

論文 北陸地方での道路構造物の中性化深さの進行特性

青山 實伸^{*1}・石川 裕一^{*2}・足立 嘉文^{*3}・西尾 守広^{*4}

要旨：建設後 19～36 年経過した北陸地方での高速道路の橋梁およびカルバートボックスの部位を対象に，中性化深さの実態を調査した。その結果，中性化深さは部位によって大きく異なっていた。中性化速度係数は，雨水の影響を受ける橋台・橋脚等の部位はコンクリート標準示方書による予測値と概ね合致するが，雨水の影響を受けない桁・床版等は橋台等の 3 倍を超え，予測値を大きく上回っていた。この結果，設計かぶりの小さい鋼橋床版等では，中性化の鉄筋到達時期が早く，今後，耐久性に大きく影響すると推察された。

キーワード：橋梁，耐久性，中性化，水セメント比，中性化速度係数

1. はじめに

北陸地方のコンクリート道路構造物の耐久性に関する事象では，塩害やアルカリ骨材反応が着目されている。これらの劣化は，海岸部，特定の部位および特定の地域に発生する特徴を有する。他方，全てのコンクリート部材で生じる中性化による劣化は，個々に調査が実施されるものの，道路構造物の特性や全体像が必ずしも明確にされていない。その特性や全体像を明らかにすることは，耐久性確保や維持管理を実施する上で重要になる。

そこで，建設後 19～36 年経過した北陸地方（主に福井，石川，富山の北陸 3 県）の高速道路の橋梁部位（桁・床版・高欄・橋台・橋脚）およびカルバートボックス（以下，C-Bx）を対象に，中性化深さを調査し，中性化進行の全体像を明らかにした。調査は，橋梁数で全体の 40%，C-Bx 数で約 1% を対象に実施した。調査結果より，構造部位や配合ごとの中性化進行速度を分析した。そして，同時に施工された C-Bx の翼壁・側壁・頂版部位の違いや，橋梁部位の雨水の影響を受けない桁・床版と雨水の影響を受ける橋台・橋脚の違いを明らかにした。また，コンクリート標準示方書（以下，示方書）による予測値との比較を示した。さらに，設計かぶりが小さく中性化の影響が懸念される桁および床版に関して，中性化進行の劣化予測を行い，耐久性に関する検討を実施した。



図 - 1 調査路線の概況

2. 調査の概要

2.1 調査道路構造物

(1) 調査路線概要と環境

調査対象とした北陸地方の高速道路は，建設からの経過年数が調査時点で 26～36 年経過している北陸自動車道と，19 年経過している東海北陸自動車道の区間である。北陸自動車道の建設時期は，昭和 40 年代前半～50 年代中頃である。路線は，約 2/3 が平地部を通過している。調査路線の概況を図 - 1 に，主要区間の建設からの調査時点までの経過年数を図 - 2 に示す。

北陸は，冬季降雪期の影響を受け湿度が高い地域である。北陸地方の主要都市と東京の 35 年間年平均湿度を気象庁データより求め 図 - 3 に示す。北陸の主要都市の年平均湿度は，72～74% で，東京の 62% に比べ高い値を

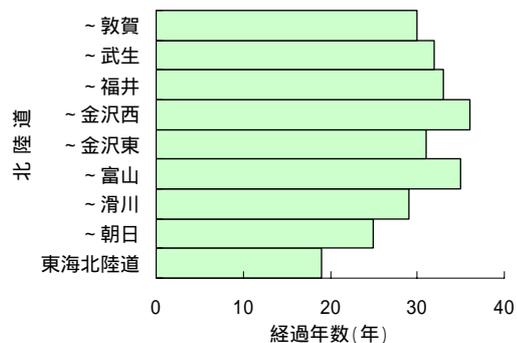


図 - 2 主要区間の建設からの調査時点までの経過年数

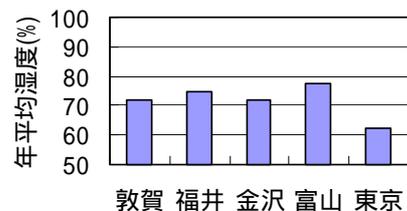


図 - 3 主要都市と東京の 35 年間年平均湿度

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）金沢支店 道路技術部 部長 博(工) (正会員)

