

論文

[1089] 寒冷地におけるコンクリート構造物の複合劣化に関する研究

山下英俊*¹・堺 孝司*²・熊谷政行*³・喜多達夫*⁴

1. まえがき

コンクリート構造物は種々の有害な作用を受けている。寒冷地においては、それらの中でも特に、凍結融解作用が重要な問題となる。凍害は、コンクリートの品質、構造物の置かれる環境、水の供給程度などの要因に支配され、それらの影響度合いにより、劣化の程度、範囲、形態が異なる[1]。また、塩害や中性化などの他の劣化要因との複合効果によっても異なってくる。このようなことから、コンクリート構造物の凍害劣化を定量的に評価するのは難しい現状にあると言える。

以上のことを背景に、本研究では、実際のコンクリート構造物の劣化状況を、部材、部位、発生要因別に調査し、凍害の現状を整理した。また、凍害による劣化を定量的に評価するために、表面強度、超音波速度および細孔径分布を測定し、凍害範囲を推定した。また、凍害と塩害、凍害と中性化の複合効果を調べるために、塩分浸透量と中性化深さも測定した。

2. 凍害調査の概要

2.1 1次調査

凍害調査は、図-1に示す通り、昨年の札幌、小樽、室蘭地区に引き続き、紋別、網走、知床、北見地区のコンクリート橋を中心に、調査可能であった約60橋について行った。調査は図-2の調査フローに示すように、劣化の程度、範囲、形態および環境、水の供給、コンクリートの品質について行った。また、複合劣化についても整理した。

2.2 詳細調査

1次調査の結果、著しい凍害が発生しているA橋および複合劣化が生じていると思われるB覆道(前回の調査対象)について詳細調査を行うこととした。調査構造物の概要は表-1に示す通りであり、調査位置は写真-1に示すA橋の6箇所(a~f)と、B覆道の健全部、ひびわれ部(亀甲状にひびわれが発生している部分)スケーリング部(排水管末端のコンクリート部で常に水の供給があり、スケーリングが発生している部分)とした。調査内容は、凍害の範囲を推定するために、シュミットハンマーによる

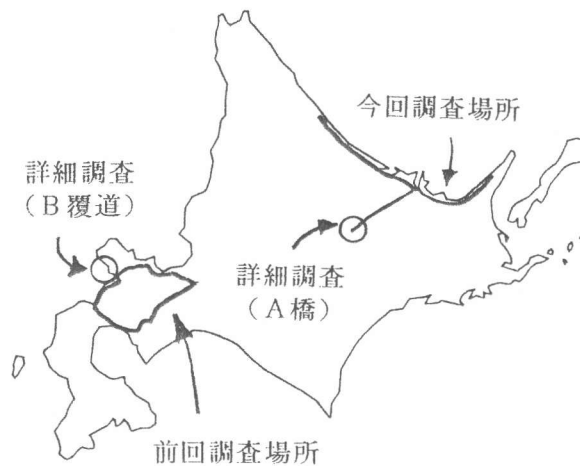
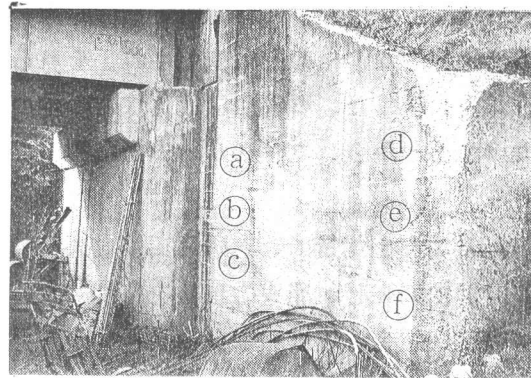
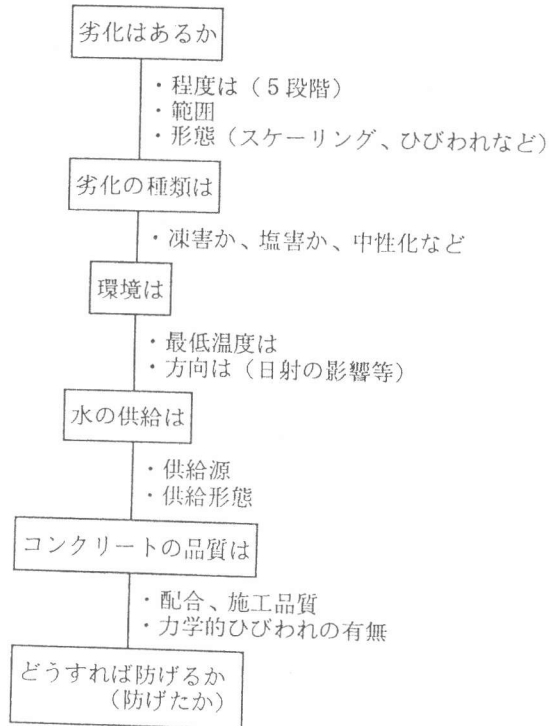


