

指針(案)及び手引書(案)の主な改訂点

「コンクリート標準示方書(土木学会)」の2012年改訂をうけ、指針(案)及び手引書(案)の「耐久性の照査(中性化・塩害)」について部分的な改訂を行った。

(1) 指針(案) [平成23年10月(改訂版)]からの改訂点

「2.2.4 構造物の耐久性照査」p.2-6～p.2-12について、「2012年制定コンクリート標準示方書」に準拠した照査方法に修正し、記述内容の見直しを行った。

主な修正点は以下の通りである。

① 中性化

- ・ 中性化速度係数の予測値 (α_p) を削除。

② 塩害

- ・ 鋼材腐食発生限界濃度 (C_{lim}) の算出式が、セメントの種類ごとに設定され、水セメント比の変化に対応。
- ・ 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 (C_d) の算出式の変更。
- ・ コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (C_0) について、離岸距離10m及び20mの値を補間。「解説 表2.2.2」参照。
- ・ コンクリートの塩化物イオン拡散係数の特性値 (D_k) の算出式について、セメントの種類が追加拡充されたことへの対応。
- ・ p.2-10に示されていた「塩害に対する照査を満足する拡散係数およびかぶり判定図」を、水セメント比からかぶりを算出できる「塩害に対する照査を満足する水セメント比およびかぶり判定図」に変更。

(2) 手引書(案) [平成23年10月(改訂版)]からの改訂点

手引書(案) [本編・照査実務事例編]において、「2012年制定コンクリート標準示方書」及び指針(案)の改訂に準拠し、耐久性の照査(中性化、塩害)記述について修正。

2.2.4 構造物の耐久性照査

コンクリート構造物が、所要の耐久性能を設計耐用期間にわたり満足することを照査しなければならない。照査する場合は、構造物の置かれる環境条件に応じて以下の項目に関してコンクリート構造物の耐久性を照査しなければならない。

- (1) 中性化に伴う鋼材腐食に対する照査
- (2) 塩害に対する照査
- (3) アルカリ骨材反応に対する照査
- (4) 凍害に対する照査
- (5) 化学的侵食に対する照査

【解 説】(1)について コンクリートの中性化は鉄筋の腐食と密接な関係にあり、中性化の進行と共に鉄筋の腐食が始まる。中性化速度は、主にセメントの種類、水セメント比（水結合材比）、および環境条件に支配される。

土木学会コンクリート標準示方書では、中性化深さの設計値 y_d の鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} （かぶり c から施工誤差 Δc_e および中性化残り c_k を差し引いた値）に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより中性化に対する照査を行っている。

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0 \quad (2.2.1)$$

中性化深さ y は一般的に、次式で表されるように経過年数 t の平方根に比例し、その比例定数 α を「中性化速度係数」と呼ぶ。

$$y = \alpha \sqrt{t} \quad (2.2.2)$$

中性化深さの設計値を求める上で必要となる中性化速度係数は、実験あるいは既往のデータに基づいて定める必要があるが、次式により求めてもよい。なお、同一の水セメント比であっても、セメントに普通ポルトランドセメントのみを用いた場合と、高炉セメントを用いた場合とでは、中性化速度係数が異なることに留意する必要がある。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \cdot (W/B) \quad (2.2.3)$$

ここで、 α_p ：中性化速度係数の予測値 (mm/√(年))

W/B ：有効水結合材比。 $W/B = W / (C_p + k \cdot A_d)$

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 $k=0.7$

2.2.4 構造物の耐久性照査

コンクリート構造物が、所要の耐久性能を設計耐用期間にわたり満足することを照査しなければならない。照査に際して、構造物の置かれる環境条件に応じて以下の項目に関してコンクリート構造物の耐久性を照査することとする。

- (1) 中性化に伴う鋼材腐食に対する照査
- (2) 塩害に対する照査
- (3) アルカリ骨材反応に対する照査
- (4) 凍害に対する照査
- (5) 化学的侵食に対する照査

【解 説】(1)について コンクリートの中性化は鉄筋の腐食を引き起こすことから、中性化がある程度進行すると鉄筋の腐食が始まる。中性化速度は、主にセメントの種類、水セメント比（水結合材比）、および環境条件等に支配される。

土木学会コンクリート標準示方書では、中性化深さの設計値 y_d と鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} （かぶり c から施工誤差 Δc_e および中性化残り c_k を減じた値）の比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより中性化に対する照査を行っている。(2.2.1) 式参照。

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0 \quad (2.2.1)$$

中性化深さ y は一般的に、次式で表されるように経過年数 t の平方根に比例し、その比例定数 α を「中性化速度係数」と呼ぶ。

$$y = \alpha \sqrt{t} \quad (2.2.2)$$

中性化深さの設計値を求める上で必要となる中性化速度係数は、実験あるいは既往のデータに基づいて定めることを原則とするが、次式により求めてもよい。なお、同一の水セメント比であっても、セメントに普通ポルトランドセメントのみを用いた場合と、高炉セメント等の混合セメントを用いた場合とでは、中性化速度係数が異なる。(2.2.2) 式参照。なお、ここでは有効結合材とする概念を導入している。

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \cdot (W/B) \quad (2.2.3)$$

ここで、 α_k ：中性化速度係数の特性値 (mm/√(年))

W/B ：有効水結合材比。 $W/B = W / (C_p + k \cdot A_d)$

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 $k=0.7$

なお、ここでの単位体積はコンクリートの単位体積である。

指針(案) 平成 23 年 10 月(現行)

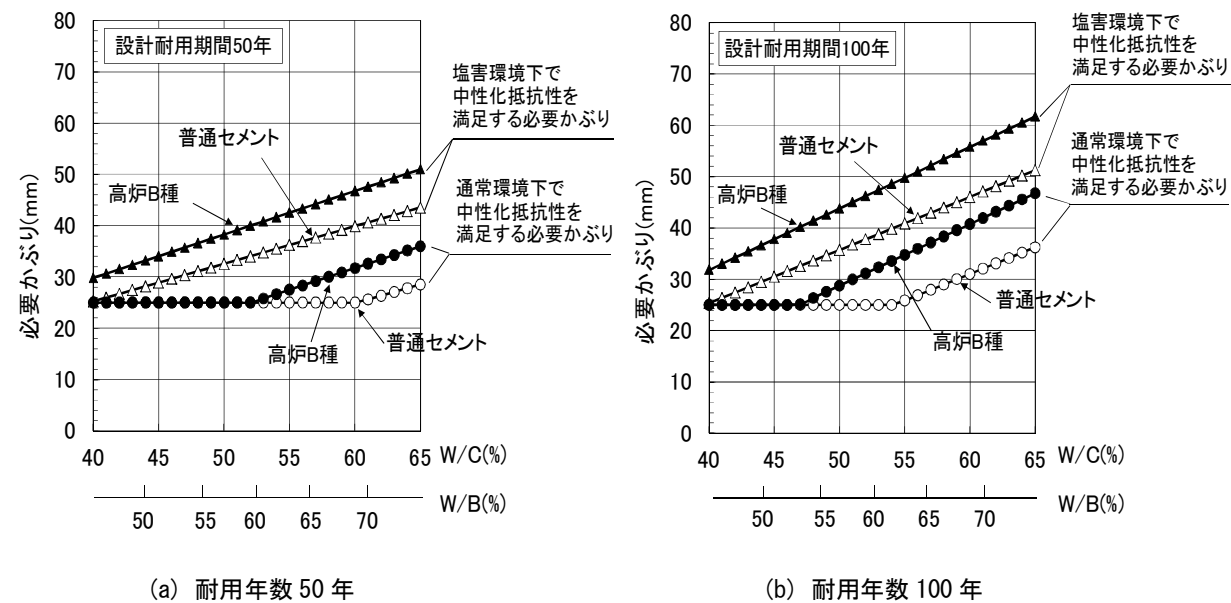
この照査方法により設計耐用期間 50 年および 100 年に対する必要かぶりを算定した結果を、解説図 2.2.1 に示す。なお、算定にあたっては解説表 2.2.1 に示す値を使用し、中性化深さの設計値 y_d は、次式により算定した。また、算定結果がスラブ部材の最小かぶり 25mm を下回る場合は、必要かぶりを 25mm とした。

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \quad (2.2.4)$$

ここに、 $\alpha_d (= \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c)$ ；中性化速度係数の設計値、 α_k ；中性化速度係数の特性値、 β_e ；環境作用の程度を表す係数、 γ_c ；コンクリートの材料係数、 γ_{cb} ； y_d のばらつきを考慮した安全係数。

解説表 2.2.1 必要かぶり算定に使用した数値

記号	名称	数値
γ_i	構造物係数	1.0
c_k	中性化残り	・ 通常環境下：10mm ・ 塩分環境下：25mm
Δc_e	施工誤差	0mm
t	年数（耐用年数）	50 年, 100 年
γ_p	α_p の精度に関する安全係数	$\gamma_p = 1.0$ $\alpha_k = \gamma_p \cdot \alpha_p$
W/C	水セメント比	0.40~0.65 (40%~65%)
—	使用セメント	・ 普通ポルトランドセメント ・ 高炉セメント B 種 (スラグ置換率 45%) ($W/B=0.46\sim0.75$ に相当.)
β_e	環境作用の程度を表す係数	1.0 (乾燥しにくい環境)
γ_{cb}	y_d のばらつきを考慮した安全係数	1.15
γ_c	コンクリートの材料係数	1.0



解説図 2.2.1 中性化抵抗性を満足する必要かぶり算定結果

指針(案) 平成 25 年暫定改訂(案)

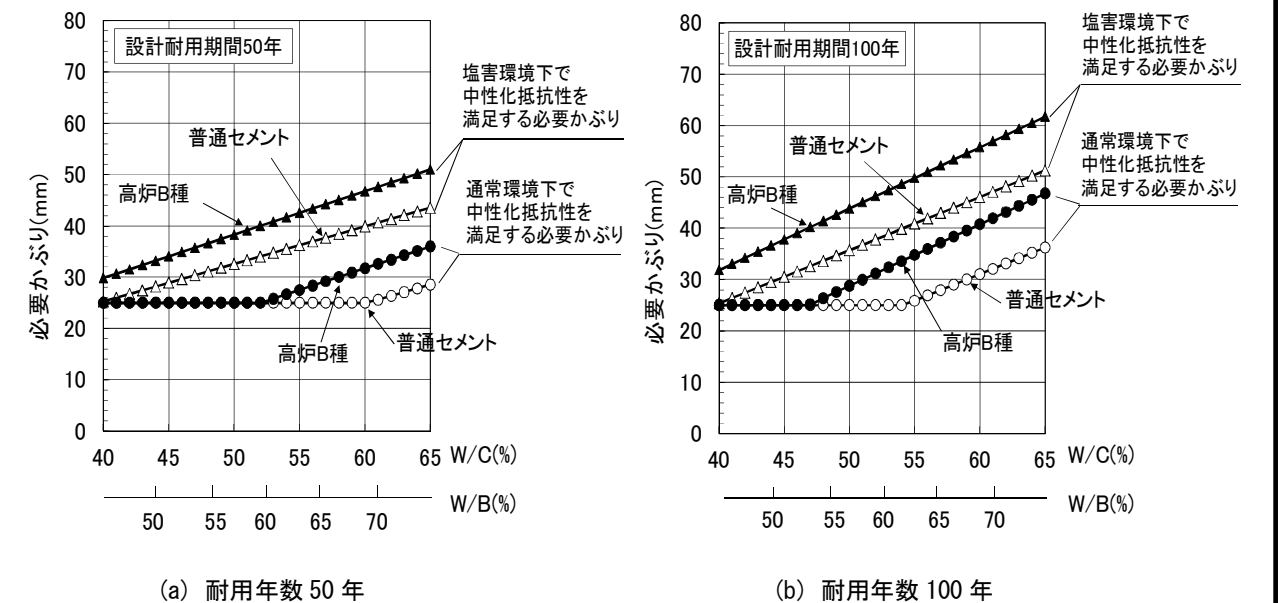
この照査式により設計耐用期間 50 年および 100 年における中性化抵抗性を満足する必要かぶりを算定した結果を、解説図 2.2.1 に示す。なお、算定にあたっては解説表 2.2.1 に示す値を使用し、中性化深さの設計値 y_d は、次式により算定した。

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \quad (2.2.4)$$

ここに、 $\alpha_d (= \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c)$ ；中性化速度係数の設計値、 α_k ；中性化速度係数の特性値、 β_e ；環境作用の程度を表す係数、 γ_c ；コンクリートの材料係数、 γ_{cb} ； y_d のばらつきを考慮した安全係数。

解説表 2.2.1 必要かぶり算定に使用した数値

記号	名称	数値
γ_i	構造物係数	1.0
c_k	中性化残り	・ 通常環境下：10mm ・ 塩分環境下：25mm
Δc_e	施工誤差	0mm
t	年数（耐用年数）	50 年, 100 年
W/C	水セメント比	0.40~0.65 (40%~65%)
—	使用セメント	・ 普通ポルトランドセメント ・ 高炉セメント B 種 (スラグ置換率 45%) ($W/B=0.46\sim0.75$ に相当.)
β_e	環境作用の程度を表す係数	1.0 (乾燥しにくい環境)
γ_{cb}	y_d のばらつきを考慮した安全係数	1.15
γ_c	コンクリートの材料係数	1.0



解説図 2.2.1 中性化抵抗性を満足する必要かぶり算定結果

指針(案) 平成 23 年 10 月(現行)

指針(案) 平成 25 年暫定改訂(案)

道路橋示方書では、床版、地覆、高欄、支間 10m 以下の床版橋に対して、最小かぶりは 30mm と定めている。したがって、解説 図 2.2.1 より、普通ポルトランドセメントを用いる場合、耐用年数 50 年では水セメント比が約 60%以下の領域で、耐用年数 100 年では水セメント比が約 55%以下の領域で、かぶりを 30mm 以上とすることにより、中性化に対する抵抗性は満足できると言える。

よって、九州地方整備局において通常の環境に建設されるコンクリート構造物（セメントに普通ポルトランドセメントのみを用いた場合）は、道路橋示方書に示される最小かぶりの規定を遵守することで中性化に対する照査を省略することができる。しかし、セメントに高炉セメントやフライアッシュセメントを用いる場合や塩害環境下に建設される場合は、土木学会コンクリート標準示方書に従い、中性化に対する照査を行わなければならない。

(2)について 海岸構造物および凍結防止剤が散布されるおそれのある構造物では、塩化物イオンの侵入により、設計耐用期間に対してコンクリート中の鋼材が腐食しないことを照査しなければならない。照査の結果、鋼材腐食のおそれがある場合は、かぶりの増大、エポキシ樹脂被覆鋼材の使用、コンクリート表面の被覆、電気防食など適切な措置をしなければならない。

土木学会コンクリート標準示方書では、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d と鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} との比に構造物係数 γ_i を乗じた値が 1.0 以下であることを確かめることにより塩害に対する照査を行っている。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad (2.2.5)$$

鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} は、類似の構造物の実測結果や試験結果を参考に定めてよい。それによらない場合は 1.2 kg/m^3 としてよい。また、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d は Fick の拡散方程式の解である次式により求めることができる。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} \quad (2.2.6)$$

ここで、 γ_{cl} : C_d のばらつきを考慮した安全係数。一般に 1.3 としてよい。

C_0 : コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 (kg/m^3) (解説 表 2.2.2)

c_d : かぶりの設計値 (mm)。かぶり c から施工誤差 Δc_e を差し引いた値。

t : 耐用年数 (年)

D_d : 塩化物イオンに対する設計拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

$\operatorname{erf}(s)$: 誤差関数であり、 $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \doteq \sqrt{1 - e^{-\frac{4s^2}{\pi}}}$ で表される。

解説 表 2.2.2 コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m^3)

飛来塩分が多い地域	飛来塩分が少ない地域	飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
北海道, 東北, 北陸, 沖縄	関東, 東海, 近畿, 中国, 四国, 九州	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
9.0			4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

海岸付近の高さ方向については、高さ 1m が汀線からの距離 25m に相当すると考えて C_0 を求めてよい。

道路橋示方書では、床版、地覆、高欄、支間 10m 以下の床版橋に対して、最小かぶりは 30mm と定めている。したがって、解説 図 2.2.1 より、普通ポルトランドセメントを用いる場合、耐用年数 50 年では水セメント比が約 60%以下の領域で、耐用年数 100 年では水セメント比が約 55%以下の領域で、かぶりを 30mm 以上とすることにより、中性化に対する抵抗性は満足できると言える。

よって、九州地方整備局において通常の環境に建設されるコンクリート構造物（セメントに普通ポルトランドセメントのみを用いた場合）は、道路橋示方書に示される最小かぶりの規定を遵守することで中性化に対する照査を省略することができる。しかし、セメントに高炉セメントやフライアッシュセメントを用いる場合や塩害環境下に建設される場合は、中性化に対する照査を行わなければならない。

(2)について 海岸構造物および凍結防止剤が散布されるおそれのある構造物では、塩化物イオンの侵入により、設計耐用期間に対してコンクリート中の鋼材が腐食しないことを照査しなければならない。照査の結果、鋼材腐食が発生する場合は、かぶりの増大、エポキシ樹脂被覆鋼材の使用、コンクリート表面の被覆、電気防食など適切な措置を講じなければならない。

土木学会コンクリート標準示方書では、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d と鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} との比に構造物係数 γ_i を乗じた値が 1.0 以下であることを確かめることにより塩害に対する照査を行っている。(2.2.5) 式参照。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad (2.2.5)$$

鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} は、類似の構造物の実測結果や試験結果に基づいて定めてよい。それによらない場合は式(2.2.6)～式(2.2.9)を用いて定めてよい。ただし W/C の範囲は、0.30～0.55 とする。なお、凍結融解作用を受ける場合には、これらの値よりも小さな値とするのがよい。

(普通ポルトランドセメントを用いた場合)

$$C_{lim} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad (2.2.6)$$

(高炉セメント B 種相当, フライアッシュセメント B 種相当を用いた場合)

$$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1 \quad (2.2.7)$$

(低熱ポルトランドセメント, 早強ポルトランドセメントを用いた場合)

$$C_{lim} = -2.2(W/C) + 2.6 \quad (2.2.8)$$

(シリカフェームを用いた場合)

$$C_{lim} = 1.20 \quad (2.2.9)$$

また、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d は Fick の拡散方程式の解である次式により求めることができる。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} + Ci \quad (2.2.10)$$

ここで、 γ_{cl} : C_d のばらつきを考慮した安全係数。一般に 1.3 としてよい。

C_0 : コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 (kg/m^3) (解説 表 2.2.2)

c_d : かぶりの設計値 (mm)。かぶり c から施工誤差 Δc_e を減じた値。

t : 耐用年数 (年)

D_d : 塩化物イオンに対する設計拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

Ci : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3)。一般に 0.3 kg/m^3 としてよい。

指針(案) 平成 23 年 10 月(現行)

なお、 C_0 の値は、九州地区では解説 表 2.2.2 の下欄の値を用いるが、島嶼部や気温の高い地域では上欄・下欄の中間的な値を採用するなど、別途検討が必要である。

塩化物イオンの拡散係数 D は次式により求めてよい。水セメント比 W/C と次式により求めた拡散係数との関係を解説 図 2.2.2 に示す。ただし、実験値あるいは既往のデータがある場合は、そのデータを用いてもよい。

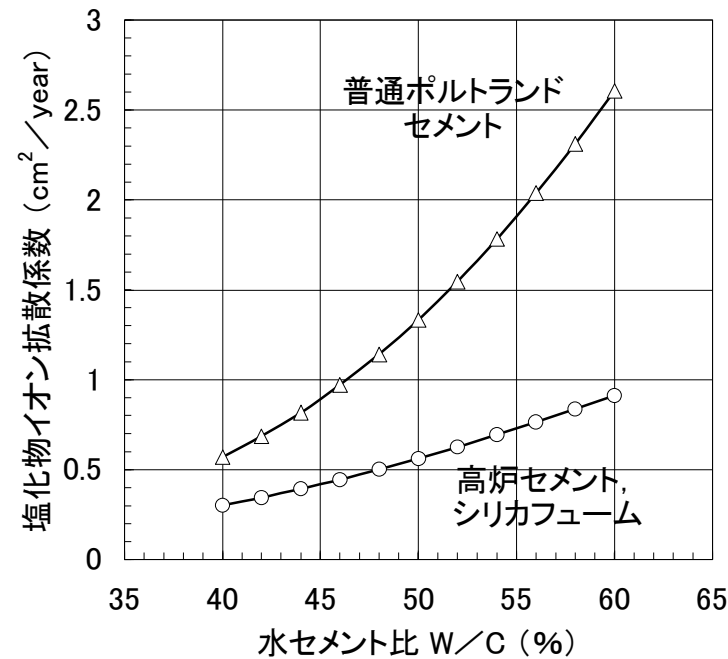
土木学会コンクリート標準示方書

(a) 普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (2.2.7)$$

(b) 高炉セメントやシリカフェームを使用する場合

$$\log D = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \quad (2.2.8)$$



解説 図 2.2.2 水セメント比と塩化物イオン拡散係数の関係

設計耐用期間 50 年後および 100 年後において、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 以下となる拡散係数およびかぶりの組み合わせを、解説 図 2.2.3 に示す。この図は、環境条件（解説 表 2.2.2 に示されるコンクリート表面における塩化物イオン濃度）ごとに必要なかぶりを算定するために用いることができる。拡散係数とかぶりの関係が環境条件ごとに示される曲線よりも右側にプロットされる場合、所要の塩化物イオン浸透抵抗性を有すると言える。

指針(案) 平成 25 年暫定改訂(案)

$$\text{erf}(s) : \text{誤差関数} \left(\text{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \doteq \sqrt{1 - e^{-\frac{4s^2}{\pi}}} \right)$$

解説 表 2.2.2 コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m^3)

	飛沫帯	離岸距離 (m)							
		汀線付近	10	20	100	250	500	1000	
飛来塩分が多い地域	北海道, 東北 北陸, 沖縄	13.0	9.0	-	-	4.5	3.0	2.0	1.5
			4.5	-	-	2.5	2.0	1.5	1.0
飛来塩分が少ない地域	九州		9.0	9.0	4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

高い位置ほど表面塩化物イオン濃度が減少する場合もあるので、その場合には適切に考慮するのがよい。

なお、 C_0 の値は、九州地区では解説 表 2.2.2 の下欄の値（九州）を用いるが、島嶼部や気温の高い地域では別途検討が必要である。

塩化物イオンの拡散係数 D_k は次式により求めてよい。ただし、水セメント比 0.30 以上、0.55 以下とする。なお、実験値あるいは既往のデータがある場合は、そのデータを用いてもよい。

土木学会コンクリート標準示方書

(a) 普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log_{10} D_k = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (2.2.11)$$

(b) 低熱ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log_{10} D_k = 3.5(W/C) - 1.8 \quad (2.2.12)$$

(c) 高炉セメント B 種相当、シリカフェームを使用する場合

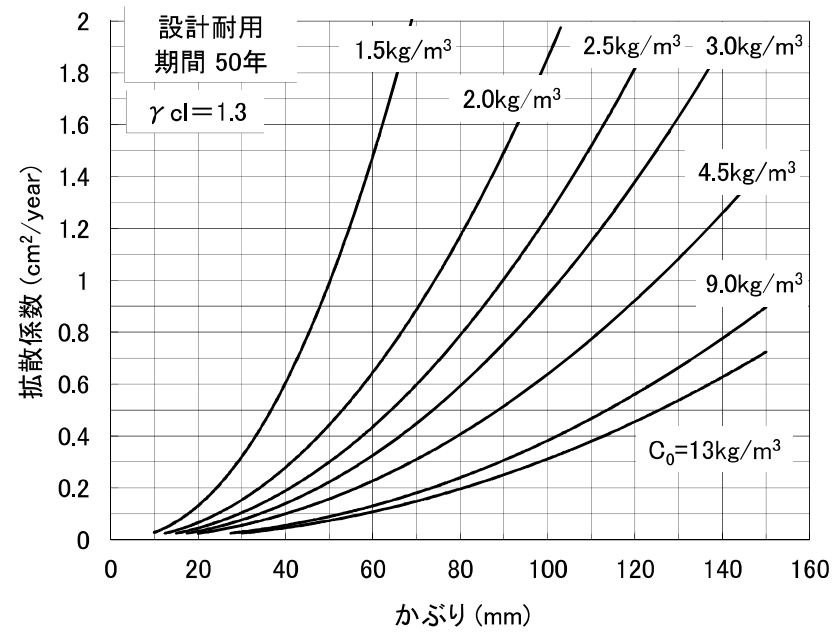
$$\log_{10} D_k = 3.2(W/C) - 2.4 \quad (2.2.13)$$

(d) フライアッシュセメント B 種相当を使用する場合

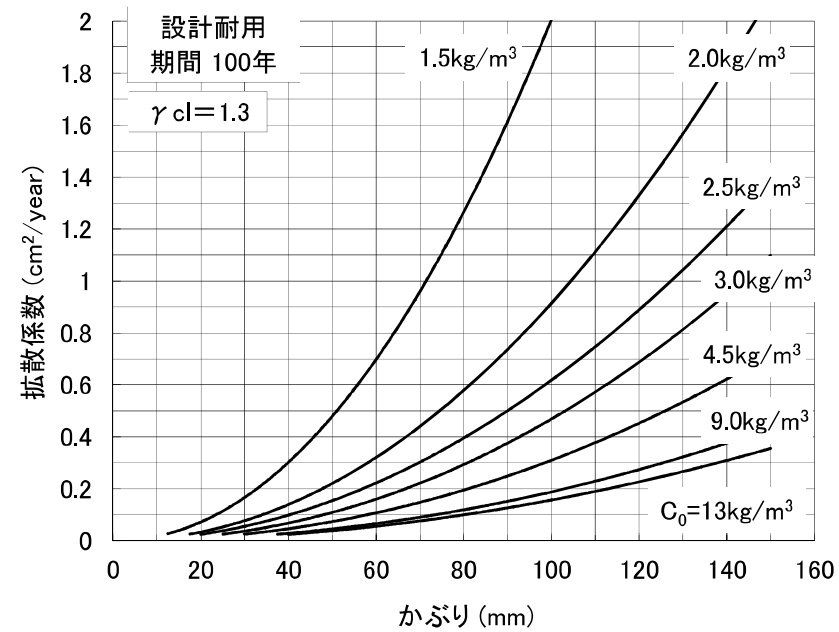
$$\log_{10} D_k = 3.0(W/C) - 1.9 \quad (2.2.14)$$