*2 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）金沢支店 道路技術部 構造技術課 (正会員)

*3 中日本高速道路（株）金沢支社 保全・サービス事業部 改良チーム サブリーダー

*4 中日本高速道路（株）金沢支社 保全・サービス事業部 企画統括チーム

表 - 1 主要部位のコンクリートの設計基準強度，示方配合の主要値 並びに設計かぶり

構造部位	セメント種別	F _{ck} (N/mm ²)	示方配合の主要値				設計かぶり (mm)	略称		
			W/C(m)	W/C(s)	G _{max} (mm)	C(kg/m ³)				
上部工	PCT 桁・合成桁	早強	41	0.419	0.016	25	400	35	PC 桁	
	PC 中空床版	ポルトランド	36	0.446	0.024	25	350	35	PC 床版	
	鋼合成桁床版	普通	31	0.489	0.023	25	330	30	鋼合成	
	鋼非合成桁床版		24	0.503	0.018	25	300	30	鋼非合	
	RC 中空床版		ポルトランド	24	0.503	0.018	25	300	35	RCSf
	壁高欄		24	0.513	0.031	25	295	30	高欄	
下部工	橋脚	普通	24	0.527	0.025	25	290	約 70	橋脚	
	橋台翼壁							約 60	橋台	
	C-Bx							約 50	C-Bx	

示している。中性化の進行は，中程度の湿度で最大となり湿度が高くなるに従い小さくなる¹⁾。このことから，北陸地域は，他の地域と比較して相対的に中性化による劣化のしにくい環境にあると考える。

(2) 道路構造物の概要

調査対象とした橋梁および C-Bx の各構造部位に使用したコンクリートの設計基準強度（以下，強度），示方配合の主要値（調査箇所の平均値，W/C（平均値(m)，標準偏差(s)）並びに設計かぶりを表 - 1 に示す。強度および設計かぶりは，当時の高速道路の設計基準や道路橋示方書によっている。配合は，各工事単位で決定されている。目標スランプは 80mm である。床版の最小セメント量は 300 kg/m³ に規定しており，鋼非合成桁床版および RC 中空床版は強度および配合が同じである。橋台，橋脚 並びに C-Bx は，同じ強度と配合を適用している。設計かぶりは，桁・床版で 30～35mm，橋脚約 70mm，橋台約 60mm，C-Bx は約 50mm である。以下，各構造部位の本文での呼び方は，表 - 1 の右端に示す略称とする。

2.2 調査概要

(1) 調査方法

中性化深さは，径 30 mm のコアを採取して測定した。中性化試験のコア径は，最大粗骨材寸法の 3 倍以上を目安とされているが，構造物への影響を勘案して 30mm とした。コア径や調査数が測定精度に及ばず影響の検討が課題であると考え。コア採取位置は，桁・高欄は側面，床版は下面，橋台は翼壁側面，橋脚は側面で行った。C-Bx は，内空側面，内空頂版並びに翼壁で行った。コア採取は，橋梁の桁・床版，C-Bx 頂版は検査路や高所作業車を用いて行い，橋脚・橋台・C-Bx 翼壁・側壁では，地表面より 1.2 m 程度の高さで行った。中性化深さの測定は，採取したコア側面にフェノールフタレイン 1 % エタノール溶液を噴霧し，非発色領域の面積の平均値より求めた。参考にコアの中性化領域の最大値を測定した。併せて，塩化物イオンの浸透が懸念されるコアは，中性化測定後のコアをスライスカットして深さ方向の塩化物イオン

表 - 2 調査数量および塩分浸透(0.5kg/m³以上)箇所数

構造部位	調査数量	浸透箇所数	比率 (%)	
上部工	PC 桁	17	7	41
	PC 床版	12	9	75
	鋼合成	29	3	10
	鋼非合	104	2	2
	RCSf	122	5	4
	高欄	58	37	64
下部工	橋脚	43	12	28
	橋台	32	16	50
C-Bx	32	11	34	

