

論文 溶接鉄筋の橋梁床版への適用に関する研究

平城弘一*1・松井繁之*2

要旨: 近年、道路橋床版の配筋作業が熟練工の不足のため危惧されている。そこで、本研究では、床版に溶接鉄筋（鉄筋網あるいは鉄筋格子）を使用することを提案し、設計上問題となる疲労強度を明確にするため、一連の疲労試験を実施した。その結果、実床版内の鉄筋に発生する応力変動範囲に比べて、溶接鉄筋の疲労強度は十分に高いことが明らかにされた。これらの試験結果から、溶接鉄筋が実橋梁床版に適用可能であると考えられる。

キーワード: 溶接鉄筋、鉄筋網、道路橋床版、疲労強度、トラス筋

1. はじめに

近年、現場床版工事の省力化はもちろん、プレキャスト床版の工場製作時も省力化が求められている。その1つとして、溶接鉄筋を橋梁床版に適用することは検討に値する。しかし、わが国のこれまでの道路橋示方書では、疲労強度が明確にされていないため、溶接鉄筋の適用は認められていなかった。一方、外国の設計規準である BS5400、DIN および AASHTO では、この方面の試験データ、特に長期の荷重履歴を受けたデータが少ないとしながらも、イギリスでは溶接鉄筋の疲労破壊の適切な確率評価、またドイツでは特別の認証を行い、厳しい条件下で溶接鉄筋の使用を認めている。

表-1で BS5400[1]と DIN[2]の溶接鉄筋網における疲労強度を比較した。この表より明らかなように、溶接鉄筋は慎重に取り扱われていて、その疲労強度は、かなり安全側に評価されていることが分かる。これは溶接鉄筋の疲労強度に関するデータが少ないからであろう。代表的な研究として、主鉄筋にスターラップが仮付け溶接によって溶接されると、主筋の疲労強度は約 35%程度低下することを明らかにした Burton らの研究がある[3]。日本においても、溶接鉄筋網は橋梁構造以外の、疲労が問題とならないRC構造に、JIS G 3551「溶接金網」が制定されていることもあり、積極的に採用されつつある。最近、建設省土木研究所は「スポット溶接した鉄筋の疲労試験」と題する研究報告を発表し、その疲労強度は設計値{コンクリート標準示方書(土木学会)}の 50% を下回ることがないことを明らかにしている[4]。

筆者らも、溶接鉄筋の疲労強度を明らかにするため、異形鉄筋自身と軸十字溶接鉄筋に関する引張疲労試験、溶接部の疲労強度を知るための小形はりを用いた曲げ疲労試験および実床版構造

表-1 溶接鉄筋(鉄筋網)の疲労強度に関する設計規準の比較

BS 5400, Part 4	DIN 488 (BS1500M)
<p>【鉄筋網の溶接接点に対する疲労強度】 $N \cdot \sigma_r^m = K_0 \cdot \Delta^d$ ここで、N: 破壊に至るまでの繰返し回数、 σ_r: 応力範囲 (N/mm²)、 m: $\log \sigma_r - \log N$ 曲線 (中央) の傾きの逆数 {=3.0: 軸十字溶接鉄筋(D75)}、 K_0: 平均値に対する統計的定数 {=3.99x10⁻²: 軸十字溶接鉄筋(D75)}、 Δ: $\log N$ の標準偏差の真数の逆数 {=0.617: 軸十字溶接鉄筋(D75)}、 d: 平均値以下の標準偏差に対する倍数 {破壊確率(p)=50%→d=0; p=2.3%→d=2.0}。 繰返し回数 N=200x10⁴での疲労強度: ∴ $\sigma_r = 125.9 \text{ N/mm}^2$ (p=50%); $\sigma_r = 91.2 \text{ N/mm}^2$ (p=2.3%)</p>	<p>【鉄筋網の溶接接点に対する疲労強度】 破壊確率(p) 50% における時間強度: $\sigma_r = 110 \text{ N/mm}^2$ (N=200x10⁴)、 $\sigma_r = 160 \text{ N/mm}^2$ (N=100x10⁴)、 $\sigma_r = 340 \text{ N/mm}^2$ (N=10x10⁴)。 溶接鉄筋網の疲労強度: N=200x10⁴において、 $\sigma_r = 100 \text{ N/mm}^2$ (10%の危険率)。 N=20x10⁴において、 $\sigma_r = 200 \text{ N/mm}^2$ (10%の危険率)。 特に認証された溶接鉄筋網の場合: $\sigma_r = 80 \text{ N/mm}^2$</p>

