第５章　環境耐久性

床版などのコンクリート構造物は、道路構造物の中でも補修が困難であること、破損の影響が大きいこともあり、その重要度は非常に高いものといえる。

従来、コンクリート構造物は耐久性が高く、維持管理に手間のかからない半永久的なものであると考えられてきた。事実、その寿命は非常に長いと言えるが、鉄筋コンクリートの耐久性はコンクリートが健全であり、鉄筋を錆から十分に保護している状態にあって初めて保たれるものである。床版などのコンクリート構造物は、様々な気象作用・外的作用・品質・施工等により「塩害」「中性化」「凍結融解」等の変化や劣化を起こしている。

近年、コンクリート構造物の劣化に関する報道が盛んに行われ、社会問題にもなっている。鉄筋コンクリート床版の調査，点検を行ったときにも、張出し部、その他において材料劣化に起因する損傷が見受けられることも事実である。このように、コンクリート床版の耐久性を議論する上で、材料劣化の問題は欠かせない項目であるが、橋梁工学に携わる者にとって、構造力学などの物理学的分野は得意であっても工業化学や電気化学といった分野は苦手としがちである。そこで、本章では橋梁工学や、構造力学とは趣きを異にし、コンクリートの材料劣化のメカニズム等に関する事項について整理する。

尚、環境面からの近年の話題としては、酸性雨犯人説が強いとされる、床版下面等に発生する白色のつらら等の問題もあるが、本章では割愛する。

5.1　塩　害

5.1.1　塩害とは

鉄筋コンクリート構造物の塩害とは、コンクリート中に外部から侵入したり、材料中に含まれていた塩化物イオンによって鉄筋が腐食し、錆の発生によってコンクリートにひび割れや剥離が生じ、最終的には構造部材としての耐力を低下させる現象と考えられている。

5.1.2　塩害のメカニズム

(1) 鋼材（鉄筋）の腐食

一般に鋼材（鉄筋）が腐食する場合、その反応に水が関与している腐食を湿食と呼び、関与していないものを乾食と呼ぶが、コンクリート中での鋼材（鉄筋）の腐食は湿食であると考えられている。

湿食は電気化学反応の一種であって、コンクリート中においては次式で表すことができる。

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \quad \text{アノード反応} \quad (5.1.1)$$

$$1/2O_2 + H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-} \quad \text{カソード反応} \quad (5.1.2)$$

アノード反応とは、電子２個を母材中に残して鉄がイオンとなって溶出することが基本であり、鋼材（鉄筋）が腐ることそのものを意味する。このアノード反応によって生じた電子を消費するのがカソード反応である。これらの反応が同時に生じるのが腐食反応であり、次式で表すことができる。

$$Fe + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (5.1.3)$$

(2) コンクリート中での塩化物腐食

コンクリート中の細孔溶液は pH12～13 と強アルカリ性であり、これと接する鉄筋表面には不働態皮膜と呼ばれる薄く緻密な水和酸化物形成されており、酸素や水といった鋼材の錆に必要な物質との接触を防いでいる。この不働態皮膜はコンクリートが中性化するまで保持され鉄筋の発錆を防止している。しかし、コンクリート中に塩化物イオンが存在した場合には、塩化物イオンが鉄筋の発錆を防いでいた不働態皮膜を破壊してしまうためコンクリートが中性化していなくとも、錆が発生する可能性がある。コンクリート中の鋼材に腐食が生じるとまず水酸化第一鉄（$Fe(OH)_2$）が生成され、これらはさらに酸化されFe_2O_3(赤錆)、Fe_3O_4(黒錆)等となり、鋼材表面に錆の層を形成する。水酸化第一鉄で 3.8 倍、赤錆では 2.2 倍、もとの体積より大きくなり、錆の生成によりコンクリートには膨張圧が生じることとなり、ひび割れが生じる。

(3) マクロセル腐食

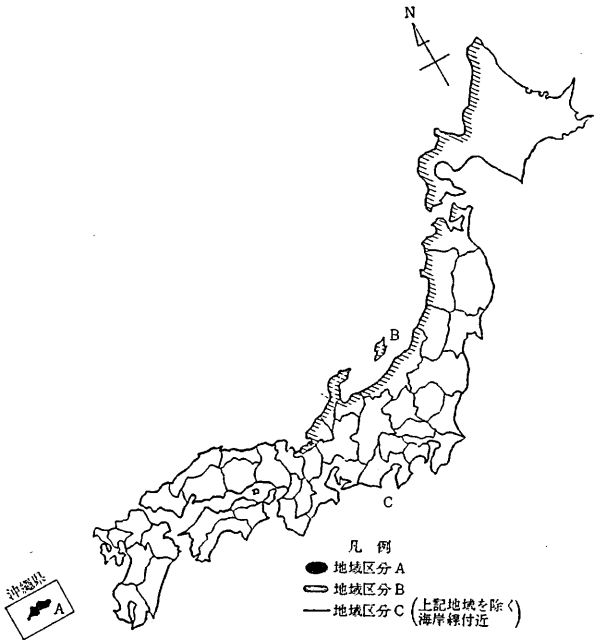
コンクリート中の塩化物イオンの分布は均一ではないため、塩害の場合には不働態皮膜の破壊が局部的に生じることが多い。鉄の腐食は鉄と酸素及び水の間の電子の授受による反応であり、電子の移動に伴う一種の電気回路（セル）が形成される。塩化物イオンにより局所的に不働態が破壊された部分を中心としてコンクリート中に比較的大きなセルが形成された腐食形態はマクロセル腐食と呼ばれ、この場合の鋼材腐食は不働態が破壊された部分に集中し、早期に劣化が生じる可能性がある。

このように、コンクリートの塩害は塩化物イオンの存在により鉄筋に錆が発生することにより鉄筋コンクリート構造物の耐力低下につながることが問題となる。

5.1.3　塩害の地域区分

一般に海から飛来する場合の量は、太平洋側に比べ特に北西の季節風が卓越する北陸や北海道の西側地域で多いとされる。

日本道路協会「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」（以下、塩害指針と略記）では、**図－5.1.1** に示す塩害区分を設定している。Ｂゾーン（日本海側）では、極めて強い季節風の影響や岩礁などによる破砕波の影響により、海からの海水滴等が一般の地域より内陸まで飛来すると考えられる地域である。塩害指針では、Ｂゾーンにおいては、一般の地域より 100m内陸まで海水滴分が飛来すると設定している。Ａゾーン（沖縄）では、強い台風の影響を多く受けることや岩礁が多いことなどから、Ｂゾーン同様に塩分が一般の地域より内陸まで飛来すると考えられる地域である。



図－5.1.1 地域区分

地域区分Bの地域は,冬季に海からの季節風が卓越し,強い潮風,波しぶきを受ける状況にある。さらに,これらの地域の海岸付近は,時に損傷を受けている橋梁の発生割合が大きくなっており,また海岸線からある程度離れた場所にある橋梁についても塩害を受けているものがあるので,海岸線から300m迄を対象地域とした。

5.1.4 アメリカにおける塩害の事例

米国におけるコンクリート構造物（橋梁床版）の腐食の現状に関して、1950 年代までは凍結融解作用によるスケーリング（コンクリートの剥離）、いわゆる、凍害が問題視されていた。

