

鉄道コンクリート部材の疲労破壊の照査に関する検討

The study on the fatigue design method of a concrete component used for a railroad

北武コンサルタント(株)	○正員	高橋貴哉	(Takatada Takahashi)
北武コンサルタント(株)	正員	渡邊忠朋	(Tadatomo Watanabe)
(財) 鉄道総合技術研究所	正員	谷村幸裕	(Yukihiro Tanimura)
(財) 鉄道総合技術研究所	正員	曾我部正道	(Masamichi Sogabe)
(財) 鉄道総合技術研究所	正員	鎌田卓司	(Takuji Kamada)

1. はじめに

鉄道橋は、列車の通過に伴い繰返し荷重を受ける。列車荷重による繰返し回数は車軸の数と配置、そして鉄道橋のスパンによって決まるため、一般に、スパンが短いほど繰返し回数は多くなる。したがって、設計耐用期間で考えると数千万回に達するため、疲労破壊の検討がしばしば設計断面の決定要因になることがある。

鉄筋コンクリート部材を用いた鉄道構造物の設計は「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物」(以下、設計標準)をもとに行なわれている。設計標準では、鉄道構造物の疲労破壊に対する照査は、部材断面の疲労耐力と材料の疲労強度がほぼ比例関係にあることから、材料の疲労強度を用いて行なうこととしてあり、その場合、異形鉄筋は引張疲労強度と疲労寿命の関係を示したS-N線図を用いて照査を行なうことになる。

従来より、鉄筋の両対数グラフによるS-N線図は疲労寿命 2×10^6 回程度以降で傾きが小さくなるといわれている²⁾。しかしながら、設計標準で用いられているS-N線図は両対数グラフ上において直線関係のものを用いている。これは、高繰返し疲労試験データの蓄積が十分でないため、繰返し回数 2×10^6 回以下の試験から得られたS-N線図の傾きを用いて、設計上安全になるようにしたためである。しかし、より合理的な設計を行なうためには、高繰返し領域における傾きを緩やかにしたS-N線図を用いる必要がある。

以上より、本検討において、まずS-N線図の傾きを疲労寿命 2×10^6 回以降で変更させた修正マイナー則を用いた疲労強度算定法を示す。続いて、列車荷重による繰返し回数が、どの程度引張疲労強度に影響を及ぼすのか確認するため、列車本数をパラメータとした検討を行う。最後に、 2×10^6 回以降のS-N線図の違いが実構造物の照査に及ぼす影響について検討を行う。

2. 疲労破壊の照査方法

2.1 照査の流れ

照査の手順を図1に示す。

列車が鉄道構造物上を通過する際の作用応力はランダムな応答波形となるため、直接、実構造物の設計にS-N線図を用いることはできない。S-N線図を用いて疲労の照査を行うには、ランダムな応答波形を一定応力(断面力)振幅に対する繰返し回数に換算する必要がある。

