

[65] 各種鉄筋継手の集中度がRC梁の疲労特性に及ぼす影響について

正会員 ○出 雲 淳 一 (東京大学大学院)
 正会員 榎 本 松 司 (東京大学工学部)
 正会員 岡 村 甫 (東京大学工学部)
 正会員 池 田 尚 治 (横浜国立大学工学部)

1. はじめに

鉄筋継手を有する部材が高サイクル繰返し荷重を受ける場合、継手を同一断面に集中させると、継手部で鉄筋が徐々にぬけ出し軸方向剛性が低下したり、継手の耐力がそのまま部材の耐力を決定すると考えられているが、一方において、継手を分散して配置する場合に比べて継手部への応力集中が避けられ、疲労に対して有利であるとも考えられる。著者の知る限りにおいて、高サイクル繰返し荷重を受ける場合の継手の集中度が部材に及ぼす力学的性状についての報告はほとんどみられないように思われる。¹⁾

本研究は、ねじふし鉄筋継手、圧着継手、および重ね継手を用いて実験を行ない、上述の事柄について検討を行なったものである。

2. 実験方法

1) 供試体の作製 供試体は、図-1に示すように幅30cm、高さ30cm、長さ210cmおよび270cm(以下A-供試体およびB-供試体という)の矩形ばりである。主鉄筋は直径19mmの鉄筋4本とした。主鉄筋の2本あるいは4本にねじふし鉄筋継手、圧着継手および重ね継手を用い、継手の集中度を2/4および4/4とした供試体、および継手を全く有しない供試体の計7種類をA、B-供試体について各2本ずつ、合計28本の供試体を作製した。また、直径10mmのスターラップをA-供試体の場合には6cm間隔、B-供試体の場合には10cm間隔にせん断区間のみに配置してせん断破壊を防いだ。継手を有しない供試体およびねじ

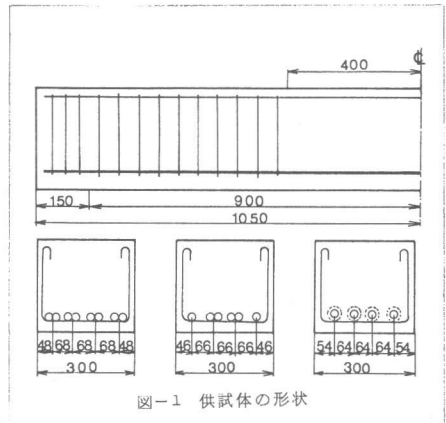


図-1 供試体の形状

ふし鉄筋継手に用いた鉄筋はSD35のねじふし鉄筋継手で、降伏点 38.7 Kgf/mm^2 、引張強度 58.9 Kgf/mm^2 であった。圧着継手および重ね継手に用いた鉄筋はSD35の斜めふしの異形鉄筋で、降伏点 38.3 Kgf/mm^2 、引張強度 57.2 Kgf/mm^2 であった。ねじふし鉄筋継手の継手部の固定には、カプラーの両側に配置されたロックナットにトルクを与えて継手部に軸力を導入して固定するトルク固定方式を用い、圧着継手には、締付け圧着加工による工法を用い、圧着回数は10回とした。重ね継手の場合、重ね合せ長さは土木学会コンクリート標準示方書20条に準じて60cmとした。継手はスパン中央に継手の中心がくるように配置し、実験を簡略にするために継手部に横方向の補強を行なわなかった。スパン中央およびスパン中央から30cmの位置の母材鉄筋および継手部の表面にははずみゲージを貼りつけ、またその位置に曲げひびわれが生じるように切欠きを設けた。

使用したコンクリートは、最大骨材寸法20mm、スランプ8cm、目標圧縮強度 240 Kgf/cm^2 のレデーミクストコンクリートであり、7種類の供試体を7本ずつ、計4回に分けてコンクリートの打設を行なった。疲労試験時の圧縮強度は $272 \sim 367 \text{ Kgf/cm}^2$ の範囲であって、平均値 317 Kgf/cm^2 であった。

