

Ⅲ 耐久性能照査の照査例

1. 照査条件

照査条件を表 1-1 のように仮定する。なお、ひび割れに対する照査で、「示方書[構造性能照査編]」の特に厳しい腐食性環境の許容ひび割れ幅 ($w_a=0.0035c=0.0035 \times 100=0.35\text{mm}$) 以内であることを確認したことを前提とする。

表 1-1 照査条件一覧

分類	項目	条件	
配合条件	セメントの種類	フライアッシュセメントC種	
	単位体積あたりの水の質量(W)	180kg/m ³	
	単位体積あたりのセメントの質量(C)	400kg/m ³	
	フライアッシュ混合率(Fa/C)	0.22	
	水セメント比(W/C)	0.450	
設計条件	設計耐用年数(t)	40年	
断面諸元およびひび割れの条件	かぶり(c)	100mm	
	鉄筋径	16mm	
	断面厚さ	一般的	
	ひび割れ幅(w)	0.05mm	
	鉄筋位置のコンクリート応力度が零の状態からの鉄筋応力度の増加量 (σ_{se})	150N/mm ²	
環境条件	環境条件 (塩害)	海岸からの距離	飛沫帯
		環境区分	特に厳しい腐食性環境
		温度	15℃
		相対湿度	70%
		酸素濃度	20%(気中)
	環境条件 (中性化)	乾燥しにくい環境	
	環境条件 (凍害)	凍結融解がしばしば繰り返される	
構造物の露出条件 (凍害)	しばしば水で飽和される		

2. 中性化に対する照査

2.1 中性化深さの評価

まず、中性化速度係数の予測値(α_p)を式(2.1-1)(耐震性能照査マニュアル式(6.5-3))により計算する。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \cdot W/B \text{ (mm}/\sqrt{\text{年}}) \tag{2.1-1}$$

ここに、 W/B : 有効水結合材比 [= $W/(C_p + k \cdot A_d)$]

W : 単位体積あたりの水の質量

B : 単位体積あたりの有効結合材の質量

C_p : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

A_d : 単位体積あたりの混和材の質量

k : 混和材の種類により定まる定数 フライアッシュの場合、 $k=0$

高炉スラグ微粉末の場合、 $k=0.7$

先に、有効水結合材比を求める。

$$A_d = 400 \times 0.22 = 88 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2.1-2)$$

$$C_p = 400 - 88 = 312 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2.1-3)$$

$$W/B = 180 / (312 + 0 \times 90) = 0.58 \quad (2.1-4)$$

よって、中性化速度係数の予測値は次の通りとなる。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \times 0.58 = 1.65 \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}}\text{)} \quad (2.1-5)$$

安全係数 $\gamma_p = 1.1$ であるので、中性化速度係数の特性値 (α_k) は、次の通りである。

$$\alpha_k = \gamma_p \cdot \alpha_p = 1.1 \times 1.65 = 1.82 \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}}\text{)} \quad (2.1-6)$$

海水に接する環境ではコンクリートは乾燥しにくいと考えられるので、 $\beta_e = 1.0$ とし、コンクリートの材料係数を一般の $\gamma_c = 1.0$ とすると、中性化速度係数の設計値は次のようになる。

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c = 1.82 \times 1.0 \times 1.0 = 1.82 \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}}\text{)} \quad (2.1-7)$$

中性化深さの設計値 (y_d) は、 $\gamma_{cb} = 1.15$ とすると次のように計算される。

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \cdot \sqrt{t} = 1.15 \times 1.82 \times \sqrt{40} = 13.2 \text{ (mm)} \quad (2.1-8)$$

2.2 照査用限界値の設定

中性化深さの照査用限界値 (y_{lim}) は、式(2.2-1) (耐震性能照査マニュアル式(6.5-4)) により算定する。

$$y_{lim} = c - c_k \quad (2.2-1)$$

ここに、 c : かぶりの期待値(mm). 一般に、設計かぶりとしてよい。

c_k : 中性化残り(mm). 一般に、通常環境下では 10mm, 塩分環境下では 10~25mm としてよい。

中性化残りを、塩分環境下の $c_k = 25$ (mm) とすると、照査用限界値は次のようになる。

$$y_{lim} = c - c_k = 100 - 25 = 75 \text{ (mm)} \quad (2.2-2)$$

2.3 中性化に対する照査

耐震性能照査マニュアルの式(6.5-1)により照査を行う。構造物係数を $\gamma_i = 1.1$ とすると、次式のようになり、設計値が限界値を超えないことが確認された。

$$\gamma_i \cdot \frac{y_d}{y_{lim}} = 1.1 \times \frac{13.2}{75} = 0.194 \leq 1.0 \quad (2.3-1)$$