設計耐用期間 50 年時および 100 年時において、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が C_{lim} 以下となる水セメント比とかぶりの関係図を解説 図 2.2.2 に示す。この図は、環境条件（解説 表 2.2.2 に示されるコンクリート表面における塩化物イオン濃度）ごとに必要なかぶりを算定するために用いることができる。拡散係数とかぶりの関係が環境条件ごとに示される曲線よりも右側にプロットされる場合、所要の塩化物イオン浸透抵抗性を有すると言える。

指針(案) 平成 23 年 10 月(現行)



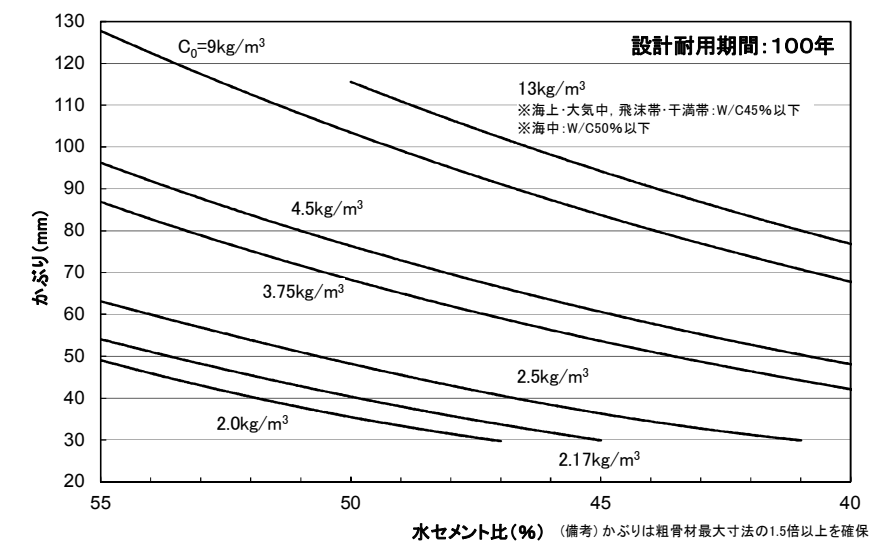
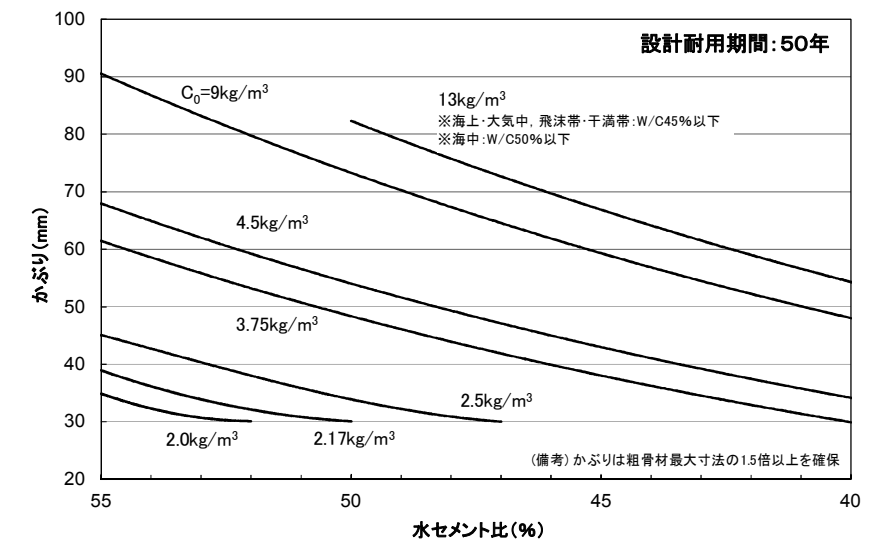
(a) 設計耐用期間 50 年の場合



(b) 設計耐用期間 100 年の場合

解説 図 2.2.3 塩害に対する照査を満足する拡散係数およびかぶり判定図 ($\gamma_{cl}=1.3$)
(曲線の右側にプロットされる場合は照査を満足する)

指針(案) 平成 25 年暫定改訂(案)



※離岸距離 500m 以上 ($C_0: 1.5\text{kg/m}^3$ 以下) の必要かぶりは 30mm 以上となる

必要かぶり算定に使用した数値

記号	名称	数値
γ_l	構造物係数	1.0
—	使用セメント	高炉セメント B 種
W/C	水セメント比	0.40~0.55 (40%~55%)
Δc_e	施工誤差	0mm
t	年数 (耐用年数)	50 年, 100 年
γ_{cl}	鋼材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	1.3
C_i	初期塩化物イオン濃度	0.30kg/m ³
D_d	塩化物イオンに対する設計拡散係数	$\gamma_e \cdot D_k \cdot \beta_{cl}$
γ_c	コンクリートの材料係数	1.0
β_{cl}	初期ひび割れの影響を考慮した係数	1.15

解説 図 2.2.2 塩害に対する照査を満足する水セメント比およびかぶり判定図
(曲線の右側にプロットされる場合は照査を満足する)

指針(案) 平成 23 年 10 月(現行)

また、土木研究所では暴露供試体による調査結果(供試体サイズ:90×90×30cm, 暴露位置:海岸から約20m)を基にした塩化物イオンの拡散係数と W/C との関係式を提案している。道路橋示方書では、土木研究所の推定式を参考に、塩害の影響を受けるプレストレストコンクリート構造物および鉄筋コンクリート構造物のかぶりの最小値を、塩害を受ける程度によって定めている。例えば、設計耐用期間を100年とし、塩害の影響が激しい地域(PCでは、海岸線から20mまで、RCでは50mまで)では最小値を70mmとし、かつ塗装鉄筋の使用またはコンクリート塗装を併用することとしている。その際のコンクリートの水セメント比はプレストレストコンクリート構造物(工場製品以外のもの)の場合43%、鉄筋コンクリート構造物の場合50%を想定している。

しかし、過酷な環境下においては道路橋示方書に示される塩害対策を行った場合でも劣化が生じることが認められているので、このような場合は土木学会の予測式によって照査を行った方がよい。

また、路面凍結防止剤を使用する場合は、路面排水の漏水、車両による飛散などに起因する塩化物イオンの侵入についても検討する。

なお、港湾、海岸、海洋に建設される構造物では、土木学会 コンクリート標準示方書〔施工編:特殊コンクリート〕「第11章 海洋コンクリート」において最大水セメント比が示されているので、水セメント比はこの値以下でなければならない。

(3)について 骨材のアルカリ骨材反応性は、同じ骨材であっても、試験法(JIS化学法、JISモルタルバー法、ASTM法など)ごとに判定が異なることが報告されている。また、海岸付近や凍結防止剤が散布される地域では、アルカリの供給によりアルカリ骨材反応が促進されることが指摘されている。

九州地域では、アルカリ骨材反応による劣化事例が散見される。そのため、設計段階においては構造物の建設予定地の環境条件、アルカリの供給の有無、周囲の既設構造物等を調査し、アルカリ骨材反応による劣化が懸念される場合は、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いるなどの抑制対策をしなければならない。

(4)について 凍害に対する環境条件としては、構造物の露出状況(例えば、地中構造物や水中・海中構造物)や、外気温等の気象条件がある。九州地区では、一部の山間地を除いて凍結するおそれがないので、凍結融解作用に関する照査を省略することができる。凍害に対する危険度の指標として、JASS5「鉄筋コンクリート工事2003」(26節 解説図26.1「凍害危険度の分布図」)を参考としてよい。

(5)について 化学的侵食とは、侵食性物質とコンクリートとの接触によるコンクリートの溶解・劣化や、コンクリートに侵入した侵食性物質がセメント組成物質や鋼材と反応し、体積膨張によるひび割れやかぶりの剥離などを引き起こすなどの劣化現象である。

九州地区では、温泉地域、旧産炭地域、下水道施設などで化学的侵食による劣化が生じており、これらの場所に建設される構造物には、何らかの対策を講じる必要がある。対策工法としては、腐食性環境として軽微な場合には、コンクリートの材料・配合の選定を行うのがよい。しかし、設計耐用期間内に、劣化因子の浸透深さが著しく大きくなると想定されるような厳しい腐食性環境の場合は、土木学会「表面保護工法設計施工指針(案)」に準じて適切な方法を選定し、設計図書に明記する。

上記(1)～(5)に示した対策のみでは構造物に所要の耐久性能を付与することが困難と判断される場合は、専門評価機関を交えて協議しなければならない。

なお、本指針で触れていない特殊な材料、工法および施工方法を採用する場合は、新材料、新技術、新工法に関する既往の研究成果や具体的な実施例とその効果を十分に考慮し、かつ実際に採用のできるものを選定する必要がある。このような特殊な材料、工法および施工に対して土木学会では、以下の指針やマニュアルを制定している。特殊な材料などの検討にあたってはこれらの資料を参考にするとよい。

指針(案) 平成 25 年暫定改訂(案)

また、土木研究所では暴露供試体による調査結果(供試体サイズ:90×90×30cm, 暴露位置:海岸から約20m)を基にした塩化物イオンの拡散係数と W/C との関係式を提案している。道路橋示方書では、土木研究所の推定式を参考に、塩害の影響を受けるプレストレストコンクリート構造物および鉄筋コンクリート構造物のかぶりの最小値を、塩害を受ける程度によって定めている。例えば、設計耐用期間を100年とし、塩害の影響が激しい地域(PCでは、海岸線から20mまで、RCでは50mまで)では最小値を70mmとし、かつ塗装鉄筋の使用またはコンクリート塗装を併用することとしている。その際のコンクリートの水セメント比はプレストレストコンクリート構造物(工場製品以外のもの)の場合43%、鉄筋コンクリート構造物の場合50%を想定している。

しかし、過酷な環境下においては道路橋示方書に示される塩害対策を行った場合でも劣化が生じることが認められているので、このような場合は土木学会の予測式によって照査を行った方がよい。

また、路面凍結防止剤を使用する場合は、路面排水の漏水、車両による飛散などに起因する塩化物イオンの侵入についても検討する。

なお、港湾、海岸、海洋に建設される構造物では、土木学会 コンクリート標準示方書〔施工編:特殊コンクリート〕「第11章 海洋コンクリート」において最大水セメント比が示されているので、水セメント比はこの値以下でなければならない。

(3)について 骨材のアルカリ骨材反応性は、同じ骨材であっても、試験法(JIS化学法、JISモルタルバー法、ASTM法など)ごとに判定が異なることが報告されている。また、海岸付近や凍結防止剤が散布される地域では、アルカリの供給によりアルカリ骨材反応が促進されることが指摘されている。

九州地域では、アルカリ骨材反応による劣化事例が散見される。そのため、設計段階においては構造物の建設予定地の環境条件、アルカリの供給の有無、周囲の既設構造物等を調査し、アルカリ骨材反応による劣化が懸念される場合は、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いるなどの抑制対策をしなければならない。

(4)について 凍害に対する環境条件としては、構造物の露出状況(例えば、地中構造物や水中・海中構造物)や、外気温等の気象条件がある。九州地区では、一部の山間地を除いて凍結するおそれがないので、凍結融解作用に関する照査を省略することができる。凍害に対する危険度の指標として、JASS5「鉄筋コンクリート工事2003」(26節 解説図26.1「凍害危険度の分布図」)を参考としてよい。

(5)について 化学的侵食とは、侵食性物質とコンクリートとの接触によるコンクリートの溶解・劣化や、コンクリートに侵入した侵食性物質がセメント組成物質や鋼材と反応し、体積膨張によるひび割れやかぶりの剥離などを引き起こすなどの劣化現象である。

九州地区では、温泉地域、旧産炭地域、下水道施設などで化学的侵食による劣化が生じており、これらの場所に建設される構造物には、何らかの対策を講じる必要がある。対策工法としては、腐食性環境として軽微な場合には、コンクリートの材料・配合の選定を行うのがよい。しかし、設計耐用期間内に、劣化因子の浸透深さが著しく大きくなると想定されるような厳しい腐食性環境の場合は、土木学会「表面保護工法設計施工指針(案)」や「**けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)**」に準じて適切な方法を選定し、設計図書に明記する。

上記(1)～(5)に示した対策のみでは構造物に所要の耐久性能を付与することが困難と判断される場合は、専門評価機関を交えて協議しなければならない。

なお、本指針で触れていない特殊な材料、工法および施工方法を採用する場合は、新材料、新技術、新工法に関する既往の研究成果や具体的な実施例とその効果を十分に考慮し、かつ実際に採用できるものを選定する必要がある。このような特殊な材料、工法および施工に対して土木学会では、以下の指針やマニュアルを制定している。特殊な材料などの検討にあたってはこれらの資料を参考にするとよい。

指針(案) 平成 23 年 10 月(現行)

- ・海洋コンクリート構造物設計施工指針(案)
- ・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案)(昭和 63 年)
- ・膨張コンクリート設計施工指針(平成 5 年)
- ・高炉スラグ骨材コンクリート設計施工指針(平成 5 年)
- ・高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの施工指針(案) 付・流動化コンクリート施工指針(平成 5 年)
- ・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針(平成 8 年)
- ・フェロニッケルスラグ細骨材コンクリートの施工指針(平成 10 年)
- ・銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針(平成 10 年)
- ・高流動コンクリート施工指針(平成 10 年)
- ・フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)(平成 11 年)
- ・電気化学的防食工法・設計施工指針(案)(平成 13 年)
- ・自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針(案)(平成 13 年)
- ・エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(平成 15 年)
- ・超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)(平成 16 年)
- ・表面保護工法設計施工指針(案)(平成 17 年)

指針(案) 平成 25 年暫定改訂(案)

- ・海洋コンクリート構造物設計施工指針(案)
- ・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案)(昭和 63 年)
- ・膨張コンクリート設計施工指針(平成 5 年)
- ・高炉スラグ骨材コンクリート設計施工指針(平成 5 年)
- ・高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの施工指針(案) 付・流動化コンクリート施工指針(平成 5 年)
- ・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針(平成 8 年)
- ・フェロニッケルスラグ細骨材コンクリートの施工指針(平成 10 年)
- ・銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針(平成 10 年)
- ・高流動コンクリート施工指針(平成 10 年)
- ・フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)(平成 11 年)
- ・電気化学的防食工法・設計施工指針(案)(平成 13 年)
- ・自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針(案)(平成 13 年)
- ・エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(平成 15 年)
- ・超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)(平成 16 年)
- ・表面保護工法設計施工指針(案)(平成 17 年)
- ・けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)(平成 24 年)

1. 耐久性の照査

構造物は、設計耐用期間にわたり所要の性能を確保しなければならず、そのためには環境作用による劣化や変状によって低下した性能が要求性能を満足するかを照査することが必要である。

一般に、コンクリートの耐久性については、道路橋示方書や土木構造物設計マニュアル(案)等に規定されるかぶりを満足することで照査が省略されている。しかし、設計耐用期間が明確ではなく、水セメント比(W/C)が50%程度の普通ポルトランドセメントの使用を前提としており、さらに過酷な環境での劣化等が複合して作用する場合などに必要なかぶりが満足できない場合がある。

したがって、当面の運用として中性化および塩害に対する耐久性については、道路橋示方書等に加え、指針(案)の算定式により照査を行うものとする。

参考に標準化を図ったかぶりの例(表1.1, 表1.2)を以下に示す。

表 1.1 橋梁下部構造の表面から軸方向鉄筋中心までの距離の例

		必要とする軸方向鉄筋中心までの距離の目安 (mm)	提案する軸方向鉄筋中心までの距離 (mm)	
逆 T 式橋台	パラペット	100~110	150	
	たて壁	110~140	150	
	フーチング	下 面	100~120 (210~220)	150 (250)
		上 面	100~120	150
張出し式橋脚 (壁式橋脚)	はり	100~110	150	
	柱	110~140	150	
	フーチング	橋軸方向 下面鉄筋	110~140 (230~250)	150 (250)
		橋軸方向 上面鉄筋	110~130	150

※1 上表は、一般的な鉄筋の径(軸方向鉄筋D35、配力鉄筋D29、帯鉄筋もしくはスターラップD22程度を上限)を想定した値であるので、それ以上の太径を用いる場合には別途考慮する必要がある。

※2 ()内は、杭頭結合方法Bの杭基礎を有する場合における一般的な値である。

表 1.2 地覆・壁高欄のかぶりの例

直壁型	フロリダ型
42	70

【注】表 1.1：道路橋示方書に定められる(水セメント比50%程度の普通ポルトランドセメントの使用を前提)必要かぶりの70mm以上かつ鉄筋の直径以上を確保することを基本として、軸方向鉄筋中心までの距離を150mmに統一している。これは、一般的な下部構造の各部位において、軸方向鉄筋中心までの距離は、軸方向鉄筋、スターラップや配力鉄筋の径によって異なるが、一般的に100~140mm必要であることによる。

表 1.2：地覆や高欄においても標準化が図られており、塩害の影響を考慮し、かぶりを70mmとして統一している。

1. 耐久性の照査

構造物は、設計耐用期間にわたり所要の性能を確保しなければならず、そのためには環境作用による劣化や変状によって低下した性能が要求性能を満足するかを照査することが必要である。

一般に、コンクリートの耐久性については、道路橋示方書や土木構造物設計マニュアル(案)等に規定されるかぶりを満足することで照査が省略されている。しかし、設計耐用期間が明確ではなく、水セメント比(W/C)が50%程度の普通ポルトランドセメントの使用を前提としており、さらに過酷な環境での劣化等が複合して作用する場合などに必要なかぶりが満足できない場合がある。

したがって、当面の運用として中性化および塩害に対する耐久性については、道路橋示方書等に加え、指針(案)の算定式により照査を行うものとする。

参考に標準化を図ったかぶりの例(表1.1, 表1.2)を以下に示す。

表 1.1 橋梁下部構造の表面から軸方向鉄筋中心までの距離の例

		必要とする軸方向鉄筋中心までの距離の目安 (mm)	提案する軸方向鉄筋中心までの距離 (mm)	
逆 T 式橋台	パラペット	100~110	150	
	たて壁	110~140	150	
	フーチング	下 面	100~120 (210~220)	150 (250)
		上 面	100~120	150
張出し式橋脚 (壁式橋脚)	はり	100~110	150	
	柱	110~140	150	
	フーチング	橋軸方向 下面鉄筋	110~140 (230~250)	150 (250)
		橋軸方向 上面鉄筋	110~130	150

※1 上表は、一般的な鉄筋の径(軸方向鉄筋D35、配力鉄筋D29、帯鉄筋もしくはスターラップD22程度を上限)を想定した値であるので、それ以上の太径を用いる場合には別途考慮する必要がある。

※2 ()内は、杭頭結合方法Bの杭基礎を有する場合における一般的な値である。

表 1.2 地覆・壁高欄のかぶりの例

直壁型	フロリダ型
42	70

【注】表 1.1：道路橋示方書に定められる(水セメント比50%程度の普通ポルトランドセメントの使用を前提)必要かぶりの70mm以上かつ鉄筋の直径以上を確保することを基本として、軸方向鉄筋中心までの距離を150mmに統一している。これは、一般的な下部構造の各部位において、軸方向鉄筋中心までの距離は、軸方向鉄筋、スターラップや配力鉄筋の径によって異なるが、一般的に100~140mm必要であることによる。

表 1.2：地覆や高欄においても標準化が図られており、塩害の影響を考慮し、かぶりを70mmとして統一している。

ここでは、設計耐用期間が定められたコンクリート構造物について、その耐久性能に影響を及ぼす劣化現象のうち代表的な「中性化に伴う鋼材腐食に対する照査」および「塩害に対する照査」について耐久性照査の流れと考え方を示す。

また、参考として 1.3 に「アルカリ骨材反応照査における留意点」を示す。

1.1 中性化に伴う鋼材腐食に対する照査

前述のように道路橋示方書では、塩害の影響を受けない一般的な環境における鉄筋の腐食を防ぐための必要なかぶりが定められている。このかぶりを満足すれば中性化に対する照査を省略することができると読み替えることができる。ただし、道路橋示方書においては、対象とするコンクリートの水セメント比や構造物の耐用年数等が明確にされていない。

また、「2007 年制定 土木学会コンクリート標準示方書(設計編)」では、施工誤差および水セメント比の最大値を考慮したかぶりの最小値が規定されている。

したがって、指針(案)に準拠した中性化に対する照査は、これらを明確にし照査することが必要である。

ここでは、設計耐用期間が定められたコンクリート構造物について、その耐久性能に影響を及ぼす劣化現象のうち代表的な「中性化に伴う鋼材腐食に対する照査」および「塩害に対する照査」について耐久性照査の流れと考え方を示す。

また、参考として 1.3 に「アルカリ骨材反応照査における留意点」を示す。

1.1 中性化に伴う鋼材腐食に対する照査

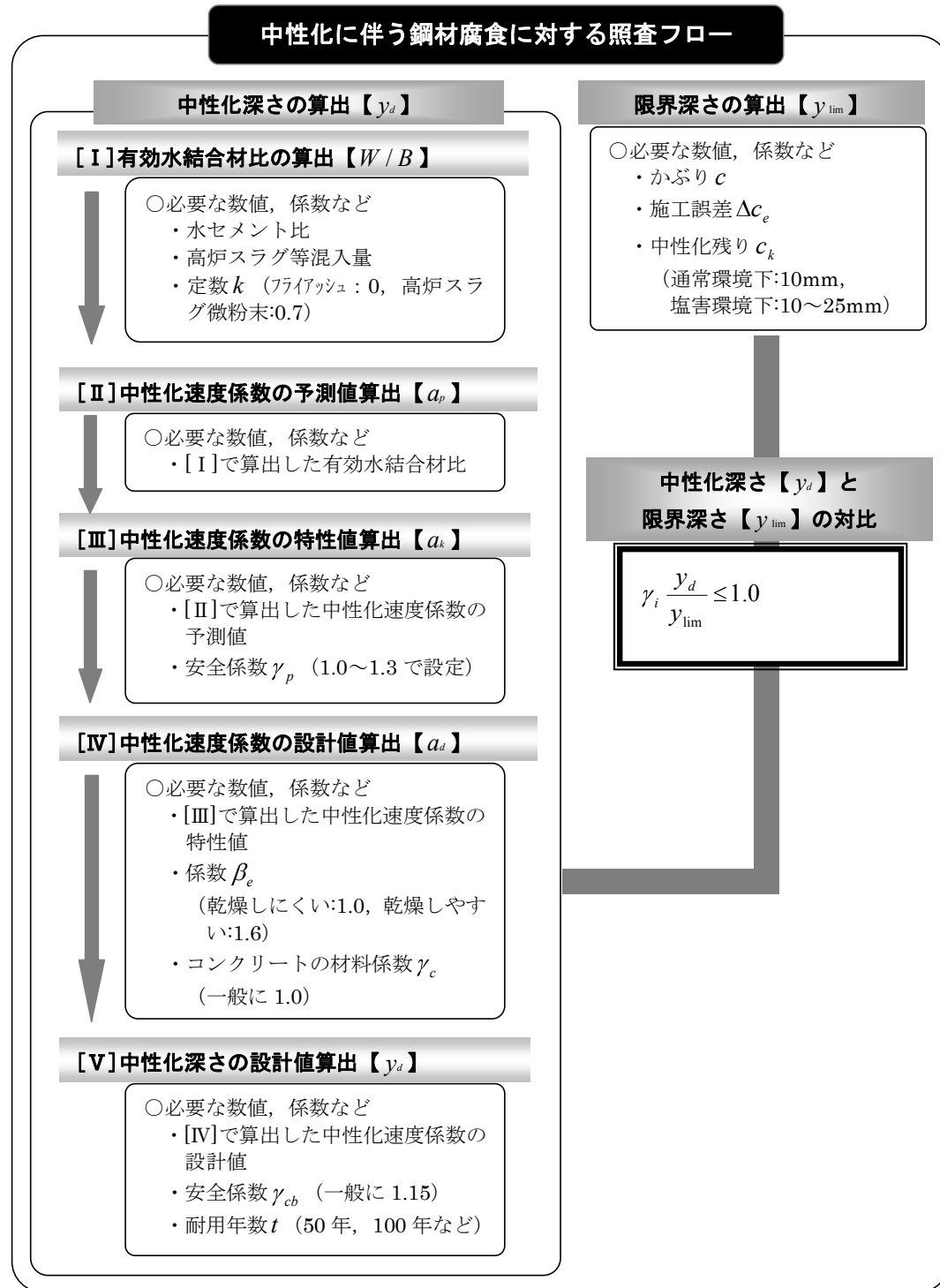
前述のように道路橋示方書では、塩害の影響を受けない一般的な環境における鉄筋の腐食を防ぐための必要なかぶりが定められている。このかぶりを満足すれば中性化に対する照査を省略することができると読み替えることができる。ただし、道路橋示方書においては、対象とするコンクリートの水セメント比や構造物の耐用年数等が明確にされていない。

