を図-2に示す。巻厚はいずれのケースも矢板工法による新幹線トンネル（巻厚70cm）を想定し150mmとした。内径は925mmで、奥行き方向は載荷板寸法と同じ300mm（1.5m相当）、スプリングラインからは250mmとなっている。なお、覆工の材料はすべて無筋コンクリートである。各ケースのコンクリートの一軸圧縮強さを表-2に示す。

(2) 実験ケース

実験ケースは、覆工の構造的欠陥をパラメータとして表-3、図-3に示す6ケースとした。

Case1は文献2)にて実施された標準ケースである。剥離剤を適量塗布した鋼製型枠を用い、コンクリートを投入後にパイプレータで適切に締め固めることによって密実にしたコンクリートである。コンクリート供試体については供試体作製時に一軸圧縮試験用のテストピースを採取し、一軸圧縮強さの確認を行い、所定の強度が得られるまでの期間、型枠を付けたまま養生を行った。

Case2は軽度の材料分離を再現したケースである。剥離剤を塗布しない鋼製型枠を用い、型枠内にコンクリートを投入後に左右足付部は木槌で軽く締め固めを行ったが、パイプレータによる締め固めについては、左右足付部、アーチ部ともに行わずに打設を終了した。図-4に材料分離の状況を示すが、覆工表面には軽度のジャンカが現れている状態である。

Case3は著しい材料分離を再現したケースである。アーチ部のトンネル内空側に模擬ジャンカを設けている。模擬ジャンカの作製方法は以下のとおりである。

- ①アーチ部に設置する鋼製型枠の内型枠上に油粘土を設置し、油粘土上に川砂利（最大粒径25mm程度）を敷き詰める（図-5）。
- ②型枠内の左右側壁部に所定の配合のコンクリートを打設し、パイプレータ及び木槌にて締め固めを行う。
- ③ジャンカを表現したコンクリートを作製するために、篩を用いて、所定の配合のコンクリートを粗骨材が多く含まれる部分とその他の部分にふるい分ける。
- ④③で作製した粗骨材が多く含まれる部分を、アーチ天端（ジャンカ部）川砂利上部に75mm厚程度になるように打設する。なお、この際の締め固めについては木槌で数回叩く程度とする。

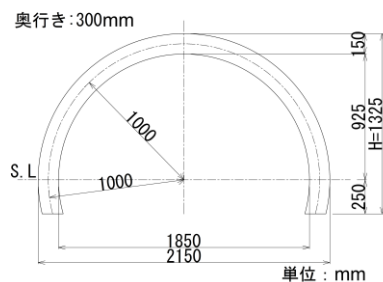


図-2 供試体の寸法

表-2 一軸圧縮強さ（材齢 28 日）

試験ケース	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
一軸圧縮強さ (N/mm ²)	22.2	26.9	30.3 14.4	16.2	23.9	26.6

※Case3については、上段が健全部、下段がジャンカ部である

表-3 実験ケース

ケース	構造的欠陥
1	構造欠陥なし（密実なコンクリート）
2	軽度の材料分離（パイプレータ未実施）
3	著しい材料分離
4	低強度コンクリート
5	初期ひび割れ
6	コールドジョイント

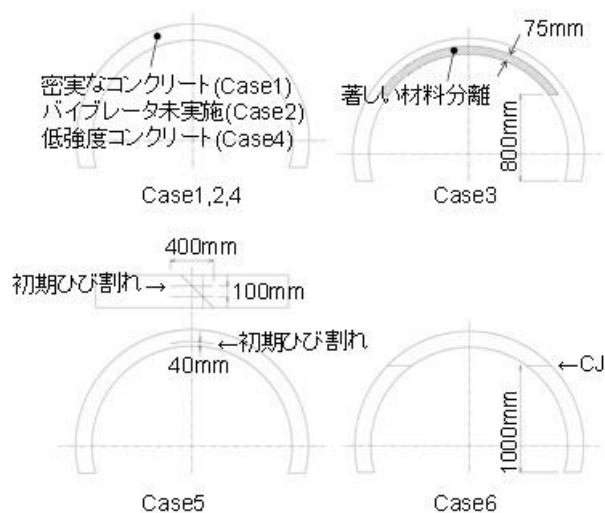


図-3 各実験ケースの模式図



図-4 材料分離の状況（Case2）

⑤骨材分の打設完了後にさらにその上部に、所定の配合のコンクリートを追加で打設し、巻厚150mmとなるようにする。

⑥所定の養生期間を経て、所定の強度が発現されていることを確認できた後に型枠を脱型する。

⑦型枠の脱型後、トンネル覆工内側に現れた油粘土を除去する。完成した模擬ジャンカを図-6に示す。妻部の状態から、顕著なジャンカが作製できていることが確認できる。

Case4は文献4)で実施された低強度コンクリート覆工のケースである。低強度のコンクリートにより打設されたトンネル覆工を表現するために、打設するコンクリートの目標強度を 10N/mm^2 に設定した。他の供試体の打設方法はCase1と同様である。