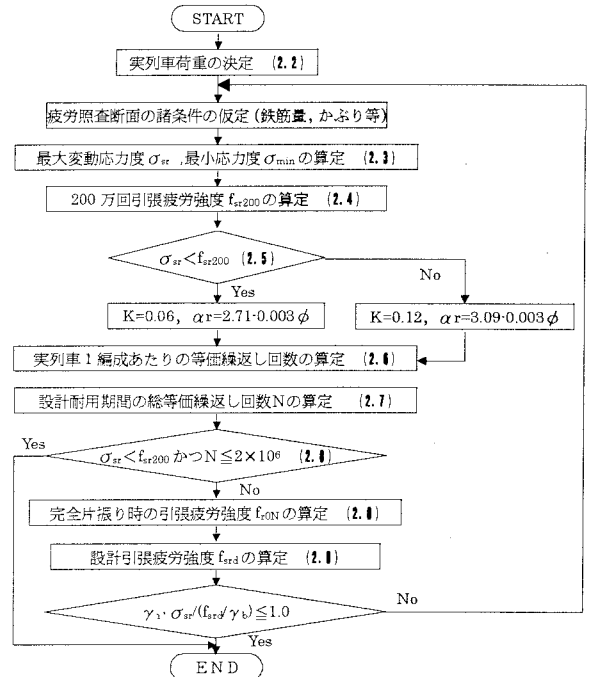


図1 疲労破壊照査手順

2.2 列車荷重の選定

列車荷重は線区によって異なる。また、同一線区においても、種々の列車形態で運行されているため、設計対象構造物の供用期間内に走行する、全ての列車形態を特定することは困難である。線区は一般線、電車専用線、新幹線があり、以後一般線に関して説明する。

多様な列車形態の種別は、気動車と機関車牽引式列車に区分されるため、この2種類の列車形態を実列車を代表とする列車形態とし、鉄道構造物に生じる繰返し回数を求めるために用いる。気動車を旅客、機関車牽引式列車を貨物として、本検討で用いる一般線の実列車荷重を表1に示す。以後、旅客列車を列車A、貨物列車を列車Bとし、それぞれについて、一日一線あたりの列車本数 j_A , j_B を設定する。また、引張疲労強度の算定には、列車AおよびBから求めた繰返し回数を合計し、それらを換算用列車荷重の繰返しに換算したものをを用いる。

一般線で用いる換算用列車荷重はJR社の機関車を基本モデルとした、軸重170kNの標準列車荷重であるE-17とする。以後、E-17を列車Cとする。

表1 実列車荷重諸元

線区	実列車および乗車率	軸重範囲(kN)	1両あたり軸配置(m)	換算用列車荷重
一般線	旅客列車：10両編成(100%)	100~124	2.1+11.9+2.1+連結部3.9	E-17
	貨物列車：機関車単機 + 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	

2.3 最大変動応力と最小応力

σ_{sr} は列車Bの通過にともない発生する引張補強鉄筋の最大変動応力度であり、疲労寿命 2×10^6 回の引張疲労強度 f_{sr200} と比較し、S-N線図の傾きを決定する際に用いる。

最小応力度 σ_{min} は永久荷重によって引張補強鉄筋に生じる応力度である。したがって、実構造物の引張補強鉄筋は $\sigma_{min} > 0$ の片振り状態になっている。これを、S-N線図上で検討するには、グッドマン線図を用いて完全片振り状態に換算する必要がある。

2.4 疲労寿命 2×10^6 回の引張疲労強度の算定

異形鉄筋の f_{sr200} は図2に示すグッドマン線図から求められる³⁾。鋼材の引張疲労強度を f_{srk} 、最小応力度を σ_{min} 、完全片振り時の引張疲労強度を f_{sro} 、鋼材の引張強度を f_{suk} で示す。この図は疲労寿命 2×10^6 回に対する最小応力と最大応力の関係を連続的に表したものであり、 σ_{min} が大きくなるにつれて、 f_{srk} が小さくなるのがわかる。ただし、厳密にはこのような関係は得られないが、安全側になることから用いている。図2より式(1)の関係が得られる。

$$f_{srk} : f_{sro} = (f_{suk} - \sigma_{min}) : f_{suk} \quad (1)$$

また、S-N線図の関係から式(2)が得られる。

$$f_{sro} = 10^{\alpha_r} / N^k \quad (2)$$

ここに、k : S-N線図の傾き

α_r : 鉄筋の径と形状を表す係数で切片を示したがって、式(1)と式(2)より式(3)が得られる。

$$f_{srk} = \frac{10^{\alpha_r}}{N^k} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{min}}{f_{suk}}\right) \quad (3)$$

鉄筋の継手、曲げ加工による低減係数 r_1 、鉄筋の材料係数 γ_s 、 $k=0.12$ 、 $\alpha_r=3.09-0.003\phi$ 、 $N=2 \times 10^6$ とすると、式(3)より f_{sr200} は式(4)になる。ここに、 ϕ は鉄筋径である。

$$f_{sr200} = r_1 \cdot \frac{10^{(3.09-0.003\phi)}}{(2 \times 10^6)^{0.12}} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{min}}{f_{suk}}\right) / \gamma_s \quad (4)$$

