

コンクリート工学

耐久性

- ・中性化
- ・塩害
- ・凍害



中性化

1. 中性化とは

中性化：
セメント硬化体のアルカリ性が低下する現象

2. 中性化による劣化事例



中性化による鉄筋腐食

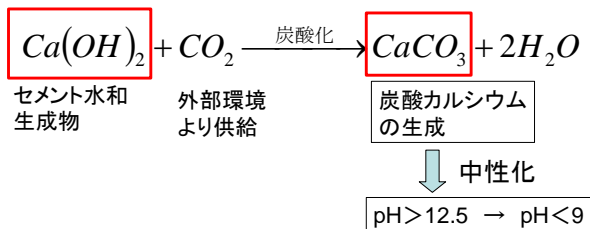
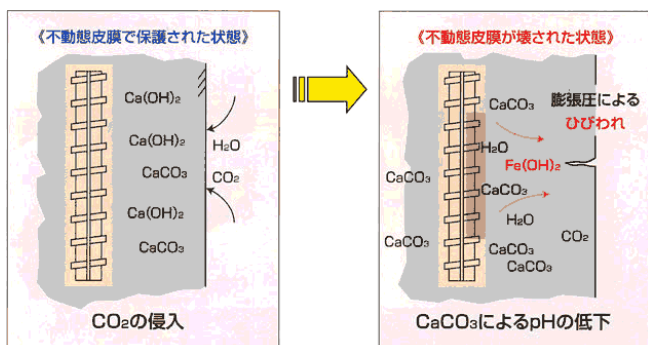


建設後10年
かぶり20mm

中性化による鉄筋腐食!?



3. 中性化による劣化過程(メカニズム)



4. 硬化コンクリートの中性化試験

フェノールフタレイン溶液(1gを無水アルコール65cm³に溶かして水を加え100cm³とする)をコンクリート面に噴霧し、赤紫色に着色しない部分を測定する。

コンクリートをはつてフェノールフタレイン溶液を吹き付け、中性化深さを判定する。赤紫色に見える部分は、セメント中の鉄分が酸化されてきた水酸化鉄の層で、コンクリートがpH4以下になっていることを示す。水酸化鉄は、セメント中の鉄分が酸化されて生成する



赤 → 中性化していない

コア抜き

コンクリートの中性化の状況や塩分量、アルカリ骨材反応を調べる際は、コンクリートからコアを採取して試験するのが一般的だ。非破壊検査に比べて正確に劣化状況がわかるので、非破壊検査の結果で問題がありそうな部分だけコア抜きをして、詳細な試験を実施することが多い。圧縮強度を正確に測定する際にも必要だ。



上: 構内のコア抜きをしている様子
左: コンクリートの中性化の状況調べるために、採取したコアをフェノールフタレイン溶液に浸した後の状況。色が変わっていない表面(左側)から10cm程度の深さまで中性化が進行している

