

報告 高繰返し領域での鉄道構造物の疲労照査法に関する研究

曾我部 正道^{*1}・鎌田 卓司^{*2}・谷村 幸裕^{*3}・渡辺 忠朋^{*4}

要旨：本研究では、高繰返しの影響を受ける鉄道コンクリート構造物について、実験により鋼材の疲労強度を精度良く評価し、また、その評価を適切に反映することができる設計法を検討した。具体的には、まず 10^7 回を超える高繰返し回数での異形鉄筋の疲労試験を実施し、高繰返し領域における鉄筋の $S-N$ 線の再評価を行った。次に、構造物の疲労設計法については修正マイナー則を適用することとし、具体的な設計手順を整理した。この設計法に基づき、疲労破壊の照査が設計断面の決定条件となる実構造物を対象としてケーススタディを行い、従来よりも 1~2 割程度合理的となることを示した。

キーワード：異形鉄筋, 疲労試験, $S-N$ 線, マイナー則, グッドマン線図

1. はじめに

鉄道橋は、列車荷重の繰返し载荷による影響を受ける。特に短スパン部材においてこの傾向が強く、1 車軸の载荷が 1 回の応力振幅となるような場合等には、設計耐用期間中に数千万回オーダーの繰返し载荷を受けるため、疲労破壊がしばしば設計における決定要因となる。

コンクリート構造物の疲労設計は、例えば、「建造物設計標準 (1970 年制定)」¹⁾ や「全国新幹線網建造物設計標準 (東北, 上越, 成田用: 1972 年制定)」²⁾ のように、疲労の影響を受けやすい短スパン (20m 未満) の部材に対して、許容応力度を通常より厳しく制限することから始まった。

「建造物設計標準 (1983 年制定)」³⁾ からは、列車の軸重、軸配置および本数の影響等が取り入れられた。すなわちレンジペア法⁴⁾ を用いて列車通過による構造物のランダム応答波形を個々の独立波に分解し、これにマイナー則⁵⁾ を用いて設計変動断面力とその繰返しに換算し、修正 Goodman 線図⁶⁾ 上で疲労強度を算定する手法である。ここでは、複線や継手の影響などについても定められ、これが現在の疲労照査法のベースとなっている⁷⁾。また、実務的には、スパン長に関する数表が提供された。

「鉄道構造物等設計標準 (1992 年制定)」⁸⁾ (以下「92 標準」と略す) は、前記を総合的に発展させたもので、限界状態設計法により算定式全体が再構築されたほか、せん断に対する疲労照査法についても示された。また、実務的に用いられる数表は、列車荷重の種類、その組合せ、断面力の種類、スパン長などより大幅な改訂がなされたほか、民鉄各社の列車への対応も図られた。

しかし、これらはいずれも 2×10^6 回程度の疲労試験⁹⁾ の結果に基づき構築されたものであり、しばしば疲労破

壊が設計の決定要因となる短スパン、すなわち 10^7 回以上の高繰返し領域における照査法としては、安全側ではあるが課題の残るものとなっていた。

本来、鉄筋は、低い応力レベルの繰返しに対しては、鋼橋の部材などと同様に疲労限を有すると考えられ¹⁰⁾、こうした点を解明できれば、より合理的な照査法が提案できると考えられる。

以上のような背景から、本研究では、まず疲労試験により、 10^7 回以上の領域における異形鉄筋の疲労応力振幅について検討した。続いて、疲労試験の結果に基づき修正マイナー則を用いた疲労照査法を提案した。最後に、照査法の改訂が実構造物の設計に及ぼす影響について評価し、その妥当性を検証した。

2. 異形鉄筋の低応力・高繰返し回数疲労試験

2.1 試験方法

二羽ら⁹⁾ は、繰返し回数 N が 2×10^6 回を超える領域では、 2×10^6 回以下よりも $S-N$ 線の勾配が緩やかになる、すなわち、疲労強度の低下割合が小さくなる式を提案していた。しかし、92 標準では、 2×10^6 回を超える繰返し回数に関する鉄筋の疲労試験データが少ないこと、特に 10^7 回以上のデータが少ないことから、 $S-N$ 線の勾配 k を一定値 (0.12) としていた。そこで本研究では、 10^7 回を超える高繰返し領域に着目して、鉄筋の疲労試験を行い、式(1)に示す二羽らの式の適用性について検討した¹¹⁾。式(1)は、280 個の疲労試験データから回帰分析により得られたものである⁹⁾。

$$f_{sr} = \frac{10^{\alpha_r}}{N^k} \quad (1)$$

*1 (財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 博(工) (正会員)

