

[73] 重ね継手の集中度がRC梁の疲労強度に及ぼす影響

正会員 ○榎 本 松 司 (東京大学工学部)

正会員 二 羽 淳一郎 (東京大学大学院)

正会員 岡 村 甫 (東京大学工学部)

1. はじめに

複数の重ね継手を有するRC梁が、高サイクル繰返し荷重を受ける場合に、継手を同一断面に集中させると、継手と連続鉄筋が混在していて、継手部分に応力が集中する場合よりも、かえって継手部分のコンクリートが割裂しやすく、疲労強度が低くなる傾向のあることが認められた¹⁾。これは、主筋を4本有するRC梁において、4本とも重ね継手とした $4/4$ 継手と、2本を重ね継手とした $2/4$ 継手についての実験より得られたものである。しかし、 $4/4$ 継手と $2/4$ 継手では、割裂時の破壊断面が異なり、静的強度自体が異なることが、その主要な理由とも考えられる。さらに、この実験では作用する最小と最大の応力の比 r は、0.2程度までであり、 r の大きい領域については行なわれていない。そこで、継手の集中度と r を変化させた実験を追加し、前回の実験結果を含めて、重ね継手の集中度がRC梁の疲労特性に及ぼす影響について詳細な検討を行なったのである。

2. 実験方法

1) 供試体 供試体は、断面が $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 、長さが 210 cm または 270 cm の矩形梁である。主鉄筋はD19 ($f_y = 38.3\text{ kg/mm}^2$)を使用し、本数は2本、4本および6本で、継手の集中度は、 $2/2$ 、 $2/4$ 、 $4/4$ 、 $2/6$ である。各継手を図-1に示した。継手の重ね合せ長さは、 $2/4$ 継手および $4/4$ 継手で 60 cm 、 $2/2$ 継手および $2/6$ 継手で 50 cm で、梁のスパン中央と継手の中心を一致させた。なお、継手部には、組立用としてD10のスターラップ2本が配

置されているが、そのほかに横方向補強はしていない。使用したコンクリートは、骨材最大寸法 20 mm 、スランブ 8 cm 、圧縮強度 $26.6 \sim 38.2\text{ kg/cm}^2$ のレデーミクストコンクリートである。

2) 試験方法 加力方法は、等モーメント区間が 80 cm で、せん断スパンが 50 cm または 80 cm の2点荷重とした。繰返し荷重の上、下限値は、主筋の上、下限応力の設定値より、コンクリートの引張応力を無視し、ヤング係数比 n を7として弾性計算により求めた。繰返し回数 N が、 1 、 10 、 10^2 、 10^3 、 10^4 、 10^5 、 3×10^5 、 10^6 、 2×10^6 に達したときに試験機を停止させ、静的に加力して、鉄筋ひずみおよびひびわれ幅を測定した。

3. 実験結果

1) ひびわれ性状 継手端部位置の供試体側面に発生する最大ひびわれの幅は、作用する上、下限応力の値や、継手の配置などに依存して変化すると考えられ、各継手間で単純に比較できるものではない。しかし、定性的な傾向を調べる目的で、図-2に、鉄筋に作用する応力振幅が約 2.2 kg/mm^2 の場合の各継手における最大ひびわれ幅の変化を示した。また図-3には、各継手ごとに、最大ひびわれ幅を平均し、1サイクルのときの最大ひ

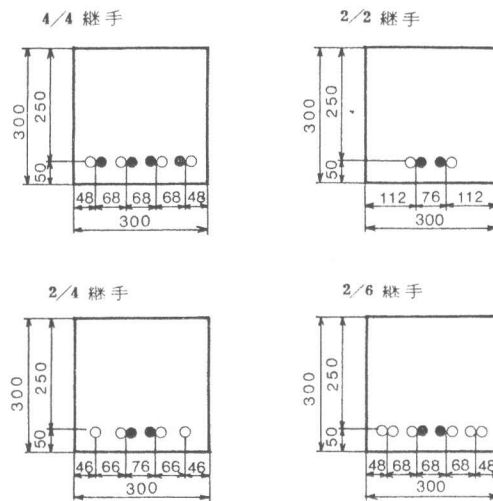


図-1 継手の配置

びわれ幅を1として、各サイクルのときの最大ひびわれ幅の大きさを示した。これらから認められるように、一断面に継手が集中している4/4継手や2/2継手の方が、断面内に継手以外に連続鉄筋を含む2/4継手や2/6継手よりも、最大ひびわれ幅が大きく増加していく傾向があった。