中性化による腐食

・腐食は中性化深さが鋼材位置に到達する以前に開始する
・腐食開始時期はかぶり厚と中性化深さの差である中性化残りにより整理されることが多い。

・中性化残りが10mm以下になると腐食している事例が多い。



腐食開始の判定は、中性化残り10mmとする。

塩化物が含まれている場合
腐食開始の判定は、中性化残り20mmとする。

5. 中性化に対する補修・補強

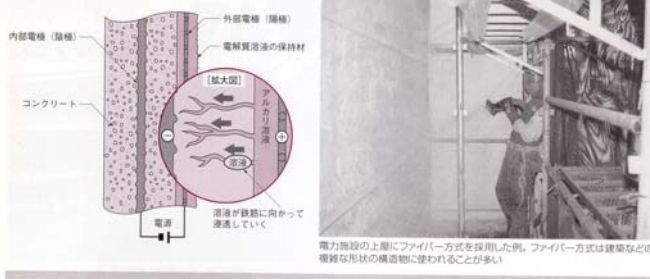
●コンクリート構造物の劣化メカニズムと補修工法

劣化メカニズム	補修方針	適用可能な補修工法	補修水準を満たすために考慮すべき要因	
塩害	・浸入したCl ⁻ の除去 ・劣化したコンクリートの除去 ・補修後のCl ⁻ 、水分、酸素の浸入抑制	断面修復工法 表面保護工法	・Cl ⁻ 浸入部除去の程度 ・鉄筋の防錆処理 ・断面修復材の材質 ・表面保護材の材質と厚さ	
	・脱塩 ・補修後のCl ⁻ 、水分、酸素の浸入抑制	脱塩工法	・PC鋼材の水素ぜい化 ・脱塩効果の確認	
	・鉄筋の電位制御	電気防食	・陽極材の品質、分極量	
アルカリ骨材反応	・水分の供給抑制 ・内部水分の散逸促進 ・アルカリ分の供給抑制 ・劣化したコンクリートの除去、アルカリ分の除去	ひび割れ注入工法 表面保護工法	・ひび割れ注入材の材質と施工法 ・表面保護材の材質と厚さ	
	凍害	・劣化したコンクリートの除去 ・コンクリートの凍結融解抵抗性の向上 ・補修後の水分浸入抑制	断面修復工法 ひび割れ注入工法 表面保護工法	・断面修復材の凍結融解抵抗性 ・ひび割れ注入材の材質と施工法 ・表面保護材の材質と厚さ
		・中性化したコンクリートの除去 ・アルカリ分の付与 ・補修後のCO ₂ 、水分の浸入抑制	断面修復工法 表面保護工法 再アルカリ化工法*	・中性化部分の除去の程度 ・鉄筋の防錆処理 ・表面保護材の材質と厚さ
化学的 侵食	・劣化したコンクリートの除去 ・有害化学物質の浸入抑制	断面修復工法 表面保護工法	・表面保護材の材質と厚さ ・劣化コンクリートの除去の程度	

(注)表中の文字や表記の方法は、資料として用いた2001年制定コンクリート標準示方書・維持管理編に従っている

再アルカリ化工法

●再アルカリ化工法の概念図



塩害

1. 塩害とは

塩害:

コンクリート中の鋼材の腐食が
塩化物イオンの存在により促進される
現象

鋼材の腐食により、鋼材に沿うひび割れを生じるとともに、著しい場合は、鋼材伸び能力の低下、鋼材断面積減少による耐荷力の低下等につながる。

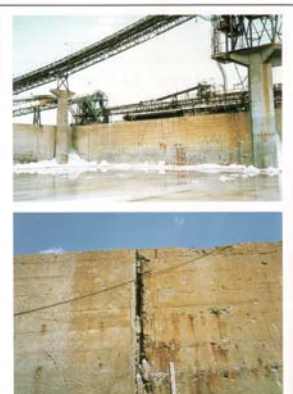
2. 塩害の劣化事例

損傷・劣化原因 酸・塩類の作用(塩分)

