

## 報告

## [1173] ポストテンション導入による初期ひびわれ幅の低減に関する一考察

壹岐直之\*<sup>1</sup>・清宮 理\*<sup>2</sup>・山田昌郎\*<sup>3</sup>

## 1. まえがき

沈埋トンネル等のマスコンクリートの製作時に発生する温度ひびわれは、部材を貫通し止水性や耐久性の観点からひびわれ幅の大きい箇所では補修が必要となる。プレストレストコンクリートの沈埋函ではポストテンションの導入によるひびわれ幅の低減効果が期待できる。本報告は、鉄筋とコンクリート間の既往の付着-ひずみ-すべり関係式を用いて、載荷、除荷およびポストテンション導入時の荷重-ひびわれ幅の関係の予測方法について考察を行った。また、ポストテンション導入によるひびわれの挙動を確認するため模型実験を行った。さらに、ひびわれを充填工法で補修した後のポストテンション導入によるひびわれ幅の状況についても調べた。

## 2. ひびわれ幅の解析方法

## 2.1 載荷時のひびわれ幅の計算

今回検討を行った付着応力( $\tau$ )-すべり( $S$ )-ひずみ( $\epsilon$ )の関係は以下の2とおりでである。

①島らの提案式[1]を用いる。

$$\tau(\epsilon, S) = K \cdot f'c \cdot \left\{ \ln \left( 1 + 5 \cdot \frac{1000 \cdot S}{D} \right) \right\}^3 \cdot \frac{1}{1 + 10^5 \cdot \epsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

ここで、 $D$ ：鉄筋径、 $f'c$ ：コンクリートの圧縮強度、 $K$ ：定数とする。

②森田らの提案式[2][3][4]より式(2)を用いる。ただし、 $\tau_{\max}$ ：最大付着応力、 $S_{\tau_{\max}}$ ：最大付着応力時のすべりとする。

$$\tau(S) = \tau_{\max} \cdot e \cdot \frac{\ln \left\{ \frac{(e-1) \cdot S / S_{\tau_{\max}} + 1}{(e-1) \cdot S / S_{\tau_{\max}} + 1} \right\}}{\left( \frac{(e-1) \cdot S / S_{\tau_{\max}} + 1}{(e-1) \cdot S / S_{\tau_{\max}} + 1} \right)} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (2)$$

ここで、 $\tau_{\max}$ 、 $S_{\tau_{\max}}$  は以下の式を用いる。最大付着応力とコンクリートの圧縮強度との関係[5]を式(3)に、付着応力とすべりの関係[1]を式(4)に示す。

$$\tau_{\max} = 2.0 \cdot \sqrt{f'c} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

$$\tau = 2.1 \cdot \ln \left( 1 + 5 \cdot \frac{1000 \cdot S}{D} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

鉄筋応力( $\sigma_s$ )、コンクリート応力( $\sigma_c$ ) および、すべり ( $S$ ) の関係は、式(5)[6]、式(6)[6]、式(7)[1][6][7]で参照した式は積分形)を用いる。ひびわれ位置でのすべりを仮定し、境界条件として端部ですべり零、もしくは端部までですべり零かつ鉄筋ひずみ零を設定して、収束する解

\*1 若築建設(株)土木本部技術調査室 運輸省港湾技術研究所研修生 (正会員)

\*2 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室長、工博 (正会員)

\*3 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室、工修 (正会員)

を試行的に求める。コンクリート応力が引張応力を越えた断面で新たなひびわれが生じる。また、新たなひびわれ発生後は、隣合うひびわれの中央ですべり零として計算を行う。

$$\sigma_s(i) = \sigma_s(0) - \frac{R}{A_s} \cdot \sum_{j=0}^{i-1} (\tau(j) \cdot dx) \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (5)$$

$$\sigma_t(i) = \frac{R}{A_c} \cdot \sum_{j=0}^{i-1} (\tau(j) \cdot dx) \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (6)$$

$$S(i) = S(0) - \sum_{j=0}^{i-1} (\varepsilon(j) \cdot dx) \quad [\text{cm}] \quad (7)$$

ここで、 $\sigma_s$ :鉄筋応力、 $\sigma_t$ :コンクリート応力、 $R$ :鉄筋周長、 $A_s$ :鉄筋断面積、 $A_c$ :コンクリート断面積、 $dx$ :要素長、 $(i)$ :荷重端より  $i$  番目の要素とする。

