

高繰返し領域を考慮した異形鉄筋 SD685 の疲労強度算定式

中田 裕喜* 岡本 大** 渡辺 健* 田所 敏弥*

Proposal of an Equation for Calculating Fatigue Strength of SD685 Rebar Considering the Range of High Frequency Repetitive Loading

Yuki NAKATA Masaru OKAMOTO Ken WATANABE Toshiya TADOKORO

The slope k of the $S-N$ line in the range of high-frequency repetitive loading used in the current equation for calculating the fatigue strength of SD685 rebars is not unmitigated because of the small number of experimental data. In this paper, an equation for calculating the fatigue strength of SD685 rebars was proposed based on experimental data including the range of high-frequency repetitive loading. SD685 rebars had $k=0.22$ within 2×10^6 cycles, which was larger than that of SD490 rebars. On the other hand, it was found that the fatigue strength can be calculated on the safe side at 2×10^6 cycles or more even if k is set to 0.06, which is the value of SD490 rebars.

キーワード：疲労強度, SD685A・B, ねじ鉄筋, 高繰返し領域

1. はじめに

降伏強度の特性値が 390N/mm^2 を超える高強度の鉄筋は、配筋の過密化への対策や断面の縮小等に対して有効である。しかし、鉄道橋や道路橋等においては、列車や車両による繰返しの作用を受けるため、高強度鉄筋を鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物に適用するためには、構造物あるいは部材の疲労特性を明らかにする必要がある。疲労破壊に関する安全性は、主として異形鉄筋の疲労破壊により定まるため、異形鉄筋の疲労強度を定量的に把握することが重要となる。

一般に、異形鉄筋の設計疲労強度 f_{srd} は、 $S-N$ 線における勾配 k と切片 α_r として示される。H16年版の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、コンクリート標準）においては、二羽らの研究²⁾や、鉄道総研における数千万回オーダーの繰返し回数 N の実験による検証³⁾に基づき、SD490以下の鉄筋に対する疲労強度算定式が示されており、 $N > 2 \times 10^6$ の k を緩和している。一方、SD685A および SD685B（以下、SD685）の鉄筋は、H16年版コンクリート標準の付属資料に疲労強度算定式が示されているが、SD490以下の鉄筋と比較して疲労強度が小さい傾向にあり、さらに $N > 2 \times 10^6$ となるような高繰返し領域での k の緩和が反映されていないため、疲労を受ける部材で適用が困難となっている。

土木学会コンクリート標準示方書（設計編）⁴⁾においては、 $N \leq 2 \times 10^6$ 回に対して、二羽らの研究²⁾に基づく k と α_r を示している。このうち、SD685の鉄筋につい

ては、H16年版コンクリート標準の付属資料で示される検討に基づいている⁵⁾。ただし、いずれの種類の鉄筋も、 $N > 2 \times 10^6$ のデータが少ないことから、 $N > 2 \times 10^6$ における k の緩和は反映されていない。

本稿では、 $N > 2 \times 10^6$ を含む実験に基づき、SD685の鉄筋の母材の疲労強度算定式を提案することを目的とする。検討では、実験データを追加した上で、付属資料で示された $N \leq 2 \times 10^6$ での疲労強度を再検証するとともに、 $N > 2 \times 10^6$ における疲労強度算定式を示す⁶⁾。

2. SD490以下の鉄筋の疲労強度算定式

SD490以下の異形鉄筋の母材の設計引張疲労強度 f_{srd} は、式(1)で示される。

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

ここで、

f_{srd} : 異形鉄筋の母材の設計引張疲労強度 (N/mm^2)

N : 疲労寿命 (回)

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

$\alpha_r = 2.71 - 0.003\phi$ ($N > 2 \times 10^6$ 回の場合)

ϕ : 鉄筋の直径 (mm)

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

$k = 0.06$ ($N > 2 \times 10^6$ 回の場合)

σ_{min} : 鉄筋の最小引張応力度 (N/mm^2) で、圧縮応力が生じる場合には一般に 0 とする

f_{suk} : 鉄筋の引張強度の特性値 (N/mm^2)

