

道路シールドトンネル分合流部における覆工構造の合理化に関する研究

石田 高啓¹・斉藤 亮¹・長田 光正¹・井上 隆広²・小倉 靖之²

¹正会員 首都高速道路（株） 東京建設局（〒160-0023 東京都新宿区西新宿六丁目6-2）

E-mail:tishida82@shutoko.jp

²正会員 （株）間組 関東土木支店 大橋出張所（〒153-0044 東京都目黒区大橋一丁目8-3）

首都高速道路中央環状品川線と3号渋谷線を接続する大橋連結路は、分合流部の本線および連結路をシールド工法で施工して両トンネル間を非開削工法により切開き、拡幅セグメントを組み立てて分合流部を構築する工法を採用しており、覆工構造の合理化を目的として本設の補強梁を設置する構造である。特殊な覆工構造のため、構造性能を実験により確認した。実験の結果、補強梁の効果を十分に発揮するために接続構造と施工方法の改良を行った。補強梁は、鋼材のなじみ、ゆるみを除去するためにプレロードを導入し、最大限の軸剛性を得るためにセグメントとの接続部にほぞ継手を採用した。本論文は、改良した補強梁の施工方法と構造、実験により確認された構造性能を報告するものである。

Key Words : junction tunnel, non-open-cut method, shield tunnel, segmental lining, times, diagonal supports

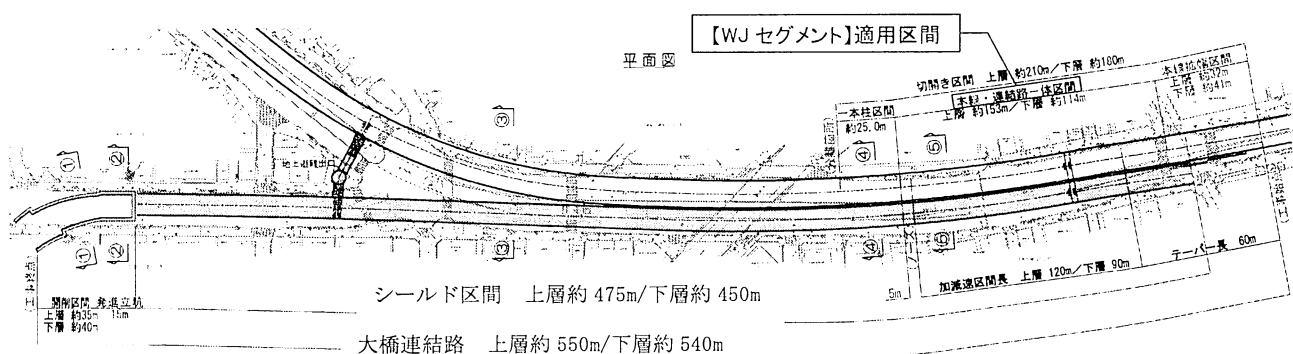


図-1 全体平面図

1. はじめに

首都高速道路中央環状品川線は、高速湾岸線大井JCTから分岐して、国道246号地下部で中央環状新宿線（山手トンネル）と接続する延長約9.4kmの路線である。このうち約8kmがシールドトンネル構造となっており、セグメント外径12.3mの2本の本線シールドを大井JCT付近の立坑から長距離掘進する。

中央環状品川線大橋連結路は、品川線本線から分岐し、大橋JCTに連絡するトンネルで、延長約550mのうち約450mがシールドトンネルとなっている（図-1）。シールド部はセグメント外径9.5mの上下2本の併設トンネルである。このうち分合流部は、上層が約210m、

下層が約180mであり、本線および連結路のセグメントを非開削工法により切開き、拡幅セグメント（以下、WJセグメントと呼ぶ）を用いて接続するのが本工事の特徴となっている（図-2～図-4）。

すなわち、分合流部は本線2車線と連結路1車線の大断面かつ地下48mの大深度のトンネルであり、一般に強度および剛性の高い覆工構造を必要として大規模な鉄筋コンクリート構造により構築されるが、本工事ではアーチ形状による鋼殻セグメント（WJセグメント）を主体として、部材の軽構造化と止水性の向上、さらに狭隙空間での施工性向上による工期短縮を目的とした合理的な覆工構造を考案、採用している。