降伏後の鉄筋の応力-ひずみ関係は、式(8)[7]を用いる。

$$\sigma_s = f_y + (1 - e^{(\varepsilon_{sh} - \varepsilon)/k}) \cdot (1.01 \cdot f_u - f_y) \quad [\text{MPa}] \quad , \quad k = 0.032 \cdot (400 / f_y)^{1/3} \quad (8)$$

ここで、 $f_y$ :鉄筋降伏強度、 $f_u$ :鉄筋引張強度、 $\varepsilon_{sh}$ :ひずみ硬化の初期ひずみとする。

コンクリート表面の変形は鉄筋の変形に比べ非常に小さく、ひびわれ位置でのすべりを、鉄筋とコンクリート表面との変位の差と設定する。ひびわれ幅は、ひびわれの左右でのすべりの合計とする。

## 2. 2 除荷時のひびわれ幅の計算

除荷時のひびわれ幅は、鉄筋とコンクリートとの間での変形に対する拘束を考慮して算定する。鉄筋の変形に対してコンクリートが拘束しないとした場合の鉄筋応力と、載荷時の最大荷重での鉄筋応力との差を除荷による鉄筋応力の減少量とし、以下a)b)c)の仮定を基にして除荷時の応力を算定する。a)鉄筋およびコンクリートは応力の減少量に対して弾性変形する。b)鉄筋応力の圧縮とコンクリートの圧縮に抵抗する力が釣り合う。c)除荷時の応力が式(5)(6)の関係に従う。また、コンクリートの応力を断面の平均値で扱うと鉄筋の変形量が小さく見積られるため、コンクリートの鉄筋近傍での応力は断面の平均応力に対し9倍であるとする。これは図-1に示すよう、コンクリート断面で円形を取り出し、中心に載荷するときの微小な角度( $d\theta$ )を持つ扇型での釣合式を積分することで求めた。

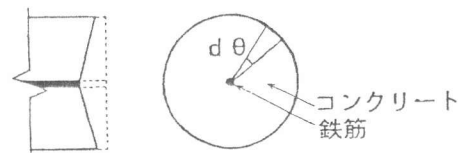


図-1 鉄筋とコンクリートの弾性変形

## 3. 載荷実験

### 3. 1 試験体の構造と使用材料

供試体は、AタイプとBタイプとがある。コンクリートの配合および強度を表-1に示す。鉄筋は、両タイプともにSD295A, D13を用いる。供試体AはA1, A2, A3, およびA4の4体製作した。図-2に示すよう一辺の長さが20cmの正方形断面とし、4本の鉄筋と、ポストテンション導入用のシース管を埋め込んだ。純引

表-1 コンクリートの配合および強度

	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				スランブ [cm]	強度 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
	W	C	S	G		
供試体 A	164	330	760	1050	10.0	339
供試体 B	164	330	760	1050	9.5	307

張部分の長さは50cmで、この中央に初期ひびわれ導入のため切欠きを設けた。

供試体B はB1, B2, B3, B4, および B5 の5体製作した。図-3に示すよう切欠きから5cm離れた位置より、コンクリートにテーパを設け、鉄筋量を中央部の3倍にした。これは、鉄筋降伏前のハンチ部付近での新たなひびわれの防止を目的とするためである。

供試体 B3 は、ひびわれ幅0.60mm(荷重最大値17.4tf)まで載荷した後で、充填工法を用いて補修を行った。シール材でひびわれ表面をマスキングし24時間放置し、ひびわれ内部にエポキシ系樹脂を注入し硬化させた。

### 3. 2 載荷方法と計測項目

図-2および図-3に示すよう、手動式の油圧ジャッキを2本入れて載荷した。初期ひびわれの導入までは2つのジャッキの合計で0.5tf毎に計測した。その後、ひびわれ幅の平均が0.01mm毎に、ひびわれ幅の目標値を0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60mmに設定して載荷した。このとき、左右のひびわれ幅が均等になるよう2本のジャッキをそれぞれ制御した。除荷は1tf毎に、ポストテンション導入は12tfまで1tf毎に計測を行った。

計測項目については、2本のジャッキそれぞれにロードセルを付け荷重を測定した。ひびわれ幅は、切欠き部の左右に上下2個づつ計4個のパイゲージで測定した。ひずみゲージは、切欠き部の4本の鉄筋にそれぞれ取り付けた。供試体A のみに切欠き位置より左右に9cm離れた位置にも更に取り付けた。これらの取り付け位置を、図-2および図-3に示す。