3. 塩害に対する照査

3.1 鉄筋に腐食が発生しないことを限界状態とする場合

(1) 鉄筋位置における塩化物イオン濃度の評価

まず、耐震性能照査マニュアルのフライアッシュセメントの式(6.5-9)により、拡散係数の予測値(D_p)を計算する。

$$\begin{aligned} \log D_p &= -3.0 \cdot (W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 & (3.1-1) \\ &= -3.0 \times 0.450^2 + 5.4 \times 0.450 - 2.2 \\ &= -0.378 \end{aligned}$$

$$D_p = 0.419 \text{ (cm}^2\text{/年)} \quad (3.1-2)$$

拡散係数の特性値(D_k)は次式のようになる。ここで、予測式の精度に関する安全係数は、耐震性能照査マニュアル式(6.5-9)を使用したので、 $\gamma_p = 1.2$ を用いる。

$$D_k = \gamma_p \cdot D_p = 1.2 \times 0.419 = 0.503 \text{ (cm}^2\text{/年)} \quad (3.1-3)$$

次に、ひび割れ幅とひび割れ間隔の比(w/l)を耐震性能照査マニュアルの式(6.5-7)により計算する。鉄筋のヤング係数は $E_s = 200 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$ 、コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅増加を考慮するための係数は、一般的な $\epsilon'_{csd} = 150 \times 10^{-6}$ とする。

$$\begin{aligned} \frac{w}{l} &= 3 \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon'_{csd} \right) & (3.1-4) \\ &= 3 \times \left(\frac{150}{200000} + 0.000150 \right) \\ &= 0.00270 \end{aligned}$$

拡散係数の設計値(D_d)は耐震性能照査マニュアルの式(6.5-6)により求める。コンクリートの材料係数を $\gamma_c = 1.0$ とし、ひび割れの影響を表す定数はマニュアルに従い $D_0 = 200 \text{ cm}^2\text{/年}$ とする。許容ひび割れ幅は「示方書「構造性能照査編」」の特に厳しい腐食性環境の許容ひび割れ幅として次式のように求められる。

$$w_a = 0.0035c = 0.0035 \times 100 = 0.35 \text{ (mm)} \quad (3.1-5)$$

$$D_d = \gamma_c D_k + \left(\frac{w}{l} \right) \left(\frac{w}{w_a} \right)^2 D_0 \quad (3.1-6)$$

$$= 1.0 \times 0.503 + 0.00270 \times \left(\frac{0.05}{0.35} \right)^2 \times 200$$

$$= 0.514 \text{ (cm}^2/\text{年)}$$

鉄筋位置における塩化物イオン濃度(C_d)は、耐震性能照査マニュアル式(6.5-5)により、以下のように算定される。鉄筋位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d のばらつきを考慮した安全係数は $\gamma_{Cl} = 1.3$ 、コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度は、耐震性能照査マニュアル表 6.5-1 の飛沫帯の値 $C_0 = 13.0 \text{ kg/m}^3$ を用いる。

$$C_d = \gamma_{Cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c}{2 \sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} \quad (3.1-7)$$

$\operatorname{erf}(s)$ は、誤差関数であり、 $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$ で表される。

$$C_d = 1.3 \times 13.0 \times \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \times 100}{2 \times \sqrt{0.514 \times 40}} \right) \right\} \quad (3.1-8)$$

$$= 2.01 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

(2) 照査用限界値の設定

照査用限界値である鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度(C_{lim})は、一般的な値として $C_{lim} = 1.2 \text{ kg/m}^3$ とする。

(3) 照査

耐震性能照査マニュアルの式(6.5-1)により照査を行う。構造物係数を $\gamma_i = 1.1$ とすると次式のようになり、設計値が限界値を超えており、照査に合格しない。

$$\gamma_i \cdot \frac{C_d}{C_{lim}} = 1.1 \times \frac{2.01}{1.2} = 1.84 > 1.0 \quad (3.1-9)$$

