

インバート形状とトンネル構造耐力の 関連性に関する検討

中里 倫子¹・棗 拓史²・河田 皓介³・砂金 伸治⁴・
大津 敏郎⁵・三上 尚人⁶・田邊 修平⁷

¹ 学生会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: nakazato-rinko@ed.tmu.ac.jp

² 学生会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: natsume-takuto@ed.tmu.ac.jp

³ 正会員 東京都立大学助教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: k_kawata@tmu.ac.jp

⁴ 正会員 東京都立大学教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: nisago@tmu.ac.jp

⁵ 正会員 東日本高速道路株式会社 (〒100-8979 東京都千代田区霞が関 3-3-2)
E-mail: t.otsu.aa@e-nexco.co.jp

⁶ 正会員 東日本高速道路株式会社 新潟支社 (〒590-0917 新潟県新潟市中央区天神 1-1)
E-mail: n.mikami.aa@e-nexco.co.jp

⁷ 正会員 東日本高速道路株式会社 新潟支社 (〒590-0917 新潟県新潟市中央区天神 1-1)
E-mail: s.tanabe.ab@e-nexco.co.jp

供用中の山岳トンネルにおける盤ぶくれに対する対策工の一つとしてインバートの設置が考えられるが、供用中の工事は施工性や経済性の面で課題があると考えられる。本研究では、インバートの形状に着目し、模型実験や数値解析を通して、工期や工事費の削減に資する従来型とは異なる合理的なインバート構造の提案を目指し、新たなインバート形状を仮定した上で、一定程度の耐力力を保持しつつ、施工時間の短縮を図ることが可能となる構造について検討を行った。その結果、従来型の形状よりも荷重条件によっては発揮する耐力力がある程度低下するものの、施工の合理化を図る可能性を有するインバート形状が存在することを確認した。

Key Words: mountain tunnel, invert, heaving, model experiments, numerical analysis

1. はじめに

近年、供用中の山岳トンネルにおいて、完成後長期の時間経過後に盤ぶくれが顕在化する事例が増加している。盤ぶくれは車両の安全な走行を阻害することに加え、長期間放置することで利用者被害を及ぼす恐れがあるため、対策を施す必要がある。盤ぶくれに対する基本的な補強対策の一つとしてインバートの設置が従来から考えられているが、その重要性が改めて示されており、例えば高速道路トンネルにおいては大規模更新事業の一つの手法として位置付けられている¹⁾。

完成後に盤ぶくれが生じる事例に多くみられる共通点

として、トンネル施工時にインバートを設置していなかったことが挙げられる。これは掘削時に地山の状態が比較的良好で、施工時の計測変位も小さかったために、当時の基準ではインバートを設置する必要が生じなかったものの、長期間にわたって地山内の地下水等の影響を受けて周辺地山の強度が低下し、側壁の押出しや路面の隆起が徐々に見られてきているものと考えられる。一方で、施工時にインバートが設置された区間においても、供用後数年の間に盤ぶくれが生じ、結果としてトンネルの耐力力が不足していたことが判明したという事例²⁾も存在する。前者の方が多く報告されているが、いずれにせよ両者の場合において速やかに対策を行う必要がある。

しかし、供用中のトンネルに新たなインバートを施工する際には多くの課題がある。例えば施工面においては、トンネル内の限られた空間での路面下の掘削やインバートコンクリートの打設は作業性が悪く、安全性の確保の検討が必要である。また、経済面においては、狭隘な空間での作業効率の低下による施工期間の長期化や交通規制、安全管理対策の実施等に伴う事業費の増加等が挙げられる。さらに、交通規制に伴う渋滞の発生等の利用者に対する社会的影響も最小限に抑える必要もある。今後、更新等を通じてインバート施工の事例の増加が考えられるが、これらの課題に対応するため、工費や工期を削減できる合理的なインバート構造の検討を行う必要性が高まっていると考えられる。

本研究では、工期や工事費の削減に資する合理的なインバート構造を検討することを目的とし、インバートの形状に着目した。構造的な観点から考えると路盤下を円形に掘削してリング構造とすることがトンネルの耐荷力向上に対して優れていることは自明であるが、施工性の面で劣ることは否定できず、工期を長期化させる一つの要因ともなる可能性がある。そのため、従来型、すなわち逆アーチ形状とは異なる新たなインバート形状を仮定した上で、予め想定した一定の耐荷力を有し、施工時間の短縮を図ることが可能となる構造について、模型実験および数値解析を実施することにより検討を行った。

2. 模型実験

インバート形状の違いによる変状発生時のトンネルの挙動および構造耐力について検討を行うため、様々なインバート形状のトンネル模型を作製し、盤ぶくれや地震時荷重等の外力を模擬した载荷を行う模型実験を実施し生じる変状や挙動について観察した。

(1) 実験装置

図-1 に実験装置の概要および寸法を示す。実験装置は、金属フレームと载荷板、载荷用エアシリンダー及びコンプレッサーで構成されている。図に示すように金属フレーム内に模擬地山とトンネル模型を設置して用いる。金属フレームは内寸500mm四方で深さ25mmである。载荷用エアシリンダーは、トンネル側方と下方の3方に各7本設置している。図の側方2か所はエアシリンダーと模型の間に载荷板があり、エアシリンダーの動きに合わせて载荷板が均一に移動する。また、図の下方は载荷板がなく、シリンダーの先端が直接模型に触れるため、シリンダー寸法毎に個別の変位を与えることが可能である。コンプレッサーの容量から、シリンダー1本当たりの最大载荷荷重は950kPaである。