濃度の分布を JIS A1154 の電位差滴定法により測定した。

(2) 調査対象数量

調査は，橋梁 298 橋で全橋梁の 40% を対象に，C-Bx で全 C-Bx の約 1 % の 16 基を対象に実施した。調査数量は，表 - 2 に示すように，橋梁部位約 450 箇所，C-Bx 部位 32 箇所である。橋梁部位の調査頻度は，橋梁上部工は 1 箇所 / 径間，下部工は 1 箇所 / 基としている。上部工の調査は，全連数に対する比率で PC 桁等 9 %，鋼橋床版 42 %，RCSf 25 % であり，中性化劣化の懸念のある床版や RCSf の調査数量を増やしている。C-Bx では，コンクリートが同時に打設されている躯体 5 基を対象に内空側面，内空頂版 並びに翼壁を比較調査した。

3. 調査結果

3.1 塩分の影響

採取コアの塩分分析結果より，海岸部の飛来塩分環境下等を除く構造部位で，深さ方向の断面で塩化物イオン濃度 0.5 kg/m³ 以上の塩分浸透が確認された箇所数を表 - 2 に示す。塩分が浸透している箇所は，凍結防止の散布や路面水の影響を受けた部位である。PC 桁・PC 床版で比率が大きいの，凍結防止剤の影響を受けやすい桁端部付近の調査が多かったことによる。高欄・橋脚・橋台は，凍結防止剤を含む路面水の飛散や漏水の影響を受けたものである。他方，鋼床版や RCSf では，塩分浸透が確認された箇所の比率が少なく，塩分の影響を受け

にくい部位であることが示されている。

3.2 中性化深さ

調査結果を、構造部位ごとの建設からの経過年数と中性化深さの関係を図 - 4 示す。経過年数は、建設完了から調査時期までの期間を示す。建設完了時期は、正確な記録がないため、上部工は供用時期の 1.5 年前、下部工・C-Bx は 2.5 年前としている。中性化深さは、バラツキを有するが、経過年数が増すに従い増大し、構造部位によって中性化深さが違っている。

3.3 中性化速度係数

中性化深さ C は、経過時間 t の平方根に比例し、中性化速度係数 A により式(1) の t 則により示される。

$$C = A \sqrt{t} \quad (1)$$

図 - 4 より、式(1) によって中性化速度係数を算定し、構造部位ごとの経過年数 (t) と中性化速度係数の関係を図 - 5 に示す。中性化速度係数は、バラツキを有するが、中性化深さと同様に構造部位によって違っている。

塩分浸透の箇所数の多い高欄・橋台・橋脚での塩分浸透の影響の有無による中性化速度係数の平均値を表 - 3 に示す。塩分浸透を受けた箇所と受けない箇所での中性化速度係数の平均値に大きな違いは見られない。