2) 試験方法 疲労試験は曲げスパンを80cm、せん断スパンを50cm(A-供試体)およびせん断スパンを80cm(B-供試体)として2点載荷で行なった。下限荷重は、鉄筋応力度 4 Kgf/mm^2 に相当する荷重に一定とし、上限荷重には鉄筋応力度 28 Kgf/mm^2 、 26 Kgf/mm^2 、および 24 Kgf/mm^2 となる3段階の荷重を選んで疲労試験を行な

った。200万回の繰返し载荷によっても破壊しない場合には、上限荷重を上げて疲労試験を続行し、すべての供試体を疲労破壊させた。疲労試験開始前、および载荷回数がそれぞれ、1, 10, 10², 10³, 10⁴, 10⁵, 3 × 10⁵, 10⁶, 2 × 10⁶に達した時に試験機の運転を停止し、上限荷重まで静的に载荷して鉄筋のひずみおよび継手部のひずみ、ひびわれ幅の測定を行なった。ひずみの測定にはデジタルひずみ測定器を用い、ひびわれ幅は供試体側面で鉄筋の重心の位置にあらかじめ6 cm間隔に貼りつけたコンタクトボール間の長さの変化をコンタクトゲージを用いて測定した。

3. 実験結果およびその考察

1)ひびわれ性状 図-2は、繰返し载荷に伴う継手部の最大ひびわれ幅の増加の傾向を示したものである。継手を有しない供試体の最大ひびわれ幅は、0.14~0.20 mmであった。継手部の最大ひびわれ幅は、ねじふし鉄筋継手の場合、継手の集中度が2/4および4/4のときそれぞれ、0.16~0.23 mm, 0.14~0.17 mm, 圧着継手の場合、継手の集中度が2/4および4/4のときそれぞれ、0.16~0.20 mm, 0.17~0.20 mmであり、重ね継手の場合、継手の集中度が2/4および4/4のときそれぞれ、0.16~0.20 mm, 0.23~0.29 mmであった。重ね継手の場合以外は、継手部に生じる最大ひびわれ幅は継手を有しない場合の最大ひびわれ幅と大差ないと考えられ、繰返し载荷に伴う増加もごくわずかである。しかし、重ね継手の場合、特に集中度が4/4の場合には、継手を有しない場合よりも最大ひびわれ幅は33~76%程度大きく、繰返し载荷に伴ってひびわれ幅も急激に増加する傾向がみられた。

2)疲労強度 表-1は、鉄筋のひずみの測定を行なった2つの断面(スパン中央断面およびスパン中央より30 cm離れた断面)でのひずみの値から求めた鉄筋の応力振幅の実測値を示したものである。ねじふし鉄筋継手の場合には、2/4継手としても継手部への応力集中の傾向はほとんどみられない。しかし、圧着継手および重ね継手の場合には、2/4継手とするとそれぞれ3~13%および28~30%程度継手部に応力が集中していたことになり、継手部の軸方向剛性が隣接の連続鉄筋よりも高いことによる影響が明瞭に認められる。

