

高軸力条件に対応する RC セグメント継手部補強構造の開発

阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部設計第一課	奥山 裕真
阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部設計第一課	福島 誉央
阪神高速道路(株)計画部事業計画課	飛ヶ谷 明人
阪神高速道路(株)計画部事業計画課	大谷 智也
阪神高速道路(株)管理本部神戸管理・保全部保全管理課	石津 綜大

要 旨

地下深くに建設されるシールドトンネルは土被りが大きく高水圧が作用するため、覆工には高い軸圧縮力が発生する。覆工として、一般的に圧縮に強いとされる RC セグメントの適用を考えた場合、セグメント本体部は鉄筋とコンクリートの合成断面で応力を負担するのに対し、セグメント継手部ではコンクリートのみで応力を負担する。このため高軸圧縮力下では、セグメントの桁高は継手部で決定される場合がある。

本稿では RC セグメントの適用範囲を拡大すべく、継手部に圧縮力伝達材を設置し、圧縮力をコンクリートと分担する、新しくかつ合理的な RC セグメント継手部補強構造の開発について報告する。

キーワード: 覆工, RC セグメント, シールドトンネル, 継手部

はじめに

近年、都市部が過密化し用地取得が困難となっていること、合理的なルートの設定により事業コストの縮減、事業期間の短縮が可能なこと等により、シールドトンネルは地下深くに建設される傾向にある¹⁾。その際、土被りが大きくなることから覆工には高い軸圧縮力が作用する。覆工に RC セグメントの適用を考えた場合、セグメント本体部は鉄筋とコンクリートの合成断面で応力を負担する。一方で、セグメント継手部では主筋が端部まで伸びてきておらず、コンクリートのみで応力を負担する(図-1)。そのため高軸圧縮力下では、セグメント桁高は継手部で決定される場合がある。

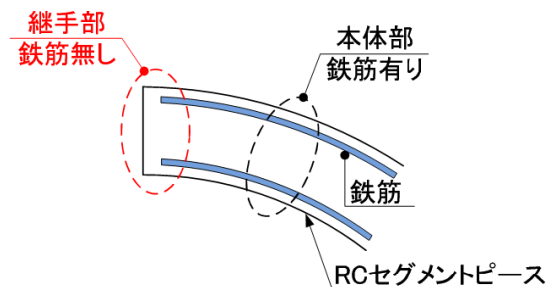


図-1 RC セグメント継手部イメージ

特に地下深くでは、卓越する軸圧縮力によってセグメント桁高が大きくなる。これによりトンネル外径が拡大し、掘削土量の増加やシールドマシン大型化が懸念される。またセグメントの重量やサイズが大きくなることで、セグメント材料費の増加や RC セグメントの運搬費の増加が懸念される。

そこで本稿では、継手部に圧縮力伝達材を設置することで、圧縮力をコンクリートとともに負担し、セグメント桁高の抑制に寄与する RC セグメント継手部補強構造の開発について報告する。

1. RC セグメント継手部補強構造の開発

1-1 継手部補強構造の概要

圧縮力を負担しコンクリートの発生応力の軽減を図るために、継手部を補強する2種類の圧縮力伝達材を考案した(図-2)。1つは鋼板に鉄筋を溶接したタイプ(以下、「タイプ1」)で、セグメントの主鉄筋・配力筋との間隔が取れるように、圧縮力伝達材の鉄筋に曲げ加工を施している。もう1つは鋼板に孔あき鋼板ジベルを溶接したタイプ(以下、「タイプ2」)で、ほかの部材との取り合いなく配置可能である。各々のタイプについて効果の検証を行っており²⁾³⁾、本章にて紹介する。

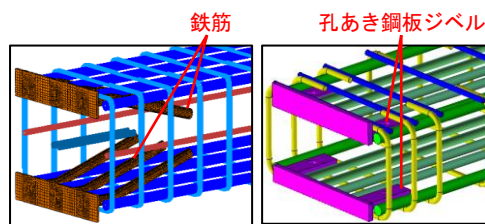


図-2 圧縮力伝達材タイプ1(左)、タイプ2(右)