γ_s : 鉄筋の材料係数で、一般に 1.05 とする

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

なお、上記の α_r の値は、ふしの根元に円弧のないものを対象に定められたものである。

一方、式(1)の根拠となる二羽らによる疲労強度算定式²⁾は、式(2)に示すとおりである。ここでは、完全片振り時の疲労強度として示す。

$$f_{sr} = \frac{10^{\alpha_r}}{N^k} \quad (2)$$

ここで、

f_{sr} ：完全片振り時の疲労振幅強度 (N/mm²)

$\alpha_r = k_0(3.17 - 0.003\phi)$ ($N \leq 2 \times 10^6$ 回の場合)

$\alpha_r = k_0(3.17 - 0.003\phi - 0.06 \log(2 \times 10^6))$ ($N > 2 \times 10^6$ 回の場合)

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

$k = 0.06$ ($N > 2 \times 10^6$ 回の場合)

k_0 ：ふしの根元に円弧のない場合で、ふしと鉄筋軸とのなす角度が60度以上のものは1.00、ふしの根元に円弧のない場合、ふしと鉄筋軸とのなす角度が60度未満のものは1.01、ふしの根元に円弧があるものは1.02

式(2)は、SD490以下である鉄筋の213個の実験データを、平均値1.0、変動係数9.6%で算定できる。なお、式(2)($k_0=1.00$)の信頼度95%として、1.2で除したものが式(1)の f_{srd} ($\gamma_s=1.0$)となる。

3. SD685の鉄筋母材の疲労強度

3.1 実験データの概要

鉄道総研でこれまでに実施したSD685の鉄筋の疲労実験データに加え、既往の疲労実験データ⁷⁾を含めて検討した。

表1に、検討に用いた実験データの一覧を示す。鉄筋はD19～D51であり、高炉製と電炉製の鉄筋が含まれている。また、未破断のデータについても実験終了時の繰返し回数以上に耐え得るものと判断して検討に加えた。

図1に、鉄道総研で実施した疲労実験の状況を示す。供試体は、いずれもねじ節鉄筋であり、JIS G 3112に適合するものである。疲労試験機への取付け時の傷等による早期疲労破断を避けるため、鉄筋両端の試験機チャック取付け部に、治具として鉄筋径よりも一回り大きい径の鋼管を配置し、鉄筋との隙間にエポキシ樹脂を充填することとした。

作成した供試体を疲労試験機に取付け、周波数5～10Hzの正弦波を荷重制御にて、等応力振幅による片振り载荷の引張疲労実験を実施した。実験における最小引張応力度 σ_{\min} は2.5～10N/mm²、最大引張応力度 σ_{\max} は155～490N/mm²である。なお、破断したデータは全て

表1 疲労実験データの一覧 (総数：66)

	破断の有無	D19	D32	D38	D41	D51	合計
高炉	破断	7	0	13	5	5	30
	未破断	2	0	2	1	1	6
電炉	破断	0	14	0	0	0	14
	未破断	0	7	0	0	0	7
不明	破断	8	0	0	0	0	8
	未破断	1	0	0	0	0	1
合計	破断	15	14	13	5	5	52
	未破断	3	7	2	1	1	14

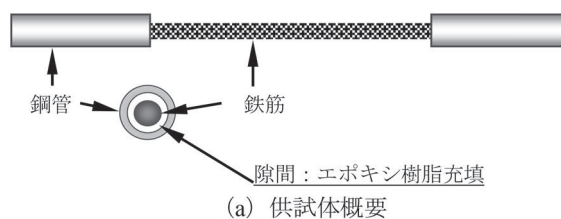


図1 供試体概要

鉄筋母材で破断したものを採用している。

3.2 全体的な傾向と製造方法の影響

図2に、繰返し回数 N と完全片振り時の疲労応力振幅 f_{sr0} の関係を示す。いずれの実験データも、修正 Goodman 線図を用いて完全片振り時に換算している。

