

6. 鋼床版の疲労設計

(1) 疲労設計の考え方

疲労設計の基本は橋梁の各部位が供用期間中に受ける応力変動とその繰返しに対して、重大な疲労損傷が生じないように設計することにある。設計時に応力を計算する部位については作用応力とその繰返し数が求められれば、それらと部材の疲労強度との比較を行い、疲労に対する照査を行うことが疲労設計となる。設計時には応力を計算しないあるいは計算できない、いわゆる二次応力が支配的となる部位別については拘束力や局所的な応力集中を生じないように細部構造を検討することが疲労設計となる。

表6-1に鋼床版の設計時における各溶接部の応力計算の有無と今までに報告されている損傷事例の有無を示す。二次応力の影響が大きく疲労の問題が考えられる部位については有限要素法などによる応力解析を行い疲労を照査することも考えられるが、このような部位については基本的には応力集中の生じにくい適切な細部構造の採用が必要と考えられる。

以下に設計計算で求められる応力が支配的である部位における疲労設計の例を述べる。

鋼床版の疲労設計をより厳密に行うには、活荷重の載荷条件や構造条件等の作用応力の計算に必要な諸量および部材の疲労強度を把握しておくことが必要である。部材に作用する応力の計算に関して、具体的に①車両の軸重分布、②車両のレーン内走行位置分布、③解析による計算応力度と実際に生じる応力度の差異等を考慮する必要がある。

設計活荷重の載荷時の応力度を基本とした場合、設計軸重と実際に通過する車両の軸重分布から得られる等価軸重との差異による応力度の補正が必要である。両者の差を軸重分布の3乗平均値の3乗

表6-1 鋼床版の応力計算

溶 接 継 手	亀裂有無	計算有無(注1)	照査の可能性
デッキプレートの現場突合せ溶接 橋軸直角方向継手	× ×	×(注2)	↑
ビード方向	×	○	
橋軸方向継手	○ ○	×(注2)	
ビード方向	×	×(注2)	
ビード直角方向	×	×(注2)	
縦リブの現場突合せ溶接	○	○	
コーナープレートの現場突合せ溶接	×	×(注2)	
デッキプレートと縦リブのすみ肉溶接			
デッキプレート側止端部	×	×	
縦リブ側止端部	△	×	
ルート	△	×	
デッキプレートと横リブのすみ肉溶接			
デッキプレート側止端部	×	×	
横リブ側止端部	×	○	
ルート	×	×(注2)	
デッキプレートと鉛直スティフナのすみ肉溶接			
デッキプレート側止端部	○	×	FEM解析を行うことで、この部分の応力を見ることが出来る(注3)
鉛直スティフナ側止端部	○	×	
ルート	×	×	
デッキプレートとコーナープレートのすみ肉溶接			
デッキプレート側止端部	×	×	
コーナープレート側止端部	×	×	
ルート	○	×	
横リブと縦リブの交差部のすみ肉溶接			
横リブ側止端部	○	×	
縦リブ側止端部	○	×	
ルート	×	×	
スラップ母材部	×	×(注2)	
リブ埋戻し部の横リブ側止端部	○	×	
横リブとコーナープレートの突合せ溶接	○	×	
鉛直スティフナとコーナープレートの突合せ溶接	○	×	
端横桁と縦リブのすみ肉溶接	○	×	
横リブのフランジとウェブのすみ肉溶接	○	×	
横リブフランジと鉛直スティフナのすみ肉溶接			
スティフナ側止端部	○	×	
箱内対傾構ガセットのガセット側止端部	○	×	↓

○：損傷事例有り  
△：外国での損傷事例有り  
×：損傷事例なし

注1：実用計算における算出の有無をいう。  
注2：構造細部の工夫によって設計に考慮する場合もあるが通常しない  
注3：モデル化によって結果が大きく異なる場合がある。また、非常に高価なものになる。

