

論文

[1121] 寒冷地海岸部コンクリート橋の耐久性調査

正会員○庄谷征美（八戸工業大学工学部）

正会員 月永洋一（八戸工業大学工学部）

正会員 杉田修一（八戸工業大学工学部）

板谷 馨（ショーボンド建設青森営業所）

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化の事例が多く報告されており、塩害やアルカリ骨材反応あるいは凍害等が多くその原因として指摘されている。青森県の場合は、三方が海に囲まれており、寒冷地でもあることから、塩害および凍害を受けやすく、また反応性骨材の存在も懸念されることから、コンクリート構造物にとっては、極めて苛酷な環境下にあるといえる。

筆者らは、青森県内のコンクリート構造物を対象に、劣化の実態と原因および表層部の品質評価に着目した試験の有用性について検討を進めている。本報告は、県内の劣化が比較的進行している橋梁について、特に表層部の品質評価に着目した各種試験も実施し、劣化程度や原因について総合的に検討した調査結果を述べるものである。

2. 調査構造物の概要

調査対象3橋梁の概要を表1に示す。A橋およびB橋は日本海側に面するPC橋で供用後約14年、C橋は陸奥湾に面するRC橋で供用後約52年経過している。

表1. 橋梁の概要

		Bridge-A	Bridge-B	Bridge-C			
所在地		青森県日本海側	青森県日本海側	青森県むつ湾側			
型式		ボステンPC 単純桁、T桁	ボステンPC 単純桁、T桁	RC 単純桁、T桁			
竣工年月		昭和51年	昭和51年	昭和13年			
橋長 (幅員)		33m (1径間 6本 主桁) (10.0m)	163m (5径間 6本 主桁) (10.0m)	103m (10径間 3本 主桁) (5.5m)			
設計荷重		T, L-20	T, L-20	T-6			
設計基準強度	上部構造 kgf/cm <sup>2</sup>	主桁	横桁	主桁	横桁	主桁	横桁
	下部構造 kgf/cm <sup>2</sup>	橋台	-	橋台	橋脚	橋台	橋脚
架設位置	距離	海岸線から約20m		海岸線から約20m		海岸線から約200m	
	高さ	海面から-約5.6m 桁下-約1.8m		海面から-約5.6m 桁下-約5.6m		海面から-約2.8m 桁下-約2.4m	

表2. 試験目的・項目および方法

試験目的	試験項目	試験方法
配合	配合分析	CAJ コンクリート専門委員会報告 F-18 に準拠
躯体強度	コア試料圧縮強度	JIS A 1107 コンクリートコア圧縮試験方法
表層部の 力学的特性	反発度	シュミットハンマー法に準拠
	超音波伝搬速度	超音波伝搬速度法に準拠
	接着引張強度	15mm深さの溝切り部に、円形鋼片(φ50×20)を接着し、建研式接着力試験機により引張強度を測定
	貫入深さ	ASTM C803-82を参考にスプリング反発式による貫入抵抗試験機により貫入深さを測定
表層部の 物理・化学的特性	簡易透気速度 <sup>1)</sup>	直径5mm深さ30mmの穴の真空度が30mmHg低下する時間を求めて透気速度を測定
	ポロシテ	水銀注入式ポロシメーターにより総細孔容積と平均細孔直径を測定
	鉄筋かぶり厚さ	はつりによる鉄筋露出後、実測
	鉄筋腐食程度	はつりによる鉄筋露出後、目視により判定
	鉄筋自然電位	塩化銀電極による自然電位を測定
	塩素イオン含有量	JCI案 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法に準拠、電量測定法による分析器を使用
	中性化深さ	フェノールフタレイン1%アルコール溶液噴霧による変色境界線までの深さを測定
	塩素イオン浸透深さ	0.1%フルオロセインナトリウム溶液+2%硝酸銀溶液噴霧による変色境界線までの深さを測定
	硫酸イオン浸透深さ	0.2%ジメチルスルホナゾIII溶液+2%塩化バリウム溶液噴霧による変色境界線までの深さを測定
	ASR反応性骨材の確認	化学法(総プロ修正案)、目視岩石種鑑定、X線回折法、化学成分分析、コア膨張量測定(総プロ案)