構造物・部位 工場の貯塩槽

構造物の立地条件 内陸部

工場の貯塩槽の壁が塩分の浸入により鉄筋腐食が生じた。



損傷・劣化原因	塩害
構造物・部位	栈橋
構造物の立地条件	海岸

梁スラブ構造の栈橋で、梁の鉄筋が腐食して膨張し、ひび割れが生じた。

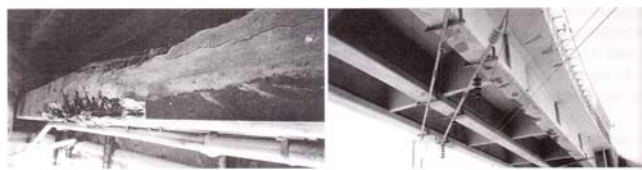


損傷・劣化原因	塩害
構造物・部位	栈橋
構造物の立地条件	海岸

栈橋に塩化物が進入し、梁鉄筋の側面に沿って鉄筋腐食によるひび割れ、ならびに、梁底面のかぶり部分の剥離が生じた。

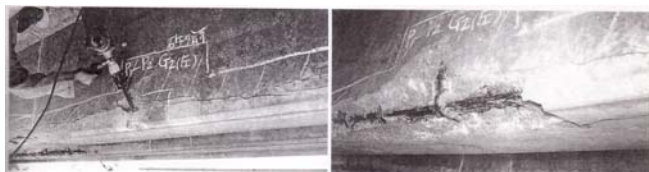


塩害で劣化した橋桁
かぶりコンクリートが剥落し、鉄筋が露出している。



左: 塩害で著しく劣化したコンクリート製の桁鉄筋が腐食し、耐荷性能も低下していると判定できる。

右: かぶりコンクリートの剥落が随所に見られるが、耐荷性能には影響がでない。



左: 比較的軽微なひび割れに見える箇所をはつてみると、概観からは内部の損傷状況を判断するのは難しい。

右: 左の桁をはつた後の状況。鋼材の腐食がかなり進行している。



左: 鉄筋の腐食により、かぶりコンクリートが剥落している。

右: 腐食した鉄筋に沿って大きなひび割れが生じている。



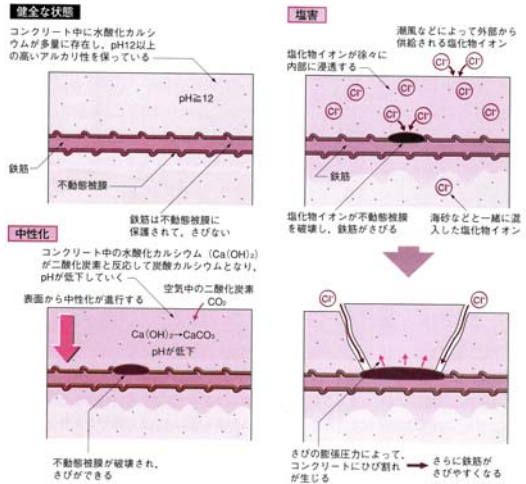
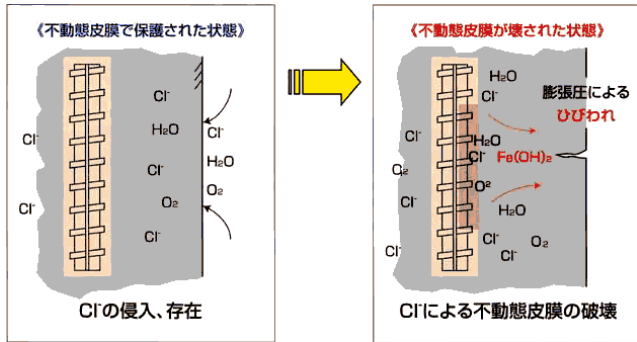
塩害で劣化した栈橋の床版
かぶりコンクリートが剥落し、鉄筋が露出している。
床版は桁に比べてかぶりが小さい場合が多く、広い範囲で剥落しやすい。





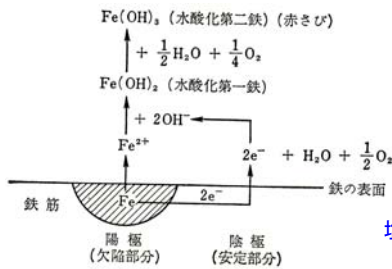
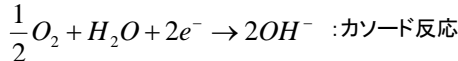
図 3.6 環境とコンクリートの劣化(1)

3.塩害の劣化過程(メカニズム)



鋼材の塩化物腐食

鋼材の腐食反応は、液相中で生じる。



塩化物イオンの役割
不動態被膜の破壊作用
腐食電流の流れやすさ

4.塩害に対する調査方法

硬化コンクリート中の塩分の分析方法 (JCI-SC4-1987)

全塩化物量、可溶性塩化物の定量化

- ①塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法
- ②クロム酸銀-吸光度法
- ③硝酸銀滴定法

- ①、②: 塩化物含有率0.001%以上の試料に適用
③: 塩化物含有率0.01%以上の試料に適用

5.塩害に対する補修・補強

自然電位法 — 鋼材の腐食状況を調べる

●自然電位法の測定イメージ

左: 自然電位法で鉄筋の腐食状態を調べているところ。右: 測定結果を表示する装置。鉄筋が一式で10万円程度から安く、判定基準が示されていることから、多くの実績がある。照合電極には飽和硫酸銅や飽和塩化銀などいくつかの種類が使われている。

電位測定値 E (mV vs CSE)	評価
-200 < E	90%以上の確率で腐食が生じていない
-350 < E ≤ -200	腐食状態は不確定
E ≤ -350	90%以上の確率で腐食が生じている

