

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	せん断スパン内にひび割れを有する鉄筋コンクリートはりのせん断疲労耐荷機構に及ぼすひび割れ先端位置の影響
Title(English)	Effect of Crack Length on Shear Fatigue Mechanism of RC beam with Cracks in Shear Span
著者(和文)	山田雄太, 千々和伸浩, 岩波光保
Authors(English)	Yuta Yamada, Nobuhiro Chijiwa, Mitsuyasu Iwanami
出典(和文)	コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 37, No. 2, pp. 643-648
Citation(English)	Proceedings of JCI, Vol. 37, No. 2, pp. 643-648
発行日 / Pub. date	2015, 7

論文 せん断スパン内にひび割れを有する鉄筋コンクリートはりのせん断疲労耐荷機構に及ぼすひび割れ先端位置の影響

山田 雄太*1・千々和 伸浩*2・岩波 光保*3

要旨: 鉄筋腐食ひび割れを有する鉄筋コンクリートはりにおけるせん断疲労挙動を解明するための、基礎的理論の構築を目的とし、コンクリートのせん断力分担分をストラット幅及び角度に及ぼす影響に分離する方法を提案した。せん断スパン内に導入されたひび割れ先端位置を変化させた三次元有限要素解析を行った結果、ストラット幅及び有効圧縮強度係数は、上限荷重比の低下に伴い減少することが明らかになった。静的載荷時、耐力の増加に寄与するひび割れを有するはりは、ストラット幅の減少が支配的な影響を及ぼすことで、繰返し回数の増加に伴い、せん断疲労耐力が急激に減少することが明らかになった。

キーワード: せん断疲労, ひび割れ長, ストラット-タイモデル, 有効圧縮強度係数

1. 序論

鉄筋コンクリート(RC)構造物の経年劣化に伴い、顕在化が予測される鉄筋腐食と疲労の複合劣化に着目すると、健全な状態に対して、曲げ破壊先行の設計がなされた構造物においても、鉄筋腐食と繰返し載荷の相互作用による劣化促進が生じ、せん断破壊先行の破壊モードに移行する可能性がある。

鉄筋腐食と疲労の複合劣化に関する研究は一部の報告に限られているが^{例えば 1)}、鉄筋腐食と曲げ疲労の複合劣化に関しては、鉄筋の疲労強度によって概ね評価できることが知られている。せん断疲労に関する知見は特に限定されており、鉄筋腐食ひび割れを有する RC はりのせん断疲労耐荷機構は解明されていないのが現状である。

健全なはりを対象としたせん断疲労に関する研究では、最大せん断力のコンクリート分担分が、繰返し回数の増加に伴い減少することが明らかにされている²⁾。コンクリートが受け持つせん断力の減少は、ひび割れ進展に伴い生じると考えられるが、ひび割れを有する RC はりでは、ひび割れの存在により、ひび割れ進展位置が限定されることで、その減少率が変化し得る可能性がある。

ひび割れを有する RC はりでは、繰返し載荷に伴うマイクロクラックの進展や、ひび割れ面を介する荷重伝達経路の形成により³⁾、応力伝達領域が変化すると考えられる。耐荷機構を簡便に表現したストラット-タイモデルに着目すると、応力伝達領域の変化は、ストラット幅、及び角度の変化と等価と見なすことができる。国内外の設計指針^{例えば 4)}では、ストラット部の応力状態に応じて、設計基準強度に有効圧縮強度係数を乗じた有効強度を用いることが定められている。ストラット幅及び角度が変化した場合、ストラットの破壊荷重が変化することから、

ひび割れを有する RC はりのせん断疲労耐荷機構に及ぼすひび割れ先端位置の影響は、現行の設計指針における有効圧縮強度係数の変化として説明できる可能性がある。

上述の観点から、本研究では、ひび割れを有する RC はりのせん断疲労耐荷機構の解明を目的として、ストラット幅及び角度の変化を、有限要素解析に基づき、上限荷重比及びひび割れ先端位置の影響に分離して明らかにすると共に、ストラット幅及び角度の変化がストラットの有効圧縮強度係数に及ぼす影響について考察を行った。