## 4. 実験結果

### 4. 1 荷重とひびわれ幅、鉄筋ひずみとの関係

供試体A では、6tf(載荷重は2本のジャッキの合計)のとき、図-4に示すように切欠き部( $x=0\text{cm}$ )とフーチングとの境界部( $x=25\text{cm}$ )に、ほぼ同時に初期ひびわれが発生した。その後、14tfにおいて切欠きより右側に、切り欠きとフーチング境界のほぼ中央( $x=13\text{cm}$ )にひびわれが発生した。

供試体B では、6tf のとき図-5に示すように切欠き部( $x=0\text{cm}$ )に初期ひびわれが発生した。その後、切欠きの右側に、12tfでフーチング境界部( $x=30\text{cm}$ )、14tfで切欠きと

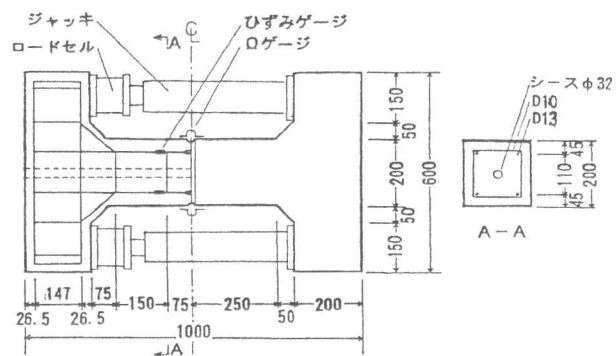


図-2 供試体 A および 実験装置

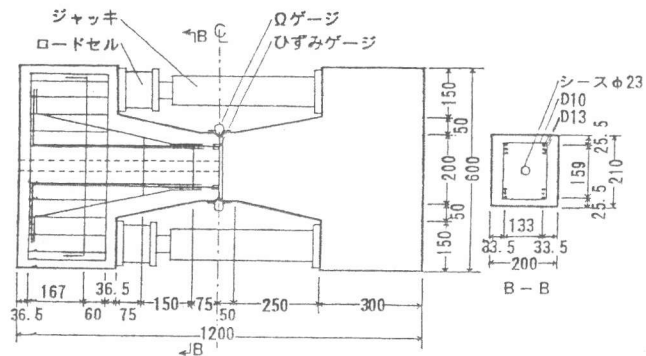


図-3 供試体 B および 実験装置

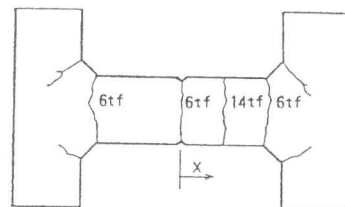


図-4 供試体 A の代表的なひびわれ

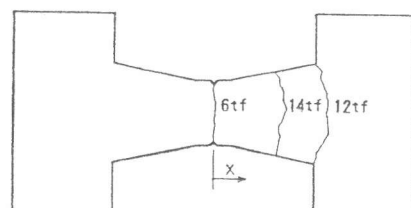


図-5 供試体 B の代表的なひびわれ

フーチング境界の間( $x=23\text{cm}$ )にひびわれが発生した。

供試体A の荷重-ひびわれ幅、荷重-鉄筋ひずみの関係を各々、図-6および図-7に示す。最大荷重19.5tfで、ひびわれ幅は0.34mmになり、除荷後0.1mmに減少した。ポストテンションをコンクリート応力に換算して $30\text{kgf/cm}^2$ 導入すると、ひびわれ幅は0.

02mmに減少しひび割れはほぼ閉じた。切り欠き部から9cm での鉄筋ひずみは、最大荷重時に1700 $\mu$ 、除荷後440 $\mu$ 、ポストテンション導入後220 $\mu$ となった。

供試体B の荷重-ひびわれ幅の関係を図-8に示す。14.5tf付近で鉄筋が降伏し、このときのひびわれ幅は0.32mmであった。その後ひびわれ幅は、最大荷重15tfで0.60mm、除荷後0.32mm、ポストテンション導入後0.12mmとなった。補修を行った供試体について、ポストテンションを導入によるひびわれ幅の減少量は0.01mmにとどまった。

供試体B のポストテンション導入後の再載荷による荷重-ひびわれ幅の関係を図-9に示す。ひびわれ幅の初期値はポストテンション導入後のひびわれ幅としてある。載荷時はポストテンション導入時の曲線に沿っており、除荷後新たな残留ひび割れは生じなかった。

