

変状対策としての 複合構造インバートの形状効果

松永 拓¹・土門 剛²・小川 澄³・安井 成豊⁴・西村 和夫²

¹ 学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail:matsunaga-taku@ed.tmu.ac.jp

² 正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢 1-1)

³ 正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

⁴ 正会員 社団法人施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

供用中トンネルの片側の交通を確保したままでのインバート施工が可能な、コンクリートと鋼管による複合構造インバートの形状効果について数値解析により検討を行った。その結果、コンクリート部と鋼管部の剛性差が大きいためか、鋼管部の形状ごとに比較すると直線が応力的に最も有利であり、最も耐力の高い形状であることがわかった。一方、コンクリート部の形状の違いは構造に影響を及ぼさないという結果となった。また、覆工とコンクリート部の接続部にゴム要素を組み入れた解析も実施し、応力緩和効果を検討した。その結果、接続部のゴムマットによる補強は効果的であるといえるが、その場合インバートのコンクリートの上面と、鋼管接続部の補強が必要であるということがわかった。

Key Words : hybrid structure invert , deformed tunnel , shape effect , two-dimensional FEM

1. はじめに

近年、高速道路トンネルにおいて、舗装版の隆起等の変状現象を生じることがある。インバート部に変状を起こしているトンネルは供用後数年を経過しているものが多く、変状原因としては塑性圧によるものがほとんどである。この塑性圧は粘土鉱物が吸水膨張することで劣化が進行し、塑性域が拡大したことにより発生したものと考えられる。

舗装版の隆起等の変状現象は走行性の低下やトンネルの安定性に問題が生じさせるため、道路管理上の対策として、隆起の変位量が小さい場合には舗装のオーバーレイで対応している。しかし、回数が多くなるとその方法では対処できなくなり、新たにインバートの設置を行う。この場合、インバートによる補強工は、舗装面下を開削する工事となり、交通開放状態での施工が困難であるため、通行止め等の交通規制が必要である。

旧日本道路公団では、変状した二車線トンネルへのインバート設置を、四車線化時や四車線化後に新設トンネルや変状していないトンネルを一時的に対面交通とし交通を切り替え、変状したトンネルを通行止めにして施工した事例がある。この際、単なる交通の切り替えだけでなく、対象トンネルの前後を含めた路線を対面交通とするとともに、トンネル内設備の変更等、高速道路特有の

配慮が必要となる。

インバートを設置するのと同様な目的での対策工として、ロックボルト工やマイクロパイル工等による路盤下補強工がある。路盤下補強工は、片側車線規制でも可能であるが、旧日本道路公団での路盤下補強工の施工事例は、緊急対策として行われたものであり、結果的にはこれらの対策では完全に変状を抑えることができず、最終的には恒久対策としてインバート補強工を行っている。

今後暫定二車線区間が増加する中で、供用中のトンネルにおいても、四車線化工事の前に変状対策工としてインバートを設置しなければならない区間が生じる可能性もある。したがって、供用下での片側車線規制によるインバート施工方法の確立が必要であると考えられる。

そこで、供用中トンネルの片側の交通を確保したままでのインバート施工が可能な、コンクリートと鋼管による複合構造のインバート補強工（以下、複合構造インバート）を考案した。

本研究では複合構造インバートにおいて、鋼管部の曲率半径、コンクリート部の形状などをパラメータとして、二次元FEM解析によるパラメトリックスタディを実施し、複合構造の形状効果を明らかにすることを目的とした。