*2 元 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (現 東海旅客鉄道(株) 監査部) (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 博(工) (正会員)

*4 北武コンサルタント(株) 博(工) (正会員)

ここに、 f_{sr} は完全片振り時の疲労応力振幅 (N/mm^2)、 N は繰返し回数 k は $S-N$ 線の勾配で $k=0.12(N > 2 \times 10^6)$ 、 $k=0.06(N < 2 \times 10^6)$ である。 r は式(2)に示す鉄筋の径および形状を表す係数である。

$$r = k_0 (3.17 - 0.003 \dots) : N < 2 \times 10^6$$

$$r = k_0 (3.17 - 0.003 - 0.06 \log(2 \times 10^6)) : N > 2 \times 10^6 \quad (2)$$

ここに、 k_0 は節の根元が円弧状でない場合で、節と鉄筋軸とのなす角度が 60° 以上のもの (type-A) は 1.00、節の根元が円弧状でない場合で、節と鉄筋軸とのなす角度が 60° 未満のもの (type-B) は 1.01、節の根元が円弧状のもの (type-C) は 1.02 とする。また、 r は鉄筋の公称径 (mm) である。

図 - 1 に供試体概要を示す。供試体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、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、載荷周波数 5~10Hz の正弦波、荷重制御にて、等応力振幅による片振り載荷の引張疲労試験を実施した。

2.2 試験結果

表 - 1 の試験結果から、高繰返し領域での式(1)に示す $S-N$ 線のパラメータ r および k を検討した。表中の応力振幅は、試験時に生じた微小の最小応力度 ($= 5N/mm^2$ 程度) に対し、修正 Goodman 線図を用いて完全片振り時に換算した値である。なお、既往の $2 \times 10^6 \sim 10^7$ 回程度の高繰返し回数での疲労試験データも、材料および試験方法の明らかなものについては併せて検討することとした。また、未破断の試験データ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。

図 - 2 に式(1)の検証結果を示す。なお、算定値は $N > 2 \times 10^6$ の条件によるものである。

全データのうち、破断したデータのみで整理すると、平均値 1.01、変動係数 9.3% となり、既往の研究において式(1)を定めた際の精度である平均値 1.00、変動係数 9.6% と概ね同程度であると評価できる。

一方、未破断のデータのみで整理すると、平均値 0.97、変動係数 12.5% とやや精度が落ちる結果となった。未破断の供試体は、実際には、実験結果以上の回数にて破断に至ると考えられる。このため、計算値が過小評価となったと推定される。

なお、これらの平均値および変動係数を、 10^7 回を境に区分して整理したが、双方ともに同程度の値であった。

以上から、 10^7 回を超える領域での疲労応力振幅につ

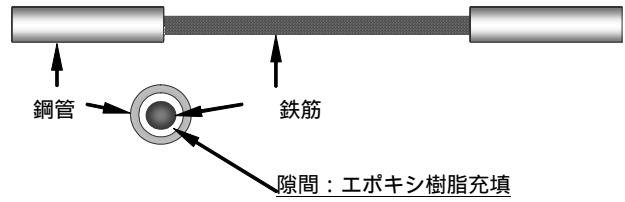
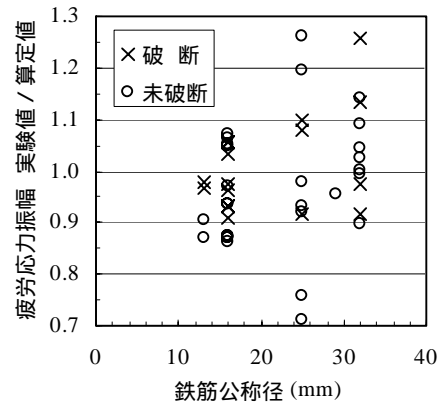