Case5は初期ひび割れをクラウン部内側付近に再現したケースである。Case1と同様に打設したコンクリートに、コンクリートカッターで幅2mm程度の切り込みを入れることで初期ひびわれを作製した。ひび割れは、覆工の打設時に若干の地山の緩み等を受けたことにより発生したことを想定して、トンネルの軸方向に2本と、剥落が生じやすい状況を想定して斜め方向に1本の計3本を設定した(図-3)。図-7に作製した模擬ひび割れを示す。

Case6は文献5)で実施したコールドジョイントを再現したケースである。コールドジョイントの位置はトンネル模型脚部から1mの高さとした。ここで、コールドジョイントの位置は、Case1において圧縮が発生した箇所に相当し、コールドジョイントの存在により圧縮の発生形態に影響が出やすい箇所に位置を設定した。コールドジョイントは、設定した高さでコンクリートの打設を一旦中断し、6時間の間隔の後、打設を再開することにより作製した。ただし、変位が大きくなった際にコールドジョイント部で大きなずれが発生することも想定されたため、コールドジョイント面において、ブリージング水をウェスで吸い取った上で、粗骨材(最大寸法20mm)をコールドジョイント部の左右それぞれに6個ずつ、せん断ずれを防ぐ役割として半分埋め込んだ。よって、今回模擬したコールドジョイントは、実際のトンネルに発生しているコールドジョイントよりもずれが発生しにくくなっている構造である。図-8に作製したコールドジョイントを示す。コールドジョイントは、目視で確認したところ、水平の分離面や、分離面近傍でコンクリートが密実でないことが確認できる。

(3) 載荷方法

載荷は天端部の載荷油圧ジャッキを鉛直下向きに変位制御により変位 $\delta=50\text{mm}$ まで載荷することにより行った。覆工模型周辺の反力用油圧シリンダは全てトンネル覆工模型に接触させ、背面空洞のない健全な状態を想定して載荷を行った。



図-5 川砂利を敷き詰めた状態 (Case3)



図-6 模擬ジャンカ作製状況 (Case3)



図-7 作製した模擬ひび割れ (Case5)



図-8 作製したコールドジョイント (Case6)

図-9に載荷実験の手順を示す。載荷ステップは載荷板押込み量 0.2mm/step の変位制御に基づく段階載荷にて行い、1分間載荷した後に、載荷を一旦停止して1分間の観察・計測を繰返し、載荷重が上昇しなくなるまで載荷を行った。

