I－5 本州四国連絡橋の疲労設計

本州四国連絡橋公団　正員　田島二郎
○正員　奥川淳志
正員　田中美宇

1　まえがき

従来の鉄道橋は41キロ鋼および50キロ級鋼により作られ，最近になって60キロ級鋼が設計標準[1]にとり入れられた。本四連絡橋では60キロ級鋼までの使用はもとより，70，80キロ級鋼までの調質高張力鋼の相当量の使用が考えられている。これらに対する疲労許容応力度は当然のことながら鋼鉄道橋設計標準には規定されておらず，新たに定める必要がある。

また本四連絡橋は鉄道・道路が併用するために道路幅員の関係で従来の複線鉄道橋に比べて主構幅が大きくなっており，また耐風性の考慮からも剛な対傾構が設けられ橋のねじり剛性が増大している。このため注目する主構応力に及ぼす影響は従来の単線載荷の場合についてのみ疲労照査を行ってきたものに比し，他の側の軌道に載荷した場合の影響も考慮する必要が生じてきた。[2]

以上のような背景をもとに，60キロ級鋼から80キロ級鋼までの疲労許容応力度と列車荷重の累積効果の影響を検討してきたので，ここにその概要を述べるものである。

2　疲労許容応力度

疲労許容応力度の決定にあたり，昭和47年度より内外の疲労試験結果を検討し，また必要な疲労試験を実施してきた。しかし橋梁を構成する構造細部，継手形式は多種多様であるので，ここではその基本的なものをとりあげて本四連絡橋の疲労許容応力度の基本的な考え方を述べることにする。

2・1　継手の等級分類

各種継手の疲労強度は本質的にバラツキの大きいものであり，一義的に疲労許容応力度を定めることはできないが，鋼鉄道橋設計標準に準じて各々の継手を分類した。即ち表－1に示すようにそれぞれの疲労強度に応じて直応力を受ける場合を4グループ（A―D）に，せん断応力を受ける場合を3グループ（S_1～S_3）に等級分類した。

表－1　継手の等級分類

応力の種類	等級分類	継手の種類
引張・圧縮	A	1. 母材（側面仕上げ）
		2. 高力ボルト摩擦接合の母材
		3. グルーブ溶接の母材と溶着部（仕上げ）
		4. 縦ビードのある母材
		5.
		6. 切抜きガセット
	B	8. スチフナー（仕上げ）のある母材
		9. ガセットを突合せ溶接（仕上げ）で取付けた母材
	C or D	10. スチフナー（仕上なし）のある母材
		11. ダイヤフラムを取付けた母材
		12 カバープレート端
		13. 応力に直角なK溶接
		14. ガセットをすみ肉溶接（仕上げ）で取付けた母材
せん断	S_1	17. 母材
		18. 連続すみ肉
	S_2	側面すみ肉
	S_3	19. 前面すみ肉

2・2　許容応力度の一般式

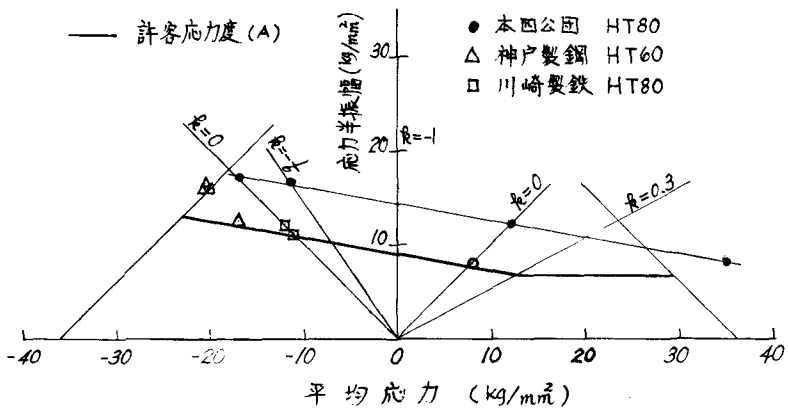
各等級分類に対し，一組の式 $\sigma_{a0}/(1-\alpha k)$ によって許容応力度を規定する。ここに σ_{a0} は基本疲労許容応力度，k は応力比，$\frac{|\sigma|_{min.}}{|\sigma|_{max.}}$ で片振りの場合には正，両振りの場合には負である。また α は平均応力－（最大応力＋最小応力）/2－の影響を示すパラメーターである。

