

論文 超大断面拡幅トンネルにおける SRC 覆工の適用

齋藤 隆弘*1・木下 茂樹*2

要旨：東京外かく環状道路（外環）の大泉JCTから東名JCTにかけてのトンネル区間では、高速道路等と本線を接続するため、直径約30mの地中拡幅部が10か所計画されている。都市部での前例のない拡幅であることから、地震時等において十分な安全性の確保が要求されている。本体構造物である覆工において、仮設部材である断面内部の鋼材を補強部材とみなすため、鋼材が覆工の耐力に及ぼす影響を把握することを目標とした。本稿では、開発した工法の概要、および覆工に発生する応力状態を再現するため、軸力を導入した1/4縮小モデルによる曲げ載荷試験により、SRC覆工の適用による安全性確保について検証した結果を報告する。

キーワード：超大断面拡幅トンネル，SRC覆工，曲げ試験

1. はじめに

外環トンネル区間の地中拡幅部は、本線トンネルとランプトンネルを接続する、直径約 30m の非開削による切り拡げ工事となる。都市部、高水圧下でかつ粘性土を主体とする地山で、このような大断面の拡幅を行った事例はないため、十分な安全性を確保できる工法の開発が必要であり、平成 27 年に国土交通省から技術開発業務が発注された。この業務において筆者らは、大口径密閉型パイプルーフを用いた地中拡幅工法の開発を行ったが、その覆工構造として仮設鋼材を評価した SRC 構造（以下、SRC 覆工）とすることを計画し、その施工法および鋼材を覆工の内部に配置することの効果についての検証を実施した。

覆工の当初計画は厚さ 1.2m の RC 構造である。施工時荷重を負担させるため、覆工円周方向に鋼材を 2m 間隔で配置することを計画した。この鋼材は補強部材としても有効であると考えられる。一方、シールドセグメントの曲げ試験を実施している例¹⁾²⁾は見られるが、トンネル構造物の覆工を対象として、軸力が作用する状況下で、SRC としての実験的検討を行った事例は見られない。そこで 1/4 縮小モデル（厚さ 300mm、幅 500mm、有効長 2,500mm）の試験体を作成し、軸力を導入した曲げ試験により、本構造の構造性能を検証した。

2. 工法概要

2.1 全体工法の概要

図-1に全体構造図、図-2、図-3に施工状況を示す。施工手順は以下のようになる。

- (1) 本線シールドから、拡幅部の両端に立坑を築造する
- (2) 立坑から円周状トンネルを泥水式推進工法により築造する
- (3) 円周状のトンネルから外径φ2.3mの鋼管を泥水式推進工法により築造する
- (4) 鋼管をボルトによ

り連結後、鋼管内部をコンクリートにより充填し、パイプルーフ（パイプを連結することによるトンネルの支保）を形成する (5) 拡幅内部を掘削し、パイプルーフ間に吹付けコンクリートを施工し、補強鉄板を設置する (6) 掘削の進行に伴い、逆巻工法により SRC 覆工を施工する、以上(1)～(6)の手順となる。

