論文 高繰返し回数での異形鉄筋の疲労強度に関する一考察

吉田 幸司*1・鎌田 卓司*2・谷村 幸裕*3・佐藤 勉*4

要旨: 異形鉄筋の疲労強度は一般に S-N 線で表されているが, 2.0×10⁶ 回を超える高繰返し 回数の領域では,疲労試験データの不足から安全側の設計式が用いられている。そこで, 2.0 ×10⁶ 回を超える領域での異形鉄筋の引張疲労試験を実施し,既往の試験データとあわせて, 異形鉄筋の疲労強度を検討した。その結果,数千万回オーダーでの異形鉄筋の疲労破断デー タを得ることができ,2.0×10⁶回を超える高繰返し回数での S-N線の傾きを*k*=0.06と設定し, 2.0×10⁶ 回以下と同程度の精度で疲労強度推定ができることを確認した。また,より適切な 疲労破壊に対する安全性の照査が可能となるよう疲労強度算定式を提案した。

キーワード:疲労強度,疲労試験,異形鉄筋, S-N線

1. はじめに

鉄道や高速道路などの既存の社会資本施設は, その多くが今後も機能を維持向上しながら供用 されていかなければならない重責を担っている。 また,新設構造物においても,耐久性に富むこ とが重要である。こうした背景を踏まえ,構造 物に要求される性能をより適切に照査していく 技術が求められ,性能照査型設計法へと各種の 技術基準が改訂されてきている(例えば,2002 年制定土木学会コンクリート標準示方書(構造 性能照査編)¹⁾など)。

要求される構造物の性能として,疲労破壊に 対する安全性も重要な性能の一つである。特に, 鉄道の RC 桁式橋梁は,比較的短スパンのもの が多く,列車走行により大きな変動荷重が繰返 し作用することから,疲労の検討は重要な照査 項目の一つといえる。一般に,設計では,活荷 重(例えば,鉄道では列車荷重)による発生断 面力に対して,鋼材の引張疲労強度により疲労 限界状態を照査することから,RC 鉄道構造物 の疲労に対する安全性は,補強鋼材として用い られる異形鉄筋の疲労強度により主に定まる。 一方,鉄筋の疲労強度は、2.0×10⁶回を超え る領域では、2.0×10⁶回以下よりも、一般にS-N 線の傾きは小さくなることが知られている²⁾。 しかしながら、現行の鉄道構造物等設計標準・ 同解説コンクリート構造物³⁾(以下、「現行標 準」という。)では、2.0×10⁶回を超える繰返し に対し、鉄筋の疲労試験データが十分でないこ とから、2.0×10⁶回程度以下の試験データによ り定めた S-N線の傾きをそのまま用いた安全側 の式としている(文献 1)も同様。)。

そこで、本研究では、より適切な性能照査を 行うため、2.0×10⁶回を超える高繰返し回数で の異形鉄筋の引張疲労試験を実施し、異形鉄筋 のS-N線の傾きについて検討することを目的と する。また、検討には、既往の高繰返し回数で の疲労試験データも材料及び試験方法の明らか なものを採用するとともに、高繰返し回数の疲 労試験データは、破断に到るものが少ないため、 未破断の試験結果についても試験終了時の繰返 し回数以上に耐え得るものと判断して検討に加 えた。

*1 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 工修 (正会員)
*2 (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 (正会員)
*3 (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 工修 (正会員)
*4 (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 工博 (正会員)

2. 現行の疲労強度算定式

現行標準における異形鉄筋の疲労強度算定式 は,式(1)に示すとおりである³⁾。

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

ここに、f_{srd}:異形鉄筋の母材の設計引張疲労

強度 (N/mm²)

N:疲労寿命(回)

 α_r =3.09-0.003 ϕ

φ:鉄筋の直径 (mm)

k=0.12

- σ_{min}:鉄筋の最小引張応力度または永久
 荷重作用時の設計応力度(N/mm²)
 で,圧縮応力を受ける場合には一般
 に0とする。
- *f_{suk}*:鉄筋の引張強度の特性値(N/mm²) γ_s:鉄筋の材料係数(一般に 1.05)

