

# 論文 エポキシ樹脂注入工法によるひび割れ補修が鉄筋の付着性状に与える影響について

山本 健太\*1・張 大偉\*2・古内 仁\*3・渡辺 忠朋\*4

**要旨:** 鉄筋コンクリート部材について繰り返し荷重による両引き引張試験を行い、発生したひび割れに対してエポキシ樹脂の注入によるひび割れ補修を行った。その結果、ひび割れ補修した場合、鉄筋のひずみは補修前に比べてほとんど増加しないか若干減少することが示された。除荷時には、硬化した樹脂が抵抗してひび割れが閉じなくなるため、ひび割れ部の残留ひずみが大きくなるが、繰り返し荷重下では鉄筋の応力振幅が小さくなることから疲労に対して有利になることが示された。

**キーワード:** ひび割れ補修, 注入工法, エポキシ樹脂, 繰り返し作用, 鉄筋の付着

## 1. はじめに

コンクリート構造物中に生じたひび割れは、部材の剛性低下をまねくだけでなく、炭酸ガス、塩化物イオンあるいは水等の浸透を促し鉄筋腐食の原因の1つとなっている。こうしたひび割れに対する補修工法の1つに樹脂のひび割れ注入工法がある。一般に、ひび割れ注入は環境因子の侵入を防ぐことを目的に実施されているため、ひび割れ注入補修された部材に対して力学的な観点から行われた研究は少ない<sup>1) 2)</sup>。

本研究では、荷重作用で生じたひび割れを対象として、エポキシ樹脂の注入が鉄筋の付着性状に与える影響について調査することを目的とした。

に長さ 800mm の D16 鉄筋を埋め込んだものである。載荷試験装置には、オートグラフ精密万能試験機（負荷容量 250kN）を用いた。

コンクリートには、早強ポルトランドセメント、天然の粗骨材および細骨材を使用した。コンクリートの配合は、表-1 に示すとおりである。試験は材齢 14 日で行われ、実測したコンクリートの圧縮強度は 23.3N/mm<sup>2</sup> である。鉄筋には SD345D16 を使用した。実測の降伏強度は 356.3N/mm<sup>2</sup>、降伏ひずみは 1781 $\mu$  である。

鉄筋にワイヤーストレインゲージを設置するために、試験区間においてリブに深さ 3.2mm の溝切り加工を行った（図-2 参照）。溝切り加工区間の断面積は、推定で 177.8mm<sup>2</sup> となり、公称断面積に比べて 10.5% 減少するこ

## 2. 実験概要

### 2.1 実験供試体

実験は両引きの1軸引張試験によりを行われ、発生したひび割れについて、樹脂注入した場合と樹脂注入なしの場合で、鉄筋の付着性状を調査する。供試体は、図-1 に示すように全長 600mm のコンクリート角柱中央部

表-1 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	W	C	S	G	A
20mm	173	314.5	854.6	960.5	0.138

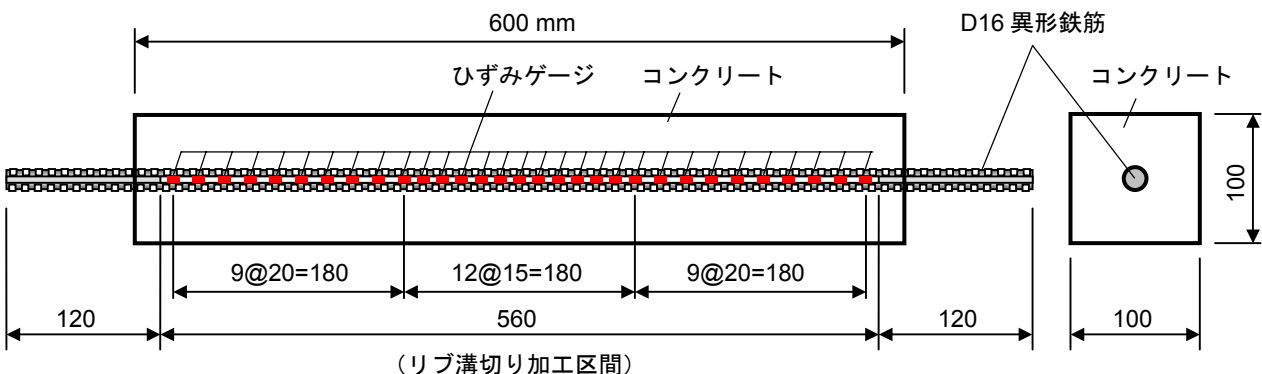


図-1 実験供試体

\*1 北海道大学 大学院工学院北方圏環境政策工学専攻 (正会員)

