

### (36) トンネル構造物のプレストレス補強工法の実物大実験

(株)熊谷組土木技術部 ○熊坂徹也  
 (株)熊谷組土木技術部 正会員 本田 勉  
 東電設計(株)地中線土木部 円谷喜只  
 東電設計(株)地中線土木部 伊藤利昭

#### 1. まえがき

経年の劣化により耐力の低下した、ボックス形式のトンネル構造物を補修・補強する場合、従来工法として①ボックス内面に鉄筋コンクリートを打増しする、②補強鉄板を貼付ける、③ボックス内面より劣化鉄筋をはつり出し、新たに鉄筋を添設する、等の方法が採用されているが、これらの方法では①ボックス内空間の減少を伴う、②ボックス外側の鉄筋に対応できない、③過大な応力度が生じていると想定される既存の鉄筋応力度を緩和することができない、等の問題点がある。これに対してプレストレス補強工法は、PC鋼材により断面に導入される軸力により既存の鉄筋応力度を緩和することが可能という利点があり、筆者らはウォータージェットにより溝を切削し、PC鋼材を挿入して埋戻した後、緊張する補強方法を提案し、要素実験を行ってその可能性を確認した[1]。また2次元および3次元のFEM解析により、PC鋼材の最適配置方法を決定し、その時のプレストレス分布を推定した[2]。本報告では、さらにプレストレス補強の実用化を目指して実施した実物大実験による、外力作用下での溝切削の影響、プレストレスの導入による応力度の変化とその奥行き方向の分布、およびプレストレスによる補強効果の確認を目的として実施した、補強試験体による曲げ載荷試験の結果について述べる。

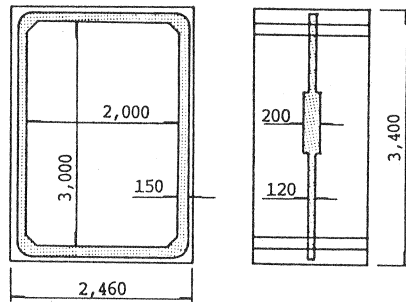


図1 試験体と溝の切削寸法

表1 コンクリートの試験結果 (kgf/cm<sup>2</sup>)

2. 実験概要	プレロード時		載荷試験時			
	圧縮強度	弾性係数	圧縮強度	割裂強度	弾性係数	
2. 1. 試験体						
実験に用いた試験体は内空3.0m(H)×2.0m(W)×1.5m(L)×厚さ20cm	本体コンクリート	490	3.10×10 <sup>5</sup>	586	42.9	3.40×10 <sup>5</sup>
(頂底板), 23cm(側壁)のボックスカルバートで、鉄筋およびコンクリート表面にひずみゲージを貼付した。	埋戻しモルタル	—	—	760	44.1	2.91×10 <sup>5</sup>

2. 2. プレロード

試験体は土水圧等の載荷状態を模擬するため、頂版下端的鉄筋応力度が2,000kgf/cm<sup>2</sup>となる状態を目標とし、頂版上部に鋼製インゴットを2点載荷(プレロード)した。プレロード時のコンクリート強度は表1に示すとおりである。

#### 2. 3. ウォータージェット(WJ)による溝切削

プレロード載荷状態でPC鋼材配置用の溝を切削し、切削中のひずみ測定を行うことにより、断面欠損による健全部への影響を把握することとした。溝切削はWJにより行い、その寸法は幅12cm×深さ15cmで、PC鋼材を全周配置するため図1のように側壁に拡幅部を設けてPC鋼材を接続・定着できるようにした。プレロードの載荷状態でのWJによる溝切削状況を写真1に示す。