2・3 平均応力の影響

平均応力の影響は一般的に応力集中の小さい程，応力変動のうち圧縮応力成分が大きくなる程大きいといわれている。橋梁上部構造の種々の継手のうち，いわゆる縦ビード溶接継手が形状による応力集中が比較的小さい上に残留応力が外力の作用方向に重畳するために，最も大きく平均応力の影響を受けるものと思われる。図－1に示される●印は平均応力を変えながら行なった縦ビード溶接継手の疲労試験結果[3)4)]を示すが，これらの点を結ぶ直線は図上で約$-\frac{1}{6}$の勾配を有しており，かつ各方面で行なわれた試験結果全体の5％破壊確率の疲労強度と圧縮片振疲労実験において引張残留応力の影響でき裂の生じたデータとを結ぶ直線の勾配にも一致している。この勾配を2・2によるパラメータαに書き換えると引張側でα≒0.7，圧縮側でα≒1.4となる。この結果は各種継手のうち最も平均応力の影響の大きいと考えられる縦ビード試験片によるものであるが，他の溶接継手についても適用するものとする。

一方最近リブ十字溶接継手のように溶接部の応力集中が大きい継手形式や溶接組立Iビームの疲労試験結果によると，主として平均応力が引張側である場合に平均応力の影響は小さくなり，疲労強度を振幅で表示したときに試験結果に有意差がないという報告[5)6)]がある。図－2は当公団が行なったリブ十字溶接継手の実験結果を示すものであるが，やはり平均応力が正の場合にはその影響は小さいことがわかる。

以上の結果を勘案し本四連絡橋の疲労許容応力度においては$k \leqq 0.3$（引張）では平均応力の影響はないとしてα＝1.0とし，$-1.0 \leqq k \leqq 0.3$（引張）および$-1.0 \leqq k \leqq 1.0$（圧縮）ではそれぞれα＝0.7およびα＝1.4とすることにした。



図－1 縦ビード溶接継手（200万回）

2・4 基本疲労許容応力度 σ_{a0}

一般に高張力鋼の疲労強度は溶接継手のような切欠作用のある場合には軟鋼などに比べて，引張強度の増加の割には高くならないことは良く知られている。従って鋼種毎に許容応力度を変化さ

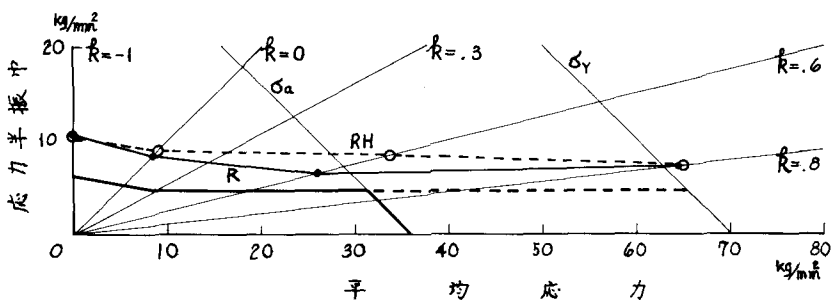


図-2 リブ十字溶接継手（200万回）

せることはあまり意味がなく，また使用する面においても繁雑であるので，60キロ級鋼から80キロ級鋼まで鋼種によらずに一つのσ_{ao}を規定することにした。次に2，3の代表的な溶接継手の基本疲労許容応力度について述べる。