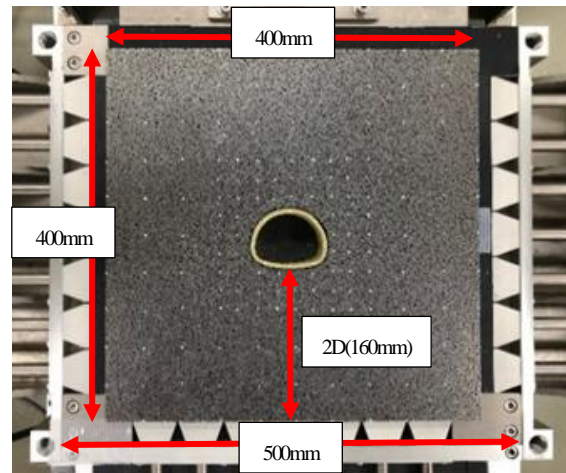


図-1 実験装置の概要

表-1 ステンレス棒積層体諸元

材質	磁性ステンレス
長さ(mm)	40
径φ (mm)	2.5, 5.0
重量混合比(φ2.5 : φ5.0)	3 : 2
内部摩擦角(°)	27
粘着力(N/mm ²)	0
単位体積重量(N/mm ³)	1.08×10 ⁵

表-2 トンネル模型物性値

材料 (重量混合比)	塗り壁材：豊浦砂：水 = 1 : 8 : 4
圧縮強度(N/mm ²)	0.4
引張強度(N/mm ²)	0.06
弾性係数(N/mm ²)	41

(2) 実験模型

模擬地山には、円形ステンレス棒を使用し、積層体とすることで連続体地山としてみなすものとした。ステンレス棒は、直径2.5mmと5.0mmの2種類を使用し、アルミ棒積層体を用いた落とし戸実験の既往研究事例³⁾を参考に、重量混合比3:2の割合で混合した。表-1 にステンレス棒及び模擬地山としての積層体の諸元を示す。

トンネル模型は载荷時の破壊挙動を確認するため、塗り壁材及び豊浦砂、水を混合した塑性材料を使用した⁴⁾。表-2 にトンネル模型の物性を示す。トンネル模型は外径D=80mm、奥行40mmとし、高さは後述するケース1の基本的形状において64.8mmとした。

(3) 実験方法

実験装置にトンネル模型を下辺から 2D (160mm) の位置に横に倒して設置し、周囲をステンレス棒で充填した。 載荷は盤ぶくれを想定し、トンネル模型の下方から中央 3 本のシリンダーで等分布荷重を与える (下方向載荷) ケースと、地震時荷重等の外力を想定し、トンネル模型の右方向から 7 本のシリンダーで等分布荷重を与える (横方向載荷) ケースを実施した。 載荷は、50kPa/20sec のステップで行い、950kPa まで載荷またはトンネル模型が崩壊した時点で実験を終了した。

実験中の観察および計測は、載荷中のひび割れ観察および地山とトンネルの変形挙動の計測を行った。 また、載荷終了後トンネル模型を取り出し、破壊の状況を確認した。 ひび割れは、ステップ毎に都度目視によりトンネル模型の内側の観察を行い、記録を行った。 地山とトンネルの変形挙動の計測は、トンネル模型周り 4D 四方の地山モデルには 2cm 間隔、それより外側は 4cm 間隔、トンネル模型には 45° 間隔で標点を設置して画像解析用カメラでステップ毎に撮影した標点の動き追尾した結果を分析し、変位量やひずみを算出した。 トンネル模型に標点を設置する角度の定義を図-2 に示す。 具体的には、天端部を 0 度とし、左右の側壁に対して回転する方向へそれぞれ正負の値での角度を定義した。 また、具体的に算定するトンネル供試体の変形量はインバート隆起量、天端沈下量、鉛直内空変位量、水平内空変位量とした。

(4) 実験ケース

実験ケースを表-3 に示す。 実験ケースは、載荷方向とインバート形状の組み合わせにより選定した。 載荷方向は、底板のシリンダーから上方向に載荷する「下方向載荷ケース」と右側板から左方向に載荷する「横方向載荷ケース」の 2 つとした。 下方向載荷ケースをケース 1~ケース 4、横方向載荷ケースをケース 5~ケース 8 とした。

インバート部の形状は通常の技術基準類等に示されているケースを「2R 従来型」として基本のケースと考え、それぞれをケース 1 およびケース 5 とした。 以降、側壁の下端部とインバートアーチの中央部を直線で結ぶことで形状を三角形にして半径比率を変化させたもの (「2R 三角」「3R 三角」と称する)、インバート部分の厚さをアーチと側壁部の 2 倍 (10mm) にして平面としたもの (「厚底平面」と称する) とした。 なお、R はアーチ部の半径であり、2R 及び 3R はインバート部のアーチ部に対する半径比率を表す。 すなわち、アーチ部の半径が 40mm であるため、2R 従来型のインバート部の半径は 80mm である。 図-3 にトンネル模型の形状を示す。

表-3 実験ケース

ケース	載荷方向	インバート形状
1	下方向	2R 従来型
2	下方向	2R 三角
3	下方向	3R 三角
4	下方向	厚底平面
5	横方向	2R 従来型
6	横方向	2R 三角
7	横方向	3R 三角
8	横方向	厚底平面