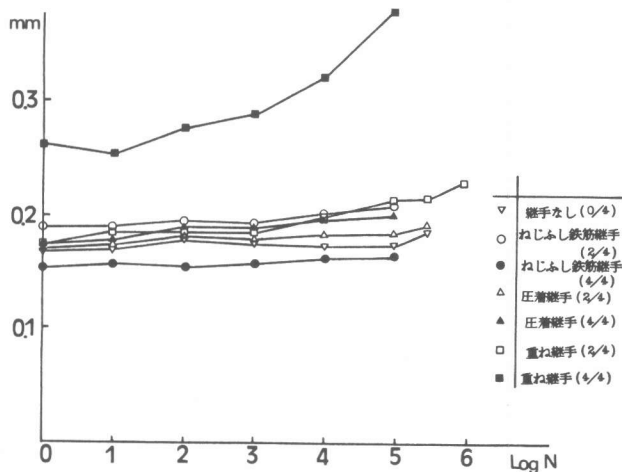


図-2 継手部の最大ひびわれ幅

表-1 鉄筋の応力振幅の測定値

継手の種類	継手の集中度	鉄筋の応力振幅 ¹⁾					
		$\sigma_r=24\text{kg/mm}^2$		$\sigma_r=22\text{kg/mm}^2$		$\sigma_r=20\text{kg/mm}^2$	
		a断面 ²⁾	b断面 ³⁾	a断面	b断面	a断面	b断面
継手なし	0/4	23.7	23.9	20.3	21.4	18.4	18.4
ねじふし鉄筋継手	2/4	21.9	21.7	21.5	19.4	16.9	17.4
	4/4	22.2		21.4		18.0	
圧着継手	2/4	23.3	21.4	21.2	18.4	16.2	15.7
	4/4	24.0		20.7		16.8	
重ね継手	2/4	23.9	17.1	20.3	14.3	16.9	12.1
	4/4	24.0		22.5		18.8	

(1) 実測した否からヤング係数を $2.1 \times 10^6 \text{ kg/mm}^2$ として求めた値

(2) スパン中央より30 cm離れた断面

(3) スパン中央断面

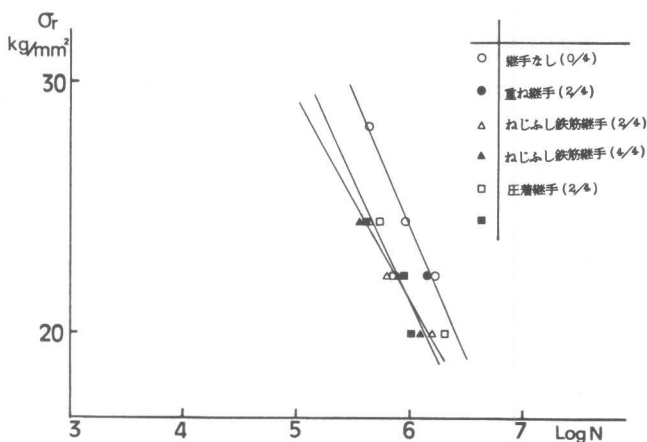


図-3 s-N 曲線

表-2は、疲労試験結果を示したものであり、鉄筋および継手に作用する計算応力振幅、破壊に至るまでの繰返し載荷回数および各供試体における200万回疲労強度振幅 f_{sr} も示してある。200万回疲労強度振幅 f_{sr} の算出に当っては、Minerの法則を参考にし、以下の仮定を設けた。

$$Nf_2 = Nf_1 (f_2/f_1)^{1/a} \text{-----}(1)$$

$$f_{sr} = f_2 (2 \times 10^6 / \Sigma Nf_2)^a \text{-----}(2)$$

ここに、 f_{sr} は200万回疲労強度振幅($K\sigma/\text{mm}^2$)、 f_1 および f_2 はそれぞれある応力振幅($K\sigma/\text{mm}^2$)、 Nf_1 は f_1 のもとの載荷回数、 Nf_2 は f_2 のもとの Nf_1 に対応する f_2 のもとの等価載荷回数、 ΣNf_2 は f_2 のもとの破壊までの等価載荷回数、 a はS-N曲線より求められる実験定数である。

図-3は、疲労試験の結果より求めたS-N曲線を示したものである。ねじふし鉄筋継手および圧着継手の場合、継手の集中度に関わらずほぼ同じような疲労特性がみられ、また重ね継手の場合、母材鉄筋が疲労破断したNO.22は継手を有しない供試体とほぼ同じような疲労特性を示していることが認められる。

継手を有しない供試体の場合には、すべて最終的には鉄筋が疲労破断したために破断した。母材鉄筋の200万回疲労強度振幅は平均21.9 $K\sigma/\text{mm}^2$ であった。

