

V-13

寒冷地の沿岸環境下におけるコンクリートの劣化挙動

北海道大学大学院 学生員 武田 均
 北海道大学工学部 正 員 佐伯 昇
 北海道大学工学部 正 員 志村 和紀
 北海道大学工学部 正 員 藤田 嘉夫
 室蘭工業大学工学部 正 員 近藤 俊郎

1. まえがき

北海道の港湾コンクリート構造物は、凍害や塩害などを受ける過酷な環境下におかれている。近年、コンクリート構造物の耐久性が注目される中で、凍害や塩害による損傷を構造物のおかれる環境条件により定量的に評価・予測し、設計や維持管理に反映させることが重要となっている。

本報告では、北海道の沿岸に施工された港湾コンクリート構造物の、施工後10年までの凍害と塩害の調査データをもとに、凍害による表面剥離と塩害による内部鉄筋の腐食について、沿岸曝露実験もあわせて検討を行ったものである。

2. 凍害

北海道の沿岸環境下のコンクリート構造物について行われた耐久性調査¹⁾²⁾のデータを用い、表面剥離による損傷の予測式をたてた。

(1) 損傷状況を示す指標

表面剥離による損傷の状況を示す指標として最大平均剥離深さ($H_{max}(mm)$)を用いた。最大平均剥離深さは調査構造物の表面の中で最も損傷を受けていると思われる $50 \times 50cm$ の枠内の、10点程度の剥離深さの平均値である。

(2) 最大平均剥離深さの予測式

予測式の定式化のために用いたデータの範囲を表-1に示す。予測式を作るにあたって、凍結融解試験の結果等²⁾も考慮し、最大平均剥離深さは構造物の受ける凍結融解の回数の指数乗に比例するとし、(1)式を仮定した。

$$H_{max} = a N^b \quad (1)$$

ここで、 H_{max} : 最大平均剥離深さの推定値(mm)

N : 凍結融解回数

a, b : 定数

表-1 予測式を作るために使用したデータの範囲

項目	水セメント比	セメント種	構造物種	セメント量
範囲	0.52~0.55	普通ポルトランドセメント フライッシュセメントB種 高炉スラグセメントB種	防波堤 (上部工、消波ブロック)	245~365 (kg/m^3)

Deterioration of coastal concrete in cold region

by Hitoshi TAKEDA, Noboru SAEKI, Kazunori SHIMURA, Yoshio FUJITA AND Hideo KONDO

3. 塩害

沿岸暴露実験と上記の調査のデータを用い、内部鉄筋の腐食についての検討を行った。

(1) 沿岸暴露実験

供試体の形状は、10×10×40cmの柱状とし、図-1に示すように、内部にかぶり1.3cmでφ13mmの鉄筋を埋め込んだ。コンクリートの配合を表-2に示す。打設後1日で脱型し、5日間麻袋により湿潤養生したのち材令28日で厚田町押琴海岸の暴露実験場に暴露した。

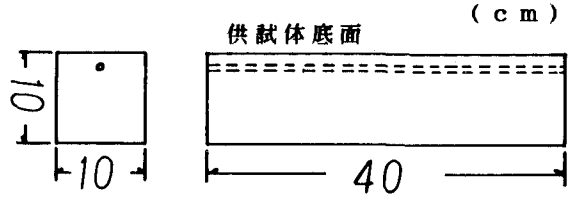


図-1 供試体の形状

表-2 暴露供試体の配合

[unit: kg/m³]

バッチ NO.	水結合 材比 (%)	細骨材 率 (%)	水	結合 材 ¹⁾	混和材料 (結合材の%)	細骨材	粗骨材	混和剤		初期 C1- 量
								AE剤	流動化 剤 ²⁾	
1	40	40	162	405	—	696.6	1083.9	0.215	—	—
2										12.3
3	50	43	162	324		778.4	1070.3	0.172	—	—
4										9.8
5	40	40	162	405	シリカフェーム	696.6	1083.9	0.405	2.430	—
6										3.4
7	50	43	162	324	10%	778.4	1070.3	0.324	1.296	—
8										3.4
9	40	40	162	405	高炉スラグ ¹⁾ p14100	696.6	1083.9	0.405	2.025	—
10										3.4
11	50	43	162	324	35%	778.4	1070.3	0.324	0.972	—
12										3.4
13	40	40	162	405	—	696.6	1083.9	0.324	—	3.4
14	50	44	162	324		796.5	1051.6	0.259	—	3.4