式(1)は、前述したように、 $N > 2.0 \times 10^{6}$ に対しては十分なデータがないことから、 $N \leq 2.0 \times 10^{6}$ の式をそのまま適用し、S-N線は直線で表されている。また、フシの影響を安全側に考慮した k_{0} =1.00とした場合の算定式としている。

一方,式(1)の根拠となる二羽らの研究による 既往データの計 280 を整理した式は,式(2)及び 式(3)である²⁾。

$$f_{sr} = (1 - \sigma_{\min} / f_{su}) \frac{10^{\alpha}}{N^k}$$
(2)

ここに、*f_{sr}*:疲労振幅強度(MPa) *f_{su}*:鉄筋の引張強度(MPa)

- k=0.12 : $N \leq 2.0 \times 10^{6}$
- =0.06 : $N > 2.0 \times 10^{6}$
- $\alpha = k_0 (3.17 0.003D) : N \leq 2.0 \times 10^6$
 - $=k_0$ (3.17-0.003*D*-0.06log (2.0×10⁶))

 $: N > 2.0 \times 10^{6}$

*k*₀:フシの根元に円弧のない場合で、フシと鉄筋軸とのなす角度が 60°以上のものは 1.00
 :フシの根元に円弧のない場合で、フ

シと鉄筋軸とのなす角度が 60°未満

のものは 1.01

- :フシの根元に円弧のあるものは 1.02
- D: 鉄筋の公称径 (mm)

この式(2)の算定精度は,213のデータに対し て,実験値と式(2)による算定値の比をとると, 平均値1.00,変動係数9.6%である。

また,疲労振幅強度 *f*_{srk}は,式(2)で算定される *f*_{sr}を 1.2 で除して,95%信頼限界で算定できるものとし,式(3)を提案している。



図-1 試験体概要図

表-1 試験に用いた異形鉄筋の特性

試験体No.	寸法	降伏点 N/mm2	引張強さ N/mm2	伸び (%)	化学成分(%)					
					$\overset{\mathrm{C}}{\times 100}$	Si ×100	$\stackrel{\mathrm{Mn}}{ imes100}$	Р ×1000	$\stackrel{ m S}{ imes 1000}$	C+Mn/6 ×100
KNシリーズ	D32	388	571	29	22	36	146	12	11	46
TNシリーズ	D32	408	584	23	24	16	100	29	31	41
	D16	401	563	26	26	10	80	31	39	39

規格:JIS G 3112 SD345

3. 異形鉄筋の引張疲労試験

3.1 異形鉄筋の疲労試験の概要

疲労試験に用いる試験体には、電炉メーカー, 知の 高炉メーカーの異形鉄筋を各1種ずつ用いた。 いた 近年の異形鉄筋においては、製造方法の違いに す。

よる疲労強度への影響はほとんどないとの報告 もあるが⁴⁾,本検討では,高繰返し回数での未 知の領域についての検討であるため,両種を用 いた。試験に用いた異形鉄筋の特性を表-1に示 す。