2. ひび割れを有するはりの耐荷挙動

ストラット幅及び角度の算出に用いる三次元有限要素解析の妥当性を確認するために、鉄筋腐食模擬ひび割れを導入した試験体を用いて、静的載荷実験を行った。以下に、実験概要及び結果について述べる。

2.1 試験体諸元

試験体諸元を図-1に示す。実験に用いた試験体は2体であり、 a/d はそれぞれ、1.6及び2.9とした。せん断補強筋の影響を除くためせん断補強筋は配していない。軸方向引張及び圧縮主鉄筋には、せん断破壊を確実に先行させるため、USD685をそれぞれ4本用いた。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は、 $a/d=1.6$ 及び2.9の試験体でそれぞれ、32.3MPa、35.3MPaであった。載荷板には厚さ20mm、はり軸方向幅100mmの鉄板を用いた。載荷は、0.1mm/分の変位制御とし、2点載荷で行った。

2.2 模擬ひび割れの導入方法

試験体には、軸方向主鉄筋に沿う模擬ひび割れをせん断スパン内に導入した。模擬ひび割れは、腐食ひび割れ面の噛合せ効果を無視し得る極限状態を模擬するために、軸直角方向に貫通する平面として与えた。模擬ひび割れ

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科 修士 (工学) (学生会員)

*2 東京工業大学 大学院理工学研究科 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授 博士 (工学) (正会員)

は、厚さ 1.5mm の鉄板と紙やすりを、エポキシ系接着剤を用いて貼付したものを 2 組、紙やすりの面が相対するようにして主鉄筋直上に配した。鉄板とコンクリートの定着は、鉄板に設置した木ネジの付着により確保した。

図-1 に示される l_c はひび割れ先端位置を示し、荷重点位置を原点に、主鉄筋軸方向スパン外を正に変化する。本研究では、ひび割れ長を示すパラメータとして損傷比 l_c/a を定義した。実験に用いた試験体の l_c/a は、 $a/d=1.6$ 及び 2.9 の試験体に対してそれぞれ 0.77 及び 0.75 である。

2.3 実験結果

図-2 に各試験体の荷重変位図を示す。健全なはりの解析結果を併記した。耐力は $a/d=1.6$ 及び 2.9 の試験体に対してそれぞれ、244kN、200kN であった。各試験体の耐力は、二羽式⁵⁾を用いた健全なはりにおける斜めひび割れ発生荷重の予測値に対してそれぞれ、2.2、2.4 倍の値を示した。図-3 に各試験体の主鉄筋位置における鉄筋のひずみ分布を示す。荷重の増加に伴い、スパン内の計測点におけるひずみが一定値に漸近していることが確認できる。健全なはりに対する耐力の増加と、鉄筋のひずみ分布から、実験に用いた試験体はいずれもタイドアーチ的な耐荷機構を示したと考えられる。

3. 解析モデルの妥当性検証

本研究では、ストラット幅及び角度の算出に、三次元有限要素解析 COM3 を用いた。COM3 は、前川ら⁶⁾により開発された有限要素解析コードであり、圧縮及び引張応力作用下の構成則において繰返し荷重に対する損傷を弾性剛性の低下として考慮することで、RC 部材の疲労破壊モードと疲労寿命を精度よく再現できることが報告されている⁷⁾。本研究では有限要素モデルとして、要素の非線形性に支配的な影響を及ぼすひび割れ面の変形を考慮する多方向非直交固定ひび割れモデルを選んだ。有限要素には 8 節点アイソパラメトリック要素を用いた。解析モデルは、対称性を考慮し、軸直角方向に 1/6 分割したモデルを適用した。要素分割数は、 $a/d=1.6$ 及び 2.9 のはりに対しそれぞれ 692、1186 である。軸直角方向要素数は 1 とした。以下に、静的荷重実験及び解析結果の整合性について述べる。

3.1 模擬ひび割れの再現方法

模擬ひび割れ面の解析的再現には、要素節点間にモルクーロンの線形摩擦則を適用する接合要素を用いた。接合要素特性は、軸力を作用させた試験面を滑動させる要素実験³⁾により定めた。要素実験による結果から算出された模擬ひび割れ面のせん断剛性及び摩擦係数はそれぞれ、 4.68kN/cm^3 、1.4 であった。ひび割れ幅とせん断剛性の関係を表す青柳・山田式⁸⁾を用いれば、算出されたせん断剛性は 1.28mm のひび割れ開口量に相当する。