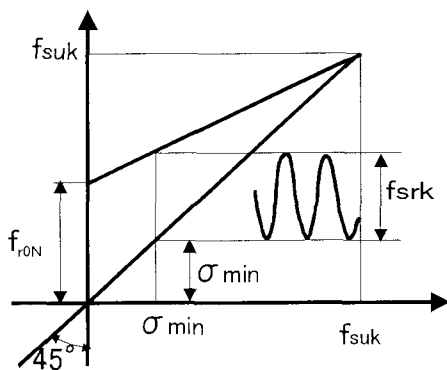


図2 グッドマン線図

2.5 S-N線図の係数選択

設計標準で用いられているS-N線図の係数は $k=0.12$ 、 $\alpha_r=3.09-0.003\phi$ である。これらは、繰返し回数 2×10^6 回以下の引張疲労試験から得られた値である。しかし、近年繰返し回数 2×10^6 回を越える疲労試験が実施されている。これらの結果も含め、吉田ら⁴⁾は高繰返し領域における異形鉄筋の引張疲労試験結果をまとめ、 $k=0.06$ 、 $\alpha_r=2.71-0.003\phi$ とすることを提案している。本検討においても、高繰返し領域においてこれらの値を用いる。

疲労の照査を行なう上で、どちらの係数を用いるか決定しなければならない。決定方法としては① σ_{sr} が f_{sr200} を超える場合は $k=0.12$ 、 $\alpha_r=3.09-0.003\phi$ 、② σ_{sr} が f_{sr200} を超えない場合は $k=0.06$ 、 $\alpha_r=2.71-0.003\phi$ を用いる。S-N線図を図3に、傾きと切片の値を表2に示す。

表2 S-N線図の傾きと切片

	選定条件	N	k	α_r
1	$\sigma_{sr} \geq f_{sr200}$	$N \leq 2 \times 10^6$	0.12	$3.09-0.003\phi$
2	$\sigma_{sr} < f_{sr200}$	$N > 2 \times 10^6$	0.06	$2.71-0.003\phi$

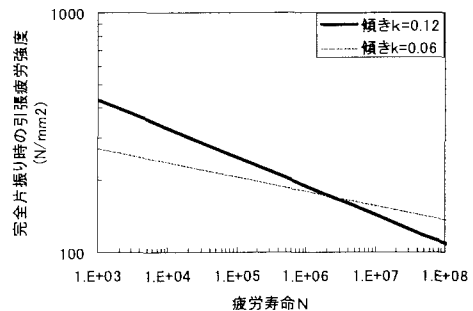


図3 S-N線図

2.6 等価繰返し回数の算定

実列車が通過する際の断面力はランダムな応答波形になる。しかし、S-N線図を用いて疲労破壊の照査を行うには一定応力(断面力)振幅に対する繰返し回数を導かなければならない。実列車1編成が通過する際のこの繰返し回数を等価繰返し回数と呼ぶ。等価繰返し回数は、レンジペア法によりランダムな応答波形を個々の独立波とその繰返しに分解し、マイナー則を用いてそれらを一定応力(断面力)振幅の繰返し回数に換算して求める²⁾。

ランダム波形を分解する方法はゼロアップクロス法等々あるが、鉄道構造物のような一方向に大小の荷重を受ける場合にはレンジペア法が適している³⁾。

今、図4(a)に示すような、断面力のランダム応答波形があるとする。波形とx軸で囲まれている部分で、複数の波が合成されている波形に着目する。着目した波形の中で、最も大きな断面力を大振幅とし、図中の斜線部を小振幅とすることで、図4(b)に示すような独立波と合成