*1: 普通ポルトランドセメント+混和材料 *2: マイティーFD混入重量

※以降供試体の記号は、(ハッチNO.)-(かぶり)-(個体番号)と表す。

(2) 塩素イオン濃度、pH値の測定方法

塩分、pH測定用供試体(鉄筋無し)に、コンクリート用ドリル(φ10mm)で、15ヶ所程度穴を開け、その際に出る粉末を各深さごと(0.0~0.5cm, 0.5~1.0cm, 1.0~2.0cm)に10g程度採取し、25ccの純水の入ったビンに集め、粉末の重量の5倍の純水を加え、試料を50℃に温めてから30分間攪拌し濾過したのち、塩分測定器(電量滴定法)、pHメーター(電極法)で塩素イオン濃度、pH値を測定した。

(3) コンクリート表面を伝播する縦波の伝播速度(以下音速と略す)の測定方法および劣化の評価方法

音速の測定にはPUNDIT(Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester)を用いた。測定方法は内部鉄筋の腐食によるコンクリート表面の変化を測定するために間接法とし、図-2に示すように供試体底面にトラバース状に6点を選び、全15区間を測定した。間接法は音波の減衰が大きく、トランスジューサーとコンクリート表面との密着の度合によりデータがばらつくので、あらかじめ供試体の底面中央部に曲げひびわれを導入して傾向が表れ易いようにし、以下に述べるような方法で評価することにした。

音速による評価は、次の2段階により行った。

a) 第1段階として、音速によるひびわれ劣化の評価がどの程度信頼できるのかを知るために、目視によるひびわれ劣化の評価と音速によるひびわれ劣化の評価とを比較、検討した。目視による評価は、最小目盛り0.05mmの拡大鏡で供試体表面を観察し、写真-1のようにひびわれをマークしたのち、ひびわれを介する区間を劣化区間と判定した。音速による評価は、ひびわれを介する区間では音波がひびわれを迂回する経路を伝播すると仮定し、全15区間の平均音速と各区間の音速を比較し、平均音速を下回る音速の区間を劣化区間と判定した。

b) 第2段階として、図-3のような6区間を選び、各区間の音速(V)の平均音速(V_m)に対する比を各区間に対してプロットし劣化の評価を行った。中央部の曲げひびわれのみの時には、区間1-4、3-6は曲げひびわれを介さないで健全部分として平均音速よりも大きな音速となる(CASE 1)。鉄筋の腐食によるひびわれが鉄筋に沿ってはいり、区間1-4、3-6がひびわれを介する区間となったときには、区間1-4、3-6は他の区間よりも区間距離が短いため、この2区間の音速は平均音速を下回る値となる(CASE 2)。このことを利用して劣化の評価をした。

(4) X線非破壊試験

管電圧190kv,照射時間7分でX線写真を撮影した。

4. 結果および考察

(1) 最大平均剥離深さの予測式

(1)式の係数を最小自乗法により求め(2)式を得た。

$$H_{max} = 0.5514N^{0.365} \quad (2)$$

このときの相関係数は $R=0.672$ であった。この式は表-1の範囲の構造物について施工後1, 2, 10年の損傷の経年変化のデータから求めたものである。

図-4に最大平均剥離深さの凍結融解回数に対する変化を示す。最大平均剥離深さは、凍結融解回数が増加するにつれはつきが大きくなるが、両対数のグラフではほぼ直線でその経年変化の傾向が示されるようである。(2)式により施工後10, 30, 50年の最大平均剥離深さの推定値を求めた結果を表-3に示す。推定値を求めるにあたって、1年の凍結融解回数を調査データの平均値である70回/年とした。