図-1 凍害調査位置図

* 1 (株) 間組技術研究所第2部第2研究室、(正会員)
 * 2 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室室長、工博(正会員)
 * 3 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室
 * 4 (株) 間組技術研究所第2部第2研究室室長、工修(正会員)

表-1 詳細調査構造物の概要

調査構造物	環境要因	水の供給要因	コンクリートの品質	劣化状況	複合劣化
A橋	山間部の橋台	雨雪直接	ブリージング大	端部にスケーリング	中性化
B覆道	海岸部の擁壁・柱	海水の飛来 雨雪直接	健全部と劣化部の差なし（品質普通）	ひびわれ スケーリング	塩害 中性化



凡例：Ⓐ健全上部 Ⓑ健全中部 Ⓒ健全下部
Ⓓ劣化上部 Ⓔ劣化中部 Ⓕ劣化下部

写真1 A橋調査位置

図-2 調査フロー図

表面強度、超音波による音速、採取したコア供試体を用いた細孔径分布測定を行った。また、複合効果を調べるために塩分浸透量、中性化深さの測定も行った。なお、凍害範囲の測定は、図-3に示すA橋の劣化部（写真1のⒹ～Ⓕ）の測点①～⑥とし、目視との比較を行った。

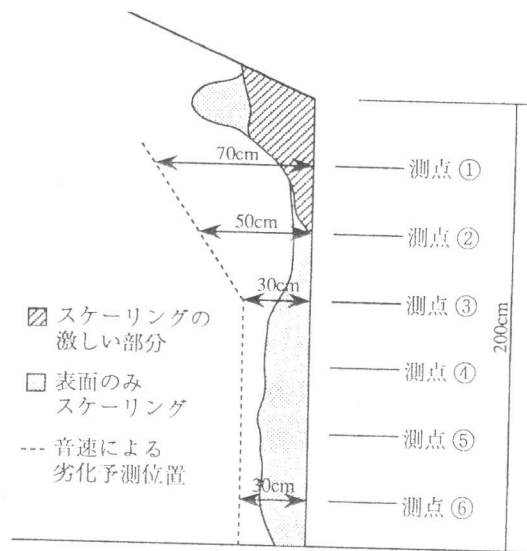


図-3 凍害発生範囲概要図

3. 結果および考察

3.1 1次調査の結果

表-2に構造物別の環境要因、水の供給要因、コンクリートの品質要因および劣化状況、劣化の程度を表す評点を示す。なお、評点は本調査のために作成した表-3に基づいた。前回は、海岸部の構造物が多かったため、特に桁下部の劣化が多くみられたが、今回は、海岸部の構造物は観光地のため古いものが比較的少なかったこと、および冬季における流水や風向きの影響で海水の飛来が少ないことなどより、前回と比べて劣化の著しい構造物は少なかった。しかし、山間部は昭和30年代の古い構造物がほとんど残っているため、大部分の橋台でスケーリングによる凍害劣化がみられた。写真2～4に特徴的な凍害の例を示す。写真2は、橋脚の上部にひびわれと