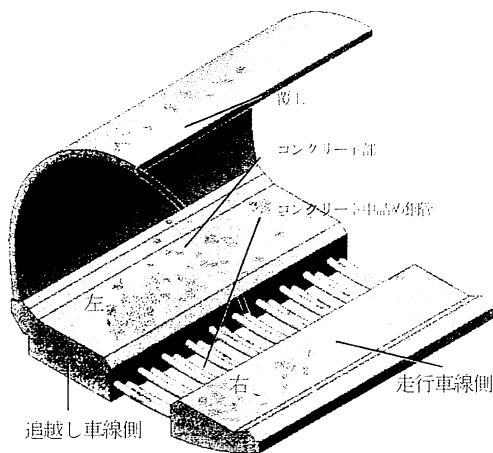


図-1 複合構造インバートの概要

2. 複合構造インバートの概要

(1) 構造

複合構造インバートの基本とする構造を図-1に示した。左右のコンクリート部で中詰めコンクリート鋼管を支持している構造になっている。

鋼管は、奥行き方向に連続するものではなく、離隔のある配置になっている。また、 $\phi 267\text{mm}$ のものを上下二段の千鳥に交差する形で配置し、上下二段の鋼管の中心が曲率半径 $R=10\text{m}$ のインバートの中心とトンネル中心において同じ位置になるように配置している。鋼管部の曲率半径は盃山トンネルのインバート部と同様な $R=10\text{m}$ としている。

鋼管を発進させる追越し車線側のコンクリート部の形状は、鋼管を打設する施工機械を配置するためフラットになっている。走行車線側のコンクリート部の形状は、底面が曲率半径 10m の曲線になっている。走行車線側はコンクリートを打設するのみでよいので、曲線にしている。

(2) 施工方法

施工手順を図-2⁹⁾に示した。追越し車線側を通行止め(図中①)にし、トンネル下部のインバート部分を掘削し作業スペースを確保(図中②)する。次に走行車線側に向かって曲がり鋼管の打設(図中③)を行う。鋼管の打設が完了後、作業スペースにコンクリートを打設し覆工と鋼管部を接続(図中④)する。その後、車線を切り替え、走行車線側を通行止め(図中⑤)にし、インバート部分を掘削し施工してある鋼管の先端を掘り出し(図中⑥)、鋼管の先端を巻き込むようにコンクリートを打設(図中⑦)する。これによりトンネルを閉合構造とし、インバートとしての機能を有することができる。

片側の交通を確保したままの施工であり、インバート

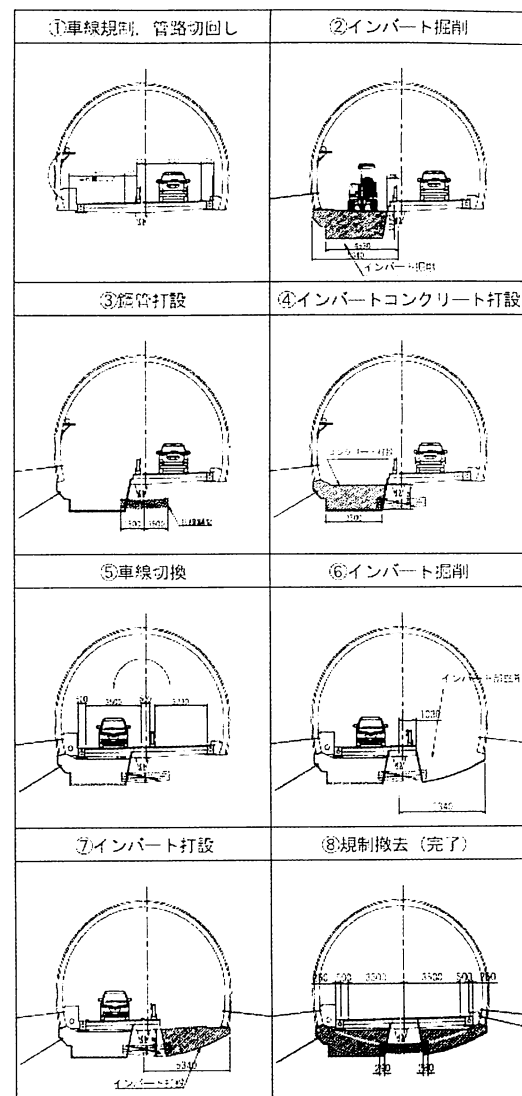


図-2 施工手順⁹⁾

部分の中央は非開削にしているため走行路は十分な幅員を確保している。また、鋼管の打設には曲がりボーリング工法での施工となっていて、幅広い地質に対応が可能になっている。

3. 解析手法

二次元FEMによる線形弾性解析により複合構造インバートの形状効果の検討をおこなった。解析ソフトとしてはISNAを使用した。

(1) 解析モデル

インバート構造にどの程度の荷重が作用しているか明確にし、耐力評価をおこなうため、地山を含めない覆工とインバート構造モデルとした。基本構造の覆工とインバート構造モデルを図-3に示した。