図 - 1 疲労試験用供試体概略図

表 - 1 高繰返し (10^7 回以上) 疲労試験の結果

供試体名称	呼び名	節の形状 type	応力振幅 (N/mm^2)	繰返し回数 (回)	破断有無
KN3201	D32	C	199	50,000,000	未破断
KN3203	D32	C	193	50,000,000	未破断
TN1601	D16	A	210	18,786,200	破断
TN1604	D16	A	199	17,301,400	破断
TN1605	D16	A	193	26,124,400	未破断
TN3203	D32	A	199	33,381,692	破断
TN3204	D32	A	200	20,452,332	破断
TN3205	D32	A	199	18,332,170	破断

鉄筋種別 SD345



区分	平均値	変動係数	データ数
破断	1.01	9.3%	17
未破断	0.97	12.5%	29
全体	0.98	11.4%	46

図 - 2 異形鉄筋の疲労応力振幅の算定精度

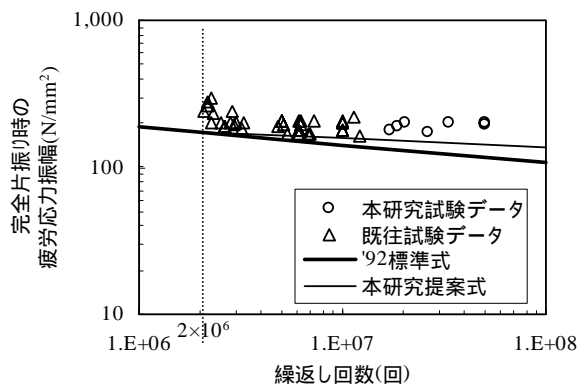


図 - 3 完全片振り時の疲労応力振幅 ($r = 32mm$ 換算)

いても、式(1)により算定可能であると考えられる。

図 - 3 に改訂算定式と試験結果の関係を示す。なお、

図中の試験データは鉄筋の径を全て $\phi = 32\text{mm}$ に換算して示した。照査に用いる疲労応力振幅の算定式は、95%信頼限界で算定できるように定めた。すなわち、安全率が 1.2 程度となるよう $S-N$ 線の切片 r_r の定数項($\ln = 3.17$)を式(3)に示すように補正したものである。

$$r_r = k_0 (3.09 - 0.003 \ln) : N \leq 2 \times 10^6$$

$$r_r = k_0 (2.71 - 0.003 \ln) : N > 2 \times 10^6 \quad (3)$$

3. 疲労照査法の検討

3.1 実構造物の疲労設計

完全片振り時の疲労応力振幅を実験により検討したが、これを実構造物に適用するためには、多様な実列車が通過する際の応力変動を反映できる、実用的な照査法を提案する必要がある。実構造物の疲労設計は、一般に以下の手順で行われる⁸⁾。

(1) 列車 1 編成あたりの等価繰返し回数の算定

列車通過によるランダムな応答波形を、レンジペア法⁴⁾を用いて個々の独立波 ($S_{r1}, S_{r2}, \dots, S_{rm}$) とその繰返し (n_1, n_2, \dots, n_m 回) に分解する。図 - 4 に例を示す。次に、マイナー則を用いて式(4)により各実列車の最大変動断面力 $S_{r(\max)}$ に換算した等価繰返し回数 N を求める。

$$N = \sum_{i=1}^m n_i \cdot \left(\frac{S_{ri}}{S_{r(\max)}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

(2) 最大実列車荷重換算の総等価繰返し回数の算定

各列車の本数を加味し、式(5)により最大実列車荷重の最大変動断面力 S_r に換算した総等価繰返し回数 N を求める。

$$\Sigma N = 365T \cdot j_A \cdot N_A \cdot \left(\frac{S_A}{S_r} \right)^{\frac{1}{k}} + 365T \cdot j_B \cdot N_B \cdot \left(\frac{S_B}{S_r} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (5)$$

ここに、 T は設計耐用期間 (年)、 j_A, j_B は実列車 (A 列車, B 列車) の 1 線・1 日あたりの本数 (本/日)、 S_A, S_B は実列車荷重による最大変動断面力、 N_A, N_B は S_A, S_B に換算した列車 1 編成あたりの等価繰返し回数 (回)、 S_r は換算する変動断面力である。

