

せん断ひび割れに樹脂注入した鉄筋コンクリート梁の疲労性状

Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beam with Epoxy Injection for Shear Cracks

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 永末 杏子 (Kyoko Nagasue)
北海道大学大学院工学研究院 正 員 古内 仁 (Hitoshi Furuuchi)
北武コンサルタント(株) 正 員 渡辺 忠朋 (Tadatomo Watanabe)

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、炭酸ガスなどの環境因子の浸透を促進し鉄筋腐食の原因のひとつになっている。

こうしたひび割れに対する補修工法のひとつに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が少ないのが現状であった。しかし、最近の研究においては、軸直角方向のひび割れや曲げひび割れに樹脂注入補修した場合には、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返し荷重下において疲労寿命が延びることが報告¹⁾されている。また、せん断ひび割れに樹脂注入補修した場合には、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の報告²⁾がある。しかし、せん断ひび割れへの樹脂注入後の繰返し荷重下における挙動が確認されていないので、本研究では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、ひび割れ補修後の疲労載荷試験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

図 1 に供試体の形状寸法を示す。本研究では 150mm×150mm の正方形断面で全長 900mm の梁を 4 体用意した。支点間距離は 600mm で、右側のせん断スパンを $a_1=350\text{mm}$ 、左側のせん断スパンを $a_2=250\text{mm}$ として、一点載荷した。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ず、組立鉄筋として圧縮側に D10 を 2 本、引張鉄筋として D16 を 3 本使用した。D16 鉄筋の実降伏強度は 374N/mm^2 、引張強度は 560N/mm^2 、コンクリートは表-1 に示す配合で作製した。なお、粗骨材最大寸は 20mm とした。コンクリートの圧縮強度は、材齢 28 日で 47.3N/mm^2 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た。補修材の引張強さ 13.0N/mm^2 以上、接着強さ 3.0N/mm^2 以上の材料特性を有し、0.2mm 以上のひび割れ幅を対象としている。

2.2 実験手順

以下に実験の手順を示す。

- ①初回の静的載荷で、供試体をせん断破壊させる。
- ②静的破壊させた後、0.2mm 以上の幅のひび割れに樹脂を注入し（写真 1 参照）、その後 1 日養生し、疲労

載荷試験を開始する。

- ③疲労荷重の載荷速度 2.5Hz を基本とし、破壊が生じるまで試験を実施する。

2.3 実験変数

疲労試験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 65%~93%に分散させた（表 2 参照）。

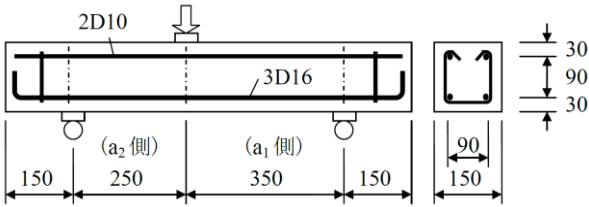


図 1 供試体

表 1 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法	単位量(kg/m ³)				
	W	C	S	G	A
20mm	168	121.6	341.0	369.4	0



写真 1 樹脂注入

表 2 実験変数

供試体	下限荷重 静的耐力比	上限荷重 静的耐力比
SB55	3.9%	56%
SB65		65%
SB85		85%
SB95		93%

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ補修前の破壊性状

各供試体のひび割れ発生状況を図2に示す。ひび割れ図において、初回の静的載荷時に入ったひび割れを実線で、疲労載荷試験時に入ってひび割れを点線で示した。また、破壊に至った主なひび割れは太線で表している。

初回載荷時における静的破壊荷重を表3に示す。供試体 SB55、SB65、SB85 は静的載荷時に a₁ 側のせん断スパンで破壊し、SB95 は a₂ 側のせん断スパンで破壊した。本実験の供試体の設計せん断耐力は、支圧板幅 (50mm) 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³⁾によって求めた。

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

ここに f_c' : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

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

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、a₁ 側では $V_{wd}=40.7\text{kN}$ (破壊荷重 97.6kN)、a₂ 側では $V_{wd}=74.2\text{kN}$ (破壊荷重 124.1kN) となる。したがって、a₁ 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。a₂ 側で破壊した SB95 については、その比は 0.75 となり予想よりもかなり小さい破壊荷重となったが、供試体製作上の不具合があったと考えられる。以降の考察において、SB95 は参考値として扱う。

3.2 ひび割れ補修後の疲労性状

次に、初回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。しかし、未破壊のせん断ひび割れについてほぼ無補修のまま疲労試験に臨むこととなった。各供試体の疲労寿命を表4に示す。上限荷重は、SB85、SB65、SB55 の静的荷重の平均値 (107.3kN) 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、SB85 の上限荷重は $1.2 \times 107.3 \times 85\% = 110\text{kN}$ である。

疲労試験においては、補修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。ただし、すべての供試体で初回静的載荷時に未破壊であった反対側のせん断スパンで破壊が起こった。なお、供試体 SB85 については、疲労によって破壊した a₂ 側のせん断ひび割れの補修が可能であったので、補修後に疲労試験を継続した。その結果、a₁ 側において補修ひび割れ近傍のせん断ひび割れが生じて破壊に至った。SB55 は載荷回数 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

