

本州四国連絡橋公団 正員 田島二郎

正員 奥川淳夫

○正員 田中美宇

1. 概要

本四連絡橋においてはAルート(本四淡路線)で新幹線複線, Dルート(本四備讃線)で新幹線・在来線の複々線となる。このため設計寿命100年間に列車本数がおおよそAルートで550万本, Dルートで950万本となり, 疲労に対する荷重の累積効果を考慮する必要性が生じた。また, 橋梁上で列車が同時載荷されると単線載荷よりも大きな応力変動を生じるので, この複線載荷回数を確率的に求め単線載荷と共に修正直線累積被害法則を用いて疲労計算を行なった。実際, 列車荷重にはバラツキがあるので頻度分布を仮定して, 疲労への影響を考慮してみた。ここでは特に, 吊橋補剛トラスの疲労設計法について述べる。

2. 基本的考え方

- i) S-N線は, 両対数方眼紙上で折線として与えられるものとする。
- ii) 疲労強度は応力振幅のみで決まり, 実用上平均応力の影響は無視できるものとする。
- iii) 疲労寿命は修正直線累積被害法則によって推定できるものとする。
- iv) 設計寿命期間において列車ダイヤはランダムと考える。
- v) 現在推定されている将来の輸送量は, 疲労寿命推定と同程度の精度で正しいものとする。

3. S-N線図

繰返し数 $\bar{N} = 2 \times 10^6$ を境に, 勾配 $k_1 (=0.2)$ と $k_2 (=0.1)$ を持つ折線とした。すなわち,

$$\sigma \geq \sigma_a \quad (N \leq \bar{N}) \text{ の範囲に対して } \log \frac{\sigma}{\sigma_a} = -k_1 \log \frac{N}{\bar{N}} \quad (1)$$

$$\sigma \leq \sigma_a \quad (N \geq \bar{N}) \text{ の範囲に対して } \log \frac{\sigma}{\sigma_a} = -k_2 \log \frac{N}{\bar{N}} \quad (2)$$

と表わすこととした。

実際材料の挙動はキ裂発生までと発生後では本質的な相違があり, キ裂発生から破断までの挙動は試験片の寸法・形状等に影響され, 実構造物の挙動を再現しているとはいえないので, 修正直線累積被害法則はキ裂発生繰返し数 N_c で整理した方がよいと考えられる。しかし, N_c の実験データが乏しいこと, 又 N_c の定義づけが曖昧な事等により破断繰返し数 N_f を用いて S-N 線を表示することにした。

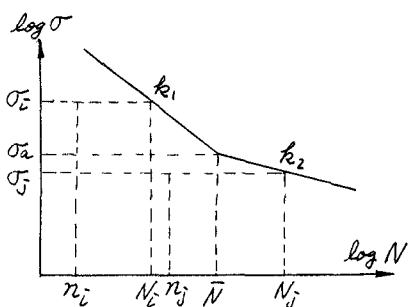


図-1

4. 修正直線累積被害法則による部材の所要断面積

ここで, $\sigma_i (= P_i/A) \geq \sigma_a$ なる荷重変動 P_i ($i=1, 2, \dots, n$) がそれぞれ n_i ($i=1, 2, \dots, n$) 回繰返されたとし, また $\sigma_j (= P_j/A) \leq \sigma_a$ なる荷重変動 P_j ($j=1, 2, \dots, m$) がそれぞれ n_j ($j=1, 2, \dots, m$) 回繰返されたとする。式(1), (2)を書き変え $\sum n_i/n_c$ が1に達した時破断と考えると,

$$\sigma_i^{1/k_1} \cdot n_i = \sigma_a^{1/k_1} \cdot \bar{N} \quad (P_i/A \geq \sigma_a \text{ の範囲}) \quad (3)$$

$$\sigma_j^{1/k_2} \cdot n_j = \sigma_a^{1/k_2} \cdot \bar{N} \quad (P_j/A \leq \sigma_a \text{ の範囲}) \quad \text{となり,} \quad (4)$$

$$\sum \frac{n_i}{N_c} \leq 1 \text{ より } 1 \geq \frac{1}{(\sigma_a \cdot A)^{1/k_1}} \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{\bar{N}} P_i^{1/k_1} + \frac{1}{(\sigma_a \cdot A)^{1/k_2}} \sum_{j=1}^m \frac{n_j}{\bar{N}} P_j^{1/k_2} \quad \text{を得る。} \quad (5)$$

ここに, A : 所要断面積, P_i : 荷重変動範囲, σ_i : 応力変動範囲, n_i : P_i の繰返し数, N_c : 一定の応力変動 σ_c で, 繰返しが行なわれたときの破断繰返し数 である。