文献 No.	No.	フシ形状	種別	載荷速度	鉄筋径 D(mm)	繰返し回数N (回)	完全片振り時の 引張作用応力 f sr0exp (N/mm ²)	備考
_	KN3201	波フシ	SD345	7Hz	32	50,000,000	199	未破断
_	TN1601	竹フシ	SD345	10Hz	16	18, 786, 200	210	破断
_	TN1604	竹フシ	SD345	10Hz	16	17, 301, 400	199	破断
_	TN3203	竹フシ	SD345	7Hz	32	33, 381, 692	199	破断
—	TN3205	竹フシ	SD345	7Hz	32	18, 332, 170	199	破断
5,6	13-5	竹フシ	SD345	5Hz	13	4, 844, 020	217	破断
5,6	13-6	竹フシ	SD345	5Hz	13	3,000,120	226	破断
5,6	W1-13-6	竹フシ	SD345	5Hz	13	6, 133, 060	201	未破断
5,6	₩-13-4	竹フシ	SD345	5Hz	13	12, 053, 720	185	未破断
4,5	I-16-3	竹フシ	SD345	5Hz	16	10,000,000	197	未破断
4,5	I-16-4	竹フシ	SD345	5Hz	16	2,645,000	213	破断
6	T2-9	竹フシ	SD345	5Hz	32	3, 195, 120	185	破断
6	T2-19	竹フシ	SD345	5Hz	32	10,000,000	206	未破断
6	T3-2	竹フシ	SD345	5Hz	16	10, 038, 400	223	破断
6	T3-11	竹フシ	SD345	5Hz	16	2,644,610	213	破断
6	T3-12	竹フシ	SD345	5Hz	16	10,000,000	197	未破断
7	No. 4-3	竹フシ	SD390	10Hz	16	5,000,000	231	未破断
7	No. 4-4	竹フシ	SD390	10Hz	16	6, 255, 650	231	未破断
7	No. 4-5	竹フシ	SD390	10Hz	16	7, 243, 000	231	未破断
7	No. 5-1	竹フシ	SD390	10Hz	16	5, 348, 430	189	未破断
7	No. 5-2	竹フシ	SD390	10Hz	16	6,075,100	189	未破断
7	No. 5-3	竹フシ	SD390	10Hz	16	6, 140, 450	189	未破断
7	No. 5-4	竹フシ	SD390	10Hz	16	6, 860, 240	189	未破断
7	No. 5-5	竹フシ	SD390	10Hz	16	6, 920, 250	189	未破断
6	I-29-4	斜フシ	SD345	5Hz	29	2,945,000	198	未破断
6	K-16-5	波フシ	SD345	5Hz	16	2,256,000	222	破断
6	K-16-6	波フシ	SD345	5Hz	16	6, 137, 000	197	
6	K-32-3	波フシ	SD345	5Hz	32	11, 270, 000	222	未破断
6	K-32-4	波フシ	SD345	5Hz	32	6, 183, 000	197	未破断
6	NI-16-2	竹フシ	SD345	5Hz	16	10,000,000	222	未破断
6	NI-16-6	竹ワシ	SD345	5Hz	16	6, 150, 000	229	一般断
6	1-32-4	竹ワン	SD345	5Hz	32	5, 122, 000	197	木破断
8	R25-01	竹ワシ	SD390	400rpm	25	2, 153, 000	274	木破断
8	D25-01	波ノン	SD390	400rpm	25	2, 188, 000	294	木破断
8	132-01	竹ノン	SD390	400rpm	32	2, 309, 000	235	不破断
8	D32-03	波ノン	SD390	400rpm	32	2,268,000	294	一般断
9	F-08	百形ノン	SD490	500rpm	25 25	2,800,000	210	木破断
9	F-09	ロ形ノン	SD490	500rpm	25 25	3, 300, 000	210	<u>木 </u>
9	F-10	ロ形ノン	SD490	500rpm	25 95	5,050,000	215	木陂町
9	F-11	ロ形ノン	SD490	500rpm	2 	10,000,000	150	木陂町
9	FZ-06	ロ形ノン	SD390	500rpm	20 25	10,000,000	100	不破断
9	F=U/	ロ形ノン	SD490	500rpm	20 	2,500,000	210 250	41又均丁 五世世纪
9 9	F2-04	ロルノン	SD390	500rpm	20 25	2,100,000	250	

表-2 2.0×10⁶回を超える高繰返し回数の疲労試験データー覧

疲労試験にあたり,試験体となる鉄筋には, 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,取付け部となるチャック部 に,治具として,鉄筋径よりも一回り大きい径 の鋼管(ガス管)を設置し,隙間にエポキシ樹 脂を充填する加工を施し(図-1 参照),鉄筋を 疲労試験機に直に掴ませることを避けた。

作成した試験体を疲労試験機に設置し,載荷 周波数 5~10Hz の正弦波により,目標荷重振幅 での荷重制御による完全片振りの引張疲労試験 を実施した。また,チャック加工の作成不良や充 填した樹脂自体の変形,付着切れ等の確認のた め,試験中の変位測定ならびに試験後の状態確 認を実施し,問題がないことを確認した。