しかし、本覆工構造は扁平な概略楕円形状（幅22m、

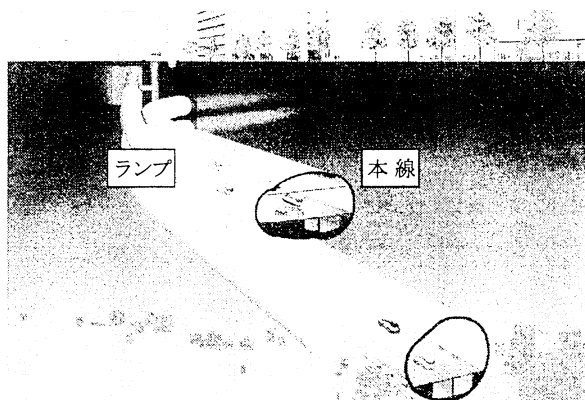


図-2 分合流部トンネル概念図

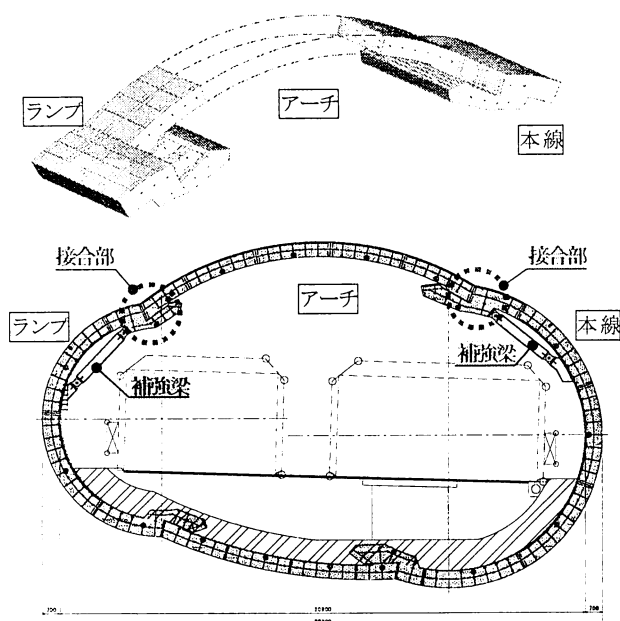


図-3 拡幅セグメント (WJセグメント) 概要図

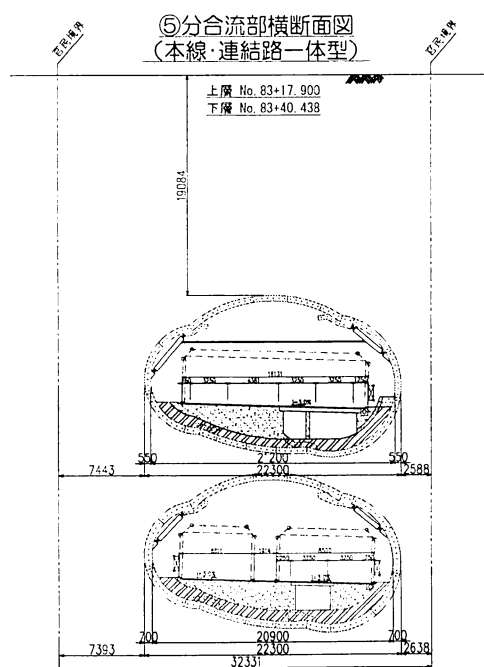


図-4 分合流部横断面図

高さ14m) であり、本線および連結路のセグメントと切開き部の拡幅セグメントとを折れ角を持って接合させている。また、その補強構造として接合部に補強梁を設置して、軸力伝達の円滑化、本体鋼殻セグメントの負荷軽減およびコスト削減を図っている。このような覆工構造は過去に実績がなく、特に接合部の力学的挙動と設計方法、補強梁の有効性を実験により検証する必要がある。