4. 調査結果の分析

4.1 中性化深さ

(1) 中性化深さ

構造部位の代表として PC 桁、鋼非合 並びに橋台の中

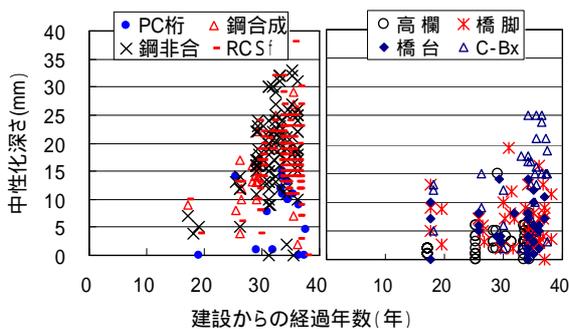


図 - 4 建設からの経過年数と中性化深さの関係

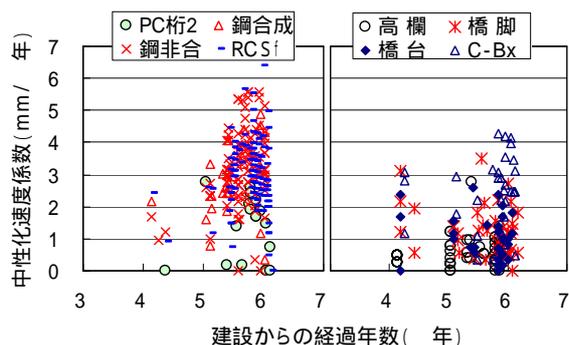


図 - 5 建設からの経過年数と中性化速度係数の関係

性化深さの度数分布を図 - 6 に示す。強度が大きく水セメント比 (以下、W/C) の小さい PC 桁の中性化深さは小さい。同じ強度である鋼非合と橋台を比べると、鋼非合は大きく橋台が小さい。鋼非合と橋台の環境の大きな差は、雨水の影響の有無である。部位の環境により中性化深さは大きく異なることになる。なお、鋼非合での中性化深さは、既に 14% の箇所設計かぶり 30mm に到達していることになる。

各構造部位の中性化深さの分布状況 (平均値 (m), ±標準偏差 (s)) を図 - 7 に示す。ほぼ同じ環境と考えられる上部工の中性化深さの平均値は 7.8 ~ 18.4 mm で、PC 桁 < PC 床版 < 鋼合成 < RCSf < 鋼非合の順に大きくなっている。これは、概ね W/C の値に比例する。高欄・橋台・橋脚の中性化深さは、雨水の影響を受ける環境にあり上部工より小さく、中性化深さの平均値は 3.3 ~ 6.8 mm である。高欄の中性化深さは橋台より小さく、W/C が小さいことによると考える。橋脚は橋台より中性化深さが大きい。これは、橋脚の上部に橋桁があり、雨水の

表 - 3 塩分浸透の影響の有無による中性化速度係数の平均値 (mm/年)

塩分浸透の影響	高欄	橋台	橋脚
塩分浸透を受けた箇所	0.7	1.2	1.0
塩分浸透を受けない箇所	0.5	1.2	1.1

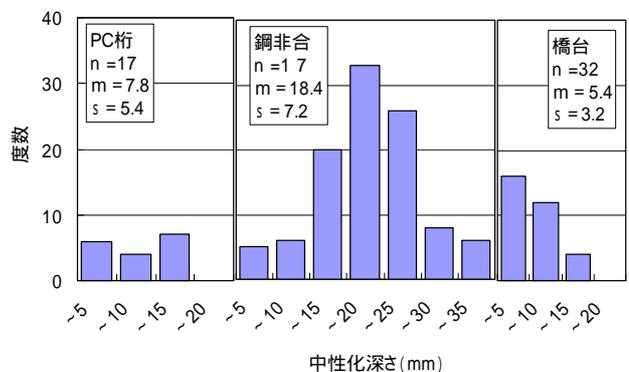


図 - 6 PC 桁、鋼非合並びに橋台の中性化深さの度数分布

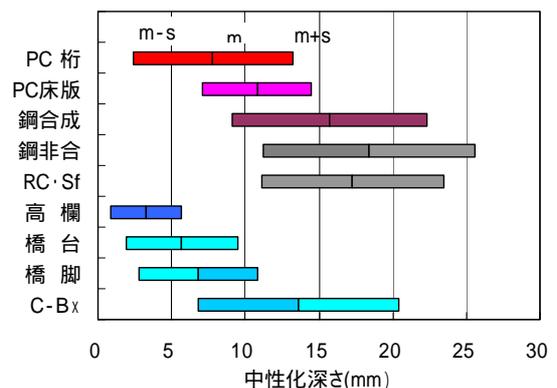


図 - 7 中性化深さの分布状況

影響が橋台より少ないことによると推察する。C-Bx の中性化深さの分布は、後述するように雨水の影響を受ける翼壁と影響を受けない内空側壁・頂版の部位の調査結果から構成されることから、分布幅が大きくなっている。