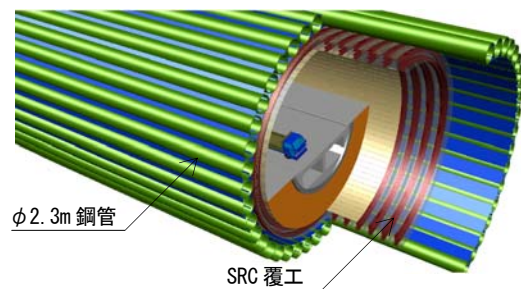


図-1 全体構造図

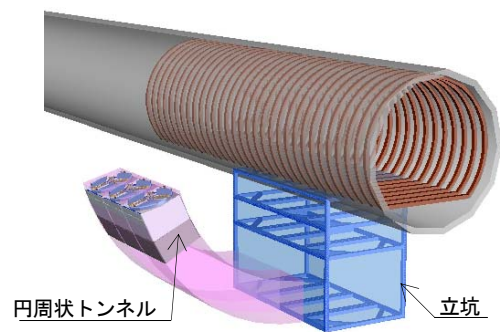


図-2 立坑および円周状トンネルの発進状況のイメージ図

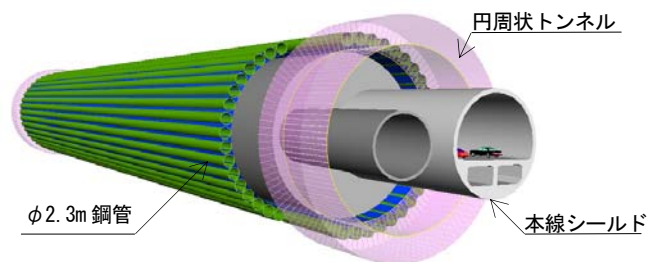


図-3 パイプルーフ鋼管の発進状況のイメージ図

*1 (株) 奥村組 技術研究所 (正会員)

*2 (株) 奥村組 東日本支社 土木技術部

2.2 SRC 覆工の概要

図-4に,SRC 覆工の横断方向の断面図,図-5に SRC 構造の縦断方向の断面図を示す。SRC 覆工の構造は,パイプルーフから設置したアンカーボルトにより円形に加工した鋼製支保工 (H 形鋼 300×300,以下,H-300 と称する) を吊り,これを用い,型枠および打設時の荷重 (コンクリート重量,衝撃荷重他) を負担する構造となる。通常のトンネルのように,移動式型枠を用い施工することは,断面が大きいだけでなく,施工基面が状況に応じ変わるため困難である。このため,掘削段階に応じて,上部から覆工を施工する,逆巻工法を想定して設計した。この際,パイプルーフから吊鋼材を設置し,自重や打設時の荷重を負担する構造とした。打設時には支保として使用する鋼製支保工には,供用後には覆工の構造性能を高め,想定外の事態 (大地震等) が発生した場合における構造物としての安全性を高める役割を期待した。

3. 基本構造設計

3.1 計算条件

トンネルの構造条件は,内径 26.4m,外径 28.8m,厚さ 1.2m の円形とする。土被りは 45m,地下水位はトンネル

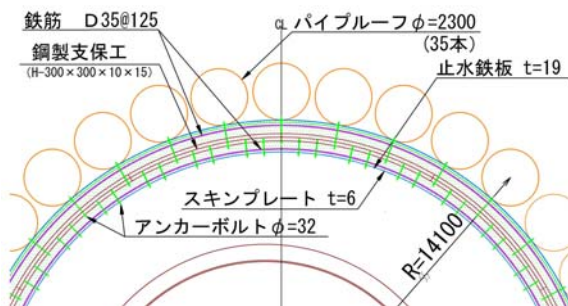


図-4 SRC 覆工の横断方向の断面図 (上部)

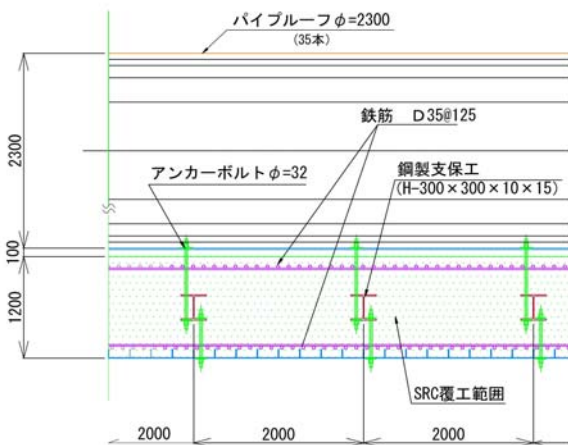


図-5 SRC 覆工の縦断方向の断面図 (上部)

表-1 荷重条件

本設構造物の設計	
外環地盤条件を考慮したシールドトンネルの設計モデル	
【鉛直土圧】最低土圧 1.0D	

表-2 使用材料の物性値

コンクリート	設計基準強度	σ_{ck}	N/mm ²	40
	ヤング係数	E_c	kN/mm ²	31
	許容圧縮応力度	σ_a	N/mm ²	14
	許容せん断応力度	τ_{al}	N/mm ²	0.27
鉄筋 (SD345)	ヤング係数	E_s	kN/mm ²	210
	許容引張応力度	σ_{sa}	N/mm ²	180
	許容圧縮応力度	σ_{sa}'	N/mm ²	200