また、「2012 年制定 土木学会コンクリート標準示方書(設計編)」では、施工誤差および水セメント比の最大値を考慮したかぶりの最小値が規定されている。

したがって、指針(案)に準拠した中性化に対する照査は、これらを明確にし照査することが必要である。

【中性化に対する照査実務】

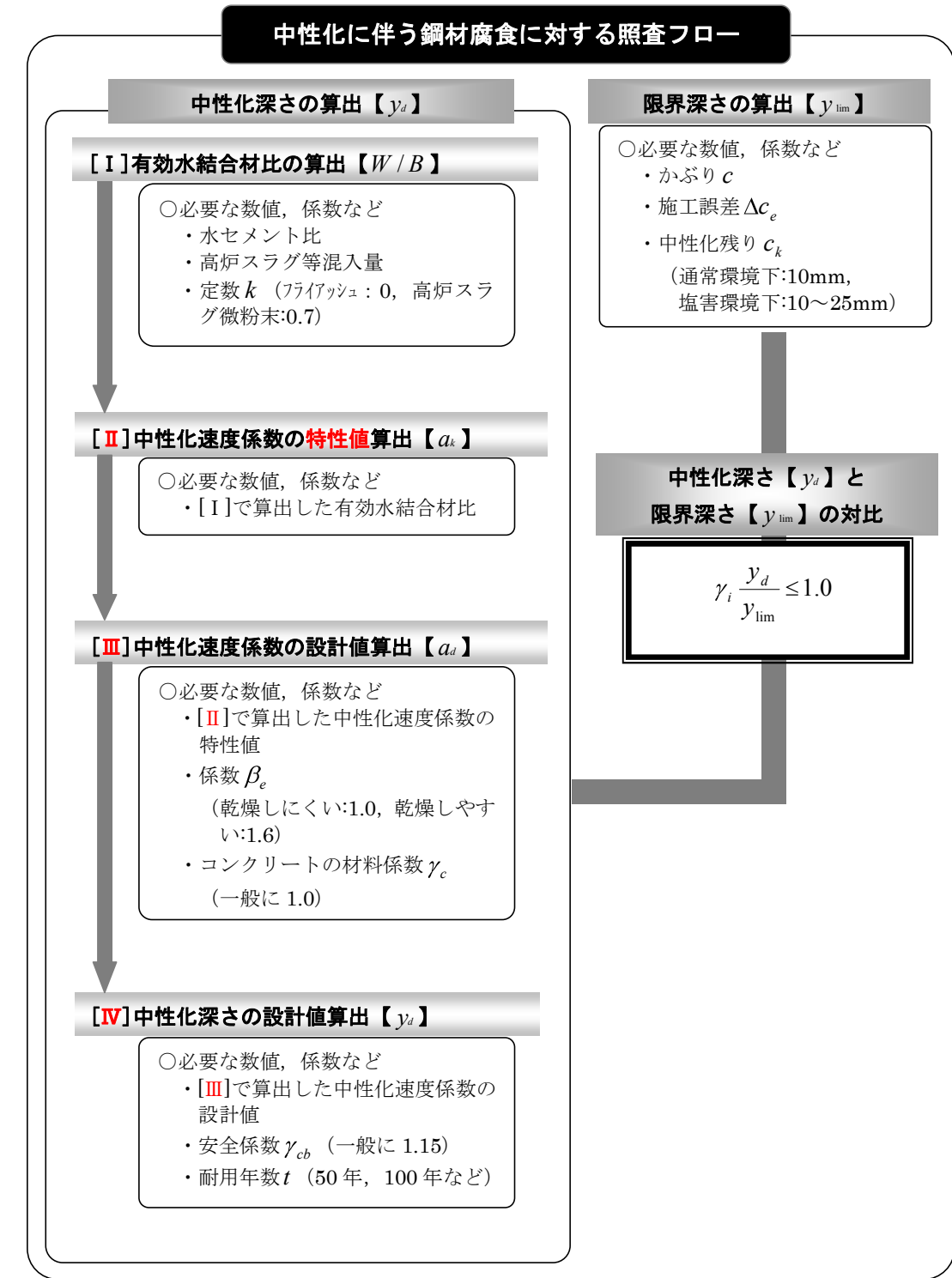
中性化に対する照査は、設計耐用年数に応じた中性化深さの設計値 y_d の鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。以下に照査フローを示す。



※具体的な手法は、照査例を参照 (p 例-5, p 例-69)

【中性化に対する照査実務】

中性化に対する照査は、設計耐用年数に応じた中性化深さの設計値 y_d の鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。以下に照査フローを示す。



※具体的な手法は、照査例を参照 (p 例-5, p 例-69)

図 1.1 にかぶり, 限界深さおよび中性化残りの概念図を示す。なお, 耐久性の照査では施工誤差を考慮しないものとする。これは, 出来形管理基準にて最小かぶり以上を確保することが原則とされていることによる。

指針(案)には, 中性化に対する照査を簡易的に行う際に役立つノモグラムを示している。これは, 設計耐用期間が 50 年および 100 年を想定し, セメントに普通ポルトランドセメントまたは高炉セメント B 種を使用する場合の算定結果を図示したものである。

ただし, 算定に用いた高炉セメント B 種のスラグ置換率は 45% であり, その他の安全係数等についても指針(案)に明示しているので適切に活用しなければならない。

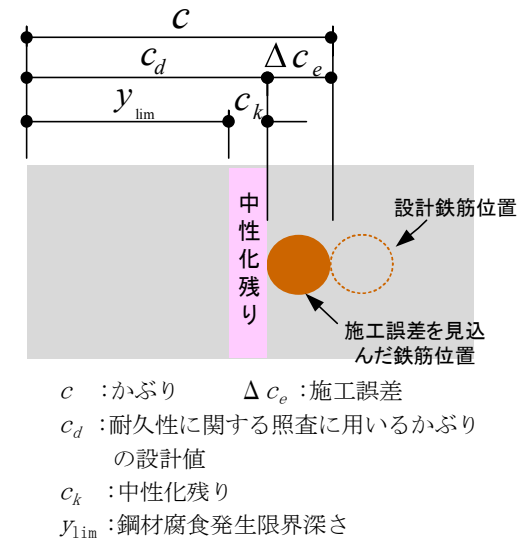


図 1.1 かぶり, 限界深さ等イメージ

- c : かぶり
- c_d : 耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値
- c_k : 中性化残り
- y_{lim} : 鋼材腐食発生限界深さ
- Δc_e : 施工誤差

図 1.1 にかぶり, 限界深さおよび中性化残りの概念図を示す。なお, 耐久性の照査では施工誤差を考慮しないものとする。これは, 出来形管理基準にて最小かぶり以上を確保することが原則とされていることによる。

指針(案)には, 中性化に対する照査を簡易的に行う際に役立つノモグラムを示している。これは, 設計耐用期間が 50 年および 100 年を想定し, セメントに普通ポルトランドセメントまたは高炉セメント B 種を使用する場合の算定結果を図示したものである。

ただし, 算定に用いた高炉セメント B 種のスラグ置換率は 45% であり, その他の安全係数等についても指針(案)に明示しているので適切に活用しなければならない。

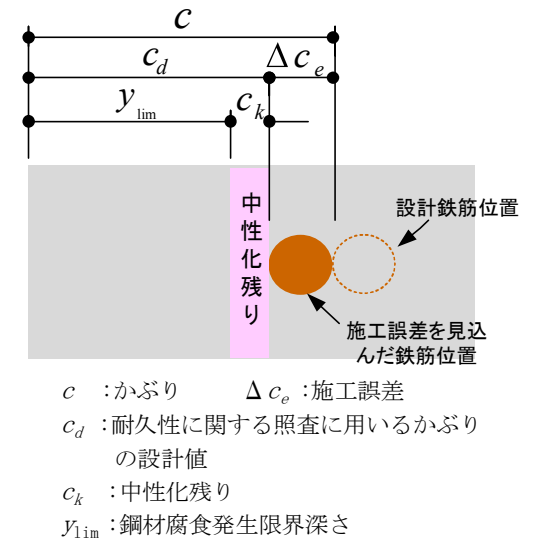


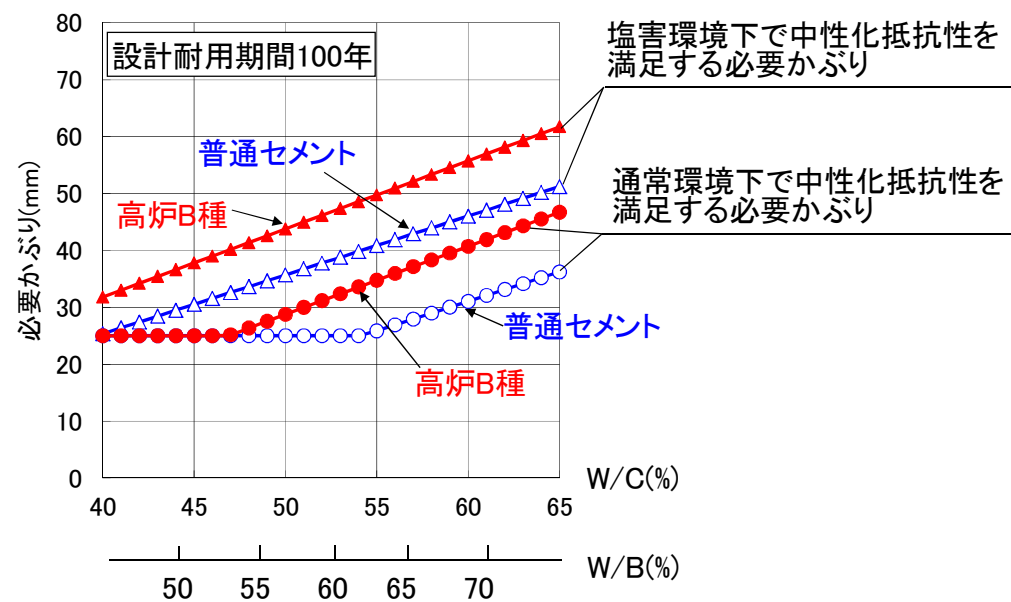
図 1.1 かぶり, 限界深さ等イメージ

- c : かぶり
- c_d : 耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値
- c_k : 中性化残り
- y_{lim} : 鋼材腐食発生限界深さ
- Δc_e : 施工誤差

【簡易ノモグラムの活用例】

図 1.2 に設計耐用期間 100 年を想定し, α_p の精度に関する安全係数 γ_p を 1.0 とした場合の中性化抵抗性を満足する必要かぶり算定結果の活用例を示す。

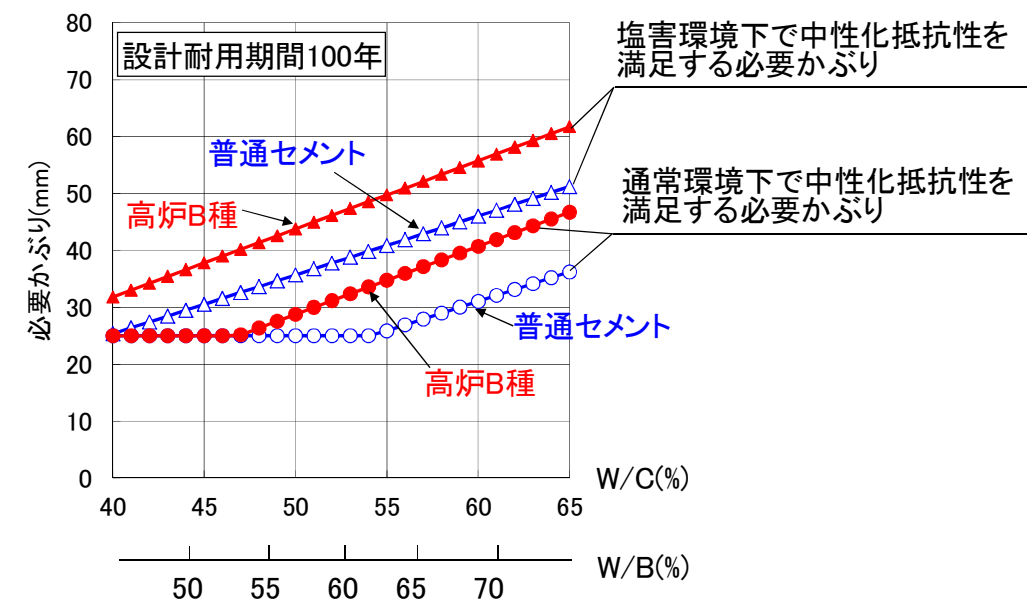
これより, 水セメント比が 55% のコンクリートを使用した場合, 普通ポルトランドセメントを使用した場合は, 中性化抵抗性を満足するために約 26mm のかぶりが必要であり, 高炉セメント B 種を使用した場合は, 約 35mm のかぶりが必要であることが読み取れる。

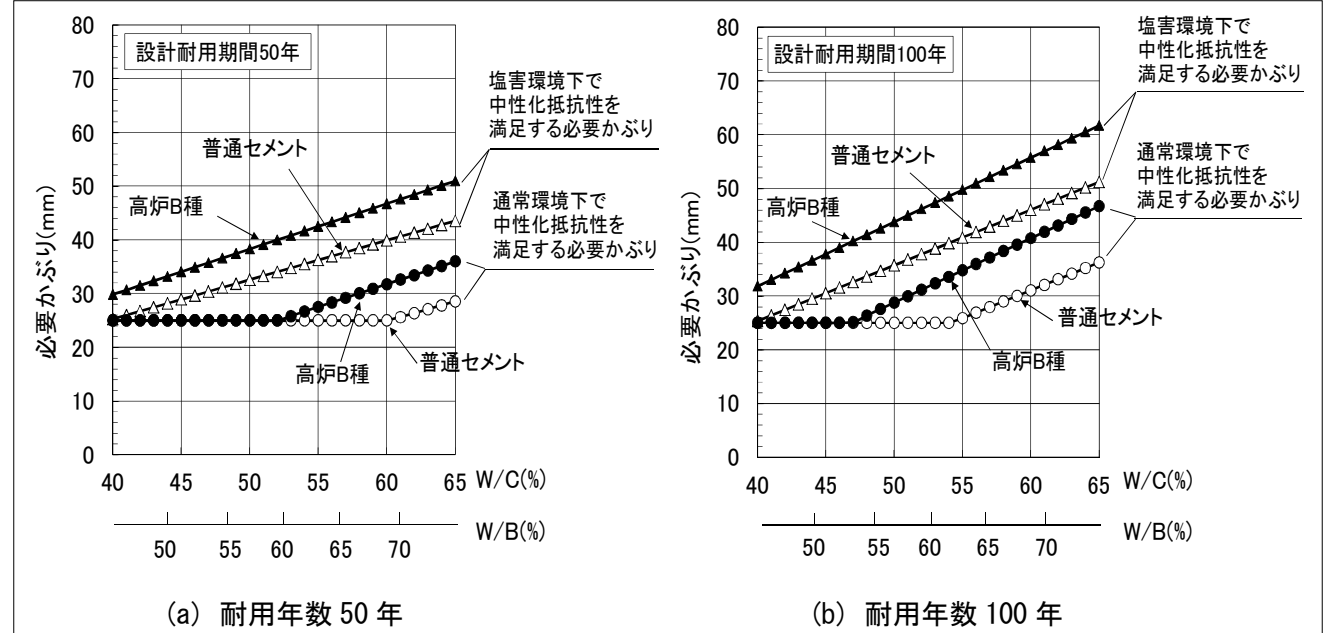
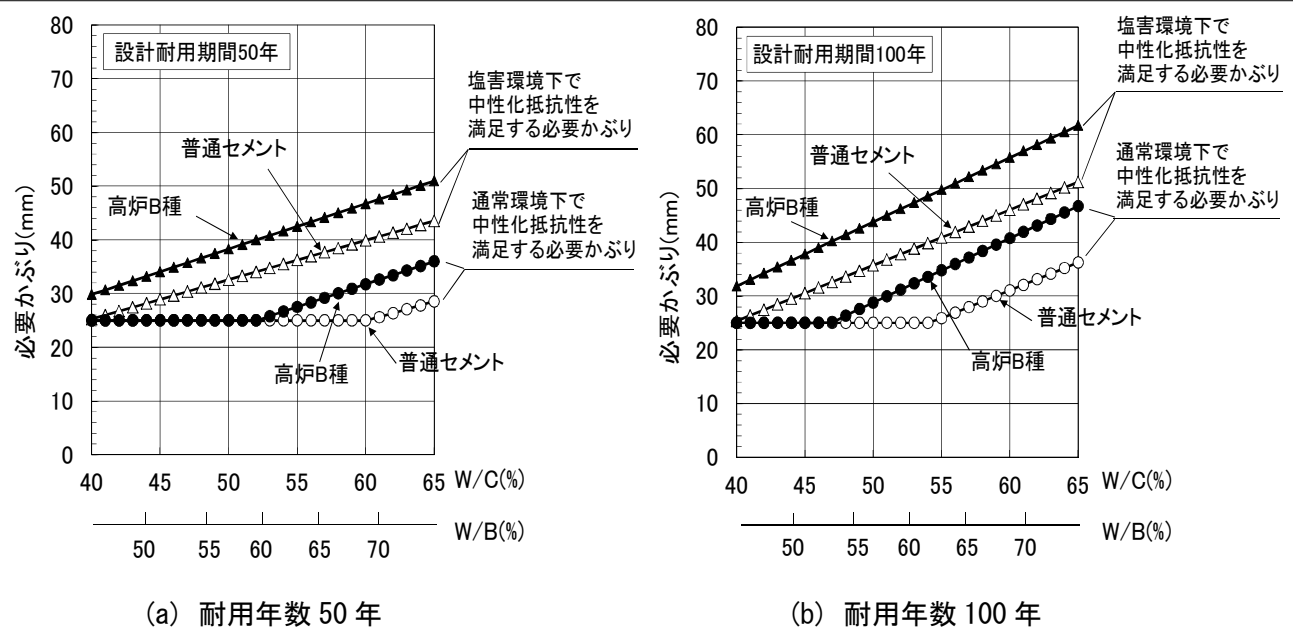


【簡易ノモグラムの活用例】

図 1.2 に設計耐用期間 100 年を想定した場合の中性化抵抗性を満足する必要かぶり算定結果の活用例を示す。

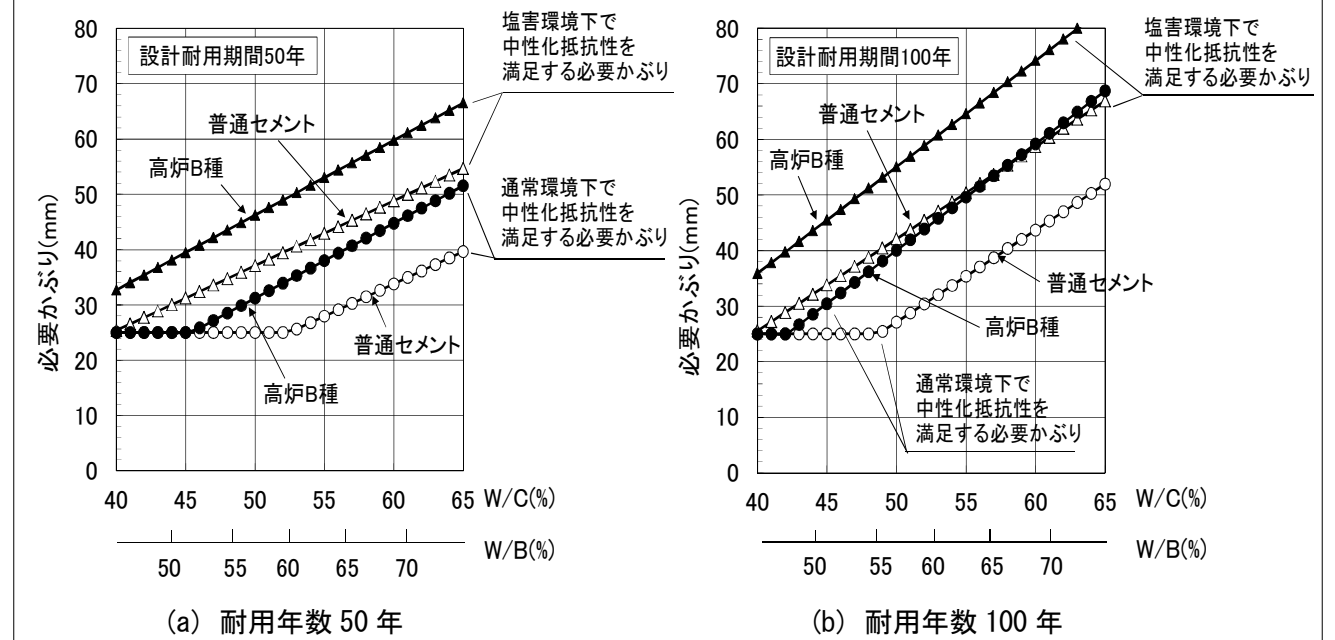
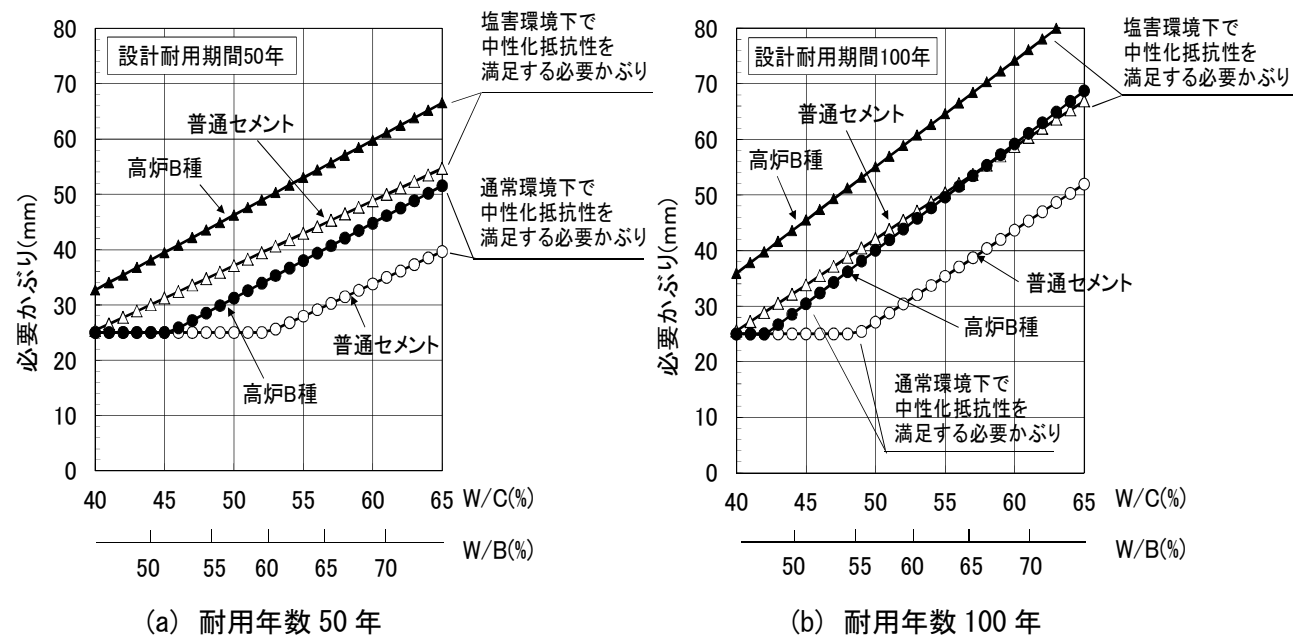
これより, 水セメント比が 55% のコンクリートを使用した場合, 普通ポルトランドセメントを使用した場合は, 中性化抵抗性を満足するために約 26mm のかぶりが必要であり, 高炉セメント B 種を使用した場合は, 約 35mm のかぶりが必要であることが読み取れる。





※指針(案)の p.2-7 解説表 2.2.1 の条件で作図

※指針(案)の p.2-7 解説表 2.2.1 の条件で作図



※指針(案)の p.2-7 解説表 2.2.1 の条件で、
 β_e [環境作用の程度を表す係数]を 1.6(乾燥しやすい条件)で作図

※指針(案)の p.2-7 解説表 2.2.1 の条件で、
 β_e [環境作用の程度を表す係数]を 1.6(乾燥しやすい条件)で作図

図 1.2 中性化抵抗性を満足する必要かぶり算定図

図 1.2 中性化抵抗性を満足する必要かぶり算定図

1.2 塩害に対する照査

道路橋示方書では, 表 1.3 に示すように塩害によって所要の耐久性が損なわれないよう部材毎に, 塩害の影響地域に基づいた影響度合いによって最小かぶりが定められている。

表 1.3 塩害の影響による最小かぶり (道路橋示方書) (単位:mm)

【下部構造】		部材の種類	はり, 柱, 壁
塩害の影響度合い	対策区分		
影響が激しい	S		90 [*]
	I		90
	II		70
	III		50

※塗装鉄筋, コンクリート塗装, 埋設型枠を併用

【上部構造】

塩害の影響の度合い	対策区分	構造		
		(1) 工場で製作される PC 構造	(2) (1) 以外の PC 構造	(3) RC 構造
影響が激しい	S	70 [*]		
	I	50	70	
	II	35	50	70
	III			50
影響を受けない		一般環境の鋼材のかぶりによる		

※塗装鉄筋の使用又はコンクリート塗装を併用

[備考]

- 対策区分：S(影響が激しい), I・II・III(影響を受ける)
- 適用条件
 - ・耐久性に関する設計上の目標期間として 100 年を設定した場合
 - ・各部材の水セメント比
 - 下部構造 50%, 上部構造の(1)工場製作される PC 構造 36%, (2) (1)以外の PC 構造 43%, RC 構造 50%程度の普通ポルトランドセメントを使用することが前提

1.2 塩害に対する照査

道路橋示方書では, 表 1.3 に示すように塩害によって所要の耐久性が損なわれないよう部材毎に, 塩害の影響地域に基づいた影響度合いによって最小かぶりが定められている。

表 1.3 塩害の影響による最小かぶり (道路橋示方書) (単位:mm)

【下部構造】		部材の種類	はり, 柱, 壁
塩害の影響度合い	対策区分		
影響が激しい	S		90 [*]
	I		90
	II		70
	III		50

※塗装鉄筋, コンクリート塗装等を併用

【上部構造】

塩害の影響の度合い	対策区分	構造		
		(1) 工場で製作される PC 構造	(2) (1) 以外の PC 構造	(3) RC 構造
影響が激しい	S	70 [*]		
	I	50	70	
	II	35	50	70
	III			50
影響を受けない		一般環境の鋼材のかぶりによる		