3.2 鉄筋腐食によるひび割れが発生しないことを限界状態とする場合

ここでは、方法1による照査例を示す。

① 設計耐用期間終了時の腐食量の算出

まず、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の経年変化を耐震性能照査マニュアル式(6.5-6)～式(6.5-10)により算出する。拡散係数の設計値(D_d)の算出は、前述の「3.1 鉄筋に腐食が発生しないことを限界状態とする場合」と全く同じである(式(3.1-1)～式(3.1-6)参照)。拡散係数の設計値($D_d = 0.514 \text{ cm}^2/\text{年}$)、かぶり($c = 100 \text{ mm}$)、コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度(耐震性能照査マニュアル表 6.5-1 の飛沫帯の値 $C_0 = 13.0 \text{ kg/m}^3$)、鉄筋位置における塩化物イオン濃度の評価値 Cl_m のばらつきを考慮した安全係数($\gamma_{Cl} = 1.3$)を耐震性能照査マニュアル式(6.5-10)に代入すると、式(3.2-1)のようになり、鉄筋位置における塩化物イオン濃度の評価値 Cl_m は、経過年数 t_n の関数として表される。

$$Cl_m = 1.3 \times 13.0 \times \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \times 100}{2 \times \sqrt{0.514 \times t_n}} \right) \right\} \quad (3.2-1)$$

式(3.2-1)により、時間刻み(Δt)を1年として、経過年数0年から40年までの鉄筋位置の塩化物イオン濃度の評価値を計算すると図3.2-1のようになる。

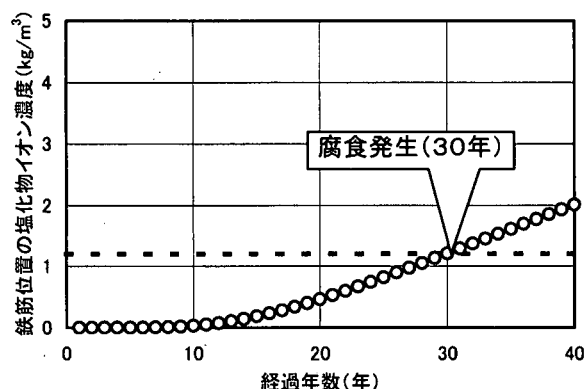


図 3.2-1 鉄筋位置の塩化物イオン濃度の経年変化算出結果(時間刻み1年)

次に、経過年数毎の腐食速度 V_{1m} を耐震性能照査マニュアル式(6.5-12)～式(6.5-15)により計算する。鉄筋径($d=16\text{mm}$)、かぶり($c=100\text{mm}$)、水セメント比($W/C=0.450$)、湿度に関する項($H=(70-45)/100=0.25$)、酸素濃度($O=0.20$)、温度($T=15^\circ\text{C}$)を代入すると式(3.2-2)～式(3.2-5)のようになり、経過年数毎の腐食速度 V_{1m} は鉄筋位置の塩化物イオン濃度の関数となる。

$$V_{1m} = V_{11m} \times \frac{V_{12m}}{V_{12m}} \quad (3.2-2)$$

$$V_{11m} = \frac{16}{10 \times 100^2} \left(-0.51 - 6.81 \cdot Cl_m + 44.97 \cdot (0.450)^2 + 60.84 \cdot Cl_m \cdot (0.450)^2 \right) \quad (3.2-3)$$

$$V_{12m} = \frac{1}{10} (2.59 - 0.05 \times 15 - 6.89 \times 0.25 - 22.87 \times 0.20 - 0.89 \times Cl_m + 0.14 \times 15 \times 0.25 + 0.51 \times 15 \times 0.20 + 0.01 \times 15 \times Cl_m + 60.81 \times 0.25 \times 0.20 + 3.01 \times 0.25 \times Cl_m + 6.55 \times 0.20 \times Cl_m) \quad (3.2-4)$$

$$V_{12m}' = \frac{1}{10} (0.56528 + 1.2808 \cdot Cl_m) \quad (3.2-5)$$

経過年数毎に鉄筋位置の塩化物イオン濃度 Cl_m (図3.2-1の値)を代入し、塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 未満の期間の腐食速度をゼロとすると、経過年数毎の腐食速度は図3.2-2のように算出される。