最大平均剥離深さの推定値は、施工後50年で10mm程度となった。

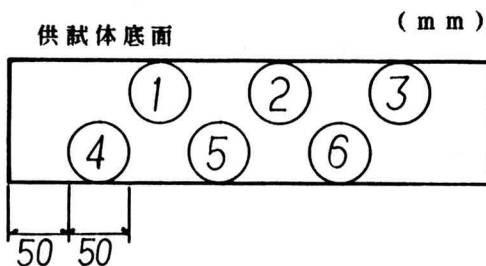


図-2 音速測定のための測点

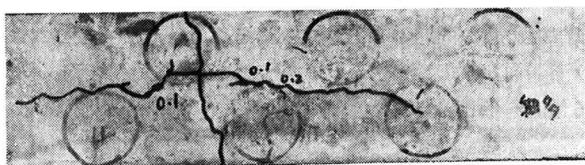


写真-1 目視による腐食ひびわれの評価

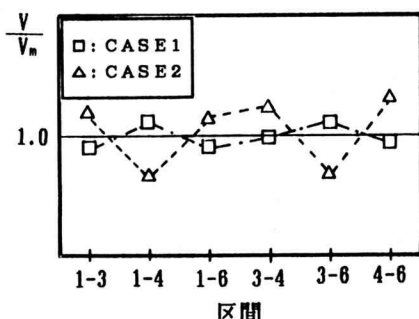


図-3 音速による劣化評価の概念

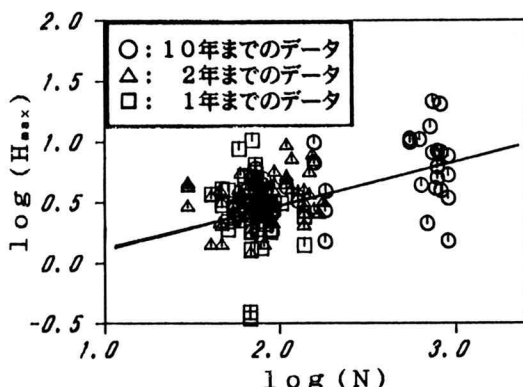


図-4 凍結融解回数と最大平均剥離深さの関係

(2) 塩害

(a) 塩分量とpH値の経年変化

凍害で用いた調査のデータから、施工後1年と10年の塩分量の表面からの分布を図-5、図-6に、pH値の分布を図-7、図-8に示す。塩分量の基準を安全側に 0.30kg/m^3 と考えると、平均塩分量は施工後1年では、 0.5cm の位置で 0.22kg/m^3 、 1.5cm よりも深い位置では 0.05kg/m^3 以下となっており施工後1年では鉄筋腐食の問題となる量には達していない。施工後10年では 0.5cm の位置で 0.44kg/m^3 、 1.5cm の位置で 0.30kg/m^3 、 1.5cm よりも深い位置では 0.30kg/m^3 以下となっていた。施工後10年では 3.5cm の深さまで 0.30kg/m^3 を越える塩分量となっていた構造物もあり、施工後10年では塩分量が問題となるレベルに達する構造物もあると考えられる。施工後10年で塩分量が 0.30kg/m^3 以下となる表面からの深さは 4.0cm 以上であると考えられる。pH値については、施工後1年よりも10年の方が下がる傾向を示していた。

