

鉄道(性能照査型設計)における疲労設計 2014. 2. 28
T. Y.

1. まえがき

先回、鉄道橋の設計3手法の中で「性能照査型設計法」については疲労に対する耐力照査の作業が容易ならぬことを報告しているが、桁の「支間長」と「路線等級」ごとの係数を用いて照査する簡易な方法を紹介したい。

2. 安全性(耐疲労性)の照査例

耐疲労性の照査は【鋼標準 第Ⅱ編 2.4】より、耐疲労性の照査では、まず疲労限による照査【鋼標準 第Ⅱ編 2.4.4】を行い、最大応力範囲が疲労限を超えた場合には、繰返し数の影響を考慮した耐疲労性の照査【鋼標準 Ⅱ編 2.4.5】を行う。

(1) 疲労限による照査

$$\gamma_i \cdot \frac{\Delta \sigma_{fud}}{\Delta \sigma_{cod}'} \leq 1.0$$

ここに、

$\Delta \sigma_{fud}$: 【鋼標準 第Ⅱ編 1.3.2.3】に従って算定した設計最大応力範囲

$\Delta \sigma_{cod}'$: 補正した垂直応力の一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界
 $\Delta \sigma_{cod}' = \Delta \sigma_{cod} \cdot C_R \cdot C_t$

$\Delta \sigma_{cod}$: 【鋼標準 第Ⅱ編 2.4.2】に定める一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界

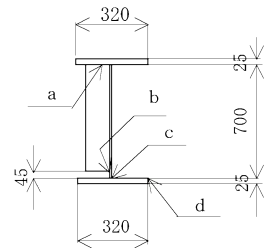
C_R : 【鋼標準 第Ⅱ編 2.4.2】に定める平均応力に関する補正係数

C_t : 【鋼標準 第Ⅱ編 2.4.2】に定める板厚に関する補正係数

$$C_t = 4 \sqrt{25/t} \quad : \quad t > 25 \text{ mm}$$

$$C_t = 1.0 \quad : \quad t \leq 25 \text{ mm}$$

γ_i : 構造物係数で、1.0 とする。



・ 設計断面力

$$M_{max} = 688.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{min} = 101.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

・ 中央断面の諸元

$$I_n = 2,388 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A = 23,000 \text{ mm}^2$$

$$y_c = 375.0 \text{ mm}$$

$$y_t = 375.0 \text{ mm}$$

部位	照査箇所	照査に用いる強度区分と継手の種類
a 部	上フランジと垂直補剛材のすみ肉溶接部	E (d)十字溶接継手、荷重非伝達型②非仕上げ
b 部	腹板と垂直補剛材のすみ肉溶接部	E (d)十字溶接継手、荷重非伝達型②非仕上げ
c 部	下フランジと腹板のすみ肉溶接部	D (c)縦方向溶接継手③
d 部	下フランジの高力ボルト摩擦接合の母材	B (a)高力ボルト摩擦接合継手(1)(n<1)

① 上フランジと垂直補剛材のすみ肉溶接部 (a 部)

疲労強度等級 : E (d)十字溶接継手、荷重非伝達型②非仕上げ

設計最大応力範囲

$$\sigma_{max} = \frac{M_{min}}{I} y_c = \frac{101.5 \times 10^6}{2,388 \times 10^6} \times -350.0 = -14.9 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{min} = \frac{M_{max}}{I} y_c = \frac{688.7 \times 10^6}{2,388 \times 10^6} \times -350.0 = -100.9 \text{ N/mm}^2$$

【鋼標準 第Ⅱ編 1.3.2.3】より

$$\Delta \sigma_{fud} = \gamma_a \cdot [\sigma_{max} - \sigma_{min}] \quad \gamma_a : \text{構造解析係数で } 1.0$$

$$= 1.0 \times [-14.9 - (-100.9)] = 86.1 \text{ N/mm}^2$$

【鋼標準 第Ⅱ編 2.4.2 表2.4.3】より

$$\Delta \sigma_{cod} = 62.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\phi = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} = \frac{-100.9}{-14.9 - (-100.9)} = -1.17 \leq -1$$

$$C_R = 1.30 \quad : \quad \phi \leq -1$$

$$C_t = 1.00 \quad : \quad t \leq 25 \text{ mm}$$

$$\Delta \sigma_{cod}' = \Delta \sigma_{cod} \cdot C_R \cdot C_t = 62.0 \times 1.30 \times 1.00 = 80.6 \text{ N/mm}^2$$

