

論文 ひび割れを注入補修した鉄筋コンクリート梁の疲労耐力

古内 仁*1・渡辺 忠朋*2

要旨： 曲げひび割れあるいはせん断ひび割れを樹脂による注入補修した鉄筋コンクリート梁について疲労載荷試験を行い、ひび割れ補修後の疲労耐力を調べた。曲げひび割れに対しては、樹脂注入補修することでひび割れを横切る鉄筋に適度なプレストレスが導入され、繰り返し荷重下では応力振幅が小さくなり、鉄筋の疲労寿命が大幅に増加することが確認された。せん断ひび割れを樹脂注入補修した場合に再載荷を行うと、補修ひび割れを迂回する新たなせん断ひび割れによって破壊が生じ耐力が増加することが明らかになっているが、疲労荷重下においても同様にせん断ひび割れの迂回によって疲労耐力が増加することが確認された。

キーワード： ひび割れ補修, 注入工法, 鉄筋コンクリート梁, 疲労耐力

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の点検技術や補修補強技術が発展してきているが、補修補強後の構造性能が不明確なまま、維持管理が行われている。例えば、構造物に生じた許容値を超えるひび割れは、構造物の耐力・耐久性・水密性などの諸機能を低下させる要因となっているが、現状それらのひび割れに対しては、補修材による被覆・注入・充填等の工法によって劣化の進行を食い止めるといった対処療法的な対策にとどまっている。維持管理において求められる構造物の評価は、材料劣化でなく構造性能である。著者らは、補修補強後の構造性能を明確にすることが合理的な維持管理の最重要課題であると考えている。

既往の実験¹⁾²⁾では、軸方向に引張力を受けた鉄筋コンクリート角柱に生じたひび割れを樹脂注入補修した場合に再載荷を行うと、ひび割れを横切る鉄筋に適度なプレストレスが導入され、繰り返し荷重下において鉄筋の応力振幅が小さくなることを実験により示した。また、深澤ら³⁾は、せん断破壊したひび割れを樹脂注入補修した鉄筋コンクリート梁に再載荷を行うと、補修ひび割れ

を迂回する新たなせん断ひび割れで破壊することとなり、結果的にせん断耐力が向上するという報告している。しかし、ひび割れへの樹脂注入後の繰り返し荷重下における疲労耐力については確認されていない。本研究では曲げ破壊およびせん断破壊が先行するように設計された鉄筋コンクリート梁供試体を用いて、ひび割れ補修後の基本的な疲労耐荷性状を調べるために載荷試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 曲げ疲労破壊試験

(1) 実験供試体

曲げ破壊先行型供試体を図-1に示す。供試体の断面寸法は150 mm×150 mmで、全長は900 mmである。支間長を600 mmとし、等モーメント区間180 mmを有する2点対称載荷とした。主鉄筋には図に示すようにD16を2本、D13を1本配置したが、中央のD13鉄筋を確実に疲労破断させるため、等モーメント区間ではD13鉄筋のみを1本配置している。供試体の外形寸法、諸元および支持・載荷条件は、すべての供試体で共通である。なお、等モーメント区間では鉄筋のひずみを計測した。

