

論文 荷重履歴に着目したせん断補強筋を持たない RC はりの変形性状に関する検討

竹田 京子*1・佐藤 靖彦*2

要旨：せん断補強筋を持たない RC はりの静的荷重および疲労荷重試験を対象として、サンプリングモアレ法による解析を行い、静的破壊と疲労破壊の変形性状の差異について検討を行った。本論において、静的破壊に比べて疲労破壊は、繰返し荷重によってせん断変形量が著しく増加することと、また、斜めひび割れの幅とずれ量、さらに、圧縮域コンクリートの圧縮および引張主ひずみの変化から、骨材の噛み合わせによるせん断抵抗の低下が圧縮領域におけるせん断抵抗の増加を引き起こし、破壊に至らしめる可能性があることを示した。

キーワード：RCはり、せん断疲労、せん断ひび割れ、サンプリングモアレ法

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）のはり部材のせん断疲労破壊は非常に脆性的で避けるべき破壊形式である。RC はりのせん断疲労に関する研究では、数多くの実験的検討が行われてきた¹⁾。その主たる目的は、疲労寿命を明らかにすることである。しかし、コンクリートの疲労強度に大きなばらつきが存在することや、せん断破壊の不確実性が大きいことから、疲労寿命の予測精度を高めることは非常に難しい。そこで著者らは、疲労寿命だけではなく、変形やひび割れ情報といった他の指標に着目することで、せん断疲労破壊機構を定量的に評価し、疲労寿命の予測精度の向上を目指すことを考えている。なお、本研究では RC 床版の疲労の課題を念頭に置いている。RC 床版が繰返し移動輪荷重を受けてはり状化した場合、はり状化部材はせん断補強筋を持たない RC はりとみなすことができる。このため、本研究ではせん断補強筋を持たない RC はりを対象に、疲労に関する検討を行った。また、疲労荷重を受けるせん断補強筋を持たない RC はりのひび割れ挙動や抵抗機構を解明することで、せん断補強筋を持つ RC はりのひび割れ挙動や抵抗機構の解明にも寄与できると考えている。

著者らは、過去に行った実験から、静的荷重を受ける場合と疲労荷重を受ける場合とでは、斜めひび割れ面における骨材の噛み合わせ、圧縮域コンクリートの寄与、

表-1 供試体一覧

供試体名	STA	FT80
荷重条件	静的荷重	疲労荷重 上限 80kN / 下限 5kN
圧縮強度	33.2 MPa	33.1 MPa
終局荷重	133.7 kN	-
疲労寿命	-	95005 回

ダウエル力といったせん断抵抗成分の分担割合が両者で異なる可能性があることを示した²⁾。本研究では、RC はりのせん断スパン全体に着目して、静的破壊と疲労破壊の差異について考察を行う。具体的には、サンプリングモアレ法による解析（以下、モアレ解析）を用い、せん断スパンの面内変位に基づきせん断ひび割れ幅や主ひずみの違い、さらに、抵抗機構の変化に関して検討する。

2. RC はりの静的および疲労荷重試験

2.1 実験概要

(1) 供試体

供試体の寸法と配筋を図-1 に示す。供試体は幅 150mm、高さ 180mm、長さ 1300mm の RC はりとした。3 章で詳述するモアレ解析を行うため、供試体の右側せん断スパンの側面に格子をあらかじめスタンプと油性インクでプリントし、領域全体の動画撮影を行った。撮影

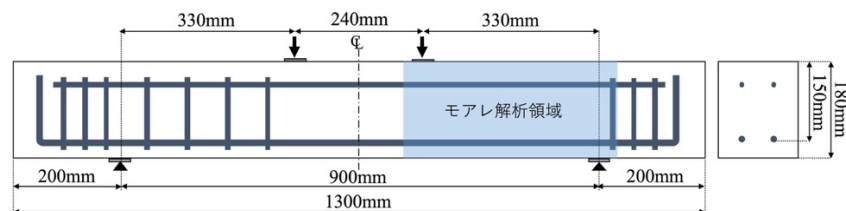


図-1 供試体寸法と鉄筋配置

*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博士(工学) (正会員)