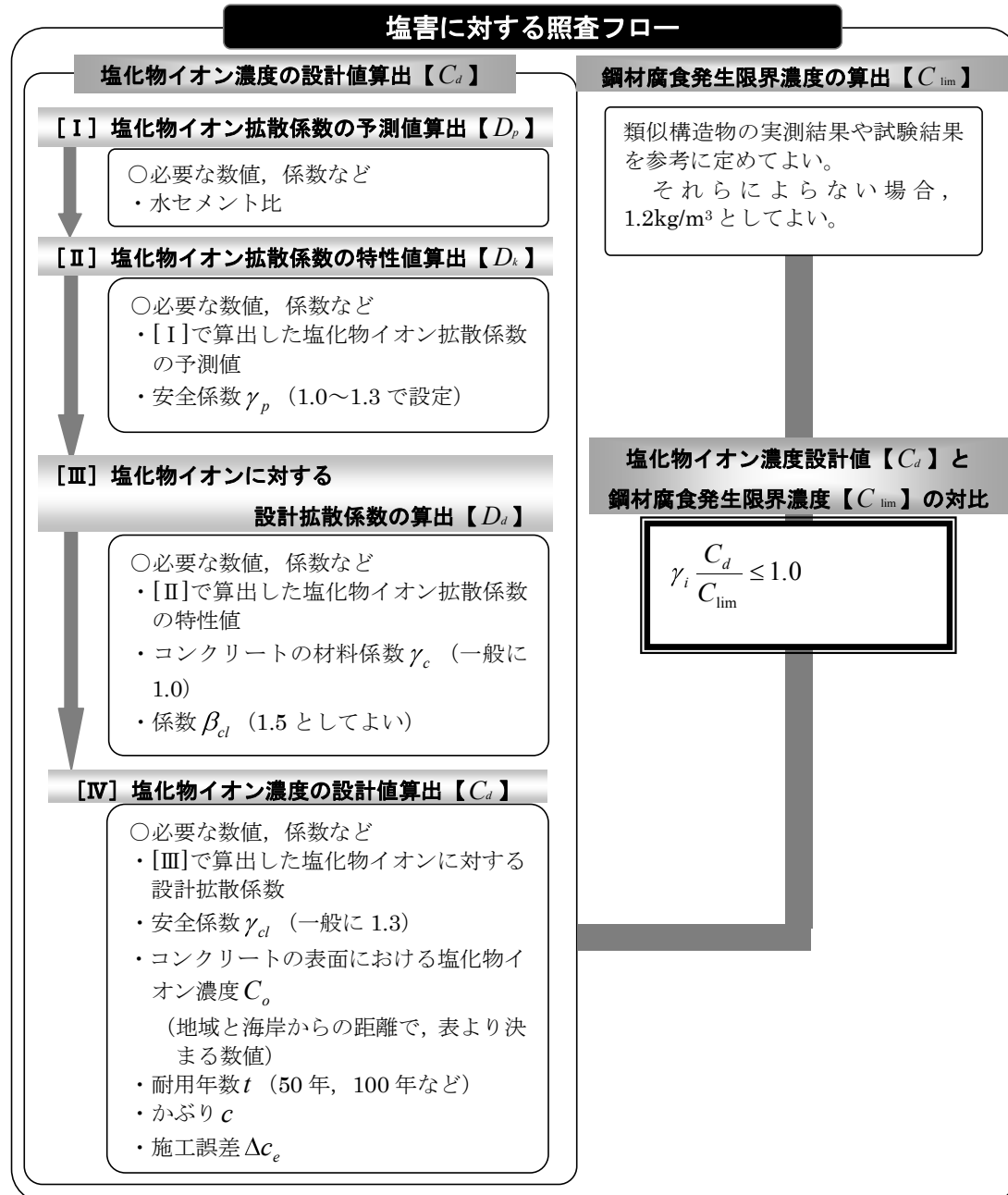
※塗装鉄筋の使用又はコンクリート塗装を併用

[備考]

- 対策区分：S(影響が激しい), I・II・III(影響を受ける)
- 適用条件
 - ・耐久性に関する設計上の目標期間として 100 年を設定した場合
 - ・各部材の水セメント比
 - 下部構造 50%, 上部構造の(1)工場製作される PC 構造 36%, (2) (1)以外の PC 構造 43%, RC 構造 50%程度の普通ポルトランドセメントを使用することが前提

【塩害に対する照査実務】

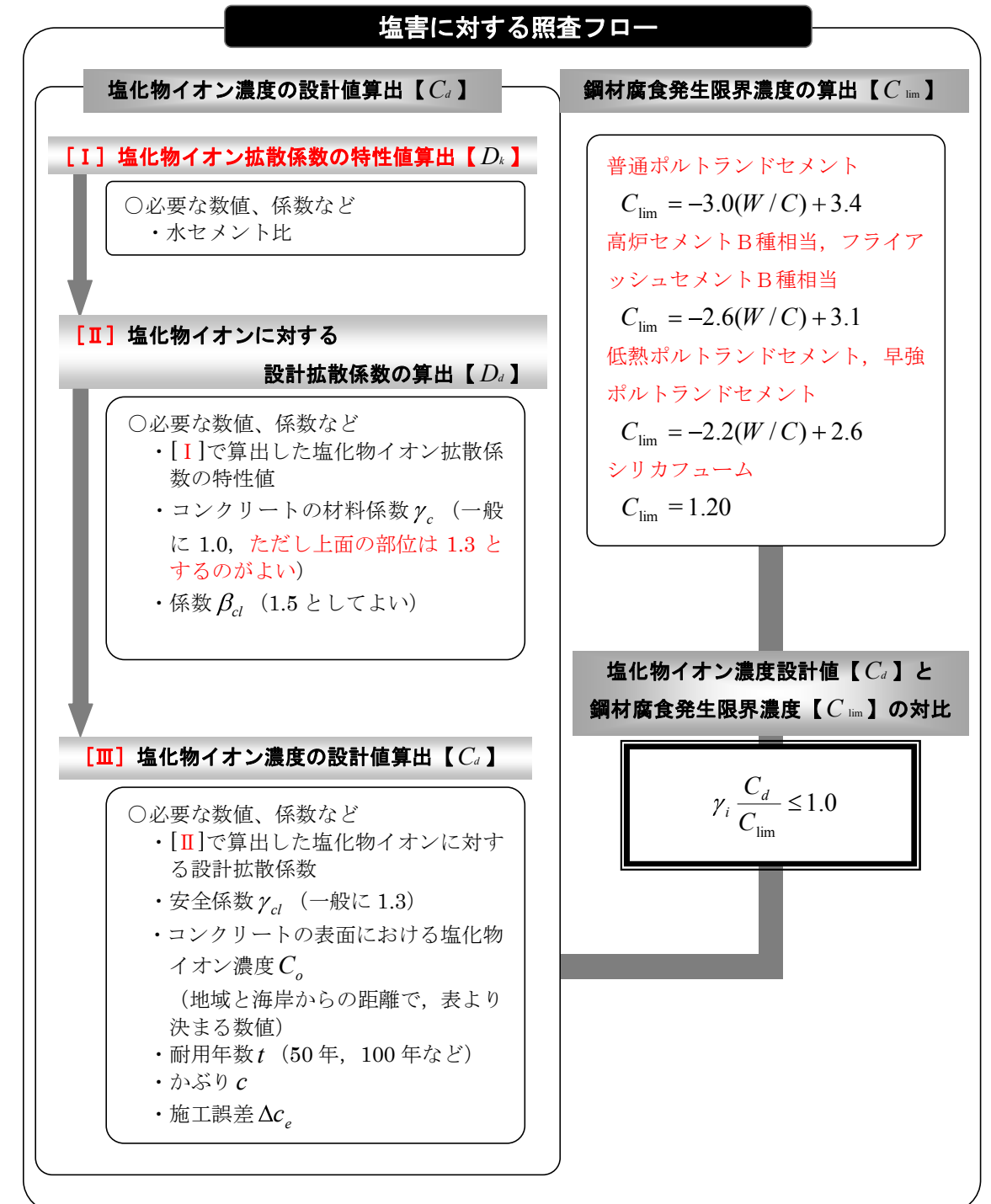
塩害に対する照査は、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。以下に照査フローを示す。



※具体的な手法は、照査例を参照 (p 例-10)

【塩害に対する照査実務】

塩害に対する照査は、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。以下に照査フローを示す。



※具体的な手法は、照査例を参照 (p 例-10)

指針(案)には 2.2.4 の解説(2)において、塩害に対する照査を簡易的に行う際に役立つノモグラムを示している。これは、水セメント比からコンクリートの塩化物イオン拡散係数を算定し、これを基に設計耐用期間 50 年および 100 年の場合の必要かぶりを照査することができる。

このノモグラムの活用例を以下に示す。

照査の結果、非常に大きなかぶりが必要になる場合や、指針(案)に示されている対策のみでは構造物に所要の耐久性を付与することが困難と判断される場合は、専門評価機関を交えて協議しなければならない。

なお、耐久性の照査では施工誤差を考慮しないものとする。これは、出来形管理基準にて最小かぶり以上を確保することが原則とされていることによる。

【簡易ノモグラムの活用例】

使用セメント：高炉セメント B 種，W/C=53%，設計耐用年数 100 年および海岸線からの距離を 0.5km と仮定した場合

①塩化物イオン拡散係数の予測値【 D_p 】 (図 1.3)

W/C=53%より $D_p=0.660$ (高炉セメント B 種)

②塩化物イオンに対する設計拡散係数【 D_d 】

D_p の安全係数 $\gamma_p=1.2$ ，コンクリートの材料係数 γ_c (ここでは 1.0) およびひび割れ幅による影響 (ここではひび割れなし) 等により $D_d=0.792$

③最小かぶり【 c 】 (図 1.4*)

九州地方における海岸から 0.5km の距離のコンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 は 1.5kg/m^3 であるので、 D_d が 0.792 のときの最小かぶりは、 $c=63\text{mm}$

以上より、かぶりが 63mm 以上の場合は、塩害に関する耐久性を満足することがわかる。

※図 1.4 は、以下の条件によるものであり、条件が異なる場合は使用できない。

- ・ C_0 のばらつきを考慮した安全係数 $\gamma_{cl} : 1.3$
- ・ 耐用年数 $t : 100$ (年)

指針(案)には 2.2.4 の解説(2)において、塩害に対する照査を簡易的に行う際に役立つノモグラムを示している。これにより、水セメント比から設計耐用期間 50 年および 100 年の場合の必要かぶりを照査することができる。

このノモグラムの活用例を以下に示す。

照査の結果、非常に大きなかぶりが必要になる場合や、指針(案)に示されている対策のみでは構造物に所要の耐久性を付与することが困難と判断される場合は、専門評価機関を交えて協議しなければならない。

なお、耐久性の照査では施工誤差を考慮しないものとする。これは、出来形管理基準にて最小かぶり以上を確保することが原則とされていることによる。

【簡易ノモグラムの活用例】

使用セメント：高炉セメント B 種，W/C : 53%，設計耐用年数 100 年および海岸線からの距離を 100m の場合

・九州地方における、海岸から 100m の距離のコンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 は、表 1.5 より 2.5kg/m^3 である。

W/C=53%における必要かぶりは図 1.3 より 57mm 以上となる。

・よって、かぶりが 57mm 以上の場合は、塩害に関する耐久性を満足することがわかる。

※本例の場合は、中性化抵抗性を満足する必要かぶりが 60mm 以上となる。

したがって、耐久性上の必要かぶりは 60mm 以上になる点に注意を要す。

※表 1.5 に示す適用条件に該当しない場合は使用できない。

表 1.4 コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m³)

		飛沫帯	離岸距離 (m)						
			汀線付近	10	20	100	250	500	1000
飛来塩分が多い地域	北海道, 東北, 北陸, 沖縄	13.0	9.0	-	-	4.5	3.0	2.0	1.5
	関東, 東海, 近畿, 中国, 四国		4.5	-	-	2.5	2.0	1.5	1.0
九州	9.0		9.0	4.5	2.5	2.0	1.5	1.0	

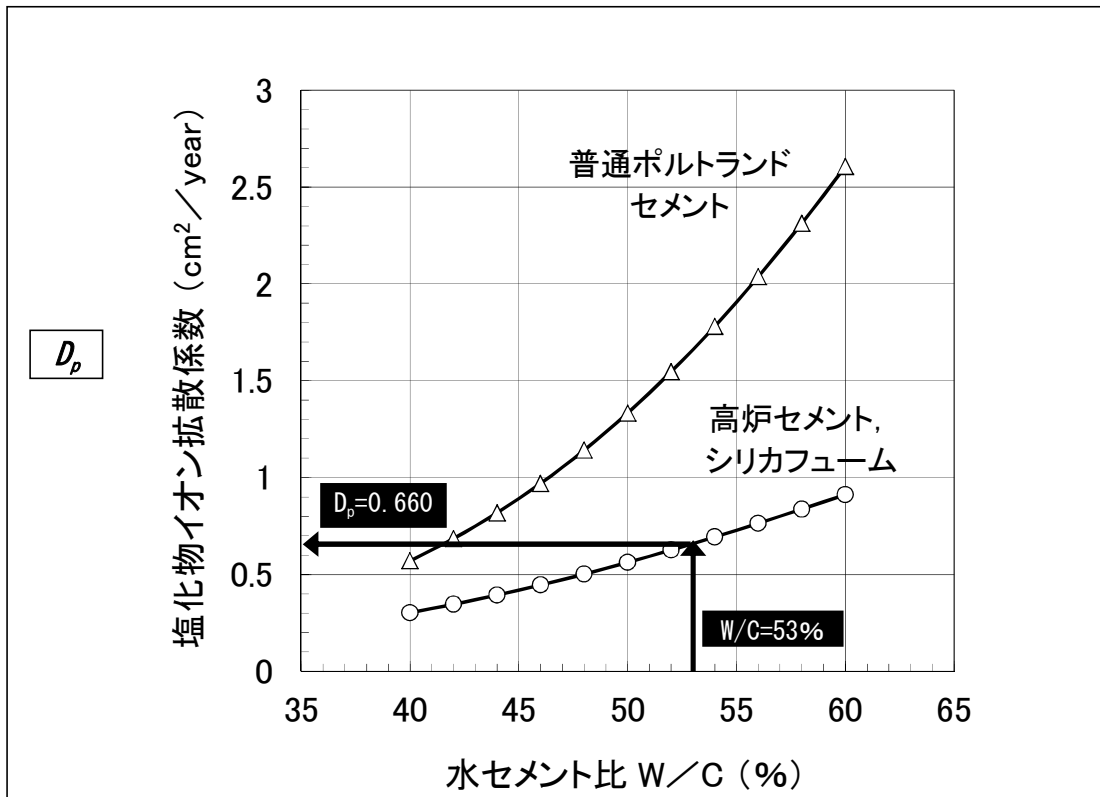


図 1.3 水セメント比と塩化物イオン拡散係数の関係

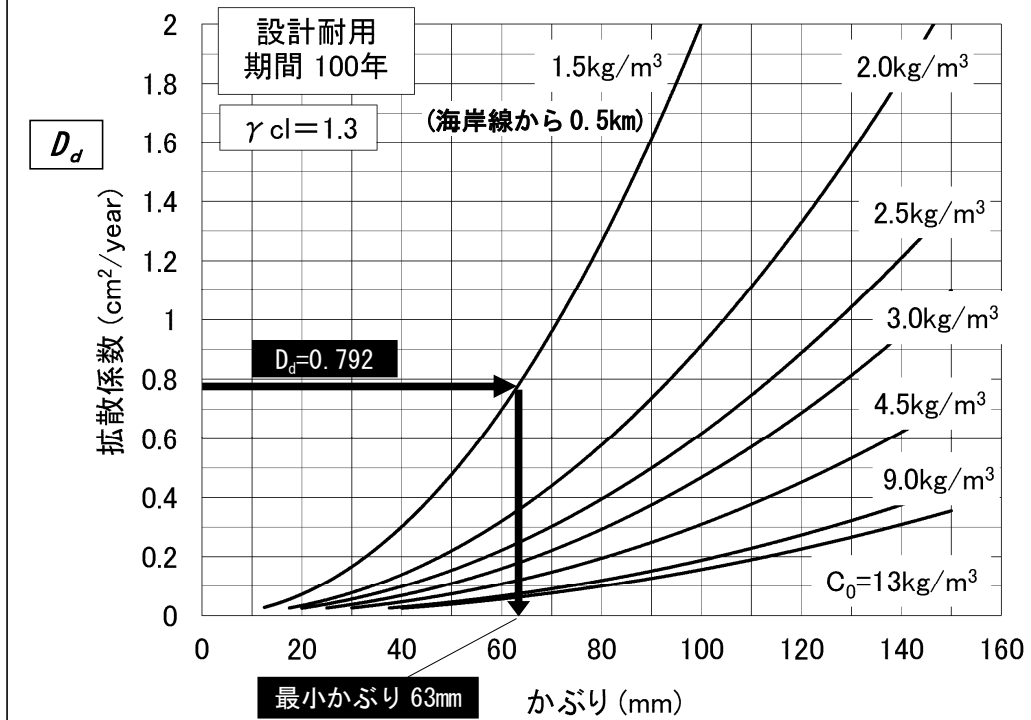
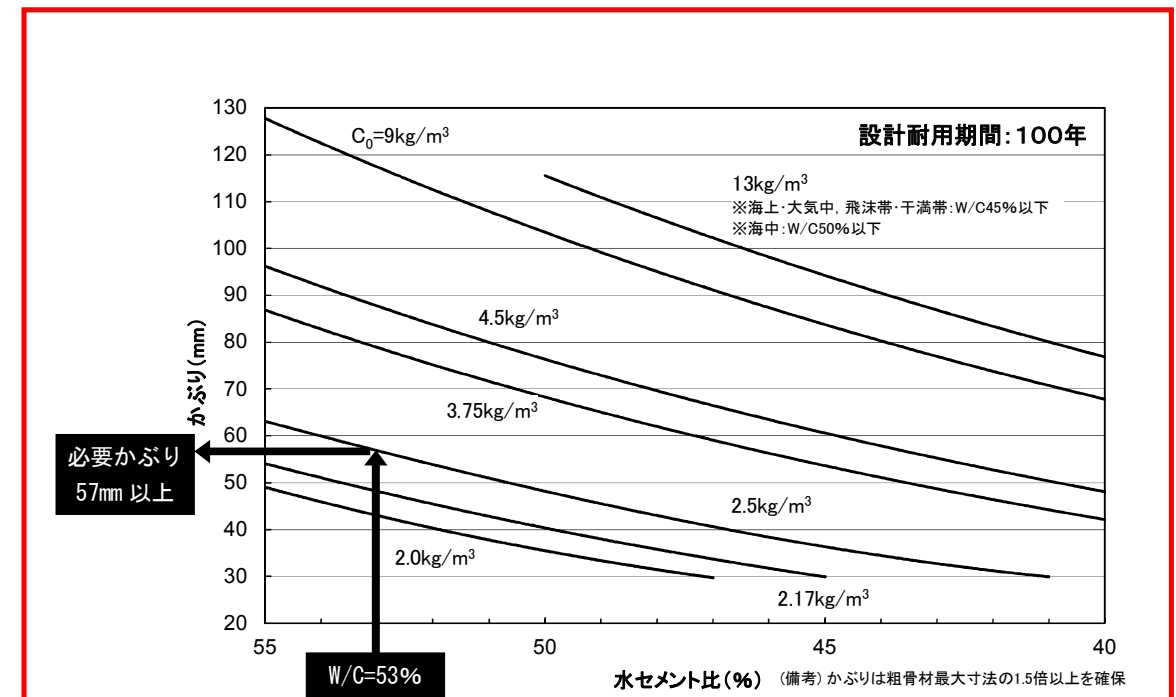


図 1.4 塩害に対する照査を満足する拡散係数およびかぶり判定図



必要かぶり算定に使用した数値

記号	名称	数値
γ_i	構造物係数	1.0
-	使用セメント	高炉セメント B 種
W/C	水セメント比	0.40~0.55 (40%~55%)
Δc_e	施工誤差	0mm
t	年数 (耐用年数)	50 年, 100 年
γ_{cl}	鋼材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	1.3
C_i	初期塩化物イオン濃度	0.30kg/m³
D_d	塩化物イオンに対する設計拡散係数	$\gamma_e \cdot D_k \cdot \beta_{cl}$
γ_c	コンクリートの材料係数	1.0
β_{cl}	初期ひび割れの影響を考慮した係数	1.15

図 1.3 塩害に対する照査を満足する水セメント比およびかぶり判定図

1.3 アルカリ骨材反応に対する照査（留意点）

コンクリートに使用する骨材が反応性か否かを判断するためには、施工段階で使用するコンクリートに用いられる骨材が特定されていなければならない、反応性骨材と判断された場合は、適切なアルカリ骨材反応抑制対策を施さなければならない。

九州地区の既設構造物においてはアルカリ骨材反応による劣化事例が散見され、指針(案)では、施工段階において使用する骨材が反応性骨材であると判断された場合の対策検討・実施のみならず、設計段階から構造物の建設予定地の環境条件、アルカリの供給の有無および周囲の既存の構造物等を調査し、アルカリ骨材反応による劣化が懸念される場合は、事前に抑制対策を検討することとしている。

またこれらは施工着手時に行われる三者連絡会（工事監理連絡会）において、設計者から施工者へ留意を促すことが重要である。

アルカリ骨材反応の照査の参考資料として、図 1.5 に九州地方における反応性骨材の分布推定図を示す。



図 1.5 九州地方における反応性骨材の分布推定図
(出典：九州技報第 8 号)

1.3 アルカリ骨材反応に対する照査（留意点）

コンクリートに使用する骨材が反応性か否かを判断するためには、施工段階で使用するコンクリートに用いられる骨材が特定されていなければならない、反応性骨材と判断された場合は、適切なアルカリ骨材反応抑制対策を施さなければならない。

九州地区の既設構造物においてはアルカリ骨材反応による劣化事例が散見され、指針(案)では、施工段階において使用する骨材が反応性骨材であると判断された場合の対策検討・実施のみならず、設計段階から構造物の建設予定地の環境条件、アルカリの供給の有無および周囲の既存の構造物等を調査し、アルカリ骨材反応による劣化が懸念される場合は、事前に抑制対策を検討することとしている。

またこれらは施工着手時に行われる三者連絡会（工事監理連絡会）において、設計者から施工者へ留意を促すことが重要である。

アルカリ骨材反応の照査の参考資料として、図 1.4 に九州地方における反応性骨材の分布推定図を示す。



図 1.4 九州地方における反応性骨材の分布推定図
(出典：九州技報第 8 号)

橋梁下部工 照査例① : A 橋脚 (壁式橋脚)

橋梁下部工 照査例① : A 橋脚 (壁式橋脚)

1.1 構造物の諸元

1.1 構造物の諸元

表 1.1.1 下部工諸元

表 1.1.1 下部工諸元

橋梁構造形式	鋼 6 径間連続非合成鈹桁橋	
橋長	L=213.000m	
下部工形式 (躯体)	張出式橋脚	
塩害に対する地域区分	C 地域	
凍害に関する事項	九州地区 平地 (山間地ではない)	
化学的侵食に関する事項	温泉地域および旧産炭地域等ではない	
使用材料	コンクリート	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$
	鉄筋	SD345

橋梁構造形式	鋼 6 径間連続非合成鈹桁橋	
橋長	L=213.000m	
下部工形式 (躯体)	張出式橋脚	
塩害に対する地域区分	C 地域	
凍害に関する事項	九州地区 平地 (山間地ではない)	
化学的侵食に関する事項	温泉地域および旧産炭地域等ではない	
使用材料	コンクリート	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$
	鉄筋	SD345

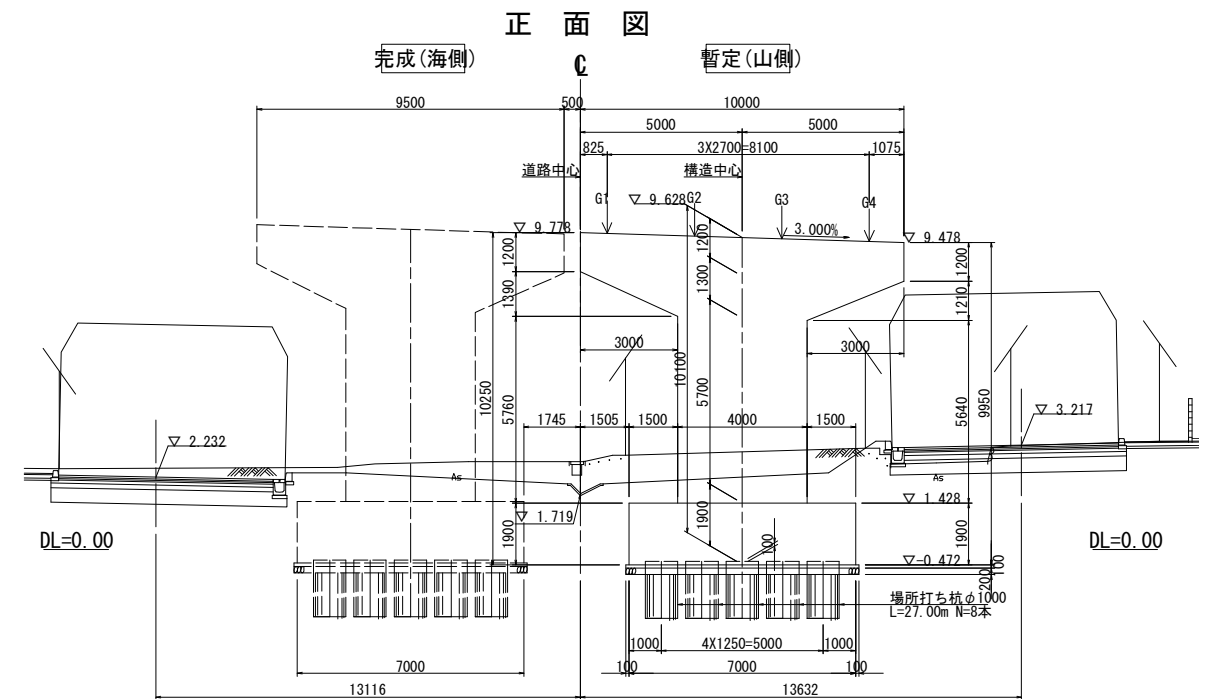
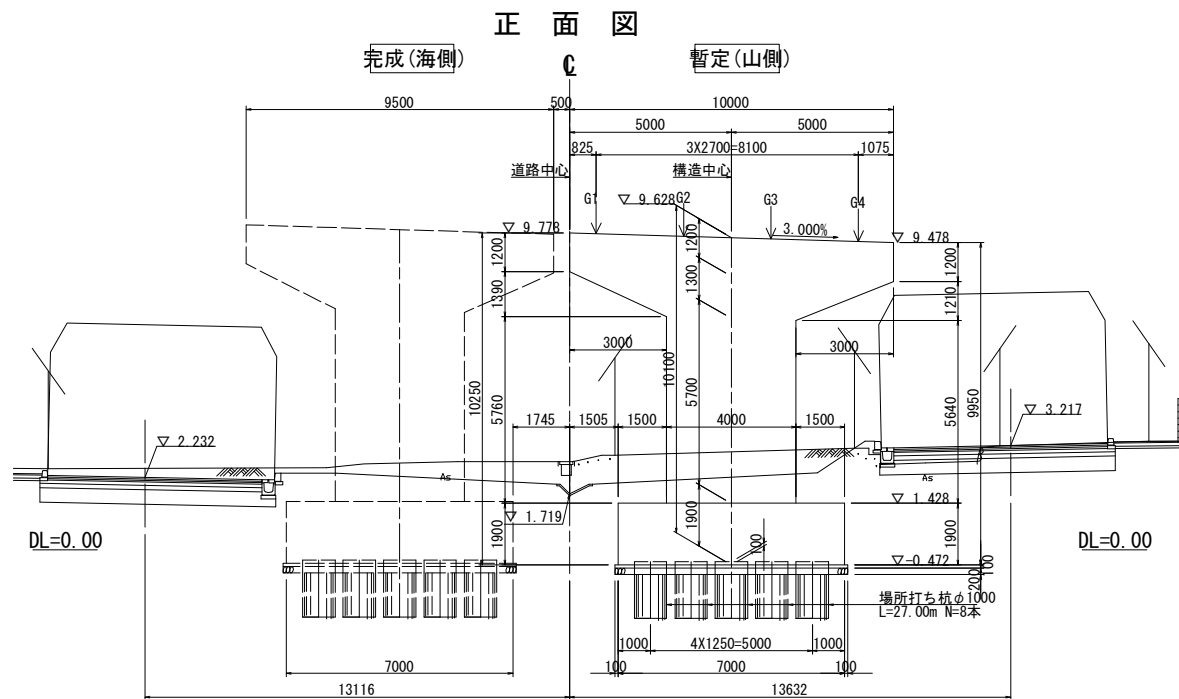