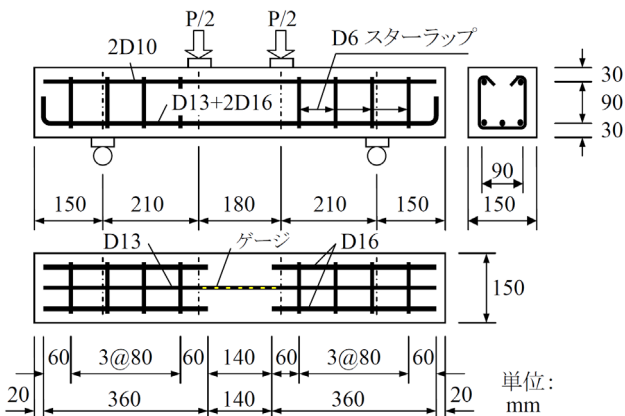


図-1 曲げ破壊先行型実験供試体

表-1 曲げ破壊先行型実験変数

供試体	上限荷重	補修時の荷重
MB-85-N	$\sigma_{s1} = 0.85 f_y$ となる荷重	補修無し
MB-85-35	$\sigma_{s1} = 0.85 f_y$ となる荷重	$\sigma_{s1} = 0.35 f_y$ となる荷重
MB-90-50	$\sigma_{s1} = 0.90 f_y$ となる荷重	$\sigma_{s1} = 0.50 f_y$ となる荷重
MB-90-75	$\sigma_{s1} = 0.90 f_y$ となる荷重	$\sigma_{s1} = 0.75 f_y$ となる荷重

σ_{s1} : 1本目のひび割れ位置における鉄筋の応力
 f_y : 鉄筋の実降伏強度

*1 北海道大学 大学院工学研究院助教 博(工) (正会員)

*2 北武コンサルタント(株) 博(工) (正会員)

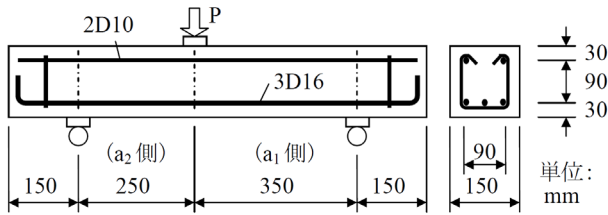


図-2 セン断破壊先行型実験供試体

(2) 実験変数

実験変数は、表-1 に示すように繰り返し載荷時の上限荷重とひび割れ補修の有無および補修時の荷重の大きさとした。

(3) 実験手順

ひび割れを無補修の状態、所定の上限荷重を1万回載荷する。ひび割れ補修を行う供試体は、その後、所定の補修時荷重を保持した状態で、ひび割れのシールおよび樹脂注入を行い、24時間養生してから所定の上限荷重で再度繰り返し載荷を行った。なお、下限荷重は2kNとした。

2.2 セン断疲労破壊試験

(1) 実験供試体

せん断破壊先行型の供試体を図-2 に示す。外形寸法は曲げ破壊先行型の供試体と同じである。主鉄筋は3D16とした。載荷は1点集中荷重としたが、右側のせん断スパンを $a_1 = 350$ mm、左側のせん断スパンを $a_2 = 250$ mmとして、左右非対称とした。せん断ひび割れへの樹脂注入を目的としているためせん断補強筋は用いなかった。

(2) 実験変数

せん断破壊先行型では、表-2 に示すように疲労載荷の上限荷重を実験変数とした。上限荷重の設定にあたっては、初回の載荷で得られた静的せん断破壊荷重をもとに、ひび割れ補修後の耐力が20%増加すると仮定し、その耐力の56%~85%に分散させた。

(3) 実験手順

初回の静的載荷で、供試体をせん断破壊させる。静的破壊させた後、0.2 mm以上の幅のひび割れに樹脂を注入し、その後24時間養生し、所定の上限荷重で繰り返し載荷を行い、破壊が生じるまで試験を実施した。

2.3 使用材料の特性

供試体に用いた主鉄筋はSD295Aである。D16鉄筋およびD13鉄筋の実降伏強度は、それぞれ374 N/mm²と356 N/mm²である。

曲げ破壊先行型の供試体には、レディミクストコンクリート（早強、呼び強度24、スランプ15 cm、最大骨材寸法20 mm）を用いた。実測の圧縮強度は、材齢28日で27.5 N/mm²である。せん断破壊先行型の供試体に用

表-2 セン断破壊先行型実験変数

供試体	上限荷重	下限荷重
SB-56	0.56 P_u	0.039 P_u
SB-65	0.65 P_u	//
SB-85	0.85 P_u	//

P_u : 無補修状態の梁のせん断破壊荷重×1.2

表-3 コンクリートの配合（せん断破壊先行型）

粗骨材 最大寸法	単位量 (kg/m ³)			
	W	C	S	G
20mm	168	121.6	341.0	369.4



写真-1 ひび割れ注入補修の様子 (MB-90-50)