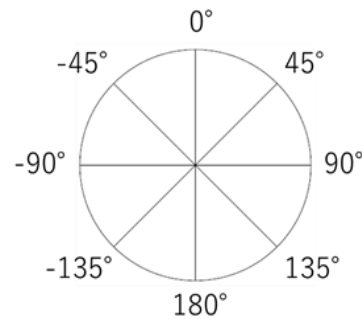


図-2 角度の定義

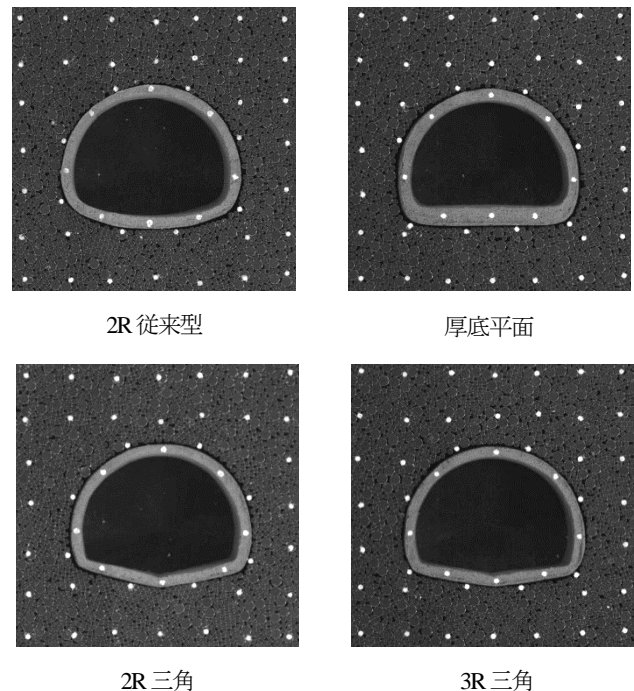


図-3 トンネル模型形状

3. 実験結果

表-4に各ケースのひび割れの発生時の荷重および主な発生場所を示す。模型実験は各ケースにつき複数回実施しており、結果はばらつきを考慮して、特徴が顕著に表れているものを示した。なお、ひび割れは、発生順に「第1、第2、第3ひび割れ」と称する。ただし表中に示すように、供試体の軸方向に対してひび割れが全面に発生しなかったものについては発生時の荷重をカッコ書きで示した。

(1) 破壊の状況

a) 下方向載荷ケース

トンネル模型の下方向から載荷したケース1～ケース4について、構造として致命的となる可能性のある主要なひび割れは、いずれのケースにおいてもインバート中央付近に発生した。インバート中央付近に発生したひび割れの発生時荷重の大きさを比較すると、2R 従来型>3R 三角>厚底平面>2R 三角の順であることがわかる。

一方、第1ひび割れとして、実験で観察されたひび割れすべてを取り上げて上述の検討を行ったが、供試体の縦断方向にわたって発生したひび割れに着目すると、ケース1およびケース3では600～800kPa程度で発生しており、下方向からの荷重に対する発生荷重の差は大きくないものの、ケース2およびケース4ではひび割れ発生荷重がやや低めであることが分かる。ただしばらつきも多く、数値解析や、材料としてコンクリートの使用や供試体の規模を大きくする実験等によるさらなる検証が必要であると考えられる。

第1ひび割れから第2ひび割れの発生までの荷重差を比較すると、2R 従来型>2R 三角>厚底平面>3R 三角の順であることがわかる。2R 従来型および2R 三角は、第1ひび割れから第2ひび割れ発生までの荷重差が大きいことから、初期段階でインバートに変状が生じたとしても構造耐力の限界に至るまでの余裕があると考えられる。2R 三角は、下方向からの載荷に対して三角形の頂点部分が突っ張る状態になることで、条件によっては見かけ上では構造耐力が相対的に大きい構造になる場合があると考えられ、結果として2R 従来型と2R 三角のひび割れ発生荷重の間隔に類似の傾向が表れたと考えられる。一方、3R 三角および厚底平面は第1ひび割れから第2ひび割れ発生までの荷重差が小さいことから、初期の変状が生じてから構造耐力に至るまでの余裕が小さく、ひび割れが生じてから早期に破壊が生じる可能性があると考えられる。特に3R 三角は実験ケースの中で唯一崩壊まで至った形状であることから盤ぶくれのような下方向からの荷重に対して構造耐力としては小さいと考えられる。

表-4 ひび割れ発生時荷重および発生場所

case	ひび割れ発生時荷重(kPa)			主な発生場所
	第1	第2	第3	
1	(350)	800	(850)	インバート中央
	-165°内側	180°内側	165°内側	
2	450	(800)	(850)	インバート中央 隅角部
	180°内側	-150°内側	135°内側	
3	600	750	850	インバート中央 隅角部
	-165°内側	165°内側	180°内側	
4	(350)	550	—	インバート中央 隅角部
	-165°内側	180°内側	—	
5	650	900	—	インバート中央 隅角部
	180°内側	±105°内側	—	
6	700	(800)	(900)	インバート中央 隅角部
	165°内側	150°内側	-150°内側	
7	(400)	750	—	インバート中央 隅角部
	165°内側	-165°内側	—	
8	600	—	—	インバート中央 隅角部
	180°内側	—	—	

b) 横方向載荷ケース

トンネル模型の横方向から載荷したケース5～ケース8について、主要なひび割れは、いずれのケースにおいてもインバート中央付近に発生している。これより、インバート中央付近に発生したひび割れの発生時荷重の大きさを比較すると、3R 三角>2R 三角>2R 従来型>厚底平面の順であることがわかる。下方向からの載荷と比較して、インバート中央付近にひび割れが発生した際の荷重は形状間で大きな差が見られないことがわかる。