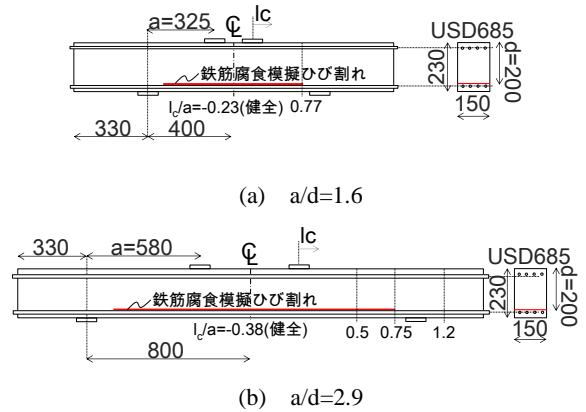
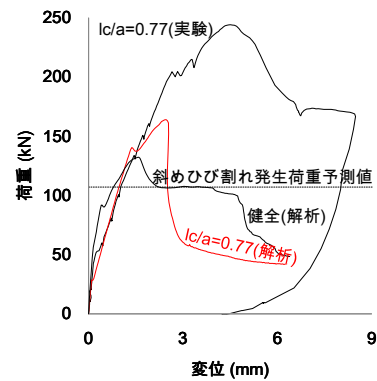
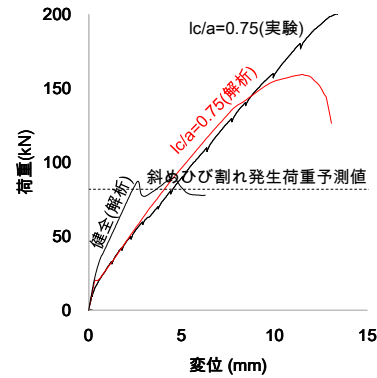


図-1 試験体諸元 (単位: mm)

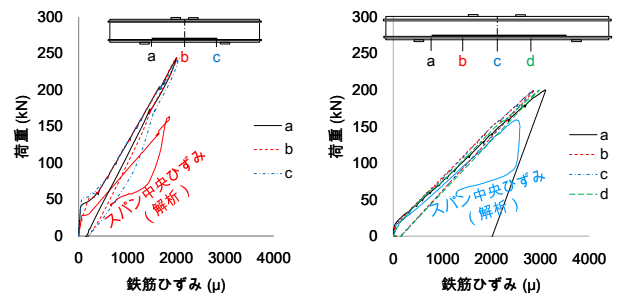


(a) $a/d=1.6$



(b) $a/d=2.9$

図-2 荷重変位図



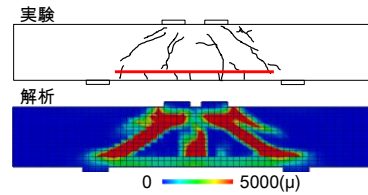
(a) $a/d=1.6$

(b) $a/d=2.9$

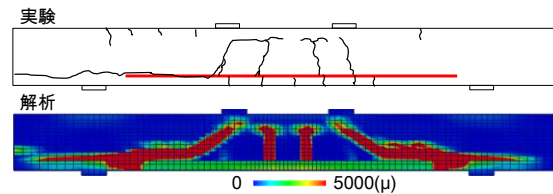
図-3 主鉄筋位置におけるひずみ分布 (解析結果併記)

3.2 静的解析結果

図-2 に実験の再現解析結果を示す。いずれの a/d においても、初期及び弾塑性域における剛性は概ね一致した。図-2(a)に示した $a/d=1.6$ の場合には、解析に基づく耐力が実験結果と比較して、特に低下する傾向を示した。プレピーク挙動が概ね一致したことから、接合要素を用いた模擬ひび割れを有するはりの解析結果は概ね妥当であると考えられる。図-4 に、実験に基づくひび割れ分布図及び解析により得られた最大主ひずみ分布図の比較を示す。いずれの a/d においても、ひび割れ分布図及び最大主ひずみ分布図は概ね一致した。従って、ひび割れを有するはり内部に形成される応力分布は概ね解析により再現可能であると判断し、本章で述べた解析モデルを用いて疲労解析を行うこととした。