表-2 凍害調査結果一覧表

構造物の種類			竣工年	環境	水の供給要因		コンクリートの品質	劣化程度等		複合劣化
NO	部材	部位			要因	供給源		供給形態 ¹⁾	評点	
1	橋台	桁	S35年	平野	雨・雪・川水	AB・A, C	普, 普	3, 5	スケリク ²⁾ 、はく落	中性化
2	橋台	壁	S51年		雨・雪	AB	普	5	はく落	中性化
3	橋台	翼	S33年		雨・雪	ABC	普	5	亀甲状ひびわれ、スケリク ²⁾	中性化
4	橋台	翼	S43年		雨・雪	AB, C	普, 不良	5, 2	スケリク ²⁾ 、エロ	中性化
5	橋台	翼	S45年		川水	A	普	2	スケリク ²⁾	中性化
6	橋台	翼	S35年		雨・雪	AB, AB	普, 不良	3, 3	スケリク ²⁾ 、亀甲状ひびわれ	中性化
7	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB, AB	普, 不良	5, 2	スケリク ²⁾ 、ひびわれ	中性化
8	橋台	翼	S60年		雨・雪	AB, AB	普, 普	1, 2	異常なし、ひびわれ	なし
9	橋台	翼	S36年		雨・雪	AB	不良	5	スケリク ²⁾	中性化
10	橋台	翼	S41年		雨・雪	AB・A	不良	5	スケリク ²⁾	中性化
11	橋台	翼	S31年		雨・雪	AB	普	4	亀甲状ひびわれ、浮き	中性化
12	橋台	翼	S36年		雨・雪	AB, C	普	3, 4	スケリク ²⁾ 、鉄筋露出、エロ	中性化
13	橋台	翼	S43年		雨・雪	AB	普	1	異常なし	なし
14	橋台	翼	S47年		雨・雪	AB	普	2	ひびわれ、エロ	中性化
15	橋台	翼	S48年		雨・雪	AB, AB	普	1, 1	異常なし、異常なし	なし
16	橋台	翼	S43年		雨・雪	AB, AB	普	1, 1	異常なし、異常なし	なし
17	橋台	翼	S41年		雨・雪	AB	普	2	はく落	中性化
18	橋台	翼	S37年		雨・雪	AB	普	3	スケリク ²⁾	中性化
19	橋台	翼	S42年		雨・雪	BC, BC	普	1, 2	異常なし、つらら	なし
20	橋台	翼	S50年		雨・雪	AB	普	2	ホップアウト	中性化
21	橋台	翼	S54年		雨・雪	AB, AB	普	1, 1	異常なし	なし
22	橋台	翼	S54年		雨・雪	AB, AB	普	1, 1	異常なし	なし
23	橋台	翼	S51年		雨・雪	AB, AB	普	1, 1	異常なし	なし
24	橋台	翼	H2年		雨・雪	AB	普	1	異常なし	なし
25	橋台	翼	S28年		雨・雪	ABC, C	普	5, 5	ひびわれ、スケリク ²⁾ 、鉄筋露出	アル骨
26	橋台	翼	S30年		雨・雪	AB・A	普	5	スケリク ²⁾	中性化
27	橋台	翼	S47年		雨・雪	AB・A	普	1	なし	なし
28	橋台	翼	S28年		雨・雪	ABC	普	4	エロ、層状ひびわれ	中性化
29	橋台	翼	H元年		雨・雪	AB	普	1	異常なし	なし
30	橋台	翼	S38年		雨・雪	ABC, C	普	2, 2	スケリク ²⁾ 、エロ	中性化
31	橋台	翼	S35年		雨・雪	AB, AB	普	2, 2	ひびわれ、スケリク ²⁾	中性化
32	橋台	翼	S36年		雨・雪	AB, AB	普	1, 2	ひびわれ	中性化
33	橋台	翼	S45年		雨・雪	AB, AB	普	2, 3	スケリク ²⁾	中性化
34	橋台	翼	S36年		雨・雪	AB, C	普	3, 3	スケリク ²⁾ 、ひびわれ、エロ	中性化
35	橋台	翼	S38年		雨・雪	AB	普	1	異常なし	なし
36	橋台	翼	S46年		雨・雪	AB	普	5	亀甲状ひびわれ	アル骨
37	橋台	翼	S47年		雨・雪	AB	普	2	スケリク ²⁾	中性化
38	橋台	翼	S62年		雨・雪	AB, B	普	1, 1	異常なし	なし
39	橋台	翼	S55年		雨・雪	AB, C	普	5, 2	スケリク ²⁾ 、ひびわれ	中性化
40	橋台	翼	S63年		雨・雪	AB, AB	普	1, 1	異常なし	なし
41	橋台	翼	H3年		雨・雪	AB	普	1	異常なし	なし
42	橋台	翼	S43年		雨・雪	C	普	3	スケリク ²⁾	中性化
43	橋台	翼	S31年		雨・雪	C	普	2	エロ、つらら	中性化
44	橋台	翼	S50年		雨・雪	AB	普	1	異常なし	なし
45	橋台	翼	S34年	海岸	雨・雪・海水	AB・D, D	普	3, 3	ホップアウト、スケリク ²⁾ 、鉄筋露出	塩害
46	橋台	翼	S9年		雨・雪・海水	AB・D	普	3	スケリク ²⁾	塩害
47	橋台	翼	S50年		雨・雪・海水	AB・D	普	2	スケリク ²⁾	塩害
48	橋台	翼	S40年		雨・雪・海水	AB・D	普	2	スケリク ²⁾	塩害
49	橋台	翼	S52年		雨・雪・海水	AB・D	普	2	スケリク ²⁾	塩害
50	橋台	翼	S43年		雨・雪・海水	AB・D	普	5	スケリク ²⁾ 、ホップアウト、はく落	塩害
51	橋台	翼	S54年		雨・雪・海水	AB・D	普	2	ひびわれ、スケリク ²⁾	塩害
52	橋台	翼	S54年		雨・雪・海水	ABC・D	普	5	鉄筋露出、スケリク ²⁾	塩害
53	橋台	翼	S39年		雨・雪・海水	AB・D	不良	4	スケリク ²⁾	中性化
54	橋台	翼	S41年		雨・雪・海水	C・D	不良	2	エロ、つらら	中性化
55	橋台	翼	S41年		雨・雪・海水	AB・D	普	5	スケリク ²⁾	中性化