*1 摂南大学助教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*2 大阪大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

をモデル化したはりの曲げ疲労試験を実施した。

ここに、それらの結果を報告し、溶接金網の橋梁床版への適用性を示唆するものである。

2. 試験体の種類と試験方法

試験体の種類は、次に示す3種類である。その内容とコンクリートの強度特性を表-2~4に示す。

1) シリーズI：異形鉄筋単体および軸十字溶接鉄筋の引張疲労試験。異形鉄筋径および溶接方法{(アーク・シールドアーク・抵抗)溶接}、溶接条件{(通常・弱)溶接・横方向筋除去}、溶接箇所(節・面・リブの6種類の組合せ)を変化させた。

2) シリーズII：小形はり曲げ疲労試験。コンクリート内にある1本の溶接鉄筋の疲労強度を正確に知るため。

3) シリーズIII：床版の一部を取り出したはりモデルによる曲げ疲労試験。

ここで、溶接条件の「通常」とは一般的な溶接条件で抵抗溶接されたもの、「除去」とは通常の溶接条件で溶接した横方向筋をせん断力を作用させて取り除いたものであり、形状は母材と同じで、熱影響が残留しているもの、「弱」とは溶接鉄筋網の溶接点が運搬途中に破断しない程度のもの(鉄筋交点のせん断強度を通常のものに比べて1/3に落としたもの)である。

各シリーズの試験体の形状・寸法を図-1~3に示す。表-4に示したシリーズIIIの試験体では、上下の溶接金網の間にスターラップの代わりに鉄筋で造ったトラス筋を挿入した。平面トラスは上下の弦材がそれぞれ1本で、斜材が1面のものである。立体トラスは上弦材が1本で、下弦材が2本とし、斜材も2面としたものである。

試験は、シリーズIでは±100kN油圧サーボ形疲労試験機を用いて行い、下限荷重を10.0kNとした。シリーズIIでは同じ試験機を用い、下限荷重を5kNとした。またシリーズIIIでは別の±300kN油圧サーボ形疲労試験機を用いて、下限荷重を5kNに保持し、上限荷重を種々変化させて実施した。また、シリーズIIIのB・Cタイプは多段繰返し

表-2 試験体Iの種類

シリーズI (異形鉄筋自身および軸十字溶接鉄筋の引張疲労試験)										
タイプ	鋼種	直径(mm)	試験体	溶接条件	溶接箇所 ¹⁾					
A	SD295A	D13	母材	—	—					
	SD345	D16								
B	SD295A	D13+D13	溶接鉄筋	通常 ²⁾	考慮していない					
	SD345	D16+D16								
C	SD345	D16+D16	溶接鉄筋	通常	節-節	節-面	面-節	面-リブ	面-面	リブ-リブ
				除去 ³⁾	—	節-面	面-節	—	面-面	—
				弱 ⁴⁾	—	節-面	面-節	—	面-面	—

- 1) 溶接箇所：(軸方向引張鉄筋) — (横方向鉄筋) を指す(図-1を参照)、
 2) 通常：溶接鉄筋交点のせん断強度が150 N/mm²程度の溶接強度をもつもの、
 3) 除去：通常溶接後に横方向筋を除去したもの、
 4) 弱：溶接鉄筋交点のせん断強度が50 N/mm²程度の溶接強度をもつもの。

表-3 試験体IIの種類とコンクリートの強度特性

シリーズII (軸十字溶接鉄筋を用いた小形はりの曲げ疲労試験)								
タイプ	鋼種	直径(mm)	試験体	溶接条件	溶接箇所 ¹⁾			コンクリートの強度特性
A	SD345	D16 +D16	溶接鉄筋	通常	節-面	面-節	面-面	$f_c' = 3005 \text{ N/cm}^2$
				除去 ³⁾	節-面	面-節	面-面	$E_c = 23.42 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$
				弱 ⁴⁾	節-面	面-節	面-面	N/cm^2

- 1) 溶接箇所：(軸方向引張鉄筋) — (横方向鉄筋) を指す(図-1を参照)、
 2) 通常：溶接鉄筋交点のせん断強度が150 N/mm²程度の溶接強度をもつもの
 3) 除去：通常溶接後に横方向筋を除去したもの、
 4) 弱：溶接鉄筋交点のせん断強度が50 N/mm²程度の溶接強度をもつもの。