(a) $a/d=1.6$ (ピーク荷重時)



(b) $a/d=2.9$ (ピーク荷重時)

図-4 ひび割れ分布及び最大主ひずみ分布図の比較

4.せん断疲労耐力機構の評価方法

ひび割れを有する RC はりのせん断疲労耐力機構は、ストラット-タイモデルに基づき、上限荷重比、損傷比、はりの幾何学的条件を変数に持つストラット幅及び角度の変化に依存すると仮定した。この仮定により、疲労と鉄筋腐食ひび割れの複合劣化がはりの耐力機構に及ぼす影響を、現行の設計指針^(例えば 4)で定義される有効圧縮強度係数の変化として表現することが可能となる。以下に、耐力機構の評価方法について述べる。

4.1 等価有効圧縮強度係数の導出

主鉄筋軸方向にひび割れを有する RC はりは、ひび割れ位置に応じて、ひび割れ面を介し、圧縮応力を伝達するストラットが形成される。この場合、ひび割れ面特性に起因するせん断応力が、ひび割れ面を含む連続体としての主応力方向であるストラット角度を変化させる可能性がある。一方、繰返し载荷に伴い、ストラット内部に発生するマイクロクラックが、応力伝達領域を微視的に変化させる可能性がある。微視的な圧縮応力伝達領域の変化は、ストラット幅の変化として発現すると考えられる。ストラット幅及び角度の変化は、ストラットの破壊荷重を変化させることから、本研究では、ひび割れの存在と繰返し载荷によるストラット幅及び角度の変化をストラットの有効圧縮強度係数の変化として置換する方法を提案する。

ストラットが、圧縮応力伝達部材であることを考慮すれば、ストラット幅は、図-5 に示す基本モデルを用いて中立軸高 x 、载荷板幅 w_b 及びストラット角度により一意に定まると考えられる。

このモデルを用いた場合、ストラットの破壊荷重は式(1)で表される。

$$P_{fS} = -vf'_c bw_s \sin^2 \alpha_s \quad (1)$$

ここに、 f'_c : コンクリート強度、 b : はり幅である。

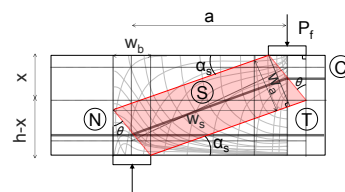


図-5 基本モデル

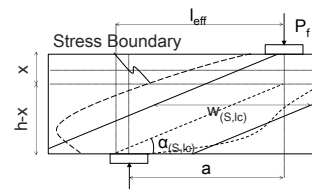


図-6 有効ストラット幅及び角度算出に関する概念図

簡単のため、はりの断面形状は矩形断面を仮定した。

上限荷重比及びひび割れ長の変化に伴い、耐力機構に寄与する有効ストラット幅及び、角度の正弦をそれぞれ、 $w_{(S,l_c)}$ 、 $\sin \alpha_{(S,l_c)}$ とすると、ストラットの破壊荷重は、式(2)で表される。

$$P_{fS} = -f'_c bw_{(S,l_c)} \sin^2 \alpha_{(S,l_c)} \quad (2)$$

ここに、 S : 上限荷重比(%), l_c : ひび割れ長である。ただし、 $w_{(S,l_c)}$ 及び $\sin \alpha_{(S,l_c)}$ の算出方法については 4.2 で述べる。

式(1)、式(2)から、ストラットの等価有効圧縮強度係数は、式(3)で表される。

$$v_{S(S,l_c)} = \frac{w_{(S,l_c)} \sin^2 \alpha_{(S,l_c)}}{w_s \sin^2 \alpha_s} \quad (3)$$

4.2 有効ストラット幅及び角度の算出方法

有効ストラット幅 $w_{(S,l_c)}$ 及び角度の正弦 $\sin \alpha_{(S,l_c)}$ は、有限要素解析に基づく破壊時の最小主応力分布から算出した。図-6 に算出に関する概念図を示す。 $w_{(S,l_c)}$ は、はり