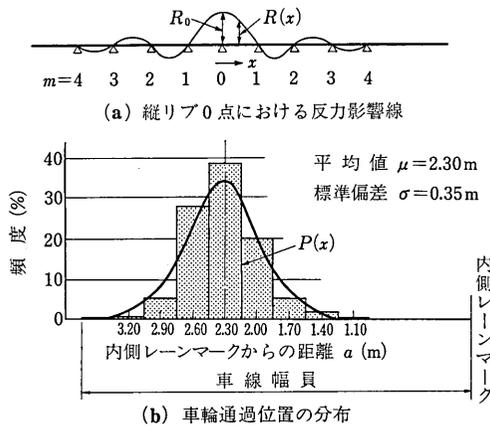


図 6-1 輪荷重通過位置<sup>14)</sup>

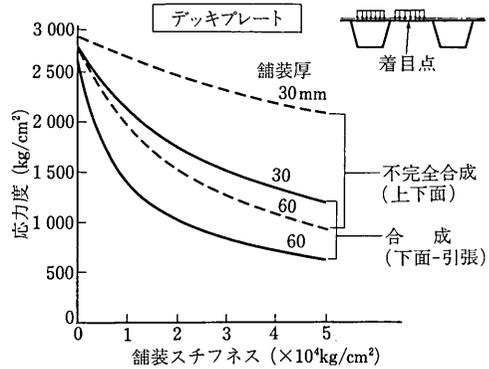


図 6-2 舗装厚とデッキプレートの曲げ応力度<sup>13)</sup>

根と設計輪荷重(8 t)との比で表すと、昭和 46 年に建設省が実施した全国主要国道 20 地点における車両重量の実態調査結果<sup>13)</sup>に対して、0.1~0.6 程度の値となる。また、車両の走行位置が縦りブ直上から幅員方向にずれるにしたがって、図 6-1 に示すように生じる応力度は小さくなることから、走行位置の実態を踏まえて応力度を補正する必要がある。建設省における昭和 46 年度の調査結果によれば、大型車の後輪通過位置別の頻度分布は、1 車線の幅が 3 ~ 4 m の場合、標準偏差が約 35 cm の正規分布に近いことが報告されている<sup>14)</sup>。

軸重の大きさや載荷位置がわかれば、解析により応力度は計算することができるが、通常の場合、計算応力度と実際に生じる応力度との間には解析上の種々の仮定による差異が生じる。この差異には有効幅、舗装の効果等の仮定による解析上の誤差等が含まれている。このうち舗装については、4 章で述べたように温度の影響を受ける等、物性およびその構造が極めて複雑な特性を有する。図 6-2 は、舗装とデッキプレートに生じる応力度との関係を示したものであるが、舗装の条件により、荷重の分散作用や鋼床版との合成作用による応力度の低減を期待できるものと考えられる。

(2) 諸外国における疲労に対する規定

英国における設計基準である BS 5400 (Part10 : 1980年)<sup>15)</sup>では道路橋の疲労に対する設計法として 3つの方法を示しており、設計寿命、荷重スペクトル、年間交通量等によって適切な方法を選択するようにしている。それらは、①対象とする橋梁の条件 (設計寿命 120 年、年間交通量 (表 6-2)、活荷重の載荷条件 (表 6-3) 等) が規定に示される設計条件に従う場合について、近似的に標準車両

表 6-2 年間交通量<sup>5)</sup>

道 路 種 別			1車線あたり年間走行台数 ( $n_c \times$ 百万台)	
形 式	車 道**	車 線 数	緩速車線	隣接車線
高速道路	複 線	3(片側)	2.0	1.5
高速道路	複 線	2(片側)	1.5	1.0
一般道路	"	3( " )		
"	"	2( " )		
ランプ	単 線	2		
一般道路	単 線	3	1.0	適用しない
"	単線(10m*)	2		
ランプ	単 線	1		
一般道路	単線(7.3m*)	2	0.5	適用しない

注) \* : 7.3~10 m の車道幅員については内挿補間する。  
\* : 複線車道とは中央分離帯等で車道が往復に分離されているものをいう。

1台の走行によって生じる最大応力範囲が許容範囲内に収まっているかを照査する方法、②①よりも正確な評価が必要かあるいは規定に示される条件と異なる条件で設計する場合について、標準荷重を載荷しその応力履歴に基づきマイナー則を適用して評価する方法、③荷重もしくは応力スペクトルが既知の場合について、そのデータを利用しマイナー則を適用して評価する方法、の3種類の方法である。

アメリカの道路橋の設計基準であるAASHTO<sup>6)</sup>では、特に交通量や車両重分布の実測データによらない場合について、表6-4に示す一方向大型車交通量に応じたトラックの載荷もしくは車線載荷に対する繰り返し回数と継手等級に対応した疲労に配慮した許容応力度（不静定構造物の場合）を与えている。