いたコンクリートは、表-3 に示す配合で実験室にて作製した。実測の圧縮強度は、材齢28日で47.3 N/mm²である。

ひび割れ補修材は、エポキシ樹脂系補修材で、低圧、低速で注入できるタイプのものを使用し、専用のインジェクター（写真-1 参照）で注入を行った。補修材は引張強さ13.0 N/mm²以上で接着強さ3.0 N/mm²以上の材料特性を有し、0.2 mm以上のひび割れ幅を対象としている。

3. 実験結果および考察

3.1 曲げ疲労破壊試験

(1) ひび割れ発生状況および破壊性状

供試体のひび割れ状況を図-3 に示す。実線が初回の載荷で発生したひび割れである。点線で示した2本目のひび割れは、繰り返し載荷中に発生したものであるが、すべて1万回載荷以降である。したがって、無補修のMB-80-N以外の供試体における2本目のひび割れは、1本目のひび割れを補修した後で発生したものである。

疲労試験の結果を表-4 に示す。無補修のMB-85-Nは、678,225回の載荷で1本目のひび割れ位置で主鉄筋が破断した。ひび割れ補修した供試体のうち、MB-90-50は5,315,594回で2本目のひび割れ位置で主鉄筋が破断した

表-4 疲労試験の結果（曲げ破壊先行型）

供試体	疲労寿命	鉄筋の破断位置
MB-85-N	678,225	1本目のひび割れ
MB-85-35	(10,000,000)	実験打ち切り
MB-90-50	5,315,594	2本目のひび割れ
MB-90-75	(10,000,000)	実験打ち切り

が、MB-85-35とMB-90-75は補修後のひび割れの開閉が小さいため、半無限的な疲労寿命を有すると判断して1,000万回で実験を打ち切った。

(2) 疲労寿命の試算

図-4は、各供試体の1本目のひび割れ部における鉄筋の応力と荷重の関係を表している。それぞれ1回目の荷重、ひび割れ補修直前の1万回目の荷重および補修後の10万回目（MB-85-35のみ100万回目）の荷重時における計測値を示している。1回目の荷重でひび割れが発生した後、2回目以降の荷重では上限荷重時に若干応力が増加するが、概ね1万回時の経路上を往復する。ひび割れ補修を行った供試体には、図中において補修時に保持した応力と荷重の位置に○印を付した。