図 1.1.1 下部工一般図

図 1.1.1 下部工一般図

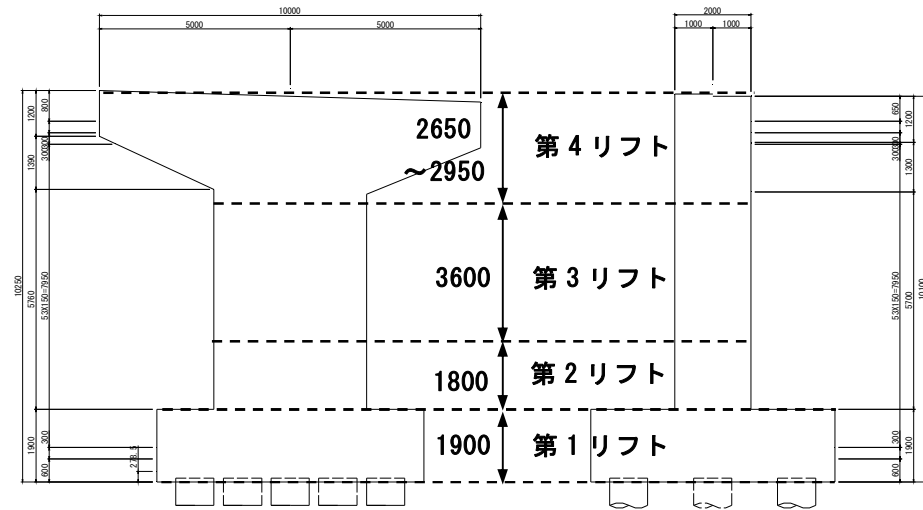


図 1.1.2 コンクリート打設割図

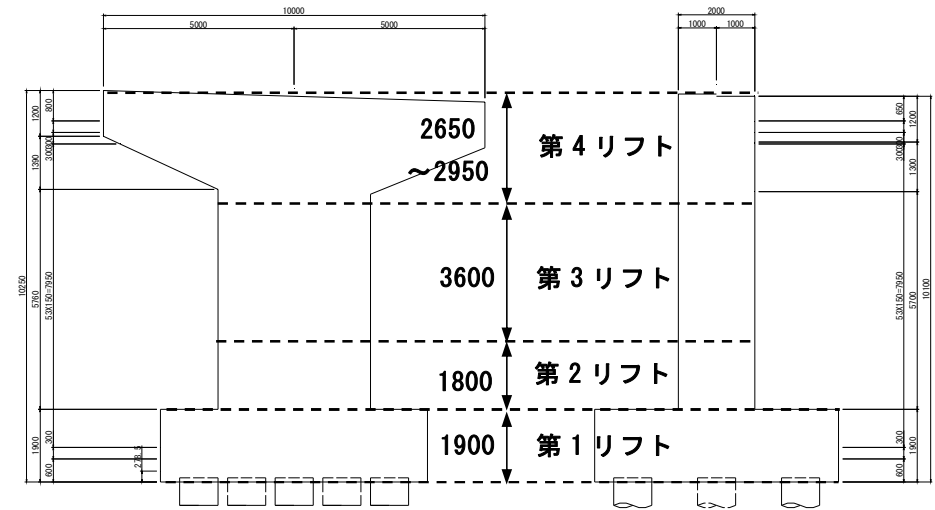


図 1.1.2 コンクリート打設割図

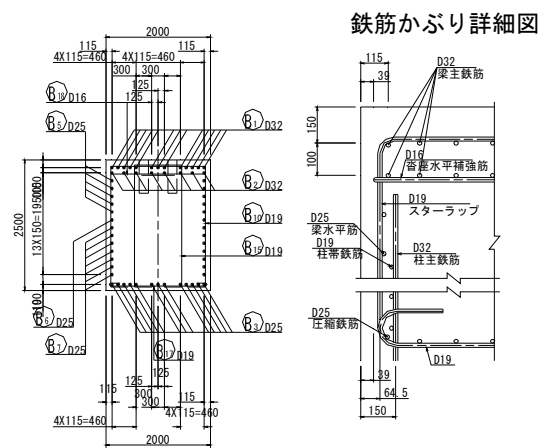
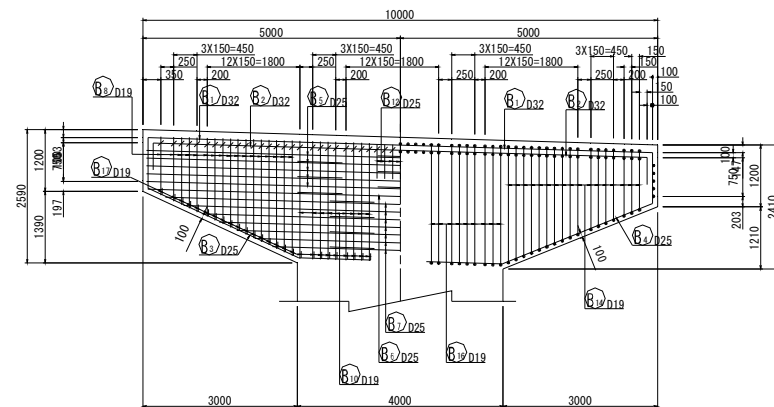


図 1.1.3 はり部 配筋図

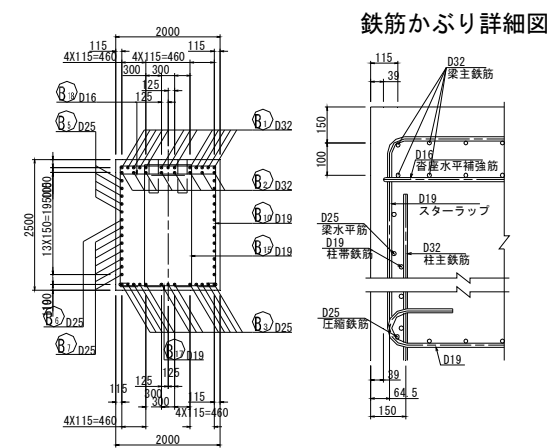
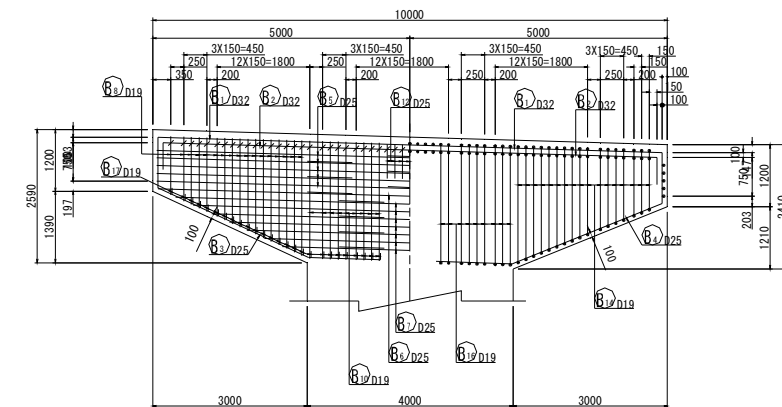


図 1.1.3 はり部 配筋図

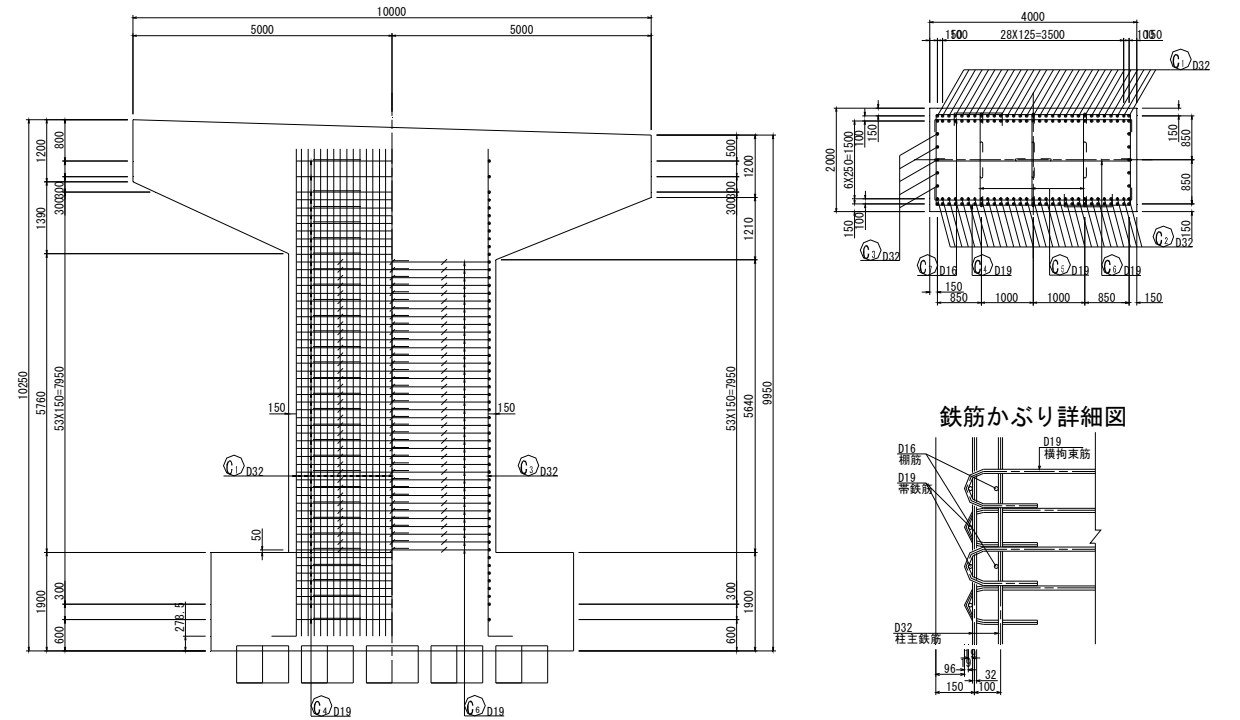
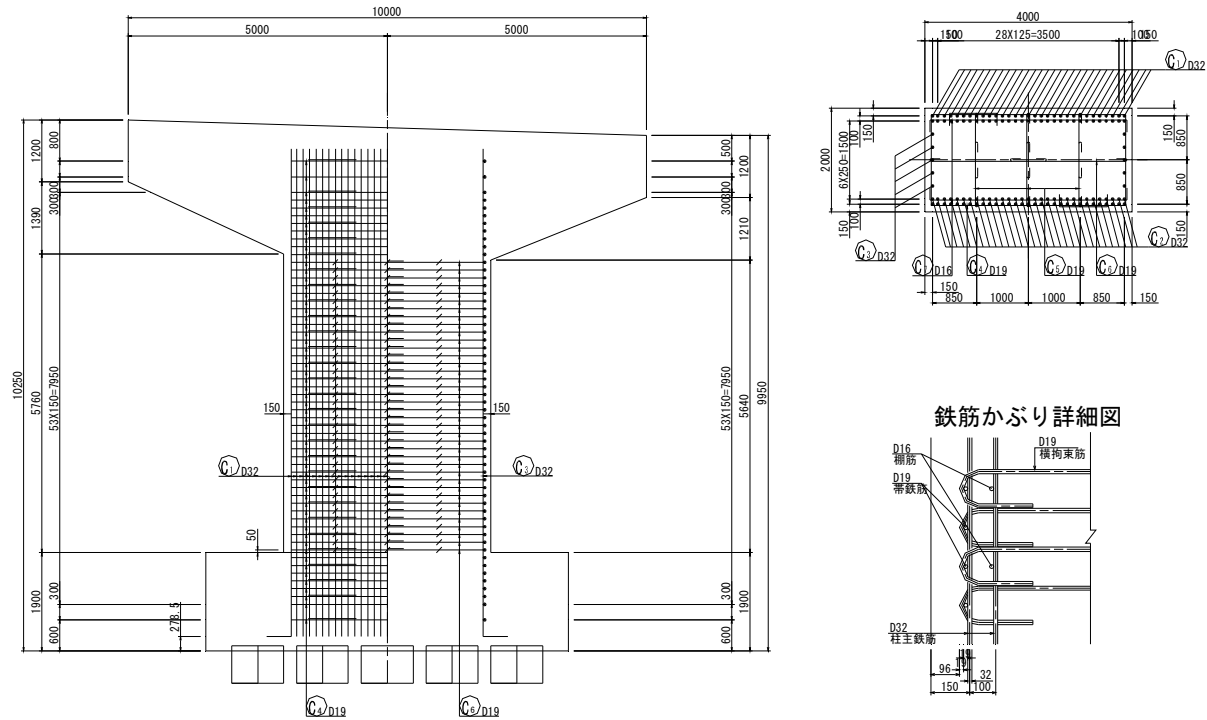


図 1.1.4 柱部 配筋図

図 1.1.4 柱部 配筋図

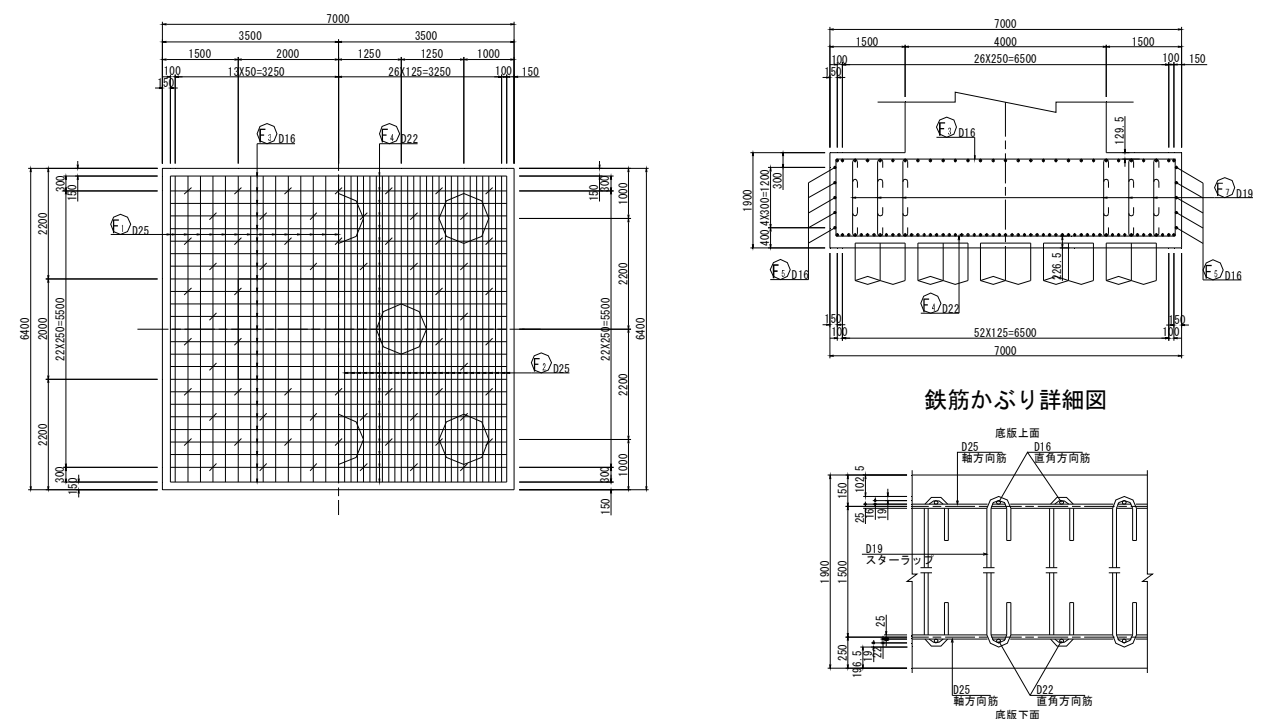
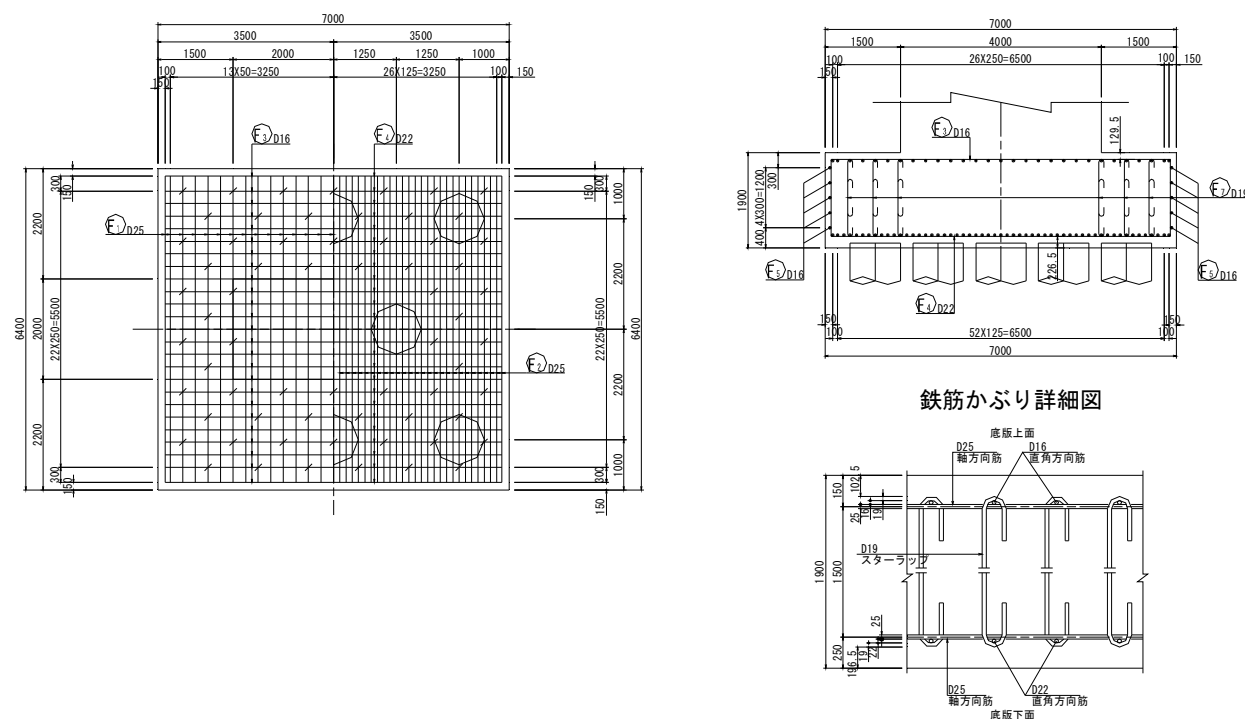


図 1.1.5 フーチング部 配筋図

図 1.1.5 フーチング部 配筋図

1.2 構造物の設計耐用期間と要求性能

本事例構造物(以下 A 橋脚)は橋梁下部工であり, 求められる設計耐用期間および要求性能は, 表 1.2.1 (太枠内) に示す通りである。

表 1.2.1 橋梁部材の設計耐用期間と要求性能の目安

部材	設計耐用期間(年)	安全性				使用性		耐久性					ひび割れ抵抗性	第三者影響度に関する性能	美観・景観
		耐荷性能	耐震性能	耐疲労性能	耐衝撃性能	構造物の使用性	機能性	中性化	塩害	アル骨反応	凍害	化学的侵食			
橋梁基礎工	100	○	○						○	○		○			
橋梁下部工	100	○	○			○		○	○	○		○	○	○	○
橋梁上部工(主桁)	100	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○
橋梁上部工(床版)	50*	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○
地覆・壁高欄	50				○			○	○	○	○	○	○	○	○

※箱桁などのように打ち換えが困難なものは, 100 年とする。

1.3 安全性の照査

耐荷性能, 耐震性能に関する照査については, 「道路橋示方書・同解説/日本道路協会」, 「土木工事設計要領/九州地方整備局」の基準を満足するように部材設計を実施することで, 性能は満足するものとして照査にかえる。

1.4 使用性の照査

使用性に関する照査については, 指針(案)では, 「現在, 道路橋示方書や国土交通省の各種指針類では, 一般に許容応力度設計法で設計されているため, その場合には使用性に対する照査は省略してもよいものとする」[指針(案)2.2.3]としている。よってここでは照査を省略する。

1.2 構造物の設計耐用期間と要求性能

本事例構造物(以下 A 橋脚)は橋梁下部工であり, 求められる設計耐用期間および要求性能は, 表 1.2.1 (太枠内) に示す通りである。

表 1.2.1 橋梁部材の設計耐用期間と要求性能の目安

部材	設計耐用期間(年)	安全性				使用性		耐久性					ひび割れ抵抗性	第三者影響度に関する性能	美観・景観
		耐荷性能	耐震性能	耐疲労性能	耐衝撃性能	構造物の使用性	機能性	中性化	塩害	アル骨反応	凍害	化学的侵食			
橋梁基礎工	100	○	○						○	○		○			
橋梁下部工	100	○	○			○		○	○	○		○	○	○	○
橋梁上部工(主桁)	100	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○
橋梁上部工(床版)	50*	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○
地覆・壁高欄	50				○			○	○	○	○	○	○	○	○

※箱桁などのように打ち換えが困難なものは, 100 年とする。

1.3 安全性の照査

耐荷性能, 耐震性能に関する照査については, 「道路橋示方書・同解説/日本道路協会」, 「土木工事設計要領/九州地方整備局」の基準を満足するように部材設計を実施することで, 性能は満足するものとして照査にかえる。

1.4 使用性の照査

使用性に関する照査については, 指針(案)では, 「現在, 道路橋示方書や国土交通省の各種指針類では, 一般に許容応力度設計法で設計されているため, その場合には使用性に対する照査は省略してもよいものとする」[指針(案)2.2.3]としている。よってここでは照査を省略する。

1.5 耐久性の照査

指針(案)では、「通常的环境下に建設され、セメントに普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート構造物については、道路橋示方書に示される最小かぶりの規定（鉄筋の直径以上、かつ、表 1.5.1 に示す値以上）を遵守することで、中性化に対する照査を省略することができる。」[指針(案)2.2.4]としている。

A 橋脚におけるそれぞれの部位の最小かぶりは表 1.5.1 に示す通り、道路橋示方書に示される最小かぶりの規定を満足している。しかし、同橋脚にはセメントに高炉セメント B 種を用いるため特にはり部材において中性化に伴う鋼材腐食が懸念されることから、中性化に対する照査を行う。

また、同橋脚は、塩害に対しては影響を受けない地域に建設されており、塩害に対する照査は省略できるが、ここでは、海岸から比較的近い位置に建設される構造物と想定し、塩害に対する照査を行う。さらに、アルカリ骨材反応に対する照査、化学的侵食に対する照査も行う。

なお、設計段階では、使用するコンクリートの配合は未定なため、近隣地区における同種構造物に用いられたコンクリートの配合を参考にするなどして仮定する必要がある、ここでは、水セメント比 53%、使用セメントを高炉セメント B 種（高炉スラグ混入量 45%）とした。

表 1.5.1 道路橋示方書によるかぶりと A 橋脚のかぶり (mm)

	部材		はり	柱, 壁	フーチング
	環境				
道路橋示方書	大気中		35	40	-
	水中及び土中		-	70	70
A 橋脚	-		側面 : 39 上面 : 115 (大気中)	96 (大気中)	102.5 (土中)

(1) 中性化に対する照査

中性化に対する照査は、設計耐用年数に応じた中性化深さの設計値 y_d の鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。

以下に照査の具体例を示す。

1.5 耐久性の照査

指針(案)では、「通常的环境下に建設され、セメントに普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート構造物については、道路橋示方書に示される最小かぶりの規定（鉄筋の直径以上、かつ、表 1.5.1 に示す値以上）を遵守することで、中性化に対する照査を省略することができる。」[指針(案)2.2.4]としている。

A 橋脚におけるそれぞれの部位の最小かぶりは表 1.5.1 に示す通り、道路橋示方書に示される最小かぶりの規定を満足している。しかし、同橋脚にはセメントに高炉セメント B 種を用いるため特にはり部材において中性化に伴う鋼材腐食が懸念されることから、中性化に対する照査を行う。