2) 継手部への応力集中度 図-4に、鉄筋に作用する応力振幅が約22 kg/mm²の場合の、実際に継手部に作用する応力振幅と平均応力振幅との比の変化を示した。継手部の応力振幅は、継手中央部で実測したひずみから、平均応力振幅は、継手端部で実測したひずみから、それぞれ鉄筋の弾性係数をかけて求めたものである。また図-5には、各継手ごとに、各サイクルでの応力集中度の平均を示した。これらによれば、2/4継手や2/6継手では、繰返しの初期には、継手部には1.3倍程度の応力集中が認められる。しかし、集中度は、繰返し載荷に伴って減少していく。とくに、図-4に示した2/6継手では、10⁴~10⁵回で継手部の応力振幅が平均応力振幅に対して急激に減少していった。これは、繰返し載荷によって鉄筋とコンクリートに相対変位が生じ、継手部の剛性が低下し、断面内の残りの連続鉄筋に応力が再分配されていったことを示すものである。一方、2/2継手や4/4継手では、継手部分の応力振幅は、継手端部よりも5%~10%程度小さく、むしろ緩和されている。断面内での継手の集中度が100%である場合には、継手部の鉄筋ひずみは、継手端部での鉄筋ひずみの半分程度である。したがって、継手部では継手端部よりも、コンクリートの引張に対する貢献が大きく、結果的に応力振幅が緩和されると考えられる。

3) 破壊性状 表-1に、試験結果として、各供試体の破壊までの繰返し載荷回数、鉄筋の上、下限作用応力、破壊モード等を示した。観察された破壊モードは、鉄筋母材の破断、継手部コンクリートの割裂、および鉄筋の降伏による曲げ破壊の3種類であった。4/4継手ではすべてコンクリートが割裂し、2/4継手と2/2継手では鉄筋の破断またはコンクリートの割裂、2/6継手では鉄筋の破断または降伏で破壊した。