側のスパンで破壊を生じさせるために、左側スパンにスターラップを配置した。また、せん断スパン外での定着破壊を防ぐ目的で、両支点の外側にもスターラップを設けた。主鉄筋には高強度異形鉄筋 D16 (USD685)、圧縮鉄筋とスターラップには D10 (SD295) を用いた。なお、供試体の諸元を決定する際には、試験機の制約からまず概ねの寸法を決定した。疲労载荷の影響を十分観察できるように、斜めひび割れ発生後に脆性的に破壊することなく圧縮ストラットを形成させることを意図して、せん断スパン比 ald を 2.2 とした。

(2) 载荷条件

供試体は静的载荷と疲労载荷で各 1 体ずつ、計 2 体を用意した (表-1)。静的载荷供試体は供試体 STA、疲労载荷供試体は供試体 FT80 と呼ぶ。図-1 に示すように、いずれも等曲げモーメント区間を 240mm とした 2 点载荷とした。疲労载荷供試体 FT80 の上限荷重は、静的载荷の終局荷重に基づいて決定し、上限荷重比を 60% とした。また下限荷重は 5kN としたが、これは完全除荷を行うことで繰返し载荷の度に供試体が衝撃を受けてしまうことを防ぐためである。

2.2 実験結果

終局荷重および疲労寿命を表-1 に示す。静的载荷の供試体 STA は最大荷重 133.7kN でせん断圧縮破壊に至った。また、疲労载荷の供試体 FT80 は、80kN の上限荷重が与えられ、繰返し回数 95006 回で 75kN、95007 回で 69kN までしか荷重が上がらなくなった。それゆえ、95005 回を破壊時繰返し回数とした。供試体 FT80 もせん断圧縮破壊に至った。以降の図表では、静的試験では、最大荷重の次の測定値である 132.8kN までを、疲労試験では 95006 回までの結果を整理している。

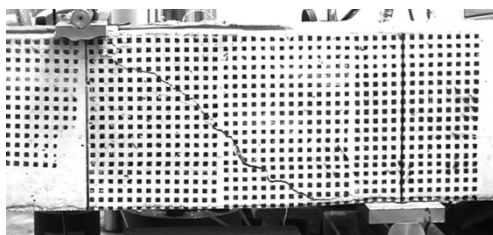
破壊後の撮影側のスパンの写真を図-2 に示す。これらは、供試体 STA はポストピークの 132kN 時、FT80 は繰返し回数 95007 回時の様子である。疲労载荷の供試体 FT80 は静的载荷の供試体 STA に比べて载荷点付近の圧壊領域が広がっていた。

3. サンプリングモアレ法による変形性状の解析

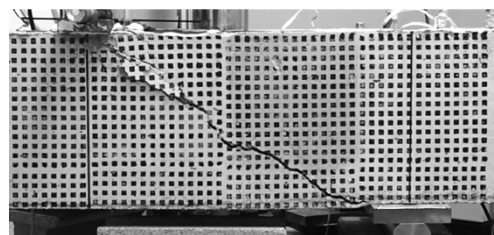
3.1 解析概要

供試体 STA および FT80 の変形性状についてより詳細な検討を行うため、モアレ解析を行う。解析には、市販のカメラである OLYMPUS OM-D E-M1 Mark II と、サンプリングモアレカメラオフライン解析ソフトウェア³⁾を用いた。なお、モアレ格子は 10mm ピッチとした。

モアレ解析の概要を説明する。動画を連番静止画として出力して解析を行うことで、1 枚目の画像に対する相対的な変位量を得られる。軸方向および鉛直方向の変位量から、せん断変形、剛性変化、ひび割れ幅とずれ、主ひずみを算出し、静的破壊と疲労破壊の変形性状について検討を行う。具体的には、図-3 に示すように、せん断スパンを約 40mm 四方の複数の領域に分けて解析を行うことで、各領域について領域内平均の変位量が算出される。なお、領域に含まれるモアレ格子の数は解析精度に影響し、また、解析結果は領域内の平均変位量として算出される。本研究では、せん断スパン全体の変形挙動を捉えるために、モアレ格子の数と領域の細かさのバランスを考え、40mm 四方の領域とした。高さ方向に 4 列、軸方向に 7 列の 28 領域に加えて、せん断スパン外の载荷点付近と支持点付近の 2 領域の合計 30 領域を設定した。領域の位置と領域番号を図-3 に示す。なお、著しく破壊が進行し、コンクリート片が落下してモアレ箇所