全体的な傾向として、鉄筋径 ϕ が大きくなると、 f_{sr0} は低下する傾向にある。また、 $N \leq 2 \times 10^6$ 程度の領域において、 N の増加とともに f_{sr0} は低下するが、 $N > 2 \times 10^6$ 程度の領域においては、その低下は顕著でなくなることがわかる。すなわち、SD490以下の鉄筋と同様に、 f_{sr0} は鉄筋径 ϕ に依存するとともに、疲労限を有することがわかった。

製造方法の違いについて、SD490 程度以下の鉄筋では、高炉や電炉といった製造方法の違いが疲労強度に及ぼす影響は小さいとされている³⁾。SD685 の鉄筋についても、安定した電炉製鉄筋が製作されるようになっており、機械的性質やコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係については、製造方法の違いは小さいことが示されている⁸⁾。図2では、高炉と電炉を区分して示したが、電炉製鉄筋の疲労限となる繰返し回数 N はやや小さい傾向にはあるが、高炉製鉄筋と顕著な違いはみられない。SD685 の鉄筋についても、製造方法の違いが f_{sr0} に及ぼす影響は小さいことを確認した。以降では、製造方法を特に区分せずに検討することとする。

3.3 $N \leq 2 \times 10^6$ での疲労強度

疲労限の影響が小さい領域と考えられる $N \leq 2 \times 10^6$ における疲労強度について、H16 年版コンクリート標準発刊以降に実施した実験データを追加した上で再検証する。

図3に、実験における f_{sr0} と式(1)および式(2)(ここでは、ふしの根元に円弧がある場合の $k_0 = 1.02$) の $S-N$

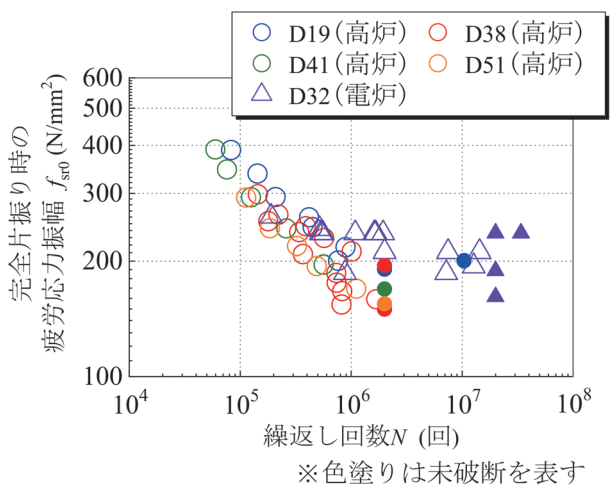


図2 SD685 の鉄筋の繰返し回数 N と f_{sr0} の関係

線の比較の例を示す。式(1)は $\gamma_s = 1.0$ で信頼度 95% を表し、式(2)は SD490 以下の鉄筋の実験データの平均値を表すものである。SD685 の鉄筋の $S-N$ 線の勾配 k は、SD490 以下の鉄筋から導出された式(1)、式(2)よりも大きいことがわかる。また、式(2)は実験結果の平均値を捉えておらず、式(1)においては、ふしの根元に円弧のないものとして算定しているにも関わらず、 N が大きい場合に実験結果を過大に算定する場合がある。

そこで、既往の研究²⁾と同様な方法で、実験結果に適合する $S-N$ 線の勾配 k と切片 α_r を導出する。 $N \leq 2 \times 10^6$ で破断した実験データに対し、鉄筋径 ϕ ごとに k を同定すると、D19、D32、D38、D41、D51 のそれぞれで $k = 0.26, 0.04, 0.25, 0.29, 0.23$ であった。ややばらつきがあり、また ϕ との関連はみられない。そこで、これらの平均値を採用²⁾することとすると、 $k = 0.22$ となる。 α_r については、 $k = 0.22$ とし、実験値と計算値の比の平均値が 1.0 程度となり、変動係数が小さくなるように決定すると、 $\alpha_r = 3.70 - 0.003\phi$ となる。