第1ひび割れから第2ひび割れの発生までの荷重差を比較すると、3R 三角>2R 従来型>2R 三角（厚底平面は第2ひび割れが発生せず）の順であることがわかる。3R 三角および厚底平面は、第1ひび割れから第2ひび割れ発生までの荷重差が大きいことから、インバートに変状が生じた後に構造耐力の限界までの余裕が大きいと考えられる。横方向からの載荷では、3R 三角および厚底平面は、インバート形状が平面に近い場合、インバートの軸方向に荷重が作用することになり軸力として耐えることで、曲げが作用する可能性がある2R 三角より強い構造となるためであると考えられる。一方、2R 従来型および2R 三角は第1ひび割れから第2ひび割れ発生までの荷重差が小さい傾向がみられることから、初期の変状が発生してから構造耐力に至るまでの余裕が小さいと考えられる。

(2) 変形量

図4以降のグラフ中における縦軸の荷重は、表-5に示す圧力と荷重の関係に従い、エアシリンダーにより载荷した圧力を荷重に変換した値を用いている。また、载荷の初期段階において、変位がほとんど生じない区間がある。これは地山部には微小な間隙があり、シリンダーにより圧力を加えた際に地山の間隙が縮小するため荷重がトンネル模型にうまく伝わらないためと考えられる。なお、圧力は出力するコンプレッサーの圧力であり、地山側の計測値ではないことに注意を要する。また、供試体が小さいことから変位計測等を供試体に直接設置することには限界があることから、供試体や地山に標点を設置して画像解析によって変形量を算出した。

a) 下方向载荷ケース

算出したインバート隆起量、天端沈下量、鉛直内空変位量、水平内空変位量を図4～図7に示す。

インバート隆起量については、3R三角>2R三角>厚底平面>2R従来型の順であることがわかる。3R三角は、

表-5 圧力と荷重の関係（シリンダー1本当たり）

圧力(kPa)	荷重(N)
100	31.4
200	62.8
300	94.2
400	126
500	157

他の形状と比較してインバート隆起量が著しく大きく、下方向からの荷重に対して盤ぶくれが生じやすい構造であると考えられる。一方、2R三角および厚底平面はインバート隆起量が比較的小さく、特に厚底平面は2R従来型とほぼ同値であることから、変形量の観点からは従来と同様にインバートが盤ぶくれを抑制する効果が期待できると考えられる。

天端沈下量については、いずれの形状においても天端が隆起する（载荷方向に移動している）ことがわかり、形状間で値に顕著な差は確認できなかった。

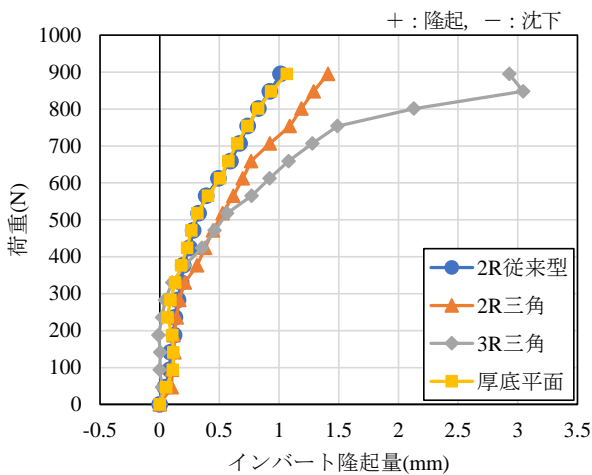


図4 インバート隆起量(下方向载荷)

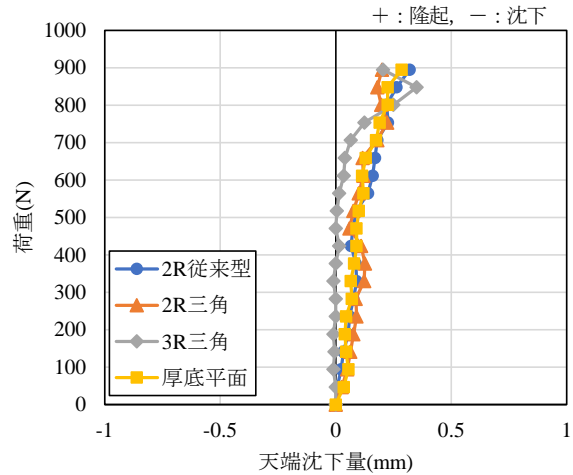


図5 天端沈下量(下方向载荷)

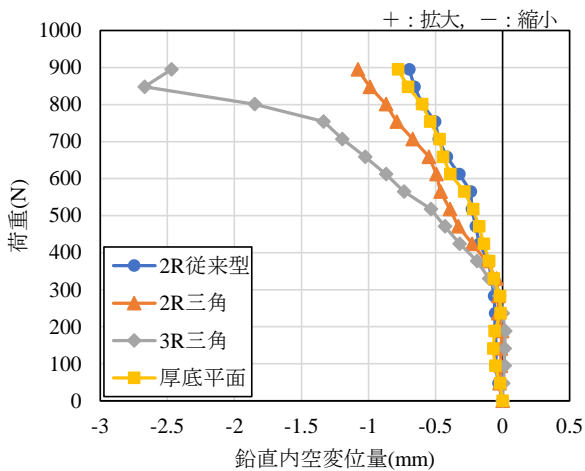


図6 鉛直内空変位量(下方向载荷)