(3) 設計列車荷重換算の総等価繰返し回数の算定

式(5)に準じて、(2)で求めた等価繰返し回数を設計列車荷重による最大変動断面力に対する総等価繰返し回数 N に換算する。

(4) 完全片振り時の引張疲労強度の算定

式(6)を用いて、(3)で求めた総等価繰返し回数 N から、鉄筋径の影響を補正し、完全片振り時の引張疲労強度 f_{sr0} を求める。

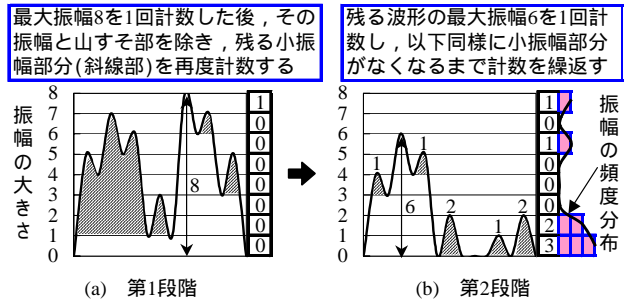


図 - 4 レンジペア法

$$f_{sr0} = \frac{10^{\alpha r}}{N^k} \quad (6)$$

(5) 設計引張疲労強度の算定

完全片振り時の引張疲労強度 f_{sr0} を修正 Goodman 線図に照らして最小応力度 σ_{\min} による補正を行い、これに継手、複線載荷の影響などを考慮して異形鉄筋の設計引張疲労強度 f_{srd} を求める。

$$f_{srd} = r_1 \cdot r_2 \cdot f_{sr0} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\min}}{f_{suk}} \right) / \gamma_s \quad (7)$$

ここに、 r_1 は鉄筋の継手、曲げ加工による低減係数 (圧接: 0.7, 曲げ加工: 0.65)、 r_2 は複線を支持する部材における荷重負担比による補正係数で、式(8)により求める。 f_{suk} は鉄筋の引張強度の特性値 (N/mm^2)、 γ_s は鉄筋の材料係数 (一般に 1.05) である。

$$r_2 = \left(\frac{1}{\{a^{1/k} + (1-a)^{1/k}\} \cdot (1-b) + b} \right)^k \quad (8)$$

ここに、 a は照査対象部材の [1 線載荷による最大断面力] / [複線載荷による最大断面力] で、 b は複線を支持する部材において列車が同時に載荷する確率である。

3.2 照査法の検討

実構造物に対する照査法を検討する場合に問題となるのは、高繰返し領域における $S-N$ 線の勾配の変更を、上記のどの段階で修正マイナー則等を用いて反映するかである。表 - 2 に検討した照査法の一覧を示す。

図 - 5(a)に照査法 A による照査手順を示す。照査法 A は、本研究で新たに検討した手法で、照査の最初の段階で設計列車荷重による最大変動応力度 f_{sr} と式(6)、(7)等から算定される鉄筋の 2×10^6 回疲労強度 f_{sr200} とを比較し、これにより $S-N$ 線の勾配を、照査の全段階を通して使い分ける手法である。また、 f_{sr} が f_{sr200} を超えず、かつ式(5)により算定した総等価繰返し回数 N が 2×10^6 回以下となった場合は、 $S-N$ 線図上で疲労破壊が生じない領域となるため、以後の照査を省略する。

本手法は最も厳密で理解しやすい反面、実設計に適用するためには、新たに実列車荷重による最大変動断面力 S_A, S_B および各列車 1 編成あたりの等価繰返し回数 $N_A,$

N_B ($k=0.06, 0.12$ それぞれによる算定値) 等に関する数表が必要となり,これを部材種別およびスパンごとに整備しておかなければならない。また,設計の初期段階で鋼材量を仮定して,最大変動応力度 σ_{sr} および最小応力度 σ_{min} を算出しておく必要がある。

図-5(b)に照査法Bによる照査手順を示す。照査法Bは,実列車荷重による最大変動断面力換算の等価繰返し回数の算定までを $k=0.06$ で行い,これが 2×10^6 回を超えるか否か,更に設計列車荷重による最大変動断面力 S_{rd} と,鉄筋が 2×10^6 回疲労強度 f_{sr200} に達するときの断面力 S_{r200} を比較し,これにより $S-N$ 線の勾配を使い分ける手法である⁷⁾。