表-4 試験体IIIの種類とコンクリートの強度特性

シリーズIII (床版の一部をモデル化したはりの曲げ疲労試験)					
タイプ	試験体名	トラス筋	溶接条件	試験条件	コンクリートの強度特性
A	III-A-1	立体トラス	通常	1段繰返し荷重 (一定応力試験)	$f_c' = 3830 \text{ N/cm}^2$ $E_c = 38.17 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$
	III-A-2		弱		
	III-A-3		グリップ ¹⁾		
B	III-B	立体トラス	通常	多段繰返し荷重 (変動応力試験)	$f_c' = 4370 \text{ N/cm}^2$
C	III-C	平面トラス	通常		$E_c = 35.55 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$

- 1) グリップ：溶接をしないで鉄筋交点を定着させるための高強度鋼線製の金具。

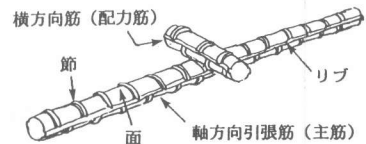


図-1 引張試験体の形状(シリーズI)

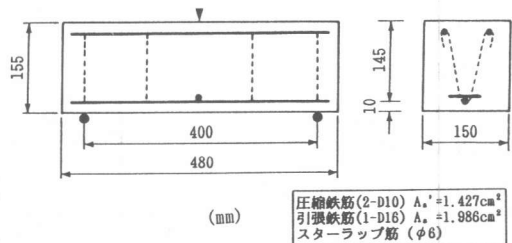


図-2 小形はり試験体の形状寸法(シリーズII)

圧縮鉄筋(2-D10) $A_s = 1.427 \text{ cm}^2$
 引張鉄筋(1-D16) $A_s = 1.986 \text{ cm}^2$
 スターラップ筋(φ6)

載荷で疲労試験を実施した。荷重設定のステップ1は、床版での設計荷重下において発生する主鉄筋応力と同等の応力をモデルで発生させる荷重である。ステップ2は主筋（引張側）の許容応力度のひずみ変化範囲($\Delta \epsilon$) $\approx 700 \mu$ になるような荷重、ステップ3は同じく $\approx 1000 \mu$ になるような荷重である。これら多段繰返し荷重作用下の疲労試験は、鉄筋の疲労に関してマイナー則の適用性を検討するためのものである。

3. 試験結果と考察

3.1 引張疲労試験

(シ-ス'1)

(1) 溶接方法の影響

図-4は、D16mmの異形鉄筋単体と、溶接方法を変化させて軸十字に横方向鉄筋を溶接した異形鉄筋の疲労強度を比較したS-N図である。溶接鉄筋の疲労破断の部位はすべて溶接部であった。さて、異形鉄筋自身の疲労試験結果に比べて、3種の溶接鉄筋（抵抗・アーク・シールドアーク溶接）ともS-N関係の傾きがきつくなり、高サイクル領域において疲労強度が低下した。200万回の時間強度で比較すると、異形鉄筋母材の結果に対して、約20%~25%低下した。ただし、3種類の溶接方法の違いは明確でない。

(2) 鉄筋直径の影響

図-5は、溶接鉄筋の鉄筋直径の違いを比較したものである。直径D16mmの溶接鉄筋ではほとんどが溶接部で破壊したが、直径D13mmのものでは疲労破壊は溶接部と溶接部から離れた軸部で観察された。この図より明らかなように、軸部の疲労破壊を示した直径D13mmのデータ（■印）は、母材の試験データ（●、▲印）とよく一致している。一方、溶接部の疲労破壊を示したもの（○、△印）は、S-N曲線の傾きがきつくなり、高サイクル領域での疲労強度が極端に低くなっていた。直径D13mm母材の疲労強度は、若干ではあるが、D16mmのものより高い値を示していた。これは材質の違いと考えられる。材質の違いは溶接には影響はないものと考えられる。