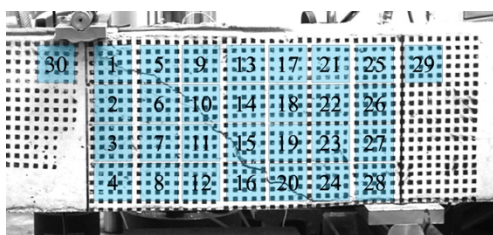


(a) 供試体 STA

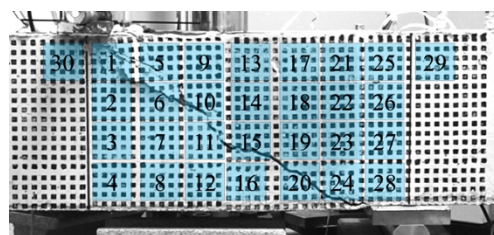


(b) 供試体 FT80

図-2 破壊状況写真



(a) 供試体 STA



(b) 供試体 FT80

図-3 モアレ解析の領域設定と領域番号

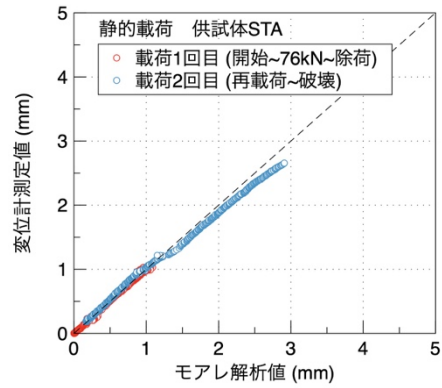
を一部損失した場合は解析精度が低下するが、本研究の図-2(b)の領域 1,5,6 付近の剥離の影響はほとんどないものと考えて検討を行った。

図-4 にモアレ解析値と実験時に設置した変位計の測定値の比較を示す。モアレ解析の荷点変位は、図-3 に示す領域番号 1 と領域番号 30 の平均値とした。供試体 STA は 1 回目に 76kN まで荷重したのち完全に除荷し、2 回目の荷重で破壊させたため、これを区別して示した。また供試体 FT80 では、繰返し荷重の 1 回目は静的に荷重を行っており、このときの値も合わせて示す。供試体 STA, FT80 とともに破壊が近くなるとモアレ解析値が変位計測定値をやや上回る傾向が見られるが、破壊直前までモアレ解析は変位計測定値と近い値を算出していることから、これ以降、モアレ解析値は十分精度を有するものと考えて検討を行う。なお、破壊直前にモアレ解析値が上回る理由としては、モアレ解析で設定した領域内にひび割れが生じたことで、領域内の平均変位量が増加したことが考えられる。これは、モアレ解析の精度が低下したのではなく、荷点位置の変位とモアレ解析で設定した領域の変位を同一のものと考えることができないことを意味している。