3.1 節(1)~(2)の段階において,一律, $k=0.06$ を用いることは危険側の評価となるが,最大変動応力度 σ_{sr} が 2×10^6 回疲労強度 f_{sr200} を超えないと仮定し,工学的に割り切っている。照査法Bは,従来から提案されてきた手法であるが,数表等は主に完全片振り時の引張疲労強度 f_{sr0} で与えればよく,数表等の量を最少とできる反面,やや明快性に欠けるきらいがある。

照査法Cは,照査法Bと同様であるが,実列車荷重による最大変動断面力換算の等価繰返し回数の算定までを,安全側の評価として $k=0.12$ で行ったものである。

3.3 照査法と完全片振り時の引張疲労強度

図-6に照査法の種類が完全片振り時の引張疲労強度に及ぼす影響を示す。設計耐用期間を100年として検討

表-2 修正マイナー則 ($S-N$ 線の勾配) の適用法

照査手順	照査法		
	A	B	C
(1)列車1編成あたりの等価繰返し回数の算定	選択	$k=0.06$	$k=0.12$
(2)最大実列車荷重換算の総等価繰返し回数の算定			
(3)設計列車荷重換算の総等価繰返し回数の算定	選択		選択
(4)完全片振り時の引張疲労強度の算定			
(5)設計引張疲労強度の算定			

選択: 勾配 k および切片 σ_c を使い分ける

した。表-3に列車の検討条件を示す。列車モデルは,新幹線9形式,電車41形式,内燃動車17形式,機関車17形式および貨車10形式のJR・民鉄の代表的な列車の軸重および軸配置を精査し,これを代表するように定めた。列車本数については,近年の運行状況および'92標準を参考に定めた。

図-6に示すように,繰返し回数が増える20m未満の短スパンにおいて $S-N$ 線の変更による効果が顕著であり,例えば照査法Aでは,'92標準に比べ $30 \sim 40 \text{N/mm}^2$ 程度,高い設計引張疲労強度での設計が可能となっている。逆に,20mを超える領域では効果が小さい。この効果は,いずれの列車荷重でも同様であり,また,図-6の上段と下段の比較から,列車の構成比率が変化しても同様の傾向であることが分かる。