疲労限による照査 γ_i : 構造物係数で、1.0

$$\gamma_i \cdot \frac{\Delta \sigma_{fud}}{\Delta \sigma_{cod}'} = 1.0 \times \frac{86.1}{80.6} = 1.07 > 1.0$$

したがって、繰返し数の影響を考慮した耐疲労性の照査を行う。

② 下フランジと腹板のすみ肉溶接部 (c 部)

疲労強度等級 : D (c)縦方向溶接継手③

設計最大応力範囲

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{I} y_c = \frac{688.7 \times 10^6}{2,388 \times 10^6} \times 350.0 = 100.9 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{min} = \frac{M_{min}}{I} y_c = \frac{101.5 \times 10^6}{2,388 \times 10^6} \times 350.0 = 14.9 \text{ N/mm}^2$$

【鋼標準 第Ⅱ編 1.3.2.3】より

$$\Delta \sigma_{fud} = \gamma_a \cdot [\sigma_{max} - \sigma_{min}] \quad \gamma_a : \text{構造解析係数で } 1.0$$

$$= 1.0 \times [100.9 - (14.9)] = 86.1 \text{ N/mm}^2$$

【鋼標準 第Ⅱ編 2.4.2 表2.4.3】より

$$\Delta \sigma_{cod} = 84.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\phi = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} = \frac{14.9}{100.9 - (14.9)} = 0.17 > -0.5$$

$$C_R = 1.00 \quad : \quad \phi > -0.5$$

$$C_t = 1.00 \quad : \quad t \leq 25 \text{ mm}$$

$$\Delta \sigma_{cod}' = \Delta \sigma_{cod} \cdot C_R \cdot C_t = 84.0 \times 1.00 \times 1.00 = 84.0 \text{ N/mm}^2$$

疲労限による照査 γ_i : 構造物係数で、1.0

$$\gamma_i \cdot \frac{\Delta \sigma_{fud}}{\Delta \sigma_{cod}'} = 1.0 \times \frac{86.1}{84.0} = 1.02 > 1.0$$

したがって、繰返し数の影響を考慮した耐疲労性の照査を行う。

(2) 繰返し数の影響を考慮した耐疲労性の照査

繰返し数を考慮した耐疲労性の照査は、【鋼標準 付属資料 11】に基づいて、以下の①～③によって行う。

① 設計最大作用応力範囲 ($\Delta\sigma_{fud2}, \Delta\tau_{fud2}$) は、次式によって求める。

$$\Delta\sigma_{fud2} = \gamma_a \cdot (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot \alpha_c$$