56	橋台	翼	S41年		雨・雪・海水	AB・D	普	3	浮き、エロ、スケリク ²⁾	塩害
57	橋台	翼	S41年		雨・雪・海水	AB・D	普	1	異常なし	なし
58	橋台	翼	S36年		雨・雪・海水	A・D	普	1	はく落	中性化
59	橋台	翼	S36年		雨・雪・海水	AB・D	普	5	鉄筋腐食、エロ、ひびわれ、	塩害
60	橋台	翼	S49年		雨・雪・海水	AB・D	普	4	浮き、ひびわれ、鉄筋露出	塩害
61	橋台	翼	S49年		雨・雪・海水	AB・D	普	4	浮き、ひびわれ、鉄筋露出	塩害
62	橋台	翼	S34年	山間	雨・雪	AB	不良	5	スケリク ²⁾	中性化
63	橋台	翼	S33年		雨・雪	AB	普	4	スケリク ²⁾	中性化
64	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
65	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
66	橋台	翼	S35年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
67	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
68	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
69	橋台	翼	S35年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
70	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
71	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
72	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
73	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
74	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
75	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
76	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
77	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
78	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
79	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
80	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
81	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
82	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
83	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
84	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
85	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
86	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
87	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
88	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
89	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
90	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
91	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
92	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
93	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
94	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
95	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
96	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
97	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
98	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
99	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化
100	橋台	翼	S34年		雨・雪	AB	普	5	スケリク ²⁾	中性化