この問題は、ＡＥコンクリートの使用などにより一応の解決を図ることができた。しかし、1960 年代以降コンクリートのスポーリング（内部膨張などによりコンクリートが薄片状に剥がれる現象）が多く発生してきている。この原因として、この年代に冬季の道路凍結防止方法として広まった路面への塩化カルシウムの散布によるコンクリート内部の鋼材腐食問題が挙げられる。スポーリング現象の防止法としては、塩化カルシウムの散布を中止することが最も簡単な方法であるが、他に安価な方法がないことより、コンクリート中の鋼材の腐食防止対策に力が置かれている。

ペンシルバニア州における橋梁各部位の計画耐用年数は表－5.1.1 に示すように、路面に舗装を施していないデッキスラブ（被覆鉄筋不使用）が 25 年と非常に短い耐用年数からも推定される。このように、凍結融解剤による塩害が耐久性を大きく支配する要因となっている。

表－5.1.1 ペンシルバニアにおける橋梁各部位の計画耐用年数

部　　位	計画耐用年数
デッキスラブ(被覆鉄筋不使用)	２５年
デッキスラブ(被覆鉄筋使用)	４０年
上部工	７５年
下部工	１００年
メタルカルバート	４０年
コンクリートカルバート	８０年

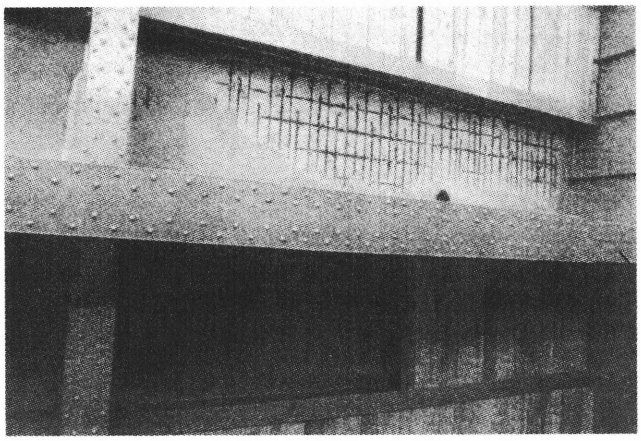
このように、米国におけるコンクリート構造物の腐食劣化状況は深刻な問題であり、電気防食法が世界に先駆けて米国で普及した背景には、このような著しいコンクリート構造物の腐食劣化問題がある。

コンクリート構造物に対する電気防食は、1960 年代に米国において「完全除雪道路政策」が多くの州で採用され、道路に散布する凍結防止剤（融氷塩）の使用量が大幅に増加したことが、技術開発の直接的な引き金となった。この凍結防止剤は、コンクリート中に徐々に浸透し、コンクリート中の鉄筋の腐食が大きな問題となった。

その対策として、断面修復等による補修が実施されたが、いずれも再劣化が発生し、問題解決には至らなかった。この問題解決の手法として検討された方法が、海中鋼構造物や地中埋設管、船舶等の鋼材防食対策として、既に長年の実績を有し、確実な防食効果が得られることが知られている電気防食法であった。

電気防食法をコンクリート中の鉄筋の腐食対策として適用する場合、コンクリートという電気抵抗を持った導電電解質を介して防食電流を供給することになるため、安定した防食電流を供給するための陽極の開発が最も重要な事項となった。

1973 年に、カリフォルニア州のスカイパークロード橋でシリコンアイアンと導電性アスファルトを陽極として使用した世界最初のコンクリート中の鉄筋の電気防食工事が実施され、その後、種々の陽極システムの開発とともにその適用事例も増加してきた。すなわち、コンクリート構造物の電気防食の歴史は、陽極材の開発の歴史であったとも言える。初期の陽極材は、防食電流の不均一性や陽極反応に伴うコンクリートの品質の低下などの問題が生じた。世界で初めて実構造物に適用されたシリコンアイアンと導電性アスファルトを陽極とする方法は、シリコンアイアンの重量が大きいため死荷重が増大することや防食電流の均一性に問題があることなどが問題となった。溝を切り白金ニオブ銅線を埋め込みこれを導電性ポリマーグラウトで充填する方法(Slotted System)は、導電性ポリマーグラウトとコンクリート界面に通電による塩素ガスが発生し、コンクリートが劣化する問題を生じたが防食効果には問題は認められなかった。床版上にカーボン線を設置しこれを導電性ポリマーグラウトで付着させる方法(Strip/Overlay System)も、先の Slotted System と同様な塩素ガスの発生に起因したコンクリートの劣化が問題視されたその後の陽極材の研究開発により現在ではコンクリート構造物の電気防食に要求される陽極材としての性能はほぼ確立されたと考えられる。このような陽極材の開発の歴史と合わせ、公的機関においても電気防食の適用に向けた検討が開始され、米国では 1987 年から５年計画で実施した SHRP 計画(Strategic Highway Research Program)の中で塩害を受けたコンクリート構造物の補修対策としての電気防食法のガイドラインが作成された。



写真－5.1.1　米国における床版の塩害損傷事例

5.1.5　積雪寒冷地における凍結防止剤散布の現状

(1) 凍結防止剤散布の現状

北海道などの積雪寒冷地における凍結防止剤の散布については、スパイクタイヤの規制（スタッドレスタイヤの使用）に伴い、道路管理者は凍結防止剤の散布を余儀なくされている現状にあり、その散布量は平成２年頃から増加し始め、平成４年から急増しているのが実態である。

(2) 凍結防止剤による塩分浸透予測

凍結防止剤散布によるコンクリート構造物の損傷は、現時点でそれほど深刻な問題となっていないが、塩化物の蓄積により将来的に損傷が起きることは十分考えられる。そこで、ＦＩＣＫの拡散方程式を用いて、10 年後の塩分浸透を予測する。

調査結果から得られたコンクリート表面からの深さ毎の塩化物イオン濃度に、以下の方程式を最小二乗法で近似させて、コンクリート表面における塩化物イオン濃度 *(Co)* と塩化物イオンのコンクリート中における拡散の進行程度を表す拡散係数 *(D)* を求める。

実測値に近似させた計算値による浸透塩分の分布図を作成する。

ＦＩＣＫの拡散方程式

$$C = Co\left[1 - erf\left(\frac{X}{2(D\cdot t)^{1/2}}\right)\right] \qquad (5.1.4)$$

X：コンクリート表面からの深さ（cm）

C：深さＸ（cm）での塩化物イオン濃度

t：建設時から調査実施までの期間（sec）、(year)

Co：表面塩化物イオン濃度（%）

※なお、$erf(s)$は誤差関数であり、$erf(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_{o}^{s} e^{-\eta^2} d\eta$ で表される。

詳細は平成 11 年版コンクリート標準示方書〔施工編〕－耐久性照査－P11,12 及び改訂資料 P23 を参照のこと。

●ＣＡＳＥ－１　塩分浸透予測（Ａ）

調査時の Co を用いた 10 年後（Ａ）の塩分浸透予測

予測Ａ：現在以降、凍結防止剤の散布を止め、現在の塩分を基に浸透すると仮定しての浸透予測値。将来、凍結防止剤散布が行われない時の 10 年後の値で最小値と予想される。