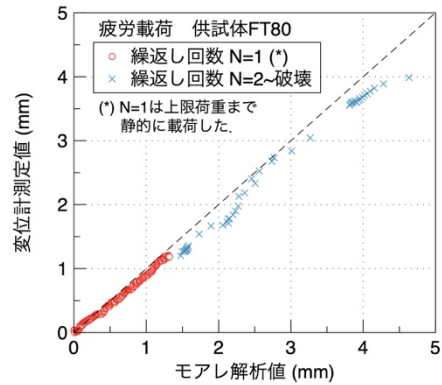
3.2 解析結果

(1) 全たわみとせん断変形の変化

まず全たわみ量とせん断変形量の変化に着目する。せ

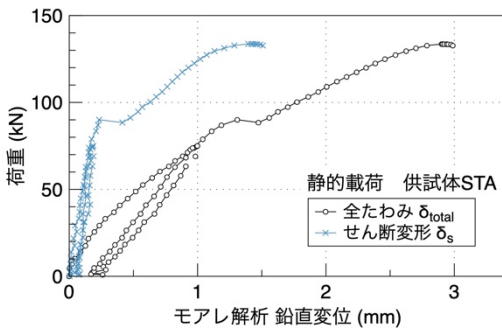


(a) 供試体 STA

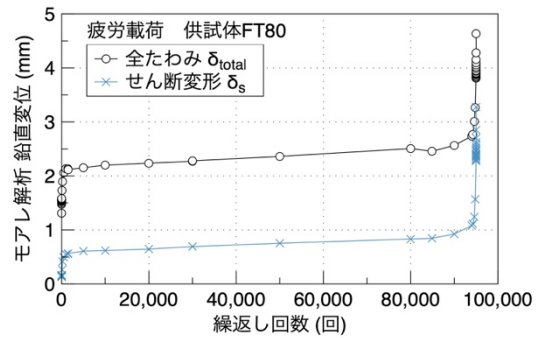


(b) 供試体 FT80

図-4 モアレ解析値と変位計測定値の比較

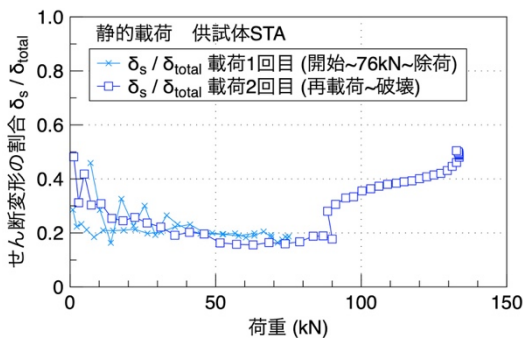


(a) 供試体 STA の荷重変位曲線

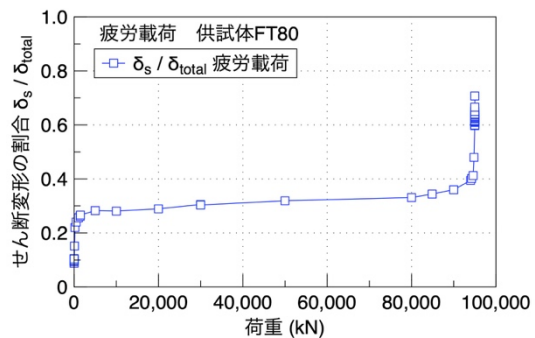


(b) 供試体 FT80 の繰返し回数-変位関係

図-5 全たわみとせん断変形



(a) 供試体 STA



(b) 供試体 FT80

図-6 全たわみに対するせん断変形の割合

ん断スパンの四隅である領域番号 1, 4, 25, 28 の各座標変化量からせん断ひずみを得ることでせん断変形量を算出した⁴⁾。

載荷点変位, すなわち全たわみと, せん断変形成分を 図-5 に示す。図-5(a) は静的載荷供試体 STA の荷重変位曲線, 図-5(b) は疲労載荷供試体 FT80 の繰返し回数-変位関係である。破壊時の全たわみは STA が 3.0mm, FT80 は 4.3mm であり, 疲労破壊のほうが破壊時の全たわみは大きい。また 図-6 に, 全たわみに対するせん断変形の割合の変化を示す。STA は横軸に荷重をとっており, 荷重が小さい範囲で大きい比が算出されている。これは, 小さい荷重で全たわみもせん断変形も非常に小さい値で変動しているため, 比として安定していないことが理由と考えられる。90kN 付近の斜めひび割れの進展によりせん断変形の割合が急増し, 最終的には 0.5 付近で破壊に至っている。供試体 FT80 も 0.3 程度で安定する期間を経たのちに破壊直前に増加するが, 破壊時の比は 0.65 程度であり, 静的破壊よりもせん断変形の割合が大きかった。