* 1: 供給形態は、A (直接)、B (コンクリート表面経由)、C (欠陥部経由)、D (飛来) から選択

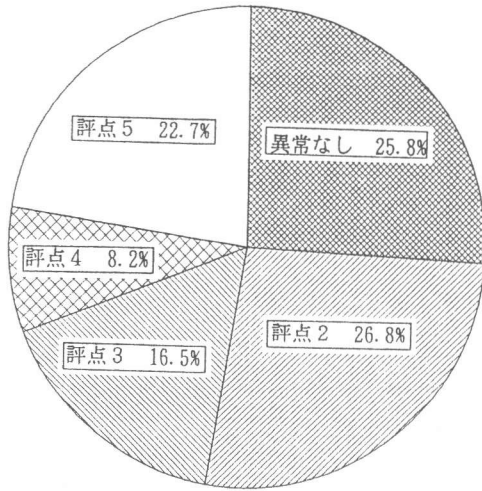


図-4 凍害劣化状況

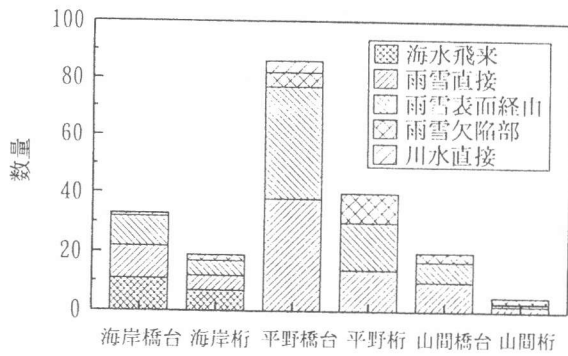


図-5 水の供給要因の影響

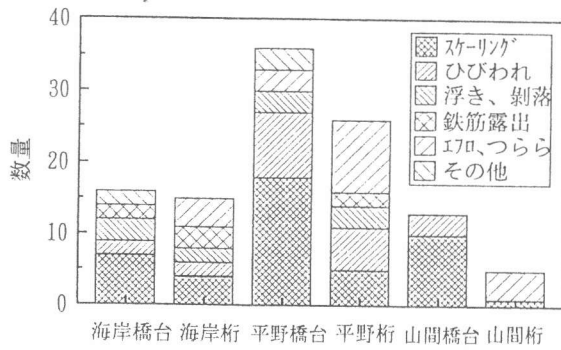


図-6 劣化形態

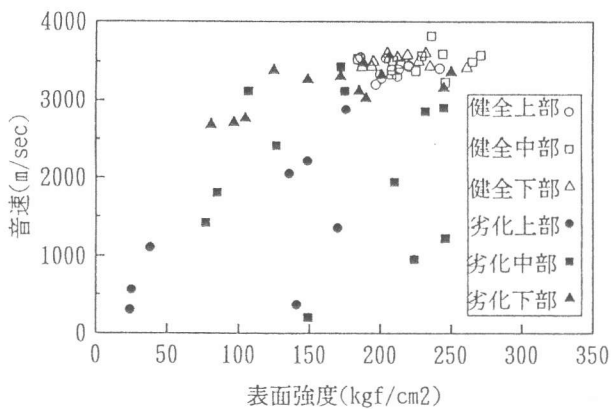


図-7 A橋の表面強度と音速の関係

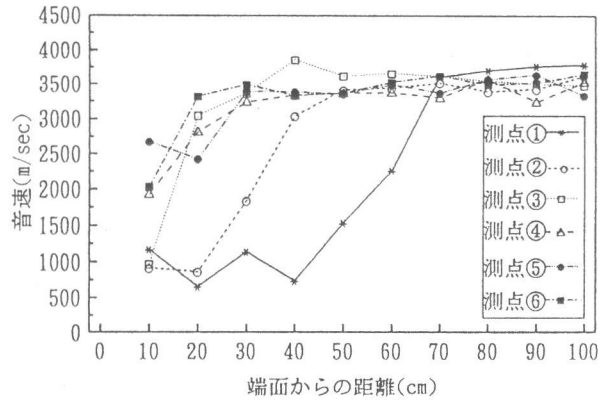


図-8 A橋の端面からの距離と音速の関係