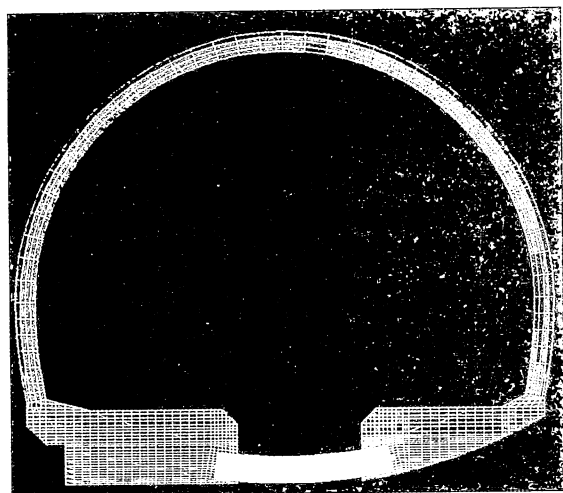


図-3 基本構造の解析モデル

表-1 物性値

	E(N/mm ²)	ポアソン比	備考
コンクリート中詰め鋼管 (ソリッド要素置換)	11500	0.2	φ267mm
覆工	22000	0.2	30cm
インバートコンクリート	22000	0.2	

(2) 物性値

インバート部のコンクリート中詰め鋼管、覆工、インバート部のコンクリートの物性値を表-1に示した。

覆工とインバート部のコンクリートの物性値は一般的な値とした。コンクリート中詰め鋼管はコンクリートとの接続部での応力を評価するため、図-4のようにコンクリート中詰め鋼管剛性を換算剛性として近似で求めた二次元平面ソリッド要素とした。

(3) 荷重条件と支持条件

載荷圧(膨張圧)は初期土圧の15%の0.3MPaとした。載荷圧は構造条件として盃山トンネルの事例が最大と考えた。そのため、盃山トンネルを二次元有限要素でモデル化し、インバート設置後、トンネル周辺に膨張圧を作用させ、インバートコンクリートの応力がコンクリート圧縮強度に達する膨張圧を試行錯誤的に求めた検討事例を参考にしている。

荷重条件と支持条件を図-5に示した。膨張圧は外周に作用させた。ただし、鋼管部については上段下段それぞれの下面に0.15MPaを作用させた。支持条件は剛体の変位のみを拘束した。

(4) 解析ケース

鋼管部の曲率半径とコンクリート部の形状の解析ケースを表-2に示した。

a) 鋼管部の曲率半径

鋼管部において、基本構造としては盃山トンネルのイ

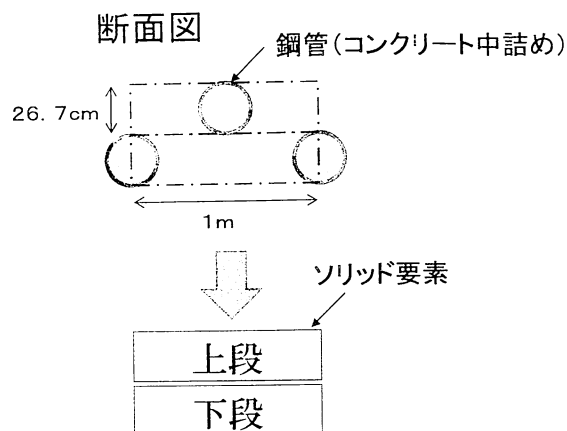


図-4 ソリッド要素の置換

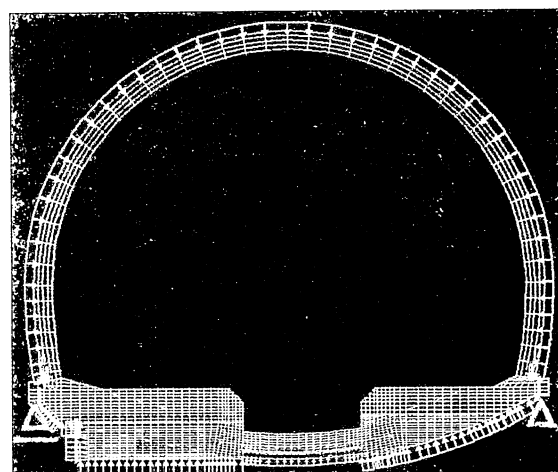


図-5 荷重条件と支持条件

表-2 解析ケース

コンクリート部の形状	両方アバットタイプ	両方アバットタイプ	両方アバットタイプ
鋼管部の曲率半径			
R=10m	0	0	0
直線	x	0	x
R=7m	0	0	0
R=5m	0	0	0