カナダの道路橋の設計基準であるOHBD<sup>7)~10)</sup>では、表6-5に示すように道路の等級分類とそれに対応した疲労に配慮した許容応力範囲を与えている。

表6-3 標準荷重スペクトル<sup>5)</sup>

車両名称*	総重量 (kN)	合計百万台あたり台数
18 GT-H	3 680	10
18 GT-M	1 520	30
9 TT-H	1 610	20
9 TT-M	750	40
7 GT-H	1 310	30
7 GT-M	680	70
7 A-H	790	20
5 A-H	630	280
5 A-M	360	14 500
5 A-L	250	15 000
4 A-H	335	90 000
4 A-M	260	90 000
4 A-L	145	90 000
4 R-H	280	15 000
4 R-M	240	15 000
4 R-L	120	15 000
3 A-H	215	30 000
3 A-M	140	30 000
3 A-L	90	30 000
3 R-H	240	15 000
3 R-M	195	15 000
3 R-L	120	15 000
2 R-H	135	170 000
2 R-M	65	170 000
2 R-L	30	180 000

注) \* : 最初の数字は軸数, 次の記号はシャーシーの種類を表し, その次の記号は L は軽, M は中, H は重車両を表す。

表6-4 AASHTOにおける許容疲労応力範囲に関する規定<sup>6)</sup>

Transverse Members and Details Subjected to Wheel Loads				Redundant Load Path Structures*				
Type of Road	Case	ADTT <sup>a</sup>	Truck Loading	Category See Table 10.3.1B	Allowable Range of Stress, $F_{sr}$ (ksi) <sup>a</sup>			
					For 100 000 Cycles	For 500 000 Cycles	For 2 000 000 Cycles	For over 2 000 000 Cycles
Freeways, Expressways, Major Highways, and Streets	I	2 500 or more	over 2 000 000	A	63	37	24	24
Freeways, Expressways, Major Highways, and Streets	II	less than 2 500	2 000 000	B	49	29	18	16
				B'	39	23	14.5	12
				C	35.5	21	13	10
				D	28	16	10	7
Other Highways and Streets	III	—	500 000	E	22	13	8	4.5
				E'	16	9.2	5.8	2.6
				F	15	12	9	8

- a. Average Daily Truck Traffic (one direction).
- b. Longitudinal members should also be checked for truck loading.
- c. Members shall also be investigated for "over 2 million" stress cycles produced by placing a single truck on the bridge distributed to the girders as designated in Article 3.23.2 for one traffic lane loading.

\*Structure types with multi-load paths where a single fracture in a member cannot lead to the collapse. For example, a simply supported single span multi-beam bridge or a multi-element eye bar truss member has redundant load paths.  
<sup>a</sup>The range of stress is defined as the algebraic difference between the maximum stress and the minimum stress. Tension stress is considered to have the opposite algebraic sign from compression stress.  
<sup>b</sup>For transverse stiffener welds on girder webs of flanges.  
 1 ksi=6.9MPa

表 6-5 OHBD における許容疲労応力範囲に関する規定<sup>7)</sup>

Highway Classification			Allowable Stress Range in Fatigue of Steel				
Average Daily Traffic per Lane Known or Projected	Criteria for use only when Traffic Data are not Available	Highway Class	Allowable Stress Range $F_{ar}$ , MPa				
			Class C-2 for 100 000 Cycles	Class C-1 for 500 000 Cycles	Class B for 2 000 000 Cycles	Class A over 2 000 000 Cycles	
Truck Traffic > 1000 or Traffic > 4000	Roads primarily for through traffic	A	a	415	250	165	165
Truck Traffic > 250 and $\leq$ 1000 or Traffic > 1000 and $\leq$ 4000	Roads on which traffic movement and property access have similar importance	B	b	310	190	125	110
Truck Traffic > 50 and $\leq$ 250 or Traffic > 100 and $\leq$ 1000	Roads primarily for property access which carry moderate commercial traffic	C <sub>1</sub>	c	220	130	90	70**
Truck Traffic $\leq$ 50 or Traffic $\leq$ 100	Roads primarily for property access which carry little or no commercial traffic	C <sub>2</sub>	d	185	110	70	48
			e	145	85	55	32
			f	110	65	40	18
			w	115	85	65	48

\* For structures with span length greater than 20m, See Clause 11-4.1. For fracture critical members, see Clause 11-4.4.