\*2 北海道大学 大学院工学研究院 学術研究員 Ph.D. (正会員)

\*3 北海道大学 大学院工学研究院 助教 博(工) (正会員)

\*4 北武コンサルタント(株) 副社長 博(工) (正会員)

ととなった。ワイヤーストレインゲージを加工された溝内に片面31枚（**図-1**参照、中央部では15mm間隔，両端部では20mm間隔，両面で62枚）設置した。

## 2.2 実験変数

実験変数は**表-2**に示すように载荷荷重の大きさとひび割れ補修の有無とした。

供試体 T03-N および T03-R は、コンクリート表面ひび割れ幅が 0.3mm となる荷重を最大荷重とし、除荷・再载荷を、それぞれ所定の回数繰り返した。なお、表面ひび割れ幅が 0.3mm となる荷重は、同寸法の断面の供試体を用いた予備実験でひび割れ幅を測定し、その箇所における鉄筋の軸方向ひずみの値を参考とした。予備実験の結果から、ひび割れ幅 0.3mm に対応するひずみを  $1250\mu$  とした。初回载荷時に、T03-N と T03-R ともに引張荷重が約 35kN でひずみの値が同値に達したが、2 回目以降の载荷では、30kN 程度で  $1250\mu$  になったため、それ以降の繰り返し载荷では上限の荷重を 30kN とした。

供試体 TY-N および TY-R は、鉄筋の最大軸方向ひずみが降伏ひずみの 1.25 倍程度（約  $2250\mu$ ）となる荷重で除荷・再载荷を繰り返した。

ひび割れ補修を行わない供試体（T03-N および TY-N）は、繰り返し载荷回数を 5000 回とした。ひび割れ補修を行った供試体（T03-R および TY-R）は、繰り返し载荷回数が 2000 回に達したとき、それぞれの最大荷重を保持したまま、発生した全てのひび割れに対してポリエステル系接着剤でシールを行い、専用インジェクターを用

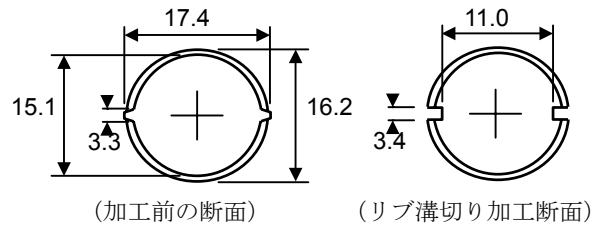


図-2 D16 鉄筋の断面

表-2 実験変数

供試体	载荷荷重の目安	ひび割れ補修	繰り返し载荷回数
T03-N	表面ひび割れ幅が 0.3mm となる荷重	なし	5000 回
T03-R		有り	7000 回
TY-N	鉄筋が降伏するときの荷重	なし	5000 回
TY-R		有り	8000 回