[注] 電位測定値の単位は、飽和硫酸銅電極基準

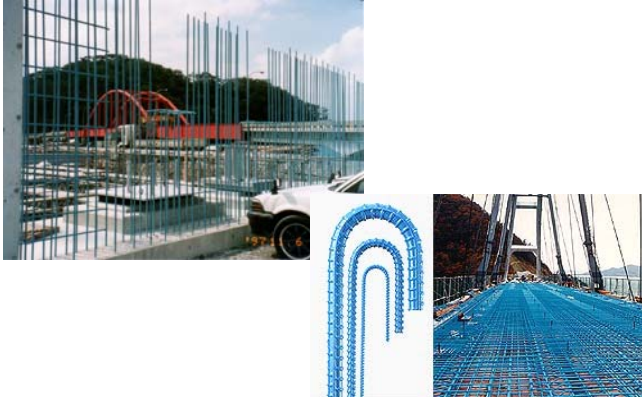
●コンクリート構造物の劣化メカニズムと補修工法

劣化メカニズム	補修方針	適用可能な補修工法	補修水準を満たすために考慮すべき要因
塩害	<ul style="list-style-type: none"> ・浸入したCl⁻の除去 ・劣化したコンクリートの除去 ・補修後のCl⁻、水分、酸素の浸入抑制 	<ul style="list-style-type: none"> 断面修復工法 表面保護工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Cl⁻浸入除去の程度 ・ 鉄筋の防錆処理 ・ 断面修復材の材質 ・ 表面保護材の材質と厚さ
アルカリ骨材反応	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水分の供給抑制 ・ 内部水分の散逸促進 ・ アルカリ分の供給抑制 ・ 劣化したコンクリートの除去、アルカリ分の除去 	<ul style="list-style-type: none"> ひび割れ注入工法 表面保護工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ひび割れ注入材の材質と施工法 ・ 表面保護材の材質と厚さ
凍害	<ul style="list-style-type: none"> ・ 劣化したコンクリートの除去 ・ コンクリートの凍結融解抵抗性の向上 ・ 補修後の水分浸入抑制 	<ul style="list-style-type: none"> 断面修復工法 表面保護工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 断面修復材の凍結融解抵抗性 ・ ひび割れ注入材の材質と施工法 ・ 表面保護材の材質と厚さ
中性化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中性化したコンクリートの除去 ・ アルカリ分の付与 ・ 補修後のCO₂、水分の浸入抑制 	<ul style="list-style-type: none"> 断面修復工法 再アルカリ工法* 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中性化部分の除去の程度 ・ 鉄筋の防錆処理 ・ 表面保護材の材質と厚さ
化学的腐食	<ul style="list-style-type: none"> ・ 劣化したコンクリートの除去 ・ 有害化学物質の浸入抑制 	<ul style="list-style-type: none"> 断面修復工法 表面保護工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表面保護材の材質と厚さ ・ 劣化コンクリートの除去の程度

[注] 表中の文字や表記の方法は、資料として用いた2001年制定コンクリート標準示方書・維持管理編に従っている

エポキシ樹脂塗装鉄筋

塗装厚: 200±50 μm(標準)

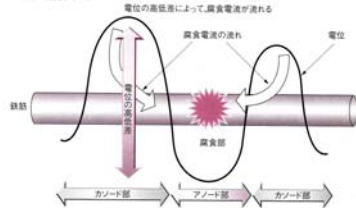


電気防食

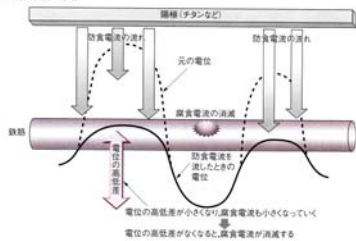
陽極防食 (Anode protection): 鋼材の電位を不動態領域におく
陰極防食 (Cathode protection): 鋼材の電位を不活性領域におく