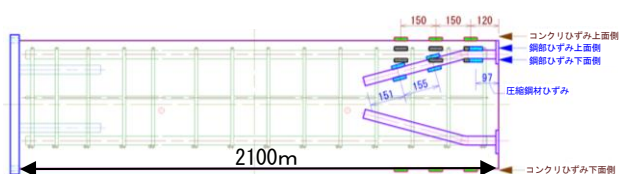


図-3 実物大試験供試体側面図(1ピース)

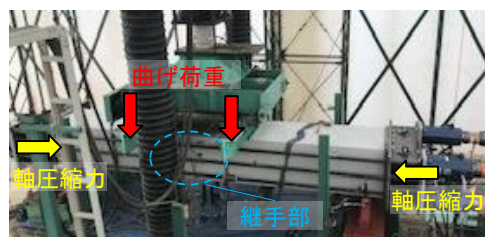


図-4 実物大試験載荷状況

1-2 タイプ1～圧縮鋼材(鉄筋)タイプ～

(1) 要素試験

圧縮鋼材の鉄筋長を変化させた場合のコンクリート応力低減効果を検証するため、要素試験を行った。圧縮鋼材は鉄筋長を変えた3ケース(9D, 12D, 15D(Dは直径))と圧縮鋼材無しの計4ケースで試験を行った。鉄筋長は、埋込み長さが鉄筋直径の12倍程度の時、鉄筋の降伏点に相当する引張力に抵抗できるという文献⁴⁾の記述を参考に設定した。12Dを基本に、その前後として12±3Dを計画した。比較の結果、最長の15Dの鉄筋を配置したケースでコンクリートの応力低減効果が最も高いことを確認できた。

(2) 実物大試験

要素試験の結果を踏まえ実工事への適用検証のため、図-3のように実物大のセグメントを模擬した軸力導入曲げ試験を実施した。圧縮鋼材の鉄筋長は要素試験結果を踏まえ15Dとした。導入軸力は試験設備の関係から軸力6000kNを最大とし、幅650mm、桁高550mm、長さ2100mmの供試体2ピースを継手部で接続して試験を行った(図

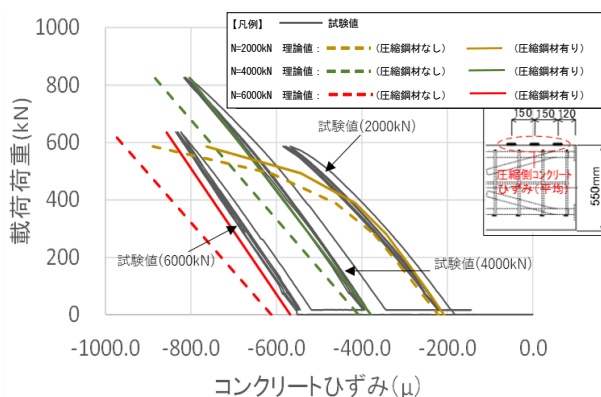


図-5 曲げ荷重とコンクリートひずみの関係(全断面平均)

4). 試験の導入軸力は、セグメント予備設計時の断面力を考慮した4000kNを中心に、2000kN, 6000kNを加えた3パターンとし、軸力を一定に保った状態で曲げ荷重を載荷した。載荷は継手部コンクリートが短期許容応力度の27N/mm²に達するまでとし、弾性挙動を確認するため、各3回の繰り返し載荷を行った。

図-5に各軸力導入下における圧縮側コンクリート表面ひずみの試験結果(3断面の平均値)を示している。図中に示した理論値は、圧縮鋼材を

鉄筋とみなして算定したコンクリートひずみである。試験値は圧縮鋼材無しの理論値（色付き点線）に比べて、総じてひずみ量が小さかった。また、圧縮鋼材有りの理論値（色付き実線）と試験結果（黒実線）の比較により、圧縮鋼材を鉄筋とみなした RC 断面として設計が可能であることが示された。加えて、導入軸力が 6000 kN 時に 15% 程度の圧縮鋼材によるコンクリートひずみ低減効果が確認できた（表-1）。

試験体は実験の安全を考慮して、軸力を入れずに曲げ荷重のみで最終破壊するまで載荷した。破壊後の試験体を確認したが、圧縮鋼材付近からのひび割れやコンクリートの剥離等は見られなかった。破壊形態は、継手金物（コーンコネクター継手）の引張による降伏で破壊していた（写真-1）。