写真-1 ひび割れ補修状況（供試体 T03-R）

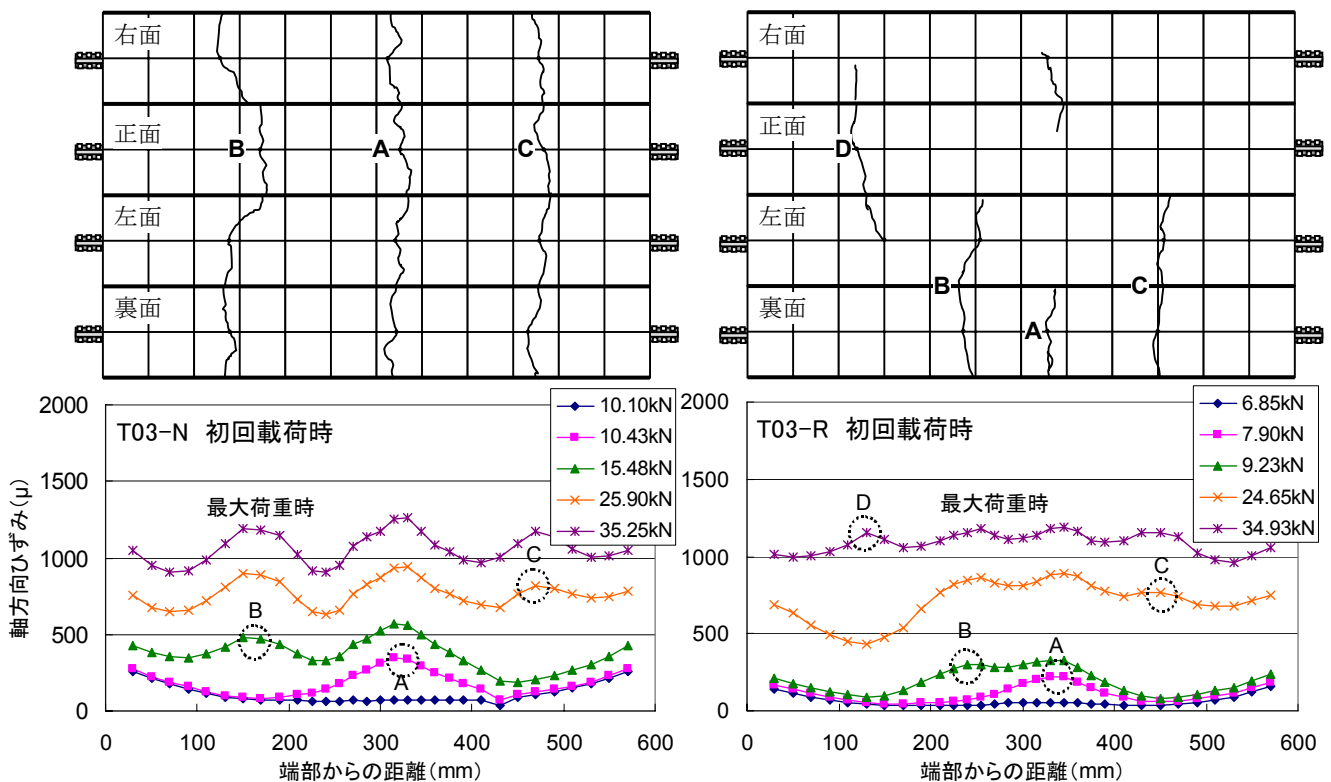


図-3 T03 シリーズにおけるひび割れ展開図とひずみ分布（初回载荷時）

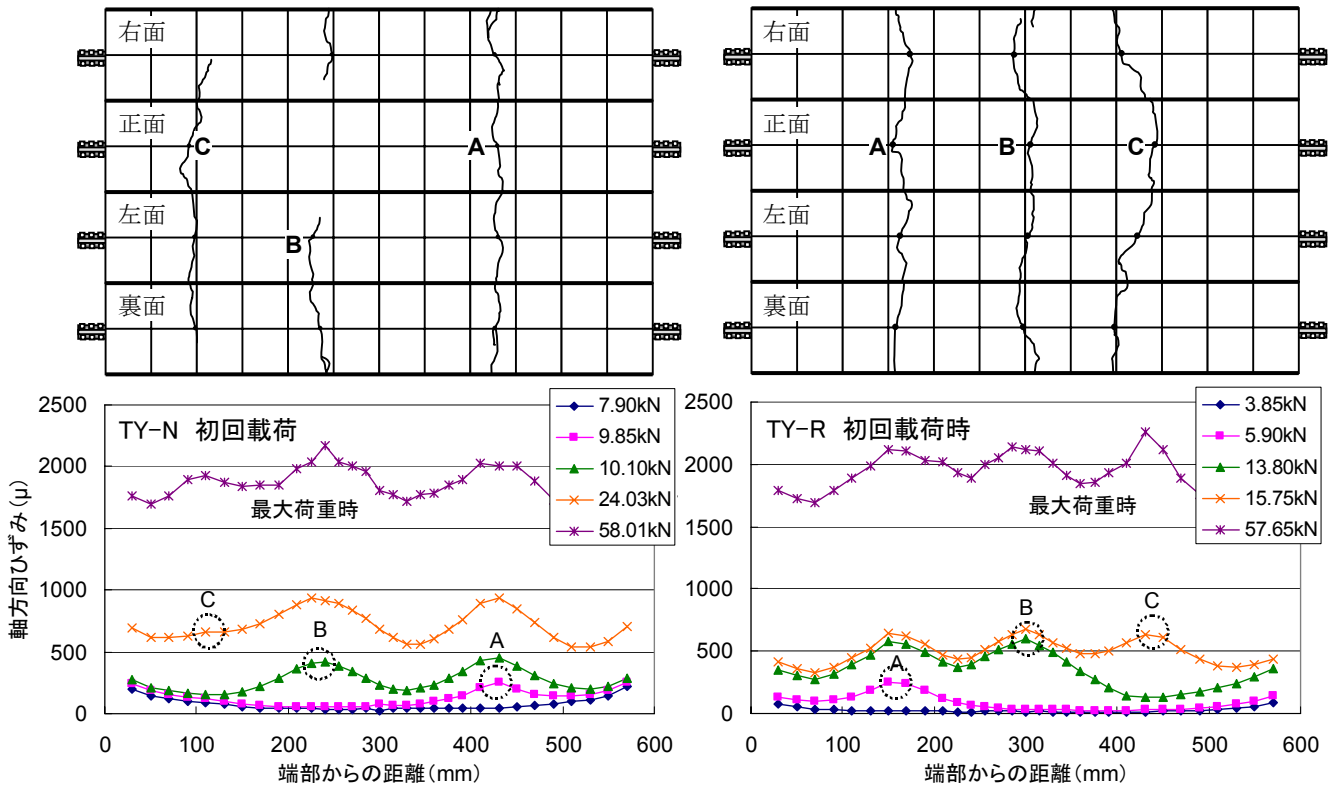


図-4 TYシリーズにおけるひび割れ展開図とひずみ分布（初回載荷時）

いてエポキシ樹脂（2液混合型の低粘性タイプ）の注入を行った（写真-1参照）。供試体は、24時間の養生を行った後に試験を再開し、さらに5000回もしくは6000回の繰り返し載荷を行った。

全ての供試体は所定の繰り返し載荷を終えた後、最終的には供試体の全降伏荷重に達するまで載荷を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 ひび割れの発生状況

供試体 T03-N, TY-N および TY-R は3箇所、供試体 T03-R は4箇所にひび割れが発生した。各供試体のひび割れ展開図と初回載荷時の鉄筋の軸方向ひずみ分布を図-3および図-4に示す。なお、ひび割れ展開図と鉄筋ひずみ分布図には、発生した順番にひび割れにA, B, C・・・の記号を付した。軸方向ひずみ分布図では、個々のひび割れが発生した直後の計測値と最大荷重時の計測値を示した。ひび割れが発生した箇所では、その周囲に比べて鉄筋のひずみが増加し、凸状の分布に変化することをみることができる。