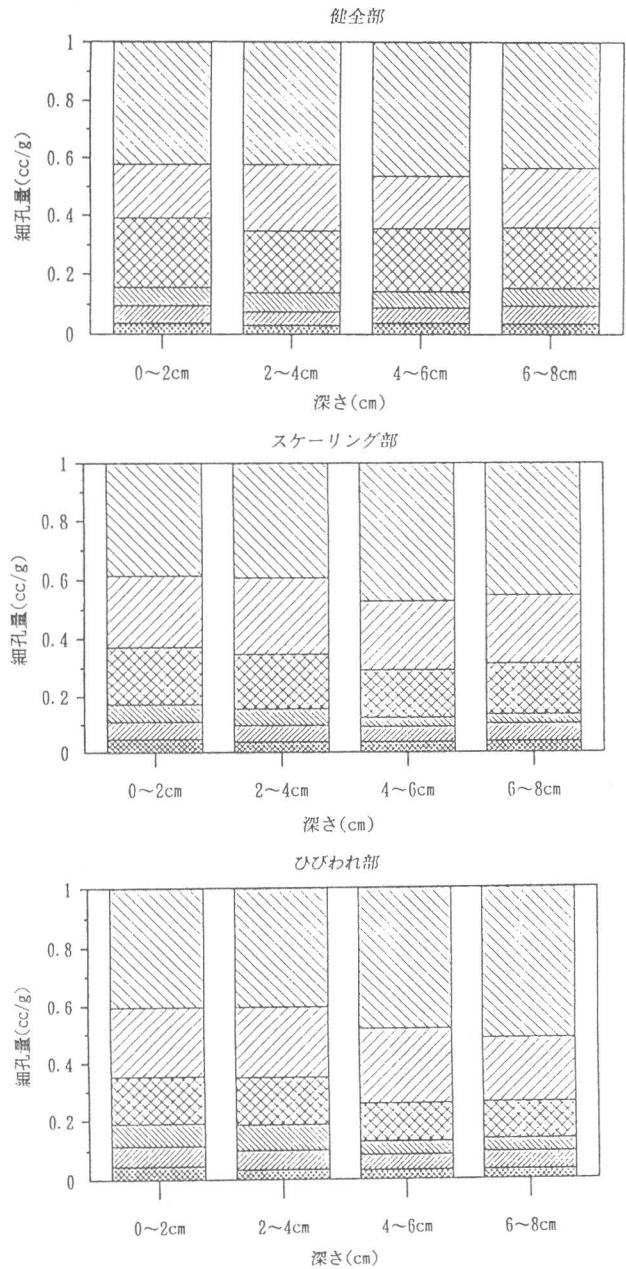


図-9 B覆道の細孔径分布

表-3 評点の基準

グレード	内容
評点1	劣化なし
評点2	0.2mm以下のひびわれまたは表面のみのスケーリング
評点3	0.6mm以下のひびわれまたは5mm以下のスケーリング
評点4	0.6mm以上のひびわれまたは5mm以上のスケーリングではく落あり
評点5	ひびわれ、スケーリング、はく落が著しく、鉄筋露出あり

スケーリングが発生している例である。写真3は、橋台の翼壁部で発生したスケーリングの例である。端部のスケーリングが特に著しいことが分かる。写真4は桁の端部にひびわれが発生している例である。水が桁端部から供給されると、端部の締め固め不良によってコンクリートの品質が悪かったことが原因と思われる。