(3) 溶接箇所および溶接条件の影響

続いて、溶接鉄筋の疲労強度に及ぼす溶接箇所および溶接条件の影響を明らかにするために

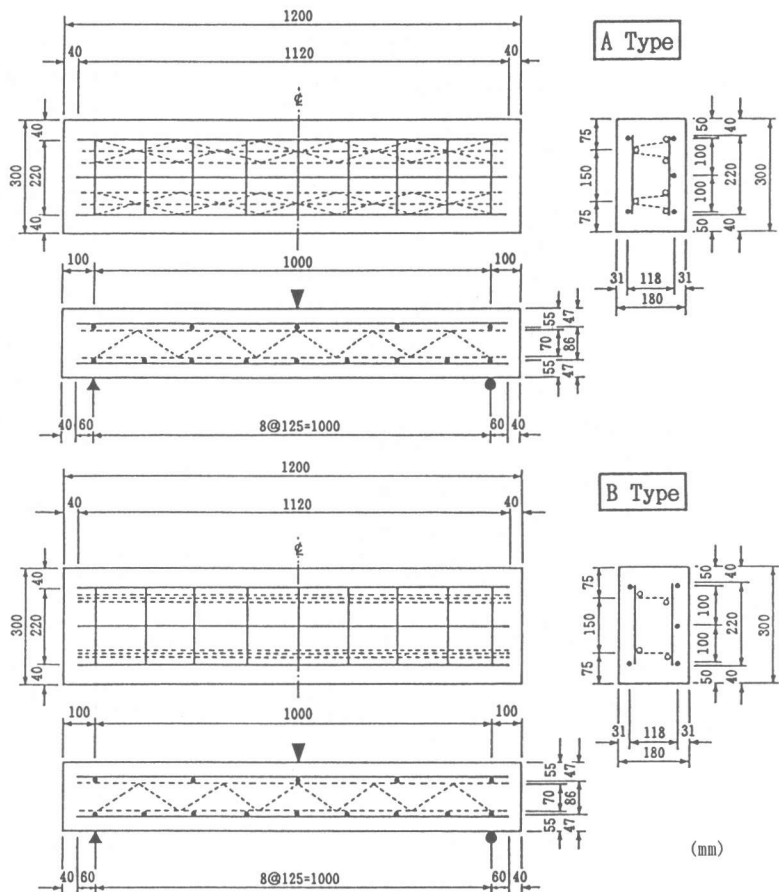


図-3 はり試験体の形状寸法(シ-ス'III、A・Bタイプ : Cタイプ)

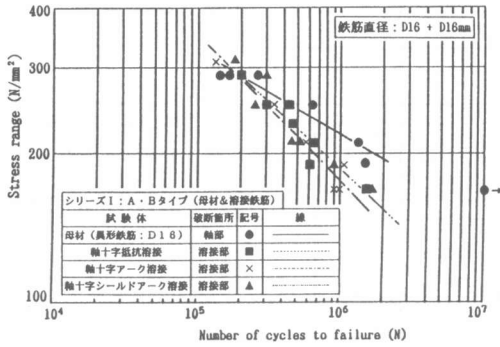


図-4 溶接方法の比較(シリーズ I、A・Bタイプ)

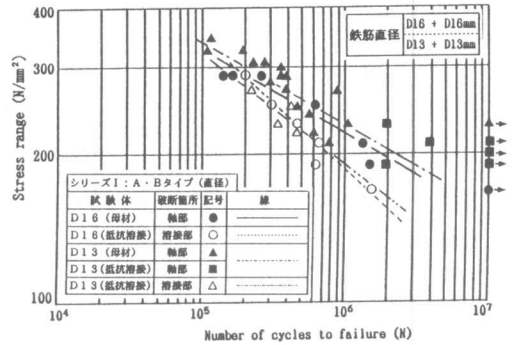


図-5 鉄筋直径の比較(シリーズ I、A・Bタイプ)

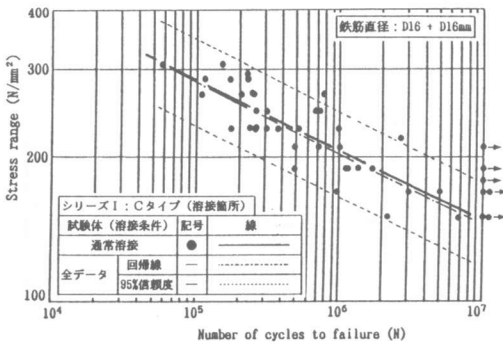


図-6 通常溶接のS-N関係(シリーズ I、Cタイプ)