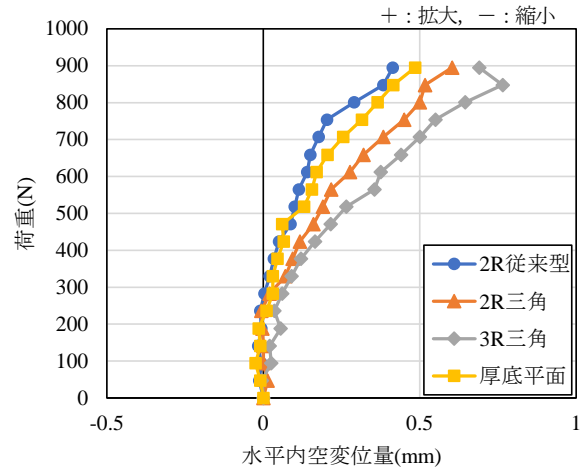


図7 水平内空変位量(下方向载荷)

インバート隆起量と天端沈下量の総和を鉛直内空変位量と算定し、拡大を正、縮小を負として表した。鉛直内空変位量については、3R 三角>2R 三角>厚底平面>2R 従来型の順であり、いずれの形状においても縮小する傾向がみられる。形状間で天端沈下量に概ね差がないため、インバート隆起量に依存している。ただし、地山材料の反力の影響等も考えられることからさらなる検討が必要になる。

水平内空変位量については、3R 三角>2R 三角>厚底平面>2R 従来型の順であり、いずれの形状においても拡大する傾向がみられる。

b) 横方向载荷ケース

算出したインバート隆起量、天端沈下量、鉛直内空変位量、水平内空変位量を図-8~図-11に示す。

インバート隆起量については、3R 三角>厚底平面>2R 三角>2R 従来型の順であることがわかる。3R 三角は、他の形状と比較してインバート隆起量が大きいことがわかる。一方、2R 三角および厚底平面は変位量がほぼ同

値であり、2R 従来型の変位量とも比較的近い値であるといえる。

天端沈下量については、いずれの形状においても天端が隆起する（鉛直方向に移動している）ことがわかり、形状間で値に顕著な差は確認できなかった。

鉛直内空変位量については、3R 三角>厚底平面>2R 三角>2R 従来型の順であり、いずれの形状においても縮小する傾向がみられる。形状間で天端沈下量に概ね差がないため、インバート隆起量に依存していることになる。ただし、地山材料の反力の影響等も考えられることからさらなる検討が必要になる。

水平内空変位量については、いずれの形状においても拡大する傾向がみられる。変位量はすべての形状において0.1mm程度となっており、ほとんど変位していないことがわかる。

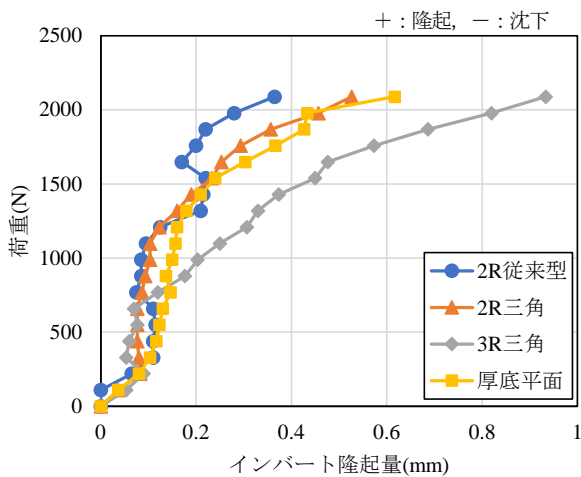


図-8 インバート隆起量(横方向载荷)

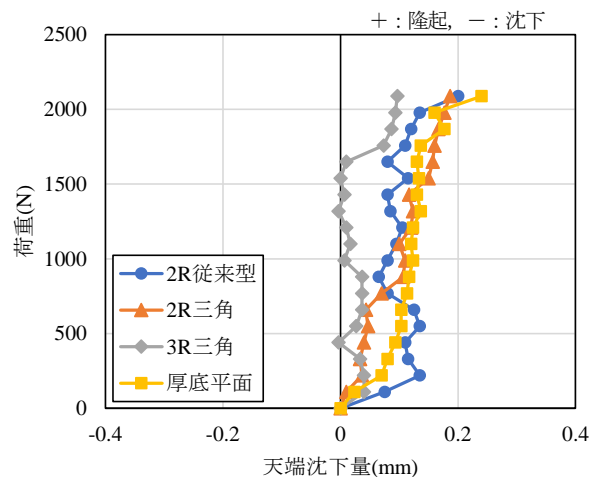


図-9 天端沈下量(横方向载荷)

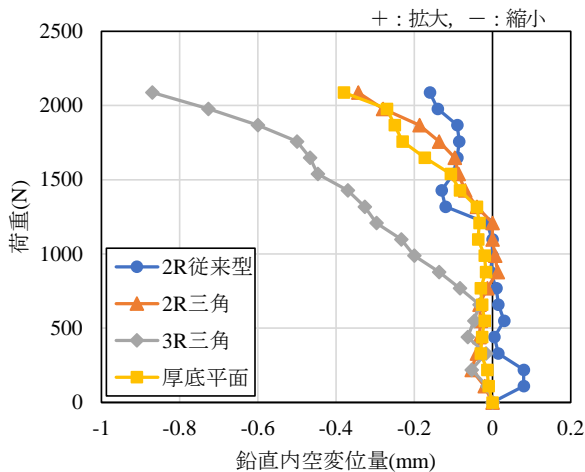


図-10 鉛直内空変位量(横方向载荷)