1-3 タイプ 2～圧縮鋼材（孔あき鋼板ジベル）タイプ～

(1) 要素試験

継手部補強構造の有効性と圧縮力の伝達機構を確認することを目的に要素試験を行った。要素試験ではジベル形状を断面積、長さ、孔の有無、孔径、孔数において変化させ、破壊荷重の増加率を比較した。比較したケースを表-2 に示す。要素試験の結果、ケース No.4 のジベルを設置した場合、ジベルを設置しない供試体に比べて最も破壊荷重が増加することを確認した。

(2) 実物大試験

次に、実工事への適用検証、応力負担状況の確認のため、要素試験で最も高い効果が確認された形状のジベルを用いて実物を模擬した試験を行った。図-6 に実物大供試体の配筋図、図-7 に試験の概要を示す。導入軸力は試験設備の関係から軸力 6000 kN を最大とし、幅 900 mm、桁高 550 mm、長さ 2350 mm の供試体 2 ピースを継手面で接続して試験を行った（図-7）。試験の導入軸力は、セグメント予備設計時の断面力を再現する 5300 kN を中心に 4000 kN、6000 kN を加えた 3 パターンとし、継手面を模擬して軸力を一定に保った状態で曲げ荷重を載荷した。各軸力における載荷は

表-1 コンクリートひずみの低下割合

軸圧縮力 (kN)	曲げ荷重 (kN)	コンクリートひずみ (μm)		圧縮鋼材によるコンクリートひずみの低下割合	
		理論値 圧縮鋼材無し	実験値 圧縮鋼材有り	実験値	理論値
2000	300	381	360	5.5%	2.6%
	4000	581	508	12.6%	8.3%
4000	600	755	667	11.6%	9.0%
	300	787	668	15.1%	10.5%
6000	600	963	812	15.7%	12.7%



写真-1 試験後の供試体（タイプ1）

表-2 要素試験供試体ケース

ケース No.	主断面部	鋼板断面積	孔あき鋼板ジベル			
			長さ	孔の有無	孔径	孔数
1	D19×4本	-	-	-	-	-
2	D19×4本	大(PL9.0)	短(L185)	有	大($\phi 45$)	1
3	D19×4本	小(PL4.5)	短(L185)	有	大($\phi 45$)	1
4	D19×4本	大(PL9.0)	長(L250)	有	大($\phi 45$)	1
5	D19×4本	大(PL9.0)	短(L185)	無	-	-
6	D19×4本	大(PL9.0)	短(L185)	有	小($\phi 25$)	1
7	D19×4本	大(PL9.0)	長(L250)	有	大($\phi 45$)	2

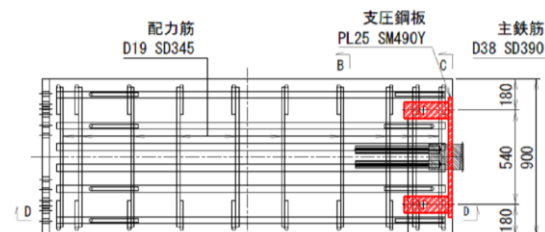


図-6 軸力導入継手曲げ試験の試験体（平面図）

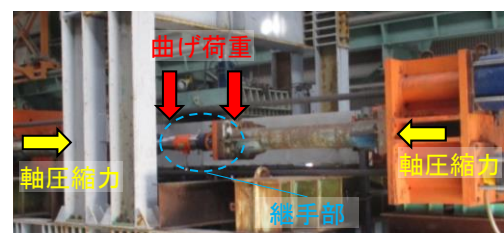


図-7 軸力導入継手曲げ試験の載荷方法

シールドトンネルの覆工設計成果を基に算定した曲げモーメントに達するまでとした。

継手面から 45 mm、100 mm、250 mm、400 mm に計測断面を設定し、試験体表面コンクリート・ジベル・主鉄筋に設置したひずみゲージから算出された各部材の荷重分担率を計算した。導入軸力 5300 kN 時の結果を一例として図-8 に示す。継手面から 100 mm の位置（ジベル孔直前）でのジベ

ルの荷重分担率は 10.7%，約 250 mm の位置（ジベル先端部分）では 6.9% となっており，主筋のみならず，設置したジベルが圧縮荷重を分担していることを確認できた。