そこで、1/2スケールの実証実験を実施したところ、補強梁と鋼殻セグメントとの接続構造について、当初設計したピン支承を用いた場合には、補強梁の軸剛性が設計より小さく、補強梁としての効果が十分に発揮されていないことが確認された。これに対して、補強梁を効果的に機能させるために、補強梁の接続構造をほぞ形式の突合せ構造に変更して、軸剛性の低下防止を図った。また、補強梁設置時の鋼材のなじみ、ゆるみ除去するために、プレロードを導入することとした。このように補強梁の接続構造や施工方法を改善して、再度実験によりその効果を検証した。主な確認項目は、補強梁の効果や軸剛性、覆工全体の変形特性や断面力分布、主桁や継手板等の応力状態、補強梁接続部の曲げ剛性などであるが、本論文では、補強梁の効果とその軸剛性の関係について述べることにする。また、補強梁の軸剛性を有効に効かすための施工方法および補強梁に導入するプレロードの効果についても述べるものである。

2. 施工ステップ

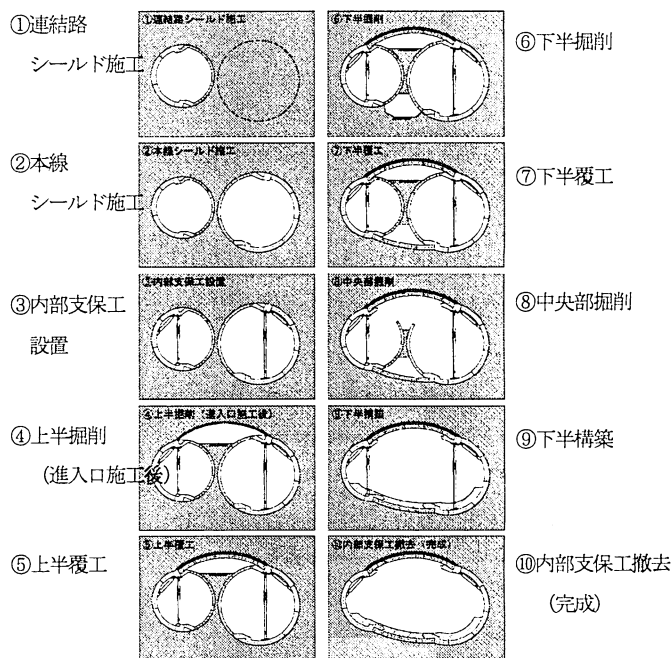


図-5 施工ステップ

分合流部の施工ステップを図-5に示す。本線および連絡路シールドが通過したのち、トンネル内に内部支保工を設置する（ステップ③）。この時設置する鉛直材は仮設物であり、完成時には撤去する。シールドトンネル間の土砂は非開削で掘削する。掘削方法はフォアポーリング等の補助工法を用いたNATMにより行う予定である。掘削後、WJセグメントを設置し覆工を閉合させる。下半には鋼殻セグメントと合成構造を成すインパルトコンクリートを打設して、拡幅工事が完了する。

3. 補強梁圧縮要素試験

補強梁全体の軸剛性が設計で期待した性能（母材と同等）より低いと、補強梁の軸力負担が小さくなり、本体の鋼殻セグメントにとって危険側の設計となる。図-6に示すとおり補強梁は複数の部材から構成されているため、実験により補強梁の軸剛性を確認する。

(1) 試験方法

補強梁両端に載荷桁を配置し、PC鋼棒を通してセンタホールジャッキにより軸力を導入する。試験体は2分の1スケールで行う（図-7）。

(2) 試験ケース

表-1に試験ケースを示す。ケース1-1は当初設計されたものであり、補強梁の両端をピン支承にしたものである。ケース2-1は、比較のため補強梁母材を試験する。補強梁組立時のゆみを除去するためにキリンジャッキを組み込んだケースをケース1-2、2-2としている。ケース3は、ピン支承の代わりにほぞ形式の突合せ構造としている（図-8）。