1）　縦ビード溶接継手

図－3には80キロ級鋼について行なわれた引張片振疲労試験のS－N線図を示す。また図－1は40～80キロ級鋼における種々の実験結果より，200万回，5％破壊確率の値を示している。図－1よりわかる様に80キロ級鋼の200万回，5％破壊確率強度は約15.6 kg/mm² とかなり低い値が得られたが，図－3では16 kg/mm² 以下で破断したデータは見当らない。これは5％破壊確率を求めるに際しS－N線を直線近似しているためであるので，縦ビード溶接継手の基本許容応力度として鋼鉄道橋設計標準に習ったσ_{ao}＝1530 kg/cm²（k＝0）を基準としてAグループとしても良いと思われる。ただし，図－1にも示すように60キロ級鋼以上では残留応力が比較的高いため圧縮応力下でも疲労き裂が発生することがあるので注意を要する。

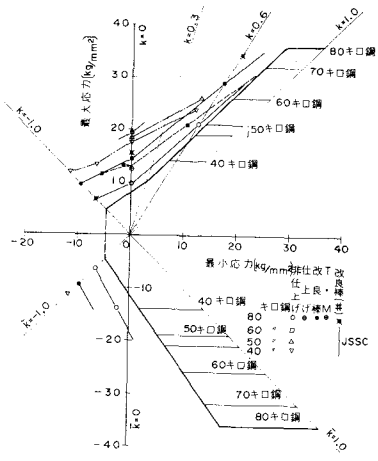
2）　ガセットの突き合せ溶接継手

ガセットを突き合せ溶接で取付けた母材についての疲労試験は土研[7]と本四公団が行なっており，図－4には本四公団の実験結果を示した。図－4より200万回疲労強度はk＝0.6で14 kg/mm²，k＝0で11 kg/mm²，k＝－1で16 kg/mm² 程度であることがわかり，k＝0のとき多少低目の結果となっている。しかし土研の結果では，k＝0のとき25 kg/mm² とかなり高い強度を得ているので，とりあえずσ_{ao}＝1275 kg/cm²（k＝0）としてBグループとした。

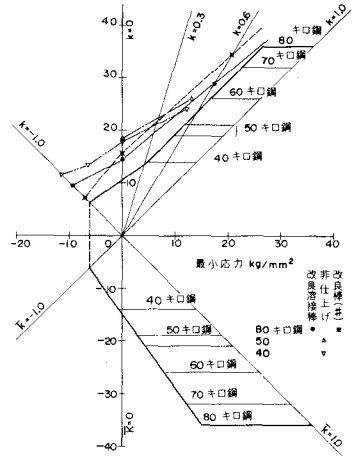
3）　リブ十字溶接継手

リブ十字溶接継手の試験は他の継手に比べ多く行なわれており，これらの結果の200万回5％破壊確率疲労強度を求めてまとめると図－7のようになる。これからわかるようにビード止端を仕上げない場合疲労強度は高強度鋼になる程低下しており，80キロ級鋼の強度は約9.8 kg/mm² であり，また図－5に示す様にデータの中には9 kg/mm² で破断するものも含まれている。これらの結果から，リブ十字溶接継手の基本許容応力度としてはσ_{ao}＝805 kg/cm² 程度にせざるを得ない。（図－7）

一方，最近になってリブ十字継手の疲労強度を向上させる試みがいくつか行なわれている。これらは溶接ビード止端に化粧盛を施すかあるいはビードの形状が特にきれいになる溶接棒を使用したり，ビード止端を削ったり，ブラスト処理をするなどの方法である。これらの方法による試験結果をまとめると図－6，図－8のようになる。図－5，図－7と比べると明らかに疲労