図-9 に導入軸力 5300 kN 時の継手面から 100 mm の断面での試験体のひずみ分布を示す。図中の縦軸 0 mm の位置が試験体下面，縦軸 550 mm の位置が試験体上面として試験体を横から眺めた場合のひずみを表現している。表面コンクリート・ジベル・主鉄筋のひずみが，試験体上面から下面に向けてほぼ一直線状に分布（図中赤色の近似直線）していることが見てとれる。このことからジベル・鉄筋・コンクリートは一体的に挙動していることが確認できる。

また近似直線は，実験時に計測した実ヤング係数比（ $n = 5.21$ ）から算出した理論ひずみに近く，設計上用いられるヤング係数比（ $n = 15$ ）⁵⁾から算出したひずみと比較しても十分小さかった。このことから，ジベルを鉄筋とみなした鉄筋コンクリート断面として設計が可能であることが示された。

安全に配慮して軸力を導入しない曲げ試験を試験体が破壊するまで行った。破壊形態はタイプ 1 と同様に，セグメント継手アンカー筋の降伏での破壊を確認した（写真-2）。

2. FEM 解析による応力伝達状況の詳細検討

2-1 検討概要

試験より新たな継手部補強構造が十分なコンクリート応力低減効果を保有していることは確認した。一方で鋼板裏は鋼材とコンクリートの境となり，特殊な荷重状態となる。また圧縮鋼材の端部や折れ曲がり部には，局所的な力が働くことが考えられる。そこで本章では，実験では確認が困難な細部の応力伝達状況について FEM 解析で検証した結果を示す。

具体的には鋼板裏のコンクリートへの応力伝達過程に加え，圧縮伝達材周辺のコンクリートへの応力伝達状況について確認する。本稿では代表してタイプ 1 の圧縮力伝達材を用いて行った解析結

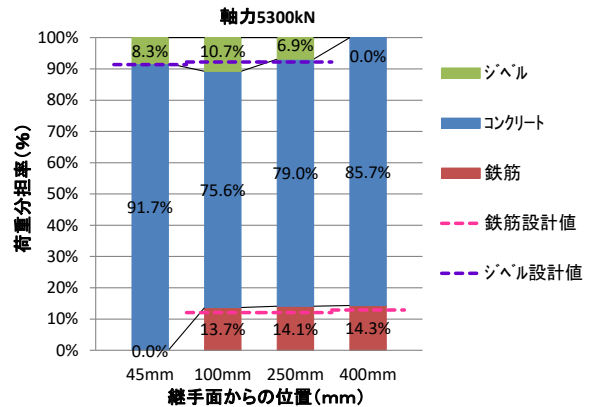


図-8 荷重分担率

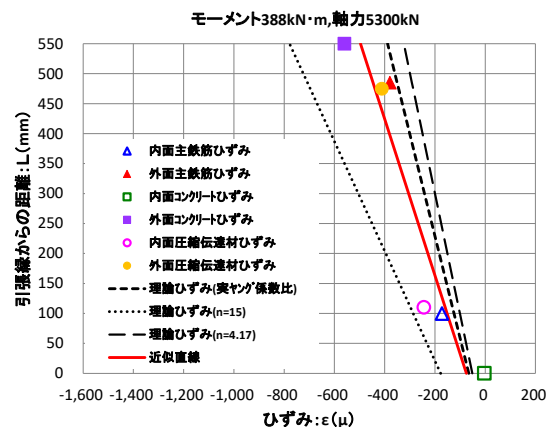


図-9 ひずみ分布（継手面から 100 mm）

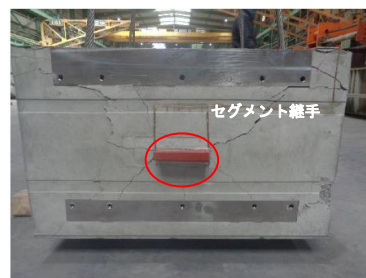


写真-2 試験後の供試体（タイプ 2）

果を示す。併せてタイプ 1 を設置した場合に，合理的にコンクリートの応力負担を軽減できる構造を確立するために，①圧縮鋼材の曲げ角度，②継面の鋼板厚を変更したケースについても検証した。