3橋とも、冬期の季節風が卓越して海塩を供給する厳しい環境下にあると共に、日最低気温が0℃を下回る年間日数が約90~100日程度と寒冷気象条件下にもある。

### 3. 調査内容の概要

試験目的・項目・方法を表2に示す。本調査では、コンクリートの劣化は表面から始まり内部へ進むという観点から、表層部の品質評価に重点をおいている。表層部の品質については、力学的特性の他、細孔構造等の性状も捉える必要があると考え、各種試験を実施した。ここでは図1および図2に示したように、試験の簡便性を重視して、前者の見地から接着引張強度試験、後者の見地から簡易透気性試験<sup>1)</sup>に着目している。調査位置は図3に示した。

### 4. 結果および考察

#### 4. 1 劣化程度の実態

3橋の調査結果一覧を表3に示す。また、図4~図6には塩素イオン含有量、図7にはC橋の自然電位測定結果、表4には使用されていた粗骨材の岩石学的特徴を示した。以下試験項目ごとに結果の概要を述べる。

#### (1) 外観観察による損傷状況

A橋：山側の主桁に、著しいひび割れが数本みられた。この内の1本は、桁底面で、部分的に被りコンクリートがシース下端まで剥落しており、引張鉄筋も著しく腐食していることが確認された。橋台には、軽微ではあるがスケーリング劣化も認められた。

B橋：橋脚の海側に著しい亀甲状ひび割れと白色の析出物が認められた。橋脚山側は、比較的健全であった。

C橋：主桁は、表面のモルタルが損失して粗骨材が露出している部分が多く、全体的にスケーリング劣化が著しい。また、主筋に沿ったひび割れも観察された。親柱は、著しい亀甲状ひび割れと白色の析出物が認められた。

#### (2) 躯体強度

A橋およびB橋：コア圧縮強度は全試料とも設計基準強度 $f'_{ck}$ を満足しているが、部分的には山側に比べて海側から採取した試料の値が低く、静弾性係数も低下している。C橋：コア圧縮強度は横桁および橋脚とも $f'_{ck}$ を満足したのは1試料のみで、他の5試料は下回る値を示し、静弾性係数も著しく低下している。