図－7　リブ十字溶接継手の200万回疲労強度（5％破壊確率）



図－8　リブ十字溶接継手の200万回疲労強度。非調質鋼，改良溶接棒使用調質鋼（5％破壊確率）

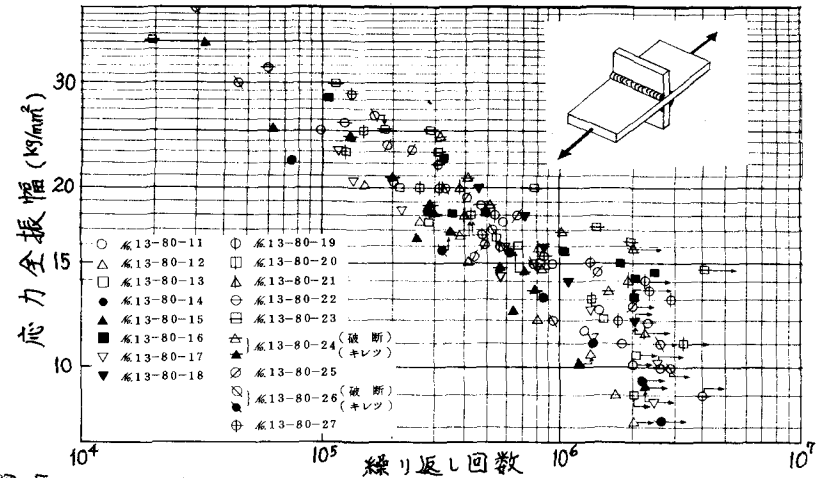


図-5

母材	接合材	試験片 種類	試験片 特徴	荷重の種類	応力範囲
HT80		リブ十字すみ肉	仕上げなし, as weld	引張	R=0

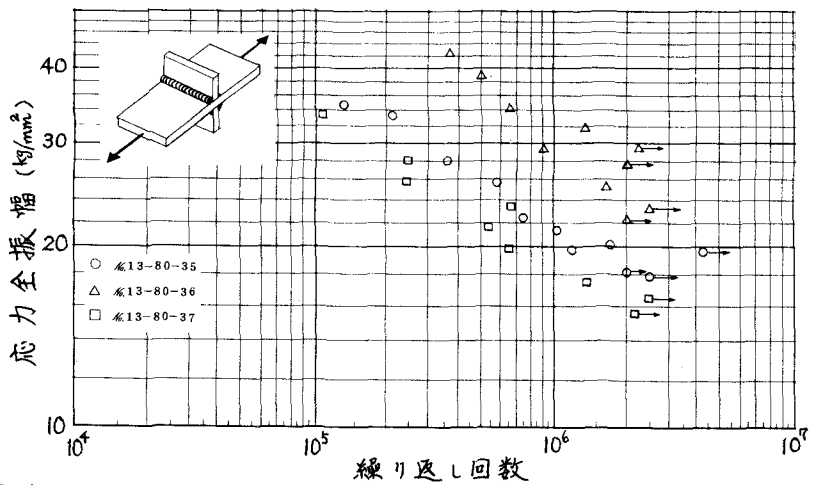


図-6

母材	接合材	試験片 種類	試験片 特徴	荷重の種類	応力範囲
HT80	ライムチタニアなど	リブ十字すみ肉	溶接棒改良	引張	R=0

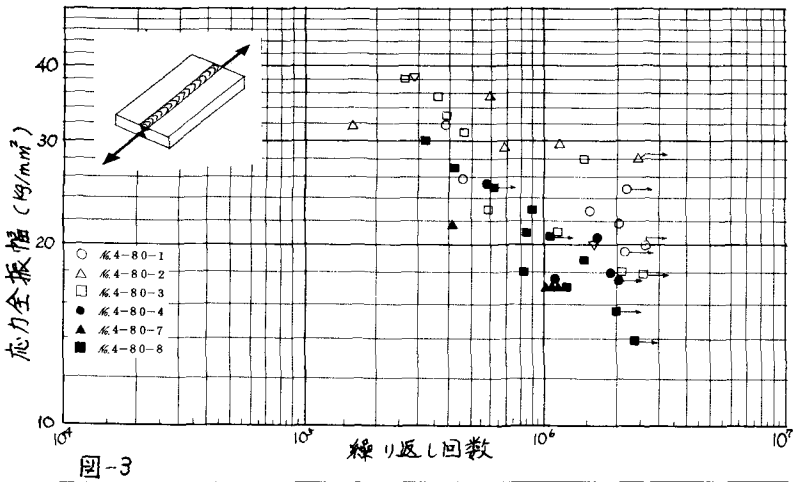


図-3

母材	接合材	試験片 種類	試験片 特徴	荷重の種類	応力範囲
80キロ鋼	KS116	突合せ溶接継手	縦縁	引張	片振

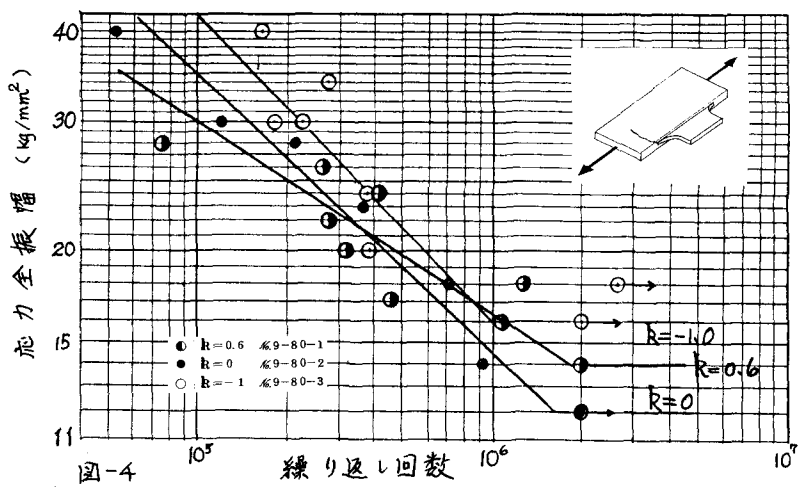


図-4

母材	接合材	試験片 種類	試験片 特徴	荷重の種類	応力範囲
HT80	LB106 3.2φ, 4.0φ	側面ガセット継手	リブ材SM50, rどりr=20mm	引・圧	R=0.6, 0, -1

強度は向上しており，ビード止端の仕上げを入念に行なうこと，ビード形状が特にきれいになり疲労強度が明らかに向上すると思われる溶接施工がなされる等の条件をつけなければ，基本疲労許容応力度を上げることができると考える。従ってこの種の継手については以上の条件付で基本疲労許容応力度として $\sigma_{a0} = 1050\ kg/cm^2$ とするものとしCグループと考え，無条件のものは $\sigma_{a0} = 805\ kg/cm^2$ としてDグループと分けることにする。

表2　母材および溶接継手の疲労許容応力度