の幾何学的条件から定まる応力境界内部のはり軸方向要素寸法の和をはり高で平均化したものとして定義した。すなわち、

$$w_{(S,lc)} = \frac{1}{h} \sum_i \sum_j \{1 - H(\sigma_{ij} - \sigma_{3min})\} w_{ij}^{x_2} \quad (4)$$

ここに、 h ：はり全高、 i, j ：面内座標を示す添え字、 $w_{ij}^{x_2}$ ：はり軸方向要素寸法、 $H(\sigma_{ij} - \sigma_{3min})$ ：Heaviside 関数である。

応力境界の閾値は、基本となるストラット-タイモデルのストラット部に伝達される応力の定数倍として与えた。

$$\sigma_{3min} = -n \frac{P_{max}}{b w_s \sin \alpha_s} \quad (5)$$

ここに、 n ：スケールファクタ、 P_{max} ：上限荷重である。静的載荷時における健全なはりの基本モデルにおけるストラット耐力と、算出された有効ストラット幅及び角度の正弦から定まるストラット耐力が等しくなるよう、 $v_s = 1$ における n を与えた。

有効ストラット角の正弦は、図-6に示したはり下縁に形成される応力境界の中心位置と、中立軸位置から定まる正弦として式(6)で定義した。

$$\sin \alpha_{(S,lc)} = \frac{h - x}{\{l_{eff}^2 + (h - x)^2\}^{0.5}} \quad (6)$$

ここに、 l_{eff} ：はり下縁における応力境界中心から載荷点までの距離、 x ：等価応力ブロックを用いて算出される終局時の中立軸高さである。

5. ひび割れを有するはりのせん断疲労耐荷機構

上述の耐荷機構評価方法に基づき、ひび割れ長がストラット幅及び角度に与える影響を確認した。最後に、ストラット幅及び角度の変化が等価有効圧縮強度係数に及ぼす影響について述べる。

5.1 疲労解析

(1) 解析対象諸元

表-1に解析対象諸元を示す。せん断スパン比 a/d 、上限荷重比 S 、損傷比 lc/a を解析変数にとり、有効圧縮ストラット幅及び角度の正弦、等価有効圧縮強度係数を算出した。解析ケースは、合計23ケースである。損傷比の定義は、2.2に述べたとおりである。今回の検討ケースにおいて、損傷比-0.38及び、-0.23は健全なはりを示す。疲労解析において、下限荷重は9.8kNに固定した。載荷方法は、上限荷重まで静的載荷を行い、上限荷重に達した後、載荷周波数1Hzで繰返し載荷を行った。

(2) 荷重変位図に及ぼすひび割れ先端位置の影響

図-7に各損傷比を有するはりの静的解析結果を示す。いずれの a/d においても、 lc/a 約0.8で耐力が著しく増加しているのが確認できる。 lc/a 約0.8とは、載荷点と支点を結ぶ線分上にひび割れ先端が存在する場合を示している。図-8に解析結果に基づく応力伝達領域に関する概念図を示す。ひび割れ先端位置を決定する幾何学的因子を独立変数に選ぶ時、最大の耐力を発揮する最小主応力分布が存在すると考えられる。耐力の発現に最も効果的

表-1 解析対象諸元

せん断スパン比	スケールファクタ	上限荷重比	上限荷重	損傷比	破壊サイクル	有効圧縮ストラット幅	有効圧縮ストラット正弦	等価有効圧縮強度係数
a/d	n	$S(\%)$	$P_{max}(\text{kN})$	lc/a	N_f	$w(\text{mm})$	$\sin \alpha$	v_s
2.9	1.30	100	89.8	-0.38	1	307	0.28	1.00
			112.0	0.50	1	259	0.28	0.88
			159.4	0.75	1	348	0.28	1.16
			105.3	1.20	1	332	0.27	1.03
		80	71.8	-0.38	577777	218	0.28	0.71
			89.6	0.50	2677	236	0.29	0.84
			127.5	0.75	1764	307	0.28	1.01
			84.3	1.20	27277	319	0.27	1.02
		60	53.9	-0.38	115277781	236	0.28	0.79
			67.2	0.50	105277781	331	0.30	1.27
			95.7	0.75	562777	324	0.28	1.09
			63.2	1.20	1665277	183	0.29	0.67
		40	35.9	-0.38	1580277801	252	0.27	0.81
			44.8	0.50	2292777801	157	0.28	0.54
			63.8	0.75	137777781	229	0.33	1.08
			42.1	1.20	407777781	300	0.26	0.89
1.6	0.97	100	132.3		1	184	0.50	1.00
		90	118.8	-0.23	32	185	0.48	0.92
		56	73.5		70277778	175	0.50	0.95
		100	163.9		1	189	0.48	0.96
		80	131.1	0.77	11777	164	0.50	0.89
		60	98.3		1165277	135	0.50	0.73
		40	65.6		135277781	117	0.52	0.69