解析にあたっては，実施した実物大試験の供試体をモデリングし，FEM 解析にて試験結果を再現した。再現したモデルを実物大モデル（基本モデル）として，鉄筋の曲げ角度，鋼板の板厚を変更した，表-3 に示す 3 ケースのモデルで解析を行った。

2-2 実物大試験結果の再現

(1) 解析条件

図-10、図-11 に示すとおり、解析モデルを作成した。主鉄筋は三次元ビーム要素、圧縮鋼材とコンクリートは三次元ソリッド要素をそれぞれ使用している。境界条件は試験体の対象となる面を剛体壁に接触しているように設定した。圧縮鋼材の設置領域は挙動を重点的に確認したいため、メッシュを細かく設定した。コーンコネクター以外の接点に関しては軸力方向に対して引張力が働かず、圧縮力のみが働くように設定している。コーンコネクターとなる接点は軸力に対して圧縮力が働かず、引張力のみが働くように設定した。解析は軸力を模した面荷重を導入した状態で、曲げ荷重を模した線荷重を試験と同じく継手面から 550 mm 離れた位置で鉛直方向に加える。

(2) 再現結果

一例として B 断面の載荷荷重とコンクリートひずみの関係を図-12 に示す。試験値は、実物大試験において B 断面と同位置で計測されたひずみを表す。純粋な試験値と比較した場合、載荷荷重 0 の状態で試験値と解析値に大きなずれが生じていたため、載荷荷重 0 の状態におけるひずみの値を一致させて比較した（開始合わせ）。これは、試験を繰り返すことによる残留ひずみが影響していると考えられる。試験値（図中点線）と解析値（図中実線）の傾きはほぼ一致しており、他の A、C 断面においても同様の傾向であった。図-12 から導入軸力 2000 kN 時、4000 kN 時では、試験値が解析値よりわずかに大きなひずみが発生していることがわかる。試験の供試体の継手面は完全に平滑な面ではなく、ごくわずかにコンクリートの不陸が発生している可能性がある。その場合、継手面のコンクリートが主に接触することで、解析値よりも試験におけるコンクリートの負担（ひずみ量）が大きくなっていることが考えられる。一方で、導入軸力 6000 kN 時では、圧縮力が大きくなるため、不陸の影響が減少し、解析値と試験値がほぼ完全に一致していると推察される。

表-3 解析ケース

供試体	圧縮鋼材	
	圧縮鋼材曲げ角度	板厚
実物大モデル（基本）	165°	12 mm
曲げ角度変更モデル	150°	12 mm
板厚変更モデル	165°	25 mm

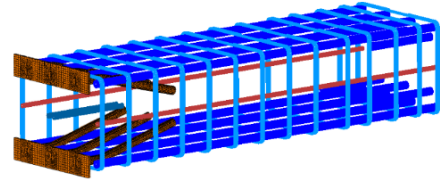


図-10 解析モデル（配筋状況）

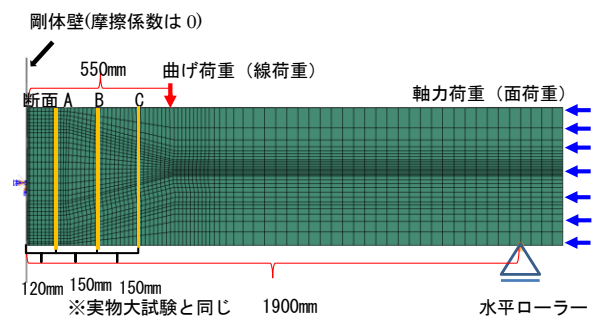


図-11 解析モデル（側面図）

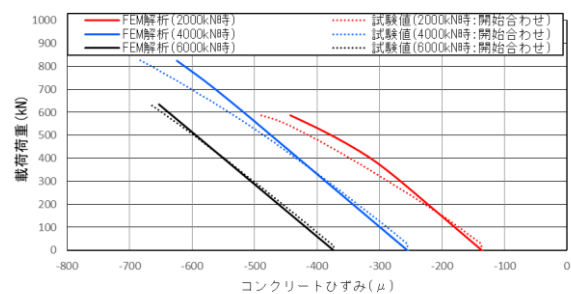


図-12 試験値と FEM 解析結果の比較 (B 断面)