表-3 予測式による予測値

凍結融解回数 (材令：年)	700 (10)	2100 (30)	3500 (50)
最大平均剥離深さ (mm)	6.0	9.0	10.8

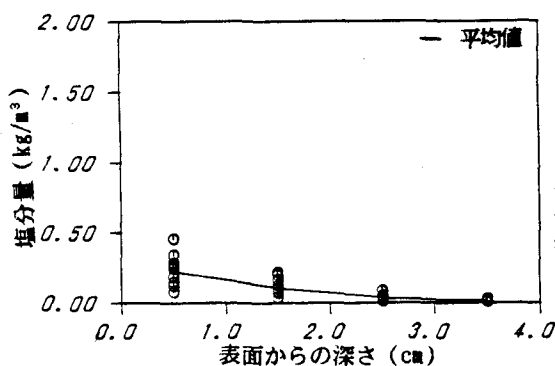


図-5 施工後1年の塩分量の分布

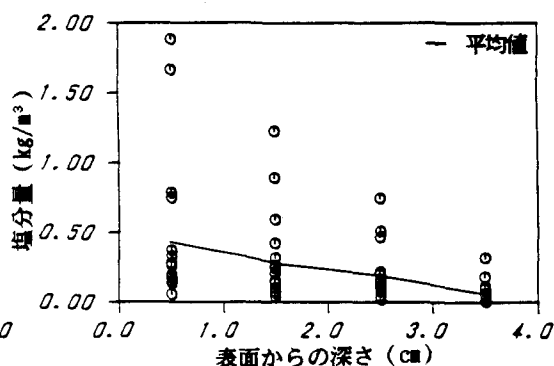


図-6 施工後10年の塩分量の分布

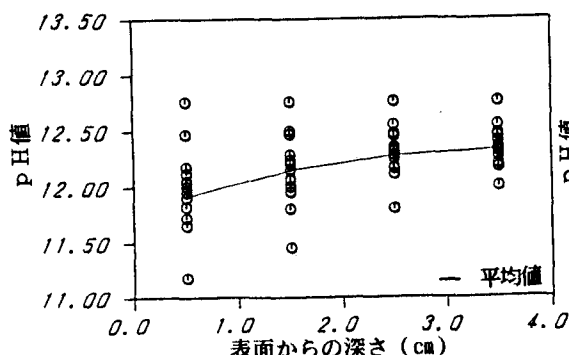


図-7 施工後1年のpH値の分布

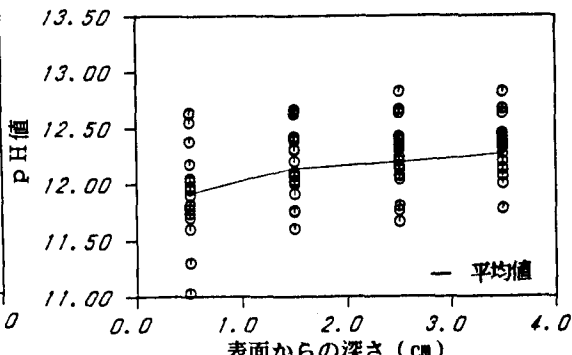


図-8 施工後10年のpH値の分布

(b) 腐食に対する塩分量とpH値の影響

腐食ひびわれが発生した曝露供試体の、曝露1年後の塩分量とpH値の関係を図-9に示す。腐食ひびわれが発生した供試体は、すべてかぶり1.0cmの供試体であった。鉄筋が埋め込まれている位置(1.0~2.0 cm)の塩分量のレベルが2.00kg/m³程度よりも高いレベルでは、pH値が12.0~13.0であっても腐食ひびわれが発生した。また塩分量が、1.00 kg/m³程度であってもpH値が11.5で腐食ひびわれが発生したものがあつた。このことからpH値が低ければ、低いレベルの塩分量でも、鉄筋が腐食する可能性があるものと思われる。(a)の結果では、施工後の年数を経るに従ひpH値、塩分量ともに危険側に向うが、曝露実験の結果から、施工後10年の深さ1.5 cmまでは鉄筋腐食の可能性のある塩分量とpH値であつた。

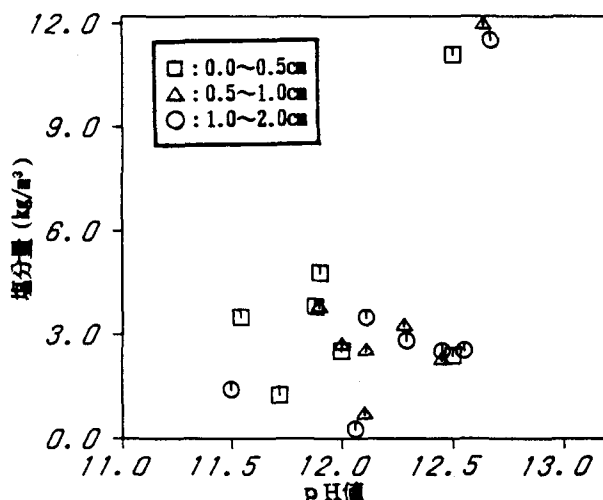


図-9 腐食ひびわれ発生供試体の塩分量とpH値の関係

C) 非破壊試験によるひびわれ劣化の評価

曝露1年で腐食ひびわれが発生した供試体を表-4(1)に示す。初期塩分混入供試体で、かぶり1.0cmの供試体のほとんどに腐食ひびわれが生じた(初期塩分を10.00~12.00kg/m³程度混入した供試体は、曝露前に腐食ひびわれが発生したので表から除いた)。比較的早い時期にシリカフュームを混和した供試体に腐食ひびわれが生じたのは、養生方法が5日間湿潤養生では不十分であつたためだと思われる。