ひび割れ補修後では、除荷曲線において勾配が変化

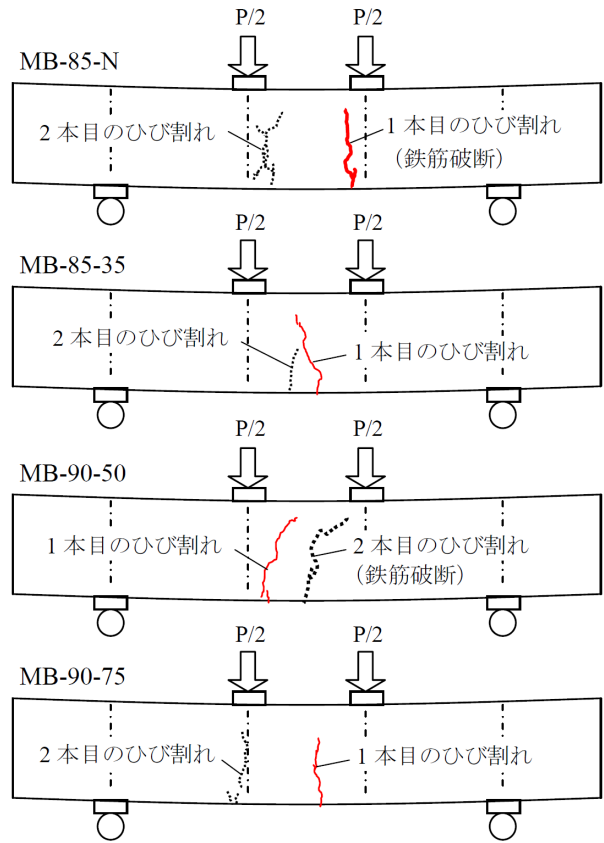
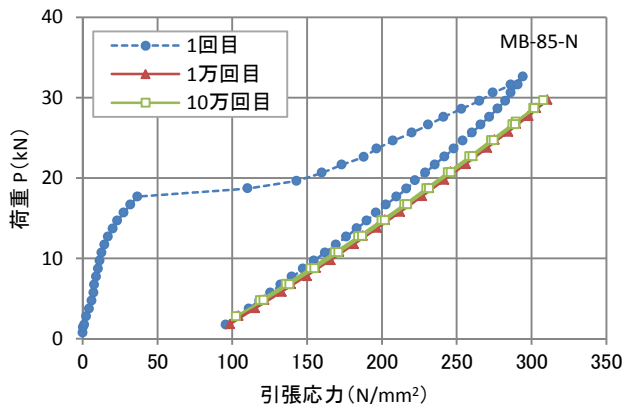
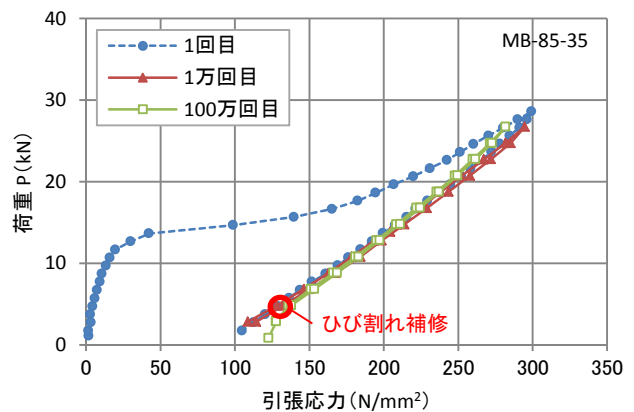


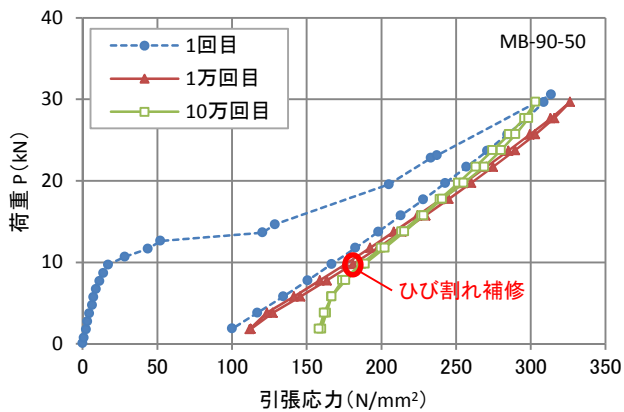
図-3 ひび割れ発生状況（曲げ破壊先行型）



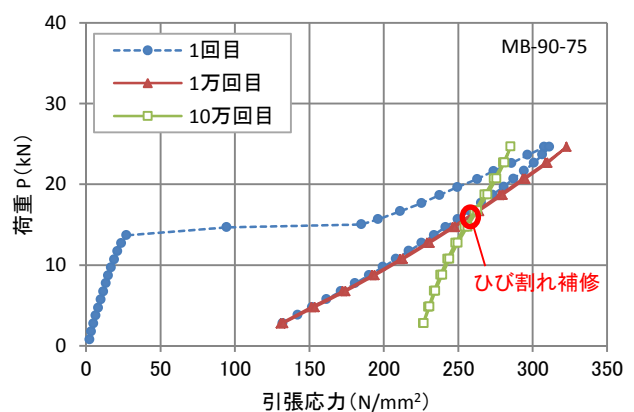
(1) 供試体 MB-85-N



(2) 供試体 MB-85-35



(3) 供試体 MB-90-50



(4) 供試体 MB-90-75

図-4 1本目のひび割れ位置における鉄筋の応力（曲げ破壊先行型）

表-5 疲労寿命の試算結果 (曲げ破壊先行型)