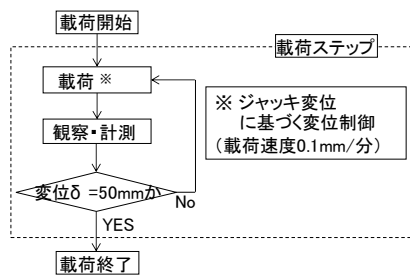


図-9 荷重実験の流れ

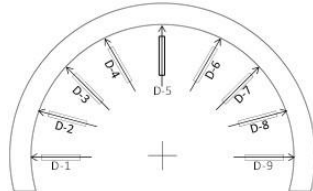


図-10 計測機器の配置

図-10に計測項目を示す。荷重中、荷重荷重、荷重変位、覆工内面の法線方向変位（9箇所）を計測した。

(4) 実験結果

a) ひび割れ発生状況

Case1～Case6の各ケースについて試験終了時の状況を図-11～図-16に示す。また、各ケースのひび割れ発生状況を図-17に示す。

破壊形態は、ケース間で大きな違いはなく、概ね以下のような形態となった。天端部ひび割れの発生・進展はまず $\delta=2\text{mm}$ 程度で曲げひび割れが天端内側と左右肩部外側に発生して3ヒンジアーチ状態となった後に、ひび割れの先端が、天端部は荷重板側（地山側）に、左右肩部はトンネル内空側に進展する形態であった。図-18に、例として天端部のひび割れの進展を示す。圧ざの発生・進展は、 $\delta=19\text{mm}\sim 26\text{mm}$ の間において左右肩部内側で圧ざが発生し、 δ が大きくなるとともに圧ざ部分が成長する。Case1（構造欠陥）を例にとると、図-20に示すように、表面において薄い剥離が発生することから始まり、 δ が大きくなるに従い、剥離の範囲が周方向に広がりつつ、剥離・剥落する部分が覆工の内部に深くなっていき、最終的には、手のひら大の塊状の剥落が発生した。

構造欠陥による破壊形態の差異に着目すると、Case2（軽度の材料分離）、Case4（低強度コンクリート）は、Case1と明確な破壊形態の差は見られず、ひび割れの発生・進展の形態、圧ざの発生・進展の形態ともCase1とほぼ同様であった。

一方、Case3（著しい材料分離）では、天端部のひび割れ発生・進展は、アーチの覆工面に骨材が多く露出していることから、目視で精緻に把握することが困難であった。ただし、変形が進展し、ひび割れの幅が大きくなり目視で把握できるようになってからの挙動は、Case1と同様であった。圧ざの発生・進展については、図-21に示すように、Case1とは異なり、その発生・進展を詳細に把握



図-11 Case1（構造欠陥なし）破壊状況（ $\delta=50\text{mm}$ ）



図-12 Case2（軽度の材料分離）破壊状況（ $\delta=50\text{mm}$ ）



図-13 Case3（著しい材料分離）破壊状況（ $\delta=50\text{mm}$ ）

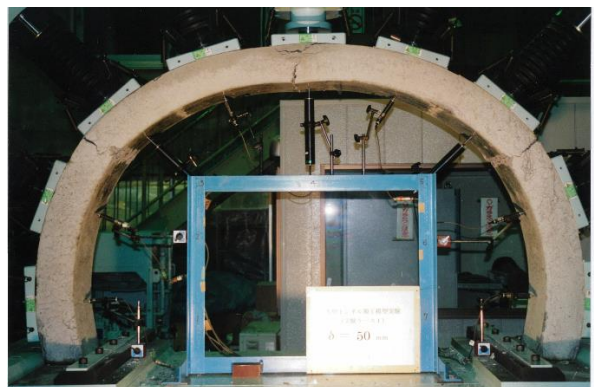


図-14 Case4（低強度コンクリート）破壊状況（ $\delta=50\text{mm}$ ）

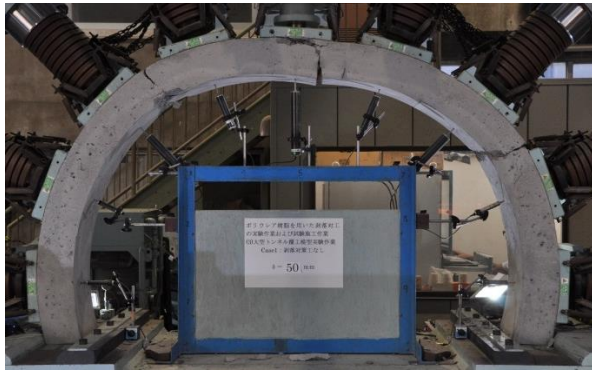


図-15 Case5（初期ひび割れ）破壊状（ $\delta=50\text{mm}$ ）

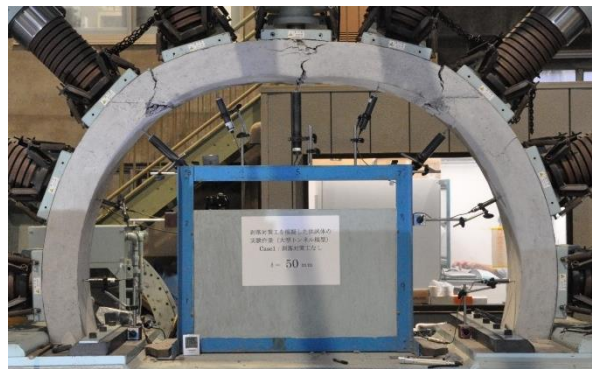


図-16 Case6（コールドジョイント）破壊状（ $\delta=40\text{mm}$ ）

することができず、粗骨材の剥離・剥落が突然発生するようなものであった。

Case5（初期ひび割れ）では、天端部のひび割れ発生・進展は、初期状態で天端部にひび割れが設定されているため、天端右側の初期ひび割れ先端から引張りひび割れが発生し、それが延長するようにしてひび割れが進展する形態であった（図-19）。左右肩部の圧ざの発生・進展は、Case1と同様である。