また、基準とする荷重変動 P_0 を任意に選んで、 P_i, P_j を次のように表わすことができる。

$$P_i = f_i \cdot P_0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad , \quad P_j = f_j \cdot P_0 \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

$$k_1=0.2, k_2=0.1 \text{ であり, 式(6)を式(5)に代入すると } A \geq \alpha \frac{P_0}{\sigma_a} \text{ を得る。} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに, } \alpha &= \left(\frac{C_1 + \sqrt{C_1^2 + 4C_2}}{2} \right)^{1/5} ; \text{断面積割増率} \\ C_1 &= \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N} f_i^5, \quad C_2 = \sum_{j=1}^m \frac{n_j}{N} f_j^{10} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

5. 設計寿命と列車本数

橋梁の設計寿命は100年と考え、1日片線当り所要列車本数は昭和65年の推定値をとって次の値とする。

Aルート：新幹線旅客 75本/日/線 (12両編成, 乗車効率80%)

Dルート：新幹線旅客 14本/日/線 (" ")

在来線旅客 29本/日/線 (8両編成, 乗車効率90%), 在来線貨物 86本/日/線

6. 荷重分配

複線および複々線においては列車は偏載荷重となる。従来の主構の設計においては、安全側をみて横桁を単純桁として主構への荷重分配を行ない、主構を平面解析で解く方法によって設計されていたが、本四橋においては立体解析(ぬじり解析含)を用いて疲労設計も行なっている。又本四吊橋においては、ぬじり剛性および付属構せん断剛性が大きくなっているため列車偏載の両主構への荷重分配は0.5に近い結果となっている。従って、どの軌道載荷しても、主構の応力変動の影響は大きいのでそれを考慮して疲労累積効果を検討する。

7. 列車荷重

実際列車荷重には乗車率、積載量によってバラツキを生じている。さらにこのバラツキを持った荷重が橋上で複線載荷されたりする訳であるが、ここでは新幹線・在来線貨物と旅客の三種類の荷重タイプを決めた後で複線載荷の影響を検討する。荷重タイプを決定するためには、バラツキのある荷重を単に算術平均するのではなく、疲労累積効果が変わらないように等価換算荷重を求める。

算術平均した荷重を $\bar{P}_0$ とするとバラツキを持つ荷重は、

$$P(f) = f \cdot \bar{P}_0 \quad \text{ただし, } f_a \leq f \leq f_b \quad (9)$$

と表わすことができる。いま $P(f)$ の頻度分布は確率密度関数 $g(f)$ を用いて図-2のように与えられるものとする。ここに、疲労累積効果 $\sum \frac{n_i}{N}$ を表わす式(5)を用いて等価換算荷重 $f_0 \cdot \bar{P}_0$ を求めると、

$$f_0 = \left\{ \beta^{1/k_1 - 1/k_2} \int_{f_a}^{f_b} g(f) \cdot f^{1/k_1} df + \beta^{1/k_2 - 1/k_1} \int_{f_a}^{\beta} g(f) \cdot f^{1/k_2} df \right\}^{k_2} \quad (10)$$

ここに、 $f_0 \geq \beta$ のときは $k_1=k_1$, $f_0 \leq \beta$ のときは $k_1=k_2$

又、式(10)の中の β は図-3からもわかるように $\sigma_a = \beta \cdot P/A$ (11)

を満足している。S-N線が直線ならば等価換算荷重 $f_0 \cdot \bar{P}_0$ は

$$f_0 = \left[\int_{f_a}^{f_b} g(f) \cdot f^{1/k} df \right]^{k_2} \quad \text{で与えられる一定値と} \quad (12)$$

なるが、式(10)からもわかるようにS-N線が折線になると β 値の変化によ

って、つまりS-N線のどの部分に荷重のバラツキが分布しているかによって、等価換算荷重の値が変わってくる。今、例として図-4に示すような $g(f)$ を用いると、図-5に示す f_0 の値を得る。このとき f_0 は1.06~1.14の間に分布しており、中間値として $f_0=1.1$ を採用する。新幹線の $\bar{P}_0$ として2.56t/m(軸重16t, 車両長25m, 100%乗車)を用いると $P_3=1.1 \times \bar{P}_0=2.816$ t/mとなる。又在来線貨物においては、全国貨車平均両数および宇高航送の実績によると $\bar{P}_0=2.5 \sim 2.6$ t/m

g(f)