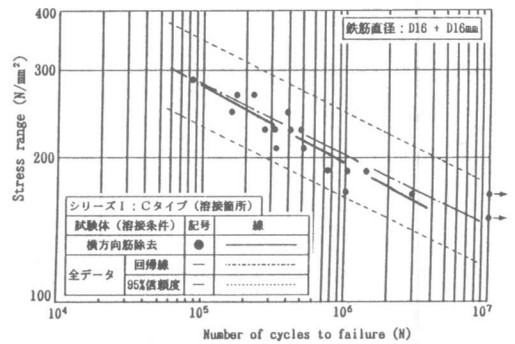


図-7 横方向筋除去のS-N関係(シリーズ I、Cタイプ)

ったCタイプの結果を考察する。

図-6～8は、シリーズ I、Cタイプのすべての疲労試験データから得たS-N線と、溶接条件(通常・除去・弱)ごとに分類した結果とを比較したものである。なお、このタイプでは鉄筋相互の溶接箇所も実験パラメータとして含めていたが、溶接箇所の違いは明確に出現しなかったため、その区分は省略した。これらの図中に示された実線から明らかなように、全試験データとの比較において、通常溶接と弱溶接の疲労強度の結果は高サイクル領域において若干高い傾向、逆に除去の疲労強度は高サイクル領域において若干低い傾向が見られる。また、弱溶接の試験データのバラツキは通常溶接のものより小さい。

3.2 小形はりの曲げ疲労試験(シリーズ II)

溶接条件が異なるごとに、軸十字溶接鉄筋の引張疲労試験であるシリーズ I、Cタイプの結果と小形はり試験結果(×印)とを比較したものを図-9～11に示す。これらの小形はり試験での疲労破壊の部位はすべて溶接部であった。これらの図より明らかなように、はり試験結果は少ないが、総じて、引張試験結果の中央値(回帰線)の上側に分布した。よって、コンクリート中の溶接鉄筋の疲労強度は、引張試験結果で安全側に評価できると言える。小形はり試験において引張側主鉄筋の応力範囲($\Delta\sigma$)が 180N/mm^2 で複数体の試験を実施したが、いずれの溶接条件に対し

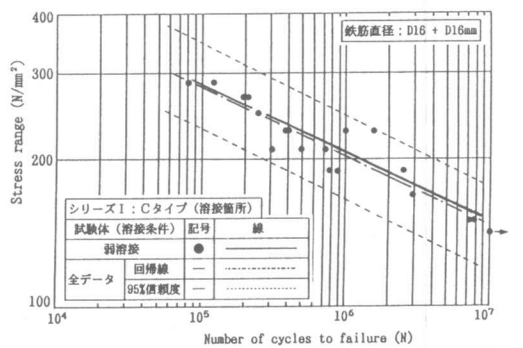


図-8 弱溶接のS-N関係(シリーズ I、Cタイプ)

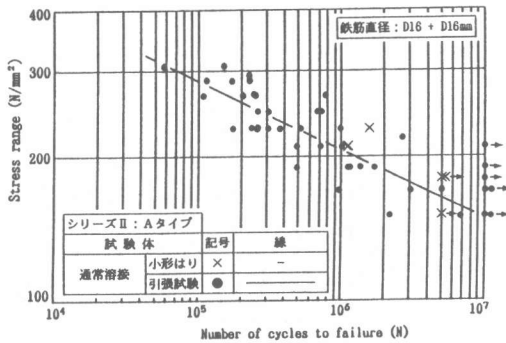


図-9 小形はり試験のS-N関係(シリーズ II, 通常)

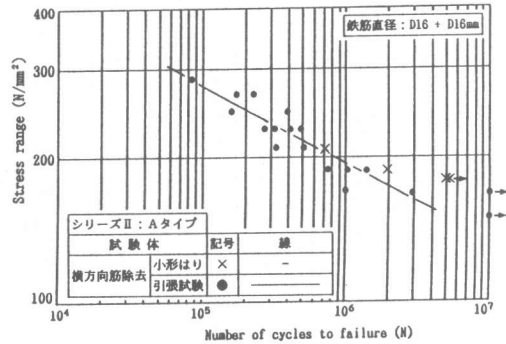


図-10 小形はり試験のS-N関係(シリーズ II, 除去)