以下の手順でＦＩＣＫの拡散方程式より⑥を求めて深さ毎にプロットし、実測値に近似させた計算値による浸透塩分の分布図を作成する。

① 供用年数
〈建設時から調査実施までの期間（sec）、(year）〉
② データ数
③ 推定したい深さ（cm）
④ 塩化物イオンの拡散係数（cm^2/sec）
⑤ 調査時の表面塩化物イオン濃度（%）
⑥ 推定したい深さの塩分濃度（%）

●ＣＡＳＥ－２　塩分浸透予測（Ｂ）

10 年後のＣo を単純に、直線的な比例で試算した表面塩化物イオン濃度 $Co._{10}$ を用いた 10 年後（Ｂ）の塩分浸透予測

予測Ｂ：現在と同様に凍結防止剤の散布を続け、塩分がどこにも逃げないで表面にどんどんたまると仮定した時の浸透予測値。現実には雨、風により表面は洗われるので、10 年後の値で最大値と予想される。

$Co._{10}$＝{ Co／今回調査までの凍結防止剤の散布年数} ×10

以下の手順でＦＩＣＫの拡散方程式より⑥を求めて深さ毎にプロットし、実測値に近似させた計算値による浸透塩分の分布図を作成する。

① 塩化物イオンの拡散係数（cm^2/sec）
② 供用年数
〈建設時から調査時までの期間(sec)、(year）〉
③ 推定したい年数、何年後の塩分濃度か？（year）
④ 推定したい深さ（cm）
⑤ 調査時の表面塩化物濃度（%）
⑥ 推定したい深さの推定したい年数での塩分濃度（%）

以下に実橋の壁高欄における塩分量と 10 年後の予測値に関するグラフおよび主な国々におけるコンクリート中の塩化物含有量の規制値、鉄筋の発錆に及ぼす塩化物の量に関する文献を示す。

調査箇所	型式	ニュジャージー型
	かぶり	75mm
壁高欄	供用年月	平成4年9月
	海砂使用	なし

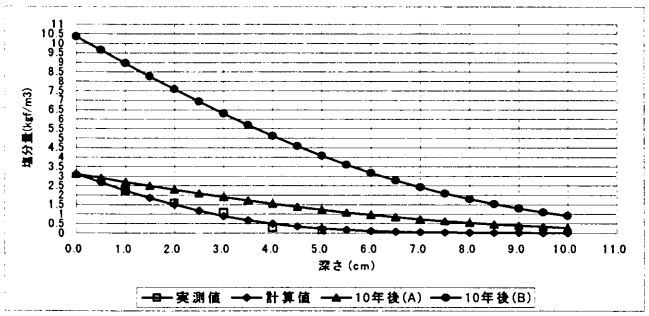
係数値

拡散係数 (cm2/sec)	表面塩分量 (%)	表面塩分量 (kgf/m3)	竣工後年数 (年)	推定年数 (年後)	推定年数後の表面塩分量
4.190E-0.8	0.135	3.105	3	10	10.35
A1	A2	A3	A4		
0.278393	0.230389	0.000972	0.078108		

計算結果

測定深さ (cm)	実測値 (kgf/m3)	計算値 (kgf/m3)	A計算値 (kgf/m3)	B計算値 (kgf/m3)	計算時の係数 X0	計算時の係数 X
0.0		3.105	3.105	10.350	0.0000	0.0000
0.5		2.668	2.895	9.651	0.1256	0.0603
1.0	2.208	2.242	2.685	8.952	0.2511	0.1206
1.5		1.844	2.478	8.260	0.3767	0.1810
2.0	1.587	1.482	2.275	7.583	0.5023	0.2413
2.5		1.164	2.078	6.927	0.6278	0.3016
3.0	1.104	0.892	1.889	6.296	0.7534	0.3619
3.5		0.665	1.708	5.693	0.8790	0.4222
4.0	0.253	0.483	1.536	5.121	1.0045	0.4826
4.5		0.341	1.374	4.582	1.1301	0.5429
5.0	0.138	0.234	1.223	4.076	1.2557	0.6032
5.5		0.156	1.082	3.606	1.3812	0.6635
6.0		0.102	0.952	3.172	1.5068	0.7238
6.5		0.065	0.832	2.773	1.6323	0.7842
7.0		0.041	0.723	2.409	1.7579	0.8445
7.5		0.025	0.624	2.080	1.8835	0.9048
8.0		0.015	0.535	1.784	2.0090	0.9651
8.5		0.009	0.456	1.521	2.1346	1.0254
9.0		0.006	0.386	1.288	2.2602	1.0858
9.5		0.003	0.325	1.084	2.3857	1.1461
10.0		0.002	0.272	0.906	2.5113	1.2064

計算結果



表－5.1.2 主な国々におけるコンクリート中の塩化物含有量規制値

研究者	供試体、配合、鉄筋、ほか	暴露条件	研究結果	Cl⁻の限界値 (kg/m³)
大即ら[1]	・モルタル(4×4×16cm) ・W/C：0.40～0.65(6段階) ・水：水道水、海水(1/2～4倍)(5段階) ・鉄筋：径10mm(かぶり=1.5cm)	材齢1年まで標準養生または海水養生 (分極曲線を利用)	・Cl⁻でモルタル重量の0.05%以下では必ず不動態がある ・この値は、コンクリート中のCl⁻に換算すると約0.75kg/m³	0.75
佐伯ら[2]	・モルタル(7.4×7.4×30cm) ・W/C：0.45～0.60(4段階) ・NaCl：C×0～1.0%(6段階) ・鉄筋：SD35－D13(かぶり=3.0cm) ・鉄筋応力：0, 1000, 2000kgf/cm²	25℃, 80% R.H.に1週間 (発せい面積を測定)	・NaClで、セメント重量の0.236%が鉄筋の発せいの限界値* ・この値は、C=350kg/m³のコンクリート中のCl⁻に換算すると、0.50kg/m³	0.50
宮川ら[3,4]	・コンクリート(5×5×40cm) ・W/C=0.50、C=391kg/m³ ・水：海水(0～1倍)(4段階) ・鉄筋：SD35－D10(かぶり=2.0cm) ・ひびわれ幅：0, 0.03, 0.06mm	・温度：20, 40, 60℃ ・湿度：90%RH以上 ・期間：20℃→3年まで40, 60℃→1.2か月 (発せい面積を測定)	鉄筋の発せいの臨界塩分量Cl⁻で、1.2～2.5kg/m³の間に存在	1.2～2.5
大和ら[5]	・コンクリート(15×15×120cm) ・W/C=55.6%、C=313kg/m³ ・NaCl：S×(0～0.5%)(4段階) ・鉄筋：SD35－D13(かぶり=1.5～5.5cm)	内陸放置 6年 (発せい面積を測定)	・NaClが細骨材の0.1%までは発せいは比較的軽微 ・コンクリート中の鉄筋の発せいの臨界塩分量は、Cl⁻で0.8～2.3kg/m³の間に存在	0.8～2.3