#### 3.2 鉄筋のひずみ分布に与える繰り返し載荷の影響

図-5および図-6に各供試体の最大荷重時と除荷時の鉄筋のひずみ分布を示す。表示した分布は、各供試体とも載荷回数が1, 1000, 3000, 5000回目のものである。T03-RとTY-Rは載荷回数2000回目の最大荷重時にひび割れ注入補修を行っているので3000回目と5000回目は

ひび割れ補修後の計測値である。

#### (1) 最大荷重時のひずみ

ひび割れ補修を行わなかったT03-NとTY-Nにおいては、初回載荷時に比べて1000回目以降の載荷時におけるひずみに若干の増加が見られたが、1000回目～5000回目の計測値ではほとんど変化がない。したがって、数千回レベルの繰り返しでは、1000回までの載荷で概ね安定したひずみ分布となるのがわかる。

ひび割れ補修を行ったT03-Rでは、補修前(1000回目)と補修後(3000回目と5000回目)で比較すると、最大荷重時のひずみの値は100μほど減少した。一方、樹脂注入量の多いTY-Rでは、補修前に比べて補修後のひび割れ部におけるひずみはおおよそ300μ減少していた。

#### (2) 除荷時の残留ひずみ

補修なしのT03-Nの除荷時(1回目, 1000, 3000, 5000回目)およびT03-Rの補修前(1回目と1000回目)の除荷時の残留ひずみは、おおむね同程度の数値を示しており、ひずみ分布は1つの大きな凸型の形状となっている。T03-Rにおける補修後の除荷時(3000回目と5000回目)では、ひび割れ補修のない状態に比べてひび割れ部の残留ひずみが大きくなった。これは、樹脂の注入を最大荷重時に行っているため、除荷時には硬化した樹脂が抵抗してひび割れが閉じなくなるためである。