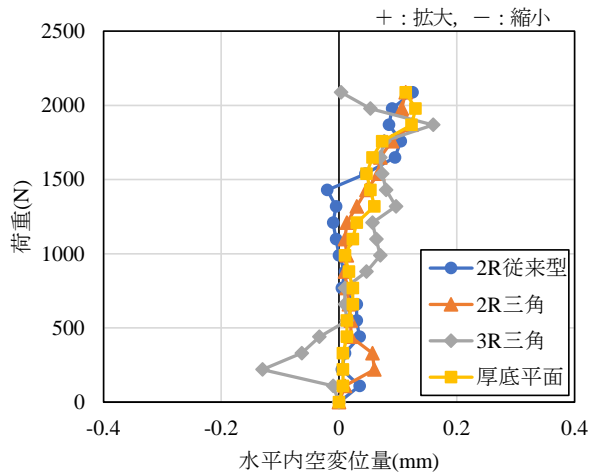


図-11 水平内空変位量(横方向载荷)

(3) まとめ

2R 従来型, 2R 三角, 3R 三角, 厚底平面の 4 種類のインバート形状のトンネル模型に対して, 地山に盤ぶくれを想定した下方向からの载荷および地震時荷重等の外力を想定した横方向からの载荷を行った結果, インバート形状によりトンネル構造物の耐荷力や変形性能に差が生じることを確認した. インバートの形状によっては, 従来の形状と比較して補強効果は低下すると考えられるものもある. 一方で施工期間の短縮など合理的な施工が期待できる可能性を有し, かつ従来の形状と同様に一定の耐荷力が見込める可能性のある形状も存在し, 既設トンネルの補強対策としてのインバート設置において, 従来と異なる形状とすることに検討の余地はあると考えられる.

4. 有限要素法による模型実験の再現解析

3章で述べた実験では, トンネル模型の断面変形量を追跡することは可能であるが, トンネル模型に生じる断面力や地山内での地中応力の変化等が不明確であるため, 得られた結果の妥当性をより詳細に確認することを目的として有限要素法により二次元解析を実施した.

(1) 解析モデル

図-12(a), (b)に解析モデルを示す. 解析領域は実験装置に合わせて幅 400mm, 高さ 400mm とし, トンネルと境界までの離隔は, 側方と下方に 2D (160mm) 確保した. 境界条件は, 下方向から载荷するケースの場合, 上辺は鉛直方向, 両側辺は水平方向を拘束した. 横方向から载荷するケースの場合, 上辺および下辺は鉛直方向, 左側辺は水平方向を拘束した. 载荷条件は, 下方向および横方向载荷ともに, 载荷の境界部に実験データをもとにした強制変位を与えることで実験時の地山モデルの挙動を再現した.

(2) 解析物性値

表-6に解析に用いた物性値を示す. 数値解析を行うにあたり, 実験装置全体で捉えた場合のステンレス棒積層体の弾性係数およびポアソン比が明らかになっていないため, 模型実験の再現解析を行い採用すべき物性値を推定した. 再現解析は標準的なケース 5; 横方向からの载荷の 2R 従来型とし, ポアソン比を 0~0.49, 弾性係数を 0.9~900N/mm² の範囲で変化させ, インバート隆起量, 天端沈下量, 鉛直内空変位量, 水平内空変位量の値を再現した.

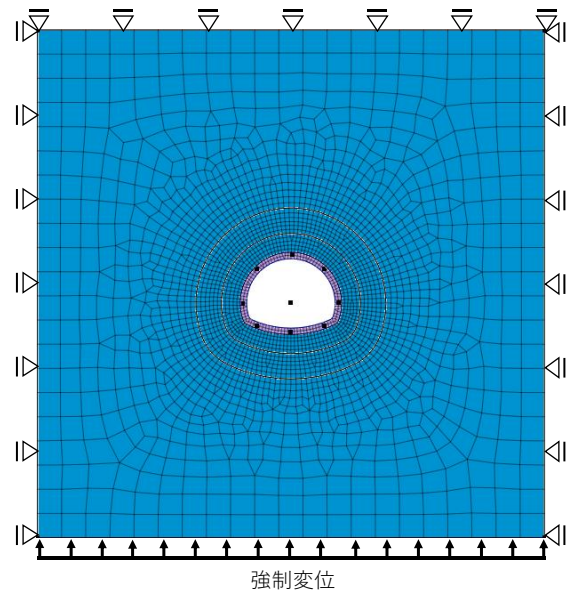


図-12(a) 解析モデル(下方向载荷)

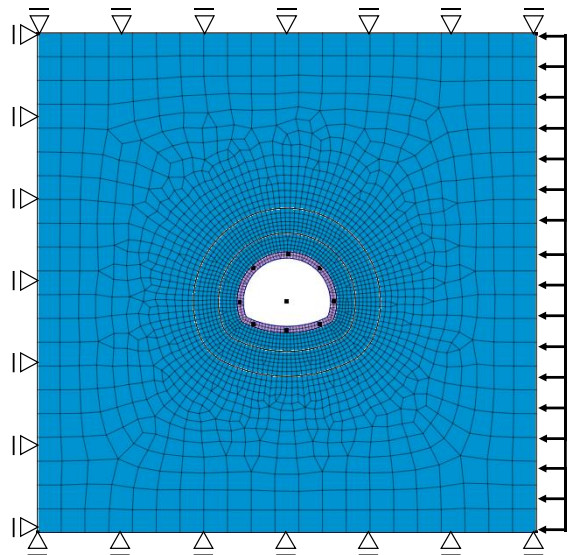


図-12(b) 解析モデル(横方向载荷)