＊文献中の値にセメントから供給された塩素イオンを加えて換算した値

表－5.1.3 鉄筋の発錆に及ぼす塩化物の量の影響

国名	規格	規制値	Cl⁻換算値* (kg/m³)	
イギリス	BS 8110(1985)	1) PCでは、Cl⁻に換算してセメント重量の0.1%以下 2) RCでは、Cl⁻に換算してセメント重量の0.4%以下	0.45 1.20	
フランス	Document Technique Unifit. N°21.4 (1979 部分改訂) (建築科学技術本部)	RCでは、Cl⁻に換算してセメント重量の0.65%以下	1.95	
アメリカ	ACI 222R(1985) (ACI318+)	1) PCでは、Cl⁻に換算してセメント重量の0.08%以下 2) RCでは、Cl⁻に換算してセメント重量の0.20%以下	0.36 0.60	
西ドイツ	DIN 4226(1983)	骨材中の水溶性塩化物量は、 (1) プレテンション方式のPCでは、Cl⁻に換算して0.02%以下 (2) RCおよびポストテンション方式のPCでは、Cl⁻に換算して0.04%以下	0.17″ 0.28″	PC…0.59 RC…0.64
	DIN 1164(1978)	セメント中の塩化物は、Cl⁻に換算して、セメント重量の0.1%以下		
新しい土木学会示方書		1) PCなど、厳しい条件の場合 …… 0.30 2) 一般のRCなどの場合 …… 0.60		

＊RCではC=300kg/m³、S=850kg/m³、PCではC=450kg/m³、S=700kg/m³と仮定し、1m³当たりのコンクリートに含まれる塩素イオン重量に換算した値

+ ACI318では、規制値は設けていないが、ACI222のレポートによるのがよいと述べている

″骨材以外の材料からの塩化物の量を0とした値

＜考察＞

・現時点においては、表面から2～3cmまでは、比較的塩分量が多いが4～5cm以降深部においては、さほど塩分が浸透しておらず、鉄筋位置においては安全といえる。ただし、壁高欄の設計上のかぶり（7．5cm）が確保されていることが前提である。

・測定位置近傍にクラック等がある場合、実際の塩分量が多くなる可能性がある。

・現時点においては、凍結防止剤散布によるコンクリートの塩害についてはそれほど深刻な問題とはならないと考えられるが、中長期的には損傷が起きることも考えられる。ここで、設計上の対応としては以下のことが挙げられる。

a．早期実施項目

① 密実なコンクリートとなるよう施工方法を指導する。

② 十分な鉄筋のかぶりを確保する。

③ 表面吸水型わく等、凍塩害に強い水セメント比に改善する。

④ 高炉セメント等塩害に強いセメントを使用する。

⑤ 施工の省力化、工期短縮、品質向上からプレファブ化を推進する。

b．中長期対応項目

① セパレータを塩害に耐えられる仕様とする。

② エポキシ鉄筋など塩害に強い鉄筋を使用する。

③ 塩害、中性化に強い埋設型わくを使用する。

④ 表面吸水性型わくを使用する。

⑤ 遮塩性に関して、新たなスペックを規定し、これを満足する防水工を選定する。

5.2　凍結融解

5.2.1　凍結融解とは

北国の人々にとって、コンクリートの凍結融解が身近なものであると認識させる事実として、道を歩き、橋を渡れば縁石ブロックの崩壊や、高欄周りの劣化したコンクリートを見ることが少なくない。また、橋梁の下面を点検する際にも、特に張り出し部において、凍結融解に起因する損傷が見受けられることもある。

このように、コンクリート床版の経年による凍害とは、コンクリート中の水分が凍結融解を繰り返し、ひび割れが発生したり表層部が剥離したりして、表層に近い部分から破壊し、劣化していく現象をいう。

5.2.2　凍結融解のメカニズム

コンクリートの凍害機構は、T.C.Powers が 1945 年に示した水圧説により説明されると考えられてきた。これによると、水には凍結するときに自由に膨張できるものとすると、9%の体積膨張を生ずるが、セメントペースト内部では空隙の組織の壁によって膨張が拘束される。この体積膨張を緩和するのに必要な自由空隙（空気で満たされた空隙）が存在しない場合、大きな圧力が生じ、これが劣化の原因になると考えられている。湿度降下に伴い、まず大きい空隙中の水が凍結する課程では、大きい空隙中にできた水晶により膨張が拘束される。この膨張を緩和するだけの自由空隙がない場合には、大きい静水圧が空隙の壁に作用し、これが引張強度に達したときにひび割れが生じるものと考えられている。

この繰り返しにより、ついにはコンクリート表面の破壊、あるいは剥落に至る。

5.2.3　凍結融解による劣化の形態と損傷事例

1）凍結融解による劣化の形態

凍結融解による劣化の形態は以下のように分類することができる。

① Spall（表面の薄皮状の剥げ落ち）
② Pitting（あばた、表面の比較的小さな孔の発達）
③ Pop out（内圧による表面の円錐状の剥離）
④ Cracking（ひびわれ）
⑤ Scaling（表面付近の部分的な剥離、皮むけ）
⑥ Deg radation（崩壊…何からの原因で、小さなかたまりか、粒子になる組織の破壊）

2）凍結融解による損傷事例

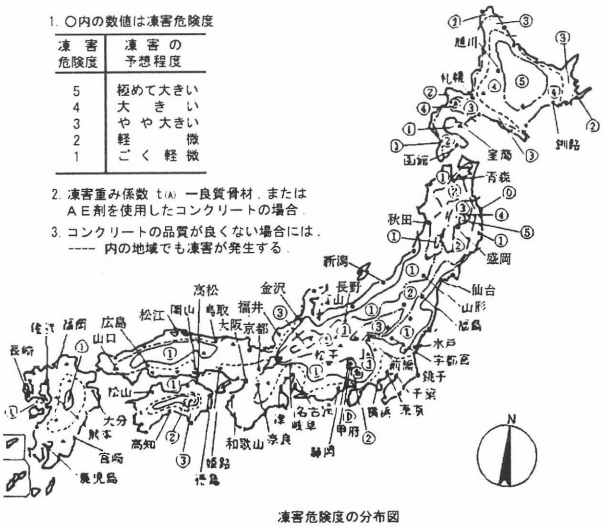
凍結融解が発生する基本的条件は、コンクリート中に水が浸入し、それが凍結することである。床版に関して凍結融解による損傷が発生する箇所は地覆部と張り出し部の水切り部がほとんどである。地覆部の損傷は、凍結融解の発生に対して水の供給が不可欠であることを示しているといえる。写真－5.2.1 では高欄の継手部分から侵入して柱に溜まった水が凍結して膨張し、根元にある地覆コンクリートに損傷を与えたと考えられる。写真－5.2.2 は床版張出し部の凍結融解による損傷を示したものである。

写真－5.2.1　凍結融解による地覆の損傷

写真－5.2.2　凍結融解による床版張出し部の損傷

5.2.4　凍害危険度の分布図

図－5.2.1 に凍結危険度の分布図を示す。これを見ると、コンクリートの凍結融解の危険性は山間部、内陸部を中心に広く分布しており、被害の程度に差があっても凍結融解の発生する危険性があり、特に北海道、東北、中部地方の山間部、内陸部では凍結融解の危険度に対応した防止対策を行う必要があると考えられる。