図-9に計測機器の配置図を示す。補強梁への導入軸力を測定するためにロードセルと母材に歪みゲージを設置し、軸変位を測定するために部材毎に変位計またはεゲージを設置した。

(3) 試験結果

母材の剛性を理論値として比較した結果を図-10に示す。ピン支承の軸剛性が低くまた、キリンジャッキを入れるとこえて剛性が落ちる結果となった。これは、部材自体の剛性の低さに加え、エンドプレートを介した軸力伝達機構において、鋼板接触部でのなじみ、ゆみとエンドプレートの変形が原因であると考えられ、別の検証実験、解析で確認している。また、低荷重時の初期剛性が極端に発揮されていない。これは、

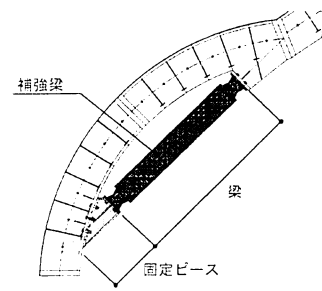


図-6 補強梁構造

平面図

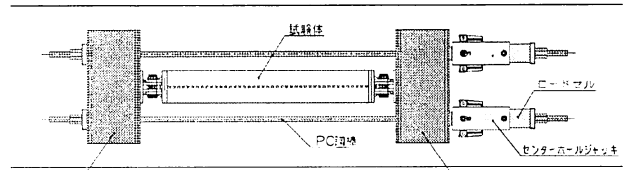


図-7 試験体概要図（当初設計）

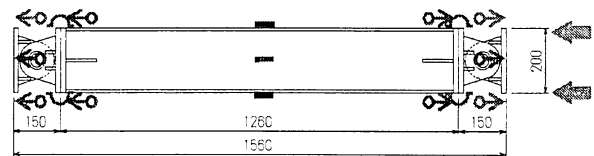
表-1 試験ケース

試験ケース	構造（組合せ）
1-1	ピン支承 ピン + H-200 + ピン
1-2	ピン支承 + キリンジャッキ + H-200 + ピン
2-1	剛結（母材） H-200
2-2	剛結（母材） + キリンジャッキ
3	ほぞ継手 ほぞ + H-200 + ほぞ



図-8 補強梁接続構造（左：ピン支承、右：ほぞ継手）

【ケース 1-1】



【ケース 3】

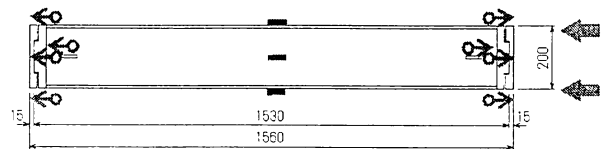


図-9 試験体及び計測配置概要図

【凡 例】

- ひずみゲージ
- ε ゲージ
- 変位計
- ⇄ ロードセル

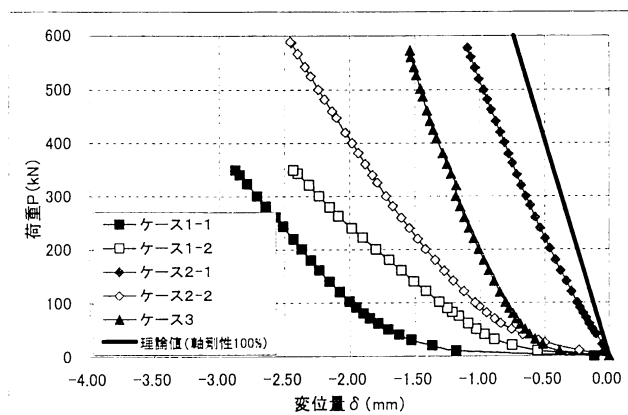


図-10 試験結果（軸剛性）

接合部がメタルタッチになっているわけではないので、接合部のゆるみ、なじみにより見かけの剛性が極端に低下してしまうためである。これを解消するためには、相応のプレロードを補強梁に導入する必要があるものと考えられる。