供試体	対象としたひび割れ	ひび割れの状態	荷重 (kN)			σ_{min} (MPa)	σ_{max} (MPa)	f_{sr} (MPa)	N (計算値)	N (実験値)
			下限	上限	補修					
MB-85-N	1 本目	無補修(1 万回時)	0.8	30.0	—	98.6	310.6	212.0	840,560	678,255
MB-85-35	2 本目	補修前(1 万回時)	0.8	26.7	4.8	113.5	289.9	176.4	4,077,387	(10,000,000)
		補修後(10 万回時)				128.7	290.0	161.3	9,412,740	
MB-90-50	2 本目	補修前(1 万回時)	0.8	29.7	9.7	110.4	295.5	185.1	2,082,448	5,315,594
		補修後(100 万回時)				151.8	309.6	157.8	4,760,911	
MB-90-75	1 本目	補修前(1 万回時)	0.8	24.7	16.7	132.5	322.7	190.2	1,010,332	(10,000,000)
		補修後(10 万回時)				226.9	285.2	58.3	1.483×10^{12}	

し補修時荷重の大きさに応じて残留応力が大きくなっている。これは、ひび割れ内で硬化した樹脂の抵抗によるものであるが、プレストレスと同じ原理である。また、上限荷重時の応力は、補修前に比べて減少する傾向にあるが、補修時荷重が大きい MB-90-75 ではその傾向が顕著である。これらの性状は、既往の研究¹²⁾において行われた 1 軸引張試験によって得られた結果と同じである。なお、1 本目のひび割れ補修によって得られるプレストレス効果で、2 本目のひび割れ部においても鉄筋の除荷時残留応力が増加したため、2 本目のひび割れ補修は行わなかった。

以上のように、ひび割れ補修後には下限荷重時の鉄筋の応力が増加することから、繰り返し荷重においては応力振幅が小さくなるのがわかる。そこで、実測された応力値を用いて、ひび割れ補修前と補修後の鉄筋の疲労寿命の試算を行ってみることとした。疲労寿命の計算には、次式に示す二羽らによって提案された異形鉄筋の疲労強度算定式⁴⁾を用いた。

$$f_{sr} = (1 - \sigma_{min} / f_{su}) \frac{10^\alpha}{N^k} \quad (1)$$

ここに、 f_{sr} : 疲労振幅強度 (MPa)

σ_{min} : 最小応力 (MPa)

f_{su} : 引張強度 (MPa)

N : 疲労寿命

$k_0 = 1.00$

($N \leq 2 \times 10^6$ のとき)

$k = 0.12$

$\alpha = k_0(3.17 - 0.003D)$

($N > 2 \times 10^6$ のとき)

$k = 0.06$

$\alpha = k_0\{3.17 - 0.003D - 0.06 \log(2 \times 10^6)\}$

D : 鉄筋の公称径

試算結果を表-5 に示す。試算には、ひび割れ補修前の鉄筋応力として 1 万回載荷時の計測値、補修後の鉄筋

表-6 静的載荷試験結果 (せん断破壊先行型)

供試体	破壊荷重 (kN)	破壊スパン
SB-56	107.3	a_1 側
SB-65	99.5	a_1 側
SB-85	115.1	a_1 側

応力として 10 万回もしくは 100 万回載荷時の計測値を用いた。また、対象としたひび割れ位置は、計算において破壊が先行する方とした。無補修の MB-85-N の疲労寿命は、計算値と実験値を常用対数で比をとると 1.016 となり、妥当な評価が得られる結果となった。補修供試体については、補修後の疲労寿命を補修前の疲労寿命と比べれば、MB-85-35 および MB-90-50 はいずれも 2.3 倍増加する結果となった。また、MB-90-50 は、実験において載荷回数 5,315,594 回で 2 本目のひび割れ位置で鉄筋が破断したが、計算値(4,760,911 回)と常用対数による比をとれば 0.99 となる。MB-90-75 は、補修後の応力振幅が補修前に比べて極端に小さくなり疲労限以下になっていると考えられる。