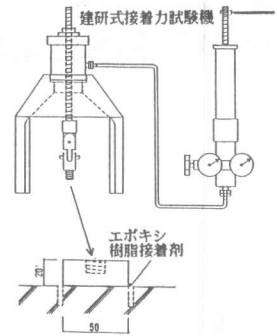


図1. 接着引張強度試験

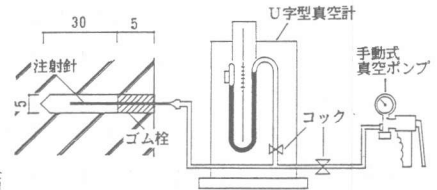


図2. 簡易透気性試験

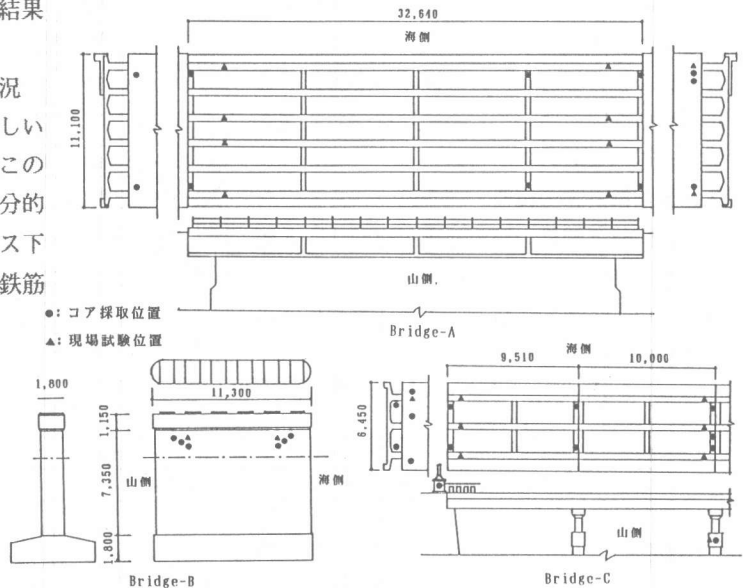


図3. 試験位置

表3. 試験結果一覧

(3) 表層部強度性状

A橋およびB橋：反発度、音速および接着引張強度の値にも海側で低いという傾向がみられる。C橋：他の2橋に比べ、表層部の強度は低く、音速の値が顕著にその傾向を示している。

(4) 簡易透気速度・ポロシチー

A橋およびB橋：簡易透気速度およびポロシチーの結果には、海山側の違いによる差はみられないが、比較的大きな値を示す箇所もあり、強度面では健全であっても、幾分ポロシチーが大きめとなっている箇所もあった。C橋：簡易透気性試験は、試験穴内部の真空度が上昇せず、測定不能であった部分が5箇所あった。主桁では、簡易透気速度およびポロシチーが著しく大きな値を示す箇所があった。

(5) 中性化深さ・塩素イオン浸透深さ・硫酸イオン浸透深さ

A橋およびB橋：中性化深さの最大値は、A橋橋脚山側で12.5mmであるが、部位別に値をみると橋脚>横桁>主桁の順となり、 $f'_{ck}$ の値の大きさに対応している。W/C=40%として岸谷式より標準的中性化深さを求めると約7mmとなるが、平均値のみを見た場合は、A橋の主桁が2mmを示す以外、ほぼこの値に近い。塩素イオン浸透深さの場合は、海側に比べて山側で顕著であるが、中性化深さおよび硫酸イオン浸透深さの場合には、この傾向はみられない。C橋：中性化深さの最大値は、主桁で76.7mm、最小値は橋脚で48.9mmであった。W/C=60%と仮定して岸谷式より標準的中性化深さを求めると約27mmとなるが、主桁平均値48mm、横桁平均値41mmは、この値を10mm以上こえており、橋脚平均値は32mmとほぼ近い値となっている。塩素イオンおよび硫酸イオンの浸透深さは、測定位置で値の大小が概略対応しているが、全体的に中性化深さと同程度かやや大きめとなっている。

(6) 塩分含有量

A橋およびB橋：可溶性塩分の場合、3cmの深さで、A橋では、橋台海側5.5kg/m<sup>3</sup>、横桁海側1.5kg/m<sup>3</sup>、横桁山側1.2kg/m<sup>3</sup>を示し、B橋では、橋脚海側0.9kg/m<sup>3</sup>、橋脚山側6.7kg/m<sup>3</sup>を示した。著しく高濃度の塩分が検出されたが、山側の部材は、海側の部材に比べて塩分の浸透蓄積が多い傾向にある。C橋：A、B橋と同様、塩分浸透は著しいが、部材内部に均等に浸透蓄積する傾向がある。また、ピークが内部5cmとなる場合があった。