\*\* For welds connecting transverse stiffeners to girder webs or flanges, use 83 MPa.

### (3) 疲労の照査方法例

疲労設計を行うには前節で述べた諸外国の規定のように、活荷重の载荷条件に応じて疲労の照査を行えるようにすることが必要である。しかし、走行する活荷重の実態およびその载荷条件については不確定な部分が多く、限られた活荷重に関するデータから疲労の照査に必要な部材の応力範囲の頻度分布を求めることは難しい。そこでここでは、活荷重に関するデータから部材に生じる応力度が既に求まったものとして、その後の疲労の照査方法例について述べる。

実際の橋梁部材には変動応力が作用するが、変動応力下の疲労被害の考え方としては、一般に Miner の累積被害則が用いられている。これは、部材に作用する応力範囲  $S_{ri}$  に対して  $N_i$  で部材に疲労破壊が起こった時、応力範囲  $S_{ri}$  の 1 回の繰返しによる疲労損傷の程度を  $1/N_i$  と考え、次式に示すようにその和が 1 になったとき破壊に達すると考えるものである。

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (6.1)$$

ここで、部材の疲労強度  $S_r$  と破壊に至るまでの繰返し回数  $N$  との関係は一般に次式で表される。

$$\log N = b - m \log S_r \quad (b, m \text{ は継手に対応した定数}) \quad (6.2)$$

あるいは、式(6.2)は式変形することにより

$$S_r^m N = C \quad (C, m \text{ は継手に対応した定数}) \quad (6.3)$$

のとおり表わされる。式(6.1), (6.3)より、

$$\sum (S_{ri}^m \cdot n_i) = C \quad (6.4)$$

式(6.4)は供用期間中に受ける応力振幅  $S_{ri}$  とその繰返し回数  $n_i$  に関する  $S_{ri}^m \cdot n_i$  の和が  $C$  になった時に破壊することを意味する。この式を用いて疲労の照査を行うことが出来るが、変動応力の影響(繰返し回数, 応力範囲)を一定の応力が何回繰返し载荷することと等価であるかという話におきか

えたほうがわかりやすく、一般に等価応力範囲 ( $m$  乗平均値の  $m$  乗根) が用いられる。すなわち、式 (6.4) の左辺は部材が受けるいわば損傷の程度を示すものであり、ある一定の応力範囲 (等価応力範囲)  $S_{req}$  を用いることにより次式のように置き換えることができる。

$$\sum S_{ri}^m \cdot n_i = S_{req}^m \cdot \sum n_i \quad (6.5)$$

この式から、等価応力範囲は、次式で表される。

$$S_{req} = (\sum S_{ri}^m \cdot n_i / \sum n_i)^{1/m} \quad (6.6)$$

計算により応力範囲の頻度分布が与えられた場合、等価応力範囲は、設計荷重に対する計算応力範囲  $S_{rd}$  を用いることにより次式で表される。

$$S_{req} = [\sum \gamma_i (\phi_i \alpha S_{rd})^m]^{1/m} = [\sum \gamma_i \phi_i^m]^{1/m} \alpha S_{rd} \quad (6.7)$$

ここで、

$S_{rd}$  : 設計荷重に対する計算応力範囲

$\gamma_i$  :  $i$  番目の応力範囲が生じる頻度 ( $= n_i / \sum n_i$ )

$\phi_i$  : 計算応力範囲  $S_{rd}$  に対する  $i$  番目の応力範囲の比

$\alpha$  : 計算応力度と実応力度との比 (実応力比)

$m$  : S-N 線の傾き

また、

$$\rho = [\sum \gamma_i \phi_i^m]^{1/m} \quad (6.8)$$

とすると

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} \quad (6.9)$$

$\alpha$  は対象とする箇所、荷重の載荷状態により異なるものであるが、ここでは、ある一定の値をとると考える。疲労の照査は等価応力範囲  $S_{req}$  およびその繰返し数  $\sum n_i$  を部材の疲労強度と比較することにより行われる。

ここで、あらかじめ、活荷重頻度分布と部材に生じる作用応力範囲頻度分布より、 $\alpha$  および繰返し数  $\sum n_i$  と車両の走行台数との対応をつけておけば、活荷重の載荷条件に基づき疲労の照査を行うことができる。