$$\Delta\tau_{fud2} = \gamma_a \cdot (\tau_{max} - \tau_{min}) \cdot \alpha_c$$

ここに、

$\sigma_{max}, \sigma_{min}$: 引張を正号、圧縮を負号とした垂直応力度の代数的最大値及び最小値

τ_{max}, τ_{min} : 絶対値の大きい方の応力方向を正号、逆方向を負号とした時のせん断応力度の代数的最大値、最小値

γ_a : 構造物係数で、一般に1.0

$$\alpha_c = f_1 \cdot f_2$$

f_1 : 繰返し数を考慮した係数で、設計耐用期間に応じて算出する。

f_2 : 複線載荷を考慮した係数

・ 単線支持の部材 : $f_2 = 1.0$

・ 複線支持の部材 : $f_2 = (a_1^m + a_2^m)^{1/m}$

m : 疲労設計曲線の傾きを表す定数で、垂直応力を受ける継手では、 $m=3$ 、せん断応力を受ける継手では $m=5$ 、

a_1, a_2 : 複線双方の $\frac{1 \text{ 線に載荷した時の応力範囲}}{\text{複線に載荷した時の応力範囲}}$

② 疲労許容応力範囲 ($\Delta\sigma_{fd'}, \Delta\tau_{fd'}$) は、次式によって求める。

$$\Delta\sigma_{fd'} = \Delta\sigma_{fd} \cdot \alpha_a$$

$$\Delta\tau_{fd'} = \Delta\tau_{fd} \cdot \alpha_a$$

ここに、

$\Delta\sigma_{fd}, \Delta\tau_{fd}$: 各継ぎ手の強度等級に対する 2×10^6 回 基本疲労許容応力範囲

α_a : 基本許容応力範囲の補正係数

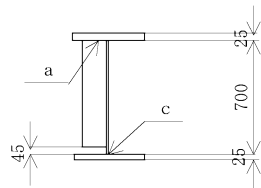
$$\alpha_a = C_R \cdot C_t$$

③ 繰返し数を考慮した耐疲労性の照査は、次式によるものとする。

$$\gamma_i \cdot \frac{\Delta\sigma_{fud2}}{\Delta\sigma_{fd'}} \leq 1 \quad \gamma_i \cdot \frac{\Delta\tau_{fud2}}{\Delta\tau_{fd'}} \leq 1$$

④ 各部位の照査結果

下図 a, c 部について、繰返し数を考慮した耐疲労性の照査を行う。



照査位置	照査に用いる強度区分と継手の種類
a 部	E (d) 十字溶接継手、荷重非伝達型②非仕上げ
c 部	D (c) 縦方向溶接継手③

		a 部	c 部		
予 備 計 算	最大曲げモーメント	Mmax	kN・m	598.7	598.7
	最小曲げモーメント	Mmin	〃	101.5	101.5
	断面二次モーメント	I	mm ⁴	2,388 × 10 ⁶	2,388 × 10 ⁶
	縦 距	y	mm	-350	350
	最大応力度	σ_{max}	N/mm ²	-14.9	87.7
	最小応力度	σ_{min}	〃	-87.7	14.9
	支間長による係数	n_{eq1}	—	2.21	2.21
	列車数による係数	n_{eq2}	—	0.57	0.57
	$f_1 = n_{eq1} \cdot n_{eq2}$	—	1.26	1.26	
	f_2 : 単線の場合1.0	—	1.0	1.0	
	$\alpha_c = f_1 \cdot f_2$	—	1.26	1.26	
	対象部位の疲労強度等級		E	D	
	$\Delta\sigma_{fd}$ 基本疲労許容応力範囲		80	100	
	$\phi = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}}$		$\phi = -1.2 \leq -1.0$	$\phi = 0.2 > -0.5$	
	C_R 平均応力度補正係数		1.3	1.0	
対象部位の板厚	t	mm	25 ≤ 25	25 ≤ 25	
$C_t = 4\sqrt{\frac{25}{t}}$ (1.0 以下)		1.0	1.0		
$\alpha_a = C_R \cdot C_t$		1.3	1.0		
設計最大作用応力範囲 $\gamma_a \cdot (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot \alpha_c$	γ_a	1.0	1.0		
	σ_{max}	-14.9	87.7		
	σ_{min}	-87.7	14.9		
	α_c	1.26	1.26		
$\Delta\sigma_{fud2}$		91.7	91.7		
許容応力範囲 $\Delta\sigma_{fd'} = \Delta\sigma_{fd} \cdot \alpha_a$	$\Delta\sigma_{fd}$	80.0	100.0		
	α_a	1.3	1.0		
	$\Delta\sigma_{fd'}$	104.0	100.0		
耐疲労性の照査 $\gamma_i \cdot \frac{\Delta\sigma_{fud2}}{\Delta\sigma_{fd'}} \leq 1$	γ_i	1.0	1.0		
	$\frac{\Delta\sigma_{fud2}}{\Delta\sigma_{fd'}}$	0.882 ≤ 1	0.917 ≤ 1		
判 定		OK	OK		

3. あとがき

今回の受託業務においては、列車走行時の「応力変動解析」を強いられたが、これへの対応には大変な労力を要することになる（現実的には不可能に近い）。

よって簡易計算法が確立されたわけだから、これを活用しない手はない。ただ、構造物の疲労耐力に関わる性状を知って間違いなく運用しなければならない。

また、ここに示した計算フォーマットは他でも使えるはずだから活用してもらいたい。