Case6（コールドジョイント）では天端部のひび割れの発生・進展はCase1と同様である。左右肩部の圧ざの発生・進展は、Case1で圧ざが発生したあたりに水平方向のコールドジョイントがあらかじめ設定されているため、Case1とは異なり、図-22に示すように、コールドジョイントの下側から鉛直方向にひび割れが進展するとともに圧縮破壊が進行するような形態となり、コールドジョイント部右下側の部分が三角柱状に剥離・剥落した。結果的に文献6)における福岡トンネルの剥落と類似した形態であった。

b) 荷重－変位曲線

i) Case2～Case4

まず、材料分離やコンクリートの強度をパラメータとした、Case2～Case4の4ケースについて考察する。図-21に荷重～変位曲線を示す。載荷直後のトンネルの剛性には、大きな違いは見られなかった。いずれのケースとも、

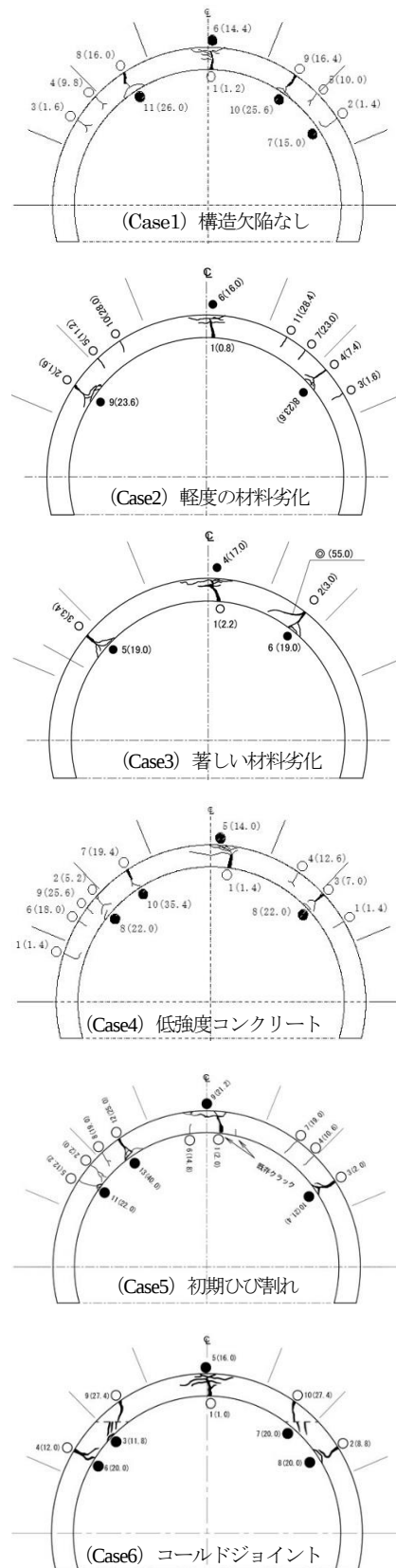
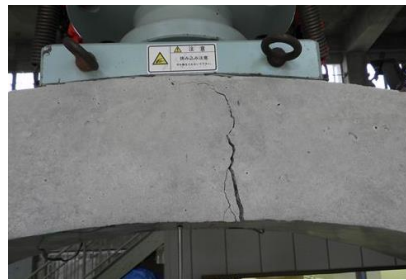