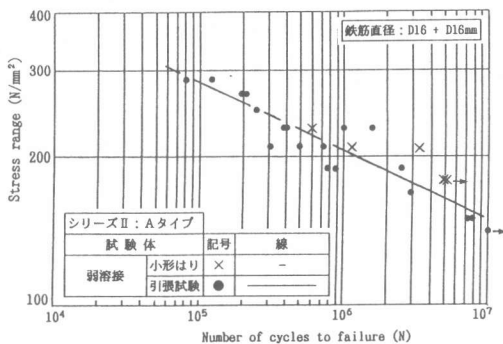


図-11 小形はり試験のS-N関係(シリーズ II, 弱)

ても、500万回の繰返し回数(N)では疲労破壊しないことを確認した。

3.3 橋梁床版の一部を取り出したはりモデルの曲げ疲労試験(シリーズ III)

表-5~6にシリーズIIIのAタイプとB・Cタイプの荷重設定・履歴と破壊回数をそれぞれ示す。これらの表より、主筋の実測ひずみ変動範囲が1200 μ の試験結果において、溶接条件が鉄筋の疲労強度に大きく影響を及ぼすことが分かった。溶接鉄筋における弱溶接の有用性が確認できた。

図-12にシリーズIII、Aタイプの試験結果を示す。はり試験結果は、いずれの溶接条件においても、同図に示されている軸十字溶接鉄筋の引張試験結果のバラツキの上限に位置していることが分かる。図-13は、抵抗溶接で軸十字に溶接された異形鉄筋の引張疲労試験結果を図示したものの上に、変動繰返し载荷のはり疲労試験結果をマイナー則を使って換算してプロットしたものである。この図より明らかなように、

表-5 荷重設定と破壊回数(シリーズ III, Aタイプ)

試験体	ケース	P_{min} (kN)	P_{max} (kN)	ΔP (kN)	$N(x10^4)$	破壊形状
III-A-1 (通常溶接)	A	5.0	105.0	100.0	45.0	主筋溶接部
	B	〃	97.5	92.5	620.0	破壊せず
	C	〃	42.8	37.8	200.0	破壊せず
	D-1	〃	64.7	59.7	200.0	破壊せず
III-A-2 (弱溶接)	D-2	〃	103.4	98.4	58.0	主筋溶接部
	A	〃	105.0	100.0	130.0	主筋溶接部
	B	〃	97.5	92.5	200.0	破壊せず
	C	〃	42.8	37.8	200.0	破壊せず
III-A-3 (かりっぱ)	D-1	〃	64.7	59.7	200.0	破壊せず
	D-2	〃	103.4	98.4	69.8	主筋溶接部
	A	〃	105.0	100.0	200.0	破壊せず
	B	〃	97.5	92.5	200.0	破壊せず
III-A-3 (かりっぱ)	C	〃	42.8	37.8	200.0	破壊せず
	D-1	〃	64.7	59.7	200.0	破壊せず
	D-2	〃	103.4	98.4	102.3	主筋溶接部
	A	〃	105.0	100.0	200.0	破壊せず

A : 主筋の実測ひずみ変動範囲が $\approx 1200\mu$ である荷重を設定、
 B : 主筋の実測ひずみ変動範囲が $\approx 800\mu$ である荷重を設定、
 C : 主筋の実測ひずみ変動範囲が $\approx 571\mu$ である荷重を設定、
 D-1 : 主筋の実測ひずみ変動範囲が $\approx 600\mu$ である荷重を設定、
 D-2 : 主筋の実測ひずみ変動範囲が $\approx 1100\mu$ である荷重を設定。

表-6 荷重履歴と破壊回数(シリーズ III, B・Cタイプ)

試験体	ステップ	P_{min} (kN)	P_{max} (kN)	ΔP (kN)	$N(x10^4)$	破壊形状
III-B-1	1 ¹⁾	5.0	49.0	44.0	100.0	破壊せず
	2 ²⁾	〃	84.0	79.0	200.0	破壊せず
	3 ³⁾	〃	102.0	97.0	40.9	主筋溶接部
III-B-2	2	〃	84.0	79.0	100.0	破壊せず
	3	〃	102.0	97.0	50.0	主筋溶接部
III-B-3	3	〃	102.0	97.0	300.0	主筋溶接部
III-C-1	1	〃	49.0	44.0	100.0	破壊せず
	2	〃	84.0	79.0	70.0	主筋溶接部
III-C-2	2	〃	84.0	79.0	100.0	破壊せず
	3	〃	102.0	97.0	10.0	主筋溶接部
III-C-3	3	〃	102.0	97.0	70.0	主筋溶接部