図3に実験における f_{sr0} と $k = 0.22$ 、 $\alpha_r = 3.70 - 0.003\phi$ とした $S-N$ 線の比較の例を、図4に D32 に換算した全実験データの実験値と計算値の比を示す。なお、図3には、信頼度 95% 以上となるように 1.2 で除した $S-N$ 線、すなわち $\alpha_r = 3.62 - 0.003\phi$ とした計算値も併記した。設定した k と α_r とすることで、 f_{sr0} と N の関係や、実験値を精度よく表現できることが確認できる。図4に示した実験データに対し、実験値と計算値の比の平均値は 1.04、変動係数は 0.12 となり、SD490 以下の鉄筋に対する式(2)と概ね同等な精度で算定できる。

3.4 $N > 2 \times 10^6$ での疲労強度

既往の研究^{9) 10)}では、疲労き裂進展解析に基づいて、SD685 の鉄筋の N の大きい領域での勾配の変化の傾向を表現でき、長寿命域で勾配を小さくできる可能性があることを示している。ここでは、これまで実験データが少なかった $N > 2 \times 10^6$ での疲労強度について、実験デー

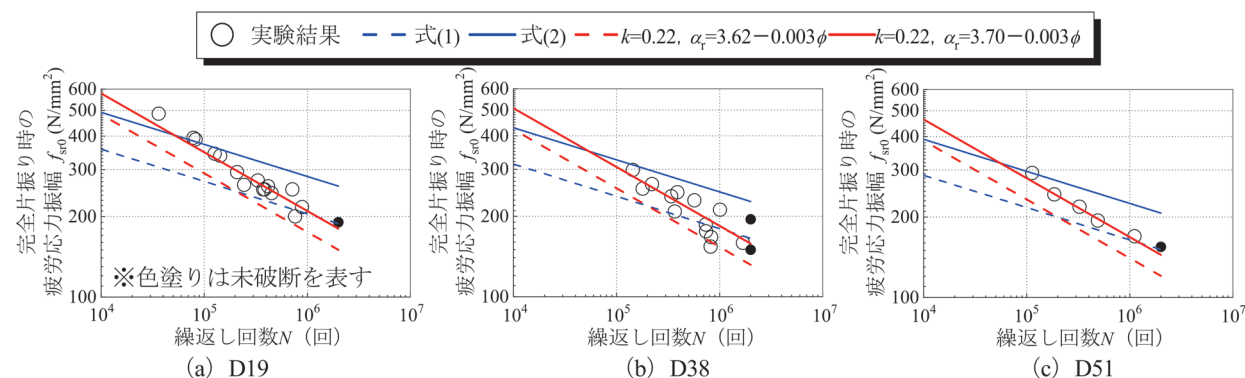


図3 SD685 の鉄筋の疲労強度算定式の適用性 ($N \leq 2 \times 10^6$)

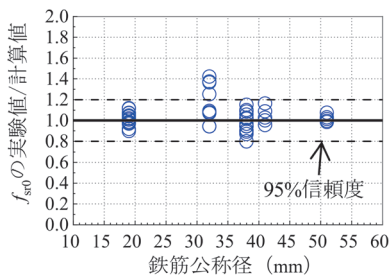


図4 $N \leq 2 \times 10^6$ における算定精度
($k=0.22, \alpha_r=3.70-0.003\phi$)