（単位：kg／cm²）

継手分類	引張 $-1.0 \leqq k < 0.3$	引張 $0.3 \leqq k \leqq 1.0$	圧縮 $-1.0 \leqq k \leqq 1.0$	備考
A	$\frac{1530}{1-0.7k}$	$\frac{1355}{1-k}$	$\frac{2160}{1-1.4k}$	疲労許容応力度は，それぞれの応力の種類について，各鋼種毎に定められた基本許容応力度以下とする。ただしkは $k = \frac{\lvert\sigma\rvert_{min}}{\lvert\sigma\rvert_{max}}$ または $k = \frac{\lvert\tau\rvert_{min}}{\lvert\tau\rvert_{max}}$ 片振れの場合：正　両振れの場合：負
B	$\frac{1275}{1-0.7k}$	$\frac{1130}{1-k}$	$\frac{1800}{1-1.4k}$	
C	$\frac{1050}{1-0.7k}$	$\frac{930}{1-k}$	$\frac{1480}{1-1.4k}$	
D	$\frac{800}{1-0.7k}$	$\frac{710}{1-k}$	$\frac{1130}{1-1.4k}$	
継手分類	せん断 $-1.0 \leqq k < 0.3$	せん断 $0.3 \leqq k \leqq 1.0$		
S_1	$\frac{920}{1-0.7k}$	$\frac{815}{1-k}$		
S_2	$\frac{820}{1-0.7k}$	$\frac{725}{1-k}$		
S_3	$\frac{650}{1-0.7k}$	$\frac{580}{1-k}$		

表－1にあげた各種の継手形式について，それぞれ入手できる限りの試験結果にもとずき上述の方法で個々に基本許容応力度を決めていった。その結果は表－2のようにまとめられる。