(2) 平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係

続いて, RC はり全体としてのせん断挙動について検討する。作用せん断力を断面で除した平均せん断応力 τ と, せん断スパンの四隅の領域 1, 4, 25, 28 の座標から得た平均せん断ひずみ γ の関係を図-7 に示す。供試体 STA は 1 回目および 2 回目の載荷中の τ - γ 関係を示し, 供試体 FT80 は各繰返し回数での上限荷重時と下限荷重時の τ -

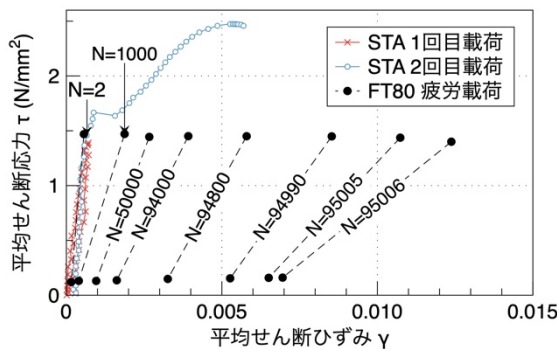


図-7 平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係

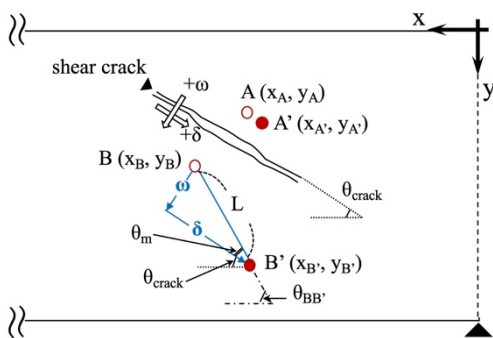


図-8 ひび割れ幅とずれ算出時の座標の定義

γ 関係を示す。破壊時のせん断ひずみは供試体 STA で 0.0055, FT80 の上限荷重で 0.011 程度であり, 疲労破壊の方がせん断ひずみは大きく, 前節で示したせん断変形割合の傾向と一致する。

τ - γ 関係からせん断剛性の変化を推測する。供試体 STA は斜めひび割れが大きく進展した $\tau = 1.7\text{N/mm}^2$ 付近からせん断剛性が低下している。供試体 FT80 では, 繰返し回数が増加するとせん断剛性は徐々に低下する。特に破壊直前に急激に進行し, STA よりも低いせん断剛性となっており, 疲労破壊では静的破壊よりもはり全体が損傷を受けていると考えられる。

(3) 斜めひび割れ幅とずれの変化

斜めひび割れに沿った骨材の噛み合わせによるせん断抵抗について検討するため, 斜めひび割れ幅とずれ量を算出する。斜めひび割れの角度と, 斜めひび割れを挟む 2 箇所の領域の座標変化をモアレ解析により得ることで, ひび割れの幅とずれを得ることができる。図-8 に示すように, 斜めひび割れを挟む 2 点 $A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$ が, 載荷試験が進むことで $A'(x_A', y_A')$, $B'(x_B', y_B')$ へ移動するとする。載荷にともなうはりの剛体変形を考慮すると, ひび割れ幅とずれの進展による点 B の x 方向の移動量 $\Delta X_{BB'}$ と y 方向の移動量 $\Delta Y_{BB'}$ は, 点 A に対する点 B の相対移動として次式で表される。

$$\Delta X_{BB'} = \{x_{B'} - (x_{A'} - x_A)\} - x_B \quad (1)$$

$$\Delta Y_{BB'} = \{y_{B'} - (y_{A'} - y_A)\} - y_B \quad (2)$$

ひび割れ幅 ω とずれ量 δ は次式で求められる。

$$\omega = L \sin(\theta_m) = L \sin(\theta_{BB'} - \theta_{crack}) \quad (3)$$

$$\delta = L \cos(\theta_m) = L \cos(\theta_{BB'} - \theta_{crack}) \quad (4)$$

ここで, L : 点 A に対する点 B の相対移動量, $\theta_{BB'}$: B-B'線の角度, θ_{crack} : 斜めひび割れの角度, であり, L と $\theta_{BB'}$ は次のように表される。

$$L = \sqrt{X_{BB'}^2 + Y_{BB'}^2} \quad (5)$$

$$\theta_{BB'} = \tan^{-1}(Y_{BB'}/X_{BB'}) \quad (6)$$

式(3), (4)に基づき, 供試体 STA と FT80 それぞれ斜めひび割れの上部, 中部, 下部の位置で幅とずれを算出した。具体的な算出位置を表-2 に示す。ひび割れの幅の

