論文 疲労き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

田中 寿志*1·中村 光*2·国枝 稔*3

要旨:高強度鉄筋の疲労強度について検討するために,引張疲労試験を実施し,疲労き裂進展解析により算定した疲労寿命と比較した。解析にあたっては,疲労試験を行った鉄筋と同種の鉄筋の形状を測定し,軸方向断面をモデル化した2次元有限要素解析を行い,き裂進展方向の応力集中係数の分布を求めた。さらに応力集中による補正係数を用いて疲労き裂進展解析を行い,鉄筋の S-N 線を解析的に求めた。その結果,現行の鉄道の設計標準に示されている高強度鉄筋の疲労強度算定式を用いた S-N 線より,長寿命域での勾配を小さくできる可能性があることが分かった。

キーワード:高強度鉄筋,疲労強度,疲労試験,疲労き裂進展解析, S-N線

1. はじめに

近年,経済性,過密配筋に対する施工性向上等の観点 から降伏点が 685N/mm²以上の高強度鉄筋が実用化され, 超高層 RC 建物や橋脚などに適用されている。しかし, 土木構造物の桁,梁などの繰り返し荷重の影響が大きい 部材に高強度鉄筋を用いるためには,鉄筋の疲労特性の 検討が不可欠である。

鉄道構造物においては、鉄道構造物等設計標準・同解 説―コンクリート構造物¹⁾(以下,設計標準)では、普 通強度(JIS で規定される SD490 以下)の疲労強度は、 二羽らの研究²⁾による既往データを整理した式を、長寿 命域の疲労試験結果³⁾を用いて検証した以下の式を用い ている。

$$f_{srd} = \frac{10^{\alpha_r}}{N^k} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\min}}{f_{suk}}\right) / \gamma_s \tag{1}$$

ここに,

f_{srd}: 異形鉄筋の設計引張疲労強度(N/mm²) N:疲労寿命(回)

 $\alpha_r = 3.09 - 0.003 \phi$ (N $\leq 2 \times 10^6$ 回の場合)

 $\alpha_r = 2.71 - 0.003 \phi$ (N > 2×10⁶回の場合)

φ:鉄筋の直径 (mm)

k = 0.12 (N $\leq 2 \times 10^{6}$ 回の場合)

k = 0.06 (N > 2×10⁶回の場合)

σ_{min}:鉄筋の最小引張応力度(N/mm²)

 f_{suk} : 鉄筋の引張強度の特性値 (N/mm²)

γ_s:鉄筋の材料係数で,一般に1.05とする。

一方,高強度鉄筋の疲労強度に関しては,設計標準の 付属資料で,式(1)に a_r =3.62-0.003 ϕ ,k=0.22の値を用 いてもよいとしているが,これらの値は,繰り返し回数 2×10⁶回以下の疲労試験結果に基づいて提案されたもの であるが, S-N線の勾配が普通強度鉄筋よりも大きいこ とと、2×10⁶回を超える場合の勾配の緩和がないため、 長寿命域においては疲労強度を低く算定される。

そこで、本研究では、繰り返し回数 10⁷回を超えるデ ータ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 た疲労き裂進展解析を行って、長寿命域を含む疲労強度 を評価する。

2. 高強度鉄筋の疲労試験

2.1 高強度鉄筋の疲労試験の概要

疲労試験に用いる試験体には、USD685 と SD490 の それぞれ D19 と D32 を用いた。節形状は、USD685 につ いては、D19、D32 ともネジ節で、SD490 については D19 がネジ節で D32 が竹節である。表-1 および表-2 に使 用した鉄筋のうち D19 の機械的性質と化学成分を示す。

疲労試験にあたり,試験体となる鉄筋には,疲労試験 機のチャックで直接つかむとチャック部分で鉄筋が破 断するため,図-1のように,鉄筋の外径よりも一回り 大きい径の鋼管をかぶせて,隙間に樹脂(ポリエステル 系またはエポキシ)を充填する加工をした。

作成した試験体を疲労試験機に設置し、載荷周波数 4 ~10Hzの正弦波により、表-3および表-4に示す応力 範囲および下限応力に対応する荷重を設定して荷重制 御で片振りの引張疲労試験を実施した。