コンクリート中に塩化物イオンが存在していても有効である。

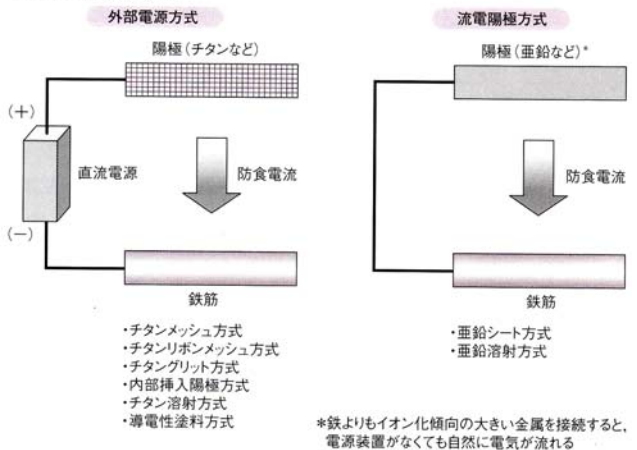
●鉄筋が腐食するメカニズム



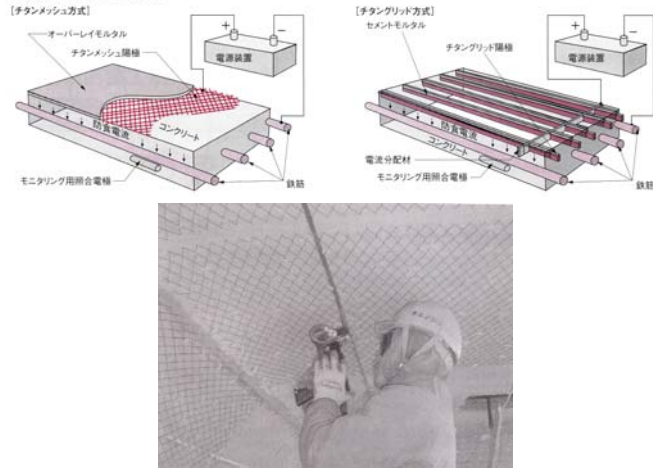
●電気防食の原理



●電気防食工法の分類



●電気防食工法のシステム構成の例



凍害

1. 凍害とは

凍害:

コンクリートに含まれている水分が凍結し、その際に生じる水圧がコンクリートの破壊をもたらす現象

2. 凍害の形態と事例

損傷・劣化原因	凍結融解作用
構造物・部位	ダム堰体下流面
損傷物の立地条件	山梨県

ダム堰体の非鉄流部に凍結融解作用による剝離が生じた。特に目地部分の被害が大い。



損傷・劣化原因	凍結融解作用
構造物・部位	道路機石
構造物の立地条件	山間部

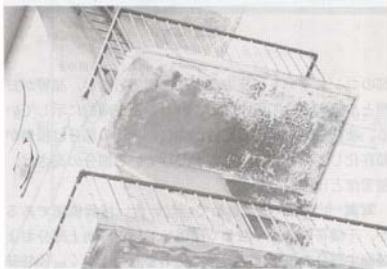
コンクリート二次製品の緑石が凍結融解作用により隅角部からスケーリングを起こしている。



上:凍害を受けた機石
右:工場製の道路機石に
生じた凍害の事例



2.1 ひび割れ



屋外の階段

写真-1

紋様ひび割れ:比較的広い面積に現れる。亀甲状
Dひび割れ :継ぎ目や端部あるいはすでに存在する
ひび割れに沿って現れる

2.2 スケーリング

コンクリート表面のセメントペースト、モルタルのはく離から始まり、粗骨材間のモルタル、粗骨材のはく離へと進行する。



建物の屋上

写真-2



写真-3

防波堤



写真-4

2.3 骨材の露出



写真-6

擁壁

2.4 ポップアウト



写真-8

コンクリートの表面の剥離の一種で、薄く皿状に表面のコンクリートが剥げ落ちることをいう。骨材の吸水膨張、吸水性の高い骨材の凍結融解、鉄筋の腐食膨張などが原因。

3. 凍害のメカニズム

コンクリートの凍害劣化の形態: **内部劣化**
スケーリング
ポップアウト



Powersの水圧説

T. C. Powers : A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, journal of American Concrete Institute, Vol.16, No.4, pp.245-272, 1945

- ・0℃以下の温度においてコンクリート中の水が凍結し、氷になる際に約**9%**の体積増が生じる。
- ・氷が生成した空隙中に体積膨張に見合うだけの空間がない場合には、空隙中の未凍結水が移動する。この水の移動にあたり、組織の緻密さ、移動する距離、移動速度に比例した圧力が発生し、この水圧によりコンクリートが破壊される。