ケース2-1においても理論値より剛性が低くなっているが、これは載荷桁の変形等、計測誤差が原因と思われる。

4. 補強梁施工方法検討

(1) プレロード導入方法

初期に軸剛性を得るために、作業性、コストを考慮してプレロードの導入方法を検討した。図-11に示すように、補強梁の一端にフラットジャッキを設置するのに必要な隙間を空け、固定ボルトで仮受けしたのちに、フラットジャッキを挿入してプレロードを導入することとした。80mmの隙間があれば、フラットジャッキが設置可能である（図-12）。プレロード導入後、プレロードによる軸力を固定ボルトに受替えて固定し、フラットジャッキを引抜く。フラットジャッキは転用可能であり、コスト面でも優位である。

(2) 接合構造

フラットジャッキを撤去したのち、部材間に無収縮モルタルを充填する（図-13）。固定ボルトは構造計算上、安全側の設計とするために考慮しないこととした。また、長期耐久性を考慮し、割れ・欠け防止として無収縮モルタル部を鋼板等で巻き立てる予定である。

無収縮モルタルの充填性を確認する試験も別途実施しており、J14漏斗による流下時間が 8 ± 2 秒であれば、充填性は満足することを確認している。

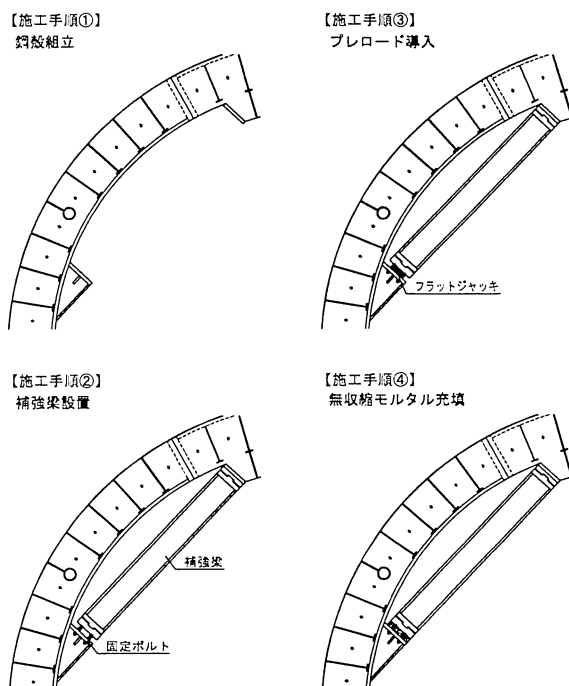


図-11 補強梁の施工手順

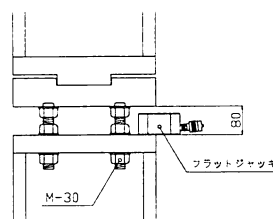


図-12 フラットジャッキ概要

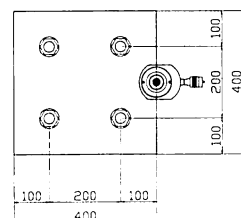


図-13 接合部構造概要

5. プレロード導入型補強梁圧縮要素試験

(1) 試験方法

前章同様の試験治具とスケールで補強梁の圧縮要素試験を行う（図-14、表-2）。補強梁の供試体は、実施工の施工手順に従って作成する。プレロードは、図-10の試験結果から50kNで初期のなじみが解消すると判断し設定した。また、固定ボルトで受け替える際、軸力が約10%抜けることが確認されており、これを考慮しプレロードを導入する。無収縮モルタルの養生は7日とし、養生期間中の軸力変化が無いことを確認している。

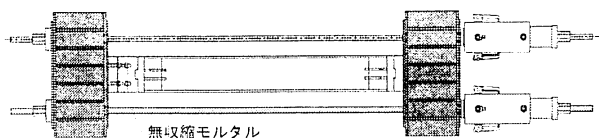


図-14 試験体概要図（プレロード導入）

表-2 試験体の形状・寸法

	仕様
母材	H-200×200×8×12, L=1,360mm
ほぼ継手	凹部：幅52mm, 奥行き200mm, 深さ10mm 凸部：幅50mm, 奥行き150mm, 高さ15mm エンドプレート厚さ：50mm
固定ボルト	M-16×4本
無収縮モルタル	マスターフロー120グラウト（BASF） 水/モルタル比=15.2%