※下限荷重：9.8kN

な最小主応力分布の稜線の中で、載荷点と支点を結ぶ曲線を最適荷重伝達経路と定義すると、 lc/a 約 0.8 の場合、ひび割れ面がストラットを横断せず、圧縮応力伝達領域が局所化することで、圧縮応力の主軸が、最適荷重伝達経路に近接すると考えられる(図-8(a))。一方、ひび割れ先端がストラットを横断する位置に存在する場合、ひび割れ面上の作用最大せん断応力が健全時と比較して減少する。その結果、主応力角が低減することで、最適荷重伝達経路から圧縮応力の主軸が逸脱する(図-8(b))。ひび割れ先端が極端にスパン内部に存在する場合、圧縮応力伝達領域が限定されないため、圧縮応力主軸が逸脱すると考えられる(図-8(c))。主応力方向の変化に起因して、圧縮応力の主軸が、最適荷重伝達経路から逸脱する場合、ストラットに作用する内力を軸力に変換して外力に抵抗するタイドアーチ的機構を十分発現することができず、耐力の低下に繋がったと考えられる。

(3) S-N 曲線に及ぼすひび割れ先端位置の影響

図-9 に各損傷比を有するはりに対する S-N 曲線を示す。縦軸は上限荷重を示し、横軸は破壊サイクルを対数軸で示している。いずれの a/d においても、 lc/a 約 0.8 のはりでは、静的耐力は高いが負勾配が大きく、疲労耐力の低減に伴い、破壊繰返し回数がその他のはりの結果に漸近する傾向が確認された。 lc/a 約 0.8 のはりでは、圧縮応力伝達領域の局所化により、繰返し載荷に伴う損傷蓄

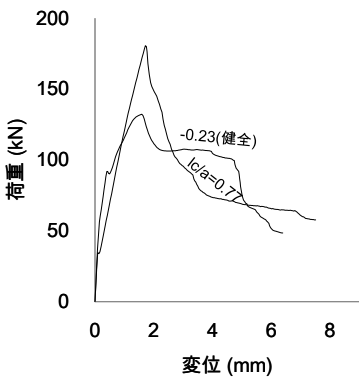
積領域が限定されたことが原因と考えられる。

5.2 有効ストラット角度に及ぼす損傷比の影響

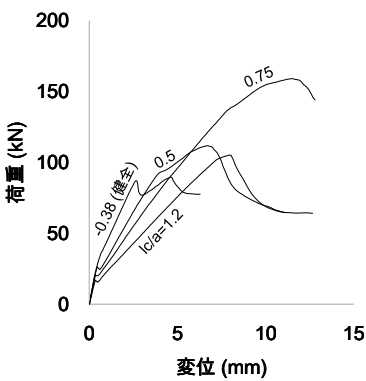
図-10 に算出された有効ストラット角正弦を示す。線形近似線を実線で示した。正弦は、 $lc/a=0.8$ 付近において上限荷重比の低下に伴い増加傾向にある。ストラット角の変化は、鉄筋定着部に水平力が繰返し作用することにより生じると考えられる。 $lc/a=0.8$ のはりでは、40% 程度の上限荷重比が作用する場合においても、定着部への損傷蓄積が少ない状態で破壊に至ることが推察される。他の lc/a を有するはりにおいて、各 a/d に対する変化はほぼ見られないことから、 lc/a がストラット角度に及ぼす影響は無視できると言える。