3　列車荷重による累積効果

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り，設計寿命100年間には総列車本数がおよそAルートで550万本，Dルートで950万本となる。このため，2に示した200万回における疲労許容応力度に対し荷重の累積効果を修正直線累積被害法則にもとずいて考慮するとともに，複線載荷の影響を次のような考え方で検討し，許容応力度の低減率を求めた。[8)]

3・1　S－N線図

修正直線累積被害法則に用いるS－N線は次式を用いるものとする。[9)]

$$\log\frac{\sigma}{\sigma_a} = -k_i \log\frac{N}{\bar{N}} \qquad (1)$$

ここに σ，N；応力振幅および繰り返し回数

σ_a；200万回疲労許容応力度（応力振幅）

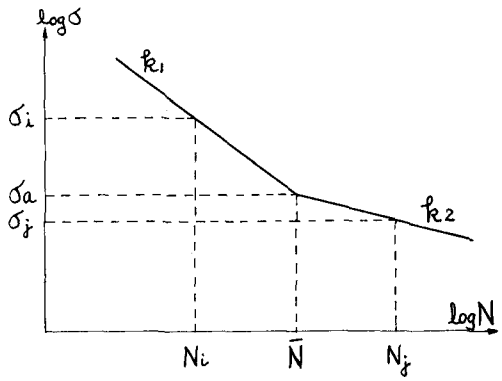
$\bar{N} = 2\times10^6$，$k_1 = 0.2\ (N \leqq \bar{N})$，$k = 0.1\ (N \geqq \bar{N})$

3・2　疲労荷重累積効果

図－9のS－N線図に示すように $\sigma_i\ (= P_i/A \geqq \sigma_a)$ になる部材力 P_i が n_i 回，また $\sigma_j\ (= P_j/A < \sigma_a)$ となる部材力 P_j が n_j 回繰り返されたとすると，修正直線累積被害法則より

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} + \sum_j \frac{n_j}{N_j} \leqq 1 \qquad (2)$$

となるように部材断面積を決定する必要がある。



図－9

式(1)のσをPとAに書き換えて式(2)に代入すると

$$\frac{1}{(\sigma_a A)^{\frac{1}{k_1}}}\sum_i \frac{n_i}{\bar{N}} P_i^{\frac{1}{k_1}} + \frac{1}{(\sigma_a A)^{\frac{1}{k_2}}}\sum_j \frac{n_j}{\bar{N}} P_j^{\frac{1}{k_2}} \leq 1 \qquad (3)$$

を得る。ここにAは所要断面積である。

今設計荷重によって着目する部材に生ずる部材力をP_0とすると，P_i，P_jは，$P_i = f_i P_0$，$P_j = f_j P_0$のように表示できるから，式(3)をAについて解くと

$$A = \beta \frac{P_0}{\sigma_a} \quad , \quad \beta = \left(\frac{C_1 + \sqrt{C_1^2 + 4C_2^2}}{2}\right)^2 \quad , \quad C_1 = \sum_i \frac{n_i}{\bar{N}} f_i^5 \quad , \quad C_2 = \sum_j \frac{n_j}{\bar{N}} f_j^{10} \qquad (4)$$

となる。式(4)を計算する場合，f_iがC_1に属するかC_2に属するかは断面積Aが未定なのでβを仮定して断面積を求め，C_1，C_2が収束するまで繰り返し計算をする必要がある。

βは設計荷重により生ずる部材力P_0を200万回許容疲労応力度σ_aで割って求まる断面積の割増率を意味しているので，許容応力の低減率は$1/\beta$となる。

3・3　複線載荷の影響

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荷重の累積効果を考える。複線載荷の影響を考慮する部材は，吊橋の補剛桁，トラス主構，主構トラスなどがあるが，ここでは吊橋補剛桁における場合について述べる。なお，この場合着目部材の応力は列車軌道位置によって違ってくるので，吊橋の補剛桁については立体解析（ねじり解析）を行なっている。

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。今図－10のような影響線を用いて図－11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書き換える。さらに横軸が距離であるのを列車速度Vで割って図－12に示すように時間軸に変換する。