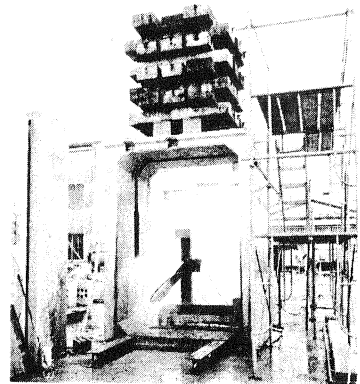


写真1 プレロードとWJ切削

2. 4. プレストレスの導入

WJで切削した溝は内径50mmのシースを配置し、拡幅部を箱抜きしてプレミックスの補修用モルタルを吹付け、埋戻した。この箱抜き部より12.4mm P C鋼より線4本を後挿入し、写真2に示す矩形の接続具を用い、その両面で相対するP C鋼材をくさび定着した。緊張側のP C鋼材は、カープチェアーを用いてトンネル内に引出し、緊張ジャッキをセットし、頂版中央に緊張力20tfを導入した。

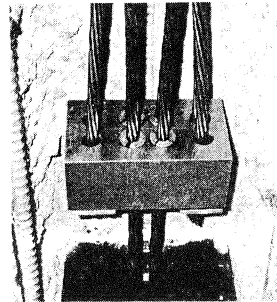


写真2 接続定着具

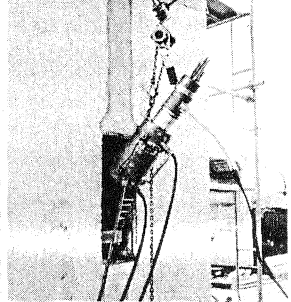


写真3 PC緊張状況

2. 5. 曲げ荷重試験

試験体は緊張後箱抜き部を埋戻しプレロードを除荷した後、実験棟内に搬入して1000tf型の反力フレームにセットした。荷重は頂版に2点荷重で油圧ジャッキにより単調増加で与え、試験体が終局に至るまで荷重した。荷重方法を図2に示す。また荷重試験時のコンクリート強度は表1のとおりである。

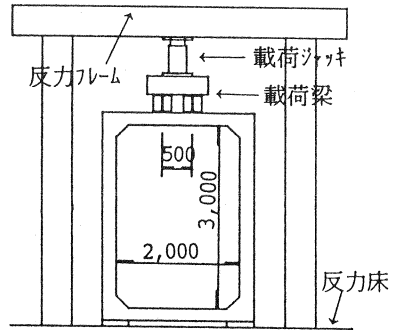


図2 荷重方法

3. 実験結果と考察

3. 1. プレロードと鉄筋応力度

プレロード時の荷重と頂版中央下端の鉄筋応力度との関係を図3に示す。図中に直線で示した計算値は、コンクリートの曲げ引張強度を $\sigma_{ct}=36\text{kgf/cm}^2$ として、ひびわれ発生までを全断面有効で、その後コンクリートの引張部分を無視して応力計算したものである。

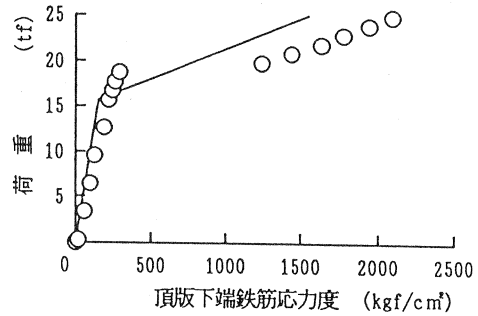


図3 頂版中央下端鉄筋応力度と荷重の関係

プレロード時にひびわれ発生が目で確認されたのは15tf荷重時であり、図3の計算値と概ね一致している。その後19tf程度まで新たなひびわれ発生や、ひびわれの進展が認められ、20tf以後はひびわれ深さはほぼ安定した状態であった。

