論文 高強度鉄筋の疲労亀裂進展挙動

田中 寿志*1·中村 光*2·国枝 稔*3

要旨:高強度鉄筋の疲労亀裂進展挙動について,疲労試験および疲労亀裂進展解析により検討した。疲労試 験では,ビーチマーク法(疲労試験の途中で上限応力を変えずに応力範囲を半分にし,一定の繰返し載荷を 行うことで破面に痕跡を残す方法)により,疲労亀裂深さと疲労亀裂進展寿命の関係を示した。また,節の 局部形状による応力集中を応力拡大係数範囲の補正係数として考慮した疲労亀裂進展解析により,試験結果 による疲労亀裂進展挙動を評価した。

キーワード:高強度鉄筋,疲労試験,ビーチマーク,疲労亀裂進展解析,疲労亀裂進展速度

1. はじめに

近年,部材断面の縮小を目的として,高層 RC 建築物 や道路橋の RC 橋脚などに降伏点が 685N/mm²以上の高 強度鉄筋 USD685 が用いられるようになってきた。しか し,特に鉄道構造物の桁や梁などのように繰返し荷重の 影響の大きい部材に高強度鉄筋を用いるためには,その 疲労特性の検討が必要である。

鉄道構造物等設計標準·同解説¹⁾(以下,設計標準) では, 普通強度鉄筋 (JIS に規定されている SD490 以下) の疲労強度として、二羽らによる既往データに基づく算 定式²⁾を長寿命域の疲労試験結果³⁾で検証して用いてい る。一方、高強度鉄筋に関しては、設計標準の付属資料 で,破断寿命2×10⁶回以下の疲労試験結果⁴⁾に基づいて 提案された疲労強度算定式が示されているが、2×10⁶回 を超える場合の勾配の緩和がないため、長寿命域では疲 労強度が低く算定される。著者らは、これまでに長寿命 域を含む高強度鉄筋の引張疲労試験を実施し、鉄筋の形 状から有限要素法により求めた応力集中分布を用いた疲 労亀裂進展解析を行い,高強度鉄筋の疲労強度を評価し た⁵⁾。この研究では、鋼構造物の疲労寿命予測に用いら れる疲労亀裂進展則を用いることにより,疲労寿命の解 析を行った。解析に用いた疲労亀裂の進展特性は、各種 の鋼材に適用可能であることが知られているのが、鉄筋 用の鋼材で求められたものではないため、実際に鉄筋に 適用した場合の疲労亀裂進展挙動を確認することにより 検証する必要がある。

鋼材の疲労亀裂進展挙動を確認する方法として、ビー チマーク法があり、構造用鋼材や溶接継手の疲労試験に 用いられている^{たとえば7).8)}。ビーチマーク法とは、疲労試 験の途中で、上限応力を変えずに応力範囲を半分になる ような繰返し載荷を一定の回数行うことにより、疲労破 面に木の年輪状の痕跡を残し、ある繰返し回数での疲労 亀裂の寸法を測定する方法である。

そこで、本研究では鉄筋の引張疲労試験にビーチマー ク法を適用することにより高強度鉄筋の疲労亀裂深さと 疲労亀裂進展寿命の関係を求め、疲労亀裂進展解析の結 果と比較することにより疲労亀裂進展挙動を評価する。

2. 疲労試験の概要

2.1 疲労試験体

疲労試験に用いる試験体には,USD685 と SD490 の D25 の電炉ねじ節鉄筋を用いた。表-1 に機械的性質と 化学成分を示す。鉄筋をそのまま疲労試験機のチャック でつかむとつかみ部で破断するため,図-1 に示すよう に鉄筋のつかみ部の節を旋盤で切削し,ビニールテープ 等で隙間を調整してアルミ管をかぶせることによりつか み部を保護した。また,一部の試験体にはワイヤーソー で切り込みを入れることにより,深さ 2.0 mm のノッチ を加工した(図-2)。