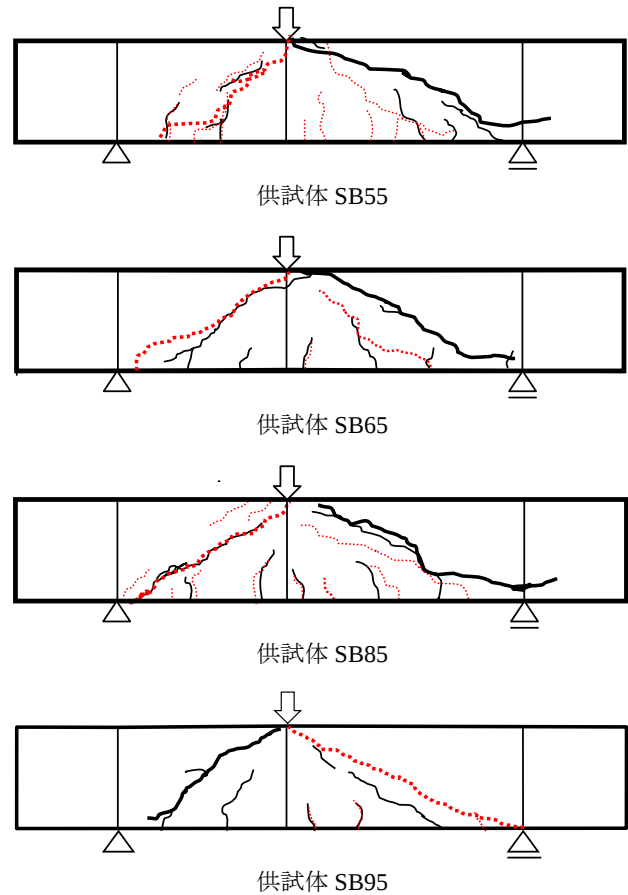


図2 ひび割れ発生状況

表3 実験結果 (初回載荷)

供試体	破壊スパン	破壊荷重 (kN)
SB55	a ₁ 側	107.3
SB65	a ₁ 側	99.5
SB85	a ₁ 側	115.1
SB95	a ₂ 側	91.9

表4 実験結果 (ひび割れ補修後)

供試体	上限荷重 (kN)	破壊スパン	疲労寿命 (回)
SB55	72	a ₂ 側	2,000,000※1
SB65	84	a ₂ 側	45,805
SB85	110	a ₁ 側	35,044
SB95	109※2	a ₂ 側	1

※1 SB55 は未破壊で実験を打ち切り

※2 上限荷重 120kN に達する前に破壊

荷試験を行ったところ、破壊荷重が 136kN となり、大きな残存耐力を持つことが確認された。

SB95 は、補修後供試体の上限荷重を 120kN に設定していたが、初回の載荷において 109kN で破壊に至った。この結果は、a₁ 側の無補修時のせん断耐力とほぼ同じであるが、ここでは参考値として 109kN での疲労寿命が 1 回であったと捉えることとした。

a₁ 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 3 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。図中の実線は、下の式に示すコンクリート標準示方書⁴⁾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す。

$$V_{rcd} = V_{cd} \left(1 - \frac{V_{pd}}{V_{cd}} \right) \left(1 - \frac{\log N}{11} \right) \quad (2)$$

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 a₁ 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。SB95 を除く 3 体の供試体について、補修後の疲労耐力は補修前の設計せん断疲労耐力を上回っていることがわかる。当初、補修後においても a₁ 側で破壊を生じることを見込んでいたが、a₁ 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が、S-N 線を得るには至らなかった。また、せん断スパン比が小さいことから設計耐力式との実際の耐力とのばらつきも考慮して引き続き検証をすすめたい。

4. まとめ

せん断破壊させた鉄筋コンクリート梁部材において、せん断ひび割れにエポキシ樹脂注入による補修を行い、疲労載荷試験を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) ひび割れ補修前の鉄筋コンクリート梁の静的載荷試験では、4 体のうち 3 体がせん断スパンの大きい方でせん断破壊が生じた。これらの破壊に対しては、ディープビームのせん断耐荷力式で妥当な評価ができた。
- 2) せん断破壊した鉄筋コンクリート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、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

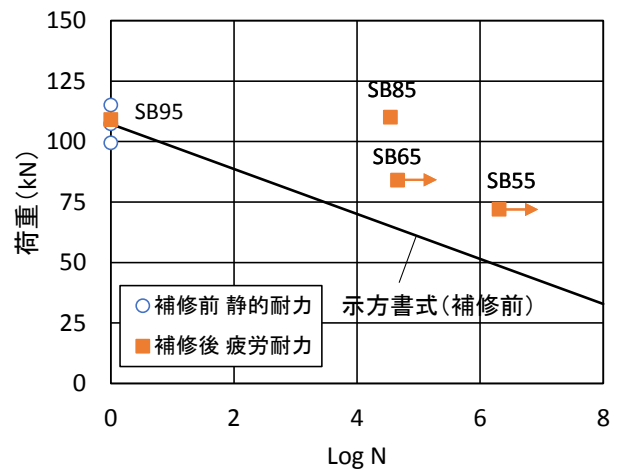


図 3 セン断疲労耐力

現した。

- 3) セン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：本研究の実験を行うにあたり、北海道大学工学部の木村勉技術職員にご協力をいただきました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 林 蓮, 古内 仁, 渡辺忠朋：ひび割れ注入補修した鉄筋コンクリート桁の疲労載荷試験, 土木学会北海道支部論文報告集, 70 : E-4, 2014
- 2) 深澤優一, 斉藤成彦, 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
- 3) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式, 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 年
- 4) 2012 年制定コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会, 2012