表-1 鉄筋の機械的性質

| 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 (%) |
|--------|-----|----------------------------------|------------------------------|-----------|
| SD490 | D19 | 527 | 714 | 17 |
| USD685 | D19 | 716 | 901 | 15 |

*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)

表-2 鉄筋の化学成分(%)

| 鋼種 | 呼び名 | С | Si | Mn | Р | S |
|--------|-----|------|------|------|------|------|
| SD490 | D19 | 0.26 | 0.22 | 1.37 | 0.25 | 0.19 |
| USD685 | D19 | 0.32 | 0.56 | 1.32 | 0.17 | 0.17 |

| 鋼種 | 応力範囲 (N/mm ²) | 下限応力 (N/mm ²) | 繰り返し 回数 | 備考 |
|--------|------------------------------|------------------------------|------------|--------|
| USD685 | 490 | 10 | 36182 | 破断 |
| USD685 | 400 | 10 | 78618 | 破断 |
| USD685 | 350 | 10 | 126348 | 破断 |
| USD685 | 280 | 10 | 331027 | 破断 |
| USD685 | 270 | 10 | 244050 | 破断 |
| USD685 | 260 | 10 | 373210 | 破断 |
| USD685 | 260 | 10 | 716237 | 破断 |
| USD685 | 260 | 10 | 384946 | 破断 |
| USD685 | 250 | 10 | 10079211 | 未破断 |
| SD490 | 280 | 10 | 670537 | 破断 |
| SD490 | 250 | 10 | 11322901 | 未破断 |
| USD685 | 199 | 6 | 761460 | 破断4) |
| USD685 | 258 | 6 | 417400 | 破断4) |
| USD685 | 387 | 7 | 82600 | 破断5) |
| USD685 | 335 | 7 | 143000 | 破断5) |
| USD685 | 291 | 7 | 208000 | 破断5) |
| USD685 | 243 | 7 | 450000 | 破断 5) |
| USD685 | 216 | 7 | 890000 | 破断 5) |
| USD685 | 188 | 7 | 2000000 | 未破断 5) |

表-3 載荷条件と試験結果(D19)

| 细種 | 応力範囲 | 下限応力 | 繰り返し | 備老 |
|--------|------------|------------|----------|-----|
| 到两个里 | (N/mm^2) | (N/mm^2) | 回数 | |
| USD685 | 235 | 6 | 20000000 | 未破断 |
| USD685 | 235 | 6 | 1614515 | 破断 |
| USD685 | 235 | 6 | 1940001 | 破断 |
| USD685 | 235 | 6 | 1663450 | 破断 |
| USD685 | 235 | 6 | 554119 | 破断 |
| USD685 | 235 | 6 | 20000000 | 未破断 |
| USD685 | 235 | 6 | 33925625 | 未破断 |
| USD685 | 241 | 6 | 517873 | 破断 |
| USD685 | 235 | 6 | 1088749 | 破断 |
| USD685 | 210 | 6 | 14383666 | 破断 |
| USD685 | 193 | 6 | 12737257 | 破断 |
| USD685 | 188 | 6 | 20000000 | 未破断 |
| USD685 | 259 | 6 | 189724 | 破断 |
| USD685 | 210 | 6 | 7473542 | 破断 |
| USD685 | 210 | 6 | 2002136 | 破断 |
| USD685 | 185 | 6 | 880446 | 破断 |
| USD685 | 185 | 6 | 7201671 | 破断 |
| USD685 | 161 | 6 | 20000000 | 未破断 |
| USD685 | 161 | 6 | 20000000 | 未破断 |
| USD685 | 161 | 6 | 20000000 | 未破断 |
| SD490 | 235 | 6 | 6702081 | 破断 |
| SD490 | 235 | 6 | 718785 | 破断 |
| SD490 | 241 | 6 | 487400 | 破断 |
| SD490 | 235 | 6 | 2000000 | 未破断 |



2.2 試験結果

疲労試験の載荷条件および結果を表-3 および表-4 に示す。D19に関しては、既往のデータとして文献 4)お よび 5)の試験結果も含めて記載した。また、試験結果に 加えて、式(1)の設計標準式により算出した普通強度と USD685 に対応する S-N 線を図-2 および図-3 に示す。 試験結果から、10⁶回以下の繰り返し回数では USD685 の設計標準式の S-N線の勾配に近い傾向があることが分 かる。一方、2×10⁶回を超える長寿命域では、USD685 の設計標準式は試験結果の疲労強度を過小評価してお り、試験結果からは 10⁶回以上では S-N 線に明確な傾き が存在せず、疲労限に近い状態と考えられる。また、10⁶ 回以上の疲労強度には大きなばらつきがみられる。