試験項目	Bridge-A			Bridge-B	Bridge-C		
	主桁	横桁	橋台	橋脚	主桁	横桁	橋脚
配合分析 水セメント比(%)		44.3	(74.8)	52.8		(80.6)	(77.5)
コア試料圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	Max	336	270	364		169	275
	Min	295	231	267		75	133
	平均	318	241	302		130	188
弾塑性係数(×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	Max	2.98	3.60	2.24		1.29	2.26
	Min	2.33	2.19	1.79		0.72	1.50
	平均	2.74	3.02	2.00		1.01	1.65
反発度	Max	63.3	51.2	53.4	44.2		45.3
	Min	52.4	48.1	49.5	28.1		42.2
	平均	59.4	49.7	50.7	36.9		43.8
超音波伝搬速度(km/sec)	Max	4.57	4.16	4.24	2.08		2.00
	Min	2.92	2.61	2.84	0.55		1.54
	平均	3.48	3.39	3.55	1.63		1.77
接着引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	Max	49.1	28.4	31.8	39.0		21.4
	Min	34.3	24.8	18.9	14.0		17.7
	平均	42.1	26.6	27.9	23.0		19.6
貫入深さ(mm)	Max	3.4	4.1		4.7		3.7
	Min	3.2	4.1		3.5		3.7
	平均	3.3	4.1		4.2		3.7
簡易透気速度(mmHg/sec)	Max	3.75	1.37	1.47	9.64		2.48
	Min	0.50	1.21	0.90	7.75		
	平均	1.31	1.29	1.13	8.92		
総細孔容積(cc/g)	Max	0.168	0.137	0.181	0.792		0.186
	Min	0.074	0.089	0.154	0.141		0.135
	平均	0.114	0.113	0.170	0.371		0.161
平均細孔直径(μ)	Max	683	361	527	1515		571
	Min	233	291	280	423		405
	平均	416	326	422	876		488
気孔率(%)	Max	28.8	25.4	33.5	67.2		32.7
	Min	15.7	18.1	27.6	28.1		25.8
	平均	22.2	21.7	30.0	43.2		29.2
中性化深さ(mm)	Max	3.1	8.9	12.5	9.8	76.7	50.9
	Min	1.0	6.3	5.5	2.7	31.5	28.7
	平均	2.2	7.7	8.1	6.3	48.4	41.0
塩素イオン浸透深さ(mm)	Max	20.3	4.3	7.6	11.8	120.4	61.2
	Min	2.8	4.0	5.6	4.6	26.9	15.2
	平均	11.3	4.2	6.4	8.0	57.9	35.3
硫酸イオン浸透深さ(mm)	Max	6.5	9.0	9.2	10.5	88.8	64.4
	Min	1.7	6.4	6.0	5.3	31.5	30.6
	平均	3.5	7.7	7.6	7.4	51.8	42.4
コア残存聴量 7W (×10 <sup>-3</sup> )		—		約 520	親柱 約 1030		

### (7) 腐食程度

A橋およびB橋：A橋の山側主桁の底面で被りコンクリートの剥落が認められた部分では、鉄筋およびシースが断面欠損に至るまで腐食していた。主桁の健全部研り部分8箇所では、総ての箇所腐食無しあるいは極く小面積の斑点状腐食であった。B橋の場合は、橋台海側研り部2箇所の内、1箇所は断面欠損までは至っていないが、鉄筋の全周にわたって浮き錆が生じていた。

C橋：研り部分8箇所のすべてが、全周腐食または断面欠損に至る腐食状態にあった。自然電位測定でも、総て-350mvより卑の領域に入り、ASTM規格に照し合せると、90%以上の腐食の可能性がある領域に入っている。

### (8) アルカリ骨材反応性

化学法による反応性骨材の確認では、A橋横桁、B橋橋脚およびC橋横桁・親柱とも有害の領域にあり、7週におけるコア残存膨張量は、B橋橋脚で500 $\mu$ 、C橋親柱で1000 $\mu$ をこえており、総プロ判定基準の3ヵ月500 $\mu$ をこえている。粗骨材は、構成鉱物に、長石、石英、クリストパライトが同定され、化学組成もSiO<sub>2</sub>が50%以上検出されているため、特にB橋脚、C橋脚でアルカリ骨材反応による劣化も複合して生じていると考えられる。

### 4. 2劣化作用を受けたコンクリート表層部の品質に関する一考察

前章では、実橋の劣化程度と形態について調査結果の概要を述べた。筆者らは、コンクリートの耐久性について、表層部の力学的性状および細孔構造や中性化などの物理・化学的性状の変化に着目して行なうべきと考え、前者の見地から接着引張強度、後者の見地から簡易透気性について検討を進めている。以下、これらの観点から、3橋の全データを用いて、考察した結果を耐久性との関連から述べる。