ンバート部と同様なR=10mとしている。しかし鋼管部の形状(曲率半径)を変えることにより、より耐力の高い構造にすることができると考えられる。また、施工性を考えるとR=10mの場合、鋼管施工時に施工機械と既設覆工とが干渉してしまう事が考えられる。これらの構造的、施工的観点から構造を評価する際に、鋼管部の曲率半径による形状効果を明らかにすることが必要である。

よって、鋼管部の形状(曲率半径)の異なる4ケースにおいて解析を行うことで、形状効果を明らかにした。鋼管部の曲率半径R=10m, 7m, 5m及び直線の4ケースで比較検討した。曲線のケースではコンクリート部の形状を片方アバットタイプとし、直線のケースではコンクリートの形状を両方アバットタイプとした。

b) コンクリート部の形状

コンクリート部において、基本構造としては追越し車線側のインバートコンクリートの形状は、施工機械を考慮し、底面をフラットにしている。走行車線側のインバートコンクリートの形状は、コンクリートを打設するのみでよいので、底面を曲線にしている。しかし、施工性を加味すると、底面をフラットの形状にしたほうが有利だとも考えられる。これらの構造的、施工的観点を考える際に、コンクリート部の形状効果を明らかにすることが必要である。

よって、コンクリート形状の異なる3ケースにおいて解析を行うことで、形状効果を明らかにし、応力的に顕著な違いがみられるかを検討した。インバートコンクリートの底面がフラットなものをアバット形状、曲線なものを逆アーチ形状とした。コンクリート部の形状を片方アバットタイプ、両方アバットタイプ、両方逆アーチタイプの3ケースで比較検討した。片方アバットタイプは基本構造とし、追越し車線側をアバット形状、走行車線側を逆アーチ形状の構造とした。両方アバットタイプは追越し車線側、走行車線側ともにアバット形状の構造とした。両方逆アーチタイプは追越し車線側、走行車線側ともに逆アーチ形状の構造とした。鋼管部の形状を直線にすると片方アバットタイプと両方逆アーチタイプの場合、コンクリート部を通り抜ける構造となってしまう。そのため鋼管部の形状は曲線とし、曲率半径 $R=10m$ 、 $R=7m$ 、 $R=5m$ で検討した。なお、本報告では鋼管部の曲率半径 $R=7m$ とした解析結果のみ示した。

c) 覆工とインバート接続部

複合構造インバートは剛性のコントラストにより覆工とインバートコンクリートの接続部に応力が卓越している。そこで、覆工とコンクリート部の接続部にゴム要素を組み入れた解析を実施し、応力緩和効果を検討した。ゴム要素の物性値を表-3に示した。

4. 解析結果

(1) 鋼管部の曲率半径

コンクリート部(覆工も含む)への影響と鋼管部への影響に分けて形状効果を検討した。4つのケースにおいてコンクリート部(覆工も含む)と鋼管部の最大引張応力と最大圧縮応力の値を表-4に示す。鋼管部の値は二次元解

表-3 ゴム要素の物性値

	ヤング率 (N/mm^2)	ポアソン比	伸び率 (%)	引張強度 (MPa)	備考
ゴム要素	2.73	0.48	550	15	厚さ:10mm

析であるため、単位奥行き当たりの鋼管と中詰めコンクリートの平均値となっている。

a) コンクリート部(覆工も含む)への影響

すべてのケースで最大主応力は覆工とインバートコンクリートの接続部の外側に卓越し、最小主応力は覆工とインバートコンクリートの接続部の内側に卓越した。

最大引張応力は右側の覆工との接続部に発生した。最大圧縮応力は左側の覆工との接続部に発生した。これは覆工とインバートコンクリートにおける剛性のコントラストにより生じた応力集中であると考えられる。