また、同橋脚は、塩害に対しては影響を受けない地域に建設されており、塩害に対する照査は省略できるが、ここでは、海岸から比較的近い位置に建設される構造物と想定し、塩害に対する照査を行う。さらに、アルカリ骨材反応に対する照査、化学的侵食に対する照査も行う。

なお、設計段階では、使用するコンクリートの配合は未定なため、近隣地区における同種構造物に用いられたコンクリートの配合を参考にするなどして仮定する必要がある、ここでは、水セメント比 53%、使用セメントを高炉セメント B 種（高炉スラグ混入量 45%）とした。

表 1.5.1 道路橋示方書によるかぶりと A 橋脚のかぶり (mm)

	部材		はり	柱, 壁	フーチング
	環境				
道路橋示方書	大気中		35	40	-
	水中及び土中		-	70	70
A 橋脚	-		側面 : 39 上面 : 115 (大気中)	96 (大気中)	102.5 (土中)

(1) 中性化に対する照査

中性化に対する照査は、設計耐用年数に応じた中性化深さの設計値 y_d の鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。

以下に照査の具体例を示す。

○中性化深さの算出【 y_d 】

[I]有効水結合材比の算出【 W/B 】

$$W/B = W / (C_p + k \cdot A_d) \quad (\text{式 1.5.1})$$

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=0, 高炉スラグ微粉末=0.7)

- ・水セメント比 : 53%より,
 $W/C=0.53 \Rightarrow$ (全セメント量) $C = W/0.53$
 - ・高炉セメント B 種の高炉スラグ混入量 : 45%より,
 (高炉スラグ混入量はセメント試験成績表により確認できる)
 ポルトランドセメント質量 : 混合材質量 = 55% : 45%
 $C_p = W/0.53 \times 0.55, \quad A_d = W/0.53 \times 0.45, \quad k = 0.7$
- (式 1.5.1) に代入すると,
 $W/B = W / (W/0.53 \times 0.55 + 0.7 \times W/0.53 \times 0.45) = \underline{0.613}$

[II]中性化速度係数の予測値算出【 α_p 】

$$\alpha_p = a + b \cdot (W/B)$$

a, b : セメントの種類に応じて, 実績から定まる値
 コンクリート標準示方書によると, 「係数 a および b は, 厳密には環境条件にも依存するので, 特に中性化に関して厳しい環境と考えられる場合には, 環境条件の影響を適切に考慮しなければならない。」とされている。また, 土木学会フライアッシュ研究小委員会が, 普通ポルトランドセメントあるいは中庸熱ポルトランドセメントを用いた 17 種類の実験データに基づいて求めた回帰式として以下の式 1.5.2 が示されている。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \cdot W/B \quad (\text{式 1.5.2})$$

[I] で得られた結果を(式 1.5.2)に代入すると,

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \times 0.613 = \underline{1.947} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$$

○中性化深さの算出【 y_d 】

[I]有効水結合材比の算出【 W/B 】

$$W/B = W / (C_p + k \cdot A_d) \quad (\text{式 1.5.1})$$

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=0, 高炉スラグ微粉末=0.7)

- ・水セメント比 : 53%より,
 $W/C=0.53 \Rightarrow$ (全セメント量) $C = W/0.53$
 - ・高炉セメント B 種の高炉スラグ混入量 : 45%より,
 (高炉スラグ混入量はセメント試験成績表により確認できる)
 ポルトランドセメント質量 : 混合材質量 = 55% : 45%
 $C_p = W/0.53 \times 0.55, \quad A_d = W/0.53 \times 0.45, \quad k = 0.7$
- (式 1.5.1) に代入すると,
 $W/B = W / (W/0.53 \times 0.55 + 0.7 \times W/0.53 \times 0.45) = \underline{0.613}$

[II]中性化速度係数の特性値算出【 α_k 】

$$\alpha_k = a + b \cdot (W/B)$$

a, b : セメントの種類に応じて, 実績から定まる値
 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編:標準]では, 「係数 a および b は, 厳密には環境条件にも依存するので, 特に中性化に関して厳しい環境と考えられる場合には, 環境条件の影響を適切に考慮しなければならない。」とされている。また, コンクリートライブラリー 64 「フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究(最終報告)」に示された普通ポルトランドセメントあるいは中庸熱ポルトランドセメントを用いた 17 種類の実験データに基づいて求めた回帰式として以下の式 1.5.2 が示されている。

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \cdot W/B \quad (\text{式 1.5.2})$$

[I] で得られた結果を(式 1.5.2)に代入すると,

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \times 0.613 = \underline{1.947} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$$

[Ⅲ] 中性化速度係数の特性値算出【 α_k 】

$$\alpha_k = \gamma_p \cdot \alpha_p \quad (\text{式 1.5.3})$$

γ_p : α_p の精度に関する安全係数。一般に 1.0~1.3 としよよい。ここでは土木学会フライアッシュ小委員会の式 1.5.2 を用いるとして 1.0 とする。

[Ⅱ]で得られた結果と係数 γ_p を(式 1.5.3)に代入すると、

$$\alpha_k = 1.0 \times 1.947 = \underline{1.947} \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}})$$

[Ⅳ] 中性化速度係数の設計値算出【 α_d 】

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \quad (\text{式 1.5.4})$$

β_e : 環境作用の程度を表す係数(乾燥しにくい=1.0, 乾燥しやすい=1.6) ここでは土中にあるフーチングは 1.0, その他の部材は 1.6 とする。

γ_c : コンクリートの材料係数。一般に 1.0 としよよいが材料分離や養生の影響を受けやすい上面 (ここでははりの上面) は 1.3 とする。

[Ⅲ]で得られた結果と係数 β_e, γ_c を(式 1.5.4)に代入すると、

$$\alpha_d = 1.947 \times 1.6 \times 1.0 = \underline{3.115} \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{はり側面, 柱}$$

$$\alpha_d = 1.947 \times 1.6 \times 1.3 = \underline{4.050} \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{はり上面}$$

$$\alpha_d = 1.947 \times 1.0 \times 1.0 = \underline{1.947} \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{フーチング}$$

[Ⅴ] 中性化深さの設計値算出【 y_d 】

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \quad (\text{式 1.5.5})$$

γ_{cb} : 中性化深さのばらつきを考慮した安全係数。一般に 1.15 としよよい。

t : 中性化に対する耐用年数(年) ここでは 100 年とする。

[Ⅲ] 中性化速度係数の設計値算出【 α_d 】

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \quad (\text{式 1.5.3})$$

β_e : 環境作用の程度を表す係数(乾燥しにくい=1.0, 乾燥しやすい=1.6) ここでは土中にあるフーチングは 1.0, その他の部材は 1.6 とする。

γ_c : コンクリートの材料係数。一般に 1.0 としよよいが材料分離や養生の影響を受けやすい上面 (ここでははりの上面) は 1.3 とする。

[Ⅱ]で得られた結果と係数 β_e, γ_c を(式 1.5.3)に代入すると、

$$\alpha_d = 1.947 \times 1.6 \times 1.0 = \underline{3.115} \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{はり側面, 柱}$$

$$\alpha_d = 1.947 \times 1.6 \times 1.3 = \underline{4.050} \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{はり上面}$$

$$\alpha_d = 1.947 \times 1.0 \times 1.0 = \underline{1.947} \text{ (mm/}\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{フーチング}$$

[Ⅳ] 中性化深さの設計値算出【 y_d 】

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \quad (\text{式 1.5.4})$$

γ_{cb} : 中性化深さのばらつきを考慮した安全係数。一般に 1.15 としよよい。

t : 中性化に対する耐用年数(年) ここでは 100 年とする。

[Ⅲ]で得られた結果と係数 $\gamma_{cb},$ 耐用年数 t を(式 1.5.4)に代入すると、

$$y_d = 1.15 \times 3.115 \times \sqrt{100} = 35.82 \approx \underline{36} \text{ (mm)} \cdots \text{はり側面, 柱}$$

$$y_d = 1.15 \times 4.050 \times \sqrt{100} = 46.58 \approx \underline{47} \text{ (mm)} \cdots \text{はり上面}$$

$$y_d = 1.15 \times 1.947 \times \sqrt{100} = 22.39 \approx \underline{23} \text{ (mm)} \cdots \text{フーチング}$$

[IV]で得られた結果と係数 γ_{cb} , 耐用年数 t を(式 1.5.5)に代入すると,

$$y_d = 1.15 \times 3.115 \times \sqrt{100} = 35.82 \approx 36 \text{ (mm)} \dots \text{はり側面, 柱}$$

$$y_d = 1.15 \times 4.050 \times \sqrt{100} = 46.58 \approx 47 \text{ (mm)} \dots \text{はり上面}$$

$$y_d = 1.15 \times 1.947 \times \sqrt{100} = 22.39 \approx 23 \text{ (mm)} \dots \text{フーチング}$$

○限界深さの算出【 y_{lim} 】

$$y_{lim} = c_d - c_k \quad (\text{式 1.5.6})$$

c_d : 耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値(mm)

$$c_d = c - \Delta c_e$$

c : かぶり(mm) 図 1.1.3~1.1.5 鉄筋詳細図より

Δc_e : 施工誤差(mm) 出来形管理基準にて最小かぶり以上を確保することが原則とされているため, 施工誤差は考慮しないもの(0ゼロ)とした。

c_k : 中性化残り(mm) 一般に, 通常環境下では 10mm としてよい。また塩害環境下では 10~25mm とするのがよい。ここでは塩害環境下で 25mm とする。

はり, 柱, フーチングで鉄筋かぶりが異なるため, (式 1.5.6)によりそれぞれの部位で限界深さの算出を行う。

【はり】 $y_{lim1} = 39 - 0 - 25 = 14 \text{ (mm)} \dots \text{側面}$

$$y_{lim1} = 115 - 0 - 25 = 90 \text{ (mm)} \dots \text{上面}$$

【柱】 $y_{lim2} = 96 - 0 - 25 = 71 \text{ (mm)}$

【フーチング】 $y_{lim3} = 102.5 - 0 - 25 = 77.5 \text{ (mm)}$

○中性化深さ【 y_d 】と限界深さ【 y_{lim} 】の対比

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0 \quad (\text{式 1.5.7})$$

γ_i : 構造物係数。一般に 1.0 としてよいが, 特殊な構造物に対しては 1.1 とする場合もある。ここでは 1.0 とする。

○限界深さの算出【 y_{lim} 】

$$y_{lim} = c_d - c_k \quad (\text{式 1.5.5})$$

c_d : 耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値(mm)

$$c_d = c - \Delta c_e$$

c : かぶり(mm) 図 1.1.3~1.1.5 鉄筋詳細図より

Δc_e : 施工誤差(mm) 出来形管理基準にて最小かぶり以上を確保することが原則とされているため, 施工誤差は考慮しないもの(0ゼロ)とした。

c_k : 中性化残り(mm) 一般に, 通常環境下では 10mm としてよい。また塩害環境下では 10~25mm とするのがよい。ここでは塩害環境下で 25mm とする。

はり, 柱, フーチングで鉄筋かぶりが異なるため, (式 1.5.5)によりそれぞれの部位で限界深さの算出を行う。

【はり】 $y_{lim1} = 39 - 0 - 25 = 14 \text{ (mm)} \dots \text{側面}$

$$y_{lim1} = 115 - 0 - 25 = 90 \text{ (mm)} \dots \text{上面}$$

【柱】 $y_{lim2} = 96 - 0 - 25 = 71 \text{ (mm)}$

【フーチング】 $y_{lim3} = 102.5 - 0 - 25 = 77.5 \text{ (mm)}$

○中性化深さ【 y_d 】と限界深さ【 y_{lim} 】の対比

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0 \quad (\text{式 1.5.6})$$

γ_i : 構造物係数。一般に 1.0 としてよいが, 特殊な構造物に対しては 1.1 とする場合もある。ここでは 1.0 とする。

手引書(案):橋梁下部工 照査例① 平成 23 年 10 月(現行)

(式 1.5.7)によりそれぞれの部位で算出, 確認を行う。

【はり】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim1}} = 1.0 \times \frac{36}{14} = 2.57 \geq 1.0$ ……側面 (NG)

$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim1}} = 1.0 \times \frac{47}{90} = 0.52 \leq 1.0$ ……上面 (OK)

【柱】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim2}} = 1.0 \times \frac{36}{71} = 0.51 \leq 1.0$ (OK)

【フーチング】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim3}} = 1.0 \times \frac{23}{77.5} = 0.30 \leq 1.0$ (OK)

はり, 柱, フーチングにおける照査結果を表 1.5.2 に示す。

本事例では, 中性化に伴う鋼材腐食に対しては, 柱およびフーチングにおいて, 耐用年数 100 年を満足しているがはり側面については満足していないことが確認された。

はり部に対して以下のような対策が必要となる。

- ・鉄筋かぶりを大きくする
- ・水セメント比を小さくする

表 1.5.2 中性化に関する照査結果

照査部材	かぶり c (mm)	施工 誤差 Δc _e (mm)	照査に 用いる かぶり c _d (mm)	中性 化残 り c _k (mm)	限界 深さ y _{lim} (mm)	構造物 係数 γ _i	中性 化深 さ y _d (mm)	$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}}$	結果 ≤1.0
	【イ】	【ロ】	【ハ】 =イ-ロ	【ニ】	【ホ】 =ハ-ニ	【ヘ】	【ト】		
はり(側面)	39	0	39	25	14	1.0	36	2.57	NG
はり(上面)	115	0	115	25	90	1.0	47	0.52	OK
柱	96	0	96	25	71	1.0	36	0.51	OK
フーチング	102.5	0	102.5	25	77.5	1.0	23	0.30	OK

手引書(案):橋梁下部工 照査例① 平成 25 年暫定改訂(案)

(式 1.5.6)によりそれぞれの部位で算出, 確認を行う。

【はり】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim1}} = 1.0 \times \frac{36}{14} = 2.57 \geq 1.0$ ……側面 (NG)

$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim1}} = 1.0 \times \frac{47}{90} = 0.52 \leq 1.0$ ……上面 (OK)

【柱】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim2}} = 1.0 \times \frac{36}{71} = 0.51 \leq 1.0$ (OK)

【フーチング】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim3}} = 1.0 \times \frac{23}{77.5} = 0.30 \leq 1.0$ (OK)

はり, 柱, フーチングにおける照査結果を表 1.5.2 に示す。

本事例では, 中性化に伴う鋼材腐食に対しては, 柱およびフーチングにおいて, 耐用年数 100 年を満足しているがはり側面については満足していないことが確認された。

はり部に対して以下のような対策が必要となる。

- ・鉄筋かぶりを大きくする
- ・水セメント比を小さくする

表 1.5.2 中性化に関する照査結果

照査部材	かぶり c (mm)	施工 誤差 Δc _e (mm)	照査に 用いる かぶり c _d (mm)	中性 化残 り c _k (mm)	限界 深さ y _{lim} (mm)	構造物 係数 γ _i	中性 化深 さ y _d (mm)	$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}}$	結果 ≤1.0
	【イ】	【ロ】	【ハ】 =イ-ロ	【ニ】	【ホ】 =ハ-ニ	【ヘ】	【ト】		
はり(側面)	39	0	39	25	14	1.0	36	2.57	NG
はり(上面)	115	0	115	25	90	1.0	47	0.52	OK
柱	96	0	96	25	71	1.0	36	0.51	OK
フーチング	102.5	0	102.5	25	77.5	1.0	23	0.30	OK

(2) 塩害に対する照査

塩害に対する照査は、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。以下に照査の具体例を示す。

○塩化物イオン濃度の設計値算出【 C_d 】

【I】塩化物イオン拡散係数の予測値算出【 D_p 】

コンクリート標準示方書によると、『コンクリートの使用材料、配合より拡散係数を予測する式としては、既往のコンクリート構造物中の塩化物量分布調査結果をもとに作成した幾つかの回帰式が導かれている。』とあり、次式が示されている。

$$\log_{10} D_p = -3.0 (W/C)^2 + 5.4 (W/C) - 2.2 \quad (\text{式 1.5.8})$$

[高炉セメントやシリカフェームの場合]

- ・水セメント比：53%より

$$W/C = 0.53$$

- ・(式 1.5.8)に代入すると

$$\log_{10} D_p = -3.0 \times 0.53^2 + 5.4 \times 0.53 - 2.2 = -0.181$$

$$D_p = 0.660 \quad (\text{cm}^2/\text{年})$$

【II】塩化物イオン拡散係数の特性値算出【 D_k 】

$$D_k = \gamma_p D_p \quad (\text{式 1.5.9})$$

γ_p : D_p の精度に関する安全係数。一般に 1.0~1.3 としてよい。

ここでは土木学会の回帰式 1.5.8 を用いるものとして 1.2 とする。

[I]で得られた結果と係数 γ_p を(式 1.5.9)に代入すると、

$$D_k = 1.2 \times 0.660 = 0.792 (\text{cm}^2/\text{年})$$

(2) 塩害に対する照査

塩害に対する照査は、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。以下に照査の具体例を示す。

○塩化物イオン濃度の設計値算出【 C_d 】

【I】塩化物イオン拡散係数の特性値算出【 D_k 】

2012 年制定コンクリート標準示方書によると、『コンクリートの使用材料、配合より拡散係数の特性値を予測する式としては、既往の実験結果をもとに作成した幾つかの回帰式が導かれている。』とあり、次式が示されている。

$$\log_{10} D_k = 3.2 (W/C) - 2.4 \quad (\text{式 1.5.7})$$

[高炉セメント B 種相当、やシリカフェームを使用する場合]

- ・水セメント比：53%より

$$W/C = 0.53$$

- ・(式 1.5.7)に代入すると

$$\log_{10} D_k = 3.2 \times 0.53 - 2.4 = -0.704$$

$$D_k = 0.198 \quad (\text{cm}^2/\text{年})$$

【Ⅲ】 塩化物イオンに対する設計拡散係数の算出【 D_d 】

梁部材など曲げひび割れが考えられる部材では、下記の式 1.5.10 を用いて照査を行う。

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \left(\frac{w}{l}\right) \cdot \left(\frac{w}{w_a}\right)^2 \cdot D_0 \quad (\text{式 1.5.10})$$

γ_c : コンクリートの材料係数。一般に 1.0 としてよい。

D_0 : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数。一般に、 $200\text{cm}^2/\text{年}$ としてよい。

w : ひび割れ幅(mm)

w_a : ひび割れ幅の限界値(mm)

w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔の比。算出については、コンクリート標準示方書 設計編 8.3.7 および 7.4.4 を参照

マスコンクリートなど曲げひび割れが考えにくい部材において、初期収縮ひび割れ間隔を求めることが困難な場合で、ひび割れ幅がコンクリート標準示方書 設計編 8.3.2 のひび割れ幅の限界値以下であれば次式を用いてよい。

$$D_d = D_k \cdot \gamma_c \cdot \beta_{cl} \quad (\text{式 1.5.11})$$

ここに

β_{cl} : 初期ひび割れの影響を考慮した係数で、1.5 としてよい。

柱、はり側面、フーチングの D_d は式 1.5.11 より

$$D_d = 0.792 \times 1.0 \times 1.5 = 1.188 (\text{cm}^2/\text{年})$$

はり上面の D_d は限界ひび割れ幅近くまでひびが生じると仮定すると

式 1.5.10 より

$$D_d = 1.3 \times 0.792 + 0.002 \times 1^2 \times 200 = 1.430 (\text{cm}^2/\text{年})$$

【Ⅱ】 塩化物イオンに対する設計拡散係数の算出【 D_d 】

梁部材など曲げひび割れが考えられる部材では、下記の式 1.5.8 を用いて照査を行う。

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \lambda \cdot \left(\frac{w}{l}\right) \cdot D_0 \quad (\text{式 1.5.8})$$

γ_c : コンクリートの材料係数。一般に 1.0 としてよい。

ただし、上面の部位に関しては 1.3 とするのがよい。

D_0 : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数。一般に、 $400\text{cm}^2/\text{年}$ としてよい。

λ : ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数
一般に 1.5 としてよい。

w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔の比。算出法については、2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 2.1.4 参照

マスコンクリートなど曲げひび割れが考えにくい部材において、初期収縮ひび割れ間隔を求めることが困難な場合で、ひび割れ幅が2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編:標準] 2.1.2 のひび割れ幅の限界値以下であれば次式を用いてよい。

$$D_d = D_k \cdot \gamma_c \cdot \beta_{cl} \quad (\text{式 1.5.9})$$

ここに

β_{cl} : 初期ひび割れの影響を考慮した係数で、1.5 としてよい。

柱、はり側面、フーチングの D_d は式 1.5.9 より

$$D_d = 0.198 \times 1.0 \times 1.5 = 0.297 (\text{cm}^2/\text{年})$$

はり上面の D_d は式 1.5.8 より

$$D_d = 1.3 \times 0.198 + 1.5 \times 0.002^* \times 400 = 1.457 (\text{cm}^2/\text{年})$$

*ここでの w/l は仮定値である (基本的な解法を参考までに次ページに示す)

[IV] 塩化物イオン濃度の設計値算出【 C_d 】

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right)\right) \quad (\text{式 1.5.12})$$

C_0 : コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 (kg/m³)

c_d : 耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値 (mm)

$$c_d = c - \Delta c_e$$

c : かぶり (mm) 図 1.1.3~1.1.5 鉄筋詳細図より

Δc_e : 施工誤差 (mm) 出来形管理基準にて最小かぶり以上を確保することが原則とされているため、施工誤差は考慮しないもの(0ゼロ)とした。

t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数(年)。ここでは 100 年とする

γ_{cl} : 鋼材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。一般に 1.3 としてよい。

・コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 C_0

表 1.5.3 より求める。構造物の立地する地域は九州で、海岸からの距離は約 0.5km 程度とすると

$$C_0 = 1.5$$

表 1.5.3 コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m³)

		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道, 東北, 北陸, 沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東, 東海, 近畿, 中国, 四国, 九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

【参考】照査例①の梁部材におけるひび割れ幅とひび割れ間隔の比 (w/l)

w/l (ひび割れ幅とひび割れ間隔の比)

一般に、次式にて求めてよい。

$$\frac{w}{l} = \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} \left(\text{または} \frac{\sigma_{pe}}{E_p} \right) + \varepsilon'_{csd} \right)$$

ここに、 σ_{se} 、 σ_{pe} 、 ε'_{csd} の定義は、2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編: 標準] 4 編に準ずる。

本照査例については以下の算出法による。

σ_{se} : 鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)

$$\sigma_{se} = \frac{M_d}{A_s j d}$$

ここに、

M_d : 曲げモーメント

(許容応力度法に基づく設計では「死荷重+活荷重」による値)

j : $1 - k/3$

k : 中立軸比 ($= \sqrt{2np_w + (np_w)^2} - np_w$)

n : ヤング係数比 ($= E_s/E_c$)

p_w : 鉄筋比 ($= A_s/(bwd)$) ※ bw : 部材幅, d : 有効高

ε'_{csd} : 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の増加を考慮するための数値で、標準的な値として下表に示す値としてよい。

収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の増加を考慮する数値

環境条件	常時乾燥環境 (雨水の影響を受けない桁下面など)	乾湿繰返し環境 (桁上面, 海岸や川の水面に近く湿度が高い環境など)	常時湿潤環境 (土中部材など)
自重でひび割れが発生 (材齢 30 日を想定) する部材	450×10^{-6}	250×10^{-6}	100×10^{-6}
永続作用時にひび割れが発生 (材齢 100 日を想定) する部材	350×10^{-6}	200×10^{-6}	100×10^{-6}
変動作用時にひび割れが発生 (材齢 200 日 想定) する部材	300×10^{-6}	150×10^{-6}	100×10^{-6}

※2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編: 標準] 2.3.4 より

・ 部位ごとの耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値 c_d

【はり】 $c_{d1} = 39 - 0 = 39$ (mm)・・・側面
 $c_{d1} = 115 - 0 = 115$ (mm)・・・上面

【柱】 $c_{d2} = 96 - 0 = 96$ (mm)

【フーチング】 $c_{d3} = 102.5 - 0 = 102.5$ (mm)

[Ⅲ]で得られた結果とイオン濃度 C_0 , かぶりの設計値 c_d , 耐用年数 t , 係数 γ_{cl} を, 部位ごとに(式 1.5.12)に代入すると,

【はり】

$$C_{d1} = 1.3 \times 1.5 \times \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \times 39}{2\sqrt{1.188 \times 100}} \right)\right) = 1.561 \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdots \text{側面}$$

$$C_{d1} = 1.3 \times 1.5 \times \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \times 115}{2\sqrt{1.430 \times 100}} \right)\right) = 0.968 \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdots \text{上面}$$

【柱】

$$C_{d2} = 1.3 \times 1.5 \times \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \times 96}{2\sqrt{1.188 \times 100}} \right)\right) = 1.04 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

【フーチング】

$$C_{d3} = 1.3 \times 1.5 \times \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \times 102.5}{2\sqrt{1.188 \times 100}} \right)\right) = 0.987 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

○鋼材腐食発生限界濃度の算出【 C_{lim} 】

鋼材腐食発生限界濃度。類似の構造物の実測結果や試験結果を参考に定めてよい。それらによらない場合, 1.2kg/m^3 としてよい。

○塩化物イオン濃度設計値【 C_d 】と鋼材腐食発生限界濃度【 C_{lim} 】の対比

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad (\text{式 1.5.13})$$

γ_i : 構造物係数。一般に 1.0 としてよいが, 重要構造物に対しては 1.1 とするのがよい。ここでは 1.0 とする。

【Ⅲ】塩化物イオン濃度の設計値算出【 C_d 】

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right)\right) + C_i \quad (\text{式 1.5.10})$$

C_0 : コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

c_d : 耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値 (mm)

$$c_d = c - \Delta c_e$$

c : かぶり (mm) 図 1.1.3~1.1.5 鉄筋詳細図より

Δc_e : 施工誤差 (mm) 出来形管理基準にて最小かぶり以上を確保することが原則とされているため, 施工誤差は考慮しないもの(0ゼロ)とした。

t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数(年)。ここでは 100 年とする

C_i : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3)。一般に 0.30 kg/m^3 としてよい。