図－12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－13を得る。このとき上下線では列車進行方向が逆なので，時間を横軸にとった応力変動図は逆に生じる。

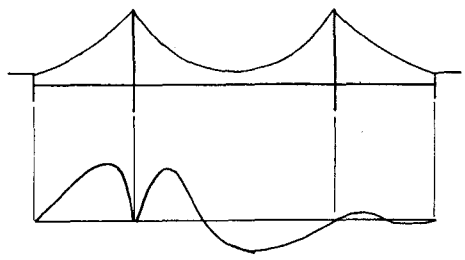


図-10　補剛トラス中間支点上弦材影響線

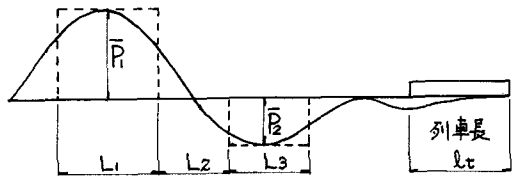


図-11　1列車による応力変化線

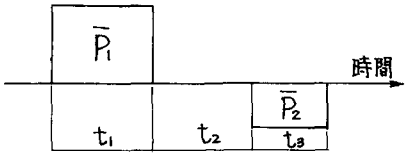
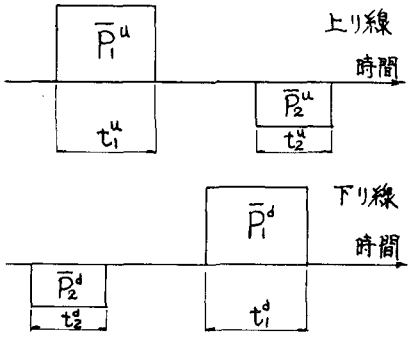


図-12

1）　複線載荷

複線載荷の確率計算は図－13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



図－13

力符号が逆になり応力変動範囲が小さくなると考えられるので，複線載荷としては取り扱わず単線載荷として考慮した。

i）　$\overline{P}_1^u$ と $\overline{P}_1^d$ の部分で上下線が重なる場合（図-14）

設計寿命（100年）中の繰り返し回数は確率計算より

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

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）

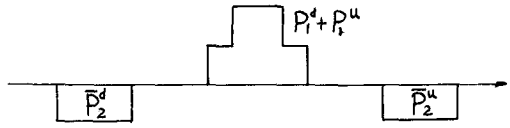


図-14

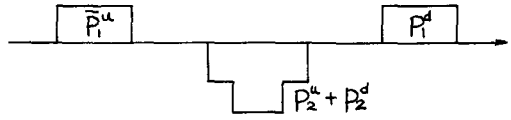


図-15

1回の複線載荷ごとに range pair count method（以下 r・p・c 法と呼ぶ）を適用すると，それぞれの荷重変動と繰り返し数が次のように求まる。（$\overline{P}_2^d > \overline{P}_2^u$，$\overline{P}_1^d > \overline{P}_1^u$ の場合を考える）

A：　$P_i^A = \overline{P}_1^d + \overline{P}_1^u + P_2^d$，　$N_i^A = N_i$　　B：　$P_i^B = \overline{P}_2^u$，　$N_i^B = N_i$

ii）　$\overline{P}_2^u$ と $\overline{P}_2^d$ の部分で上下線が重なる場合（図-15）

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

A：　$P_{ii} = \overline{P}_2^u + \overline{P}_2^d + \overline{P}_1^d$，　$N_{ii}^A = N_{ii}$　　B：　$P_{ii}^B = \overline{P}_1^u$，　$N_{ii}^B = N_{ii}$

2）　単線載荷

単線載荷の繰り返し数は，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。

上り線：　$P_s^u = \overline{P}_1^u + \overline{P}_2^u$，　$N_s^u = n_t^u \times 36500 - (N_i + N_{ii})$

下り線：　$P_s^d = \overline{P}_1^d + \overline{P}_2^d$，　$N_s^d = n_t^d \times 36500 - (N_i + N_{ii})$