(2) 試験結果

表-3および図-16に試験結果を示す。図-15に示すL2については、母材の97%の剛性が得られている。無収縮部を含む軸剛性L1については母材の83%であるが、計測点がエンドプレートの端部で計測しており、載荷桁の変形に伴うエンドプレートの変形が計測値に含まれている。図-16より、プレロードの効果により初期なじみが除去されていることが確認できた。

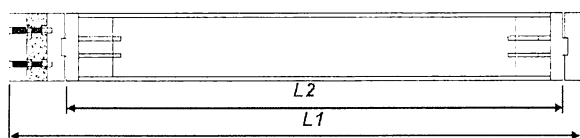


図-15 変位計測位置

表-3 軸剛性の算定

	荷重 (kN)	長さ (mm)	変位量 (mm)		$\delta a / \delta$
			計測値 δ	理論値 δa	
L1	1,000	1,655	-1.481	-1.231	0.83
L2	1,000	1,430	-1.096	-1.064	0.97

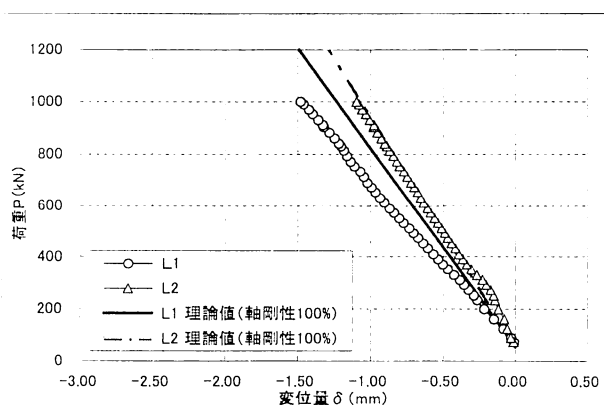


図-16 試験結果（軸剛性）

6. 1/2スケール上半リング載荷試験

(1) 試験方法

覆工の上半部を模擬した2分の1スケールの試験体で、本体1リング（幅600mm）、添接2リング（同300mm）の計3リング甲乙組とした。実構造では、本線シールドと連結路シールドではセグメント径が異なるが、実験、解析の簡便化のため、セグメントの曲率を連結路側（ $R=2,200\text{mm}$ ）に合わせている。WJセグメントの曲率半径は $R=5,600\text{mm}$ である。試験体の全幅は約11mである。

セグメントに軸力を導入するため、センターホールジャッキで水平荷重を与え、鉛直荷重は3点で載荷し、曲げモーメント分布が実設計と同等になるよう荷重レベルを設定した。Py1およびPxが800kN、Py2が440kNである。

(2) 試験ケース

補強梁の接合方法として、当初設計されたピン支承をケース1、プレロードを導入し、ほぼ継手をケース2とする。比較のため補強梁を設置しないケースの実験も行っているが、ここでは割愛する。載荷荷重は同じであるが、ケース2ではプレロードが導入されているため、セグメントに発生する設計断面力（理論値）は2つのケースに差異が発生する。