#### (1) 接着引張強度の特性

図7には、接着引張強度と反発度の関係、図8には、貫入深さととの関係、図9には音速との関係を示した。本実橋

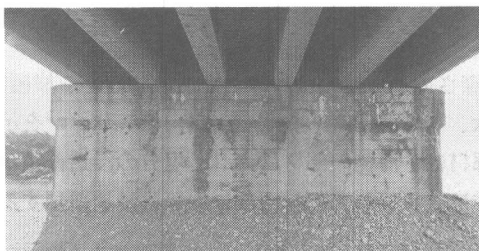


写真1. B橋橋脚の劣化状況

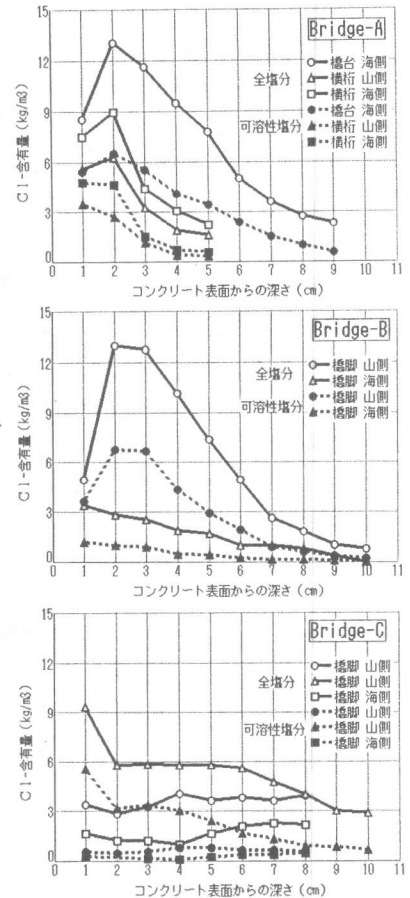


図4. C1-量分布状況

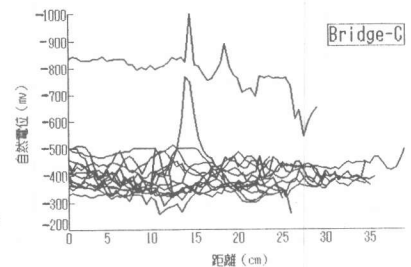


図5. 自然電位測定例（C橋）

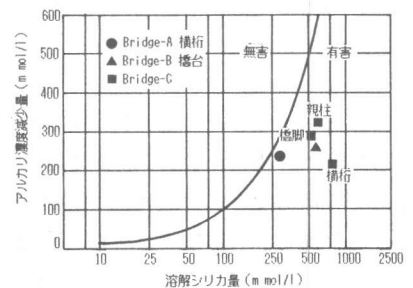


図6. 化学法（総プロ）による粗骨材の判定

表4. 使用されていた粗骨材の岩石学的特徴

橋梁記号	部位	目視鑑定 (○:多量, △:中量, △:少量 ?:薄片鑑定を要す)	X線回折同定鉱物	化学組成							
				CaO	MgO	Fe <sup>2+</sup> O <sup>3</sup>	Al <sup>2+</sup> O <sup>3</sup>	Na <sup>2</sup> O	K <sup>2</sup> O	SiO <sup>2</sup>	SO <sup>3</sup>
Bridge-A	橋台	◎プロピライト、○流紋岩	長石、石英、クリストパライト 輝石	8.93	3.97	10.54	14.95	0.65	0.36	52.34	0.12
	横桁	◎流紋岩、○プロピライト	長石、石英、クリストパライト 緑泥石、黒雲母	5.03	4.00	8.07	14.67	0.20	0.01	59.45	0.14
Bridge-B	橋脚	◎流紋岩、○プロピライト	長石、石英、クリストパライト	6.80	1.54	7.25	15.06	0.55	0.15	57.70	0.15
Bridge-C	橋脚	◎流紋岩、○?プロピライト ○?頁岩、○安山岩質凝灰岩	長石、石英、クリストパライト 輝石	2.90	1.64	4.72	10.01	0.30	0.66	73.43	0.20
	横桁	◎流紋岩	石英	1.37	0.45	1.72	1.80	0.35	0.10	89.80	0.16
	親柱	◎流紋岩、○?プロピライト △?頁岩	長石、石英	2.17	0.50	1.97	2.43	0.20	0.10	87.58	0.16