TYシリーズも、除荷時の挙動も上記T03シリーズとほぼ同様である。TY-RはT03-Rに比べて樹脂注入量が

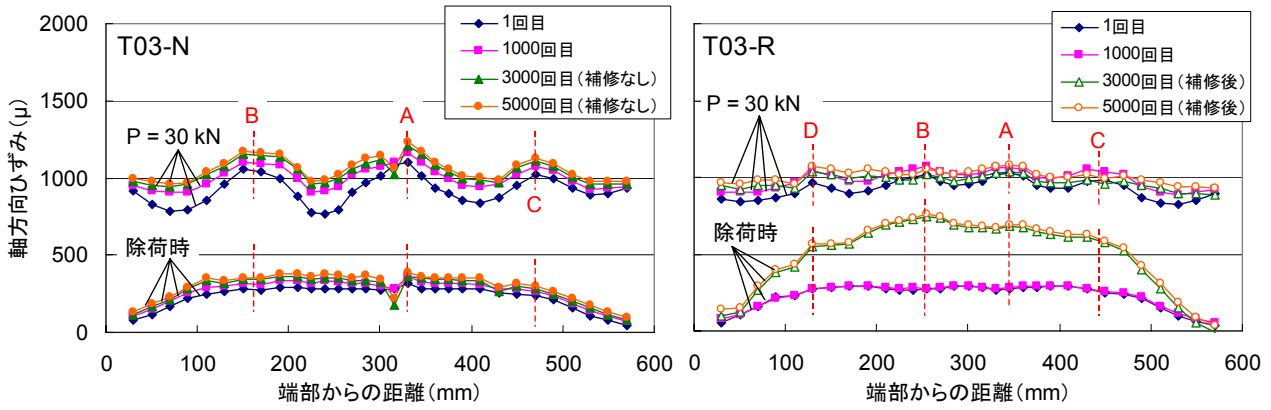


図-5 繰り返し載荷時のひずみ分布の変化 (T03 シリーズ)

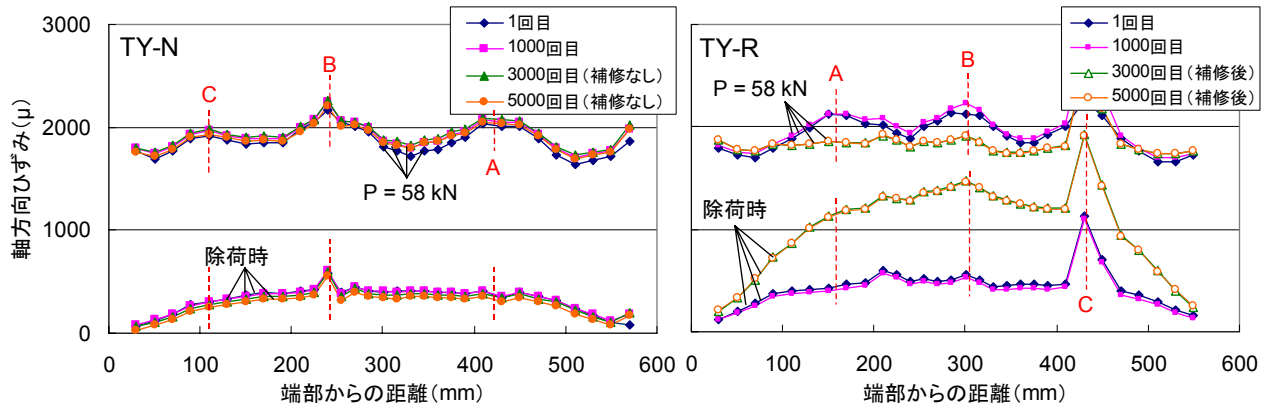


図-6 繰り返し載荷時のひずみ分布の変化 (TY シリーズ)

多いため、残留ひずみの計測値は全体的に大きくなっており、T03-Rの2倍ほどとなった。

### 3.3 疲労寿命への影響についての考察

各供試体のひび割れ位置における鉄筋の応力振幅がひび割れ補修することで、小さくなっていることから鉄筋の疲労寿命が大きくなると予想される。ここでは、試算として、土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>の鉄筋の設計疲労強度式を用いて、疲労寿命を算出した。設計疲労強度式を以下に示す。

$$f_{srd} = 190 \frac{10^a}{N^k} \left( 1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}} \right) / \gamma_s \quad (1)$$

ただし、 $N \leq 2 \times 10^6$

ここに、 $f_{srd}$  : 設計疲労強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$N$  : 疲労寿命

$\sigma_{sp}$  : 永久荷重による応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{ud}$  : 鉄筋の設計引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$a = k_{0f} (0.81 - 0.003 \phi)$