図－5.2.1　凍害危険度の分布図

5.2.5 凍結融解による損傷対策

床版コンクリートの凍結融解による損傷が発生する要因としては、

① 内部の空隙が水で満たされていること

② その水が凍結・融解して水圧の発生が繰り返されること

③ その繰返し作用がコンクリートの抵抗能力を上回っていること

以上が必須条件であり、これらを１つでも除去できれば損傷の発生を避けることができる。

具体的な方策としては、

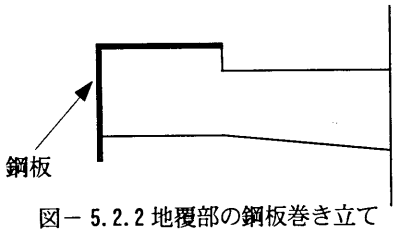
1）構造詳細の工夫

a．地覆の補強

地覆には大きな収縮ひび割れが発生している例が多く見受けられ、これが原因となり凍結融解による損傷を発生させる恐れが強い。このような場合、配力筋方向の鉄筋を増やすことにより、収縮ひび割れの低減が可能であり、凍害発生後の耐久性も確保できて、高欄の支持に役立つものと考えられる。

b．地覆部の鋼板巻き立て（図－5.2.2）

地覆部を鋼板で巻き立てることにより、地覆部の保護、地覆部の水を側面に伝えない効果がある。跨線橋、跨道橋で有効な方法である。

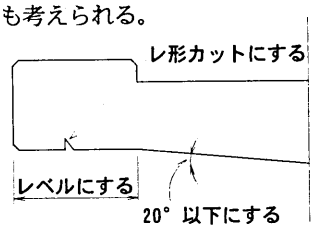


図－ 5.2.2 地覆部の鋼板巻き立て

c．地覆下面形状の工夫（図 5.2.3）

橋面から流れる水は、地覆や床版の側面を濡らし、凍害の発生を招く恐れがある。少なくとも、側面を伝わる水はそのまま落下するようにし、床版下面まで回り込むことのないように配慮する必要がある。

ただし、水切りも溝の形状や寸法が適切でなければ用をなさず、図－5.2.2 のように地覆側面につばを出す方法も考えられる。



図－ 5.2.3　地覆下面の形状

2）入念な施工

当然の事ではあるが、施工原則の遵守こそが凍結融解に損傷防止の大きな要件といえる。AE 剤はコンクリートの耐凍害性の向上を目的として開発されたが、AE 剤使用が一般的でなかった昔の床版コンクリートにおいても、凍害から身を守っているものも少なくないことは事実である。また、適正な空気量（一般には 5%前後）とすることは言うまでもない。

5.3 中性化

5.3.1 中性化とは

コンクリートはセメントの水和反応の進行とともに強度を発現し、水和した硬化セメントペーストの約 60%は水和生成物（ＣＳＨ)、約 25%が水酸化カルシウム（$Ca(OH)_2$)で占められる。コンクリートが大気中にある場合、大気中の二酸化炭素が拡散によりコンクリート内部へ侵入し、空隙中の飽和水溶液の形で存在する水酸化カルシウムと反応し、炭酸カルシウムが生成する。

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

この反応によりセメント硬化体中の水酸基が減少し、アルカリ性が低下する現象が中性化であり、表面からコンクリート内部へと進行する。

5.3.2 中性化のメカニズム

セメントの水和の代表的な反応式は、次式によって示される。

$$2(CaO)_3SiO_2 + 6H_2O \rightarrow (CaO)_3(SiO_2)_2(H_2O)_3 + 3Ca(OH)_2 \quad (5.3.1)$$

$$2(CaO)_2SiO_2 + 4H_2O \rightarrow (CaO)_3(SiO_2)_2(H_2O)_3 + Ca(OH)_2 \quad (5.3.2)$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (5.3.3)$$

$$(CaO)_3(SiO_2)_2(H_2O)_3 + 3CO_2 \rightarrow 3CaCO_3 + 2SiO_2 + 3H_2O \quad (5.3.4)$$

いずれも水酸化カルシウムが生成されるが、通常の普通ポルトランドセメントでは、生成する水酸化カルシウムはセメント量の約１／３である。水酸化カルシウムはＰＨ12～13 の強アルカリ性を呈し、セメント水和物のＰＨを決定している。

一方、大気中には弱酸性の炭酸ガスが 0.03%含まれている。その結果、水酸化カルシウムと炭酸ガスとが式（5.3.3）のように反応して、炭酸カルシウムを生成する。炭酸カルシウムとなった部分のＰＨは 8.5～10 程度になることから、日本ではこれを中性化と呼んでいる。

また、セメントの水和反応によって生成した水酸化カルシウム以外の鉱物も炭酸ガスと反応し、式（5.3.4）のように炭酸カルシウムを生成する。この反応は炭酸化であり、一般に日本では中性化には含まれていないようである。

コンクリートの圧縮強度は中性化により大きくなるとした実験結果が示されており、その原因は、中性化により難溶塩である炭酸カルシウムが生成し、これが、硬化セメントペースト中の空隙量を減少させるためと考え

より難溶塩である炭酸カルシウムが生成し、これが、硬化セメントペースト中の空隙量を減少させるためと考えられている。

コンクリートの中性化が劣化として重要視されるのは、コンクリート中の鉄筋に錆が発生しやすくなるためである。中性化していない部分の細孔溶液のＰＨは、12から 13 と強アルカリ性であり、これに接する鉄筋の表面には不動態皮膜と呼ばれる緻密で薄い水和酸化物が形成され、腐食反応に必要な水や酸素と鉄筋の接触を防いでいる。しかし、中性化によりＰＨが 11 より低くなると不動態皮膜は破壊され鉄筋は活性状態となり発錆することが知られている。コンクリート中の鋼材に腐食が生じるとまず水酸化第一鉄$(Fe\ (OH)_2)$が生成され、これらはさらに酸化されFe_2O_3（赤錆）、Fe_3O_4（黒錆）等となり、鋼材表面に錆の層を形成する。水酸化第一鉄で3.8倍、赤錆で2.2倍、もとの体積より大きくなり、錆の生成によりコンクリートには膨張圧が生じることとなり、ひび割れが生じる。

5.3.3 中性化速度

大気中に置かれたコンクリートの中性化速度は、大気中の炭酸ガス濃度、温度、湿度、仕上げ材の種類といった外的要因と、セメントの種類、調合、強度、施工条件、含水率、透気性といったコンクリート自体に依存する内的要因により影響を受けることが知られている。

1） 外的要因の影響

中性化速度は炭酸ガス濃度が高い場合、温度が高い場合に大きくなる。湿度については相対湿度50から70%程度で中性化速度がもっとも大きく、相対湿度 70%以上では湿度が高くなるにしたがい中性化速度は小さくなる。実際のコンクリート構造物ではこれらの要因が複雑に作用することとなる。屋内側では通常、炭酸ガス濃度が高く、湿度が低いため中性化の進行が屋外よりも速くなり、和泉らの調査結果では屋内の中性化速度は屋外の約1.7倍であった。