表-3 構造の諸元

部材条件	部材厚さ	呼称	単位	
部材条件	部材厚さ	H	m	1,200
	部材幅	B	m	1,000
鉄筋 (圧縮, 引張とも同じ)	引張鉄筋径	ϕ	Mm	35
	本数		本	8
	引張鉄筋量	A_s	cm ²	76.528
	被り	H-d	cm	15
鉄筋量			cm ²	153.1

天端+35~38m である。上記の荷重条件に基づき,骨組み解析により計算を実施した。なお,ここでは覆工内部の H 形鋼はないものとして検討している。荷重条件を表-1, 使用材料の物性値を表-2, 構造の諸元を表-3 に示す。

3.2 計算結果

コンクリート応力の許容圧縮応力度に対する比は 0.98, 鉄筋応力 (圧縮) の許容値に対する比は,0.90 となっている。上記の配筋における引張鉄筋比は,0.64 であり,実験に際しては,この数値を参考とし鉄筋量を設定した。

4. 1/4 縮小モデル軸力導入曲げ試験

4.1 試験概要

外環拡幅部の覆工の鉄筋量は RC として算定しているが,覆工の施工時荷重を負担する鋼製支保工により,覆工の構造性能が向上すると考えられる。その効果を把握するため,実物の 1/4 縮小モデルを使用し,その効果を確認する。

試験体の形状は、作用させる軸力を一定にするため、アーチ構造とせず単純梁とする。左右からジャッキにより軸力を導入した上で、中央で 2 点载荷した(離隔 500mm)。

4.2 試験ケース

(1)RC のみ(2)RC+鋼製支保工 (1 本) (3)RC+鋼製支保工 (2 本) (4)RC+鋼製支保工(3 本)の 4 パターンで 2 点载荷で試験を実施した。試験体の寸法は、断面の寸法を幅 500mm,高さ 300mm,支点間距離 2,500mm,全長 2,820mm である。図-5 に示すように支保工の鋼材として、H-300 を 2m ピッチで配置することから、延長方向の幅を 2m,また厚さを 1.2m として、それぞれの寸法の 1/4 にすることにより、試験体の寸法を設定した。また、H 形鋼 (鋼製支保工) については、断面 2 次モーメントが 1/16 となるように、設定した。H-300 の断面 2 次モーメント $20,200(\text{cm}^4) \times 1/16 = 1,263(\text{cm}^4)$ に対して、H-100 の断面 2 次モーメント $378(\text{cm}^4) \times 3 = 1,134(\text{cm}^4)$ であるため、実験における最も多い H 形鋼のケースは H-100 3 本とし、鋼材量が及ぼす影響を把握するため、H 形鋼を 1,2 本としたケースを設定した。

主鉄筋は、SD345,D16 の鉄筋を圧縮側、引張側とも 4 本ずつ配置した。これは、元設計での主鉄筋は、D35@125 であるが、このときの引張鉄筋比とほぼ同等の引張鉄筋比 (0.636)となるように設定したためである。代表的な配筋図を図-6 に、断面図を図-7 に、実験ケースおよび試験実施時のコンクリートの圧縮強度を表-4 に、試験体の諸元を表-5 に、鉄筋、鋼材の物性値を表-6 に示す。