*1 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 修(工) (正会員) *2 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博(工) (正会員) *3 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博(工) (正会員)

鋼種	呼び名	降伏点または 耐力(N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)				
SD490	D25	531	706	23	0.27	0.30	1.39	0.027	0.022				
USD685	D25	720	912	14	0.32	0.51	1.44	0.019	0.015				

表-1 鉄筋の機械的性質と化学成分

試験体 No.	応力範囲 σ_r	ノッチ	ビーチマーク載荷時期	破断時の繰	破断位置	備考
	(N/mm^2)	の有無		返し回数	(mm)	
USD685-1	300	無				アルミ管から鉄
						筋が抜け出し
USD685-2	300	無	60000, 80000, 以降	150000	70	チャック部破断
			10000 回間隔			
USD685-3	300	有	20000, 30000, 40000, 以	70455	192	ノッチ部破断
			降 5000 回間隔			
USD685-4	300	無	60000, 80000, 以降	172599	215	
			10000 回間隔			
USD685-5	260	無	120000, 160000, 以降	240674	102	
			20000 回間隔			
USD685-6	260	無	200000, 240000	276522	165	
SD490-1	300	無	60000, 80000, 以降	94547	70	チャック部破断
			10000 回間隔			
SD490-2	300	有	20000, 40000, 50000	59243	203	ノッチ部破断
SD490-3	300	有	20000, 30000, 40000, 以	50501	203	ノッチ部破断
			降 5000 回間隔			
SD490-4	300	無	60000, 80000, 以降	216921	70	チャック部破断
			10000 回間隔			
SD490-5	300	無	60000, 80000, 以降	198518	70	チャック部破断
			10000 回間隔			
SD490-6	260	無	120000, 160000, 以降	530506	330	チャック部破断
			20000 回間隔			

表-2 載荷条件と試験結果

注1) 下限応力はすべて10N/mm²とした。

注2) ビーチマーク載荷時期および破断時の繰返し回数はビーチマークを除く繰返し回数。





2.2 載荷方法

疲労試験は,載荷周波数 2~10Hz の正弦波により表-2 に示す応力範囲で行った。途中,通常の応力範囲での 載荷が,表-2 のビーチマーク載荷時の繰返し数に達し た時に図-3 に示すように上限応力 σ_{max}を変えずに応力 範囲を半分にして,直前の載荷ステップの繰返し数の半 分の回数だけ載荷した。

2.3 疲労試験のパラメータ

疲労試験のパラメータは**表-2**のとおり、鋼種、応力 範囲、ノッチの有無、ビーチマーク載荷時期とした。ビ ーチマークの載荷時期は,想定される破断寿命に対して 複数のビーチマークが導入できるように設定した。

3. 疲労試験結果

3.1 破断位置と破断時の繰返し数

破断時の繰返し数と破断位置を表-2 に示す。表に示 す破断位置は、つかみ部を含む試験体上端からの位置と した。ノッチ有の試験体は全てノッチ部で破断した。破 断時の繰返し数(破断寿命)は、ノッチ有の試験体は無の 試験体の 25~50 パーセント程度となった。ノッチ有の場 合は、USD685-3 と SD490-2,3 を比較すると、USD685 の 破断寿命が長くなった。ノッチ無の場合は、応力範囲 300N/mm²の USD685-2,4 と SD490-1,4 を比較すると、全 体的にばらつきが大きく、鋼種による明確な差はなかっ た。一方、応力範囲 260N/mm²の SD490-6 と USD685-5,6 を比較すると、SD490 は 1 体のみであるが、USD685 の 2 体よりも 2 倍程度の破断寿命であった。 なお、同一条 件で破断位置が異なる USD685-2 と USD685-4 の比較か ら、チャック部破断の疲労寿命への影響は、傾向的には