USD685 の D19 に対して,応力範囲 350N/mm²で行っ



写真-1 USD685, D19(応力範囲 350N/mm²)の破面

た疲労試験の破面を**写真-1**に示す。普通強度鉄筋の通 常の破断面と比べ,疲労亀裂による破壊面が小さく,最 終破断では,伸びがない脆性的な破断になっている。

3. 鉄筋の形状測定

鉄筋の表面形状をモデル化した有限要素解析モデル を作成するため、今回試験を行った鉄筋と同一形状のネ ジ節鉄筋 (D19, D32) について、文献 6)の 3D スキャナ を用いて形状を測定した。用いたスキャナの諸元と計測 状況を表-5 および写真-2 に示す。測定した形状を 3 次元表示したものを図-4 に示す。

| 我 0 | |
|------------|-------------------------|
| スキャン方式 | スポットビーム三角測量方式 |
| 使用レーザー | 波長:600~700nm |
| | 最大出力:1.0mW 未満 |
| | パルス幅:350µm |
| | パルス周波数:2875Hz |
| スキャンピッチ | 円周方向 0.2~60°,高さ方向 0.2mm |
| 最大スキャン領域 | 直径 254mm, 高さ 406.4mm |
| | |

表-5 3D スキャナの諸元⁶⁾



写真-2 3Dスキャナの外観と計測状況⁶⁾

4. 有限要素解析

4.1 解析モデル

3. で測定した鉄筋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-5 および図-6 の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いる。解析モデルの 鉄筋軸方向の長さは,D19 で40mm,D32 で45mm とし



図-6 解析モデル(D32)

た。最小要素寸法が 0.05mm 以下になるように,鉄筋中 心から鉄筋表面に向かって要素寸法を小さくした。また, 厚さ1のプレート要素を用い,弾性係数は 20kN/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-7 応力分布 (D19)



図-8 応力分布 (D32)

4.2 応力集中係数の解析結果

図-7 および図-8 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 ており最大値で D19 は 3.75、D32 で 3.46 となった。応力 集中係数が最大値をとる点を A 点、その隣の節の底でピ ークとなる点を B 点として、それぞれの点からの鉄筋中 心方向へのき裂進展を想定して、き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-9 および図-10 に示す。D19 では 2mm、D32 では 3mm 付近までの深 さで A 点の応力集中係数が B 点を上回っており、いずれ の径の鉄筋においても、節の底での局部的な断面形状変 化の違いが鉄筋径の1割程度の深さまでの応力集中の違 いに影響していることが分かる。

5. 疲労き裂進展解析

5.1 応力拡大係数範囲の算出

疲労き裂進展解析を行うためには。き裂先端近傍の力 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。



図-9 応力集中係数のき裂深さ方向分布(D19)



図-10 応力集中係数のき裂深さ方向分布(D32)



$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} F(\lambda) \cdot F_g \tag{2}$$

ここに、 $\Delta \sigma$: 応力範囲、a: き裂深さ(mm) $F(\lambda) = 0.66 - 0.02398\lambda + 1.664\lambda^2$ (3) ここに、 $\lambda = a/D$ 、D: 鉄筋直径(mm)

$$F_g = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\sigma_n} (\arcsin\frac{b_{i+1}}{a} - \arcsin\frac{b_i}{a})$$
(4)

ここに、 σ_n : 公称応力、他の記号は \mathbf{O} -11 参照 F_g は応力集中による補正係数で、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⁹。き裂深さ方向の F_g の分布を \mathbf{O} -12 および \mathbf{O} -13 に示す。

5.2 き裂開閉口を考慮した疲労き裂進展解析

通常の疲労き裂進展速度の式は、主に溶接継手のよう



な高い引張残留応力場を疲労き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⁸⁾。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,応力比の影響によるき裂開閉口を考慮 した疲労き裂進展解析を行った。き裂開閉口は,式(5) ~(8)を用いることで考慮した¹¹⁾。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff}^{\ m} - \Delta K_{eff,th}^{\ m}), \ \Delta K_{eff} > \Delta K_{eff,th}$$
(5)

$$\frac{da}{dN} = 0, \qquad \Delta K_{eff} \le \Delta K_{eff,th} \qquad (6)$$

ここで,

$$\Delta K_{\text{eff}} = U \cdot \Delta K$$
 (U: き裂開口比) (7)