(2) コアの中性化深さと最大測定値の比較

各コアの中性化領域の最大測定値と中性化深さとの比(以下、最大比)(平均値(m), ±標準偏差(s))および最大測定値の平均と中性化深さの平均の差(以下、差),を各構造部位で分析し、結果を図-8に示す。分析では、最大比が5倍を超えるものは削除している。最大比は構造部位ごとに分布範囲で示す。最大比の平均値および差は、それぞれ1.4~2.7, 3.9~9.4 mmである。最大測定値の平均と中性化深さの平均の差は、上部工で4~7mm, 高欄・橋台・橋脚で6~7mmである。このように同じコア内でも中性化に差が生じている。これは、骨材配置等の影響によるものである。中性化による鉄筋腐食の始まる時期は、最大測定値が関係すると考える。中性化深さの測定値を評価する場合、留意する必要がある。

4.2 中性化速度係数

(1) C-Bx

C-Bx 5 基のコンクリートが同時に打設されている部位(側面, 内空頂版 並びに翼壁) の中性化深さの分布状況を図-9に、中性化速度係数の各 C-Bx の部位の比較を図-10に示す。図-9の分布幅は、平均値(m), ±標準

偏差(s)の範囲を示している。部位の中性化深さの分布および中性化速度係数は、明確に違いがある。雨水の影響を受ける翼壁が最も小さく、最も大きいのは頂版である。頂版の中性化速度係数が側壁より大きいのは、鉄筋軸に対する水平方向打設部材は鉛直方向打設部材よりブリーディングに伴う水みち等の影響により透水係数が大きくなる²⁾のと同様の事象と推察する。部材間の中性化速度係数の比の平均値は、翼壁/側壁で0.37, 頂版/側壁で1.5である。これらの結果、側壁および頂版の中性化速度係数は、雨水の影響を受ける翼壁に比較すると、それぞれ2.7倍, 4倍になる。

(2) 橋梁部位

構造部位の代表としてPC桁, 鋼非合 並びに橋台の中性化速度係数の度数分布を図-11に示す。中性化速度係数の分布は、概ね正規分布を示し、各構造部位の中性化速度係数は、中性化深さと同様な傾向を示している。

各構造部位の中性化速度係数の分布状況(平均値(m), ±標準偏差(s))を図-12に示す。図中の分布幅は、平均値(m), ±標準偏差(s)の範囲を示し、図中には、示方書のW/Cからの予測値を併せて示す³⁾。上部工の中性化速度係数の平均値は1.4~3.2 mm/年で, PC桁<PC床版<鋼合成<RCSf<鋼非合の順に大きくなっている。上部工の中性化速度係数は、示方書の予測値を大きく上