表-2 ひび割れ幅とずれ量の算出に用いたひび割れ位置と領域番号

供試体名	ひび割れ位置	図-3における領域番号	
STA	上部	ω_{s1}, δ_{s1}	2-5
	中部	ω_{s2}, δ_{s2}	11-14
	下部	ω_{s3}, δ_{s3}	16-19
FT80	上部	ω_{f1}, δ_{f1}	2-5
	中部	ω_{f2}, δ_{f2}	11-14
	下部	ω_{f3}, δ_{f3}	16-19

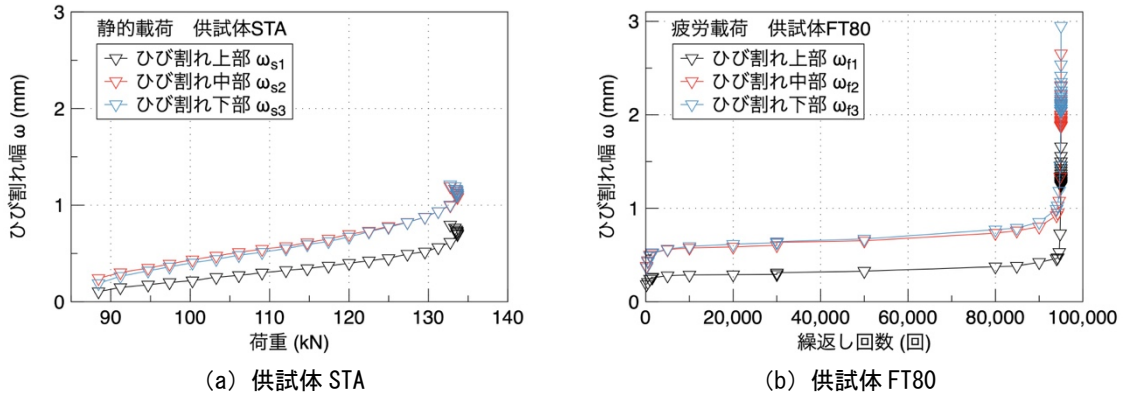


図-9 斜めひび割れ幅の変化

変化を図-9に、ずれの変化を図-10に示す。なお、供試体 STA, FT80 いずれも動画で目視できる斜めひび割れの発生以降のみを描いており、供試体 STA は 88kN 以降、供試体 FT80 は繰返し回数 $N=200$ 以降である。供試体 STA と FT80 ともに、破壊の直前にひび割れ幅やずれ量が増加する。また、幅とずれ量で、増加の傾向に大きな差異はみられなかった。

一般に、骨材の噛み合わせによるせん断伝達力は、ひび割れのずれ量が大きいほど効果が大きくなるが、ずれ量が大きくても、ひび割れ幅が大きくなりすぎるとその効果は低下する⁵⁾。このため、せん断伝達の効果を考える際には、ひび割れ幅とずれの比 δ/ω とともに、 ω の絶対値を考慮に入れる必要がある。ここで、斜めひび割れ幅

ω とずれ量 δ の関係を図-11に示す。供試体 STA に着目すると、幅 ω とずれ δ は同程度の大きさから徐々に幅 ω が上回った。FT80 も同様に、徐々に幅 ω がずれ δ を上回る傾向が見られたが、疲労荷重が進むと幅 ω とずれ δ は同程度の増加速度で進展し、 $\omega - \delta$ 関係は一定の傾きを描いた。疲労荷重の繰返し回数増加によってひび割れが進展する過程では、幅とずれの比 δ/ω は一定のまま幅 ω が増加することで、せん断伝達効果が徐々に低下しているものと推察される。すなわち、疲労荷重の繰返し回数が増加する過程で、骨材の噛み合わせによるせん断抵抗成分は低下し、この損失分を他の抵抗成分が担っている可能性がある。