文献 8)の平均設計曲線の値として, $C=2.7 \times 10^{-11}$, m=2.75, $\Delta K_{eff,th} = 2.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を用いた。 R_0 , K_0 は材料特性 値であり,文献 8)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。初期き裂深さ a_0 は,文献 7)を 参考に 0.1mm とし,限界き裂深さ a_f は疲労試験での破面 の状況から鉄筋直径の 1/2 とした。式(5),(6)を変形した 式(9),(10)により,疲労寿命 N_f を算定した。



図-15 解析結果と試験結果の比較(D32)

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K_{eff}^{\ m} - \Delta K_{eff,th}^{\ m})}, \ \Delta K_{eff} > \Delta K_{eff,th}$$
(9)

$$\Delta K_{eff} \le \Delta K_{eff,th} \quad (10)$$

5.3 解析結果と疲労強度の検討

 $N_f = \infty$,

前述の方法で応力範囲を変化させて疲労寿命を算定 s することにより, S-N線を解析的に求めた。D19 と D32 に対する解析結果を,疲労試験結果と設計標準式と併せ て,それぞれ図-14 と図-15 にプロットした。

応力集中の疲労強度への影響を把握するため,A点からとB点からのき裂を仮定してそれぞれの疲労寿命を算定しているが、実際の鉄筋では最も応力集中が高い部分からき裂が発生し、破断に至ると考えられる。そのため、B点の解析結果は、鉄筋の節底部の局所的な表面形状が試験区間全体でB点と同様に滑らかである場合の疲労試験結果に対応している。逆に、今回測定した中では応力集中が最も大きかったA点付近よりも、鉄筋の局所的な表面形状に変化がある場合は、さらに低い疲労強度になる可能性がある。このように鉄筋の表面形状のばらつきにより疲労強度は大きく影響されるが、A点とB点の解析結果を比較するとS-N線の勾配の変化はよく似た傾向を示している。

解析結果と試験結果を比較すると試験結果の下限を 包絡する傾きの変化と近い傾向を示している。一方, USD685 の設計標準式は,設計引張疲労強度が信頼度 95%以上で算出できるように,S-N線の傾きが繰り返し 数 2×10⁶回以下の既往の試験結果と合うように設定さ れているため、2×10⁶回を超える領域では試験結果を過 小評価している。今回行った疲労き裂進展解析による S-N線の勾配は、この領域でのS-N線の勾配の傾向とお おむね一致しており、幅広い繰り返し回数でのS-N線 の傾きの違いを表現できている。このことから、限られ た疲労試験結果を用いて、高強度鉄筋の長寿命域のS-N 線の勾配を小さくできる可能性があるといえる。

6. まとめ

高強度鉄筋の疲労強度を評価することを目的として, 引張疲労試験を実施し,実測した鉄筋形状から有限要素 解析により求めた応力集中分布を用いた疲労き裂進展 解析により算定した疲労寿命と比較した。その結果,得 られた知見を以下に示す。

- (1) 鉄筋の局部的な表面形状の違いにより、表面近くの 応力集中係数が大きく異なるため、疲労強度のばら つきに大きく影響する。
- (2) 疲労き裂進展解析により求めた S-N 線を用いること により、長寿命域まで含めた幅広い繰り返し回数の S-N 線の勾配変化の傾向を表現できる。
- (3) 現行の設計標準の高強度鉄筋の疲労強度算定式に よる疲労強度は、長寿命域の試験結果を過小評価し ており、疲労き裂進展解析を用いることにより、限 られた疲労試験結果を用いて、高強度鉄筋の長寿命 域の S-N 線の勾配を小さくできる可能性がある。

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 ーの方々,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,土木学会論文集第5巻354/V-2,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) 神戸製鋼所:高強度鉄筋ネジコン USD685B 品質・ 継手性能, 1997.7
- 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
- 7) 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,第13巻第2 号,pp.25-32,2002.5
- 8) 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
- 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
- 11) 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, 第5巻第1号, pp.119-126, 1987