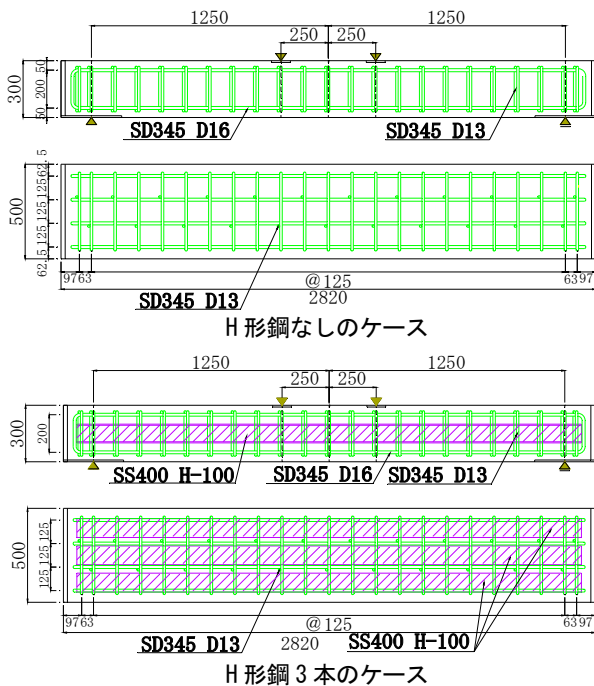
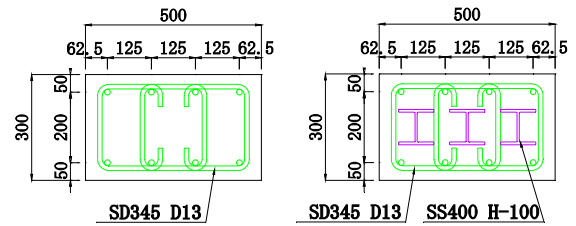


図-6 試験体の代表的な配筋図



(左 : H 形鋼なし, 右 : H 形鋼 3 本)

図-7 試験体の代表的な配筋図(断面図)

表-4 試験ケース

試験体番号	(1)	(2)	(3)	(4)
鋼製支保工 (H 形鋼) 本数	なし	1	2	3
コンクリート圧縮強度 (試験時 N/mm ²)	33.0	33.0	33.5	33.3

表-5 試験体諸元

鋼製支保工詳細		H-100×100×6×8
試験体寸法 (mm)	高さ : H	300
	幅 : B	500
	長さ : L	2820
主筋		4-D16(SD345)
帯筋		D13@125(SD345)
フック筋		2-D13@125 (SD345)

表-6 鉄筋、鋼材の物性値

材料名	材質	用途	降伏応力 N/mm ²	ヤング係数 ×10 ⁴ N/mm ²	引張強さ N/mm ²
D16 鉄筋	SD 345	主筋	389.4	18.44	574.8
D13 鉄筋	SD 345	帯筋, フック筋	384.9	18.17	581.1
8t 鋼片	SS 400	H-100 フランジ	334.4	18.63	475.2
6t 鋼片	SS 400	H-100 ウェブ	341.9	18.78	480.4

4.3 载荷条件

構造物は円環状の地中構造物であり、曲げモーメントやせん断力だけでなく、土圧、水圧により円周方向の圧縮力 (軸力) が発生している。実際のトンネルに近い応力状態での曲げ耐力を評価するために、本試験では試験体の長さ方向に軸力を作用させて曲げ試験を実施した。

試験体に導入する軸力は、コンクリートに発生する応力が 5N/mm² になるように 750kN とし、载荷中も軸力が一定になるように制御した。実施工においては、パイプルーフによっても軸力を伝達するため、表-1 の算定された応力の 1/2 程度が覆工に作用するものとし、導入する軸力を設定した。

曲げ载荷は前述のとおり中央 2 点载荷による 4 点曲げ試験とし、単調 1 方向加力とした。加力については、反力

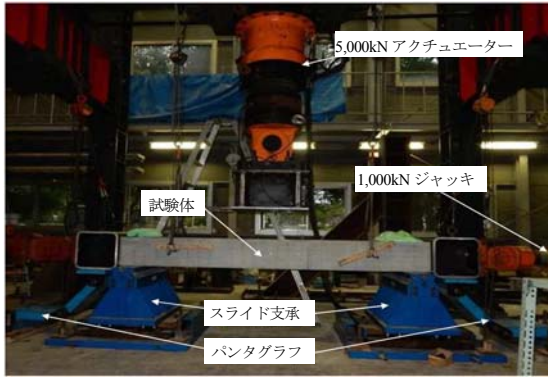


写真-1 試験状況

フレームに取り付けた試験体上部のアクチュエーターより加力用鋼材を介し荷重を漸増させ、ジャッキとピンの間に取り付けたロードセルによって荷重を計測した。支持条件は片側ピン、片側ピンローラーとした。試験体の上面が圧縮破壊し、最大荷重より 20%の耐力低下を確認した時点で加力を終了した。試験状況を写真-1に示す。