波に分類される。以降、同作業を繰返して全て独立波に分類する。図4(b)の右側の数字は独立波の数である。

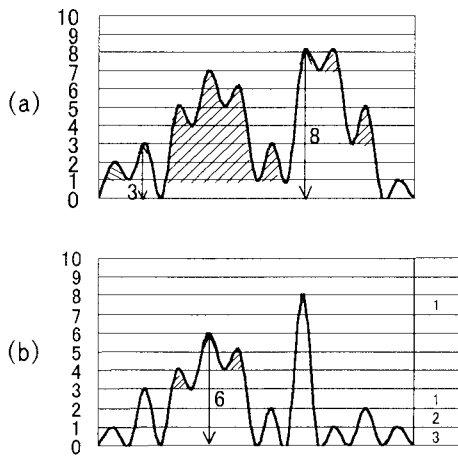


図4 レンジペア法によるランダム波形の分解

レンジペア法で得られた全ての断面力 $S_1 \sim S_m$ に対する繰返し回数を $n_1 \sim n_m$ 回、疲労寿命を $N_1 \sim N_m$ 回とすると式(5)が得られる。ここに、 M は累積損傷度である。

$$M = \sum_{i=1}^m \Delta M_i = \sum_{i=1}^m n_i / N_i \quad (5)$$

マイナー則では、累積損傷度が $M \geq 1$ の場合、疲労破壊に達するという考えである。そこで、実列車による最大断面力を S_d 、疲労寿命を N_d 、等価繰返し回数を N_{eq} とする。マイナー則を適用すると式(6)が得られる。

$$\frac{N_{eq}}{N_d} = \sum_{i=1}^m n_i / N_i = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^m n_i \cdot \frac{N_d}{N_i} \quad (6)$$

式(2)(6)より式(7)が得られ、ランダム波形から実列車荷重の最大断面力に対する等価繰返し回数が求められる。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^m n_i \left(\frac{S_i}{S_d} \right)^{1/k} \quad (7)$$

2.7 総等価繰返し回数の算定

総等価繰返し回数は、設計耐用期間における等価繰返し回数の合計を意味する。しかし、実列車ごとに最大断面力が異なるため、列車Cによる最大断面力に対する等価繰返し回数に換算してから足し合わせる。総等価繰返し回数 ΣN を式(8)に示す。

$$\Sigma N = 365 j_A \cdot N_A \cdot \left(\frac{S_A}{S_C} \right)^{1/k} + 365 j_B \cdot N_B \cdot \left(\frac{S_B}{S_C} \right)^{1/k} \quad (8)$$

ここに、 T : 設計耐用期間(年)
 S_A, S_B, S_C : 各列車荷重による最大断面力
 N_A, N_B : 実列車に換算した等価繰返し回数

2.8 引張疲労強度の算出

図1に示すように、 f_{sro} を算定する前に場合分けが行われる。すなわち、 σ_{sr} が f_{sr200} を超えず、かつ ΣN が 2×10^6 回以下の場合には、設計耐用期間内に疲労破壊が生じないため後の照査を省略する。

上述に含まれない場合は、完全片振り時の引張疲労強度を式(2)から求める。設計引張疲労強度 f_{srd} は、式(3)の f_{srk} に鉄筋の継手、曲げ加工による低減係数 r_1 と複線を支える部材における荷重負担比による補正係数 r_2 を乗じ、鉄筋の材料係数 γ_s で除して求める。

3. 列車本数が疲労強度に与える影響

3.1 列車形態の違いが与える影響

旅客列車と貨物列車の比率が完全片振り時の引張疲労強度に与える影響を確認するために、表3に示す列車本数で検討を行う。図5に完全片振り時の引張疲労強度を、図6にCASE1を基準にした比を示す。計算に用いた鉄筋径は32mmである。