4. 考 察

1) 継手部コンクリートの割裂 この場合の疲労強度を推定するためには、その基礎となる継手部の静的強度を知る必要がある。静的強度は、継手の配置、かぶり、

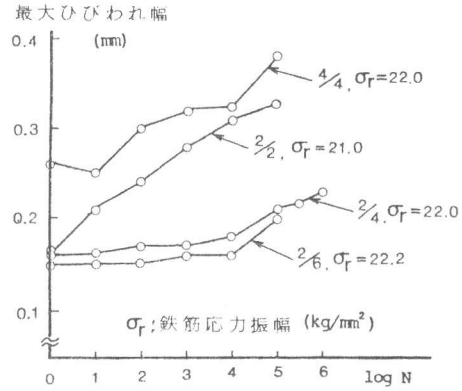


図-2 最大ひびわれ幅の変化

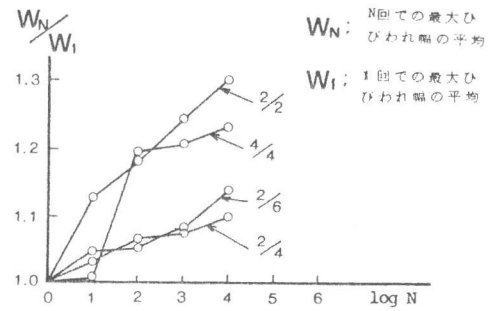


図-3 最大ひびわれ幅の平均値の変化

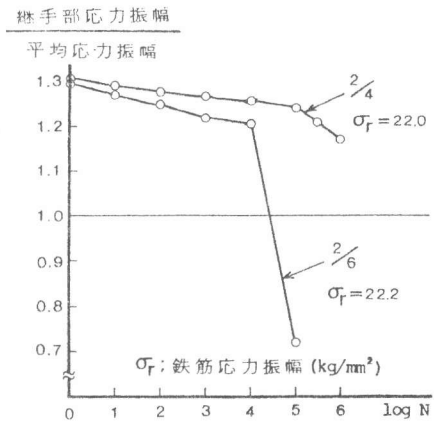


図-4 継手部への応力集中度の変化

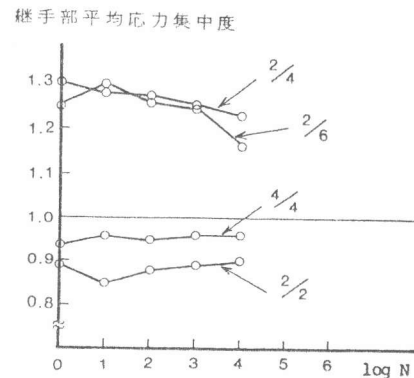


図-5 継手部平均応力集中度の変化

重ね合せ長さ、鉄筋径、コンクリート強度等に依存すると考えられるが、これについては Jirsa らの実験式²⁾、破壊断面の仮定に基づく方法¹⁾などがある。さらに本実験のように継手の集中度を変化させた場合には、応力の集中度にも影響されると思われる。一方、疲労強度に対する上、下限応力の比 r の影響に関しては、 $1-r$ の減少に伴って強度が増加するという実験式が多いが、今回のように r の大きい領域までを取扱う場合はむしろ $1-r^2$ とした方が良い傾向があった。コンクリートのせん断疲労についての最近の研究においても同様の考えが示されている。そこで、コンクリートのせん断疲労に関する強度式を参考³⁾にして、(1)式で実験結果を整理した。その際、継手の静的強度 f_{bos} は、 $f_{bos} = \alpha \sqrt{f_c}$ とし、各継手ごとに最適な α を求めてみた。

$$\log \frac{f_{bos}^{(1)}}{f_{bos}} = -0.036(1-r^2) \log N_f \quad \dots (1)$$

各記号の意味は、表-1中に示してある。なお、荷重を途中で変化させたものは、マイナーの法則を参考にして補正した。表-1に、各継手ごとの最適な α と、その α を用いた場合の疲労強度の実験値と計算値の比を示した。2/6継手は、実際には割裂しないのであるが、継手部における応力集中が逆転する現象を割裂と等価であると考へ、測定時に、初めて応力状態が逆転した際の繰返し数と、その一回前の測定時の繰返し数から α を求め、それを平均して2/2継手の α とした。表-2には、最適な α と、Jirsa らの式より求まる α_J 、および図-6の破壊断面を仮定し、断面内でコンクリート応力が一様であるとして、力の釣合から求めた α_K を示した。なお α_K を求める際のコンクリートの引張強度としては、 $f_t = 1.48 \sqrt{f_c}$ を用いた。 α_J は(2)式、 α_K は(3)式で計算される。

$$\alpha_J = 0.323 + 0.856 \frac{C_1}{\phi} + 14.045 \frac{\phi}{\ell} \quad \dots (2)$$

$$\alpha_K = 1.48 \sqrt{F_2} \quad \dots (3) \quad \text{但し} \quad F_1 = C_1 + 2 \cdot C_2, \quad F_2 = 4 \phi \quad \dots (4) \quad (2/2, 2/4, 2/6 \text{ 継手})$$

$$F_1 = 3 C_1 + 2 C_3, \quad F_2 = 8 \phi \quad \dots (5) \quad (4/4 \text{ 継手})$$

実験より求められた α は、2/4継手で1.83、4/4継手で1.55で、2/4継手の方が20%程度大きい。破壊断面の仮定に基づく α_K は、2/4継手と4/4継手で、それぞれ2.67と1.43となっていて80%以上の強度増加を予測しているが、実際にはそれほど大きくはなかった。この原因としては、2/4継手における、