荷重24.9tfの時、鉄筋応力度が目標の2,000 kgf/cm<sup>2</sup>以上となり、ひびわれ幅は0.2mmとなった。

3. 2. WJによる溝切削の影響

図4はプレロード→WJによる溝切削→モルタル埋戻→PC緊張→プレロードの除荷、における、頂版中央下端の鉄筋応力度の時刻歴変化をプロットしたものである。プレロード後の鉄筋応力度は漸増傾向にあるが、400時間程度経過した段階で約2,800kgf/cm<sup>2</sup>に安定してくる。これは、プレロード後にひびわれが徐々に進展した結果と考えられる。このときのひびわれ幅は0.3mm程度に拡大していた。またWJ切削の期間中、見かけの鉄筋応力度は減少しているが、こ

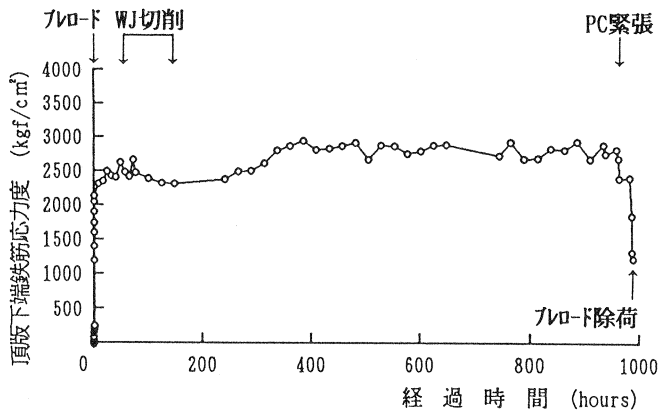


図4 頂版中央下端鉄筋応力度の時刻歴変化

これは温度変化の影響と考えられ、断面欠損による応力増加は認められなかった。

### 3. 3. プレストレスの導入

鉄筋応力度が $2,800\text{kgf/cm}^2$ のひびわれ断面に対して $20\text{tf}$ の緊張力を軸力として導入した場合、断面のつりあいから得られる鉄筋応力度の計算値は $1,800\text{kgf/cm}^2$ に減少する。しかし図4のように実験結果は $2,400\text{kgf/cm}^2$ への減少に止まった。図5の頂版中央断面のひずみ分布の変化からは、軸力 $20\text{tf}$ が増加しているの、緊張力は導入されている。プレロードを除荷した場合にも、同様に鉄筋応力度の減少は $1,300\text{kgf/cm}^2$ に止まっていることから、これは埋戻しモルタルによってひびわれの閉じるのが妨げられた結果と考えられる。

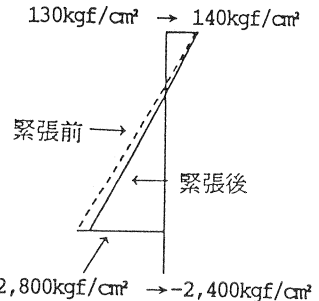


図5 PC緊張時のひずみ変化

また頂版中央部における奥行き方向のプレストレス分布を図6に示す。これは頂版中央部上端主鉄筋のプレストレス導入前後での変化量である。この結果より鋼材位置での応力変化に対する鋼材と鋼材の中間位置での応力変化の比は、 $0.74$ となった。次にFEM解析により求めた奥行き方向のプレストレス分布を図7に示す。この結果より求められた上記比率は $0.75$ となり、実験値をよく近似している。