以上の試算結果から、曲げひび割れを補修することで、繰り返し荷重下の鉄筋の応力振幅を小さくする効果があり、疲労寿命を増大させる結果を得ることが示された。

3.2 せん断疲労破壊試験

(1) ひび割れ補修前の破壊性状

すべての供試体を初回の静的載荷で破壊させた。破壊荷重を表-6 に示す。破壊形式は、図-5 に示すようにすべての供試体において、 a_1 側のせん断スパンにおけるせん断破壊である。破壊に至った主なひび割れは太線で表した。本実験の供試体の設計せん断耐力は、支圧板幅 (50 mm) およびせん断スパンの条件から、次式に示すディープビームのせん断耐荷力算定式⁵⁾によって求めた。

$$V_{wd} = \frac{0.244 f_c'^{2/3} (1 + \sqrt{p_w})(1 + 3.33 r/d)}{1 + (a/d)^2} b_w d \quad (2)$$

ここに f_c' : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

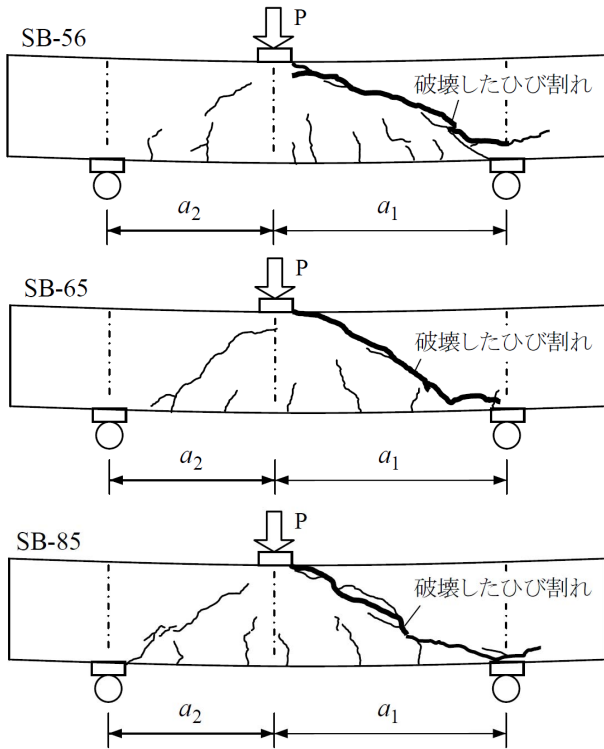


図-5 初回載荷時の破壊状況（せん断破壊先行型）

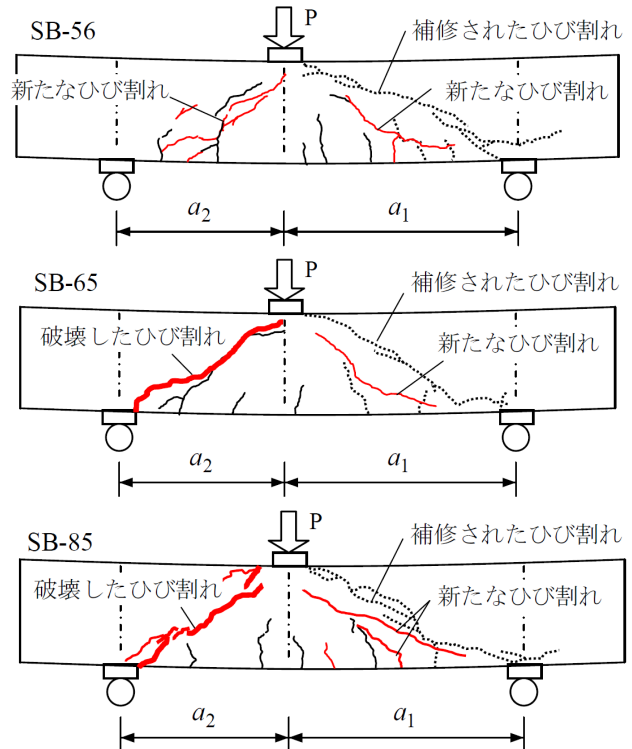


図-6 疲労載荷時の破壊状況（せん断破壊先行型）

$$p_w = 100 A_s / (b_w \cdot d)$$

A_s : 引張側鋼材の断面積 (mm²)

r : 支圧板幅 (mm)

a : せん断スパン (mm)

d : 有効高さ (mm)

b_w : 腹部の幅 (mm)