4.4 試験結果

試験結果一覧を表-7、全試験体の荷重—変位関係を図-8に示す。ここでの変位は、試験体中央部の鉛直方向変位である。全てのケースにおいて、試験体底版中央部のひずみが 300μ に達する、120kN 程度の荷重までは、線形的な勾配を示しており、ケースごとの違いは見られない。荷重が 120kN を超え、ひび割れが進展するのに伴い、徐々に剛性が低下するが、鋼材の本数が多いほど低下する程度は少ない。

また最大荷重については、鋼材本数が増加するのに伴い増加し、鋼材なしのケースと比較して、鋼材 3 本の場合では、約 1.7 倍の最大荷重となる。さらに最大荷重時の変形量は鋼材の増加に伴い、10mm (鋼材なし) から 18mm (鋼材 3 本) と徐々に増加しており、破壊に至るまでの変形量が鋼材の本数が多いほど、大きくなるのがわかる。また、最大荷重以後の荷重の低下は、鋼材の増加に伴い大きくなり、また低下時の曲線勾配も急になる傾向が見られた。

写真-2に、最大荷重時の試験体の状況 (鋼材なし、鋼材 3 本)、図-9に鋼材 3 本のケースにおけるひび割れの進展状況を示す。ひび割れは、試験体中央部の底面に最初に発生し、荷重の増加とともに、左右下面の支点に向かい発生する箇所が拡大している。それぞれのひび割れは荷重とともに上部の加力点に向かい進展し、最終的には試験体中央部上面に圧壊が生じている。鋼材の有無、本数によらず、上記のようにひび割れが進展している。しかしながら、最大荷重時においては、鋼材を配したケースの方が、鋼材のないケースと比べ、両端の支点方向により広範囲にひび割れが分布している。

表-7 試験結果一覧

試験体番号	(1)	(2)	(3)	(4)
鋼製支保工 (H 形鋼) 本数	なし	1 本	2 本	3 本
底版中央コンクリートひずみ 300μ 到達時	荷重 P(kN)	125.5	109.8	118.7
	変位(mm)	1.22	1.10	1.11
ひび割れ目視確認時	荷重 P(kN)	170.6	153.0	156.9
	変位(mm)	2.07	1.87	1.77
4mm 変形時	荷重 P(kN)	220.7	227.5	247.1
6mm 変形時	荷重 P(kN)	263.8	281.5	310.9
8.3mm 変形時 (変形角 1/300)	荷重 P(kN)	298.1	327.5	379.5
最大荷重時	荷重 P(kN)	300.1	368.7	452.1
	変位(mm)	9.9	13.11	15.54

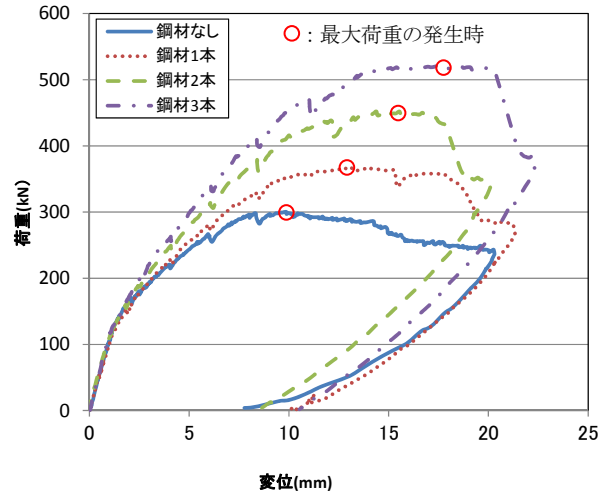
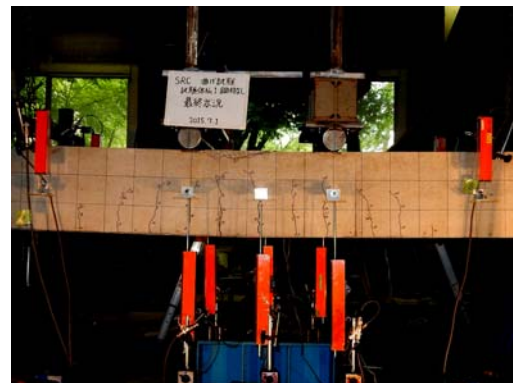