γ_{cl} : 鋼材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。一般に 1.3 としてよい。

・ コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 C_0

表 1.5.3 より求める。

構造物の立地する地域は九州で, 海岸からの距離は約 0.5km 程度とすると

$$C_0 = 1.5 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

表 1.5.3 コンクリート表面における塩化物イオン濃度: C_0 (kg/m^3)

	飛沫帯	離岸距離 (m)						
		汀線付近	10	20	100	250	500	1000
飛来塩分が多い地域	北海道, 東北 北陸, 沖縄	9.0	-	-	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東, 東海, 近畿 中国, 四国	4.5	-	-	2.5	2.0	1.5	1.0
	九州	9.0	9.0	4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

・ 部位ごとの耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値 c_d

【はり】 $c_{d1} = 39 - 0 = 39$ (mm)・・・側面

$c_{d1} = 115 - 0 = 115$ (mm)・・・上面

【柱】 $c_{d2} = 96 - 0 = 96$ (mm)

【フーチング】 $c_{d3} = 102.5 - 0 = 102.5$ (mm)

(式 1.5.12)によりそれぞれの部位で算出, 確認を行う。

【はり】 $\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} = 1.0 \times \frac{1.561}{1.2} = \underline{1.30} \geq 1.0$ 側面 (NG)

$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} = 1.0 \times \frac{0.968}{1.2} = \underline{0.81} \leq 1.0$ 上面 (OK)

【柱】 $\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} = 1.0 \times \frac{1.040}{1.2} = \underline{0.87} \leq 1.0$ (OK)

【フーチング】 $\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} = 1.0 \times \frac{0.987}{1.2} = \underline{0.82} \leq 1.0$ (OK)

はり, 柱, フーチングにおけるそれぞれの数値, 照査結果を表 1.5.4 に示す。
 本事例では, 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対しては, 柱およびフーチングについては耐用年数 100 年を満足し, はり側面については満足していないことが確認された。

はり部においては以下に示すような対策が必要となる。

- ・鉄筋かぶりを大きくする
- ・水セメント比を小さくする
- ・エポキシ鉄筋の採用

表 1.5.4 塩害に対する照査結果

照査部材	設計値	限界濃度	構造物係数	$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}}$	結果 ≤1.0
	C_d (kg/m ³)	C_{lim} (kg/m ³)	γ_i		
	【7】	【1】	【ウ】	【I】 =ウ*7/1	
はり(側面)	1.561	1.2	1.0	1.30	NG
はり(上面)	0.968			0.81	OK
柱	1.04	1.2	1.0	0.87	OK
フーチング	0.987	1.2	1.0	0.82	OK

[II]で得られた結果とイオン濃度 C_0 , かぶりの設計値 c_d , 耐用年数 t , 係数 γ_{cl} を, 部位ごとに(式 1.5.11)に代入すると,

【はり】

$C_{d1} = 1.3 \times 1.5 \times (1 - \text{erf}(\frac{0.1 \times 39}{2\sqrt{0.297 \times 100}})) + 0.3 = \underline{1.495}(\text{kg/m}^3) \cdots \text{側面}$

$C_{d1} = 1.3 \times 1.5 \times (1 - \text{erf}(\frac{0.1 \times 115}{2\sqrt{1.457 \times 100}})) + 0.3 = \underline{1.276}(\text{kg/m}^3) \cdots \text{上面}$

【柱】

$C_{d2} = 1.3 \times 1.5 \times (1 - \text{erf}(\frac{0.1 \times 96}{2\sqrt{0.297 \times 100}})) + 0.3 = \underline{0.715}(\text{kg/m}^3)$

【フーチング】

$C_{d3} = 1.3 \times 1.5 \times (1 - \text{erf}(\frac{0.1 \times 102.5}{2\sqrt{0.297 \times 100}})) + 0.3 = \underline{0.658}(\text{kg/m}^3)$

○鋼材腐食発生限界濃度の算出【 C_{lim} 】

鋼材腐食発生限界濃度。類似の構造物の実測結果や試験結果を参考に定めてよい。それらによらない場合は, 式(1.5.11)~式(1.5.14)を用いて定めてよい。ただし W/C の範囲は, 0.30~0.55 とする。

(普通ポルトランドセメントを用いた場合)

$C_{lim} = -3.0(W/C) + 3.4$ (1.5.11)

(高炉セメントB種相当, フライアッシュセメントB種相当を用いた場合)

$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1$ (1.5.12)

(低熱ポルトランドセメント, 早強ポルトランドセメントを用いた場合)

$C_{lim} = -2.2(W/C) + 2.6$ (1.5.13)

(シリカフェームを用いた場合)

$C_{lim} = 1.20$ (1.5.14)

$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1 = -2.6 \times 0.53 + 3.1 = \underline{1.722}(\text{kg/m}^3)$

○塩化物イオン濃度設計値【 C_d 】と鋼材腐食発生限界濃度【 C_{lim} 】の対比

$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0$ (式 1.5.15)

γ_i : 構造物係数。一般に 1.0 としてよいが, 重要構造物に対しては 1.1 とするのがよい。ここでは 1.0 とする。

【参考】※柱を例として

図 1.5.1 と図 1.5.2 を用いて、塩化物イオン拡散係数およびコンクリート表面における塩化物イオン濃度ごとに必要なかぶりを算定することができる。

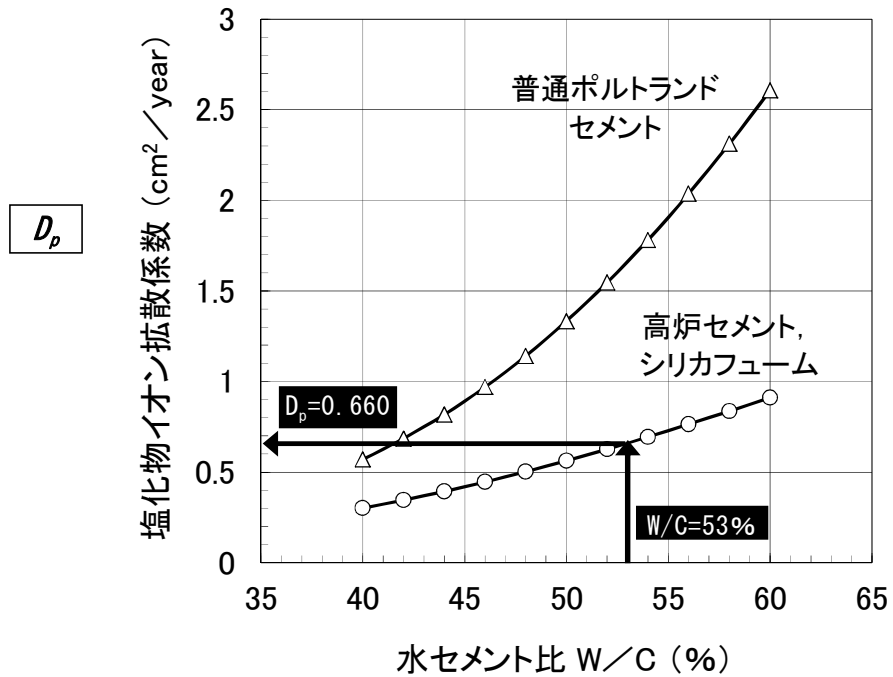


図 1.5.1 水セメント比と塩化物イオン拡散係数の関係

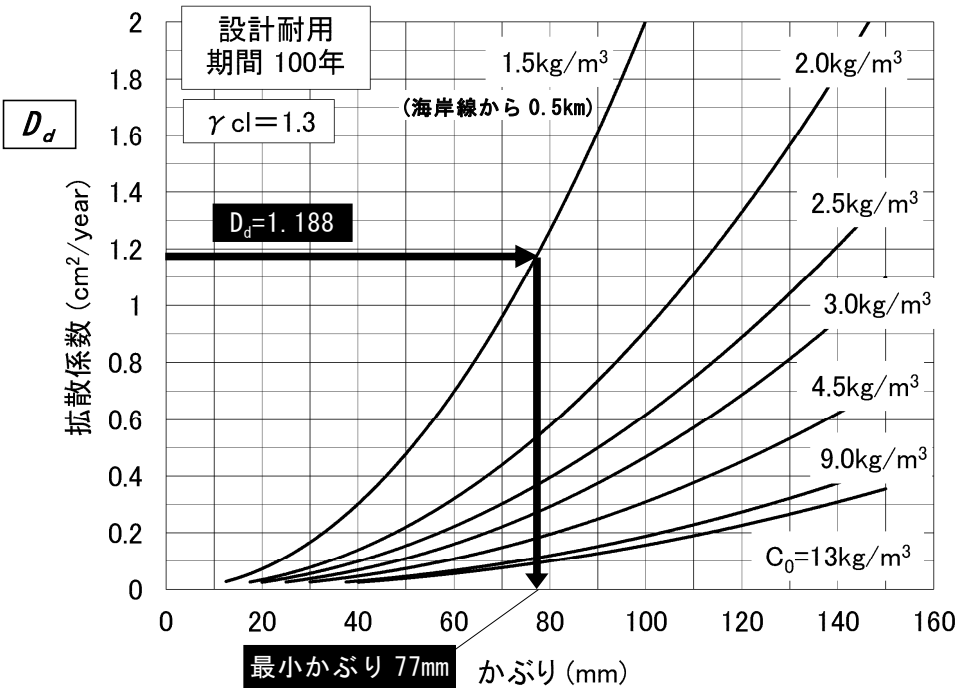


図 1.5.2 塩害に対する照査を満足する拡散係数およびかぶり判定図

(式 1.5.15)によりそれぞれの部位で算出、確認を行う。

【はり】 $\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} = 1.0 \times \frac{1.495}{1.722} = 0.87 \leq 1.0 \dots$ 側面 (OK)

$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} = 1.0 \times \frac{1.276}{1.722} = 0.74 \leq 1.0 \dots$ 上面 (OK)

【柱】 $\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} = 1.0 \times \frac{0.715}{1.722} = 0.42 \leq 1.0$ (OK)

【フーチング】 $\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} = 1.0 \times \frac{0.657}{1.722} = 0.38 \leq 1.0$ (OK)

はり、柱、フーチングにおけるそれぞれの数値、照査結果を表 1.5.4 に示す。本事例では、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対しては、はり・柱およびフーチングの全部材において耐用年数 100 年を満足する。

表 1.5.4 塩害に対する照査結果

照査部材	設計値	限界濃度	構造物係数	$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}}$	結果
	C_d (kg/m³)	C_{lim} (kg/m³)			
	【7】	【1】	【7】	【1】 = 7*7/1	
はり(側面)	1.495	1.722	1.0	0.87	OK
(上面)	1.276	1.722	1.0	0.74	OK
柱	0.715	1.722	1.0	0.42	OK
フーチング	0.658	1.722	1.0	0.38	OK

手引書(案):橋梁下部工 照査例① 平成 23 年 10 月(現行)

なお、水セメント比を用い、図 1.5.1 から算出されるのは塩化物イオン拡散係数の予測値 D_p である。図 1.5.2 にプロットする拡散係数は、安全係数 γ_p およびひび割れ幅等を考慮し、設計拡散係数 D_d である必要がある。

また図 1.5.2 は、以下の条件によるものであり、条件が異なる場合は使用できない。

- ・ C_d のばらつきを考慮した安全係数 γ_{cl} : 1.3
- ・ 耐用年数 t : 100(年)

(3) アルカリ骨材反応に対する照査

本事例の構造物建設予定地周辺の既設構造物調査を行ったところ、アルカリ骨材反応による劣化はみられなかった。

(4) 凍害に対する照査

本事例の構造物建設予定地は、平地である(山間地ではない)ため、照査の対象外である。

なお、指針(案)では、「九州地区においては、一部の山間地を除いて凍結するおそれがないので、凍害に対する照査を省略することができる」[指針(案)2.2.4]としている。

(5) 化学的侵食に対する照査

本事例の構造物建設予定地は、温泉地域および旧産炭地域等ではなく、酸性劣化や硫酸塩劣化等は想定されない。

指針(案)には、塩害等それぞれの項目について対策が示されているが、それらの対策のみでは構造物に所要の耐久性能を付与することが困難と判断される場合は、専門評価機関を交えて協議しなければならない。

手引書(案):橋梁下部工 照査例① 平成 25 年暫定改訂(案)

(3) アルカリ骨材反応に対する照査

本事例の構造物建設予定地周辺の既設構造物調査を行ったところ、アルカリ骨材反応による劣化はみられなかった。

(4) 凍害に対する照査

本事例の構造物建設予定地は、平地である(山間地ではない)ため、照査の対象外である。

なお、指針(案)では、「九州地区においては、一部の山間地を除いて凍結するおそれがないので、凍害に対する照査を省略することができる」[指針(案)2.2.4]としている。

(5) 化学的侵食に対する照査

本事例の構造物建設予定地は、温泉地域および旧産炭地域等ではなく、酸性劣化や硫酸塩劣化等は想定されない。

指針(案)には、塩害等それぞれの項目について対策が示されているが、それらの対策のみでは構造物に所要の耐久性能を付与することが困難と判断される場合は、専門評価機関を交えて協議しなければならない。

ボックスカルバート 照査例①

ボックスカルバート 照査例①

4.1 構造物の諸元

4.1 構造物の諸元

表 4.1.1 下部工諸元

ブロック長	L=13.400m	
塩害に対する地域区分	C地域	
凍害に関する事項	九州地区 平地(山間地ではない)	
化学的侵食に関する事項	温泉地域および旧産炭地域等ではない	
使用材料	コンクリート	$\sigma_{ck}=24N/mm^2$
	鉄筋	SD345

表 4.1.1 下部工諸元

ブロック長	L=13.400m	
塩害に対する地域区分	C地域	
凍害に関する事項	九州地区 平地(山間地ではない)	
化学的侵食に関する事項	温泉地域および旧産炭地域等ではない	
使用材料	コンクリート	$\sigma_{ck}=24N/mm^2$
	鉄筋	SD345

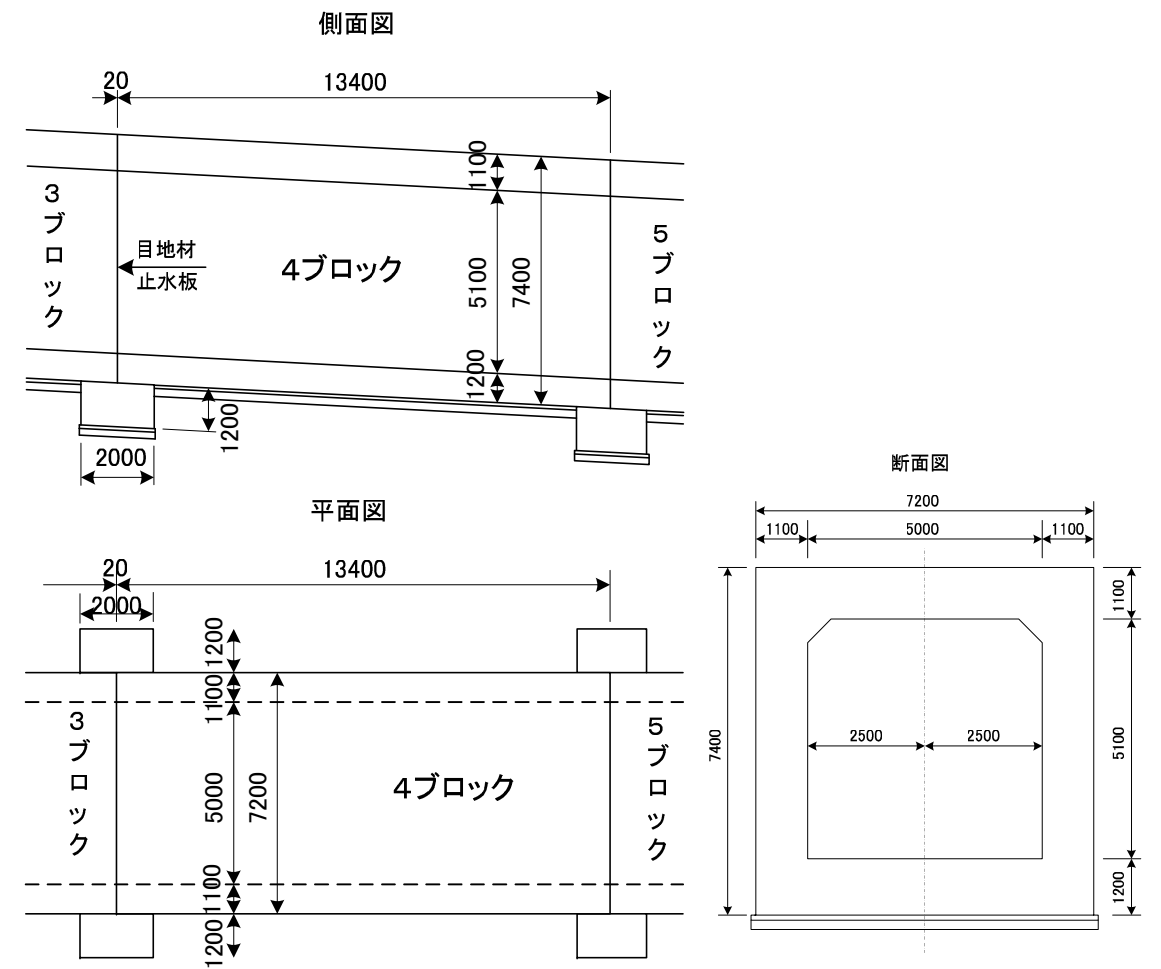
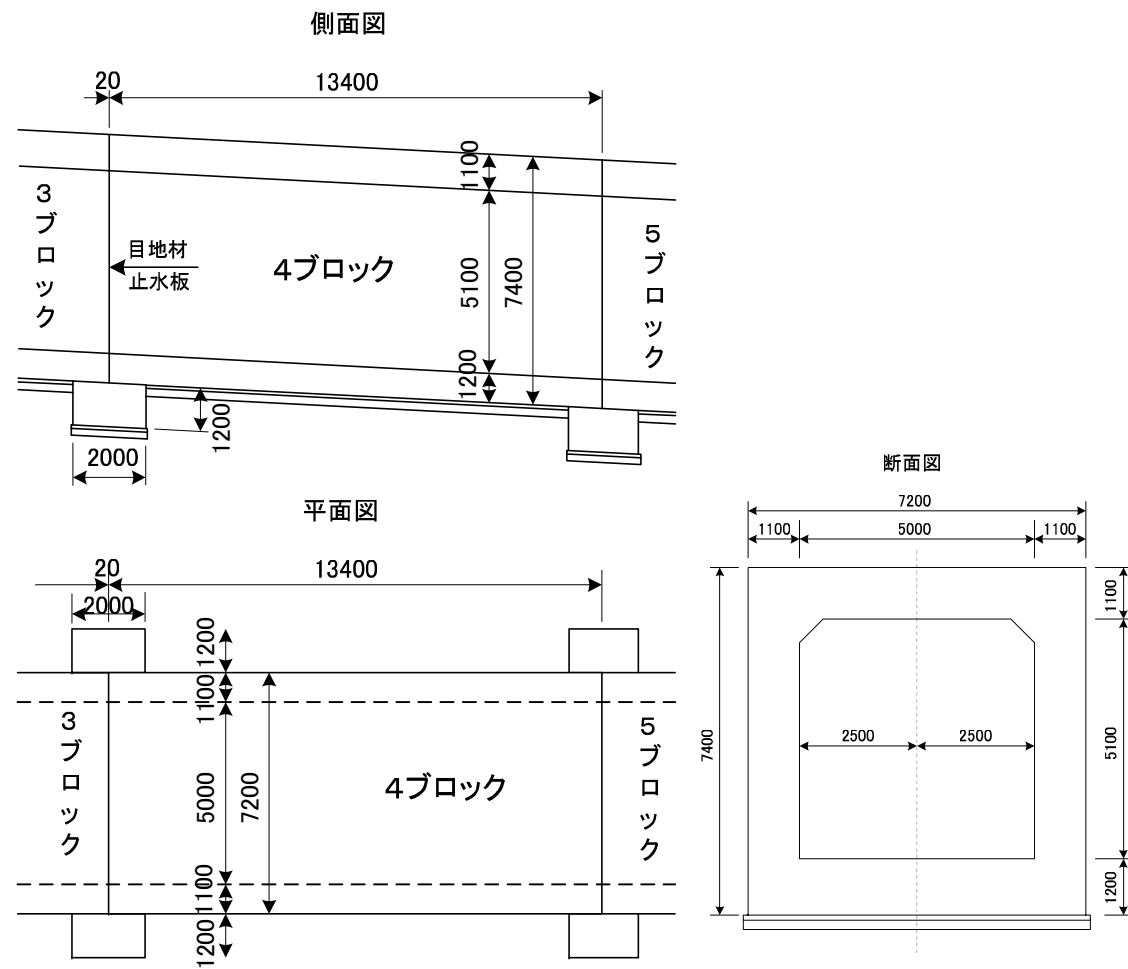


図 4.1.1 ボックスカルバート一般図

図 4.1.1 ボックスカルバート一般図

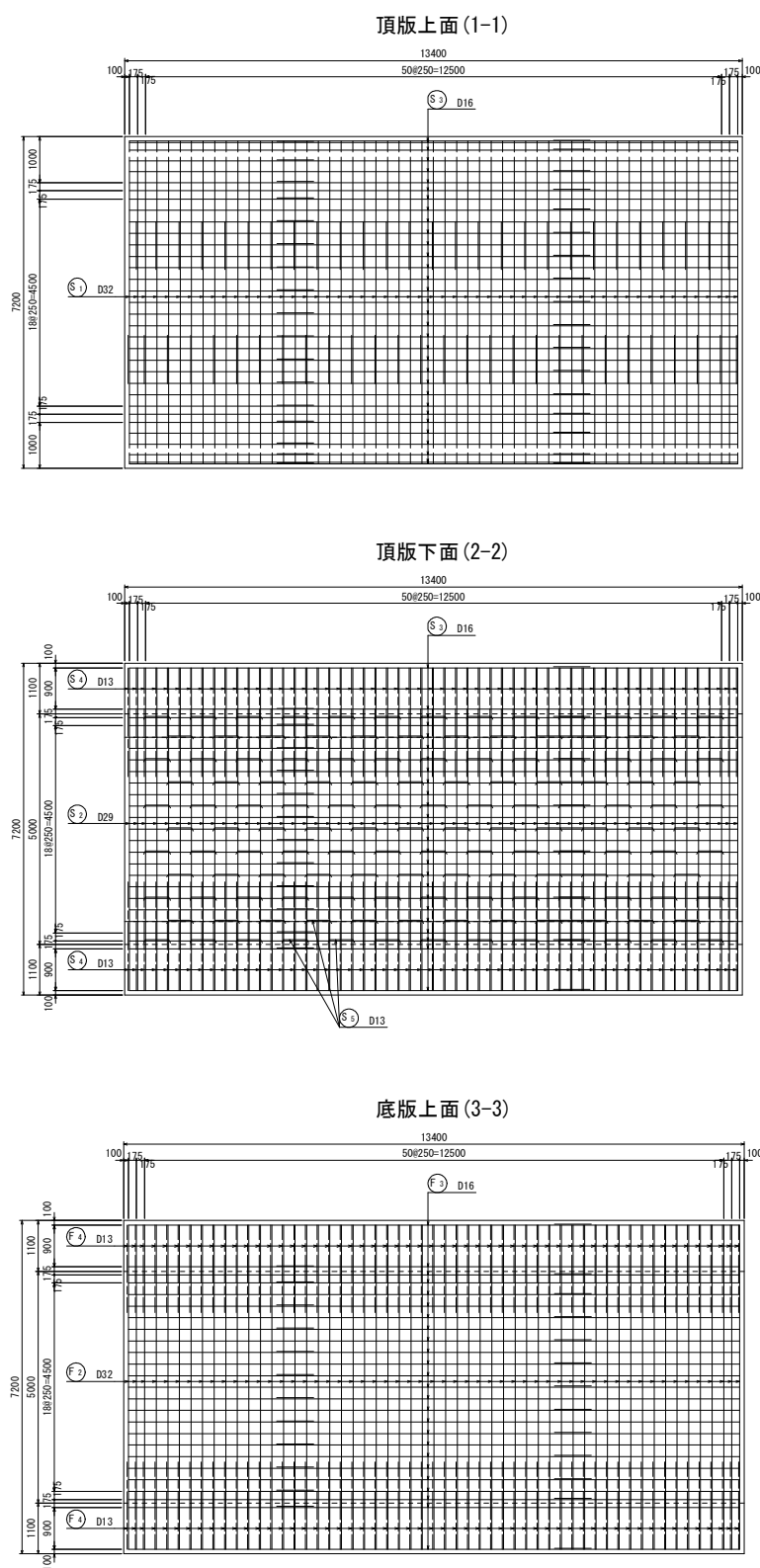


図 4.1.2 ボックスカルバート配筋図(その1)