照査例Ⅲ

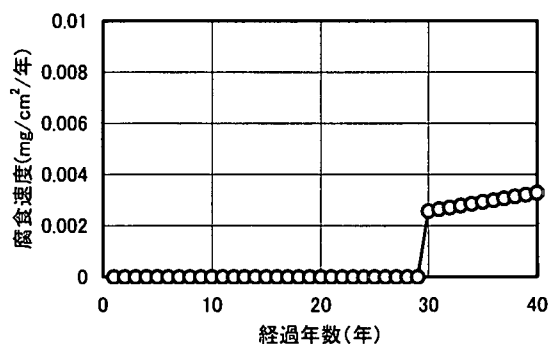


図 3.2-2 腐食速度 V_1 の経年変化の算出結果

続いて、経過年数毎の腐食速度 V_{1n} の設計耐用期間における時間積分値を計算し、腐食量の評価値とする。腐食量の評価値 Q_{1E} は、耐震性能照査マニュアル式(6.5-16)に示す台形公式により求める。時間刻み($\Delta t=1$ 年), $N=t/\Delta t=40$ 年/1年=40より、式(3.2-6)のようになる。

$$Q_{1E} = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{39} \{V_{1n} + V_{1(n+1)}\} \quad (3.2-6)$$

$$= \frac{1}{2} \{ (V_{10} + V_{11}) + (V_{11} + V_{12}) + \dots + (V_{139} + V_{140}) \}$$

式(3.2-6)に図 3.2-2 の結果を代入すると、式(3.2-7)のように腐食量の評価値 Q_{1E} が得られる。設計耐用期間終了時における腐食量の設計値 Q_{1d} は、耐震性能照査マニュアル式(6.5-18)により、式(3.2-8)のように求められる。

$$Q_{1E} = 0.031(\text{mg/cm}^2) \quad (3.2-7)$$

$$Q_{1d} = \gamma_q \cdot Q_{1E} = 1.3 \times 0.031 = 0.040(\text{mg/cm}^2) \quad (3.2-8)$$

②ひび割れ発生限界腐食量の算出

ひび割れ発生限界腐食量は耐震性能照査マニュアル式(6.5-18)に、かぶり ($c=100\text{mm}$), 鉄筋径 ($d=16\text{mm}$) を代入して、式(3.2-9)のように求められる。

$$Q_{1cr} = 0.0602 \left(1 + \frac{2 \times 100}{16} \right)^{0.85} 16 \quad (3.2-9)$$

$$= 8.80(\text{mg/cm}^2)$$

③照査

耐震性能照査マニュアルの式(6.5-1)により照査を行う。構造物係数を $\gamma_i=1.1$ とすると式(3.2-10)の通りとなり、設計値が限界値を超えないことが確認された。

$$\gamma_i \cdot \frac{Q_{ld}}{Q_{lcr}} = 1.1 \times \frac{0.040}{8.80} = 0.005 \leq 1.0 \quad (3.2-10)$$

4. 凍害に対する照査

4.1 設計値の算定

耐震性能照査マニュアルの式(6.5-29)により相対動弾性係数の設計値(E_d)を算定する。コンクリートの凍結融解試験 JIS A 1148(A 法)によって得られたコンクリートの相対動弾性係数の予測値 $E_p=90(\%)$ とする。 E_p の精度に関する安全係数は、JIS A 1148(A 法)を用いたので、 $\gamma_p=1.0$ とし、コンクリートの材料係数は、一般の $\gamma_c=1.0$ を用いることにする。

$$E_k = E_p / \gamma_p = 90 / 1.0 = 90 \quad (4.1-1)$$

$$E_d = E_k / \gamma_c = 90 / 1.0 = 90 \quad (4.1-2)$$

4.2 照査用限界値の設定

照査用限界値である相対動弾性係数の最小限界値(E_{min})を耐震性能照査マニュアルの表 6.5-2 に従い、設定する。凍結融解がしばしば繰り返される気象条件における一般の断面で、しばしば水で飽和される場合は $E_{min}=70(\%)$ である。

$$E_{min} = 70 (\%) \quad (4.2-1)$$

4.3 凍害に対する照査

耐震性能照査マニュアルの式(6.5-1)の凍害の式により照査を行う。構造物係数を $\gamma_i=1.1$ とすると、次式のようになり、満足していることが確認された。

$$\gamma_i \cdot \frac{E_{min}}{E_d} = 1.1 \times \frac{70}{90} = 0.85 \leq 1.0 \quad (4.3-1)$$