2-3 圧縮鋼材の曲げ角度の影響について

(1) 条件設定

本項では、圧縮鋼材の鉄筋の曲げ角度がセグメントに及ぼす影響について検証を行う。これまでの試験時は、圧縮鋼材を配置した際に鉄筋が配力筋より上部に突出しないように 165°の曲げ加工を施していた。このとき、圧縮鋼材先端や折れ曲がり部に、コンクリートからの反力によって局所的に大きな力が働く可能性がある。そこで、実物大試験を再現解析したモデル（以下、実物大モデル）と比較するため、鉄筋曲げ角度を変更したモ

デル（以下、曲げ角度変更モデル）を作成した。曲げ角度変更モデルは、試験体上部の圧縮鋼材を150°とし、下部の圧縮鋼材は上部の鋼材と干渉しないように直線（180°）とした（図-13）。なお、実際にはセグメントは円弧形状であるため、直線での配置は困難であるが、影響検証のためそのような配置にした。

(2) 曲げ角度の影響に関する考察

両モデルの解析結果から得られる上部表面のコンクリートひずみを C 断面で比較した結果を図-14 に示す。C 断面は継手面から最も離れた断面（継手面から 420 mm の断面）であり、A、B 断面と比較して最も差異が観測された断面である。

図-14 から曲げ角度変更モデルの結果（図中青線）の方が実物大モデルと比較してひずみが大きく出ている。他の断面の結果も比較した結果、A 断面ではほぼ差異が無く、C 断面に近づくにつれて差異が大きくなることが確認できた。また軸力が大きくなるほど実物大モデルとの差が大きくなる傾向にあった。曲げ角度変更モデルは実物大モデルよりも圧縮鋼材の曲げ角度が大きい分、鋼材がより試験体内部へ配置される。このときコンクリート表面近くの鉄筋量が少なくなる。このことから、導入されている圧縮力に対して表面のコンクリートが負担する割合が増え、ひずみが増加していると考えられる。

図-15 に軸力 6000 kN 導入時のコンクリート軸方向ひずみコンター図を示す。曲げ角度変更モデルでは実物大モデルに比べ、図中青線で囲われた部分でひずみが増加していることがわかる。これは前述の通り曲げ角度が大きくなることで、表面のコンクリートの圧縮力負担が大きくなっているためと思われる。また、図中黒線で囲んでいる部分（折り曲げ位置）においてもひずみの増加が確認できる。これは折り曲げ角度が大きくなることで、導入される軸圧縮力に対して、よりコンクリートからの反力を受けやすくなるためと推察される。しかし、その影響はコンクリート表面まで到達しておらず、角度変更モデルにおいても最大圧縮ひずみは継手面に発生している（図中明示）。

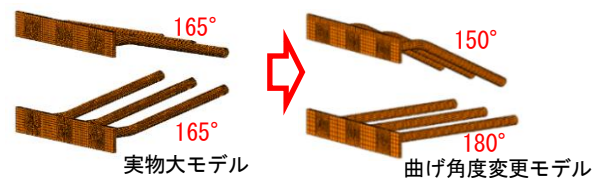


図-13 曲げ角度変更モデル

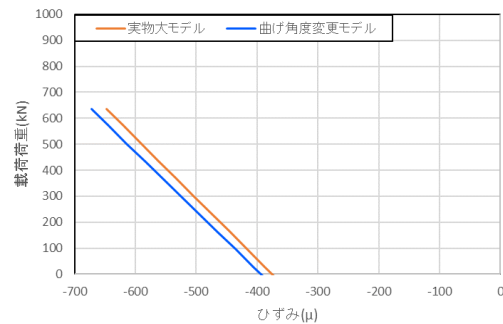


図-14 軸力 6000kN 導入時コンクリートひずみ (C 断面)

最大ひずみ : -1.927×10^{-3}

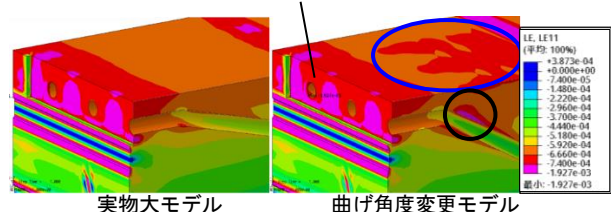


図-15 軸力 6000kN 導入時軸方向ひずみコンター図

そのため、圧縮鋼材の曲げ角度に対する厳密な管理の必要性は少ないといえる。一方で、別途配置される主筋や配力筋の位置関係を考慮した上で、それらから内側に配置できる程度で角度は緩やかとする（なるべく外側に配置する）方が望ましいと考えられる。