表-6 解析物性値

トンネル模型	弾性係数(N/mm ²)	41.2
	ポアソン比	0.3
	湿潤体積重量(N/mm ³)	1.05 × 10 ⁵
ステンレス棒積層体	弾性係数(N/mm ²)	0.9
	ポアソン比	0.49
	単位体積重量(N/mm ³)	1.08 × 10 ⁵
	粘着力(N/mm ²)	0
	内部摩擦角(°)	27

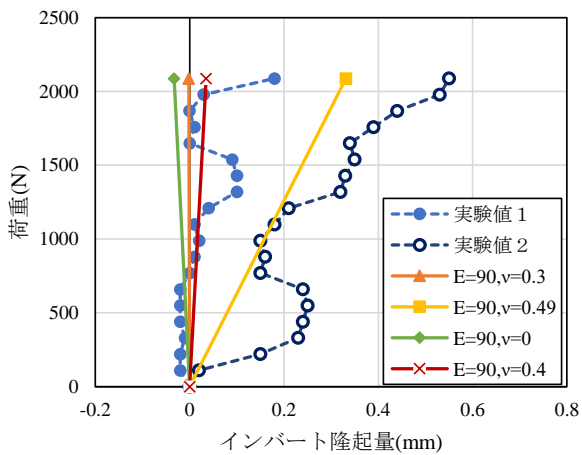


図-13 ポアソン比の検討の例

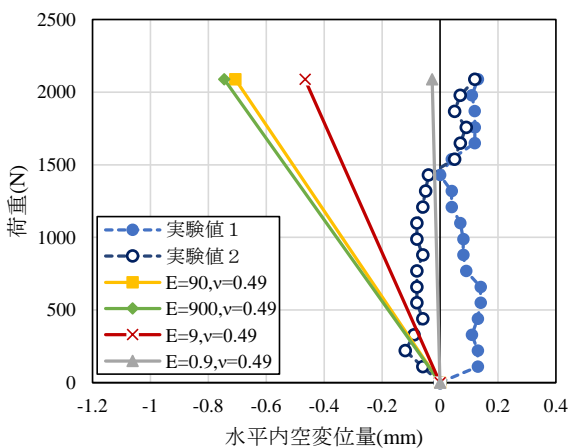


図-14 弾性係数の検討の例

再現解析の結果を図-13、図-14に示す。この結果から、ステンレス棒積層体のポアソン比は0.49、弾性係数は0.9N/mm²とした。

トンネル模型自体の物性値は、過去に実施した一軸圧縮試験の結果⁴⁾を参考に設定した。なお、本解析では地山およびトンネル模型は弾性体とした。

(3) 解析ケース

解析ケースは模型実験と同様のケース1～ケース8について解析を実施した。

(4) 解析結果

図-15、図-16に下方向載荷および横方向載荷における950kPa載荷時の変位を強制変位として与えた際の最大主応力のコンター図を示す。

トンネル模型に生じた応力について比較を行ったところ以下のような傾向がみられた。

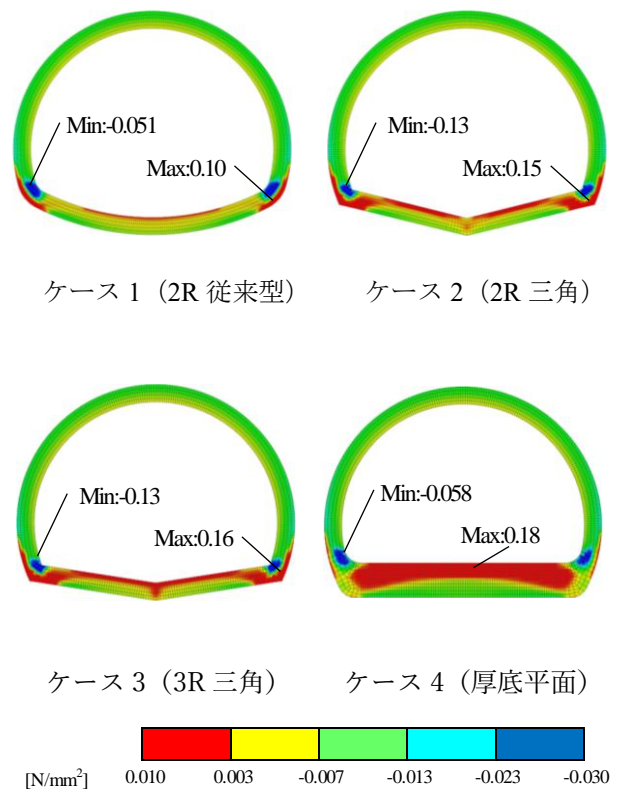


図-15 最大主応力コンター図(下方向載荷)

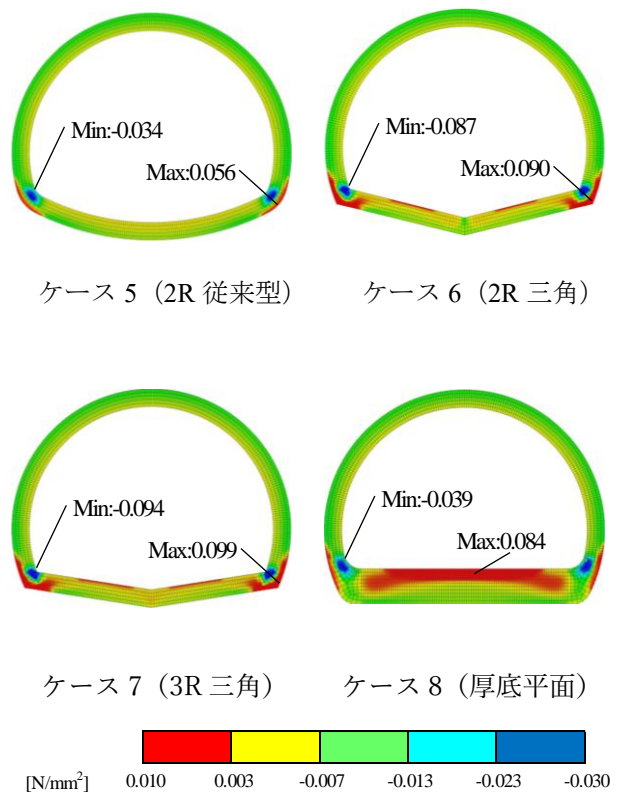


図-16 最大主応力コンター図(横方向載荷)