$k = 0.12$

$\phi$  : 鉄筋直径 (mm)

$k_{0f} = 1.0$  : 鉄筋のふしの形状に関する係数

$\gamma_s$  : 本試算では1.0を用いる。

試算では、 $f_{srd}$  と  $\sigma_{sp}$  を実測の応力振幅と最小応力に

置き換え、疲労寿命を逆算した。なお、設計式における疲労寿命の上限を200万回としているが、この試算では上限値を無視した。

試算結果を表-3 および表-4 に示す。表では、比較のため、2000回載荷までの鉄筋の平均応力と、2001～5000回載荷時の平均応力に分けて、疲労寿命を算出した。

補修無しのT03-Nでは、1～2000回載荷時よりも2001～5000回載荷時の応力振幅が大きくなり、疲労寿命は1～2000回載荷時に比べて小さくなり63～78%に減少する。補修無しTY-Nでは、2001～5000回載荷時のほうが疲労寿命が小さくなるのは同じであるが、1～2000回載荷時の97%程度の減少にとどまった。

補修を行った供試体では、試算から2001～5000回載荷時の疲労寿命は1～2000回載荷時に比べて大幅に増加するという結果が示された。補修後の疲労寿命の増加率は、T03-Rでは補修前(1～2000回載荷時)の11～871倍(Log Nでは2.4～6.8倍)、TY-Rでは255～3817倍(Log Nでは5.5～8.4倍)となった。試算では、適用範囲( $N \leq 200$ 万回)を超えて疲労寿命を計算しているため、これらの値をそのまま信じることはできないが、定性的にはひび割れ補修をすることで応力振幅が小さくなり、半永久的に疲労寿命が大きくなる可能性があることを示している。

表-3 T03 シリーズにおける鉄筋の疲労寿命の試算結果

供試体	ひび割れ	1~2000 回目載荷時の平均応力度				2001~5000 回目載荷時の平均応力度				増加率 (倍)
		$\sigma_{min}^{**}$	$\sigma_{max}^{**}$	$\sigma_{sr}^{**}$	疲労寿命	$\sigma_{min}^{**}$	$\sigma_{max}^{**}$	$\sigma_{sr}^{**}$	疲労寿命	
T03-N	A	64.3	220.3	155.9	4,282,535	69.6	230.7	161.1	2,991,146	0.70
	B	72.9	232.9	160.0	2,991,809	75.7	243.8	168.1	1,897,717	0.63
	C	55.5	216.6	161.0	3,781,537	59.0	223.9	164.9	2,938,032	0.78
T03-R	A	48.1	198.3	150.2	7,614,375	113.6	211.9	98.3	85,281,502	11.2
	B	48.9	204.8	155.9	5,521,470	152.2	207.6	55.5	4,809,294,219	871.0
	C	49.5	205.2	155.7	5,514,745	138.5	213.4	74.9	516,193,439	93.6
	D	45.0	199.0	154.0	6,492,540	116.9	196.5	79.5	468,558,620	72.2

※  $\sigma_{min}$ 、 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{sr}$  の単位は  $N/mm^2$

表-4 TY シリーズにおける鉄筋の疲労寿命の試算結果

供試体	ひび割れ	1~2000 回目載荷時の平均応力度				2001~5000 回目載荷時の平均応力度				増加率 (倍)
		$\sigma_{min}^{**}$	$\sigma_{max}^{**}$	$\sigma_{sr}^{**}$	疲労寿命	$\sigma_{min}^{**}$	$\sigma_{max}^{**}$	$\sigma_{sr}^{**}$	疲労寿命	
TY-N	A	23.9	354.8	330.9	15,391	12.8	352.0	339.2	14,813	0.96
	B	25.9	354.9	329.0	15,669	16.8	352.0	335.2	15,394	0.98
	C	17.2	355.3	338.1	14,239	5.6	352.1	346.5	13,794	0.97
TY-R	A	-6.2	340.0	346.2	16,503	142.7	241.9	99.2	45,749,114	2772.1
	B	-8.6	340.4	349.1	15,963	177.4	265.4	88.0	60,932,517	3817.1
	C	-7.3	341.2	348.4	15,890	153.6	282.8	129.2	4,059,361	255.5

※  $\sigma_{min}$ 、 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{sr}$  の単位は  $N/mm^2$