#### 4.2 残留ひびわれ幅

供試体B で、最大ひびわれ幅-残留ひびわれ幅の関係を図-10に、最大荷重-残留ひびわれ幅/最大ひびわれ幅の関係を図-11に示す。ポストテンションの導入により、最大ひびわれ幅に対する残留ひびわれ幅、荷重に対する残留ひびわれ/最大ひびわれ幅は

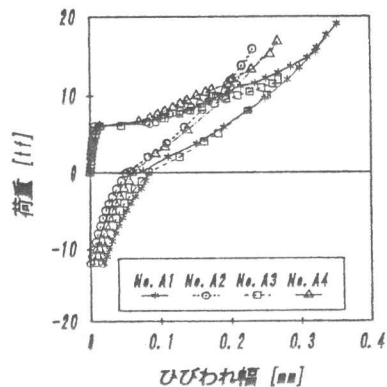


図-6 供試体 A ひびわれ幅実験値

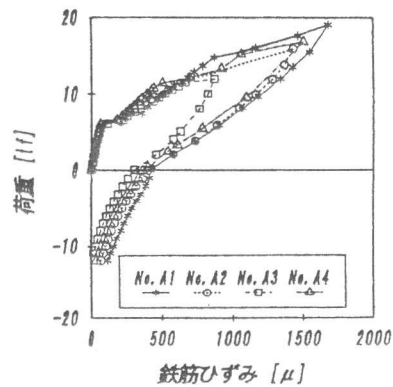


図-7 供試体 A 鉄筋ひずみ実験値

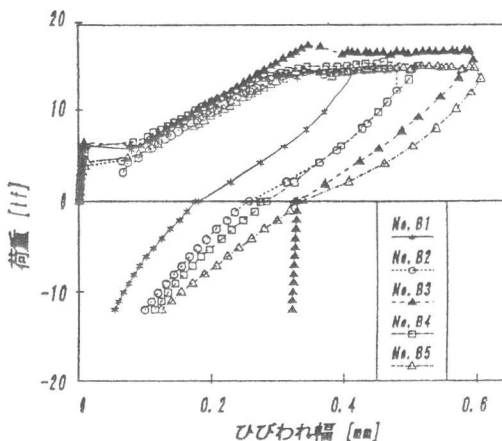


図-8 供試体 B ひびわれ幅実験値

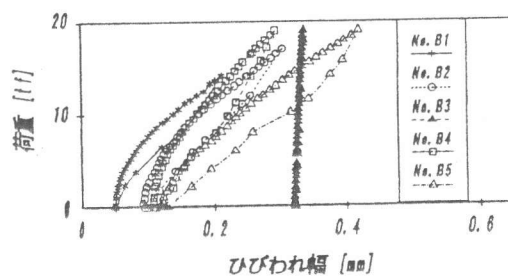


図-9 供試体 B ひびわれ幅実験値  
(ポストテンション導入後)

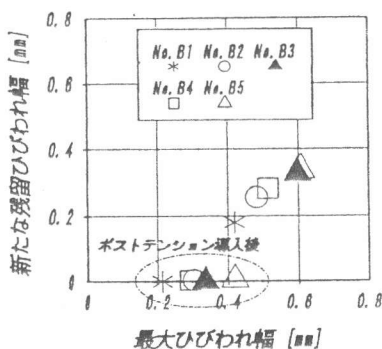


図-10 実測した最大ひびわれ幅と、新たに生じた残留ひびわれ幅との関係

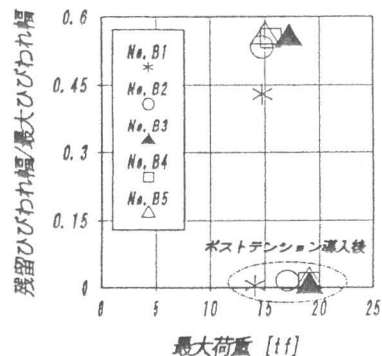


図-11 実測した最大荷重と、新たに生じた残留ひびわれ幅/最大ひびわれ幅との関係

大きく減少する。ポストテンション導入後のひびわれ幅は、1度目の残留ひびわれが幅がポストテンション導入によって低減した値を初期値としてある。2度目の載荷後の残留ひびわれ幅は0.01mm未満となり、残留ひびわれ幅はほとんど増加しなかった。補修を行った供試体のひびわれ幅は、ポストテンションの導入に際して減少量は0.007mmであり、その後19tfまで再載荷しても0.005mmの増加にとどまった。