5.3 有効ストラット幅に及ぼす上限荷重比の影響

図-11 に算出された有効ストラット幅を示す。 lc/a 約 0.8 における結果の線形近似線を実線で示し、その他を破線で示した。いずれの場合も、上限荷重比の低下に伴い、ストラット幅が減少傾向にあることが確認できる。いずれの a/d においても健全なはり($lc/a=-0.38,-0.23$)において、減少率の低下が確認できる。健全なはりでは、5.1 に述べたように、ひび割れの存在による圧縮応力伝達領域の局所化が生じないため、損傷蓄積領域がひび割れを有するはりより広範囲に及ぶことが原因と考えられる。 $a/d=1.6$ の健全なはりのストラット幅に着目すると、上限荷重比の低下に伴うストラット幅の減少量が小さいことから、

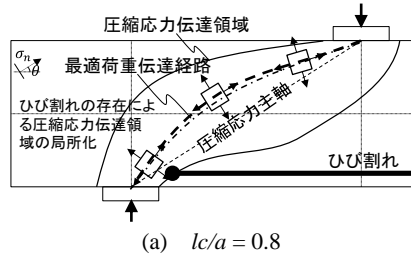


(a) $a/d=1.6$

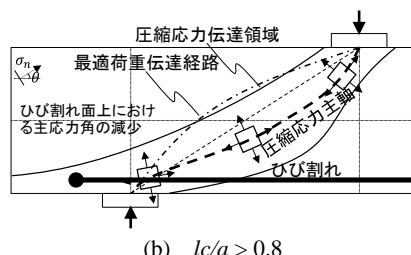


(b) $a/d=2.9$

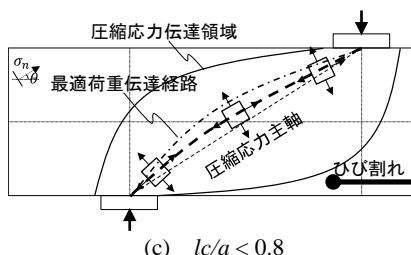
図-7 静的解析結果



(a) $lc/a = 0.8$

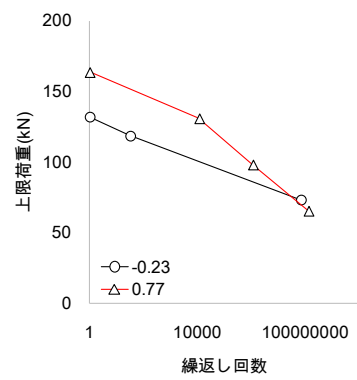


(b) $lc/a > 0.8$

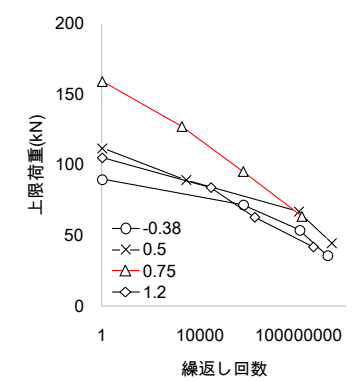


(c) $lc/a < 0.8$

図-8 応力伝達領域に関する概念図



(a) $a/d=1.6$



(b) $a/d=2.9$

図-9 S-N 曲線

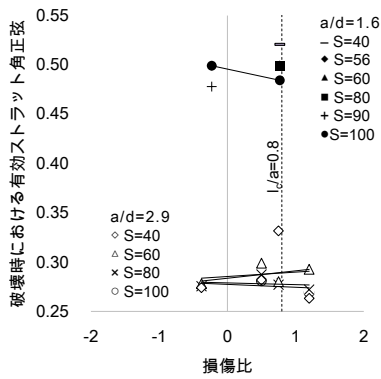


図-10 有効ストラット角正弦

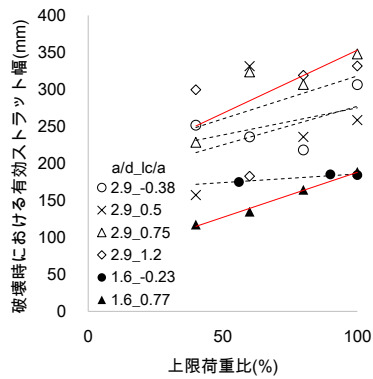


図-11 有効ストラット幅

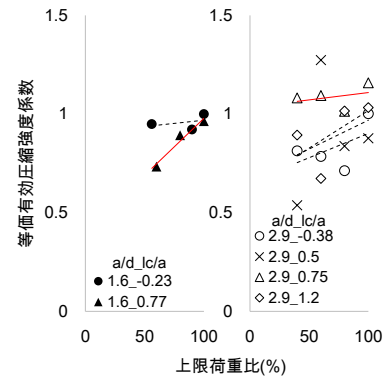


図-12 等価有効圧縮強度係数

a/d の小さなはりほどストラット幅の減少量は小さいことが推察できる。実線で示した $lc/a=0.8$ 付近のはりでは、ストラット幅の減少率が他の損傷比を有するはりと比較して高いことが確認できる。ひび割れの存在による圧縮応力伝達領域の局所化によりストラット幅の減少率が高くなることで、5.1 に示した S-N 曲線の負勾配が増加する可能性がある。

5.4 等価有効圧縮強度係数

図-12 に算出された等価有効圧縮強度係数 u_s 及びその線形近似線を示す。 $lc/a=0.8$ 付近のはりのデータに対する線形近似線を実線で示した。いずれのケースも、概ね有効ストラット幅の影響を受けて、上限荷重比の低下に伴い u_s が減少傾向にあるのが確認できる。しかしながら、 $lc/a=0.75$ 、 $a/d=2.9$ のはりにおいて、 u_s は概ね一定の値を示した。 $lc/a=0.8$ 付近では、図-10 に示したように、正弦の値が上限荷重比の低下に伴い増加する傾向にあることから、有効ストラット幅が減少傾向を示しているにもかかわらず、正弦の2乗の積に比例する u_s が概ね一定の値を示したと考えられる。 $lc/a=0.77$ 、 $a/d=1.6$ の結果に着目すると、上限荷重比の低下に対して最も減少率が高いことが確認できる。従って、繰返し荷重作用下に供されたひび割れを有する RC はりにおいて、ストラットに対する損傷の蓄積を最も考慮すべきなのはせん断スパン比の小さいはりである可能性が示された。