2-4 継手面の鋼板厚さの影響について

(1) 条件設定

本項では圧縮力伝達材を溶接する継手面の鋼板厚さの影響について検証を行う。この鋼板は圧縮力伝達材（タイプ1の鉄筋やタイプ2の孔あき鋼板ジベル）を型枠内で固定するために必要な部材である。本技術では鋼板によって直接的に耐力を確保しているわけではない。一方で、鋼板裏のコンクリートと鋼板の境界部は断面剛性が急激に変化する箇所であるため、鋼板周辺のコンクリート

に鋼板の厚さが与える影響を検証する。

検証を行うため、鋼板厚を変更したモデル（以下、板厚変更モデル）を作成し、実物大モデルと比較した。板厚変更モデルは実物大モデルの鋼板厚を 12 mm から 25 mm に変更し（図-16）、主筋と鋼板の距離が一定になるように、主筋の端部を 13 mm 内側にした。



図-16 板厚変更モデル

(2) 継手面の鋼板厚さの影響に関する考察

実物大モデルと板厚変更モデルのA断面（継手面から 120 mm 離隔をとった直近位置）のコンクリート表面ひずみを比較したものを図-17 に示す。板厚変更モデルは板厚の差異以外は実物大モデルと同様であるため、差異は継手面直近のA断面にしか現れないと考えた。図-17 から A 断面では板厚変更モデル（板厚 25 mm）の方が実物大モデル（板厚 12 mm）よりも若干ながらコンクリート表面のひずみが大きく出ている。これは、鋼板が厚くなって鋼板の剛性が上がり、変形しにくくなることで、継手部の圧縮力を確実にコンクリート軸方向に伝達できているためと考えられる。しかし、両モデルのひずみの差は最大 26 μ となっており、その差は小さい。一方、B、C 断面は鋼板から離れているため、想定通りほとんど差が生じていなかった。

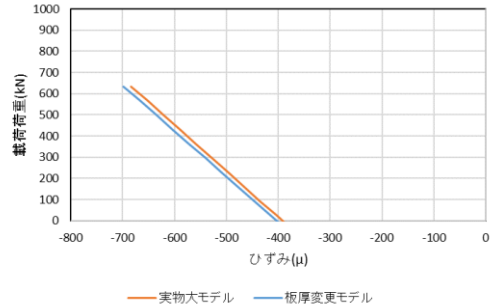


図-17 軸力 6000kN 時コンクリートひずみ (A 断面)

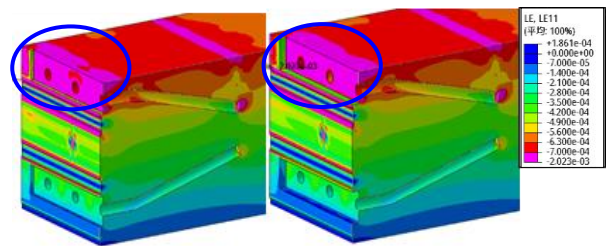
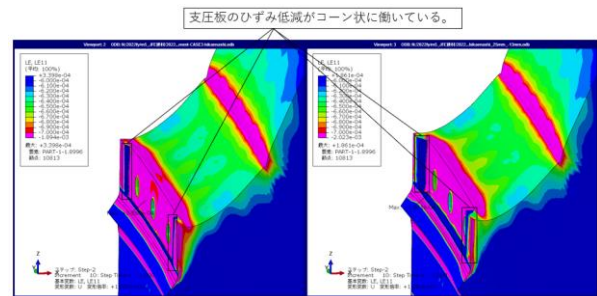