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を考慮すればよい。しかしDルートトラス橋・主構トラスに対しては3線同時載荷も実際起こりうるので，考慮する必要があるが，しかしその回数は約1000回程度であり，応力変動が3倍近くになっても無視できる回数と考えられる。

3・4　許容応力度の低減率

疲労検算を行なう場合の吊橋補剛桁の設計荷重は1軌道当り2.7t/mであり，その載荷長は在来線で370m，新幹線で400mである。また橋梁の設計寿命は100年と考え，1日片線当りの列車本数は昭和65年の推定値によると[10]次のとおりである。

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（12両編成，乗車効率80%）

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

一方，実際に運行される列車荷重には乗車率，積載量によってその荷重強度はバラツキを生じている。荷重タイプを決定するときに，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の累積効果が変らないように等価換算荷重を使用すべきである。今，設計荷重を P_0 としバラツキを持つ荷重 $P(f) = f(P_0)$ の頻度分布を確率

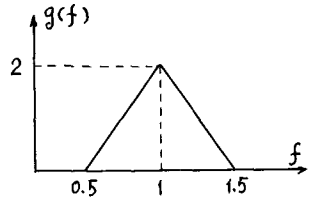


図-4

密度関数 $g(f)$ を用いて図－16のように与えられたとしたときの等価換算荷重 f_0P_0 を求めると，f_0 は1.01～1.09の間に分布しているので，その中間値として $f_0=1.05$ を採用し，図－11の $\bar{P}_1$，$\bar{P}_2$ を求めるときの荷重としては設計荷重の5％増しとした。又在来線旅客の荷重としては貨物の$\frac{1}{2}$とするものとする。

表-3　低減率

ルート	低減率
Aルート	0.80
Dルート	0.75

以上の条件のもとに断面積割増率をAルート吊橋，およびDルート吊橋を例にとり計算するとAルート吊橋では $\beta=1.23$，Dルート吊橋では $\beta=1.30$ となった。これらの結果より吊橋補剛トラスの設計においては表－3の低減率を疲労許容応力度に乗ずるものとする。

4. あとがき

本四連絡橋はこれまでに経験したことのない種々の条件下で使用されることが予想され，疲労設計法においても，これまでの鉄道橋と趣を異にするところもある。特に60キロ以上の調質型高張力鋼の疲労許容応力度を定めるにあたって充分な資料を集積したとはいえず，さらに種々のデータを必要としている。当公団においては今度富士市に完成した400t大型疲労試験機を用いて80キロ級鋼75mm厚の溶接試験体あるいは実体構造模型による疲労試験を実施しており，以上述べてきた疲労許容応力度および低減率の確認をする予定である。

本報告は土木学会，本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会，疲労分科会の審議成果をまとめたものである。分科会各委員に感謝の意を表します。

注）・図3～6のNO. 0-00-0はデータの出展を示すものであり，参考文献9）を参照されたい。
・本報告の一部は昭和49年度土木学会関東支部学術講演会に報告されている。

参考文献

1）「鋼鉄道橋設計標準・同解説」　土木学会，昭和49年
2）本四連絡橋鋼上部構造研究小委員会解析分科会報告書「別冊4．ア－4の解析と吊橋解析の追補」土木学会，昭和50年3月
3）同上委員会疲労分科会報告書「別冊3．高張力鋼溶接継手の疲労試験」土木学会　昭和48年3月
4）神戸製鋼所社内報「すみ肉溶接継手の疲れ強さ改善法に関する研究（その3）」（1973）
5）国広他「鋼床版部材引張疲労試験中間報告」　土木技術資料13－12（昭和46年12月）
6）「Effect of Weldments on the fatigue strength of Steel Beam」 Fritz Engineering Laboratory Report, NO 334,（1969. 9）
7）「80キロ鋼資料」　土木研究所　昭和39年9月
8）伊藤文人「実働荷重による鉄道橋の疲労被害推定法」　鉄道技術研究報告 NO. 676　1969年4月
9）本四連絡橋鋼上部構造研究小委員会．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，昭和49年3月
10）本州四国連絡橋調査報告書（鉄道橋）　昭和48年4月