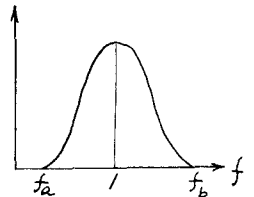


図-2

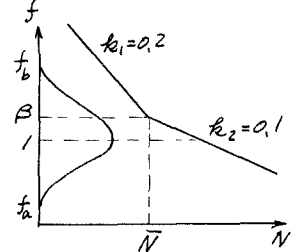


図-3

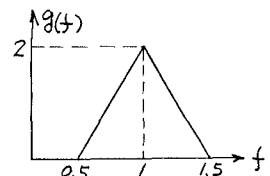


図-4

であるので $P_z = 2.75 \sim 2.86\%$ となる。吊橋の疲労設計荷重として新幹線・在来線共に 2.7% (本設計基準) が用いられていたが、この計算結果によると 2.7% の 5% 位大きくした荷重を用いる必要がある。しかし設計荷重としての 2.7% は変えないで、この 5% 以上は後に示す断面積割増率の中に考慮する。又在来線旅客の荷重としては貨物の $1/2$ とした。その他の列車条件は表-1の値を用いて計算を行なう。

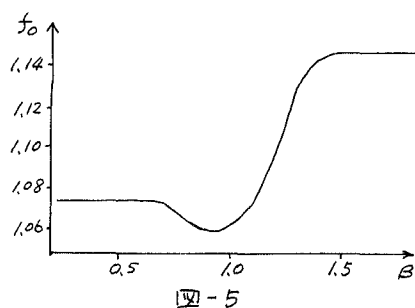


表-1

	荷重強度 t/m	列車長 m	速度 km/hr
新幹線	2.7×1.05	400	160
在来線旅客	1.35×1.05	400	70
在来線貨物	2.7×1.05	400	70

8. 複線載荷を考慮した繰返し数

ここでは複線(Alt)の場合の橋上での列車すれ違いによる複線載荷の確率的取り扱いについて示す。着目部材の応力変動を求めるためには、影響線を用いて1列車が通過した場合の応力変化線を求める必要がある。ここで使用する影響線はトラス弦材については曲げ、斜材についてはせん断力の影響線を用いた。図-7のように応力変化線が求められたとするならば、簡略化して破線のような矩形波の応力変化線に置き換える。さらに横軸が距離であるのを列車速度 V で割って図-8に示すように時間軸に変換する。 $t_i = L_i / V$ ($i = 1, 2, 3$) (13)

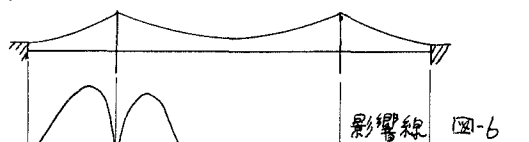
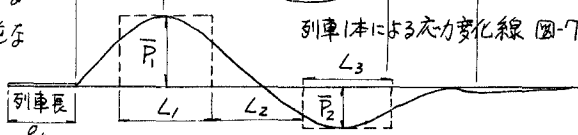


図-8と同じ応力変動図を上り線と下り線について求めると図-9を得る。このとき上下線では列車進行方向が逆なので、時間を横軸にした応力変動図は逆に生じる。



(1) 複線載荷

複線載荷の確率計算は、図-9において次の(i), (ii)

の場合だけを考え、 $\bar{P}_1^u$ と $\bar{P}_2^d$ あるいは $\bar{P}_2^u$ と $\bar{P}_1^d$ で重なるような場合は応力符号が逆になり応力変動範囲が小さく考えられるので、複線載荷としては取り扱わず単線載荷として考慮する。

(i). $\bar{P}_1^u$ と $\bar{P}_1^d$ の部分で上下線が重なる場合 (図-10)

設計寿命(100年)中の繰返し回数は確率計算より

$$N_i = (t_1^u + t_1^d) \times n_t^u \times n_t^d \times 365 \times 100 / T \quad (14)$$

ここに、 n_t^u, n_t^d : 上下線の1日当り列車本数

T : 1日当り列車運転時間(16時間とした)