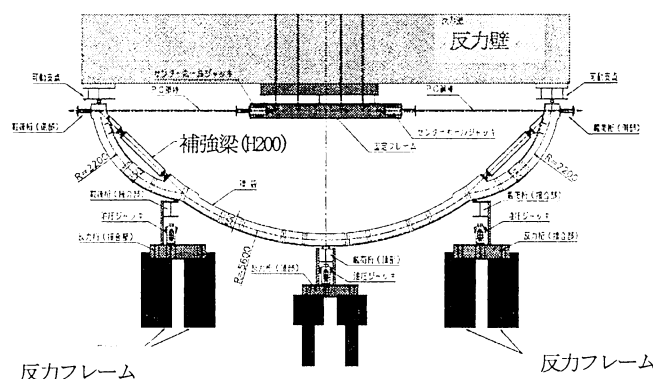


図-17 試験概要図

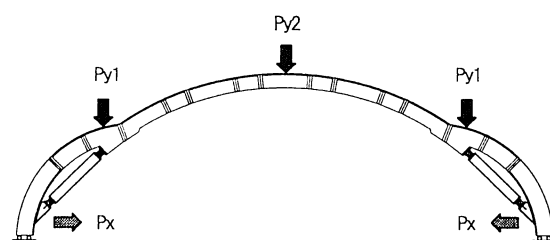


図-18 載荷パターン

(3) 試験結果

試験結果として曲げモーメント分布を図-19aに、軸力分布を図-19bに示す。ケース1では、連結路セグメント部（側円部）の断面力が理論値に比べて大きく、補強梁の軸力が理論値の半分程度となっている。これは、補強梁の軸剛性低下が原因で、期待していた応力分担ができていないことによるものと考えられる。ケース2では、ほぼ理論値どおりの断面力が得られており、プレロードを導入したほぞ継手構造による補強梁が有効であることがわかる。東側で補強梁に入る軸力が低くなっているが、後の検証によって、補強梁の組立精度が低いことが原因であるとわかった。

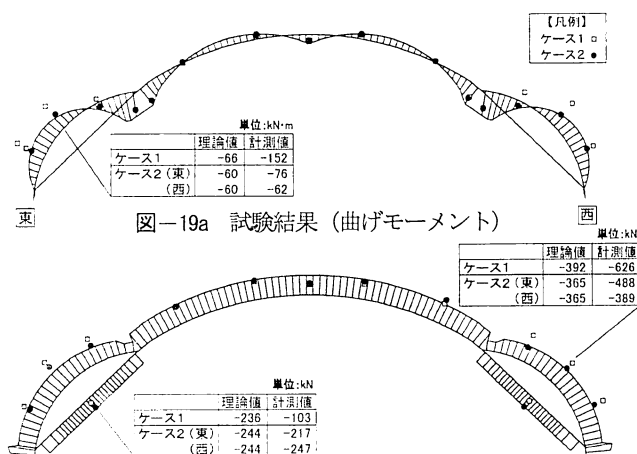


図-19b 試験結果 (軸力)

7. まとめ

今回の実証実験により、道路シールドトンネル分合流部における合理的な覆工構造として考案、採用したWJセグメントについて、特に補強梁の効果について以下の知見が得られた。今後、実施工に向けて詳細な施工方法や施工管理方法を検討する所存である。

- 1) 補強梁の構造を当初設計より変更したが、改良したプレロード導入型無収縮モルタル充填方式は、有効に機能することがわかった。これにより、補強梁を設置しない場合と比較して約 2 割の鋼殻セグメントの鋼重を削減でき、約 12 億円のコスト削減が可能となる。
- 2) 製作精度、施工誤差により発生断面力に影響を与えるので、適切な管理方法と管理値の設定、誤差に対する対応策を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 土橋・名倉・宮脇・三木, 道路分合流における大断面・併設シールドの切開き施工, 日本プロジェクトリサーチ 第 50 回「シールドトンネル工法施工技術」講習会, pp48~67, 2006

RESERCH ON RATIONAL DESIGN OF LINING STRUCTURE AT ROAD TUNNEL JUNCTION COMPOSED OF SHIELD SEGMENTS

Takahiro ISHIDA, Akira SAITOU, Mitsumasa OSADA, Takahiro INOUE and Yasuyuki OGURA

The main tunnel of Central Circular Shinagawa Route is the shield tunnel (TBM) of 12.3m diameter. And Ohashi branch line connected with Ohashi junction is also the shield tunnel of 9.5m diameter. The road at diverging section is about 20m width and the tunnel after combined becomes elliptical shape, so segments tend to be heavy structure. We propose rational design and structure so as to cut cost. We will plan to set "diagonal supports" to decrease stress on segments. These supports have function to divide stress and mainly have a part of axial stress intensity. We confirmed this effect by experimental method. In conclusion, we expect that it will be capable to cut cost about twenty percentage.