コンクリート表面に何らかの仕上げを行うことで中性化を抑制することができるが、仕上げ材の種類、施工のばらつき、仕上げ材自体の経年変化といった要因から仕上げ材による中性化抑制効果を精度良く定量化することは現状では困難である。和泉らが行った実態調査によると、仕上げ材の中性化抑制効果は仕上げ材の種類により大きく異なり、また、同一の仕上げ材であってもばらつきが大きいことが示されている。

2） 内的要因の影響

コンクリートの中性化速度は使用したセメントの種類により大きく異なることが知られている。中性化速度は、早強ポルトランドセメント＜普通ポルトランドセメント＜混合セメントの順であり、混合セメント（フライアッシュセメント、高炉セメント）では混和材が多いものほど中性化速度は速くなる。また、中性化速度は養生条件により大きく影響を受け、中性化速度を小さくするには十分な養生が必要となり、混合セメントでは特に養生条件による影響が大きいことが和泉らにより示されている。

コンクリートの水セメント比と中性化速度の関係は、岸谷、白山、和泉らにより検討されている。水セメント比 60%のコンクリートの中性化速度に対する比として中性化速度比を定義した場合、水セメント比が小さくなるに従い中性化速度比は小さくなることが示されている。

3） 中性化速度

大気中の炭酸ガスによるコンクリート表面からの中性化の進行を経過時間の関数として表わしたものが中性化速度式である。中性化が定常状態での炭酸ガスのコンクリート中への拡散によって生じると仮定すれば、中性化深さ Y_d は経過時間 t の平方根に比例するという式が導かれ、これは通常$\sqrt{t}$則として一般的に用いられているものである。

$$Y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \qquad (5.3.5)$$

ここに、

α_d：中性化速度係数の設計値(mm/√年) ＝ $\alpha_k \beta_e \gamma_c$

α_k：中性化速度係数の特性値(mm/√年)であり，その設定は基本的に設計者に任されている。設計者は、設計耐用年数や構造設計から決まる設計条件などを考慮して構造物の中性化の照査式(5.3.6)を満足するようにα_kを決定すればよい。

β_e：環境作用の程度を表す係数。一般に、乾燥北向きの面などでは1.0、乾燥しやすい環境、南向きの面などでは1.6 としてよい。

γ_{cb}：中性化深さの設計値Y_dのばらつきを考慮した安全係数。一般に1.15 としてよい。

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。なお、構造物中のコンクリートと標準養生供試体の間で品質に差が生じない場合は、すべての部位において1.0 としてよい。

$$\gamma_i = \frac{Y_d}{Y_{lim}} \leqq 1.0 \qquad (5.3.6)$$

ここに、

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。

Y_{lim}：鋼材腐食発生限界深さ。一般に(5.3.7)で求めてよい。　$Y_{lim} = c - c_k$　(5.3.7)

ここに、c：かぶりの期待値(mm)

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25mm としてよい。

中性化速度式については、さまざまな研究がなされており、実用的な中性化速度式が提案されているが、代表的なものとして、①浜田式，②岸谷式，③白山式，④依田式などがある。

① 浜田式

$$t=\frac{k}{R}C^2$$

ここに、 $k=0.3(1.15+3x)/(x-0.25)^2$ (5.3.8)

t：Cまで中性化する期間（年）

x：水セメント比

R：中性化比率（$=\gamma_c\gamma_a\gamma_s$，表−5.3.1参照）

γ_c：セメントの種類による定数

γ_a：骨材の種類による定数

γ_s：表面活性剤の種類による定数

C：中性化深さ（cm）

表−5.3.1 中性化比率

セメントの種類 (γ_c)	ポルトランドセメント 普通 1	ポルトランドセメント 早強 0.6	高炉セメント スラグ30〜40% 1.4	高炉セメント スラグ60% 2.2	シリカセメント 1.7	フライアッシュセメント (FA20%) 1.9
骨材の種類 (γ_a)	川砂・川砂利 1		川砂・川砂利 1.2		川砂・川砂利 2.9	石炭殻（細・粗） 3.3
表面活性剤の有無 (γ_s)	プレーン 1		AE剤 0.6		分散剤 0.4	

(注) 川砂・川砂利（プレーン）は川砂・川砂利（AE）0.8とAE剤0.6より推定.

② 岸谷式

浜田式をもとに、詳細な促進及び自然暴露試験結果を追加して提案されたものであり、現在最も一般的に用いられている。

$$\left.\begin{aligned} t&=\frac{0.3(1.15+3x)}{R^2(4.6x-0.25)^2}C^2 \quad (x\geqq 0.6)\\ t&=\frac{7.2}{R^2(4.6x-1.76)^2}C^2 \quad (x\leqq 0.6)\end{aligned}\right\} \quad (5.3.9)$$

ここに、 t：Cまで中性化する期間（年）

x：強度上の水セメント比

C：中性化深さ

R：中性化比率（表5.3.2参照）

表−5.3.2 コンクリートの種類別中性化比率 R

セメントの種類 ＼ 骨材の種類 / 表面活性剤の別	川砂・川砂利 プレーン	川砂・川砂利 AE剤	川砂・川砂利 AE減水剤	川砂・火山れき プレーン	川砂・火山れき AE剤	川砂・火山れき AE減水剤	火山れき プレーン	火山れき AE剤	火山れき AE減水剤
普通ポルトランドセメント	1.0	0.6	0.4	1.2	0.8	0.5	2.9	1.8	1.1
早強ポルトランドセメント	0.6	0.4	0.2	0.7	0.4	0.3	1.8	1.0	0.7
高炉セメント（スラグ30〜40%）	1.4	0.8	0.6	1.7	1.0	0.7	4.1	2.4	1.6
高炉セメント（スラグ60%前後）	2.2	1.3	0.9	2.6	1.6	1.1	6.4	3.8	2.6
シリカセメント	1.7	1.0	0.7	2.0	1.2	0.8	4.9	3.0	2.0
フライアッシュセメント（フライアッシュ20%）	1.9	1.1	0.8	2.3	1.4	0.9	5.5	3.3	2.2

(注) 軽量コンクリート（1種および2種）のRは，川砂・川砂利コンクリートと川砂・火山れきコンクリートの中間程度である.