のデータでは、先に述べたようなC橋の劣化程度が最大であり、主桁の $f'_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$ に対し接着引張強度は14~24 $\text{kgf/cm}^2$ 、すなわち(1/10~1/17) $f'_{ck}$ と小さい。これに対し、A橋では、比較的健全であり、接着引張強度は主桁部で34~49 $\text{kgf/cm}^2$ ( $f'_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$ )と $f'_{ck}$ に対する割合も1/8~1/12弱とほぼ健全な範囲にある。反発度、貫入深さ、音速は、それぞれ接着引張強度と対応して変化しており、両者の相関も0.7~0.8内外の値と良好といえる。また、B橋のアルカリ骨材反応と判定される部位では、破線で囲んだ部分のように接着引張強度や超音波速度に幅があり、品質のパラツキが大きいことが分る。図10には、接着引張強度と中性化深さの関係を示した。A橋では中性化の進行に伴い、組織が緻密変化するためか、強度は増大する傾向にある。C橋では、中性化深さは強度と関連していないことが分る。これは、ひび割れ等の欠陥の程度が結果を左右するためであろう。以上のように、接着引張強度によっても、ある程度表面の劣化進行状況を捉えることが可能であると判断される。

(2)簡易透気速度の特性

図11には、総細孔容積と簡易透気速度の関係を示した。C橋データでは、透気速度が無限大(測定不能)のものもあることなど両者の対応は明確ではない。図12は、簡易透気速度の逆数を透気抵抗性と考え、かさ容積当りの細孔容積比を気孔率(ポロシティー)Pとして表すと、Parrot<sup>2)</sup>が提唱する $\alpha P^{-4}$ の関係が概略成立することを示したものである。係数 $\alpha$ は、10倍程度の幅を有するが、 $P>35\%$ では、ほとんど透気抵抗性はなくなるなどが認められる。これは、簡易透気速度が耐久性損失の尺度として有用であることを示すものである。なお、C橋は、全般に透気抵抗が小さい。これは、貧配合であったと推定されることや目視等によりひび割れ等の欠陥が多くみられたことと符合する。