図5, 6より、貨物列車に対する旅客列車の比率が16倍になると、疲労寿命 2×10^6 回以上において約8%、それ未満において約17%強度が増加した。つまり、貨物列車の割合が小さくなるほど、 f_{sro} は大きくなるということである。これは、 ΣN の計算に用いる断面力比 S_B/S_C が S_A/S_C よりも大きいためである。スパン5mにおいて j_B が1増えるのと j_A が1増えるのとは、断面力比が異なるため、繰返し回数の増加に対して約40倍の差がある。

ここで、スパンが15m~20mの間で図6に示す比が急変しているが、これは $\sigma_{sr} > f_{sr200}$ より、 k が0.06から0.12に変化したためである。

表3 検討ケース

	列車本数(本/日)		比		比	
	旅客列車(A)	貨物列車(B)	j_A	j_B	j_A	j_B
CASE1	20	80	1	4	0.25	1
CASE2	40	60	1	1.5	0.6667	1
CASE3	50	50	1	1	1	1
CASE4	60	40	1	0.6667	1.5	1
CASE5	80	20	1	0.25	4	1

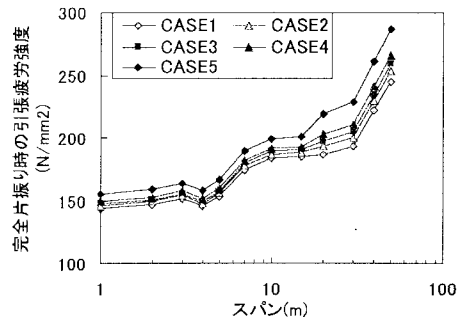


図5 完全片振り時の引張疲労強度(比率変化)

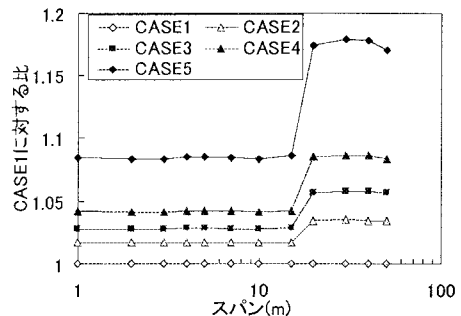


図6 CASE1に対する比

3.2 総列車本数が与える影響

旅客列車と貨物列車の総列車本数が完全片振り時の引張疲労強度に与える影響を確認するため、表4に示す総列車本数で検討を行う。図7に完全片振り時の引張疲労強度を、図8にCASE10を基準にした比を示す。計算に用いた鉄筋径は32mmである。

比率を一定とした場合、 f_{sro} の差は完全に総等価繰返し

回数に依存される。したがって、図8が一定になっていることがわかる。この差は、比率に関係なく総等価繰返し回数の k 乗となる。したがって、総列車本数が2倍になれば、 f_{sr0} は $(1/2)^k$ 倍になる。

表4 検討ケース

	列車本数(本/日)		比	
	旅客列車(A)	貨物列車(B)	j_A	j_B
CASE6	30	30	1	1
CASE7	40	40	1	1
CASE8	50	50	1	1
CASE9	60	60	1	1
CASE10	70	70	1	1

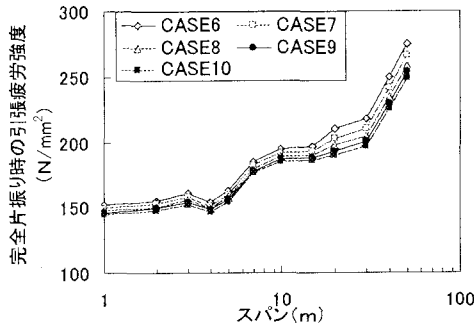


図7 完全片振り時の引張疲労強度(総列車本数一定)