## 5. 解析と実験結果の比較

### 5.1 載荷時の解析

供試体Aについての解析結果と実験結果との比較を以下に示す。解析には表-2の値を用いた。

①式(1)において $K=0.5$ で解析したところ、6tfにおいて $x=0.0, x=25.0\text{cm}$ の2カ所でひびわれが発生し、それ以降ひびわれは発生しないという結果を得た。これは、供試体左半分の状況をよく再現している。図-12および図-13に、切欠き部からすべり零までの距離(L)を12.5cmとして解析したひびわれ幅と鉄筋歪の結果を示す。ひびわれ幅および鉄筋ひずみともに実験結果とほぼ一致した。

式(1)の定数Kがひびわれ幅の算定値に及ぼす影響を図-14、鉄筋ひずみの算定値に及ぼす影響を図-15に示す。これらの図は、 $L=12.5\text{cm}$ で固定して算定した結果である。

②式(2)を用いて、式(3)(4)の計算値である $\tau_{\max}=117.2\text{kgf/cm}^2, S_{\tau_{\max}}=0.61\text{mm}$ と仮定すると以下の結果を得た。6tfで $x=0.0, x=25.0\text{cm}$ に、12tfで $x=12.5\text{cm}$ にひびわれが発生する。これは供試体右半分の状況をよく再現している。12tf以下では $L=12.5\text{cm}, 9\text{tf}$

表-2 解析に用いた諸値

$f'c$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	339.0
$f_y$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	3750
$f_u$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	4500
$\epsilon_{sh}$ [ $\mu$ ]	1700
$\tau_{\max}$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	117.2
$S_{\tau_{\max}}$ [mm]	0.61

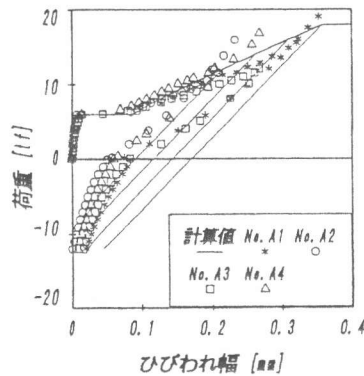


図-12 ひびわれ幅実験値と計算値の比較 (付着応力関係は岡村式)

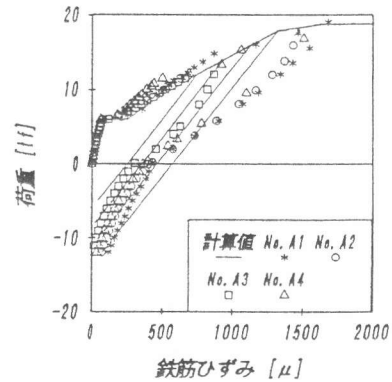


図-13 鉄筋ひずみ実験値と計算値の比較 (付着応力関係は岡村式)

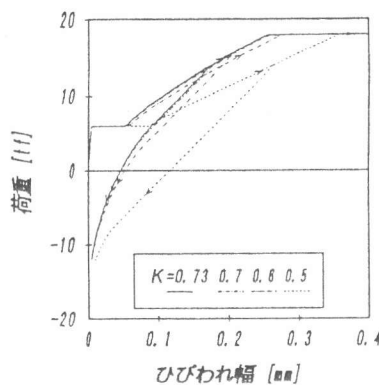


図-14 ひびわれ幅の算定値に及ぼす定数Kの影響 (付着応力関係は岡村式)

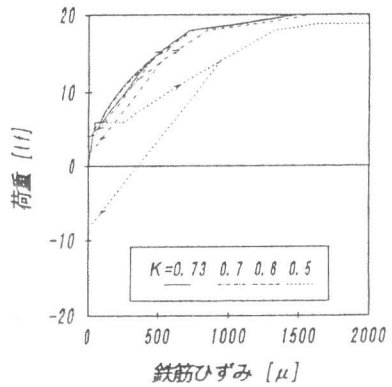


図-15 鉄筋ひずみの算定値に及ぼす定数Kの影響 (付着応力関係は岡村式)