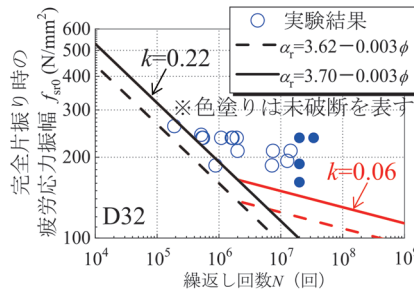


図5 $N > 2 \times 10^6$ における疲労強度
算定式の適用性

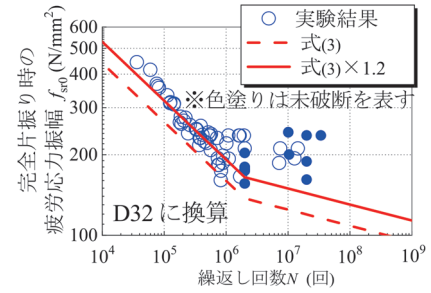


図6 実験データ全体での疲労強度算
定式の適用性

タに基づき検証する。

図5に、実験における f_{sr0} と $k=0.22, \alpha_r=3.70-0.003\phi$ または $3.62-0.003\phi$ とした $S-N$ 線の比較の例を示す。 $S-N$ 線は、 $N > 2 \times 10^6$ で実験結果を過少な算定する。なお、色塗りした実験データは鉄筋の破断に至っていないものであり、より大きな繰返し回数に耐え得ると考えられる。 $N > 2 \times 10^6$ では、 $N=2 \times 10^6$ における f_{sr0} としても（すなわち、疲労限を設定しても）、実験データに対しては安全側に算定できる傾向にはある。一方、SD490以下の鉄筋を対象とした式(1)、式(2)においては、 $N > 2 \times 10^6$ では $k=0.06$ としており、 $N \leq 2 \times 10^6$ におけるSD490以下の鉄筋とSD685の鉄筋の k の関係を踏まえると、少なくともSD685の鉄筋の $N > 2 \times 10^6$ での k は、0.06以上が適当であると考えられる。図では、 $N > 2 \times 10^6$ で $k=0.06$ とした結果を併記した。

以上より、SD685の鉄筋の設計引張疲労強度は、式(1)における α_r および k を以下のとおりとすることで算定できる。

$$\alpha_r = 3.62 - 0.003\phi \quad (N \leq 2 \times 10^6 \text{ 回の場合})$$

$$\alpha_r = 2.61 - 0.003\phi \quad (N > 2 \times 10^6 \text{ 回の場合})$$

$$k = 0.22 \quad (N \leq 2 \times 10^6 \text{ 回の場合})$$

$$k = 0.06 \quad (N > 2 \times 10^6 \text{ 回の場合})$$

ねじ鉄筋が対象であり、鉄筋表面の形状や材質等は、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に適合することが前提となる。

図6に、SD685の鉄筋の $S-N$ 線と、D32に換算した全ての f_{sr0} の比較を示す。SD685の鉄筋の設計引張疲労強度は、上記の α_r および k を用いることで、概ね安全側に算定できることを確認した。

4. まとめ

(1) SD685A および SD685B の鉄筋においても、SD490以下の鉄筋と同様に、疲労強度は鉄筋径に依存するとともに、高繰返し領域で疲労限を有する。また、高炉や電炉といった製造方法の違いが、疲労強度に

及ぼす影響は小さいことがわかった。

(2) SD685A および SD685B の鉄筋の繰返し回数 $N \leq 2 \times 10^6$ での $S-N$ 線の勾配 k は、SD490以下の鉄筋よりも大きく、0.22であった。また、 $N > 2 \times 10^6$ では、SD490以下の鉄筋の勾配 $k=0.06$ を適用しても、疲労強度を安全側に算定できることがわかった。

文献

- (財) 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）、丸善、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/V-2、pp.73-79、1985
- 鎌田卓司、曾我部正道、谷村幸裕、吉田幸司、渡邊忠朋、佐藤勉：高繰返し領域での疲労照査法に関する研究、鉄道総研報告、Vol.18、No.1、pp.13-18、2004
- 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書（設計編）、土木学会、2017
- 土木学会：コンクリートライブラリー149 2017年制定 コンクリート標準示方書改訂資料—設計編・施工編一、2018.3
- 中田裕喜、岡本大、渡辺健、田所敏弥：高繰返し領域を考慮したSD685の鉄筋の疲労強度、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.44、No.2、pp.955-960、2022
- 神戸製鋼所：高強度鉄筋ネジコン USD685B 品質・継手性能、1997.7
- 曾我部直樹、木次克彦、伊吹数行、森山陽一、石山一幸、山野辺慎一、須田久美子、渡辺義光：RC橋脚における軸方向鉄筋、帯鉄筋への高強度鉄筋の適用に関する実験的研究、土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）、Vol.67、No.1、pp.131-149、2011
- 田中寿志、中村光、国枝稔：高強度鉄筋の疲労亀裂進展挙動、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、pp.685-690、2012
- 田中寿志、中村光、国枝稔：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.2、pp.787-792、2011