(a) SD490-1





(b) USD685-3



写真-1 疲労破面

大きくないと考えられる。

3.2 疲労破面

疲労破面の代表的な例を**写真-1**に示す。写真と併せ て断面の輪郭とビーチマークを描画した。SD490の破断 面が疲労破壊から徐々に延性破壊に移行して亀裂深さが 断面直径の70%ぐらいで破断しているのに対して, USD685 では亀裂深さが断面直径の40%程度で疲労破壊 から脆性破壊に移行して破断している。しかし、ビーチ マークから判断すると、いずれの試験体でも最大亀裂深 さが断面直径の20~25%程度の時点で、破断寿命の90% 程度の繰返し数に達して、その後急速に亀裂が進展して 破断に至っている。

亀裂の形状に関しては、ノッチがある試験体 (USD685-3)ではノッチ底部に沿って扁平な亀裂が進展 し、亀裂幅がノッチ底部の幅に達した後、徐々に半円に 近い形状に亀裂幅と深さの比が変化している。

4. 節による応力集中を考慮した疲労亀裂進展解析 4.1 有限要素解析による応力集中係数の解析

鉄筋の節形状による応力集中を解析するために,まず, 鉄筋の形状を,3Dスキャナにより測定した^{5),9)}。次に測 定した3次元形状から,節による凹凸が最大になるよう に,鉄筋の長径方向で軸方向に切断した断面を用いて図 -4 に示す有限要素解析モデルを作成した。図は鉄筋軸 方向を横方向としており,鉄筋軸方向の長さは40mm と した。鉄筋中心から鉄筋表面に向かって要素寸法を小さ くし,最小要素寸法は0.1mm 程度とした。また,厚さ1 の平面応力プレート要素を用い,弾性係数は200kN/mm², ポアソン比を0.3 とした。境界条件は,図の左端の節点 を完全拘束とし,右端の節点に単位長さ当たり1に相当 する鉄筋軸方向の荷重を与えた。

図-4 に有限要素解析により得られた応力分布を鉄筋 軸方向の応力値(応力集中係数)のコンターとして示す。 いずれも節の底の部分でピークとなっており,最大値は 約3.9 となった。なお,図中で応力分布が上下対称では ないのは,モデル化した断面の節位置が上下非対称のた めである。図-4 に示す想定される亀裂発生点からの鉄 筋中心方向への亀裂進展を仮定して,亀裂深さ方向への 応力集中係数の分布を求めた。その結果を図-5 に示す。

4.2 疲労亀裂進展解析

(1) 応力拡大係数範囲の算出

疲労亀裂進展解析を行うためには。亀裂先端近傍の力 学的パラメータである応力拡大係数範囲 Δ*K* を求める必 要がある。そこで、本研究では以下のように応力拡大係 数範囲を算出した^{10,11}。

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} F(\lambda) \cdot F_g \tag{1}$$

ここに, Δσ: 応力範囲, a: 亀裂深さ(mm)

$$F(\lambda) = 0.66 - 0.02398\lambda + 1.664\lambda^2$$
(2)

ここに、 $\lambda = a/D$, D: 鉄筋直径(mm)

$$F_g = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\sigma_n} (\arcsin \frac{b_{i+1}}{a} - \arcsin \frac{b_i}{a})$$
(3)

ここに, *σ_n*: 公称応力, 他の記号は**図**-6 参照 *F_g*は応力集中による補正係数で, **図**-5 に示す有限要 素解析により求めた応力集中係数 (*σ_i/σ_n*) の深さ方向分 布を用いて計算した^{12),13}。亀裂深さ方向の *F_g*の分布を **図**-7 に示す。

(2) 亀裂開閉口を考慮した疲労亀裂進展解析

通常の疲労亀裂進展速度の式は、主に溶接継手のよう な高い引張残留応力場を疲労亀裂が進展する際の試験デ ータに基づいて設定したものである。しかし、鉄筋母材 には引張残留応力はほとんど生じていないと考えられる ことから、応力比が小さい場合に ΔK が小さい領域で亀