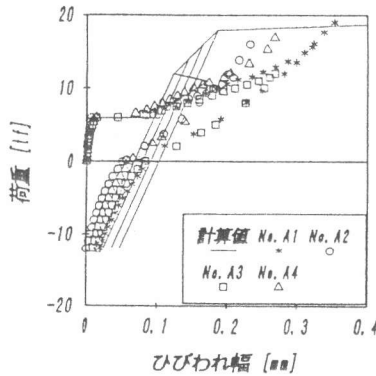


図-16 ひびわれ幅実験値と計算値の比較 (付着応力関係は森田式)

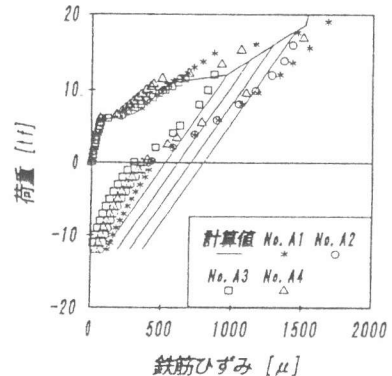


図-17 鉄筋ひずみ実験値と計算値の比較 (付着応力関係は森田式)

からは  $L=6.25\text{cm}$  で解析した結果を図-16および図-17に示す。とくに鉄筋ひずみは実験結果とよく一致しているが、ひびわれ幅は $12\text{tf}$ 以降では実験結果と一致しない。計算では、既存のひびわれの幅が、新たなひびわれの発生によって急激に減少するという結果となった。

## 5. 2 除荷時およびポストテンション導入時の解析

①式(1)において  $k=0.5$  とした解析結果を図-12および図-13に示す。ひびわれ幅および鉄筋ひずみの減少の傾向は、実験結果とほぼ一致した。残留ひびわれ幅は $0.12\sim 0.20\text{mm}$ 、鉄筋ひずみは $400\sim 700\mu$  となった。ポストテンション導入後、ひびわれ幅と鉄筋ひずみはそれぞれ $0.02\sim 0.08\text{mm}$ 、 $60\sim 260\mu$  に減少するという解析結果を得た。

②式(2)を用いた解析結果を図-15および図-16に示す。鉄筋ひずみは、除荷後 $520\sim 800\mu$ 、ポストテンション導入後 $100\sim 360\mu$  となった。両方法ともに、残留ひびわれ幅と鉄筋ひずみとは、実験値より大きくなった。これらのことより今回の計算法では、除荷後のひびわれ幅、ポストテンション導入によるひびわれ幅の低減効果を、設計上安全側に予測できると考える。

## 6. まとめ

今回、得られた主要な結果は以下のとおりである。

①島ら、および森田らの提案式をもとに、除荷時の残留ひびわれ幅の算定式を提案し、小型模型実験との比較を行った。計算による残留ひびわれ幅は、実験よりやや大きくなったが、設計的には安全側に予測できることが判明した。

②ひびわれ幅  $0.6\text{mm}$  以下のひび割れは、ポストテンションの導入により $0.15\text{mm}$  以下に低減し、再載荷による残留ひび割れの増加はみられなかった。

③エポキシ系樹脂注入工法の補修によってひびわれ幅は固定され、その後の載荷の影響はほとんど見られなかった。

## 参考文献

- 1) 島 弘、周 礼良、岡村 甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係、土木学会論文集、第378号/V-6、pp. 185~174、1987. 2
- 2) 六車 熙、森田司朗、富田幸次郎：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究、建築学会論文報告集 第131号、第132号、第134号、第139号、1967. 1, 2, 4, 9
- 3) 森田司朗：鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれに関する研究、京都大学学位論文、1968. 4
- 4) 山本康弘、中島 亨：鉄筋コンクリートの減力時における付着応力と復元特性に関する研究、コンクリート・ジャーナル、Vol. 12、No. 11、pp. 89~99、1974. 11
- 5) György L. Balázs: Cracking Analysis Based on Slip and Bond Stresses、ACI Materials Journal、V. 90、No. 4、pp. 340~348、July-August 1993
- 6) Yuzo Akatsuka: Behavior of Tensile and Flexural Cracks in Reinforced Concrete Members、REPORT OF PORT AND HARBOUR TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE、Report no. 1、Feb. 1963
- 7) 岡村 甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、第1版、技報堂出版株式会社、pp. 159~182、1991. 5
- 8) 山尾芳秀、周 礼良、二羽淳一郎：付着応力-すべり-ひずみ関係に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第343号、pp. 219~228、1984. 3