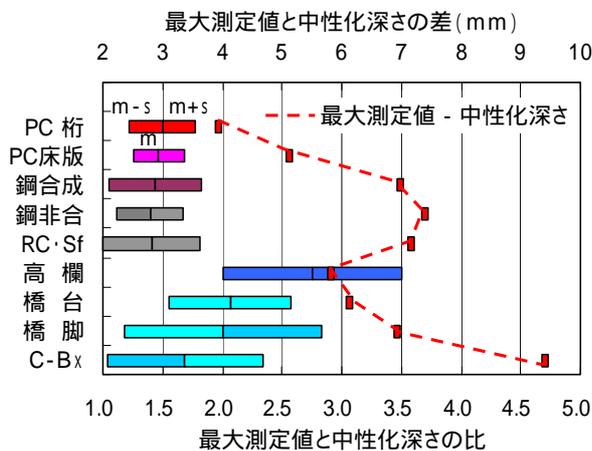


図-8 コアの中性化深さと最大測定値の比較

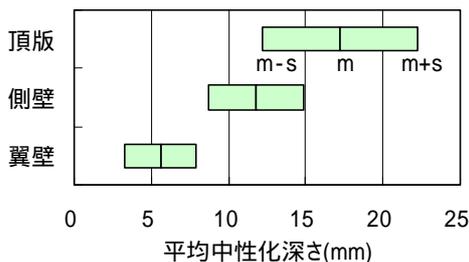


図-9 C-Bx 部位の中性化深さ状況

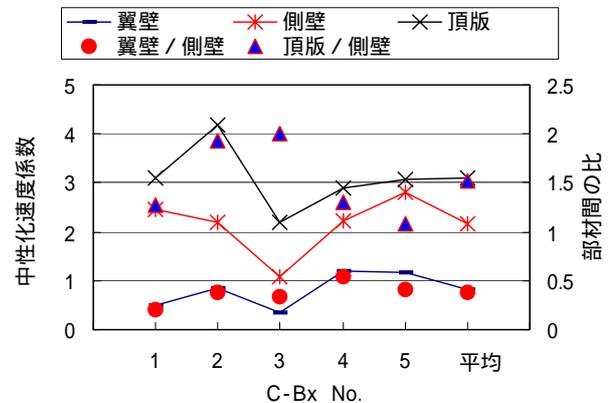


図-10 各 C-Bx の部位の中性化速度係数の比較

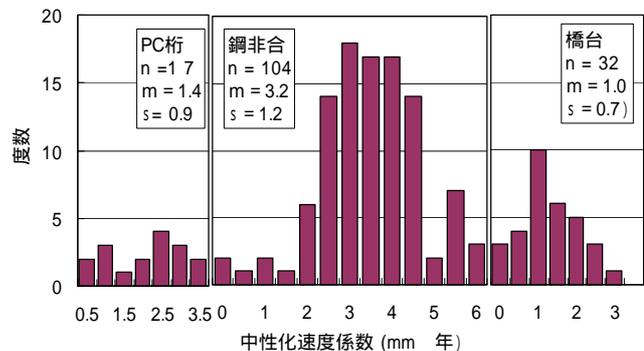


図-11 PC桁, 鋼非合並びに橋台の中性化速度係数の度数分布

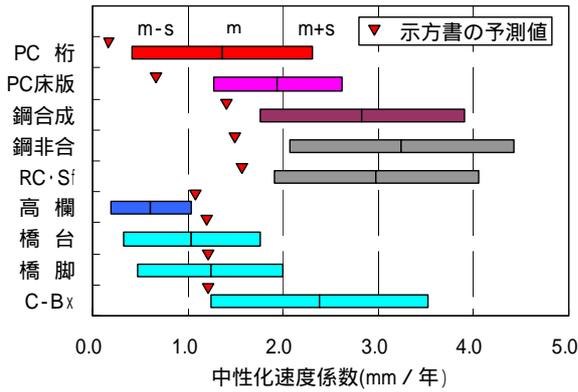


図 - 12 中性化速度係数の分布状況

回っている。高欄・橋台・橋脚の中性化速度係数は、上部工に比べ小さく、平均値は 0.6~1.2 mm/年で、高欄<橋台<橋脚の順で大きくなっている。これらの傾向および要因は、中性化深さにおける結果と同様と考える。雨水の影響の有無の差は、ほぼ同じ配合である高欄の中性化速度係数と、鋼非合および RCSf の中性化速度係数の平均値を比較すると、約 5 倍になる。これは、C-Bx が 4 倍であることと概ね同じ傾向にある。実構造物の中性化速度係数は、雨水の影響等、部位の環境により大きく異なることを示している。

同じ配合である鋼非合と RCSf の中性化速度係数の平均値は、それぞれ 3.0, 3.2 mm/年と、鋼非合が大きくなっている。この理由は、部位の設置高さに関連すると想定される。鋼橋は RCSf より支間長が長く桁高が大きく鋼桁があるため、部位は高い位置になる。今回の調査箇所の鋼非合と RCSf の平均高さは、それぞれ 8.8, 6.0 m で 2.8 m の差がある。地盤より高い位置に部材があることで、より乾いた環境になっていることが、その要因と推察する。

(3) 示方書との比較

各構造部位の W/C の平均値と中性化速度係数の平均値の関係を図 - 13 に示す。図中には、示方書の予測式より求められる値と併せて示す。雨水の影響を受けない桁・床版の部位の中性化速度係数 A は、式(2) により示される。

$$A = 18.9W/C - 6.4 \quad (2)$$

この結果、雨水の影響を受けない桁、床版の中性化速度係数は、実構造物では示方書の乾燥しやすい環境の予測値に比べ、W/C = 0.41 で 7 倍、W/C = 0.51 で 2 倍を越え、予測値を大きく上回っている。他方、雨水の影響を受ける高欄・橋台・橋脚の中性化速度係数は、示方書の乾燥しにくい環境の予測値と概ね合致している。実構造物の雨水の影響を受けない部位は、示方書の想定より乾燥しやすい環境にあることや打設方向の影響等を受