ねじふし鉄筋継手の場合には、NO.10

を除いてすべてカブラー中央部のねじ加工のために断面が減少した箇所が疲労破断して破断した。NO.10はカブラーの根元で鉄筋が疲労破断したために破断した。継手の集中度が2/4および4/4のときの200万回疲労強度振幅は、それぞれ平均19.3 $K\sigma/\text{mm}^2$ および19.5 $K\sigma/\text{mm}^2$ であり、母材鉄筋の200万回疲労強度振幅に対してそれぞれ88%および89%であった。ねじふし鉄筋継手の場合、カブラーの中央部で疲労破断するために継手部に応力が集中すると疲労に対して不利のように思われるが、実際には継手部への応力集中の傾向が小さかったために継手の集中度が4/4の場合であっても継手の集中度が2/4の場合とほぼ同じ程度の疲労強度になったものと思われる。

圧着継手の場合には、大部分がスリーブの根元で鉄筋が疲労破断して破断した。尚、NO.17はスリーブから鉄筋がぬけ出して破断し、NO.18はそれら両方の原因で破断した。継手の集中度が2/4および4/4のときの200万回疲労強度振幅は、それぞれ平均19.7 $K\sigma/\text{mm}^2$ および18.2 $K\sigma/\text{mm}^2$ であり、母材鉄筋の200万回

表-2 疲労試験結果

継手の種類	継手の集中度	供試体番号	繰返し回数1) $\times 10^4$	200万回疲労2) 強度振幅 $K\sigma/\text{mm}^2$	破壊の原因3)
継手なし	0/4	1	98.6(24)	21.1	鉄筋母材の破断 (1)
		2	168.2(22)	21.3	
		3	200(20)228(26)	24.0	
		4	43.6(28)	21.2	
ねじふし	2/4	5	44.7(24)	19.5	カブラーの破断 (2)
		6	64.5(22)	18.8	
		7	180.7(20)	19.7	
		8	148.3(20)	19.2	
鉄筋継手	4/4	9	37.8(24)	19.0	カブラーの破断 (2)
		10	78.6(22)	19.3	
		11	125.7(20)	18.7	
		12	200(20)110.5(26)	20.8	
圧着	2/4	13	56.8(24)	19.3	継手部で鉄筋破断 (2)
		14	68.4(22)	18.3	
		15	224.5(20)	20.4	
		16	200(20)113.2(26)	20.9	
継手	4/4	17	43.9(24)	18.4	スリーブからの鉄筋のぬけ出し (2) 鉄筋のぬけ出し (1) 継手部で鉄筋破断 (1) 継手部で鉄筋破断 (3)
		18	72.9(22)	18.5	
		19	82.4(20)	17.1	
		20	143.0(20)	18.9	
重ね継手	2/4	21	2.8(24)	20.9	継手部の破壊
		22	149.8(22)		鉄筋母材の破断 (1)
		23	200(20)111(24)		継手部の破壊
		24	2.8(26)		継手部の破壊
	4/4	25	5.9 $\times 10^3$ (24)		継手部の破壊
		26	17.6(22)		継手部の破壊
		27	2.8 $\times 10^2$ (20)		継手部の破壊
		28	108.6(20)		継手部の破壊

(1) ()内の数字は鉄筋の応力振幅 ($K\sigma/\text{mm}^2$)を示す

(2) 計算応力振幅と繰返し回数とから式(1)および式(2)を用いて計算した値である

(3) ()は破壊の本数を表わしている

労強度振幅に対して 90% および 83% であって、継手の集中度が 2/4 の場合の方が継手の集中度が 4/4 の場合に比べ、疲労強度はやや上回る傾向がみられる。これは、圧着継手の場合には継手部の応力集中の影響が少ないスリーブの根元で鉄筋の疲労破断が起こるために、継手の集中度が 2/4 であっても継手部の応力集中が部材の疲労強度に及ぼす影響は少なく、むしろ継手の集中度が 4/4 の場合の方が継手の集中度が 2/4 の場合に比べて継手の破壊確率が高いために疲労強度はやや低くなったものと思われる。