1)ステップ1: 設計荷重(主筋のみを考慮した計算上の算定値)、
 2)ステップ2: 主筋の実測ひずみ変動範囲が $\approx 700\mu$ である荷重、
 3)ステップ3: 主筋の実測ひずみ変動範囲が $\approx 1000\mu$ である荷重。

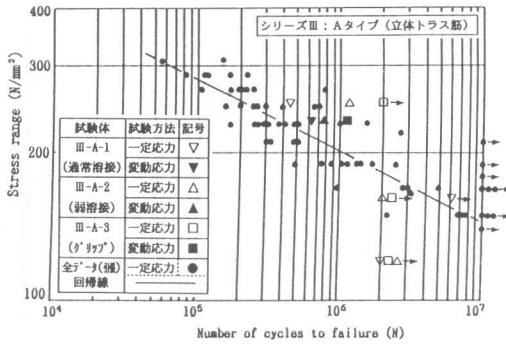


図-12 はり試験のS-N関係(シリーズⅢ、Aタイプ)

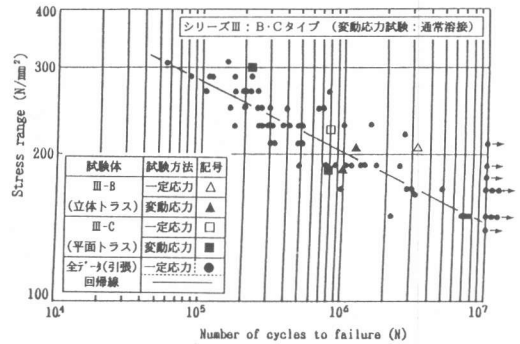


図-13 はり試験のS-N関係(シリーズⅢ、B・Cタイプ)

はり試験結果は引張疲労試験データの中央値を境として上側にプロットすることができ、引張試験データのバラツキの範囲内におさまっている。よって、この試験結果からもコンクリート内の溶接鉄筋の疲労強度は、引張試験結果で安全側に評価できると言える。また、コンクリートはりにおいてもマイナー則が適用できるものと考えられる。本シリーズのB・CタイプのS-N図から推定される 10^7 回時間強度は 150N/mm^2 であり、許容応力度法で設計する溶接鉄筋は疲労に対して十分安全であると言える。

4. 結論

今回の溶接鉄筋に関する一連の疲労試験結果から、次のようなことが明らかになった。

- 1) 引張疲労試験(シリーズⅠ)において、溶接鉄筋の疲労強度に及ぼす溶接方法の影響は確認できなかった。また、溶接箇所は溶接鉄筋の疲労強度に影響を与えないことも明らかになった。
- 2) 小形はり試験(シリーズⅡ)において、小形はり試験結果は、軸十字溶接鉄筋の引張試験結果の中央値の上側にあり、またそのバラツキの範囲内にあった。このことより、溶接鉄筋の疲労強度は引張試験結果で安全側の評価をしていると判断できる。小形はり試験結果から溶接鉄筋における弱溶接の有用性が確認できた。
- 3) はり試験(シリーズⅢ)において、B・Cタイプの試験結果から 10^7 回の時間強度を推定すると 150N/mm^2 となった。よって、実床版に溶接鉄筋を使用しても疲労強度に対して十分安全であることが確認できた。Aタイプの試験結果からも、溶接鉄筋における弱溶接の有用性が確認できた。また、変動繰返し载荷で行った結果をマイナー則を使用して、ある1つの段階の応力度に換算して等価繰返し数を求め、S-N関係図にプロットすると、単一段階で実験した結果とほぼ一致し、コンクリート内の異形鉄筋の疲労に関してマイナー則が成立すると言える。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、住倉鋼材㈱から協力を得たことを記し、謝意を表します。

参考文献

- [1] BSI:BS5400, Part 4, Code of Practice for Design of Concrete Bridges, 1978.
- [2] DIN 488: Betonstahl, Blatt 1 bis 6, Fassung April 1972.
- [3] ACI Committee 215: Considerations for Design of Concrete Structures, Subjected to Fatigue Loading, Journal of ACI, Vol. 71, No. 3, pp. 97-121, 1974.
- [4] 加藤俊二ほか: スポット溶接した鉄筋の疲労試験, 土木学会第49回年次学術講演会, V-539, pp. 1078-1079, 1994.