照査法Aと照査法Cの差は,実列車荷重による最大変

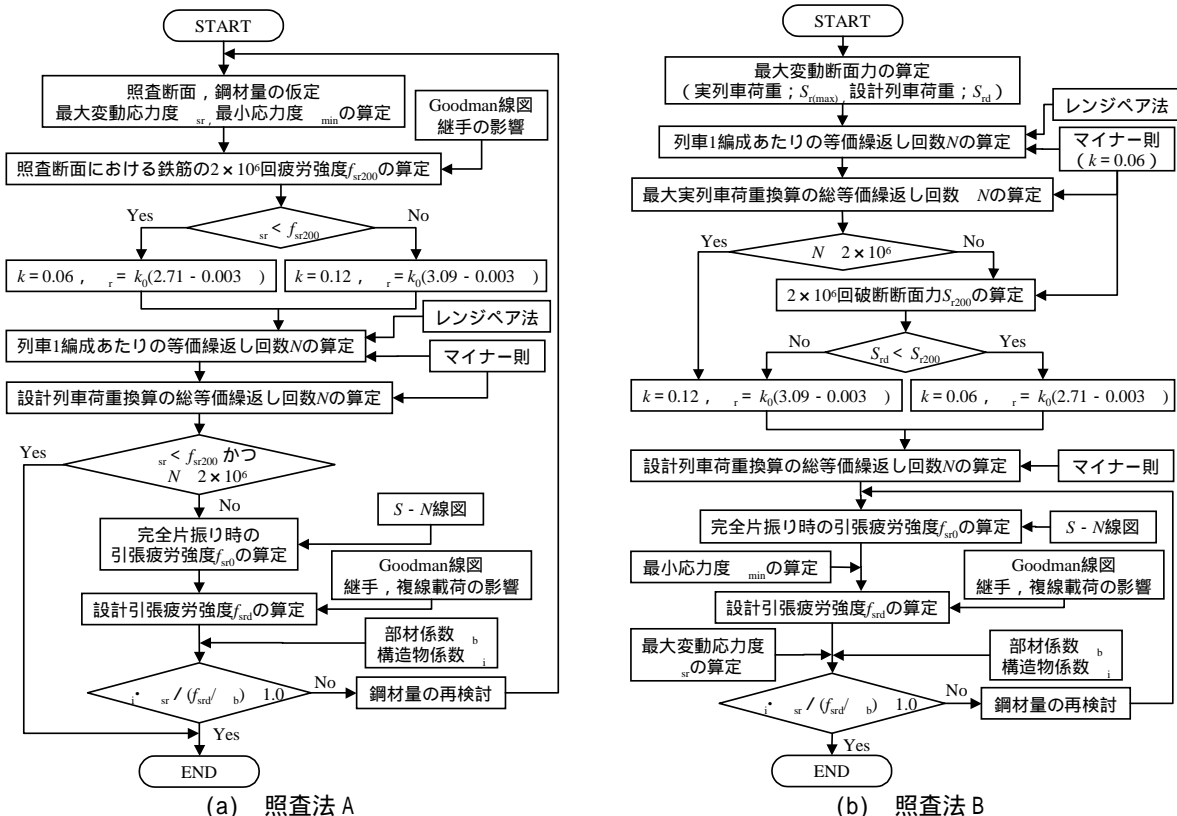


図-5 異形鉄筋の疲労破壊の照査手順

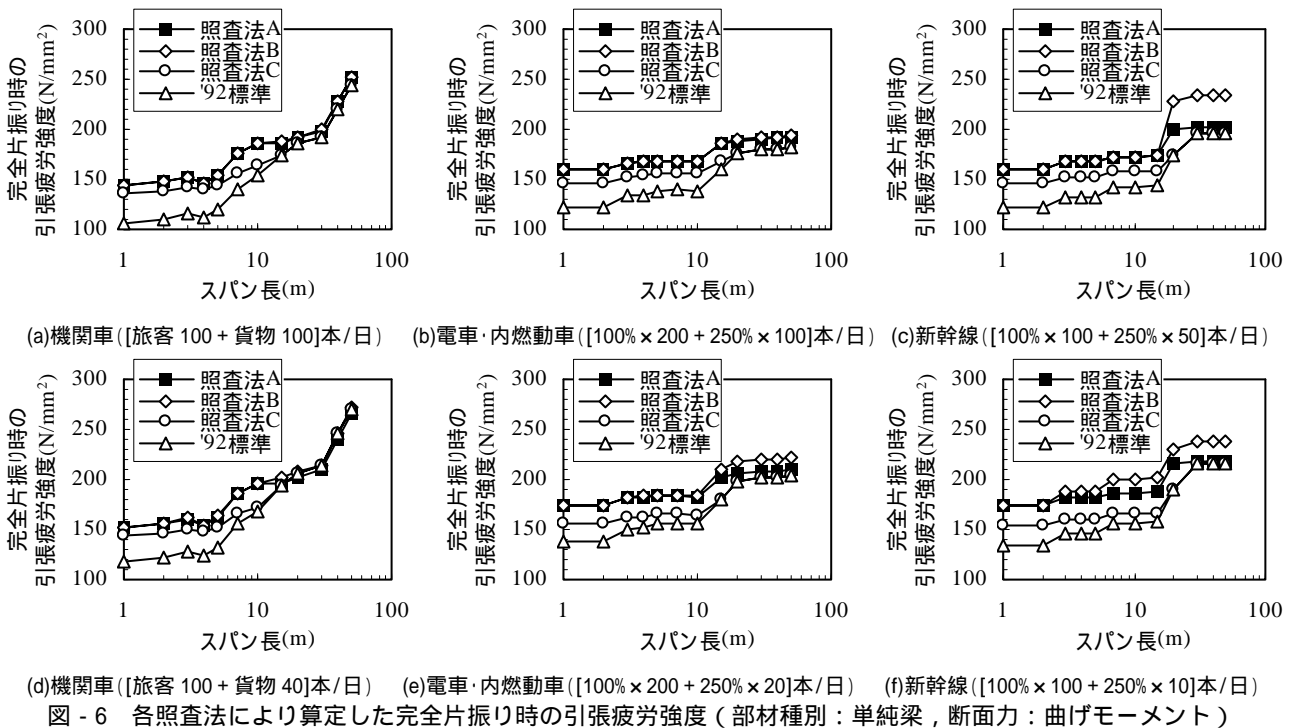


表 - 3 検討に用いた列車モデル

種別	実列車の編成および乗車率	軸重範囲(kN)	1両あたり軸配置(m)	換算用設計荷重
一般線	旅客列車: 10両編成 (100%乗車)	100 ~ 124	2.1+11.9+2.1+連結部 3.9	E-17
	貨物列車: 機関車1両 + 貨車24両編成 (満載)	機関車: 164 貨車: 145	機関車: 2.8+2.5+2.8+2.5+2.8+連結部 4.71 貨車: 1.9+12.3+1.9+連結部 4.61	
電車専用線	電車列車1: 10両編成 (100%乗車)	100 ~ 124	2.1+11.9+2.1+連結部 3.9	M-18
	電車列車2: 10両編成 (250%乗車)	130 ~ 156		
新幹線	新幹線列車1: 16両編成 (100%乗車)	107 ~ 114	2.5+15.0+2.5+連結部 5.0	H-16(軸重 160kN) 軸配置は同左
	新幹線列車2: 16両編成 (250%乗車)	130 ~ 136		

表 - 4 実構造物の照査における検討ケース

構造種別	部材種別	部材スパン長(m)	
		在来線	新幹線
RC 単純スラブ桁	主梁	10.0	
	中間スラブ	2.1	2.3
RC ラーメン高架橋	縦梁	8.0	10.0
	中間スラブ	4.5	5.3