算出された等価有効圧縮強度係数は、現行の設計指針に記される有効圧縮強度係数の最小値(約 0.4)を上回る値であった。本研究の対象範囲において、現行の設計指針に記される、最も安全側の状態を考慮して設計を行えば、繰返し荷重作用下に供される、ひび割れを有する RC はりにおけるストラットの安全性は確保されていると言える。しかしながら、個体差によるばらつきを考慮した結論を導くためには実験に基づく検証が不可欠である。

6. 結論

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

- (1) タイドアーチ的機構の発現に効果的な範囲にひび割れを有するはりでは、損傷蓄積領域が限定され、上限荷重比の低下に伴うストラット幅の減少が生じる。その結果、繰返し回数の増加に伴い、せん断疲労耐力が急激に減少する。
- (2) ストラットの有効圧縮強度係数は、上限荷重比の低下に伴い減少傾向を示す。その傾向は、せん断スパン比の小さなはりで顕著である。

参考文献

- 1) 前島拓, 子田康弘, 土屋智史, 岩城一郎: 塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol. 70, No.2, pp.208-225, 2014, 6
- 2) 上田多門, 岡村甫: 疲労荷重下のスターラップの挙動, コンクリート工学, Vol.19, No.5, pp.101-116, 1981
- 3) Y. Yamada, N. Chijiwa, M. Iwanami: Shear fatigue mechanism of reinforced concrete beams with cracks due to rebar corrosion, Proceedings of the Fourth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Tokyo, Japan, 2014, 11
- 4) ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2008, 2
- 5) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 372 号, V-5, pp.167-176, 1986
- 6) K. Maekawa, A. Pimanmas, H. Okamura: Nonlinear mechanics of reinforced concrete, Spon, London, 2003
- 7) 藤山知加子, 商峰, 櫻井信彰, 前川宏一: 直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.106-116, 2010, 3
- 8) 山田一字, 青柳征夫: ひび割れ面におけるせん断伝達, 第 2 回 RC 構造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.19-28, 1983, 9