図-4に劣化程度を表す評点ごとの割合を示す。この評点は、構造物の部分的な劣化程度を示すものであるが、70%以上のコンクリート構造物で凍害を受けていることが分かる。特に、構造的な欠陥となり得る評点5が部分的ではあるが20%以上認められている。図-5に環境要因別の橋台、桁の水の供給要因ごとの割合を示す。海岸部の一部に海水飛来の影響があるが、多くは雨雪の供給となっている。図-6に環境要因別の劣化形態ごとの割合を示す。橋台の劣化は半分以上がスケーリングであるのに対し、桁は、スケーリング、ひびわれ、鉄筋露出等が見られた。

3. 2 詳細調査に基づく凍害劣化の評価

図-7にA橋の健全部と劣化部各3箇所の表面強度と音速の関係を示す。健全部の上、中、下部のばらつきはなく、表面強度の増加に伴い音速が速くなる傾向がある。これに対し、劣化部は高さによって劣化の程度が異なっていると同時に、バラツキが大きいことが分かる。これは、水の供給程度、温度分布、ブリージングによる品質の違いなどによると考えられる。

次に、凍害範囲を調べた結果を示す。図-3に示すように測点①～⑥の高さ別に10cm間隔で音速を測定した。その結果、一定の音速になる位置は、図-8に示すように①では端部から70cm、②では50cm、③～⑥では30cm程度であり、目視で判断できる位置よりも凍害が広い範囲まで進んでいることが分かる。

図-9に、B覆道擁壁コンクリートの深さ別の細孔径分布の割合を示す。健全部は、深さ別にはほとんど差が認められないが、スケーリング、ひびわれ部では、0～4cmまで $10^3 \sim 10^5 \text{ \AA}$