動断面力換算の等価繰返し回数の算定までを、 $k = 0.12$ として安全側に割り切った影響であり、照査法 C と'92標準との差が、設計の最終段階、すなわち総等価繰返し回数への換算および完全片振り時の引張疲労強度の算定時に、 $S-N$ 線の変更を適用した効果であると説明できる。

照査法 B は、疲労破壊が支配的となるスパン 20m 未満で、概ね照査法 A と同様の結果となるが、20m 以上では、3.1節(1)~(2)の段階で等価繰返し回数を少なく見積り過ぎた影響から、特に新幹線荷重 (図 - 6(c),(f)) では疲労強度が極端に高くなってしまいう結果となっている。なお、図 - 6 は、単純梁の曲げモーメントの場合のみを示しているが、せん断力や、片持ち梁、両端固定梁、ラーメン構造梁等の部材についても同様の傾向であった。以上の検討を総合的に勘案して、今回の設計標準の改訂においては、照査法 A を採用することとした。

4. 疲労照査法が実設計に及ぼす影響

4.1 検討方法

$S-N$ 線の変更を考慮し、修正マイナー則を用いた照査

法が実設計の照査結果にどの程度影響を及ぼすかについて、コードキャリブレーションの観点から試算を行い検証した。

表 - 4 に対象構造物を示す。鉄道構造物において、疲労破壊が支配的となるスパン 20m 以下の代表的な部材に関して検討することとした。なお、設計耐用期間は 100 年とし、列車は表 - 3 に示したモデルを用いた。

4.2 検討結果

図 - 7 に検証結果を示す。照査法 A の照査結果を'92標準の照査結果と比較した。いずれのケースも、10m 以下のスパンに $S-N$ 線の変更の効果が現れており、照査結果が 1.1 ~ 1.3 倍程度、'92 標準よりも合理的となっている。また、その効果は列車本数にも依存しており、通常