③ 白山式

$$t=\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\frac{5000C^2}{(x-38)^2} \quad (5.3.10)$$

ここに、 t：Cまで中性化する期間

x：水セメント比（%）

C：中性化深さ（cm）

$\alpha,\beta,\gamma,\delta,\varepsilon$：骨材，混和剤，セメント，施工速度，仕上げ，室内外などによる係数（表−5.3.9参照）

表−5.3.3 骨材・混和剤による係数

骨材 ＼ 混和剤	プレーン	AE剤	減水剤
砂・砂利（砕石）	1.0	2.8	6.2
砂・軽量骨材	0.7	1.6	4.0
軽量骨材・軽量骨材	0.12	0.31	0.83

表−5.3.4 セメントによる係数

セメントの種類	普通ポルトランドセメント	早強ポルトランドセメント	高炉セメント A種	高炉セメント B種	高炉セメント C種	フライアッシュセメント B種	シリカセメント B種
β	1	1.6	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3

表−5.3.5 施工程度による係数

施工程度	優	良	普通	劣
γ	4	2	1	0.5

表−5.3.6 仕上げによる係数

仕上げの種類	仕上げなし	ペイント	モルタル	タイル
δ	1	2	3	7

表−5.3.7 室内外などによる係数

室内外などの別	室外 都市	室外 地方	室内
ε	1	1.3	0.5

④ 依田式

高炉セメント A種（屋内）

$$t=\alpha\beta\gamma\frac{117t^2}{(100x-25)^2}C^2$$

高炉セメント A種（屋外）

$$t=\alpha\beta\gamma\frac{182t^2}{(100x-27)^2}C^2$$

高炉セメント B種（屋内）

$$t=\alpha\beta\gamma\frac{95t^2}{(100x-26)^2}C^2$$

$$t = \alpha\beta\gamma \frac{207t^2}{(100x-24)^2} C^2$$

高炉セメント　C種（屋内）

$$t = \alpha\beta\gamma \frac{68t^2}{(100x-28)^2} C^2$$

高炉セメント　C種（屋外）

$$t = \alpha\beta\gamma \frac{251t^2}{(100x-19)^2} C^2$$

普通ポルトランドセメント（屋内）

$$t = \alpha\beta\gamma \frac{262t^2}{(100x-18)^2} C^2$$

普通ポルトランドセメント（屋外）

$$t = \alpha\beta\gamma \frac{155t^2}{(100x-36)^2} C^2$$

ここに、 t：期間（年）

x：水セメント比

α：コンクリートの品質係数（表－5. 3. 8 参照）

β：中性化遅延効果係数（表－5. 3. 9 参照）

γ：環境条件（ごく一般の地域の場合 1. 0）

表－5. 3. 8　コンクリートの品質係数 α

記　号	コンクリート施工の程度	品質係数
A	施工が優れている場合 （コンクリートの締固めが十分に行われた場合）	1
B	施工が普通(上)の場合 （コンクリートの締固めがある程度よく行われた場合）	2/3
C	施工が普通(中)の場合 （コンクリートの締固めがある程度行われた場合）	1/2
D	施工が普通(下)の場合 （コンクリートの締固めがほとんど行われなかった場合）	1/4

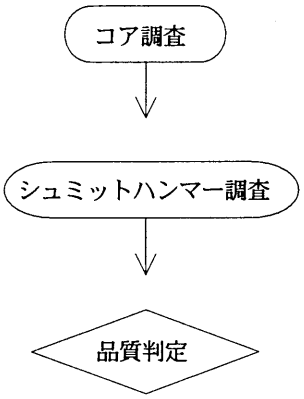
表－5. 3. 9　コンクリートの中性化速度に対する仕上げ材の遅延（抑制）効果

	仕上材なし	ペイント	モルタル	タイル
比	1.0	0.4	0.2	0.125
β	1.0	2.5	厚さ 15mm以上 5 厚さ 12mm以下 2.5	8

5. 3. 4　中性化の測定方法

中性化深さを把握することは、コンクリートの劣化を知る上で重要なことである。以下にコンクリート床版の品質調査の一手法として、中性化試験方法を東京都道路橋床版補修要領（案）より、紹介する。

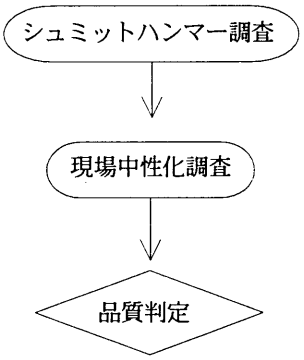
床版の品質調査は、床版損傷度がｄ以上の橋梁ではコア調査とシュミットハンマー調査を組み合わせた調査フロー(1)（図－5. 3. 1）で行う。コア調査ができない場合及び床版損傷度がｃ以下では、シュミットハンマー調査と現場中性化調査を組み合わせた調査フロー(2)（図－5. 3. 2）で行う。なお、床版損傷度がｃ以下の橋梁でも供用年数が短く損傷の進行が速い場合には調査(1)で行う。（床版損傷度は第３章 健全度評価の表-3. 1. 11 を参照のこと）



床版厚、防水層、床版厚、鉄筋かぶり厚、鉄筋径ひびわれ深さ、圧縮強度、弾性係数、中性化等を調査する

シュミットハンマー法により反発度を調査するコンクリートの品質を判定する

図－5. 3. 1　調査フロー(1)



シュミットハンマー法により反発度を調査する床版をはかり、フェノールフタレイン１％アルコール溶存法により中性化深さを調査するコンクリートの品質を判定する

図－5. 3. 2　調査フロー(2)

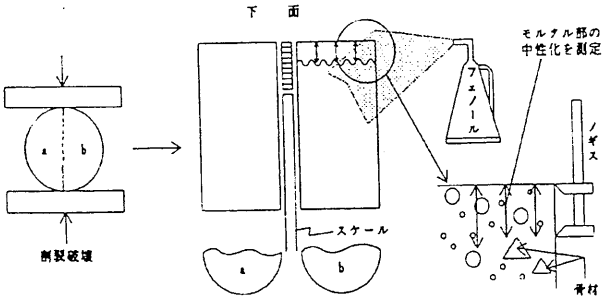
(1) 中性化試験方法

試験方法は、試薬にフェノールフタレイン１％アルコール溶液を用いた、コア割裂破断面測定方法による。なお、鉄筋が多く入っているなど割裂破断面測定方法によりがたい場合にはコア側面測定方法による。

a) 割裂破断面測定方法

コアの圧縮強度試験終了後 JIS A 1113-1999 コンクリートの割裂引張強度試験方法によってコアを割裂破壊させ、破断面の一方に試薬を塗布又は散布し、床版下面からの中性化深さを５点以上㎜単位で測定

床版下面からの中性化深さを５点以上 mm 単位で測定し、平均値で表示する。(図－5.3.1 参照) また、測定後両破断面が比較できるようにカラー写真を撮影する。



図－5.3.3　割裂破断面測定方法による中性化試験

(2) 現場中性化調査要領

a) 調査パネル

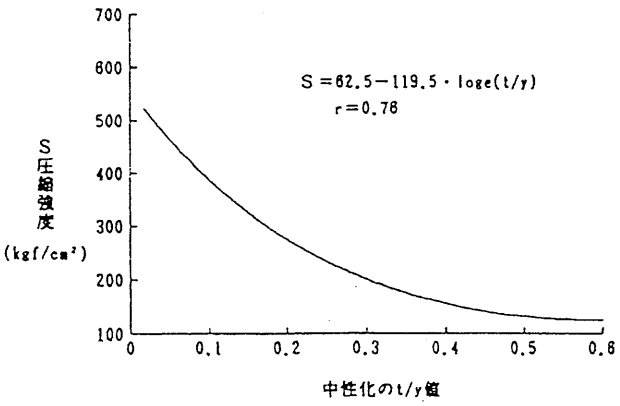
全パネルの約 40% (格子密度法によるひびわれ調査パネル) とする。

b) 調査方法

床版下面を、15×15cm 深さ 5cm 程度はつり、フェノールフタレイン１％アルコール溶液を散布又は塗布して５点以上 mm 単位で測定する。また、スケールを当て写真撮影する。なお、はつり部は調査後エポキシ樹脂モルタルで断面を修復する。

c) 圧縮強度の推定

中性化深さと材令と圧縮強度には、図－5.3.2 に示すような関係があり、中性化から圧縮強度を概略推定することができる。



図－5.3.4　コアの圧縮強度と中性化の(t/y)値の関係

推定式は次のものを使用する。

$$S = 62.5 - 119.5 \cdot Log_e(t/y) \qquad (5.3.11)$$

ただし、S : 圧縮強度(kgf/cm2)

t : 平均中性化深さ(cm)

y : 材令(年)