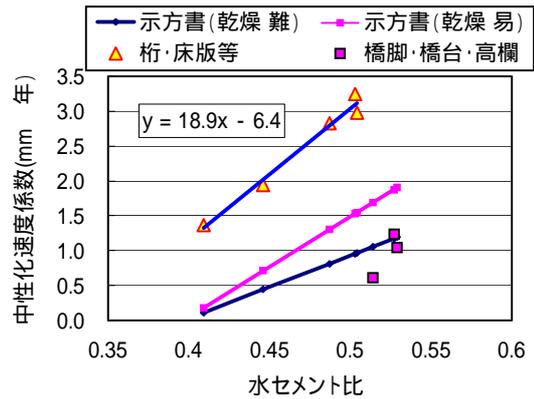


図 - 13 W/C の平均値と中性化速度係数の平均値の関係

けることから、示方書の中性化速度係数の予測値を大きく上回ることになると推察する。このことから、雨水の影響を受けない部位では、中性化による劣化リスクが高くなることから、示方書の中性化の予測方法を再検討する必要があると考える。

5. 耐久性に関する検討

中性化に対する耐久性は、中性化の鉄筋腐食開始位置や鉄筋位置への到達時期により照査される。ここでは、構造部位の設計かぶり小さく、中性化が早く鉄筋位置に到達すると考えられる PC 床版、鋼合成、RCSf、鋼非合の 4 構造部位について、鉄筋位置への到達確率を予測する。予測では、鉄筋腐食が開始するとされる「鉄筋位置 - 8 mm」(以下、中性化残り 8 mm) 位置⁴⁾への到達確率も併せて求める。中性化深さの鉄筋位置や中性化残り 8 mm 位置への到達確率の算定では、コンクリートの中性化深さと鉄筋のかぶりのバラツキを考慮する信頼性工学による手法を用いる⁵⁾。予測は、次の条件により実施する。

- 1) 中性化の進行は、調査より得られた中性化速度係数の平均値を用い t 則により予測する。
- 2) 中性化深さの変動係数は、図 - 12 の中性化速度係数の平均値と標準偏差より求め、PC 床版 0.35、鋼合成 0.38、RCSf および鋼非合 0.36 とする。
- 3) 各構造部位の設計かぶりは表 - 1 に示す値を用い、かぶりの標準偏差は 親不知海岸高架橋の測定データ⁶⁾を参考に 7.5 mm として、かぶりの変動係数を求める。

各構造部位の鉄筋位置および中性化残り 8 mm 位置への経過年数による中性化深さの到達確率の予測を、図 - 14 に示す。図より、最も鉄筋位置への中性化到達の早い構造部位は、鋼非合であり、続いて鋼合成、RCSf、PC 床版の順になる。建設 50 年後の鉄筋位置への中性化深さ到達確率は、鋼非合で 26%、鋼合成で 17%、RCSf

で 10%と予測され、PC 床版では 1%と中性化による劣化のリスクは小さい。これらの各部位の中性化が、鉄筋腐食が開始するとされる中性化残り 8 mm 位置から鉄筋位置まで達する期間は、概ね 25 年である。この間の平均腐食電流密度を $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ と考える⁴⁾と、中性化が鉄筋位置に到達するまでの鉄筋腐食総量は、ファラデー第 2 法則により求めると $46\text{mg}/\text{cm}^2$ と予測される。鉄筋腐食総量が $10\text{mg}/\text{cm}^2$ になると腐食ひび割れが生ずる⁷⁾とされることから、中性化が鉄筋位置に到達する時期には腐食ひび割れの発生するリスクは高くなると想定される。特に、設計かぶりの小さい鋼橋床版は、中性化の劣化リスクが高いと推察される