その結果、 a_1 側では $V_{wd} = 40.7$ kN（破壊荷重 97.6 kN）、 a_2 側では 74.2 kN（破壊荷重 124.1 kN）となる。したがって、 a_1 側における計算値に対する実験値の比は、1.02~1.18 であり妥当な結果であった。

(2) ひび割れ補修後の疲労性状

次に、初回の静的載荷で破壊したせん断ひび割れに対して補修を行って、疲労試験を実施した。なお、すべての供試体において未破壊の a_2 側のせん断ひび割れについては補修材の注入が困難であったため、ほぼ無補修のまま疲労試験に臨むこととなった。各供試体の疲労載荷試験における破壊状況を図-6 に、疲労寿命を表-7 に示す。上限荷重は、SB-85、SB-65、SB-56 の静的荷重の平均値 (107.3 kN) をもとに、前述の実験変数 (表-2 参照) に基づいて設定した。例えば、SB-85 の上限荷重は $1.2 \times 107.3 \times 85\% = 110$ kN である。

疲労試験においては、すべての供試体で、 a_1 側では補修されたひび割れが再び開口することがなく、補修ひび割れ近傍に新たなせん断ひび割れが発生した。結果的には、供試体 SB65 と SB85 は初回静的載荷時に未破壊であ

表-7 疲労載荷試験結果（せん断破壊先行型）

供試体	下限荷重 (kN)	上限荷重 (kN)	破壊せん断スパン	疲労寿命 (回)
SB-56	5	72	a_2 側	2,000,000 ※
SB-65	5	84	a_2 側	45,805
SB-85	5	110	a_1 側	35,044

※ SB-56 は未破壊で実験を打ち切り

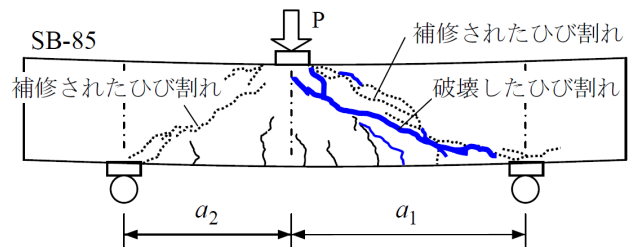


図-7 供試体 SB-85 の再疲労試験後の破壊状況

った a_2 側のせん断ひび割れで破壊が生じた (図-6 参照)。SB-56 は、 a_2 側でもせん断ひび割れが発達したが載荷回数 2,000,000 回に達しても、破壊しなかったため試験を中止した。試験中止後、参考として静的載荷試験を行ったところ、 a_2 側のせん断ひび割れで破壊が起こり、最大荷重が 136 kN となる大きな残存耐力を持つことが確認された。この破壊荷重はひび割れ補修前の初回載荷試験で得られた破壊荷重の 1.27 倍である。疲労破壊した供試体のうち、SB-65 は a_2 側のスパンで修復不能となる破壊になったが、SB-85 については a_2 側のせん断ひび割れの補修が可能であったので、そのひび割れを補修して

疲労試験を継続した。その結果、図-7 に示すように a_1 側において新たに発生していたせん断ひび割れが開口して破壊に至った。

a_1 側のせん断スパンにおけるせん断疲労耐力と疲労寿命の関係を図-8 に示す。図中の $\log N = 0$ における○は初回静的試験破壊時の値である。また、▲は SB-56 の残存耐力を示している。図中の実線は、次式に示すコンクリート標準示方書⁹⁾のせん断補強鉄筋を用いない鉄筋コンクリート棒部材の設計せん断疲労耐力を表している。

$$V_{rcd} = V_{cd} \left(1 - \frac{V_{pd}}{V_{cd}} \right) \left(1 - \frac{\log N}{11} \right) \quad (3)$$