a) 下方向荷重ケース

全ケースにおいて、隅角部内側に圧縮応力、隅角部外側およびインバート内側に引張応力が発生した。

2R 三角および 3R 三角の最大・最小応力の値は概ね一致したが、3R 三角は、2R 三角と比較して、三角形の頂点部分に引張応力が発生した。これより、半径比を変更することで、インバート中央部分に発生する応力を低減することができる可能性がある。

厚底平面は、隅角部外側の応力を低減する効果があると考えられる。一方、インバート内側に引張応力が広く分布した。これは、平面形状であることにより下方の突き上げに対して曲げが発生しているためと考えられる。

b) 横方向荷重ケース

全ケースにおいて、隅角部内側に圧縮応力、隅角部外側に引張応力が発生した。

2R 従来型は、インバート部分に引張応力の顕著な分布はみられず、インバート部分の応力を低減する効果があると考えられる。

2R 三角および 3R 三角は、応力の値および応力の分布範囲は概ね一致する。また、三角形の梁部分に引張応力が集中する傾向がみられる。

厚底平面について、隅角部外側の応力が低減する効果があると考えられる。一方、インバート内側に引張応力が広く分布した。これは、平面形状であることにより下方の突き上げに対して曲げが発生しているためと考えられる。

以上より、数値解析で確認した引張応力の発生箇所と模型実験におけるひび割れの発生箇所は概ね一致しており、本数値解析は模型実験を再現できていると考えられる。そのうえで、数値解析の結果からインバート形状の違いにより、盤ぶくれや地震時荷重等外力が生じた場合にインバート部に生じる応力の値や応力の分布範囲に差異が生じることを確認した。

6. 結論

本研究では、工期や工事費の削減に資する合理的なインバート構造を検討することを目的とし、従来の逆アーチ形状とは異なる新たなインバート形状の耐荷力に関して、模型実験および数値解析を実施することにより検討を行った。

本研究により得られた結論をまとめると、以下の知見が得られた。

- 1) インバート形状の違いによるトンネル構造耐力の関連性に関するトンネル模型実験について、地山に盤ぶくれを想定した下方向からの荷重や地震時等を想定した横方向からの荷重を作用させる荷重実験を行った。その結果、インバート形状によりトンネル構造物の耐荷力および挙動に差が生じることを確認した。また、形状によっては、従来のインバート形状よりも荷重条件によっては発揮しうる耐荷力が低下するものの、施工の合理化が図れる可能性があるため、検討の余地があると考えられる形状も存在すると明らかとなった。
- 2) 有限要素法を用いた数値解析について、模型実験の結果の再現が可能であることおよび、想定される理論的な現象と実験結果が整合していることにより模型実験の結果の妥当性を示した。しかし、模型破壊後の挙動において実験結果と数値解析で差異が生じるものも存在したため、さらなる検討が必要であると考えられる。

本研究では、模型実験および数値解析を通してインバート形状とトンネル構造耐力の関連性について検討したが、本研究で行った模型実験は極めて小規模であり、供試体の誤差もあるため定量的な比較に関してはさらなる検証が必要である。今後は、荷重や地山の条件を考慮に入れつつ、複数回の実験を行うことに加え、より規模の大きな実験、解析的な検証、具体的な施工に関する検討を踏まえる必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 中野清人：高速道路の更新事業におけるトンネル大規模修繕の計画上の留意点，基礎工，pp.2～6，2020.5
- 2) 小林寛明，井浦智実，上野光，渡辺和之，嶋本啓介，伊藤直樹：山岳トンネルの盤ぶくれとその対策に関する基礎的研究，土木学会論文集 F1(トンネル工学)，Vol.71，No.3(特集号)，I_80-I_93，2015
- 3) 土倉泰：アルミ丸棒積層体のすべり破壊実験とシミュレーション，地盤工学発表会発表講演集 JGS38(0)，435-454，2003
- 4) 森田倫先，砂金伸治，西村和夫：トンネル覆工の大変形破壊挙動に関する実験的考察，土木学会トンネル工学報告集第 30 巻，I-40，2020.11

(2022. 8. 26 受付)

STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN SHAPE OF INVERTED ARCH STRUCTURE AND TUNNEL STRUCTURAL STRENGTH

Rinko NAKAZATO, Takuto NATSUME, Kosuke KAWATA, Nobuharu ISAGO,
Toshiro OTSU, Naoto MIKAMI and Shuhei TANABE

One of the possible countermeasures to prevent the heaving of a mountain tunnel in service is the construction of a new invert, but in-service construction is considered to have problems in terms of workability and economic efficiency. In this study, we focused on the shape of inverts, and through model tests and numerical analysis, we aimed to propose a rational invert structure that contributes to reducing construction time and costs. A certain structure was examined to reduce construction time while maintaining a certain level of load-bearing capacity.