表-4からコンクリート部において4ケースを比較すると、直線での最大引張応力、最大圧縮応力が最も小さいのがわかる。また最も応力が大きくなったのは $R=5m$ である。よって、直線が最も耐力の高い構造となっており、通常のインバートの特性(R が小さい方が耐力が大きい)と異なっている。コンクリート部と鋼管部の剛性差が大きいためと推定されるが検証する必要がある。

b) 鋼管部への影響

最大主応力は上段鋼管の上面と上段鋼管のインバートコンクリート接続部に卓越し、最小主応力は下段鋼管の下面に卓越した。

すべてのケースで最大引張応力は上段鋼管の上面に発生した。走行車線側のインバートコンクリートから追越し車線側のインバートコンクリートまでの鋼管部(非開削部分)における上段鋼管の上面の主応力の値を図-6に示した。直線とその他の曲線で最大引張応力発生部位が異なるのがわかる。直線では上面のインバートコンクリート接続部に発生し、その他の曲線では上面の中央部に発生した。

表-4 最大引張応力・最大圧縮応力(鋼管部の曲率半径)

	コンクリート部(覆工も含む)		鋼管部	
	最大引張応力	最大圧縮応力	最大引張応力	最大圧縮応力
$R=10m$	51.3	37.4	34.2	44.4
直線	48.4	35.2	29.6	33.5
$R=7m$	51.6	37.7	35.9	49.1
$R=5m$	53.9	38.8	38.1	54.2

単位: MPa

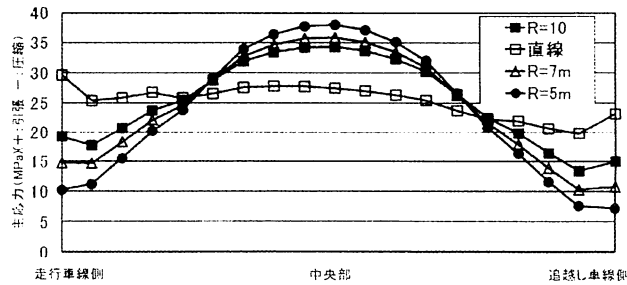


図-6 上段鋼管の上面の主応力(単位奥行き当たりの平均値)

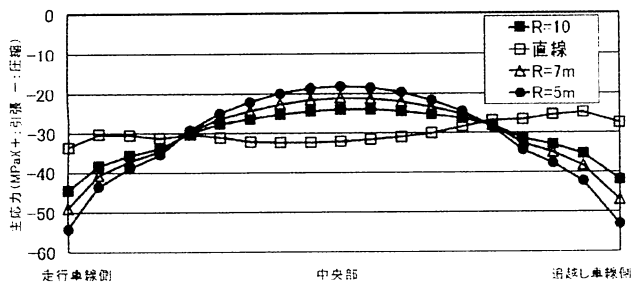


図-7 下段鋼管の下面の主応力(単位奥行き当たりの平均値)

表-5 最大引張応力・最大圧縮応力(コンクリート部の形状)

	コンクリート部(覆工も含む)		鋼管部	
	最大引張応力	最大圧縮応力	最大引張応力	最大圧縮応力
片方アバットタイプ	51.6	37.7	35.9	49.0
両方アバットタイプ	52.1	37.6	36.1	49.2
両方逆アーチタイプ	52.3	38.0	36.1	49.9

単位: MPa

最大圧縮応力は下段鋼管の下面に発生した。図-6と同様に、非開削部分における下段鋼管の下面における主応力の値を図-7に示す。すべてのケースで下面のインバートコンクリート接続部に発生したのがわかる。

表-4から鋼管部において4ケースを比較すると、直線での最大引張応力、最大圧縮応力が最も小さいのがわかる。また最も応力が大きくなったのはR=5mである。コンクリート部への影響に比べ、4ケースで最大応力の差が顕著にみられた。また、コンクリート部への影響と同様に、直線が最も耐力の高い構造であると考えられ、また、曲率半径が大きくなるほど膨張圧に対して有利な構造であると考えられる。