ここに、 V_{rcd} : せん断疲労耐力

V_{cd} : 静的せん断耐力

V_{pd} : 下限せん断力

N : 疲労寿命

図中の■は、ひび割れ補修後の疲労寿命を表している。矢印を付したデータは、実際には a_1 側で疲労破壊が生じていないので、さらに寿命が増加する可能性があることを示している。この結果、全ての供試体について、補修後の疲労耐力は、補修前の設計せん断疲労耐力を大きく上回っていることがわかる。当初、補修後においても a_1 側で破壊を生じることを見込んでいたが、 a_1 側のひび割れ補修によって耐力が予想以上に増加し、逆側のせん断スパンでの破壊が生じてしまった。結果的に、せん断ひび割れを補修することでせん断疲労耐力が大幅に増加することは定性的に捉えることができた。

4. まとめ

曲げひび割れあるいはせん断ひび割れを樹脂注入補修した鉄筋コンクリート梁について疲労載荷試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 梁の曲げひび割れを補修した後では、ひび割れを横切る鉄筋の残留応力は、補修時荷重の大きさに応じて大きくなる。これは、ひび割れ内で硬化した樹脂の抵抗によるもので、プレストレスと同じ原理が働くためである。
- (2) 上記の効果により、曲げひび割れを樹脂注入補修することで、繰り返し荷重下では鉄筋の応力振幅が小さくなり、疲労寿命が補修前に比べて大幅に大きくなることが示された。
- (3) せん断破壊した梁のせん断ひび割れを補修して疲労載荷試験を行った結果、補修した大きい方のせん断スパンでは破壊せず、樹脂注入補修ができなかった短い方のせん断スパンで破壊が生じた。そ

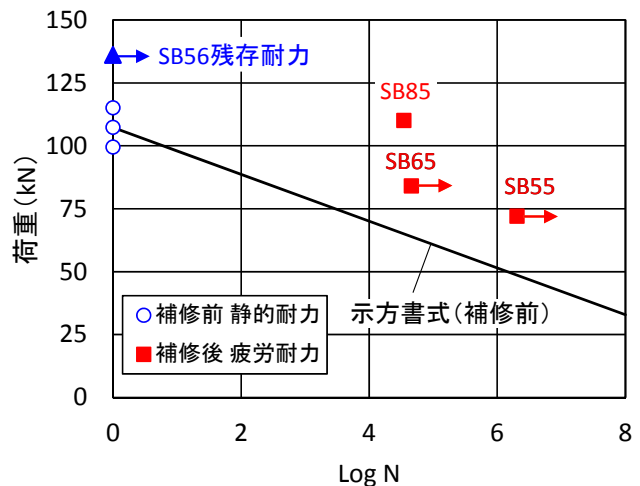


図-8 せん断スパン a_1 におけるせん断疲労耐力

の際に、補修した方のスパンでは樹脂注入部分が開くことはなく、付近に新たなせん断ひび割れが出現した。

- (4) せん断ひび割れを補修した鉄筋コンクリート梁の疲労耐力は、ひび割れ補修前の設計疲労耐力と比べて大きく増加することが確認された。

謝辞 本研究を行うにあたり、当時学生であった林蓮氏および永末杏子氏に実験を行っていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本健太, 張 大偉, 古内 仁, 渡辺忠朋: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1429-1434, 2011
- 2) 山本健太, 張 大偉, 古内 仁, 渡辺忠朋: エポキシ樹脂とセメント系補修材によるひび割れ注入補修が鉄筋のひずみ分布に与える影響について, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.79-84, 2012
- 3) 深澤優一, 齊藤成彦, 高橋良輔: 斜めひび割れを生じた RC 梁の修復効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1369-1374, 2013
- 4) 二羽淳一郎, 前田詔一, 岡村 甫: 異形鉄筋の疲労強度算定式, 土木学会論文集, No.354, pp.73-79, 1985
- 5) 二羽淳一郎: FEM 解析に基づくディーブビームのせん断耐力算定式, 第2回 RC 構造物のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.119-128, 1983
- 6) 土木学会, 2012 年制定コンクリート標準示方書 設計編, 2012