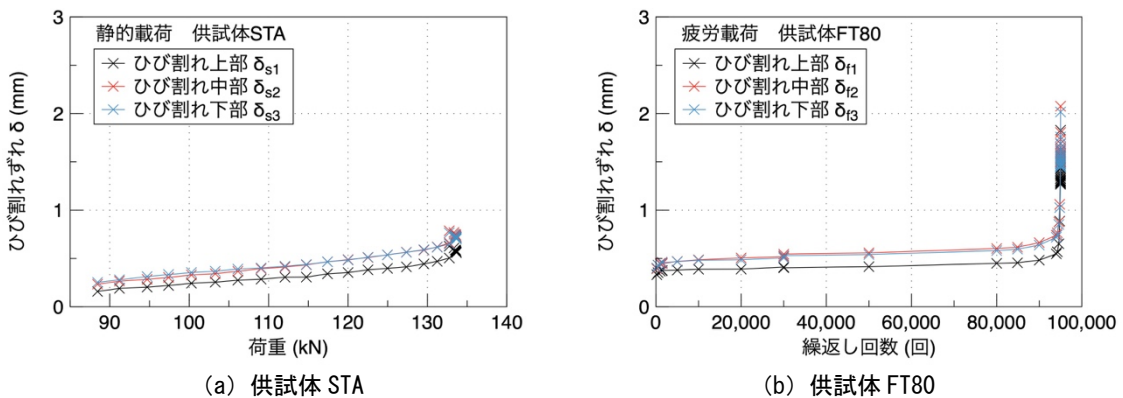


図-10 斜めひび割れのずれ量の変化

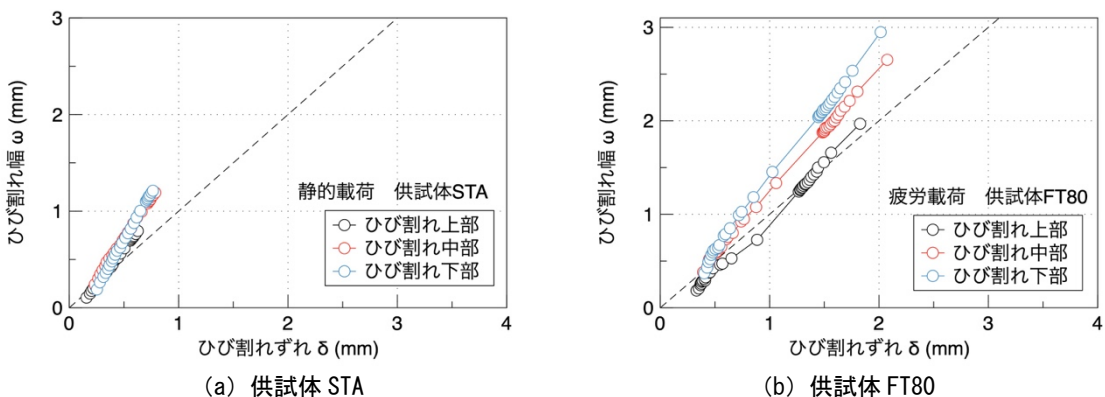


図-11 斜めひび割れの幅とずれ量の関係

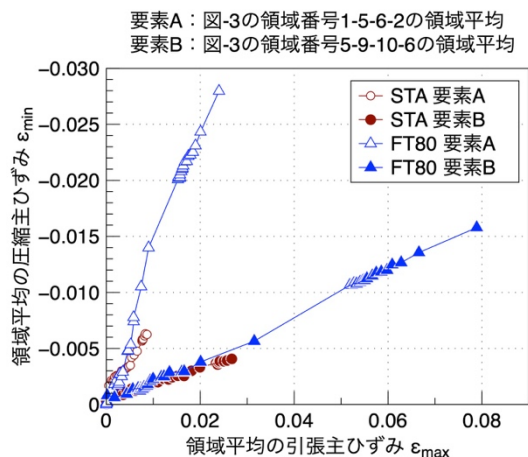


図-12 領域平均の引張-圧縮主ひずみ関係

(4) 圧縮主ひずみ-引張主ひずみ関係

図-2に示したように供試体 STA, FT80 ともにせん断圧縮破壊に至っており、荷重点付近の圧縮性状を把握する意義は高いと考えられる。モアレ解析の4箇所の領域から平均主ひずみを算出した。図-3における領域番号1-5-6-2を要素A、領域番号5-9-10-6を要素Bとして、領域平均の引張主ひずみ ϵ_{max} と圧縮主ひずみ ϵ_{min} の関係を図-12に示す。供試体 STA, FT80 ともに荷重点に近い要素Aの方が圧縮主ひずみは大きかった。また斜めひび割れが顕著に見られる要素Bの方が、引張主ひずみが大きかった。供試体 STA と FT80 を比較すると、供試体 STA が破壊に至るまでは $\epsilon_{max} - \epsilon_{min}$ 関係の傾きやその値は極めて類似している。しかし、FT80 は疲労荷重が進むと圧縮主ひずみは増加し続け、疲労破壊時には非常に大きな値となった。

以上より、ひび割れ幅の拡大により骨材の噛み合わせによるせん断抵抗が徐々に低下した結果、この分を圧縮領域のせん断抵抗が負担することで疲労荷重に抵抗している可能性がある。そして、圧縮領域のコンクリートそのものの疲労損傷が進行することで、RC はりの疲労破壊に至っている可能性が考えられる。ただし、今回の検討では、細部の検討や定量的な評価が不足しているため、今後はせん断伝達力の評価やせん断剛性の評価を行い、抵抗機構の理解を深める。

4. まとめ

本研究ではせん断補強筋を持たない RC はりの静的荷重および疲労荷重試験を対象としたサンプリングモアレ

法による解析を用いて、静的破壊と疲労破壊の変形状の差異について検討を行った。その要旨を以下に示す。

- 荷重試験の動画撮影とモアレ解析により、RC はりの全たわみ、せん断変形量、平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係、斜めひび割れの幅とずれ量、圧縮と引張の主ひずみを得ることができた。