図-8 荷重—変位関係



鋼材なし



鋼材 3 本

写真-2 最大荷重時の載荷状況

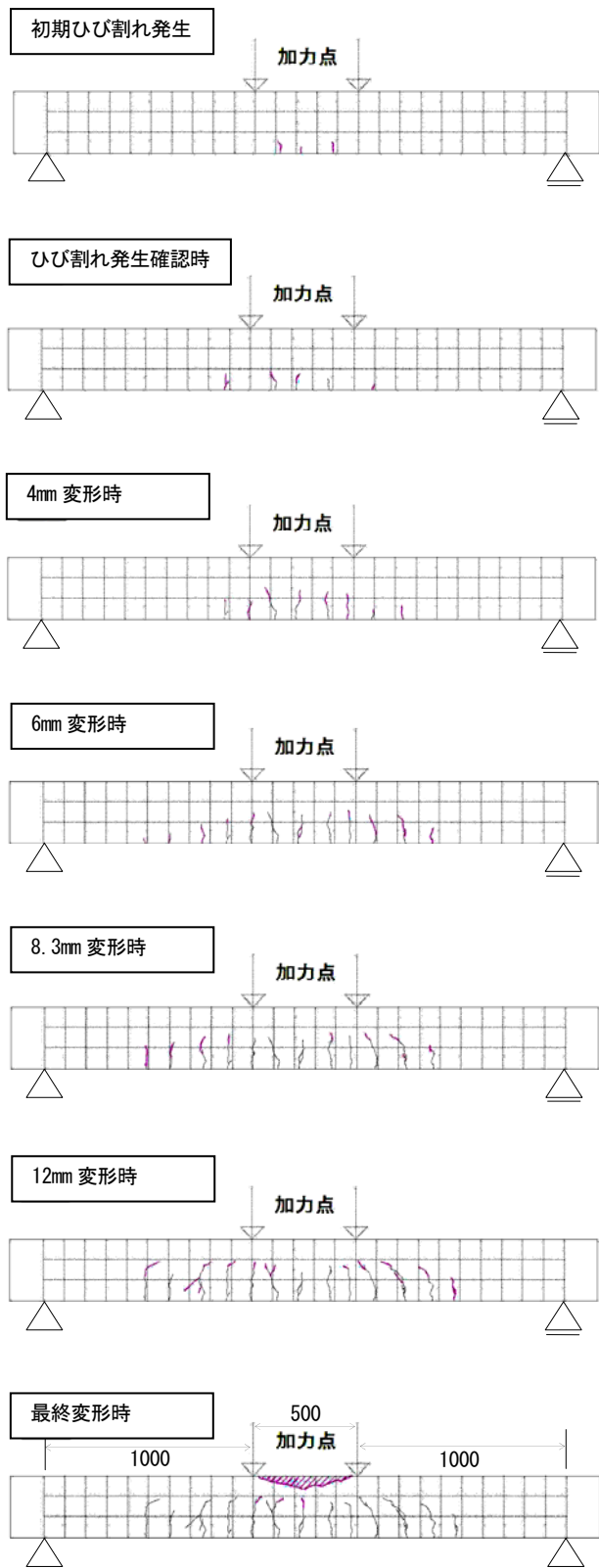
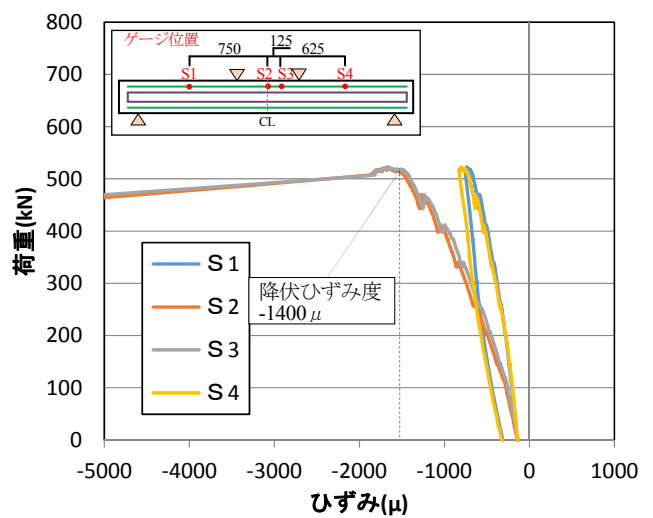