### 3.4 ひび割れ幅の変化

#### (1) 初回載荷時

表-5 に初回載荷時におけるひび割れ幅を示す。なお、ここに示したひび割れ幅は、各ひび割れ間におけるひずみ分布の接線勾配が 0 となる点を不動点とし、その点からのひずみを積分してすべり量を算定し、ひび割れを挟む左右の領域のすべり量の差をひび割れ幅と定義した（コンクリート表面のひび割れ幅とは異なる）。

初回載荷時の最大荷重時において最も大きいひび割れ幅は、T03-N が 0.160mm、T03-R が 0.132mm、TY-N が 0.363mm、TY-R が 0.305mm であった。初回載荷時における除荷時の残留ひび割れ幅は、T03 シリーズでは 0.026~0.049mm で平均すると 0.035mm の残留ひび割れ幅となった。TY シリーズでは 1 箇所のひび割れを除き、おおよそ 0.07mm 前後の残留ひび割れ幅となった。

#### (2) 繰り返し載荷およびひび割れ補修の有無の影響

各供試体における荷重-ひび割れ幅の一例を図-7 および図-8 に示す。図に示したひび割れは、最初もしくは第 2 のひび割れであるが、他のひび割れもほぼ同様の挙動を示している。図中の実線はひび割れ補修無しもしくは補修をする前の挙動であり、破線はひび割れ補修後の挙動を表している。

すべての供試体において、初回載荷に比べて 1000 回目の載荷では、最大荷重時のひび割れ幅が若干大きくなった（T03-N は 10%程度で、その他の供試体は 3%程度）。ひび割れ補修を行わなかった T03-N と TY-N においては、

表-5 初回載荷時におけるひび割れ幅

供試体	荷重 レベル	ひび割れ幅 (mm)			
		A	B	C	D
T03-N	30kN	0.160	0.155	0.113	—
	除荷時	0.049	0.045	0.026	—
T03-R	30kN	0.106	0.114	0.132	0.111
	除荷時	0.030	0.032	0.033	0.027
TY-N	58kN	0.363	0.321	0.184	—
	除荷時	0.070	0.067	0.025	—
TY-R	58kN	0.305	0.300	0.298	—
	除荷時	0.068	0.074	0.080	—

その後の載荷でひび割れ幅の大きな変動はない。

ひび割れ補修した T03-R と TY-R において、補修後における最大荷重時のひび割れ幅は初回載荷時よりも小さくなる。T03-R では約 3%、TY-R では約 9%の減少である。除荷時では、残留ひび割れ幅が大きくなった。これは、先にも述べたが、ひび割れ内に充填された樹脂が抵抗するためであるが、ひび割れ幅の減少分の大半は樹脂の弾性変形と考えられる。

#### (3) 全降伏荷重を与えたときの挙動

所定の繰り返し載荷回数を与えた後、鉄筋の全降伏荷重（約 64kN）となるまで引張力を与えた（図-7 および図-8 参照）。その荷重から除荷を行った結果、補修の有無で残留ひび割れ幅に違いが生じた。

補修無しの供試体 T03-N および TY-N では、新たに生

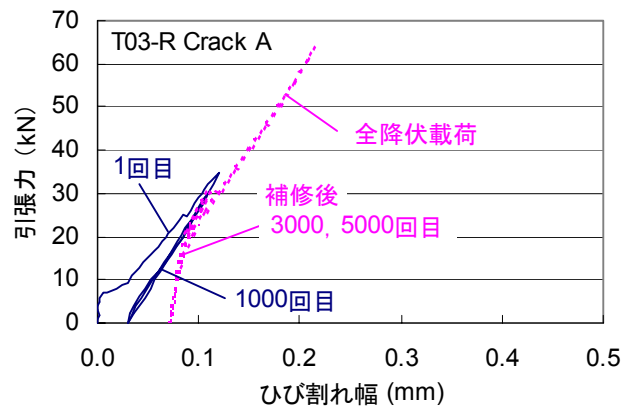
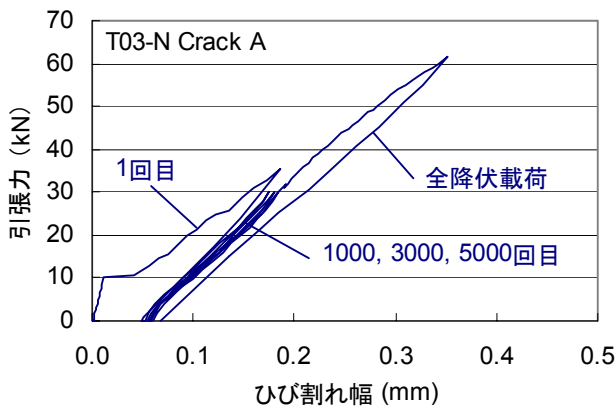