文献 10), 11) では二次モーメント法による疲労の照査方法を検討している。二次モーメント法では、破壊確率に対応する安全率の尺度として安全性指標  $\beta$  (safety index) を用いる。二次モーメント法については適用上の問題等を含めて検討する必要があるが、文献 10) の内容を参考までに以下に紹介する。

$\bar{R}$ ,  $\bar{Q}$  をそれぞれ抵抗力および荷重の平均値,  $s_R$ ,  $s_Q$  をそれぞれ抵抗力および荷重の標準偏差とすれば、 $\beta$  は次式で表される。

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{S_R^2 + S_Q^2}} \quad (6.10)$$

ここで  $\beta$  が大きいほど破壊に対する安全性は高くなる。  $R, Q$  が正規分布をする確率変数であれば、次式のように安全性指標  $\beta$  と破壊確率  $P_f$  との対応がつけられる。

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad \text{あるいは} \quad P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (6.11)$$

ある応力範囲で一定振幅疲労試験を行った場合、破壊までの繰り返し回数の頻度分布に対して対数正規分布となると考える。このとき、破壊までの繰り返し回数の平均値及び標準偏差を次式で表す。

$$\bar{R} = \log N, \quad S_R = S_{\log N} \quad (6.12)$$

$b, m, S_R$  については既存の  $S-N$  線データより与えられる。今仮りに繰り返し数の分布の標準偏差  $S_R$  が疲労強度によって変わらないとすれば、疲労強度の標準偏差  $S'_R$  は次式で表される。

$$S'_R = \frac{S_R}{m} \quad (6.13)$$

また、このとき次式が成立する。

$$\bar{R}' - \bar{Q}' = \frac{1}{m}(\bar{R} - \bar{Q}) \quad (6.14)$$

次に荷重作用の繰り返し回数平均値および標準偏差を次式で表す。

$$\bar{Q} = \log Nd, \quad S_Q = S_{\log Nd} \quad (6.15)$$

前述の式より、次式が得られる。

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{(S_R)^2 + (mS'_Q)^2}} \quad (6.16)$$

この式に  $\bar{R} = \log N, \bar{Q} = \log Nd$  を代入することにより

$$\beta = \frac{\log N - \log Nd}{\sqrt{(S_R)^2 + (mS'_Q)^2}} \quad (6.17)$$

また、式変形により

$$\log Nd = \log N - \beta \sqrt{(S_R)^2 + (mS'_Q)^2} \quad (6.18)$$

となる。 $Nd$  は安全性指標  $\beta$  に対応する荷重作用の繰り返し回数を表しており、右辺の諸量を与えることにより算出できる。

#### 参考文献

- 1) 国広・井上：道路橋の疲労設計，土木技術資料 14-1.
- 2) 国広・井上：鋼床版への疲労設計の適用例，土木技術資料 14-2.
- 3) 金井・大塩：橋梁の応力頻度と疲労設計法に関する一提案，土木技術資料 22-3.
- 4) BSI: BS 5400 Part 10, 1980.

- 5) 前田・亀井：BS 5400, Part 10 疲労の指針，橋梁と基礎，1982.9.
- 6) AASHTO：Standard Specifications for Highway Bridges 14th edition, 1989.
- 7) OHBD：Ontario Highway Bridge Design Code, Ministry of Transportation and Communications, 1983.
- 8) OHBD：Ontario Highway Bridge Design Code Commentary, Ministry of Transportation and Communications, 1983.
- 9) 九州橋梁構造工学研究会：カナダ，オンタリオ州道路橋設計規準 1983 年版（共通編，鋼橋編）およびその解説（日本語訳），1985.3.
- 10) Pedro Albrecht：ANALYSIS OF FATIGUE RELIABILITY, July, 1981.
- 11) F.MOSES, C.G.SCHILLING, and K.S.RAJU:NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM REPORT 299 FATIGUE EVALUATION PROCEDURES FOR STEEL BRIDGES, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1987.11.
- 12) 山本：道路橋示方書II鋼橋編改定の背景と運用 6章 鋼床版，橋梁と基礎，1981.8.
- 13) (財)海洋架橋調査会，本州四国連絡橋橋面舗装委員会：本州四国連絡橋の橋面舗装に関する調査研究報告書，1985.3.
- 14) 国広・非上：道路橋の疲労指針，道路，1972.3.