表-1 重ね継手疲労試験結果

No.	継手	r	$\tau_{b,max}$	$\tau_{b,min}$	Nf (x10 ⁴)	破壊モード ⁽²⁾	f _c '	α	$\frac{f_{bos}^{(1)}}{f_{bos}}$
1	2/4	0.143	22.2	3.2	2.8	S	266	1.83	1.07
2		0.154	20.6	3.2	149.8	B(1)	367		0.97
3		0.167 ⁽¹⁾ (0.143)	19.0 (22.2)	3.2 (3.2)	200.0 (1.1)	S	313		0.99
4		0.091 (0.071)	17.4 (22.2)	1.6 (1.6)	10x10 ⁴ (2.8)	S	345		0.94
5		0.083	19.0	1.6	31.0	S	313		0.93
6		0.077	20.6	1.6	16.4	S	276		1.05
7	4/4	0.143	22.2	3.2	59x10 ⁴	S	266	1.55	1.02
8		0.154	20.6	3.2	17.6	S	367		1.07
9		0.167	19.0	3.2	280x10 ⁴	S	313		0.85
10		0.091	17.4	1.6	108.6	S	345		1.00
11		0.083	19.0	1.6	2.4	S	313		1.00
12		0.077	20.6	1.6	0.4	S	276		1.08
13	2/2	0.1	26.2	2.7	59.8	B(1)	382	2.40	0.90
14		0.3	28.5	8.6	140.6	B(1)	382		0.97
15		0.5	25.7	12.8	213.0	S	366		1.02
16		0.7	33.3 (0.1)	23.3 (32.1)	125.0 (16.1)	S	350		1.00
17		0.5	34.0	17.0	1.2	S	350		0.98
18	2/6	0.1	19.5	2.0	100x10 ⁴	B(3)	382	1.85	0.94 ⁽³⁾
19		0.3	25.7	7.7	61.6	B(1)	382		0.93
20		0.5	23.3 (0.5)	11.7 (29.1)	212.0 (14.5)	Y	346		1.02
21		0.7	29.0 (0.1)	20.3 (29.0)	185.0 (2.9)	Y	350		1.06
22		0.5	29.0	14.5	28.3	Y	350		1.04

(注1) ()内は荷重変更後の値、(注2) S:コンクリートの割裂、Y:鉄筋の降伏、B:鉄筋の破断、()内は破断した鉄筋本数、(注3) 2/6継手は応力集中遊転時を破断とした

記号
 $\tau_b = \frac{As \cdot \sigma_s}{r \cdot \phi \cdot \ell}$
 : 公称付着応力度 (kg/cm²)
 As: 鉄筋断面積 (cm²)
 σ_s : 鉄筋応力度 (kg/cm²)
 ϕ : 鉄筋径 (cm)

ℓ : 重ね合せ長さ (cm)
 $\tau_{b,max}$: 最大公称付着応力度
 $\tau_{b,min}$: 最小公称付着応力度
 $r = \frac{\tau_{b,min}}{\tau_{b,max}}$
 NE: 破断までの載荷回数

$f_{bos} = \alpha \sqrt{f_c}$
 : 静的な継手の付着強度
 $f_{bos}^{(1)}$: (1)式より求まる継手の最大疲労付着強度
 α : 静的強度係数

表-2 静的強度係数

継手	α	α_J	α_K
2/4	1.83	1.62	2.67
4/4	1.55	1.44	1.43
2/2	2.40	1.71	2.67
2/6	1.85	1.53	2.51

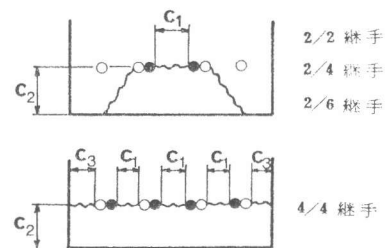


図-6 破壊断面パターン

継手部への応力集中が影響していることと、破壊断面の仮定においては断面内で、コンクリートの応力が一様であるとしているものの、実際の応力は局部的に集中して分布が不均一であることなどが考えられる。また2/2継手で α は2.41, 2/6継手で α は1.85であり, 2/4継手および2/6継手は2/2継手よりも30%程度小さい値となっている。この値は継手部での応力集中の程度(図-5)とほぼ同じであることから考えてその影響と思われる。Jirsaらの実験式, および破壊断面の仮定に基づいて求めた α_j, α_k は, 4/4継手を除いて, α を精度良く推定しているとは言えない。一般に, α_j は α より小さい傾向があり, また α_k については, 仮定と実際の状態が比較的近いと思われる4/4継手以外は, いずれもかなり α を上回る傾向がある。図-7に, 2/4継手と4/4継手