3.2 異形鉄筋の疲労試験結果

高繰返し回数 (N>2.0×10⁶) までの長期疲労 試験が実施された既往データ^{4)~9)} および今回 実施した疲労試験データからの計 44 (破断:17, 未破断:27) の試験結果一覧を表-2 に示す。な お,破断データは全て鉄筋母材での破断による ものを採用した。



区分	平均值	変動係数	データ数		
破断のみ	1.02	9.4%	17		
未破断のみ	0.97	13.0%	27		
全体	0.99	11.8%	44		
		2 17 0 00)2 d log		

図-2 k=0.06, α_r=k₀ (3.1/-0.003φ-log (2.0×10⁶))とした場合の推定精度

4. 疲労強度の検討

4.1 S-N 線勾配の検討

2.0×10⁶回を超える領域における S-N 線の傾 き kの検討として, 表-2のデータについて, 疲 労強度の実験値と計算値との比をとり検討した。

計算値は,現行標準の根拠となる式(2)と同程 度の算定精度(平均値1.00,変動係数9.6%)と なるように式(2)を基本に S-N線の傾き k を変 えて算定した。また,計算にあたり,フシの形 状の影響として,竹フシは k_0 =1.00,台形フシ は k_0 =1.01,波フシは k_0 =1.02 と考慮した。

疲労強度の算定結果として,図-2に疲労強度 の実験値を計算値で除した値を縦軸,鉄筋径を 横軸に整理したものを示す。なお,この時の計 算に用いたS-N線の傾きは*k*=0.06である。また, 図中の●は破断したデータ,○は未破断のデー タを示す。

S-N線の傾きを k=0.06 とした場合では,破断 したデータのみで見ると,平均値 1.02,変動係 数 9.4%であり,根拠式(2)での平均値 1.00,変 動係数 9.6%と概ね同程度で疲労強度が推定で



区分	平均值	変動係数	データ数
破断のみ	1.22	9.5%	17
未破断のみ	1.17	13.0%	27
全体	1.19	11.8%	44

図-3 k=0.06, α_r=k₀ (3.09-0.003 φ-log (2.0×10⁶))とした場合の推定精度 きている。一方,未破断の推定精度は,平均値 0.97,変動係数 13.0%とやや精度が落ちる結果 となるが,未破断の実強度は,実験結果以上の 回数にて破断に到ることになると考えられるた め,計算値は過少評価した値であると考えられ る。そのため,実際には全体として平均値が上 がり 1.0 に近づくと考えられる。

このことから、2.0×10⁶回を超える領域での S-N 線の傾きは *k*=0.06 として算定すれば、2.0 ×10⁶回以下の算定精度と概ね同程度になると 考えられる。

4.2 S-N線の切片の検討

次に, 2.0×10⁶ 回を超える領域における推定 結果が, 2.0×10⁶ 回以下の推定結果と同程度の 安全率を有して算定されるように, 95%信頼限 界で算定できるように, S-N 線の切片を検討し た (すなわち, 安全率 1.2 程度となるような切 片を検討した。)。

図-3 に *k*=0.06, *a_r=k₀* (3.09-0.003 φ -log (2.0 ×10⁶)) とした場合の推定精度を示す。また, 図-2 の場合と同様に, 図中の●は破断したデー タ, ○は未破断のデータを示している。

破断データのみで平均値 1.22, 変動係数 9.5% であり,また,未破断のデータも前述したよう に実強度は実験値以上有していると考えられる ことから,安全係数 1.2 程度の算定結果が得ら れ, $N \leq 2.0 \times 10^6$ での場合と同様に,95%の信頼 限界で疲労強度を算定できるものと考えられる。

4.3 疲労強度算定式の提案

4.1及び **4.2**の検討結果を踏まえ,疲労強度 算定式を式(4)のように提案する。

$$f_{srd} = \frac{10^{\alpha_r}}{N^k} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\min}}{f_{suk}}\right) / \gamma_s \tag{4}$$

ここに, *f_{srd}*: 異形鉄筋の母材の設計引張疲労 強度 (N/mm²) N:疲労寿命(回) N≦2×10⁶の場合 *k*=0.12

 $\alpha_r = 3.09 - 0.003 \phi$

- N>2×10⁶の場合
 - k=0.06

 α_r =2.71-0.003 ϕ

 $(=3.09-0.003 \phi - \log (2.0 \times 10^6))$

φ:鉄筋の直径 (mm)