図-17 ひび割れ発生状況



(a) $\delta=5\text{mm}$

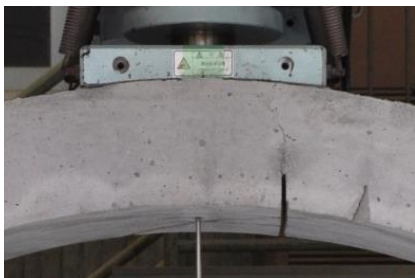


(b) $\delta=10\text{mm}$



(c) $\delta=50\text{mm}$

図-18 Case1（構造欠陥なし）の天端部のひび割れ進展状況



(a) $\delta=5\text{mm}$



(b) $\delta=10\text{mm}$



(c) $\delta=50\text{mm}$

図-19 Case5（初期ひび割れ）の天端部のひび割れ進展状況



(a) $\delta=40\text{mm}$



(b) $\delta=45\text{mm}$



(c) $\delta=50\text{mm}$

図-20 Case1（構造欠陥なし）の圧ぎ進展状況



(a) $\delta=35\text{mm}$



(b) $\delta=40\text{mm}$



(c) $\delta=45\text{mm}$

図-21 Case3（著しい材料劣化）の圧ぎ進展状況



(a) $\delta=35\text{mm}$



(b) $\delta=40\text{mm}$



(c) $\delta=45\text{mm}$

図-22 Case6（コールドジョイント）の圧ぎ進展状況

$\delta=1\text{mm}\sim 3\text{mm}$ 程度で、荷重の低下が見られた。荷重の低下後は、荷重が再度増加していく傾向を示した。ただし、載荷開始直後に比べてトンネルの剛性は小さくなった。これは、図-11～図-14に示すように、クラウン部の内側や左右両肩に曲げひび割れが発生して、構造が3ヒンジアーチに変わったことによるものである。

その後はCase1と同程度の勾配を持って荷重が増加した。しかし、Case3(著しい材料分離)については $\delta=10\text{mm}$ あたりから、Case4(低強度コンクリート)については $\delta=30\text{mm}$ あたりからトンネルの剛性が低下した。最大荷重は、Case2(軽度材料分離)およびCase4(コンクリートの強度低下)はCase1に比べて小さいが、大きな差は表れなかった。一方で、Case3(著しい材料分離)は、 $\delta=10\text{mm}$ あたりから剛性の低下に伴い、最大荷重が小さくなった。

Case3(著しい材料分離)は、覆工厚150mmのうち内空側75mmを材料分離させたコンクリートを打設している。そのため、覆工の圧縮側の強度がかなり小さくなったことが影響し、最大荷重が小さくなったものと考えられる。今回の実験では、全体の強度を小さくしたCase4に比べ、覆工の一部(内空側に設けた模擬模擬ジャンカ部)の圧縮強度を大きく低下させたCase3の方が、覆工の構造耐力が大きく低下するという結果となった。

ii) Case5, Case6

次に、初期ひび割れを有するCase5(初期ひび割れ)、Case6(コールドジョイント)について考察する。図-24に荷重変位曲線を示す。載荷開始直後のトンネルの剛性に大きな違いは見られなかった。いずれのケースとも、 $\delta=1\sim 2\text{mm}$ 程度で、荷重の低下が見られた。荷重の低下後は、荷重が再度増加していく。ただし、載荷開始に比べてトンネルの剛性も小さくなる。これもi)と同様にクラウン部の内側や左右両肩に曲げ引張ひび割れが発生して、構造が3ヒンジアーチに変わったことによるものである。

その後は、Case1と同程度の勾配を持って荷重が増加した。しかし、Case5(初期ひび割れ)においては $\delta=20\text{mm}$ あたりから、Case6(コールドジョイント)については $\delta=28\text{mm}$ あたりから、荷重が一旦低下する、または荷重の増加が緩やかになるといった現象が生じた。特に、Case6(コールドジョイント)は、 $\delta=28\text{mm}$ あたりで、コールドジョイント部に生じた圧ざ部で覆工片が大きく剥落することによりそれ以降は荷重が次第に減少した。

3. まとめ

本稿では、欠陥を有する山岳トンネル覆工に対して、模型実験を行い保有耐力および変形性能を把握した。本実験により得られた知見を以下に示す。

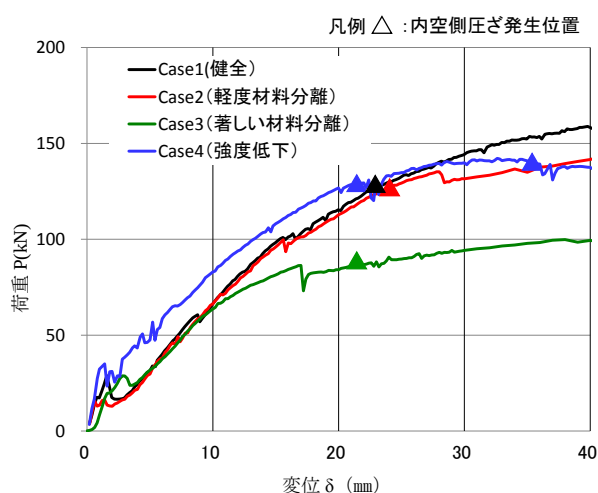


図-23 荷重変位曲線 (Case1～Case4)