- 全たわみに占めるせん断変形の割合は静的破壊よりも疲労破壊の方が多かったことや、平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係の傾きの変化から、疲労荷重は繰返し荷重の進行によってせん断変形が著しく増加する傾向があると考えられる。
- 疲労荷重の繰返し回数が増加すると、ひび割れ幅とずれ量が着実に増加する一方で、その比はほぼ一定であったことから、骨材の噛み合わせによるせん断抵抗は疲労荷重中に徐々に低下していると考えられる。
- 荷重点近くの領域平均の圧縮主ひずみは、静的荷重の破壊時の値を大きく超えたのちも、繰返し回数の増加にともなって疲労荷重の圧縮ひずみの値が着実に増加したことから、圧縮領域におけるコンクリートの抵抗が増加していると考えられる。

参考文献

- 1) 上田多門, 岡村 甫, Sabry A. Farghaly, 榎本松司: せん断補強筋のないはりのせん断疲労強度, コンクリート工学, Vol.20, No.9, pp.89-98, 1982.9
- 2) 竹田京子, 佐藤靖彦, せん断補強筋を持たない RC はりの静的荷重と疲労荷重による損傷過程と破壊機構に関する実験的検討, コンクリート論文集の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文集, Vol.19, pp.451-454, 2019.10
- 3) サンプリングモアレカメラ カメラによる変位変形計測-サンプリングモアレ法-, 参照: <https://www.kyowa-ei.com/jpn/product/special/dsmc-100a/index.html> (閲覧日: 2020年1月7日)
- 4) 田所敏弥, 佐藤靖彦, 上田多門: 斜めひび割れ面のせん断伝達機構と鉄筋コンクリート棒部材の斜め引張破壊, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.195-211, 2003.8
- 5) J. C. Walraven, H. W. Reinhardt: Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading, HERON, Vol. 26, No.1A, pp.1-68, Jan.1981