これら中性化の劣化リスクの高い構造部位には、今後、中性化進行を抑制する予防保全対策の処置を実施する必要があると考える。

6. 結論

建設後 19~36 年経過した北陸地方での道路構造物の部位での中性化深さの進行特性をまとめると次のようになる。

- 1) 上部工の中性化深さの平均値は 7.8~18.4 mm で、PC 桁 < PC 床版 < 鋼合成 < RCSf < 鋼非合の順に大きくなり、概ね W/C に比例する。雨水の影響を受ける環境にある高欄・橋台・橋脚は、中性化深さの平均値 3~6.8 mm で、上部工より小さい。
- 2) コア内の中性化領域の最大測定値の平均と中性化深さ平均の差は、上部工で 4~7mm、高欄・橋台・橋脚で 6~7mm である。
- 3) C-Bx の側壁および頂版の中性化速度係数は、雨水の影響を受ける翼壁に比較すると、それぞれ 2.7 倍、4 倍になる。頂版の中性化速度係数が側壁より大きいのは、コンクリート打設時のブリーディングに伴う水みち等の影響によると推察する。
- 4) 橋梁上部工での中性化速度係数の平均値は、1.4~3.2 mm 年、高欄・橋台・橋脚では 0.6~1.2 mm 年であり、各構造部位の値の順は中性化深さと同様である。ほぼ同じ配合の床版の部位では、雨水の影響の有無による中性化速度係数の差が 5 倍程度ある。
- 5) 実構造物の各部位の中性化速度係数の平均値と示方書の予測値とを比較すると、雨水の影響を受ける部位では概ね合致するが、桁・床版では実構造物の平均値が示方書の乾燥しやすい環境の予測値に比べ 2 倍を越え、予測値を大きく上回っている。実構造物では、より乾燥しやすい環境にあることや打設方向の影響等を受けることによると推察する。雨水の影響を受けない部位は、中性化による劣化リスクが高くなることから、

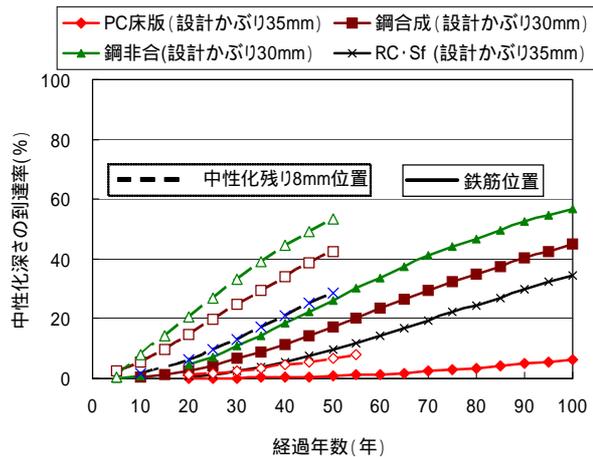


図 - 14 鉄筋位置および中性化残り 8mm 位置への経過年数による中性化深さ到達確率の予測

示方書の中性化の予測方法を再検討する必要があると考える。

- 6) 建設 50 年後の鉄筋位置への中性化深さ到達確率は、鋼非合で 26%、鋼合成で 17%、RCSf で 10%と予測される。特に、設計かぶりの小さい鋼橋床版の中性化劣化リスクが高いと推察され、中性化抑制の予防保全対策の実施が必要と考える。

参考文献

- 1) Wierig H.J: Longtime studies on the carbonation on concrete under normal outdoor exposure, RIFEM SEMINER DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES UNDER NORMAL OUTDOOR EXPOSURE, pp.239-249, 1984.
- 2) 森本 康照ほか：コンクリート内部に存在する鉄筋とコンクリート界面における統一的透水係数の構築，コンクリート工学年次論集，Vol.25，No.1，pp.593-598，2003.3.
- 3) 2007 制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp.94-95，土木学会.
- 4) 佐伯 竜彦ほか：中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価，土木学会論文集，No.532/ 30，pp.56-66，1996.2
- 5) 岸谷 孝一ほか，耐久性シリーズ 中性化，技術堂出版，pp.47-pp.52，1986.5.
- 6) 齋藤 正司ほか：北陸自動車道 親不知海岸高架橋上部工の塩害予防保全対策，コンクリート工学，Vol.46，No.10，pp.24-34，2008.10.
- 7) 2007 制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp.95-96，土木学会.