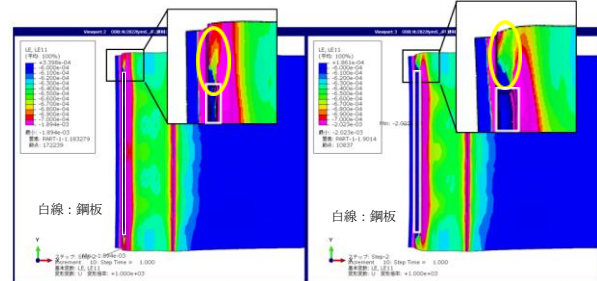
図-18 導入軸力 6000kN 時の軸方向ひずみ

図-18 に両モデルのコンクリートのひずみコンター図を示す。全体としてはほとんど差異がないが、板厚変更モデルの鋼板裏のピンク色の範囲（図中青線囲い部）が、実物大モデルと比較して若干広く確認された。図-19 に鋼板周辺部の変形量を 1000 倍にして差異をわかりやすく拡大した図を示す。図-19(a)を見ると、鋼板裏のピンク色範囲は図-18 と同様に、板厚変更モデルの方が若干広いことが見てとれる。図-19(b)は試験体を上から見た拡大コンター図である。鋼板側部のコンクリートひずみが板厚変更モデルの方が小さくなっている（図中黄線囲い部の青色部分が大きい）ことがわかる。このことから、鋼板の剛性が上がることで鋼板の変形が抑制され、鋼板側部のコンクリートのひずみ低減効果が向上していると推察される。



実物大モデル 板厚変更モデル

(a) 継手部



実物大モデル 板厚変更モデル

(b) 上面側

図-19 導入軸力 6000kN 時の軸方向ひずみ (拡大)

以上より、板厚を増加させ剛性を上げることで、鋼板裏のコンクリートに確実に継手部の圧縮力を伝達することが出来るとともに、側部コンクリートのひずみ低減効果も見られた。したがって、経済面や鋼板のたわみの程度を考慮した上で、設置する鋼板の剛性は高い方が望ましいと考えられる。

3. まとめ

本稿では RC セグメント継手部補強構造の研究成果をとりまとめるとともに、曲げ角度や板厚の影響等、細部構造の変化が及ぼす影響についても解析結果を用いて検証した。本構造を採用することによって、RC セグメントの適用範囲が拡大されることが期待できる。この技術が今後、シールドトンネルの合理的な設計に資する成果となることを期待する。

謝辞：本論文を作成するにあたり、審議いただいたコンクリート構造物検討委員会、構造技術委員会コンクリート分科会、トンネル技術検討委員会各位、JFE 建材株式会社及び株式会社 IHI 建材工業関係各位には、技術検討を進める上で多大な助力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：大深度地下利用，<https://www.mlit.go.jp/toshi/daisindo/index.html> (2024 年 1 月 19 日閲覧)。
- 2) 小川和花，飛ヶ谷明人ほか：圧縮鋼材を配置した RC セグメント継手部補強構造の開発，令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，V-513,2021。
- 3) 増本裕幸，飛ヶ谷明人ほか：圧縮力の伝達機構を付与した RC セグメント継手構造の開発，令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，V-512,2021。
- 4) 土木学会，日本下水道協会：シールド工用標準セグメント，2001。
- 5) (公社)土木学会：2016 年制定トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 [シールド工法編]・同解説，2016。

DEVELOPMENT OF STRENGTHENING SYSTEM FOR REINFORCED CONCRETE SEGMENT JOINTS UNDER HIGH AXIAL FORCES

Yuma OKUYAMA, Takahisa FUKUSHIMA, Akito HIGATANI, Tomoya OTANI and Sodai ISHIZU

Reinforced concrete (RC) segments of shield tunnels built at high depths are under high axial compressive forces. The thickness of the segments is often determined by the strength of the joints because the compressive force is carried by both concrete and steel reinforcement in the segments but only by the concrete at the joints.

This paper reports the development of a new and rational RC segment joint strengthening system in which a compressive force transmitter is installed at the joints to share the compressive forces with concrete.

奥山 裕真



阪神高速道路株式会社
建設事業本部 大阪建設部 設計第一課
Yuma OKUYAMA

福島 誉央



阪神高速道路株式会社
建設事業本部 大阪建設部 設計第一課
Takahisa FUKUSHIMA

飛ヶ谷 明人



阪神高速道路株式会社
計画部 事業計画課
Akito HIGATANI

大谷 智也



阪神高速道路株式会社
計画部 事業計画課
Tomoya OTANI

石津 綜大



阪神高速道路株式会社
管理本部 神戸管理・保全部 保全部管理課
Sodai ISHIZU