重ね継手の場合には、NO.22 を除いてコンクリートの割裂によって継手部が破壊した。尚、NO.22 は母材鉄筋が疲労破断して破壊し、この場合の 200 万回疲労強度振幅は 20.9 kg/cm^2 であり、母材鉄筋の 200 万回疲労強度振幅の 95% であった。重ね継手の場合、鉄筋の疲労破断によって破壊すると母材鉄筋の 200 万回疲労強度振幅の 95% 程度が期待できると思われるが、継手の集中度が高くなると、重ね合せ長さを土木学会標準示方書 20 条に定める長さにとっても鉄筋の疲労破断以前にコンクリートの割裂による継手部の破壊が起き疲労

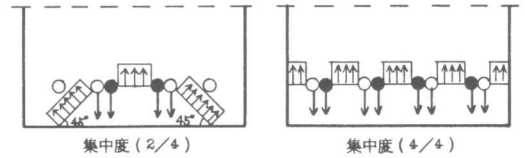


図-4 重ね継手の破壊パターン

強度は相当低下する傾向が認められる。重ね継手がコンクリートの割裂によって破壊した実験データを用いて、図-4 に示すような破壊形式を仮定することにより式(3)に示すような実験式を得た。

$$\frac{\sigma_{ct}^{\max}}{f_{ct}} = 1 - 0.080(1-R) \text{Log} N \text{ ----- (3)}$$

ここに、 σ_{ct}^{\max} は繰返し載荷時のコンクリートの最大引張応力度 (kg/cm^2)、 σ_{ct}^{\min} は繰返し載荷時のコンクリートの最小引張応力度 (kg/cm^2)、 $R = \sigma_{ct}^{\min} / \sigma_{ct}^{\max}$ ($0 \leq R \leq 1$)、 f_{ct} はコンクリートの引張強度 (kg/cm^2)、 N は繰返し回数である。式(3)に対する実験値の変動係数は 9.1% であり、応力振幅を途中で変化させた NO.23 の場合の式(3)に対する変動係数を Miner の法則を参考にして求めたところ 5.3% であった。重ね継手のコンクリートの割裂による破壊に対して式(3)は比較的合うように思われる。

4. むすび

今回行なった疲労試験結果より以下のことが推定された。

1)ねじふし鉄筋継手および圧着継手においては、母材鉄筋よりも継手部の軸方向剛性が高いために、一断面で一部の鉄筋を継手とすると継手に応力集中する傾向がある。しかし、ねじふし鉄筋継手の場合、継手の集中度が 2/4 であっても継手部への応力集中が小さく継手の集中度が 4/4 の場合と同程度の疲労強度が得られた。また圧着継手の場合、継手の集中度を 2/4 としても疲労破壊は応力の集中しない継手端部で生ずるために、疲労強度は継手の集中度が 4/4 の場合に比べてむしろ高くなる傾向にある。また、継手部の最大ひびわれ幅は、継手の集中度に関わらず継手を有しない場合の最大ひびわれ幅と大差なく、繰返し載荷に伴うひびわれ幅の増加もほとんど無視できる程度である。すなわち、疲労性状はこれらの継手において 4/4 と 2/4 とは大差ないが、むしろ継手を集中させない方が良く考えられるのである。

2)重ね継手においては、継手の集中度を 2/4 とすると継手に応力が集中する傾向があるが、継手の集中度が 4/4 となるとコンクリートの割裂による疲労破壊が生じやすくなり、継手の集中度が 2/4 であっても継手の集中度が 4/4 の場合に比べ疲労強度はかなり高くなる傾向がある。また、継手の集中度が高くなると継手部の最大ひびわれ幅は繰返し載荷に伴って増加する傾向が顕著である。すなわち、重ね継手を同一断面に集中させると疲労性状は著しく低下し、重ね継手を同一断面に集中させるのは好ましくないと考えられる。

本研究は、土木学会コンクリート委員会鉄筋継手工法小委員会からの委託により行なったものである。また、研究の実施にあたっては、古津彰三氏(住友金属)、山本孝一(神戸製鋼)、最上達雄氏(大成建設)ほか関係各位の御協力を得たことを付記し謝意を表する。

参考文献 1)岡村 甫, 松本進 「大径鉄筋の継手について」 土木学会第 27 回年次学術講演会講演概要集