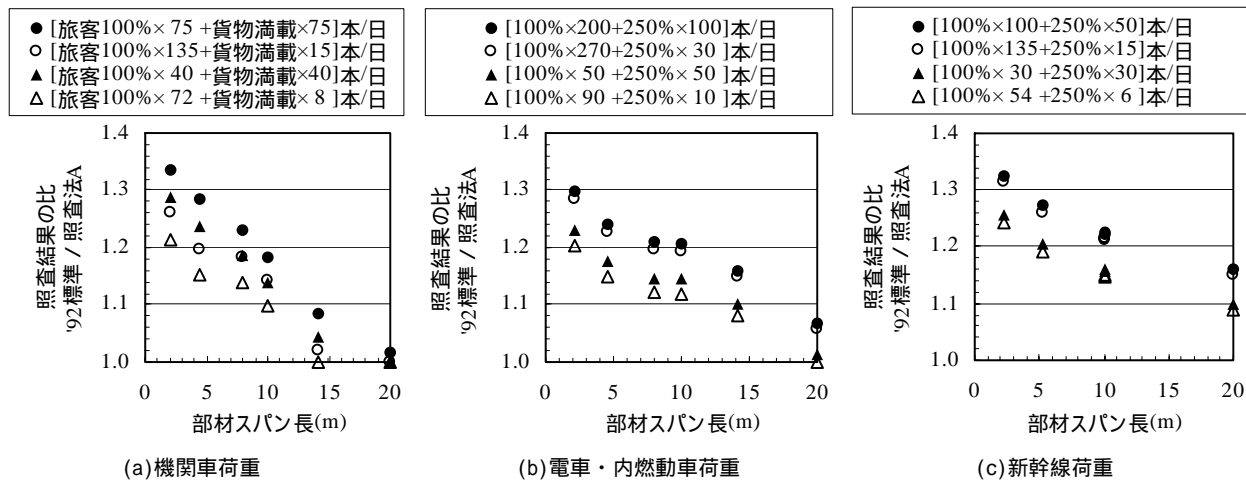


図-7 実構造物を対象とした疲労破壊の照査結果 (= $\sigma_{sr} / (f_{srd}/b)$) の新旧比較

考えられる1日あたりの列車本数(100~300本/日)の範囲内であれば、いずれの列車荷重種別、列車構成比率でも同様の効果があることが分かる。

以上の結果から、短スパン部材では、他の照査結果および構造細目を満たせば、10~20%程度の有意な鋼材減少効果あるいは断面高さ縮小効果が期待できると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめて示す。

- (1) 高繰返し領域における疲労試験に関して、既往の異形鉄筋の疲労応力振幅の算定式⁹⁾は、 10^7 回を超える高繰返し領域においても適用が可能である。
- (2) 疲労試験結果に基づいてS-N線の変更を行い、修正マイナー則を用いた具体的な疲労照査法について検討した。その結果、S-N線の勾配を、照査の全段階を通して使い分ける手法が最も適当であると判断した。
- (3) 列車荷重および部材種別ごとに、照査法が完全片振り時の引張疲労強度に及ぼす影響を検証した。上記の照査法では、短スパン部材で30~40N/mm²程度、従来よりも高い設計引張疲労強度での設計が可能となっている。
- (4) 試設計を行い、列車荷重および部材種別ごとに、照査法の改訂が実設計に及ぼす影響を検証した。(2)に示した照査法では、スパン10m以下の部材で1.1~1.2倍程度、'92標準よりも合理的となっている。

以上、疲労試験の結果に基づき、高繰返し領域での疲労照査法について提案を行ったが、列車荷重下での実構造物の応力挙動等には未解明な問題も残されている。今後ともこうした観点から、研究を進めていく予定である。

疲労試験を実施するにあたり、元(財)鉄道総合技術研究所(現 東海旅客鉄道(株))吉田幸司氏にご協力を頂いた。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道：建造物設計標準，1970
- 2) 日本国有鉄道：全国新幹線網建造物設計標準(東北，上越，成田用)，1972
- 3) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説(鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物)，1983
- 4) 伊藤文人：実働荷重による鉄道橋の疲労被害推定，鉄道技術研究報告，No.676，1969
- 5) Miner, M.A. : Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, Vol.12, pp.A159 ~ A164, 1945
- 6) Nordby, G.M. : Fatigue of Concrete - A Review of Research, Journal of ACI, Vol.55, pp.191 ~ 220, 1958
- 7) 石橋忠良，大坪正行，青木桂一；コンクリート構造物の疲労設計，国鉄構造物設計資料，No.70，pp.3 ~ 8，1982，同 No.71，pp.20 ~ 26，1982
- 8) 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)，1992
- 9) 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
- 10) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物)，1992
- 11) 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，pp.1135 ~ 1140，2003