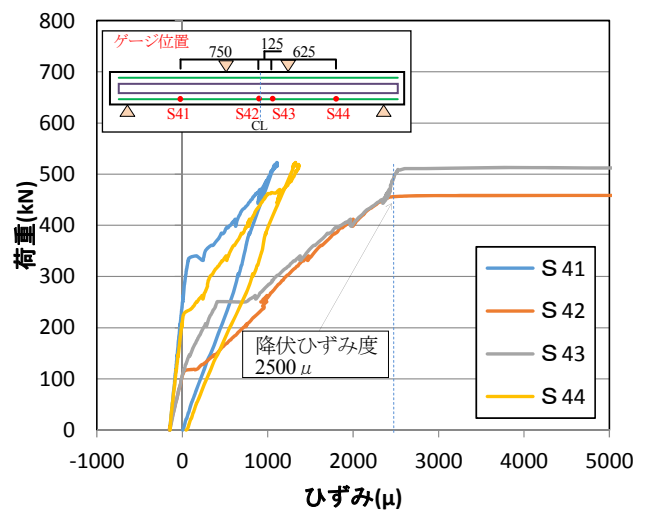
図-9 割れの進展状況 (鋼材3本)

図-10に鋼材本数が3本のケースにおける主鉄筋の荷重-ひずみ関係を、図-11に鋼材の荷重-ひずみ関係を示す。図-10(a)より、上端の主鉄筋については、支間中央部で荷重の増加に伴い圧縮ひずみが増加し、最

終的には降伏していることがわかる。図-10(b)より、下端の主鉄筋については、軸力を導入していることにより荷重当初は圧縮ひずみが生じているが、荷重が100kNを超えた時点で、引張側に転じて徐々にひずみが増加して、支間中央部では最終的に降伏していることがわかる。また、せん断スパンの中央の位置においては、上端の鉄筋、下端の鉄筋ともに、除荷とともにひずみが回復しており、線形的な挙動を示している。図-11より、鋼材については、下端のフランジでは、荷重の増加に伴い引張ひずみが増加しており、上端のフランジは圧縮ひずみが増加している。また、主鉄筋の中央部が降伏し、コンクリートが圧壊した段階でも鋼材の下フランジは弾性域であり、除荷に伴いひずみが0近くまで低下している。