σ_{min}:鉄筋の最小引張応力度または永久
 荷重作用時の設計応力度(N/mm²)
 で,圧縮応力を受ける場合には一般
 に0とする。

f_{suk}:鉄筋の引張強度の特性値(N/mm²) γ_s:鉄筋の材料係数(一般に 1.05)

また、一般的な疲労強度算定式として考える 場合は、現行標準の算定式(式(1))と同様に、 パラメータとして鉄筋径のみを含むものとし、 フシの根元に円弧がなく、かつフシと鉄筋軸と のなす角度が直角であるとするのが設計上は簡 便である。そこで、*k*₀=1.00を用い、疲労破壊に 対して最も厳しい条件としておくのがよいと考 える。

図-4 に D16 の場合,図-5 に D32 の場合にお ける疲労試験結果と提案する式(4)の S-N 線を 示す。また,現行標準の算定式(式(1))をあわ せて示した。なお,これらの図に関しても,図 中の●は破断したデータ,○は未破断のデータ を示している。



図-4 高繰返し回数における異形鉄筋母材の引張疲労強度(D16のS-N線図)



図-5 高繰返し回数における異形鉄筋母材の引張疲労強度(D32のS-N線図)

提案する算定式を用いることで,現行標準の 設計式よりも,N>2.0×10⁶での疲労強度をより 適切に評価できていることが分かる。

5. まとめ

数千万回オーダーの高繰返し回数にて疲労破 断に到る試験データが得られ,それらを用いた 本研究により以下の知見を得た。

- (1) 鉄筋母材の疲労強度特性として、2.0×10⁶ 回を超える領域では、S-N 線の傾きを現行 標準でのk=0.12からk=0.06へと変更するこ とで,より適切な疲労強度の推定ができる。
- (2) S-N 線の傾きの変更とあわせて、切片について検討し、異形鉄筋の疲労強度算定式として、N≤2×10⁶の場合:k=0.12、αr=3.09-0.003φ,N>2×10⁶の場合:k=0.06,αr=2.71-0.003φ (=3.09-0.003φ-log (2.0×10⁶))、ここで、φ:鉄筋の直径(mm)を提案した。

なお、この成果は現在性能照査型への改訂作 業を実施している「鉄道構造物等設計標準・同 解説コンクリート構造物」に反映される予定で ある。また、本検討に際し、疲労試験用の異形 鉄筋を供出していただいた鋼材メーカーの方々、 非常に長期間に亘る疲労試験の実施にご協力い ただいた関係各位の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会:2002 年制定コンクリート標準示 方書(構造性能照査編), pp.39-41, 2002
- 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, 1985.2
- 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(SI単位版), pp.72-74, 1999
- 奥田寿夫,奥田広之,田母神貞衛:高炉及 び電炉製異形鉄筋の疲労試験,鉄道技術研 究所速報,No.A-86-46,1986.3
- 5) 宮田尚彦,奥田寿夫,田母神貞衛,奥田広 之,石橋忠良,松田好史,青木桂一:溶接 鉄筋格子及び大ひずみをうけた鉄筋コンク リート疲労強度,鉄道技術研究報告, No.1279, 1984.9
- (a) 宮田尚彦,奥田寿夫,田母神貞衛,石橋忠 良,青木桂一:鉄筋コンクリート部材の疲 労強度,構造物設計資料,No.76, pp.26-29, 1983.12
- 松本信之、山住克巳、宮本征夫:多数本の 引張鉄筋を有するコンクリート梁の疲労寿 命、鉄道総研報告、Vol.4、No.7、pp.22-29、 1990.7
- 2花一郎,江口保平:各種の高強度異形鉄 筋の母材および圧接継手の疲労試験,鉄道 技術研究所速報,No.67-198, 1967.9
- 9) 村田二郎: 異形鉄筋の付着および定着について、コンクリートライブラリー第 14 号、 pp.83-89、1965.12