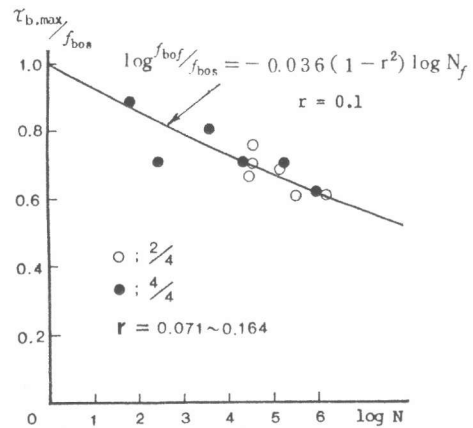


図-7 割裂強度の S-N 曲線

について, $\tau_{b,max}/f_{bos}$ を $\log N_f$ に対して示した。図中の曲線は $r = 0.1$ とした(1)式である。この図からみて, 最適の静的強度を用いれば, (1)式を用いてコンクリートの割裂疲労強度はかなり精度良く推定されるようである。

2) 鉄筋母材の破断および降伏 使用した鉄筋の200万回疲労振幅強度は, $21.9 \text{ kg}/\text{mm}^2$ である。また, S-N曲線は, $\log \sigma_r = 2.49 - 0.18 \log N_f$ で表わされる。¹⁾ 鉄筋の疲労破断で破壊した場合の200万回疲労振幅強度を求めると, 2/2継手および2/4継手では, $19.7 \sim 20.9 \text{ kg}/\text{mm}^2$ で, 母材の90~95%であった。しかし, 2/6継手では, 平均応力で計算すると $15.3 \sim 16.9 \text{ kg}/\text{mm}^2$ で70~77%にすぎなかった。しかし, 2/6継手では, 継手部が局部的に破壊し, 継手部から連続鉄筋へと応力が再分配されていくのであるから, 実際には, より大きい値となっていると考えられる。2/6継手では, 継手部が局部破壊した後, 連続鉄筋に再分配された応力により, 連続鉄筋が破断するか, 降伏するかして破壊したのである。

5. むすび

今回行った疲労試験結果より以下のことが推定された。

- 1) 重ね継手を同一断面に集中させると, 継手端部の最大ひびわれ幅が大きく増加していく。しかし, 継手と連続鉄筋が混在し, 同一断面での継手の集中度が小さくなると, その傾向は減少する。
- 2) 重ね継手と連続鉄筋が混在する場合, 継手部分には明らかに応力が集中する。その集中度は, 繰返し載荷に伴って減少していくものの, その減少率は小さく, 継手部が割裂破壊する場合には, 破壊の直前まで保持されていると思われる。しかし, 連続鉄筋の割合が多い場合には, 継手部分が局部的に破壊しても, 継手部分から連続鉄筋への応力の再分配が起こり, 梁全体としての破壊には至らない。継手の集中度的に言えば, 本実験から推定する限り2/6継手, つまり, 継手を断面内で1/3程度以下にしておけば, 継手の割裂による疲労破壊は防止できるものと思われる。
- 3) 継手が割裂により破壊する場合, 継手の静的強度を定量的に評価できれば, その疲労強度は, (1)式によって比較的正確に推定できる。

参考文献

- 1) 出雲淳一・榎本松司・岡村甫・池田尚治: 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, 第3回コンクリート工学年次講演会論文集, 1981
- 2) C. O. Oranong, J. O. Jirsa & J. E. Breen: A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, ACI Journal, 1977. 3
- 3) T. Ueda: Behavior in Shear of Reinforced Concrete Beams under Fatigue Loading, 東京大学学位論文, 1982