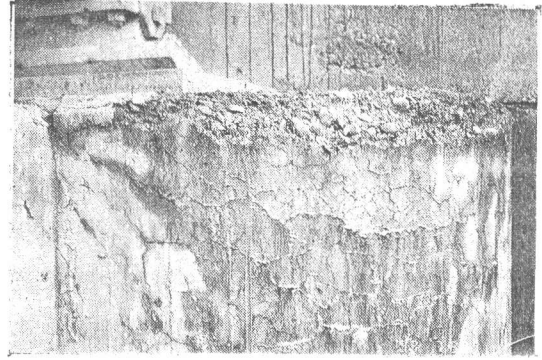


写真2 橋脚劣化状況

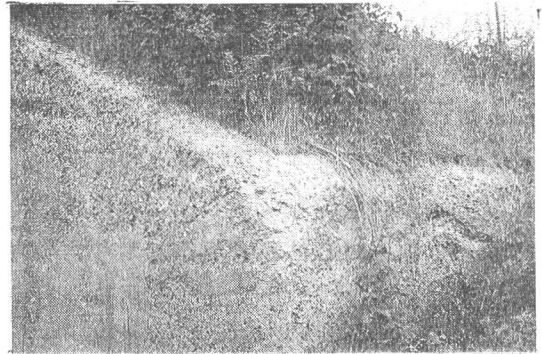


写真3 橋台翼壁劣化状況

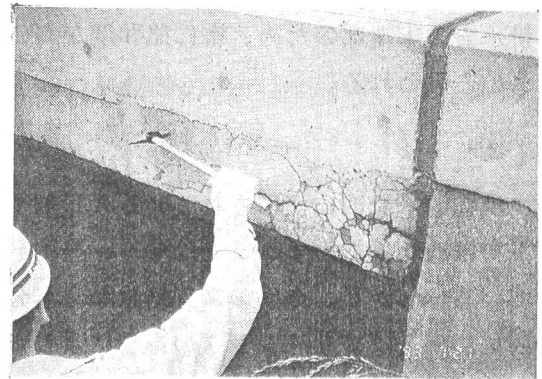


写真4 桁劣化状況

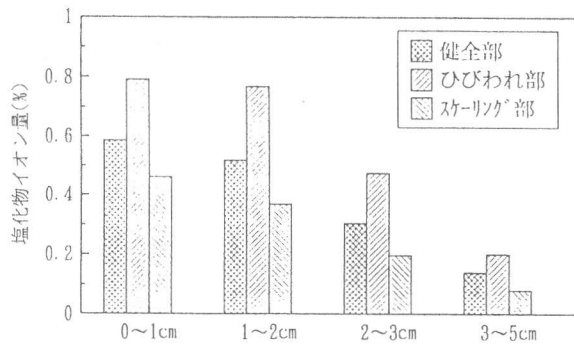


図-10 B覆道の塩分浸透量

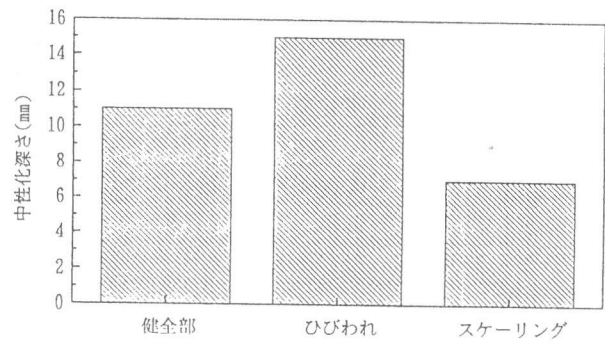


図-11 B覆道の中性化深さ

の割合が多くなっている。堀ら [2] も示している通り、凍害により微細ひびわれが発生し、コンクリート中の細孔を連結させるため、粗大側の細孔の割合が多くなることが知られている。このことから、スケーリング、ひびわれ部は4 cm程度まで凍害が進行していると判断できる。

次に、凍害と塩害、凍害と中性化の複合劣化について述べる。図-10にB覆道の擁壁の健全部、ひびわれ部およびスケーリング部の深さ別塩化物イオン浸透量を示す。この結果を見ると塩化物イオン浸透量は、ひびわれ部が最も多く、健全部、スケーリング部の順となっている。つまり、ひびわれ部においては、微細ひびわれによる組織のゆるみが塩化物イオンの浸透を助長しているものと思われる。スケーリング部の塩化物イオン浸透量が少ないのは、雨雪により付着塩分が流されたことおよびスケーリングにより塩化物イオンの含有量の多い部分がはがれ落ちたことによるとと思われる。また、塩化物イオン含有量は、健全部を含めて、約2 cmまでが通常規定されている塩化物イオン量に達している。また、ひびわれ部の塩化物イオン量は健全部より30%以上も多いものとなっている。これは、凍害により実質的にかぶりが減少し、鉄筋腐食の発生時期が短縮されることを示しており、凍害も結果として鉄筋の腐食に大きく影響することが分かる。すなわち、このような状況が複合劣化を発生させることになる。図-11にB覆道の中性化深さを示す。中性化深さは、塩化物イオン浸透量と同じように、ひびわれ部が最も大きく、健全部、スケーリング部の順になっている。ひびわれ部は微細ひびわれの影響が、スケーリング部は排水管の末端部のため、常に飽和度が高い状態にあり中性化が進みにくいことなどの影響があるものと思われる。

4. まとめ

現在、一般的に使用されているAE剤やAE減水剤を用い、所定の水セメント比のコンクリートでは凍害は発生することはないとされている。しかし、今回の調査結果からも分かるように、全体的に発生することはないとしても、部分的に、例えばブリージングの影響により水セメント比が大きくなっていると思われる構造物の上部や締固め不良等による品質の悪い部分において凍害が発生している。また、凍害によって発生した微細ひびわれは塩化物イオンの浸透や中性化を促進させることが明らかとなった。このように本研究により、コンクリート構造物では複合劣化が発生する可能性があることが分かり、その発生過程を説明できそうである。

5. 参考文献

- (1) 山下英俊他: 北海道におけるコンクリート構造物の凍害劣化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告書, Vol15, pp893~898
- (2) 堀宗朗他: 細孔構造の変化に着目したコンクリートの低温劣化の診断法の基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol13, pp724~728