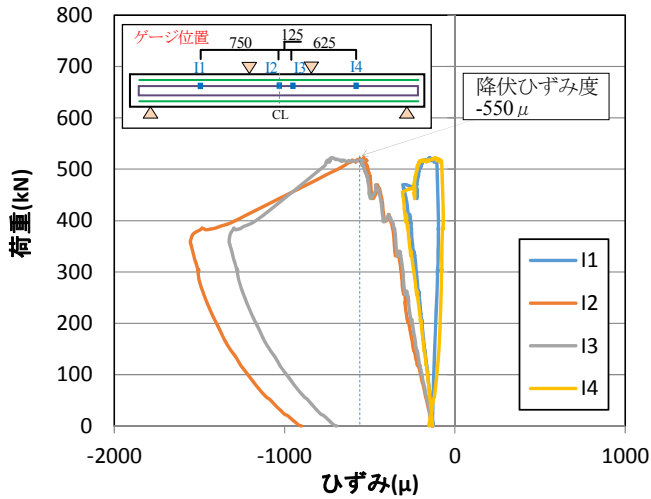


(a) 主鉄筋 上端部

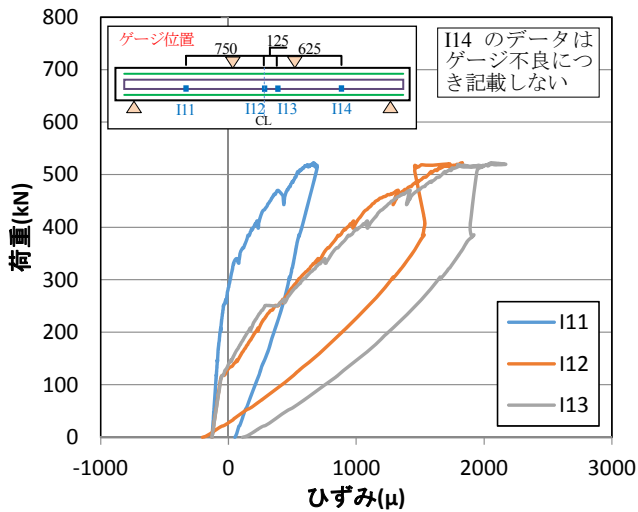


(b) 主鉄筋 下端部

図-10 主鉄筋の荷重-ひずみ関係



(a) 鋼材 上フランジ



(b) 鋼材 下フランジ

図-1.1 鋼材の荷重-ひずみ関係

表-8 試験結果一覧

番号	鋼材本数	導入軸力 (kN)	最大曲げモーメント 実験値 (kN·m)	最大曲げモーメント 計算値 (kN·m)
①	なし	750	150.0	143.7
②	1本	750	184.4	188.3
③	2本	750	226.4	219.1
④	3本	750	260.4	255.4

4.5 実験値と計算値の比較

表-8に実験における最大曲げモーメントと、同一条件における最大曲げモーメントの計算値を示す。計算には、RC断面計算 Ver7.6 (フォーラムエイト社) を使用し、コンクリート強度には実強度を用いた。鋼材の本数に関わらず実験値と計算値がほぼ一致していることを確認した。

5. まとめ

超大断面の拡幅トンネルにおける SRC 覆工において、1/4 縮小モデルの試験体を用い、鋼材の配置が耐力に及ぼす影響について、軸力を導入した曲げ試験により検証した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 鋼材なしのケースと比較して、鋼材の本数が増加するに伴い、最大荷重は増加する。鋼材 3 本のケースでは鋼材なしのケースの 1.7 倍に達し、この結果は計算結果とほぼ一致した。線形域における剛性は、鋼材の有無、本数によらず変わらない。また、破壊に至るまでの変形量は、鋼材の本数の増加に伴い、増大している。
- (2) 外環地中拡幅トンネルにおいては SRC 覆工とすることにより、耐力向上を期待することができる。また、最大荷重の増分は、線形範囲を超える荷重が作用した状況におけるものであり、設計に対する余裕とすることが適切であると考えられる。

6. おわりに

東京外かく環状道路における拡幅部は、都市部での前例のない超大断面トンネルであるため、安全性の高い構造とすることが要求されている。本検討により、覆工内部の鋼材が、超大断面トンネルの構造安全性の向上に寄与することを確認できた。本稿が、今後の同種工事における設計および施工においても活用されれば幸いである。

謝辞

本検討は、国土交通省関東地方整備局発注の東京外環トンネル地中拡幅部における技術開発業務 (その1.1) の一環として実施した。国土交通省関東地方整備局東京外かく環状国道事務所の皆様ならびに東京外環トンネル施工等検討委員会 (委員長: 今田 徹 東京都立大学名誉教授) の皆様には多大なるご指導・ご助言を頂きました。また、実験計画に際しては、東京工業大学大学院 二羽淳一郎教授のご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 林 伸郎, 大長 唯宏, 大関 宗孝, 堀 誠行, 「超大型シールド工用セグメント開発実験」 土木学会第 49 回年次学術講演会, pp1258-1259. 1994
- 2) 三桶 達夫, 丸屋 剛, 堀口 賢一, 村田 裕志, 西田 与志雄, 服部 佳文, 川島 広志, 「鋼繊維補強コンクリートを用いた大型セグメントの開発」, 大成建設技術センター報第 41 号, pp28-1 - 28-5. 2008