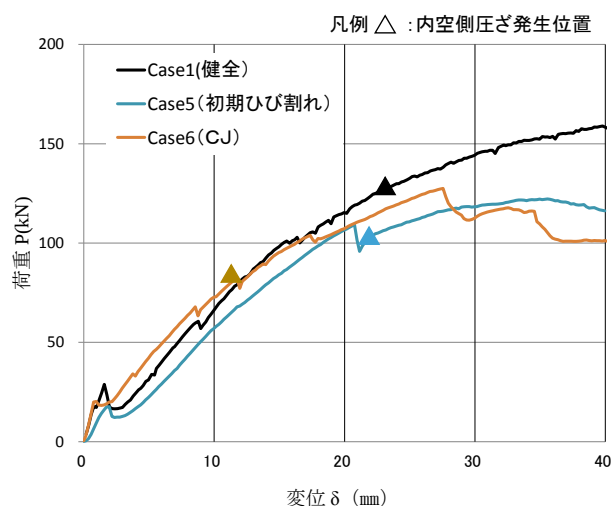


図-24 荷重－変位曲線 (Case1, Case5～Case6)

- ・ 模型実験の結果、発生している欠陥によって多少の違いがあるが、大きな枠組みで捉えると、どのケースにおいても変状の発生順序は、いずれも、①クラウン内部に曲げ引張ひび割れ→②アーチ左右肩部外側に曲げ引張ひび割れ→③アーチ左右肩部内側に圧ざという経過をたどった。これにより破壊の形態については、健全な場合と比べて大きな違いは見られなかった。
- ・ 一方で、局所的な枠組みにて捉えると、天端部に初期ひびわれを有するケースでは、初期ひびわれを設定した箇所において変状が早く進行することにより、健全な場合と比べて天端部の破壊形態が変化した。
- ・ トンネルの剛性や耐力力については、著しい材料分離をさせたケース、初期ひびわれを設けたケース、コールドジョイントを設けたケースでは、これらが弱点となり、健全の場合と比べて大きく低下した。一方で、軽度の材料分離のケースや低強度コンクリートのケースは、全体として強度は小さくなると考えられるが、

トンネル全体から見て大きな弱点箇所が存在しないことにより、健全の場合と比べて大きな低下は見られなかった。

参考文献

- 1) 朝倉俊弘, 小島芳之, 安東豊弘, 佐藤豊, 松浦章夫: トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.493, III-27, pp.79-88, 1994.
- 2) 野城一栄, 平田亮, 岡野法之, 小島芳之: 種々の材料からなる山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する研究, 土木学会論文集F1 (トンネル工学), Vol.71, No.2, pp.78-94, 2015.
- 3) 高橋幹雄, 津野究, 小島芳之: 大型トンネル覆工模型実験装置の開発, 土木学会第61回年次学術講演回講演概要集, III-070, pp.139-140, 2006.
- 4) 岡野法之, 小島芳之, 植村義之: 大型覆工模型実験によるトンネル覆工の変形特性の再現, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演概要集, pp.909-914, 2008.
- 5) 嶋本敬介, 野城一栄, 川上義輝, 興石正己, 井出一直: トンネル覆工の剥落対策としてのポリウレタ樹脂吹付けの模型実験と試験施工, 土木学会論文集F1 (トンネル工学), Vol.73, No.3, pp.I_21-I_31, 2017.

(2018. 8. 10受付)

STUDY ON DEFORMATION AND FAILURE BEHAVIOR OF MOUNTAIN TUNNELS ON LINING DEFECTS

Masaki MIZUTANI and Kazuhide YASHIRO

For the purpose of confirming deformation and failure behavior of mountain tunnel lining with defects, we conducted experiments with one-fifth tunnel lining loading equipment. Experiments were conducted on tunnel lining, which produced mild material separation, remarkable material separation, strength reduction, cracks near the crown portion, and cold joint. Results of the experiment, there is no difference in the order of occurrence of cracks due to structural defects, we obtained the finding that the influence of the structural strength of the lining is greater when the insufficient thickness of concrete like remarkable material separation or deep peeling off of the cold joint part as compared with the case where the strength is small