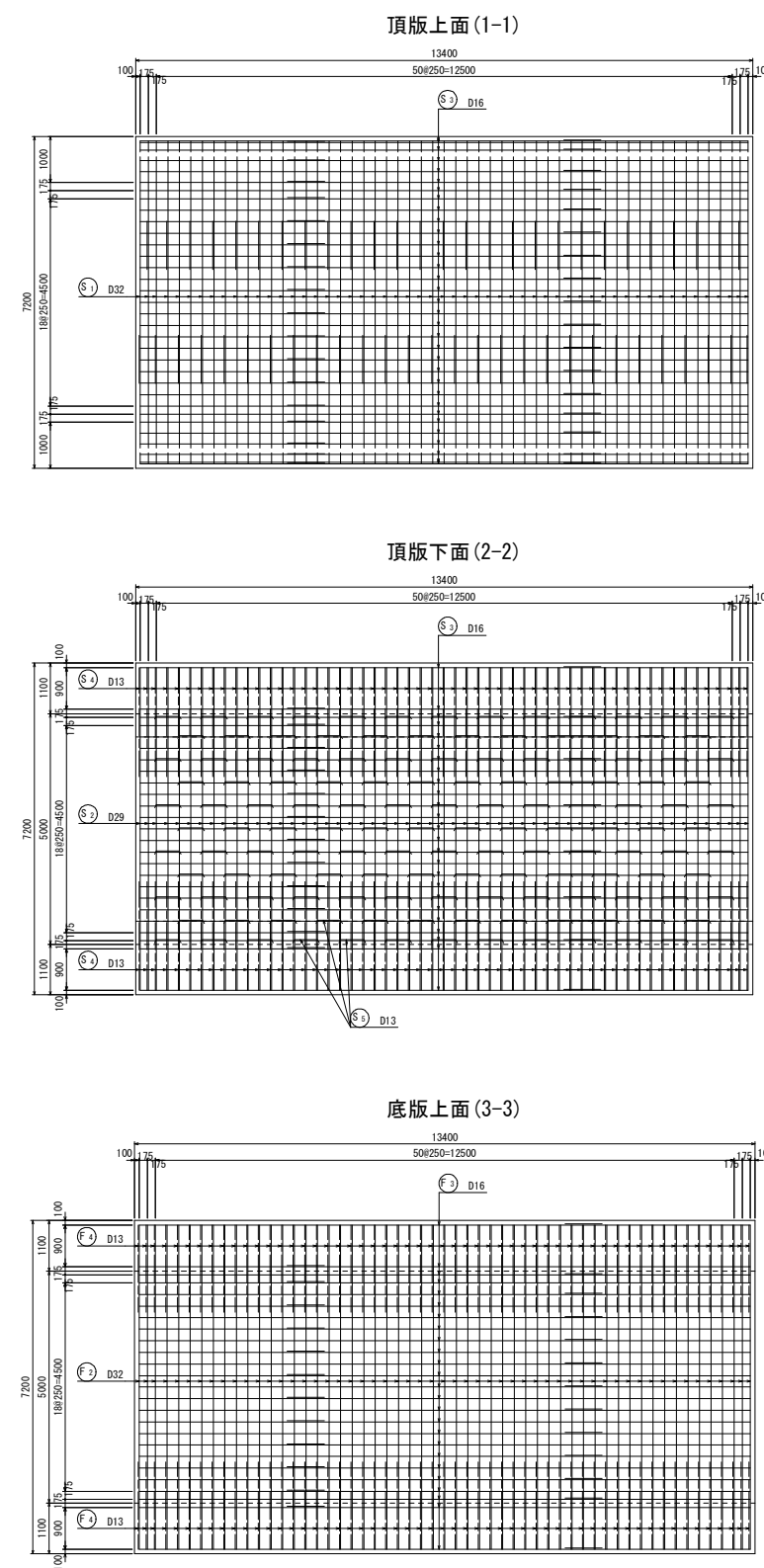


図 4.1.2 ボックスカルバート配筋図(その1)

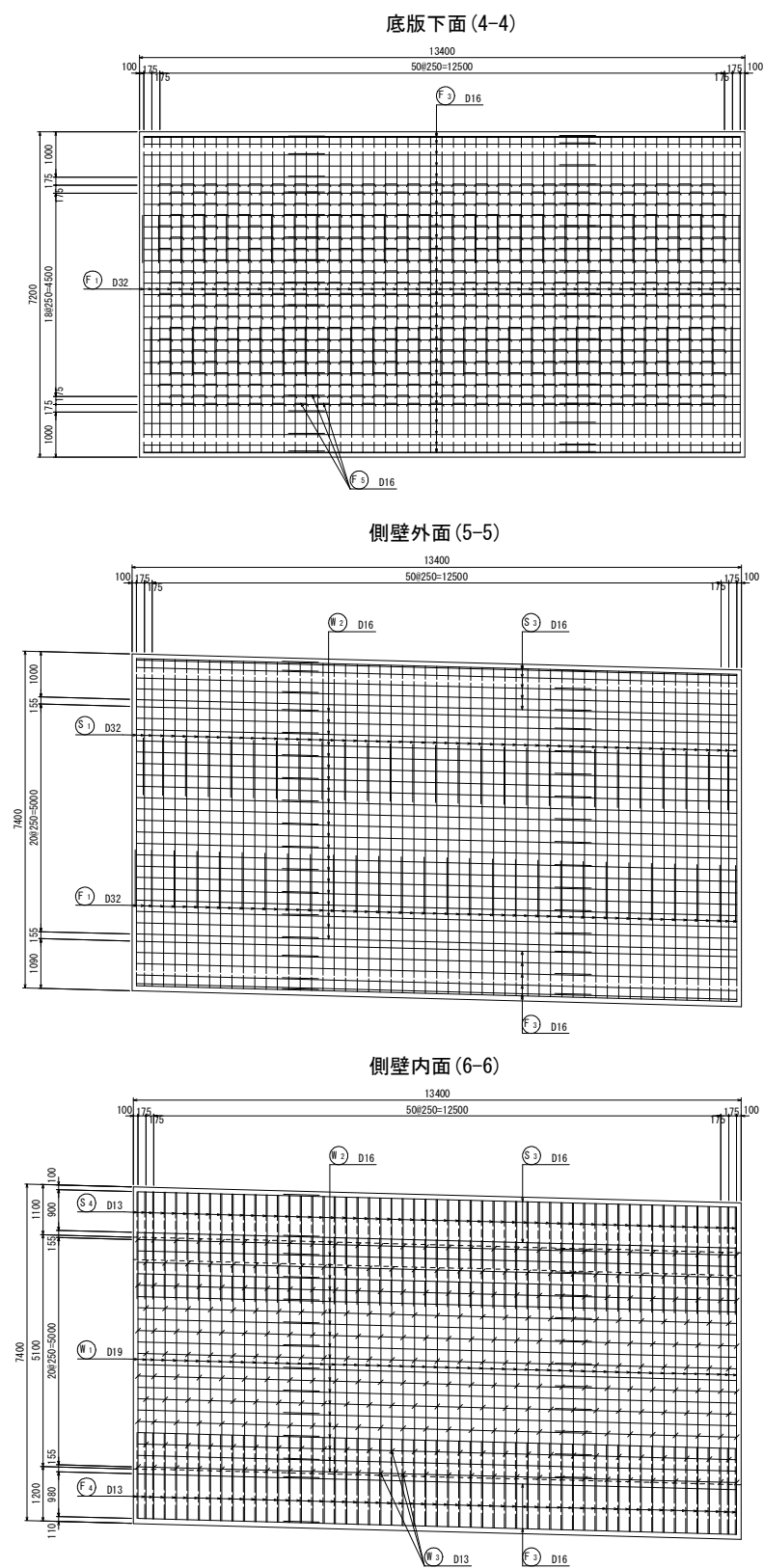
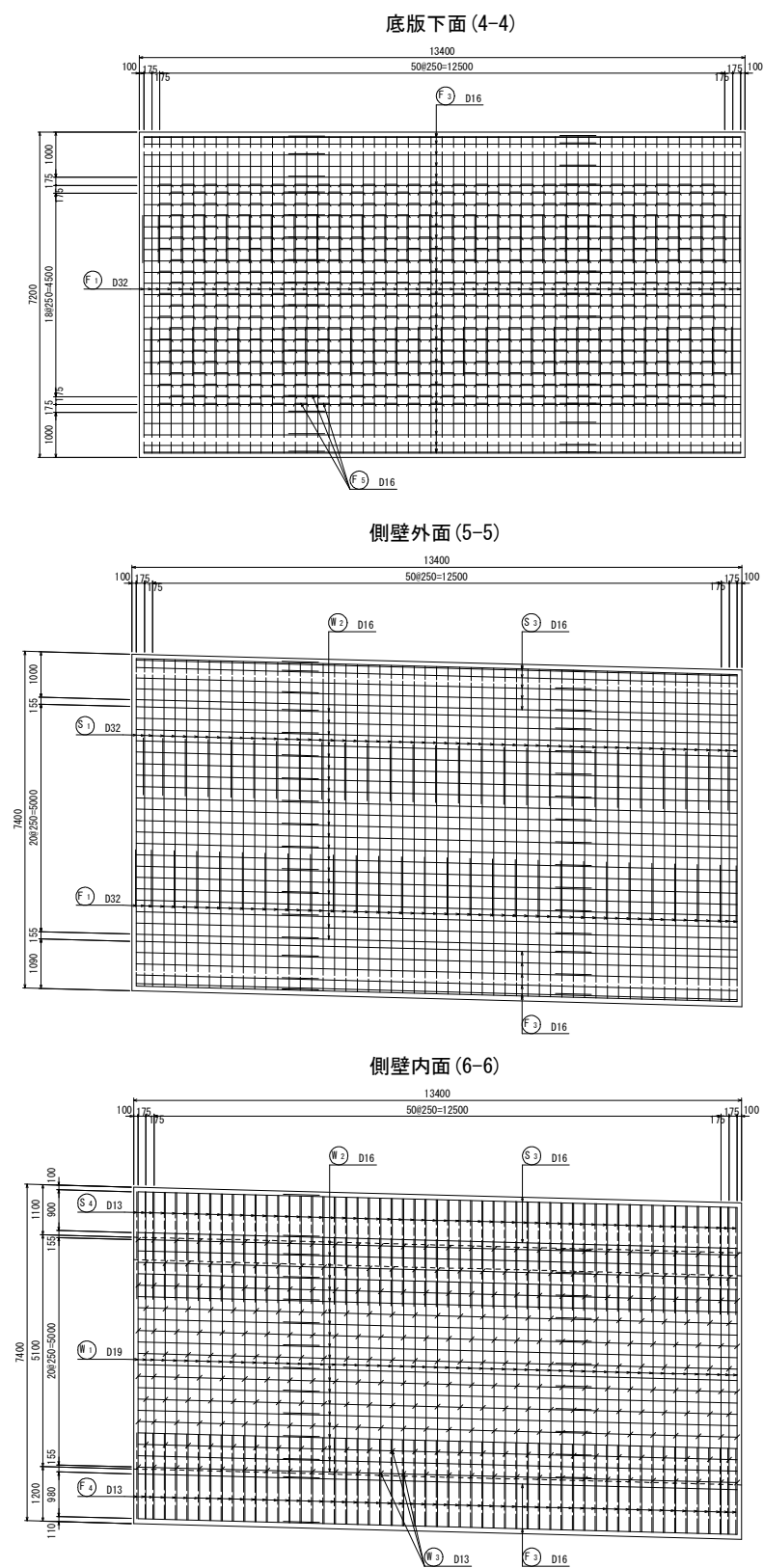


図 4.1.3 ボックスカルバート配筋図(その2)

図 4.1.3 ボックスカルバート配筋図(その2)

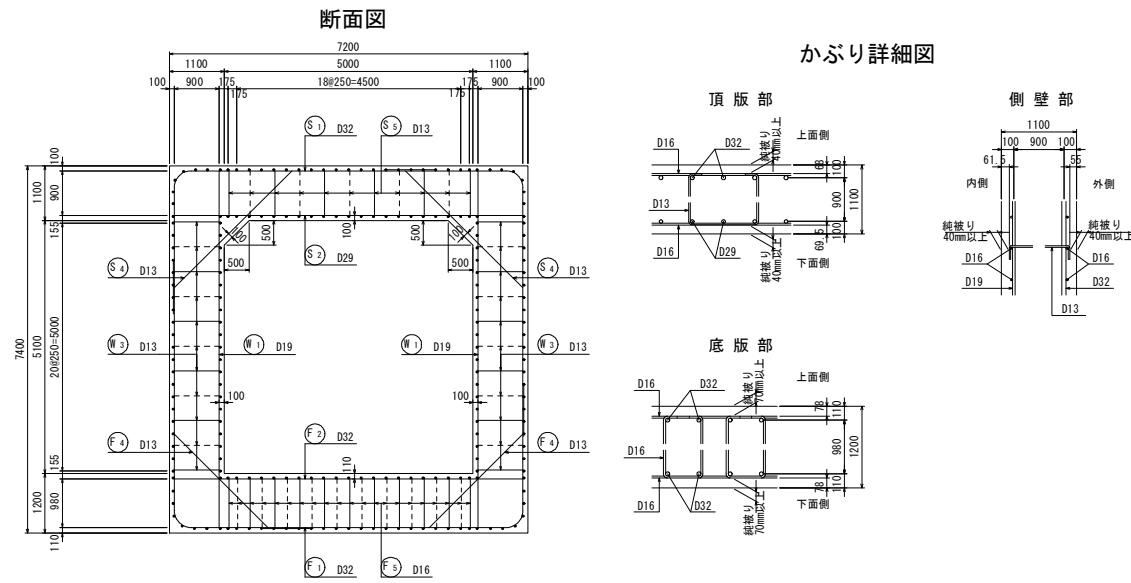


図 4.1.4 ボックスカルバート配筋図 (その 3)

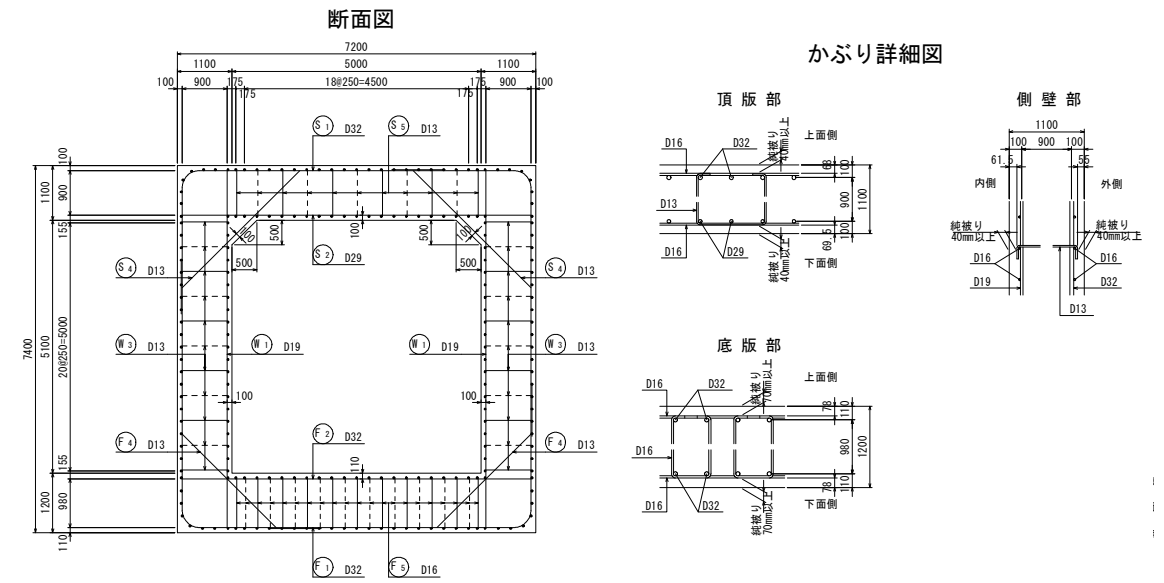


図 4.1.4 ボックスカルバート配筋図 (その 3)

4.2 構造物の設計耐用期間と要求性能

本事例構造物はカルバートであり、求められる設計耐用期間および要求性能は、表 4.2.1 に示す通りである。

4.2 構造物の設計耐用期間と要求性能

本事例構造物はカルバートであり、求められる設計耐用期間および要求性能は、表 4.2.1 に示す通りである。

表 4.2.1 鉄筋コンクリートカルバートの設計耐用期間と要求性能の目安

工種 部材	設計 耐用 期間 (年)	安全性				使用性		耐久性					ひび 割れ 抵抗 性	第三 者影 響度 に 関 する 性能	美 観・ 景 観
		耐 荷 性能	耐 震 性能	耐 疲 労 性能	耐 衝 撃 性能	使 用 性 の 構 造 物 の 機 能 性	中 性 化	塩 害	アル 骨 反 応	凍 害	化学 的 侵 食				
鉄筋コンクリート カルバート 本体	50	○	○			○		○	○	○	○	○	○	○	○

表 4.2.1 鉄筋コンクリートカルバートの設計耐用期間と要求性能の目安

工種 部材	設計 耐用 期間 (年)	安全性				使用性		耐久性					ひび 割れ 抵抗 性	第三 者影 響度 に 関 する 性能	美 観・ 景 観
		耐 荷 性能	耐 震 性能	耐 疲 労 性能	耐 衝 撃 性能	使 用 性 の 構 造 物 の 機 能 性	中 性 化	塩 害	アル 骨 反 応	凍 害	化学 的 侵 食				
鉄筋コンクリート カルバート 本体	50	○	○			○		○	○	○	○	○	○	○	○

4.3 安全性の照査

耐荷性能、耐震性能に関する照査については、「道路土工 カルバート工指針/日本道路協会」「土木構造物設計マニュアル(案)-土工構造物・橋梁編-/建設省」、「土木工事設計要領/九州地方整備局」の基準を満足するように部材設計を実施することで、性能は満足するものとして照査にかえる。

4.3 安全性の照査

耐荷性能、耐震性能に関する照査については、「道路土工 カルバート工指針/日本道路協会」「土木構造物設計マニュアル(案)-土工構造物・橋梁編-/建設省」、「土木工事設計要領/九州地方整備局」の基準を満足するように部材設計を実施することで、性能は満足するものとして照査にかえる。

4.4 使用性の照査

使用性に関する照査については、指針(案)では、「現在、道路橋示方書や国土交通省の各種指針類では、一般に許容応力度設計法で設計されているため、その場合には使用性に対する照査は省略してもよいものとする」[指針(案)2.2.3]としている。よってここでは照査を省略する。

4.5 耐久性の照査

対象構造物は、周面が埋め戻されるため中性化の影響は構造物の外側よりも内空面の方が大きくなることが予測される。したがって、中性化の照査は、内空面側で行う。また、当該構造物は、塩害に対しては影響を受けない地域に建設されるため塩害に対する照査は省略するが、アルカリ骨材反応に対する照査、化学的侵食に対する照査は行うこととする。

対象構造物におけるそれぞれの部位の内空面の最小かぶりは表 4.5.1 に示す。
 なお、設計段階では、使用するコンクリートの配合は未定なため、近隣地区における同種構造物に用いられたコンクリートの配合を参考にするなどして仮定する必要がある、ここでは、水セメント比 53%、使用セメントを高炉セメント B 種(高炉スラグ混入量 45%)とした。

表 4.5.1 ボックスカルバート内空面のかぶり

部材	底版部	側壁部	頂版部
内空面のかぶり (mm)	78	61.5	69.5

(1) 中性化に対する照査
 中性化に対する照査は、設計耐用年数に応じた中性化深さの設計値 y_d の鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。
 以下に照査の具体例を示す。ただし、詳細な計算手法等については照査例①と同様であるため、ここでは、各項目の計算結果のみを示す。

○中性化深さの算出【 y_d 】

【I】有効水結合材比の算出【 W/B 】

(式 1.5.1) より、
 $W/B = W / (W/0.53 \times 0.55 + 0.7 \times W/0.53 \times 0.45) = 0.613$

4.4 使用性の照査

使用性に関する照査については、指針(案)では、「現在、道路橋示方書や国土交通省の各種指針類では、一般に許容応力度設計法で設計されているため、その場合には使用性に対する照査は省略してもよいものとする」[指針(案)2.2.3]としている。よってここでは照査を省略する。

4.5 耐久性の照査

対象構造物は、周面が埋め戻されるため中性化の影響は構造物の外側よりも内空面の方が大きくなることが予測される。したがって、中性化の照査は、内空面側で行う。また、当該構造物は、塩害に対しては影響を受けない地域に建設されるため塩害に対する照査は省略するが、アルカリ骨材反応に対する照査、化学的侵食に対する照査は行うこととする。

対象構造物におけるそれぞれの部位の内空面の最小かぶりは表 4.5.1 に示す。
 なお、設計段階では、使用するコンクリートの配合は未定なため、近隣地区における同種構造物に用いられたコンクリートの配合を参考にするなどして仮定する必要がある、ここでは、水セメント比 53%、使用セメントを高炉セメント B 種(高炉スラグ混入量 45%)とした。

表 4.5.1 ボックスカルバート内空面のかぶり

部材	底版部	側壁部	頂版部
内空面のかぶり (mm)	78	61.5	69.5

(1) 中性化に対する照査
 中性化に対する照査は、設計耐用年数に応じた中性化深さの設計値 y_d の鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。
 以下に照査の具体例を示す。ただし、詳細な計算手法等については照査例①と同様であるため、ここでは、各項目の計算結果のみを示す。

○中性化深さの算出【 y_d 】

【I】有効水結合材比の算出【 W/B 】

(式 1.5.1) より、
 $W/B = W / (W/0.53 \times 0.55 + 0.7 \times W/0.53 \times 0.45) = 0.613$

[Ⅱ] 中性化速度係数の予測値算出【 a_p 】

(式 1.5.2) より

$$a_p = -3.57 + 0.9 \times 0.613 = \underline{1.947} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$$

[Ⅲ] 中性化速度係数の特性値算出【 a_k 】

(式 1.5.3) より,

$$a_k = 1.0 \times 1.947 = \underline{1.947} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$$

[Ⅳ] 中性化速度係数の設計値算出【 a_d 】

(式 1.5.4) より,

$$a_d = 1.947 \times 1.6 \times 1.0 = \underline{3.115} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{側壁, 頂版部}$$

$$a_d = 1.947 \times 1.0 \times 1.3 = \underline{2.531} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{底版部}$$

[Ⅴ] 中性化深さの設計値算出【 y_d 】

耐用年数を 50 年とし, (式 1.5.5) より,

$$y_d = 1.15 \times 3.115 \times \sqrt{50} = 25.33 \div 26 \quad (\text{mm}) \cdots \text{側壁, 頂版部}$$

$$y_d = 1.15 \times 2.531 \times \sqrt{50} = 20.58 \div 21 \quad (\text{mm}) \cdots \text{底版部}$$

○限界深さの算出【 y_{lim} 】

(式 1.5.6) により,

【底版部】 $y_{lim} = 78 - 0 - 10 = \underline{68} \quad (\text{mm})$

【側壁部】 $y_{lim} = 61.5 - 0 - 10 = \underline{51.5} \quad (\text{mm})$

【頂版部】 $y_{lim} = 69.5 - 0 - 10 = \underline{59.5} \quad (\text{mm})$

○中性化深さ【 y_d 】と限界深さ【 y_{lim} 】の対比

(式 1.5.7) により,

【側壁部】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} = 1.0 \times \frac{26}{51.5} = 0.50 \leq 1.0 \quad (\text{OK})$

【頂版部】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} = 1.0 \times \frac{26}{59.5} = 0.44 \leq 1.0 \quad (\text{OK})$

[Ⅱ] 中性化速度係数の特性値算出【 a_k 】

(式 1.5.2) より

$$a_k = -3.57 + 9.0 \times 0.613 = \underline{1.947} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}})$$

[Ⅲ] 中性化速度係数の設計値算出【 a_d 】

(式 1.5.3) より,

$$a_d = 1.947 \times 1.6 \times 1.0 = \underline{3.115} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{側壁, 頂版部}$$

$$a_d = 1.947 \times 1.0 \times 1.0 = \underline{1.947} \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}}) \cdots \text{底版部}$$

[Ⅳ] 中性化深さの設計値算出【 y_d 】

耐用年数を 50 年とし, (式 1.5.4) より,

$$y_d = 1.15 \times 3.115 \times \sqrt{50} = 25.33 \div 26 \quad (\text{mm}) \cdots \text{側壁, 頂版部}$$

$$y_d = 1.15 \times 1.947 \times \sqrt{50} = 15.83 \div 16 \quad (\text{mm}) \cdots \text{底版部}$$

○限界深さの算出【 y_{lim} 】

(式 1.5.5) により,

【底版部】 $y_{lim} = 78 - 0 - 10 = \underline{68} \quad (\text{mm})$

【側壁部】 $y_{lim} = 61.5 - 0 - 10 = \underline{51.5} \quad (\text{mm})$

【頂版部】 $y_{lim} = 69.5 - 0 - 10 = \underline{59.5} \quad (\text{mm})$

○中性化深さ【 y_d 】と限界深さ【 y_{lim} 】の対比

(式 1.5.6) により,

【側壁部】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} = 1.0 \times \frac{26}{51.5} = 0.50 \leq 1.0 \quad (\text{OK})$

【頂版部】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} = 1.0 \times \frac{26}{59.5} = 0.44 \leq 1.0 \quad (\text{OK})$

【底版部】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} = 1.0 \times \frac{16}{68.0} = 0.24 \leq 1.0 \quad (\text{OK})$

【底版部】 $\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} = 1.0 \times \frac{21}{68} = 0.31 \leq 1.0$ (OK)

本事例では、中性化に伴う鋼材腐食に対しては、全ての部材において耐用年数 50 年を満足していることが確認された。

(2) 塩害に対する照査

先に示した通り、当該構造物は塩害の影響を受けない地域に建設されるため照査を省略する。

(3) アルカリ骨材反応に対する照査

当該構造物建設予定地周辺の既設構造物調査を行ったところ、アルカリ骨材反応による劣化はみられなかった。

(4) 凍害に対する照査

当該構造物建設予定地は、九州地区の平地である(山間地ではない)ため、照査の対象外である。

なお、指針(案)では、「九州地区においては、一部の山間地を除いて凍結するおそれがないので、凍害に対する照査を省略することができる」[指針(案)2.2.4]としている。

(5) 化学的侵食に対する照査

当該構造物建設予定地は、温泉地域および旧産炭地域等ではなく、酸性劣化や硫酸塩劣化等は想定されない。

本事例では、中性化に伴う鋼材腐食に対しては、全ての部材において耐用年数 50 年を満足していることが確認された。

(2) 塩害に対する照査

先に示した通り、当該構造物は塩害の影響を受けない地域に建設されるため照査を省略する。

(3) アルカリ骨材反応に対する照査

当該構造物建設予定地周辺の既設構造物調査を行ったところ、アルカリ骨材反応による劣化はみられなかった。

(4) 凍害に対する照査

当該構造物建設予定地は、九州地区の平地である(山間地ではない)ため、照査の対象外である。

なお、指針(案)では、「九州地区においては、一部の山間地を除いて凍結するおそれがないので、凍害に対する照査を省略することができる」[指針(案)2.2.4]としている。

(5) 化学的侵食に対する照査

当該構造物建設予定地は、温泉地域および旧産炭地域等ではなく、酸性劣化や硫酸塩劣化等は想定されない。