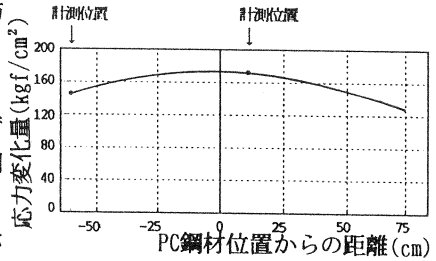


図6 頂版中央部の奥行き方向プレストレス分布

### 3. 4. 補強試験体の曲げ載荷試験

#### (1) 埋戻しモルタルと本体コンクリートの一体性

頂版下縁の荷重点位置 (引張領域) における埋戻しモルタルおよび本体コンクリートひずみと荷重の関係を図9に示す。図中の計算値は、実線が埋戻しモルタルと本体コンクリートが完全に一体化して全断面有効とした場合を、また破線は本体コンクリートのひびわれ部分を無視し、圧縮部分と埋戻しモルタルで構成されるT型断面 (図8) のみが有効として作用する場合を示している。本体コンクリートはひびわれ断面であるが、埋戻しモルタルおよび引張鉄筋との付着により、図9のように埋戻しモルタルの約 $1/3$ のひずみが生じており、相応の応力を分担している。したがって埋戻しモルタルのひずみは、全断面有効よりは大きく、T型断面よりは小さくなっており、断面の剛性は両者の中間的な値となっているものと考えられる。次に側壁上部内側 (圧縮領域) における埋戻しモルタルおよび本体コンクリートひずみと荷重の関係を図10に示す。この図から、圧縮領域については埋戻しモルタルと本体コンクリートは、ほぼ同一のひずみ変化を示しており、その一体性が確認された。

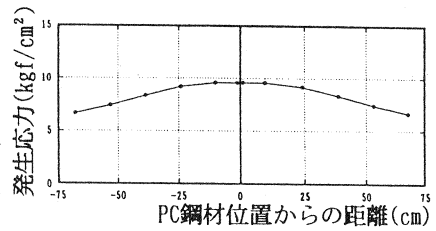


図7 頂版部奥行き方向プレストレス分布 (FEM)

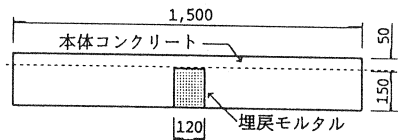


図8 部材断面

#### (2) 埋戻しモルタルのひびわれ荷重

埋戻しモルタルにひびわれ発生が認められたのは荷重 $35\text{tf}$ の時であった (図11)。ここで、プレストレス導入時には全断面有効、載荷試験時にはT型断面と考えた時の、埋戻しモルタルのひびわれ荷重の計算値は $31\text{tf}$ となり、概ね実験値を近似している。頂版中央のたわみと荷重の関係を図11に示す。モルタルのひびわれ発生前後でたわみ勾配に変化が見られており、これは頂版の剛性がT型全部が有効な断面から、圧縮コンクリート部の

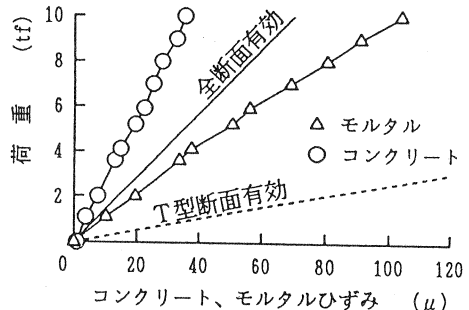


図9 頂版下縁ひずみと荷重の関係

みが有効なT型ひびわれ断面へと移行したことを示すものと考えられる。

(3) 鉄筋の降伏荷重

頂版中央下端の鉄筋ひずみと荷重との関係を図12に示す鉄筋ひずみの増加勾配も35tfを過ぎて変化が見られ、さらに50tfで明瞭な降伏を示している。図12にはプレストレス補強しない場合を想定した全ひびわれ断面を用いた計算値とプレストレス補強した場合を想定して軸力20tfを加算したT型断面を用いた計算値とを示した。鉄筋ひずみはT型断面を用いた計算値に近く、また降伏荷重の実験値と計算値を比較して、明らかにプレストレスによる補強効果が認められる。また降伏荷重を過ぎた70tf時点での目視観察でも、本体コンクリートと埋戻モルタルとの境界面にはひびわれが認められず、コンクリートと埋戻モルタルの付着は十分であると判断された。

(4) 終局荷重

荷重をさらに増加させると、頂版中央のモーメントが再分配される傾向が現れ、側壁上部の外側にひびわれが多く発生した。終局の破壊モードはハンチ部の圧壊によるもので、終局荷重は108tfであった。終局後の観察ではコーナー部内側にPC鋼材に沿ったヘアクラックや、本体コンクリートと埋戻しモルタル境界でのひびわれが観察されたが、いずれも破壊の原因となるものではなかった。