(2) コンクリート部の形状

コンクリート部(覆工も含む)への影響と鋼管部への影響に分けて形状効果を検討した。3つのケースにおいてコンクリート部(覆工も含む)と鋼管部の最大引張応力と最大圧縮応力の値を表-5に示す。鋼管部の値は二次元解析であるため、単位奥行き当たりの鋼管と中詰めコンクリートの平均値となっている。

a) コンクリート部(覆工も含む)への影響

すべてのケースで最大主応力は覆工とインバートコンクリートの接続部の外側に卓越し、最小主応力は覆工とインバートコンクリートの接続部の内側に卓越した。

最大引張応力は右側の覆工との接続部に発生した。最大圧縮応力は左側の覆工との接続部に発生した。これは覆工とインバートコンクリートにおける剛性のコントラストにより生じた応力集中であると考えられる。

表-5からコンクリート部において3ケースを比較する

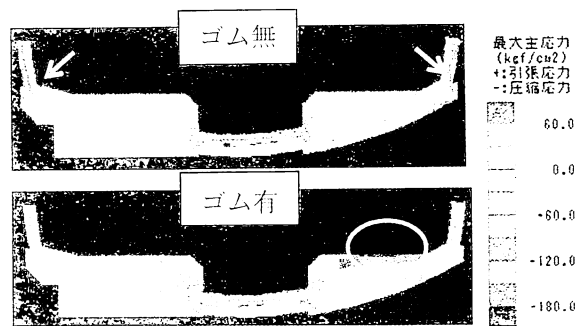


図-8 最大主応力図

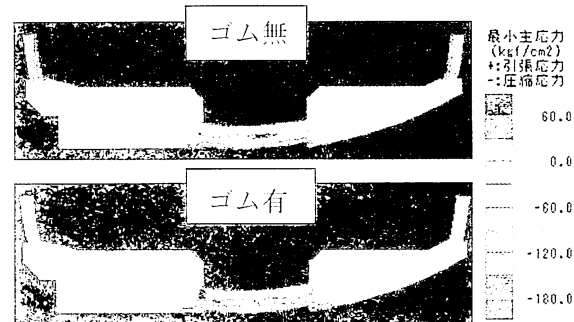


図-9 最小主応力図

と、最大引張応力の値に大きな差はないといえる。同様に最大圧縮応力の値でも大きな差はないといえる。よって、コンクリート部の形状の違いは影響を及ぼさないと考えられる。

b) 鋼管部への影響

すべてのケースで最大主応力は上段鋼管の上面と上段鋼管のインバートコンクリート接続部に卓越し、最小主応力は下段鋼管の下面に卓越した。

最大引張応力は上段鋼管の上面中央に発生した。最大圧縮応力は下段鋼管のインバートコンクリート接続部に発生した。

表-5から鋼管部において3ケースを比較すると、最大引張応力の値に大きな差はないといえる。同様に最大圧縮応力の値でも大きな差はないといえる。よって、コンクリート部への影響と同様に、コンクリート部の形状の違いは影響を及ぼさないと考えられる。

(3) 覆工とインバート接続部

ゴム要素を組み込んでいないケース(ゴム無)と組み込んだケース(ゴム有)の最大主応力を図-8に示し、また最小主応力を図-9に示した。ゴム要素を組み込んだことにより、覆工とインバートの接続部(図-8の矢印付近)の応力が引張応力は約1/10, 圧縮応力は約1/4の値に低減した。しかし、インバートの右コンクリートの上面(図-8の白丸付近)と、上部の鋼管のコンクリート接続部上面にゴム要素を組み込んでいないケースより大きな引張応力が発生した。

よって、接続部のゴムマットによる補強は効果的であるといえるが、その場合インバートのコンクリートの上面と、鋼管接続部の補強が必要である。

5. まとめ

複合構造インバートの実現可能性において、これらの構造的、施工的観点から構造を評価する際に、形状効果を明らかにすることが必要であった。

そこで今回は、鋼管部の曲率半径、コンクリート部の形状、覆工とコンクリート部の接続部に着目し、二次元FEMによるパラメトリックスタディを実施し、複合構造の形状効果を明らかにした。