(3) コンクリートの品質判定

a) 調査フロー(1)による品質判定

コアを採取した調査フロー(1)でコンクリートの品質判定を行う場合には、以下の品質判定基準による。(表－5.3.10)

表－5.3.10　コンクリートの品質判定基準

判定ランク	a_2	b_2	c_2
コア圧縮強度(kg/cm²)	1.4σck以上	1.4σck未満～1.0σck	1.0σck未満

注) σck; 設計基準強度(kgf/cm²)

なお、設計基準強度が不明の場合は架設年度により推定。

a) 調査フロー(2)による品質判定

コアを採取しない調査フロー(2)でコンクリートの品質判定を行なう場合には、シュミットハンマー及び中性化調査結果を基に表－5.3.11 により品質判定を行う。

表－5.3.11　シュミットハンマー及び中性化による コンクリート品質判定基準

判定ランク	a	b	c
シュミット推定圧縮強度(kgf/cm2)	1.4σck以上	1.3～1σck	0.9σck以下
中性化の(t/y)値(cm/年)	0.1以下	0.11～0.19	0.2以上

注) σck; 設計基準強度(kgf/cm²)

ただし、シュミット推定圧縮強度は (5.3.12) 及び (5.3.13) 式に材令の補正係数を乗じて求めた推定亜宿強度の平均値とする。

$S = 7.3R + 100$　(日本建築学会)　(5.3.12)

$S = 10R - 110$　(東京都建築材料検査所)　(5.3.13)

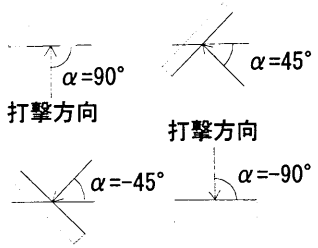
S : 圧縮強度(kgf/cm2)

R : 反発度 (角度の補正をしたもの)

(表－ 5.3.12 参照)

表－5.3.12　打撃角度の補正表

測定値 R	打撃角度 +90°	+45°	-45°	-90°
20	-5.4	-3.5	2.5	3.4
30	-4.7	-3.1	2.3	3.1
40	-3.9	-2.6	2.0	2.7
50	-3.1	-2.1	1.5	2.2
60	-2.3	-1.6	1.3	1.7



表－5.3.13　材令の補正係数

材令(日)	28	100	300	500	1000	3000	10000
補正係数	1.0	0.78	0.70	0.67	0.65	0.63	0.60

と比較検討すること。

※ここでの判定ランクは第３章　健全度評価の表 3.12 を参照のこと

5.4　塩害，凍害，中性化対策および補修・補強の考え方

(1)　補修・補強の考え方

床版コンクリートの補修・補強の概念は、補修・補強によって劣化の影響を消滅させるというより、残供用期間に対する極度の進行の抑制、あるいは定期的維持管理を前提とした期限付き無害化が実用的な補修・補強工法であると考えられる。劣化現象に応じて補修・補強目的を整理すると

① 鉄筋の腐食の回復、抑制
② コンクリートの塩分による影響の除去、低減
③ コンクリートの中性化による影響の除去、抑制
④ コンクリートのひび割れによる影響の除去

に大別できるが、いずれの場合も①の鉄筋の腐食の回復、抑制に集約されるので、下表のようにまとめることができる。

表－5.4.1　鉄筋腐食劣化構造物の補修工法の分類

鉄筋防食のメカニズム	補修工法
A 鉄筋周辺の腐食原因の除去	・断面修復工法（打ち継ぎ工法、 ・吹き付け工法、モルタル工法） ・脱塩及び再アルカリ化工法 ・含浸材塗布工法（アルカリ性付与）
B 腐食因子の鉄筋への供給を断つ	・表面被覆工法 ・防食型枠工法 ・ひび割れ注入工法 ・増厚工法 ・鋼板あるいはＦＲＰ接着工法
C 鉄筋腐食反応自体の停止あるいは抑制	・電気防食 ・含浸材塗布工法（防錆剤付与） ・鉄筋防錆処理

5.5　まとめ

床版などの鉄筋コンクリート構造物は、他の材料と比較して安価であり、耐久性にも優れているとの社会的評価を得てきた。しかし、近年のコンクリート落下事故や劣化の顕在化により、我々が考えている耐久性を有しているか疑問視する声も少なくない。この背景には高度成長期に量産された構造物の老朽化や良質なコンクリート用骨材の枯渇、熟練労働者の不足といった社会環境の変化も影響していることは否めない。

床版などのコンクリート構造物は完成後にその品質をチェックすることは極めて困難であり、また、ひとたび完成してしまうと外観で中身を判断することも難しい。また、コンクリートの特性として、水とセメントの反応は緩慢であるため、設計で想定した強度や耐久性が得られるためには約１ヶ月を要する。これが鋼構造物との大きな相違点である。

材料劣化に関する設計時における配慮としては、材料劣化には水が何らかの形で必ず関与していることから、

① 防水層の適正な材質の選定（寒冷地においては低温可撓性に優れたもの、遮塩性に優れたもの、特に歩車道境界部から水の進入が起こりやすい）
② 十分なかぶりの確保
③ 鉄筋の防錆
④ 水切りの良い構造ディテールの検討
⑤ 橋面排水の工夫

等が挙げられる。

一方、材料劣化に関しては施工の巧拙が、その後の耐久性に大きな影響を及ぼす。材料の選定からコンクリートの練り混ぜ、運搬、打ちこみ、締め固め、養生など施工の各段階を一貫して管理する体制づくりが必要と考える[10]。

参考文献

1) 土木学会：コンクリートライブラリー第 61 号
コンクリート標準示方書（昭和 61 年制定）改訂資料
2) 土木学会：コンクリートライブラリー第 99 号
コンクリート標準示方書（施工編）改訂資料
3) 土木学会：コンクリート標準示方書
－耐久性照査型－（施工編）
4) 日本道路公団　札幌建設局：コンクリート構造物の耐久性に関する調査検討報告書　平成７年３月
5) 日本道路公団　札幌建設局：コンクリート構造物の耐久性に関する調査検討報告書　平成８年 12 月
6) 社団法人　日本コンクリート工学協会北海道支部：鉄筋コンクリート構造物における補強、補修の現状
7) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）同解説
8) 岸谷　孝一、西澤　紀昭：
塩害（Ｉ）、凍害、中性化　（技報堂出版）
9) Jacqueline Llanos: La maintenance des ponts Routies
10) 片脇清士：最新のコンクリート防食と補修技術、
平成 11 年 9 月、山海堂