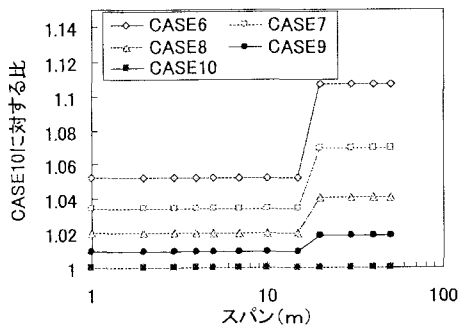


図8 CASE10に対する比

4. 2×10^6 以降のS-N線図の違いによる照査結果の影響

修正マイナー則を取り入れた照査法が実構造物の設計に対して、どの程度の効果があるか確認するため、RC単純桁を対象に照査を行なった。スパンは1~50mとし、永久荷重を104kN/mとする。検討に用いる列車荷重は表1に示すものを用いる。なお、設計耐用期間は100年とし、列車本数は両実列車とも50本/日とする。

図9に完全片振り時の引張疲労強度を示す。スパン30mまでが $\sigma_{sr} < f_{sr200}$ の範囲である。この範囲のうちスパン10mまでに、改定案の効果が見られ、強度にして5~20%増加した。

スパン10~30mの間で現行設計基準の値より小さくなっている。これは、 $\sigma_{sr} < f_{sr200}$ かつ $\Sigma N \leq 2 \times 10^6$ であることから、設計耐用期間内に疲労破壊が生じない範囲であることがわかる。

図10に設計引張疲労強度と設計変動応力度を示す。設計引張疲労強度が設計変動応力度よりも大きければ照査上安全であることを意味する。スパン15mおよび20mにおいて、現行設計基準および改定案ともに設計変動応力度と同程度かそれ以下になっている。このような場合、

現行設計基準では鉄筋量の再検討を必要とするが、改定案では上述したように、疲労破壊が起こらない範囲にあるので鉄筋量の再検討は必要としない。

以上のように、改定案を用いることで合理的な設計を行なうことができる。

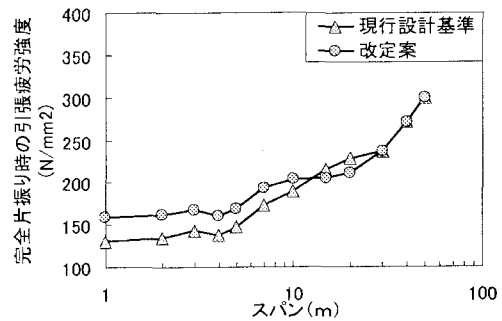


図9 RC単純桁の完全片振り時の引張疲労強度

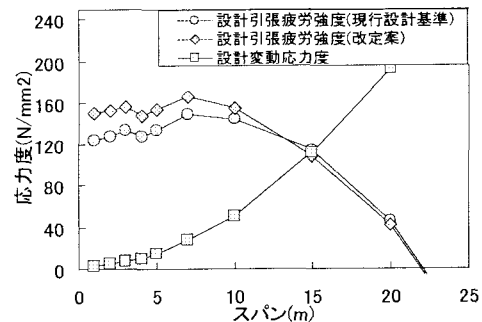


図10 設計引張疲労強度および設計変動応力度

5. まとめ

本検討によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 修正マイナー則を用いた疲労照査法として疲労寿命200万回の引張疲労強度を用いてS-N線図の傾き k を選択する方法を提案した。
- 2) 総列車本数を一定とし、実列車の比率を変化させた場合、完全片振り時の引張疲労強度は、軸重の大きい貨物列車の比率の影響を大きく受ける。
- 3) 実列車の比率を一定とした場合、総列車本数が x 倍になると、完全片振り時の引張疲労強度が $(1/x)^k$ 倍になる。
- 4) 現行設計基準と改定案による設計引張疲労強度を比較した結果、改定案を用いることで短スパン部において5~20%の強度が上方修正された。また、設計引張疲労強度が同程度で設計変動応力度よりも小さく判断された場合でも、改定案による照査では疲労破壊は生じないと判断されるケースが見られた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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(1), 国鉄構造物設計資料 No.70, pp.3-8, 1982.6.
- 3) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計, pp.235-237, 1995.6.
- 4) 吉田幸司, 鎌田卓司, 谷村幸弘, 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.2190, pp.1135-1140, 2003.6.