裂が閉口する現象を考慮した疲労亀裂進展解析を行った。 亀裂開閉口は,式(4)~(7)を用いることで考慮した¹⁴⁾。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff}^{m} - \Delta K_{eff, ih}^{m}), \quad \Delta K_{eff} > \Delta K_{eff, ih}$$
(4)

$$\frac{da}{dN} = 0, \qquad \Delta K_{eff} \le \Delta K_{eff,th} \qquad (5)$$

ここで,

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K \quad (U: \texttt{ 4 Q H D L}) \tag{6}$$

$$U =_{\min} \left(\frac{1}{R_0 - R} - \frac{K_0}{\Delta K}, 1 \right) \quad (R: \, \bar{\kappa} \, \exists \, \Bbbk) \tag{7}$$

 $C, m, \Delta K_{eff,th}$ は有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} と疲労亀裂 進展速度 da/dN の関係を表す材料定数で,文献 12)に示 されている $C=2.7\times10^{-11}, m=2.75, \Delta K_{eff,th} = 2.9 MPa \sqrt{m} \delta$ 用いた。 R_0, K_0 は亀裂開口比に関する材料特性値であり,

文献14)の測定結果に基づき文献12)で推奨されている安 全側の値として, *R*₀=0.9, *K*₀=4.0 を用いた。初期亀裂深さ *a*₀は, 文献10)を参考に0.1mmとした。式(4), (5)を変形 した式(8), (9)により, 亀裂深さ*a*での繰返し数*N*を算定 することにより, 亀裂深さと繰返し数の関係を求めた。

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K_{eff}^{\ m} - \Delta K_{eff,th}^{\ m})}, \quad \Delta K_{eff} > \Delta K_{eff,th}$$
(8)

 $\Delta K_{eff} \leq \Delta K_{eff,th}$

 $N = \infty$,

5. 亀裂深さと繰返し数,疲労亀裂進展速度の関係

亀裂深さと繰返し数の関係について,疲労破面のビー チマークから測定した値と 4.で算定した解析値を図-8 に示す。解析値に対して USD685-4 や USD685-6 は近い 関係を示しているが,そのほかの試験体では解析値から のばらつきが大きくなっている。ただし,繰返し数が増



図-9 亀裂深さと疲労亀裂進展速度の関係

加するにつれて亀裂深さが増加する傾きが大きくなって いる傾向としては一致している。この理由として, SD490-1とUSD685-2はチャック部で破断しているため, 応力状態が実際と異なっていると考えられること,解析

(9)

値は初期亀裂深さを 0.1mm と仮定しているが, 実際の初 期亀裂に相当する鉄筋表面の微小な凹凸にはばらつきが あることなどが考えられる。

そこで、初期亀裂深さの影響を受けない疲労亀裂の進 展過程での亀裂深さと疲労亀裂進展速度の関係について 検討する。疲労破面から測定した隣接するビーチマーク 間の亀裂深さの差と繰返し数の差から平均の疲労亀裂進 展速度を求め、式(4)で算定した解析値と比較した結果を 図-9 に示す。解析値はノッチのない場合の鉄筋形状か ら算定した応力集中係数を用いているが、ここでは参考 としてノッチがある試験体(USD685-3, SD490-2, SD490-3)から求めた疲労亀裂進展速度も示した。これ らノッチのある試験体を除き、疲労試験から得られた疲 労亀裂進展速度は解析値と近い傾向を示している。また、 ノッチのある試験体同士では、亀裂深さと疲労亀裂進展 速度の関係がほぼ一致している。このことから、今回試 験を行った範囲では、鋼種による疲労亀裂進展速度の違 いはほとんどなく,鋼種の違いよりも鉄筋表面近くの局 部形状による初期亀裂深さと応力集中の違いが鉄筋の疲 労寿命に与える影響の方が大きいと考えられる。