図-7 ひび割れ幅の変化の一例 (T03 シリーズ)

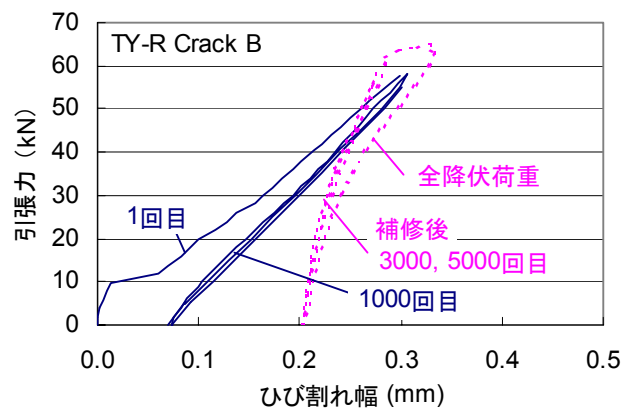
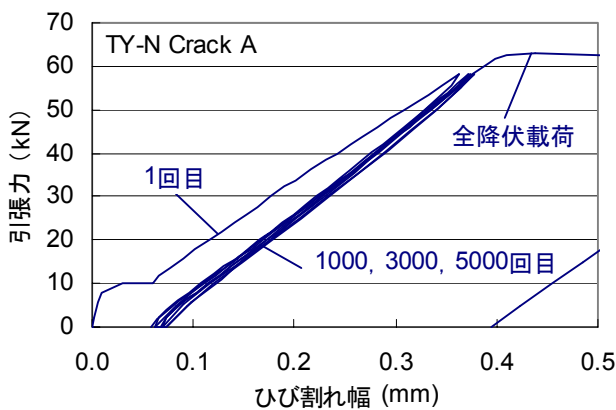


図-8 ひび割れ幅の変化の一例 (TY シリーズ)

じたすべり (ひずみ分布から算出) が除荷時の残留ひび割れ幅として加算されるが、補修した供試体 T03-R および TY-R ではすべりが生じながらも除荷時には繰り返し載荷時の残留ひび割れ幅に復帰する。このとき、新しいひび割れが発生していないことから、補修されたひび割れでは、新たに生じたすべりは回復性があるということになる。このことから、補修材がひび割れを介してその近傍の鉄筋界面にまで侵入し、付着-すべり関係が改善されているものと推測される。

#### 4. まとめ

エポキシ樹脂注入工法により補修したひび割れについて、1軸引張試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) ひび割れを補修しない供試体において、繰り返し載荷を行った場合、鉄筋の軸方向ひずみが載荷回数とともに若干増加した。ひび割れ補修した供試体では、補修後のひずみが、補修前に比べてほとんど増加しないか若干減少することが示された。
- (2) ひび割れ補修した場合、除荷時にはひび割れ補修のない状態に比べてひび割れ部の残留ひずみが大きくなった。これは、樹脂の注入を最大荷重時に行っているため、除荷時には硬化した樹脂が抵抗してひび割れが閉じなくなるためである。
- (3) 繰り返し載荷における最大荷重時にひび割れ補修を

した場合について疲労寿命の試算を行った結果、補修後の疲労寿命が大幅に増加したことから、定性的には疲労寿命が大きくなる可能性があることが示された。

- (4) 所定の繰り返し載荷を与えた後、鉄筋の全降伏荷重となるまで引張力を与えた結果、新たなすべりが生じるが、補修した供試体では除荷時には全降伏荷重載荷前の残留ひび割れ幅に復帰することが示された。

謝辞：本研究において、供試体のひび割れ注入補修を行うにあたり、ショーボンド建設(株)の船谷智浩氏、木村有志氏および山口雅史氏のご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国枝 稔 ほか：破壊制御設計に基づいたひび割れ注入補修に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.697/No.54, pp.169-177, 2002.2
- 2) 星野富夫，魚本健人：ひび割れに樹脂注入したコンクリート梁の強度性状と耐久性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.1, pp. 451-456, 2001
- 3) 2007 年制定コンクリート標準示方書「設計編」，土木学会，2007.1