1回の複線載荷ごとに range pair count method (以下M.P.C法と呼ぶ) を適用すると、それぞれ荷重変動と繰返し数が次のように求まる。

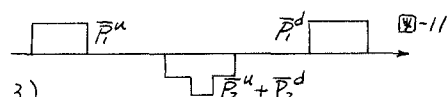
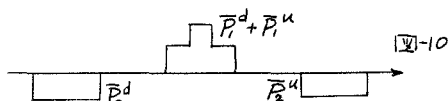
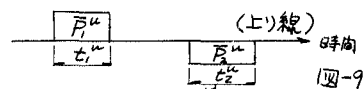
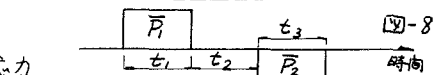
($\bar{P}_2^d > \bar{P}_2^u, \bar{P}_1^d > \bar{P}_1^u$ の場合も考える)

$$A: P^A = \bar{P}_1^d + \bar{P}_1^u + \bar{P}_2^d, N_i^A = N_i \quad B: P_i^B = \bar{P}_2^u, N_i^B = N_i \quad (15)$$

(ii) $\bar{P}_2^u$ と $\bar{P}_2^d$ の部分で上下線が重なる場合 (図-11)

$$N_{ii} = (t_2^u + t_2^d) \times n_t^u \times n_t^d \times 365 \times 100 / T \quad (16)$$

$$A: P_{ii}^A = \bar{P}_2^u + \bar{P}_2^d + \bar{P}_1^d, N_{ii}^A = N_{ii} \quad B: P_{ii}^B = \bar{P}_1^u, N_{ii}^B = N_{ii} \quad (17)$$



(2) 単線載荷

単線載荷の繰返し数は、寿命期間中の全列車本数から複線載荷本数を引いた回数になる。

$$\text{上り線: } P_s^u = \bar{P}_1^u + \bar{P}_2^u, N_s^u = n_t^u \times 36500 - (N_i + N_{ii}), \text{ 下り線: } P_s^d = \bar{P}_1^d + \bar{P}_2^d, N_s^d = n_t^d \times 36500 - (N_i + N_{ii}) \quad (18)$$

ここで例示したのは複線の場合であるが、複々線の場合も同様に計算すればよい。ただし、複々線の場合でも本四吊橋においては3線以上同時載荷はしないので複線載荷まで考慮あればよい。ここで所要断面積を求めるには、式(15)、(17)、(18)を式(7)、(8)に代入すればよい。

9. 断面積割増率

式(7)に示す P_0 として設計荷重による荷重変動 P_{ds} を用いると $A \cong \alpha \cdot P_{ds} / \sigma_a$ (19)

となり、 α は P_{ds} を200万回疲労許容応力度 σ_a で割って求める断面積の割増率を意味する。

次に、大鳴門橋(Aルート)と南備讃瀬戸大橋(Dルート)についての計算結果を示す。

(1) 大鳴門橋

設計 第3法	弦 材		傾斜側 斜材材
	中向支点上	中央係向 中央	中向支点上
I	1.22	1.21	1.23
II	1.19	1.21	1.19

注：計算法

I；極限的な状態として、最も危険側になるように複線載荷を交互に発生させて、ト・プ・C法を適用した場合。

II；1回ごとの単線または複線載荷に対してト・プ・C法を適用した場合。

(2) 南備讃瀬戸大橋

中向支点上弦材 $\alpha = 1.30$ (計算法 II)

ここで求めた α 値は、設計荷重として2.7t/mを1線載荷した場合に対する断面積割増率を示す。又列車荷重のところで検討した2.7t/mの5%増しについては上記の α 値にすでに考慮してある。

ここに、この α 値を設計に反映させるには、

- (i) P_{ds}/σ_a に α を掛けて所要断面積を求める。
- (ii) 許容応力度 σ_a を低減させて、 σ_a/α を用いる。
- (iii) 設計列車荷重をさらに α 倍する。

などの方法が考えられるが、本四吊橋においては(ii)の考え方を用いることにした。

10. 許容応力の低減率

(1) 大鳴門橋 (Aルート)

$\alpha = 1.23$ を用いても $1/\alpha = 0.813$ であるので許容応力の低減率は80%とした。

(2) 南備讃瀬戸大橋 (Dルート)

Iの計算法では計算していないが、3%のupを見込んで $\alpha = 1.33$ とすると $1/\alpha = 0.752$ となるので、許容応力の低減率は75%とした。

最後に、この疲労計算法をとりまとめるに当り懇切に御教授いただいた 東京都立大学伊藤文人教授に紙上をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤文人 “実働荷重による鉄道橋の疲労被害推算法” 鉄道技術研究報告 No. 676 1969年4月
- 2) 48年度疲労分科会報告書 “別冊2 本州四国連絡橋の疲労設計” 土木学会・疲労分科会 S. 49. 3月
- 3) 白石隆義 “疲労に関する一般常識” 溶接技術 1964年1月～4月 連載
- 4) 白石隆義 “疲労知識” 溶接技術 1969年7月～11月 連載