4. まとめ

(1)WJで溝を切削し、シースを配置して埋戻し、PC鋼材を挿入、緊張する施工方法により、トンネル内におけるプレストレス補強が可能であることが確認できた。

(2)20tfの緊張力導入により鉄筋応力度が緩和され、PC鋼材も配置されているので、補強効果は確実に得られたものと考えられる。ただし、ひびわれ幅の縮小という補修効果の面では、埋戻しモルタルをPC緊張前に施工したために不十分であった。頂版中央部のひびわれ部分に対する埋戻しモルタルをPC緊張後に施工することにより、ひびわれに対する補修効果も期待できるものと考えられる。

(3)埋戻しモルタルのひびわれ荷重の試験結果から、プレストレスが予定どおり導入されている。

(4)奥行き方向のプレストレス分布は、FEM解析によりに推定可能である。

(5)鉄筋の降伏荷重は、プレストレス補強により改善されている。

(6)埋戻しモルタルと本体との付着は十分であり、終局荷重に至るまでプレストレス補強効果を発揮できる。

[参考文献] [1] 円谷、伊藤、本田、熊坂：プレストレスによるボックスマンの補強技術に関する基礎研究、第47回土木学会年次学術講演会 V-73, 74, 1992, [2] 円谷、伊藤、本田、熊坂：プレストレスによるボックスマンの補強技術に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集第15巻 2140, 1993, [3] 円谷、伊藤、本田、熊坂：ボックスマンに対するプレストレス補強実験、第49回土木学会年次学術講演会 V-395, 396, 1994

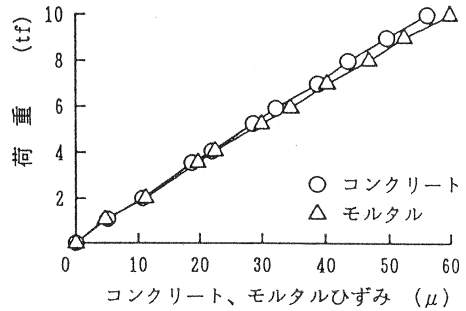


図10 側壁内側ひずみと荷重の関係

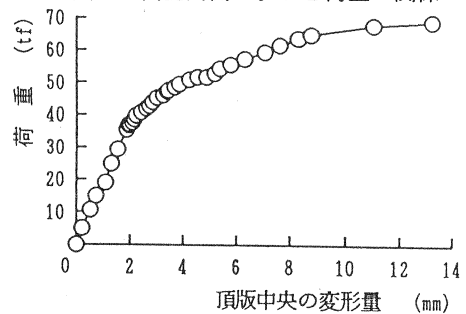


図11 頂版中央のたわみと荷重の関係

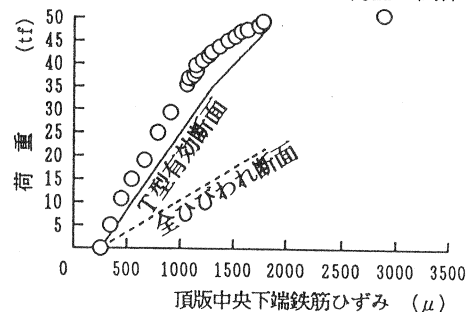


図12 頂版中央下端の鉄筋ひずみと荷重の関係

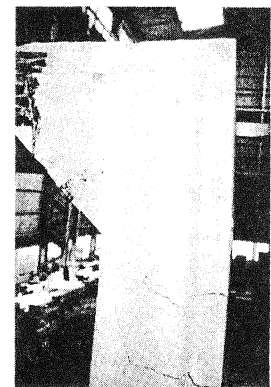


写真4 試験体終局状態