4. 耐凍害性の評価

5.1 凍結融解試験による評価

(1) 急速凍結融解試験

- ・ASTM C 666
「Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing」
A法: 水中凍結水中融解試験
B法: 気中凍結水中融解試験
- ・JIS A 6204 「コンクリート用化学混和剤」付属書2
- ・JIS A 1148 「コンクリートの凍結融解試験方法」

- ・JIS A 6204 「コンクリート用化学混和剤」付属書2
「コンクリートの凍結融解試験方法」
供試体 : 100×100×400mm
(材齢14日、20℃水中養生)
凍結時温度: -18℃(供試体中心部で)
融解時温度: +5℃(供試体中心部で)
サイクル : 200サイクル(1サイクル3~4時間)
相対動弾性係数が60%以下になるまで
評価 : 相対動弾性係数 → 組織の緩み
質量減少率 → スケーリング
- ・JIS A 1148 「コンクリートの凍結融解試験方法」
JIS A 6204とほぼ同じ
サイクル : 300サイクル(1サイクル3~4時間)

(2) 空気量

空気量**4%**以下

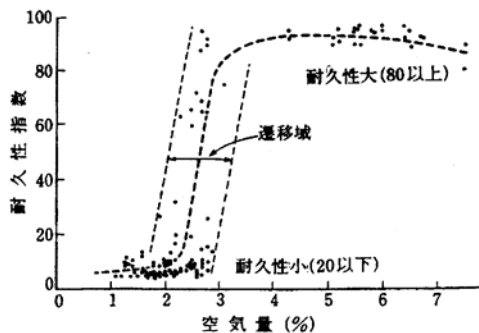


図-6 空気量が耐凍害性に及ぼす影響

6. 補修

- ・凍害による損傷は、直接雨水に暴露されている構造部材が多い。
- ・凍結融解によって損傷を受けたコンクリート構造物は、耐荷力の減少にすぐに結びつくことは少ない。
- ・損傷の進行を防止するには、構造物への水分の供給を断つことが重要

防水工で保護

●コンクリート構造物の劣化メカニズムと補修工法

劣化メカニズム	補修方針	適用可能な補修工法	補修水準を満たすために考慮すべき要因
塩害	・浸入したCl ⁻ の除去 ・劣化したコンクリートの除去 ・補修後のCl ⁻ 、水分、酸素の浸入抑制	断面修復工法 表面保護工法	・Cl ⁻ 浸入部の除去の程度 ・鉄筋の防錆処理 ・断面修復材の材質 ・表面保護材の材質と厚さ
	・脱塩 ・補修後のCl ⁻ 、水分、酸素の浸入抑制 ・鉄筋の電位制御	脱塩工法 電気防食	・PC鋼材の水蒸げい化 ・脱塩効果の確認 ・陽極材の品質、分極量
アルカリ骨材反応	・水分の供給抑制 ・内部水分の散逸促進 ・アルカリ分の供給抑制 ・劣化したコンクリートの除去、アルカリ分の除去	ひび割れ注入工法 表面保護工法	・ひび割れ注入材の材質と施工法 ・表面保護材の材質と厚さ
凍害	・劣化したコンクリートの除去 ・コンクリートの凍結融解抵抗性の向上 ・補修後の水分浸入抑制	断面修復工法 ひび割れ注入工法 表面保護工法	・断面修復材の凍結融解抵抗性 ・ひび割れ注入材の材質と施工法 ・表面保護材の材質と厚さ
中性化	・中性化したコンクリートの除去 ・アルカリ分の付与 ・補修後のCO ₂ 、水分の浸入抑制	断面修復工法 表面保護工法 再アルカリ化工法*	・中性化部分の除去の程度 ・鉄筋の防錆処理 ・表面保護材の材質と厚さ
化学的侵食	・劣化したコンクリートの除去 ・有害化学物質の浸入抑制	断面修復工法 表面保護工法	・表面保護材の材質と厚さ ・劣化コンクリートの除去の程度

[注]表中の文字や表記の方法は、資料として用いた2001年制定コンクリート標準示方書・維持管理編に準拠している