6. 結論

高強度鉄筋の疲労亀裂進展挙動を検討することを目的 として,ビーチマークを導入した鉄筋の引張疲労試験お よび疲労亀裂進展解析を行い,亀裂深さと繰返し回数, 疲労亀裂進展速度について評価した。その結果,得られ た知見を以下に示す。

- (1) 破断時の亀裂深さは USD685 が SD490 よりも小さい が、いずれも亀裂深さが断面直径の 20~25%程度の時 点で、破断寿命の 90%程度の繰返し数に達して、そ の後急速に亀裂が進展して破断に至る。
- (2) 疲労亀裂進展解析により求めた亀裂深さと繰返し数の関係は、試験体によっては解析値との差異が大きかったが、亀裂深さの増加の傾きは近い傾向を示した。
- (3) 疲労亀裂深さと疲労亀裂進展速度の関係は、ノッチ のない試験体では解析値と近い傾向を示した。
- (4) 鋼種(SD490とUSD685)による疲労亀裂進展速度の 違いは見られず,疲労寿命に与える影響としては, 鋼種の違いより,局部形状による初期亀裂深さや応 力集中の違いの方が大きいと考えられる。

謝辞

疲労試験に用いた鉄筋を提供いただいた鋼材メーカー および疲労試験の実施にご協力いただいた鉄道総合技術 研究所・車両強度研究室の方々に謝意を表します。

参考文献

- 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解 説-コンクリート構造物,2004
- 二羽淳一郎,前田詔一,岡村甫:異形鉄筋の疲労強 度算定式,土木学会論文集,No.354, pp.73-79, 1985.2
- 吉田幸司,鎌田卓司,谷村幸裕,佐藤 勉:高繰返し回数での異形鉄筋の疲労強度に関する一考察,コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1135-1140,2003
- 4) 吉田幸司,鎌田卓司,谷村幸裕,佐藤 勉:高強度
 鉄筋の引張疲労強度算定に関する一考察,土木学会
 第 58 回年次学術講演会概要集 V-367, pp.733-734,
 2003.9
- 5) 田中寿志,中村 光,国枝 稔:疲労亀裂進展解析 を用いた高強度鉄筋の疲労強度に関する研究,コン クリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.787-792, 2011
- 6) 田中洋一,征矢勇夫:各種構造用鋼の疲労亀裂伝播 特性の検討,溶接学会論文集,Vol.7, No.2, pp.256-263, 1989
- Miki, C., et.al: Study on Estimation of Fatigue Strengths of Notched Steel Members, Proceedings of JSCE, No.316, pp.153-168, Dec. 1981
- 8) 田垣徳幸,近藤明雅,山田健太郎,菊池洋一:溶接 継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端部形状の影
 響,土木学会論文報告集,No.324, pp.151-158, 1983.8
- 大屋戸理明,金久保利之,山本泰彦,佐藤 勉:鉄筋の腐食特性が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響,土木学会論文集,Vol.62,No.3, pp.542-554,2006.8
- 10) 舘石和雄,吉嶺建史,大田孝二,松井隆佳:スポッ ト溶接により製作された溶接金網の疲労に関する 研究,コンクリート工学論文集, Vol.13, No.2, pp.25-32, 2002.5
- Liaw, P.K. et al: Fatigue Crack Initiation and Propagation Behavior of Pressure Vessel Steels, Engineering Fracture Mechanics, Vol.57, No.1, pp.85-104, 1997
- 12) 日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993
- Albrecht, P. and Yamada, K.: Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, Journal of Structural Division, ASCE, ST2, pp. 377-388, Feb. 1977
- 14) 田中洋一, 征矢勇夫:疲労亀裂開閉口に及ぼす応力 比と応力拡大係数範囲の影響について, 溶接学会論 文集, Vol.5, No.1, pp.119-126, 1987