複合構造インバートは覆工とインバートコンクリートの接続部に応力が卓越し、鋼管部では上段鋼管の中央上部で引張、下段鋼管のインバートコンクリート接続部下部で圧縮が卓越する。接続部での応力の卓越は剛性のコントラストにより生じた応力集中であると考えられる。

鋼管部の曲率半径では、直線が最も耐力の高い構造となった。コンクリート部と鋼管部の剛性差が大きいためと思われるが検証する必要がある。

コンクリート部の形状では、3ケースにおいて、応力の差はみられなかった。よって、コンクリート部の形状の違いは構造の耐力に影響を及ぼさないと考えられる。

覆工とコンクリート部の接続部では、ゴムマットによる応力緩和策は効果的であるといえるが、その場合インバートのコンクリートの上面と、鋼管接続部の補強が必要であると考えられる。

今後の検討課題を列挙すると以下のようなものである。

- ・鋼管部の形状効果を明確に検証するためにはインバートコンクリート部を小さくすることにより、剛性のコントラストを小さくし検証していく必要がある。
- ・本解析の結果を踏まえて、応力が卓越した部位にたいしての補強を検討する必要がある。

- ・本解析でおこなった、補強の検討については平面二次元モデルに置換したことによる応力集中が生じていることから、三次元モデルで詳細検討をする必要がある。
- ・本研究の結果と三次元解析による複合構造全体の解析結果をふまえて要素実験、模型実験での検討が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会トンネル変状メカニズム研究小委員会：トンネルの変状メカニズム，pp35-892003
- 2) 高速道路総合技術研究所トンネル研究室：盤膨れに伴うトンネルの補強対策工法に関する手引き，2007
- 3) 佐久間智，菅原徳夫，多田誠，遠藤祐司：供用中に発生した急激な盤ぶくれ変状を復旧する一山形自動車道盃山トンネル（上り線）一，トンネルと地下，Vol.40，No.12，pp.27-37，2009
- 4) 二唐時雄，佐藤秀行，芹沢尚一，高須賀俊行：流紋岩質凝灰岩熱水変質部の膨張性地山を掘る山形自動車道盃山トンネル，トンネルと地下，Vol.22，No.2，pp.25-31，2009
- 5) 東日本高速道路株式会社東北支社山形管理事務所：供用トンネルにおけるインバート隆起（最大950mm）を復旧する山形自動車道盃山トンネル（上り線），2009
- 6) 東日本高速道路株式会社東北支社山形管理事務所：変状対策中における計測工B（インバート部）の測定結果，2009
- 7) 東日本高速道路株式会社東北支社山形管理事務所：変状対策工完了後以降（H20.12～）の変位等計測結果，2009
- 8) 東日本高速道路株式会社東北支社山形管理事務所：変状メカニズムの解析結果，2009
- 9) 横澤圭一郎，安井成豊，藤田一宏：供用中のトンネルにおけるインバート追加施工法の研究，建設の施工企画，第727号，pp.74-76，2010
- 10) 高速道路総合技術研究所，施工技術総合研究所，首都大学東京トンネル地下空間研究室：トンネルの補強工法に関する研究，2009～2011
- 11) 首都大学東京トンネル地下空間研究室：解析手法の検討，第4章，2009
- 12) 宮下直幸：供用中トンネルのインバート施工による変状対策に関する研究，首都大学東京大学平成22年度修士論文，2011

SHAPE EFFECT OF HYBRID STRUCTURE INVERT AS MEASURES FOR IMPROVING DEFORMATION

Taku MATSUNAGA, Tsuyoshi DOMON, Kiyosi OGAWA,
Sigetoyo YASUI, Kazuo NISHIMURA

Hybrid structure invert that can be constructed with one side of the road secured was designed. The object of this study is to clarify the shape effect of hybrid structure invert, because it is necessary to evaluate the feasibility of the hybrid structure invert. Parametric study by the two-dimensional FEM was executed in this study. Curvature radius of a steel pipe and concrete shape were used for the parameter. As a result, the shape effect of hybrid structure invert was able to be clarified. Additionally, the structure to put in rubber to the joint of the lining and invert was examined.