表-4 曝露1年でひびわれ劣化した供試体

(1) 目視によりひびわれが発生したと判定した供試体				(2) 音速により劣化したと判定した供試体			
記号	発生材令(日)	混和材種	水セメント比	記号	劣化材令(日)	混和材種	水セメント比
6-1-1	381	シリカフューム	0.4	6-1-2	325	シリカフューム	0.4
7-1-1	290	シリカフューム	0.5	6-3-1	325	シリカフューム	0.4
7-1-1	290	シリカフューム	0.5	8-1-1	325	シリカフューム	0.5
8-1-1	290	シリカフューム	0.5	8-1-2	198	シリカフューム	0.5
8-1-2	290	シリカフューム	0.5	8-3-1	325	シリカフューム	0.5
10-1-2	288	高炉スラグ	0.4	9-3-1	323	高炉スラグ	0.4
13-1-1	322	-	0.4	9-3-2	323	-	0.4
14-1-1	378	-	0.5				

※劣化材令は測定日

〈音速による評価〉

3.(3)(a)の方法に従い、表-4(1)の8本の供試体について、目視による判定と音速による判定とを比較し、両方の判定が一致した区間のスコアをつけた結果を表-5に示す。音速により劣化区間と判定された区間のうち目視による判定と一致した区間は76.7%となりよい確率で一致することが分かった。

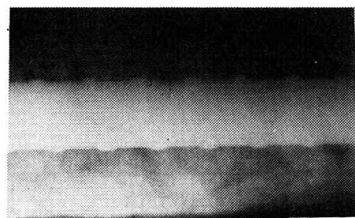
次に3.(3)(b)の方法に従い、音速により劣化したと判定された供試体を表-4(2)に示した。(2)ではかぶり3cmの供試体も含まれている。これはコンクリートの劣化が鉄筋腐食によるものだけではなく、音速での評価では表面に表れない表面下の欠陥も評価しているためだと思われる。また目視によりひびわれを確認できたにもかかわらず音速で評価されていない供試体については、発生した腐食ひびわれが区間1-4、3-6の間になかったためである。

表-5 音速による腐食ひびわれ評価のテスト

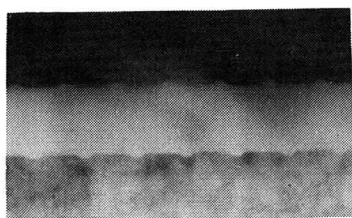
供試体記号	7-1-1	7-1-2	8-1-1	8-1-2	10-1-1	10-1-2	12-1-1	13-1-1	14-1-1	合 計
音速による判定スコア	6	8	5	10	4	8	6	5	8	60
目視との一致スコア	5	5	4	8	3	7	6	3	5	46

〈X線写真による評価〉

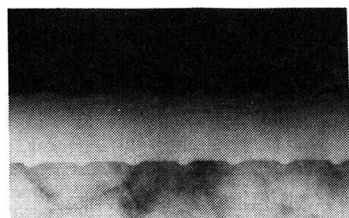
X線写真によって内部の鉄筋を観察し鉄筋腐食を評価した。写真-2にX線写真を示す(写真の下方向がかぶり)。ひびわれ幅が、0.2mm程度まで拡った供試体(1)では、異形鉄筋の節が欠けた様子がよく観察できた。ひびわれ幅が0.1mm程度(2)ではあまり変化がわからなかった。



(1)ひびわれ幅0.2mm程度の時



(2)ひびわれ幅0.1mm程度の時



(3)ひびわれ発生せず

写真-2 X線写真による内部鉄筋の観察

5. まとめ

(1) 沿岸構造物の凍結融解作用による表面剥離の深さは、凍結融解回数の指数乗に比例する傾向があると思われる。また予測式によると、今回使用したデータの範囲では施工後50年で最大平均剥離深さが1cm程度に達するものと思われる。

(2) 施工後10年で塩分量 0.30kg/m^3 以下となる表面からの深さは4cm程度であった。

(3) 音速の測定によりコンクリートの表面のひびわれ劣化がよい確率で評価できる。

参考文献

- 1) 佐伯 昇・鮎田耕一・前川静男：北海道における海岸および港湾コンクリート構造物の凍害による表面剥離損傷，土木学会論文報告集，327，NOV. 1982.
- 2) 北海道開発局港湾部港湾建設課，社団法人 寒地港湾技術センター：昭和63年度 積雪寒冷地に於ける港湾構造物の耐久性向上調査 中間報告書，MAR. 1989.
- 3) 藤田嘉夫・武田 均・佐伯 昇・中津川 汪：汀線部コンクリートの凍害劣化挙動，土木学会北海道支部論文報告集，46，pp. 725~730，1990.