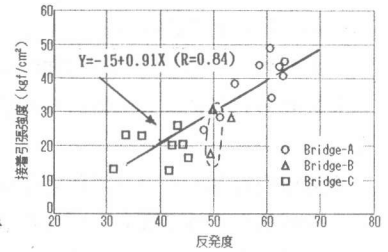


図7. 反発度と接着引張強度の関係

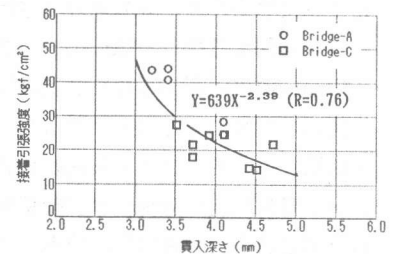


図8. 貫入深さと接着引張強度の関係

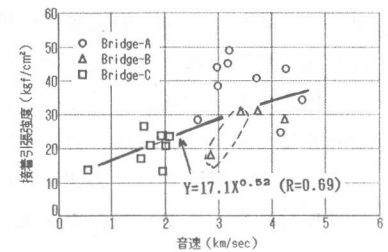


図9. 音速と接着引張強度の関係

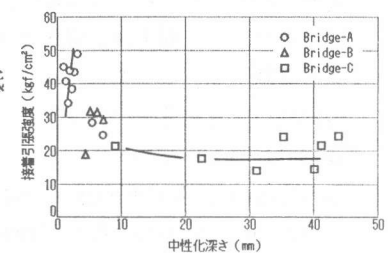


図10. 中性化深さと接着引張強度の関係

### (3) その他の特性

図13には、気孔率Pと中性化深さの関係を示した。全般に、C橋コンクリートにみられるように、気孔率Pがおよそ30%をこえると、この増加により中性化は著しく進行している。気孔率Pが30%以下では、P=20%程度で極小となるような、下に凸な関係となる。これは、品質に欠陥を生じていない場合には、中性化により細孔容積が減少するためと考えられる。図14は、中性化深さと塩素イオン浸透深さの関係を示したもので、図13と同様な傾向を示すことが分る。中性化深さが4~5mmの時に、塩素イオン浸透深さが最小となるのは、細孔構造が中性化により緻密化し、イオンの拡散が妨げられたためと考えられる。図13、図14の関係は、組織にひび割れ等の大きな欠陥の有無によって異なった結果を示すもので興味深い。

### 5. まとめ

青森県内海岸沿いの比較的劣化が進行している供用後約10~50年のPC橋2橋およびRC橋1橋に着目し、表層部の各種試験も含め、その劣化性状、原因などを検討した。その結果、全橋梁の各部位で塩分浸透は可溶性塩分量で $1\text{ kg/m}^3$ をはるかに超えるなど予想以上に大きく、部位によっては著しい鉄筋の腐食が認められた。供用年数50年のRC橋では、中性化深さが被り厚さ以上に進行していたことも認められた。全橋梁とも、凍害による劣化は比較的軽度であると判断されたが、骨材品質の分析やコア膨張量の測定から、アルカリ骨材反応と特定できる劣化部位もPC橋橋脚やRC橋親柱で認められるなど、諸々の原因による劣化を受けていることが判明した。さらに、凍害やアルカリ骨材反応による劣化にも塩分浸透の程度が深く関わっている可能性が指摘された。

劣化作用を受けたコンクリート表層部の品質変化は、接着引張強度、簡易透気速度、更に中性化などを総合的に判断すれば、判定可能であるとの知見が得られた。これについては、更に検討を重ねてゆく所存である。

〔謝辞〕調査全般にわたり青森県土木部より多大なるご協力をいただきました。各種分析に当っては日本セメント(株)中央研究所と太平洋金属(株)よりご協力いただきました。深く謝意を表します。  
〔参考文献〕

- 1) 長野基司、笠井芳夫、コンクリートの透気性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.231~232(1988)
- 2) L.J.Parrott、Measurements and Modelling of Moisture, Microstructure and Properties in Drying Concrete、Pore Structure and Materials Properties、Proc. of 1st International RILEM Congress、vol.3、pp.135~142(1987)

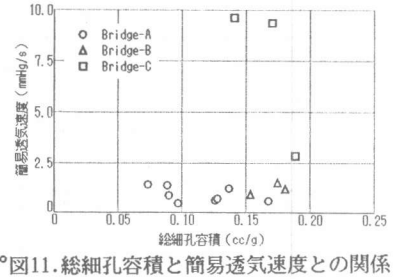


図11. 総細孔容積と簡易透気速度との関係

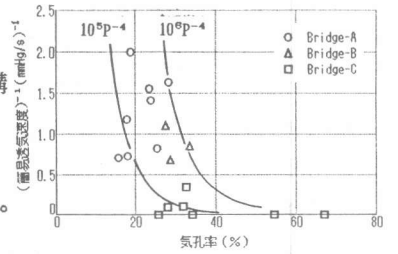


図12. 気孔率と(簡易透気速度)<sup>-1</sup>の関係

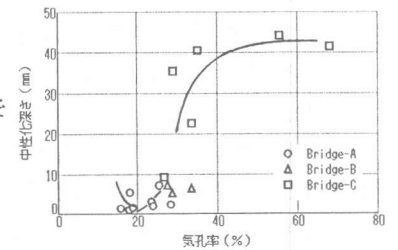


図13. 気孔率と中性化深さの関係

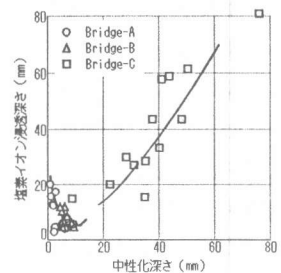


図14. 中性化深さと塩素イオン浸透深さの関係