

V—12 凍害によるコンクリート表層部の劣化の進行度についての2, 3の考察

北海道大学 学生員 〇桜井 宏
 北海道大学 正員 佐伯 昇
 北海道大学 正員 高田 宣之
 北海道大学 正員 藤田 嘉夫

1. まえがき

寒冷地の沿岸コンクリート構造物は、凍結融解と海水の作用により、打設後1～2年で表層部が劣化し、表面剝離被害が発生し、これが大きな問題となっている。北海道の沿岸地帯にあるコンクリート構造物は1年間に数十回の凍結融解作用を受け、2年間で100回を超える。この間の表面剝離被害の発生と進行の度合が、セメントの種類、水セメント比等の配合、養生条件、打設時の上面、側面、底面等の違いにより、表面剝離被害にどのような差異が現れるのかを明らかにし、また被害の程度と被害度(平均被害深さ)や、進行の度合と進行度などに数値化し、表面剝離被害に対して定量的な把握を試みるのが本研究の目的である。

2. 供試体および実験方法

使用したセメントは普通ポルトランドセメント(N)、高炉セメント(BB)、フライアッシュセメント(FB)で各々B種である。AE剤はジンカルWを用いた。

骨材は細骨材に沼津町川向の産砂を用い、粗骨材は沼津川産川砂利を使用した。骨材の試験結果を表-1に示す。さらに粗骨材は5～25mmのものと20～40mmのものを65:35の割合に混合して使用した。

配合は水セメント比を、45、55 60%とし、表-2に示す。

供試体は15×15×25.6cmの角柱はく離被害測定用、圧縮強度測定用はφ10×20cmの円柱供試体を用いた。

養生条件は打設後1日湿潤養生後材々28日まで室内乾燥(F0)、5日間水中養生後、材々28日まで室内乾燥(F5)で実験した。

凍結融解試験は、低温室内の水槽に砂を入れ砂層の表面上1cmまで海水を蓄たして行なった。これは海水の対流を防止、コンクリート上部から冷却させ、また温度線が下部の温度を1～2℃に調節して、冬期の実際の構造物の表面から深さ方向の温度分布性状と類似させたものである。

(図-1) 温度測定は一部の供試体に図-1のようにコンクリート表面から1cmのところに熱電対を埋め込み、コンクリート上部(㊸)、コンクリート中部表面(㊹)、コンクリート重心部、砂層下部の温度を測定し、凍

表-1 骨材の試験結果

項 目	骨 材		
	細 骨 材 海 砂	粗 骨 材 川 砂 利 5～25mm	粗 骨 材 川 砂 利 20～40mm
粗 粒 率	2.73	6.91	7.30
比 重	2.60	2.62	2.62
吸 水 率 (%)	1.52	1.81	2.62
単位容積重量 t/m ³	1.72	1.67	1.67
実 積 率 (%)	67.2	64.9	67.8
塩 分 含 有 率 (%)	0.026	—	—
す り へ り (%)	—	22.5	23.1
安 定 性 (%)	3.1	6.5	6.7
軟 石 量 (%)	—	2.1	0.0
粘 土 塊 量 (%)	0.0	0.0	0.0
洗 い 試 験 (%)	1.0	0.4	0.3
比重1.95の液体に浮くもの (%)	0.0	6.0	0.0

表-2 供試体の配合

配合	セメント 種類	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 kg/m^3					実測 空気量 (%)
				水	セメント	細骨材	粗骨材 5-25	粗骨材 20-40	
N 55	N	55	40	138	248	770	758	408	7.0
N 60	N	60	40	147	245	760	748	403	4.7
FB 45	FB	45	38	123	274	783	784	421	6.0
FB 55	FB	55	40	122	222	790	776	418	8.1
FB 60	FB	60	40	132	220	781	768	413	7.1
BB 55	BB	55	40	128	233	780	768	414	6.5
BB 60	BB	60	40	138	230	771	759	409	6.0

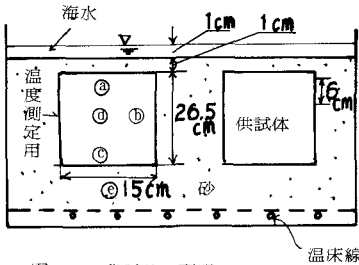


図-1 供試体の配置

結融解回数の測定(砂中の海水の凍結温度を -2°C とする)及びコントロールを行なった。

実験は自然条件を再現するため凍結融解の回数を1日1回で行った繰返凍結融解実験を用いた。80回の凍結融解を行った後50日間室内乾燥(室温約 18°C)した。そして最終的には供試体に約180回の凍結融解を与えた。これは実際の北海道の海岸地方の凍結融解回数は一冬で数十回であるので、自然条件下のおよそ3年分に相当することになる。

表面はく離被害は、SPメーターで測定し、剥落した体積(mm)で求め、測定した全面積で除し、平均被害深さ(mm)で表わしこれを被害度とした。被害度は打設方向に対し、上面、側面、底面について行なった。また図-1に示す供試体の深さ方向に凍融回数が違うので供試体の上部に発生する被害と実際の構造物の表面に発生する被害とし、図-1に示す供試体の上部の6cmである。なお供試体が受けた凍結融解回数は図-1に示す④、⑤、⑥で観測した回数で、これより測定部の中心に於ける凍結融解回数を算定して求めた。

被害度測定の前に動弾性係数と縦振動(供試体の26.5cm方向)による共鳴振動法によって測定した。

3. 実験結果と考察

各配合、各養生条件の圧縮強度試験結果(材令28日)を表-3に示す。5日間水中養生したもの(F5)と水中養生しないもの(F0)を比べると、N55(普通ポルトランドセメント、W/C=55%)ではF0はF5の1.37倍

また、BB55(高炉セメントB種 W/C=55%)では1.38倍、FB55(フライシセメントB種 W/C=55%)では1.56倍であり、水セメント比が60%のときも、ほぼ同じ値を示している。

表-3 圧縮強度試験結果

供試体	圧縮強度(kg/cm^2)	供試体	圧縮強度(kg/cm^2)	供試体	圧縮強度(kg/cm^2)
N 55 F0	162	BB 55 F0	157	FB 55 F0	116
N 55 F5	220	BB 55 F5	216	FB 55 F5	181
N 55 F28	239	BB 55 F28	228	FB 55 F28	201
N 60 F0	140	BB 60 F0	125	FB 60 F0	110
N 60 F5	192	BB 60 F5	174	FB 60 F5	171
N 60 F28	215	BB 60 F28	210	FB 60 F28	167
		FB 45 F5	276	FB 45 F28	287

図-2は養生条件と被害の関係である。水中養生しないもの(F0)と5日間水中養生したもの(F5)をセメントの種類別と水セメント比別、打設方向に対する上面、側面、底面別に示した。

養生条件が被害に及ぼす影響を見ると、N55側面(普通ポルトセメント, $w/c=55\%$ 側面、図-2a)において、凍融160回の被害度を比べるとF0はF5の5.3倍である。同様にBB55側面(高炉セメントB種, $w/c=55\%$ 側面)では2.6倍、FB55側面(FAマッシュセメントB種, $w/c=55\%$ 側面)では1.3倍であった。このように水セメント比55%では水中養生しないF0は水中養生したF5より被害が3~5倍発生した。また水セメント比60%でもこの傾向が見られた。

上面についても凍融160回の被害度はほとんどのものがF0がF5より大きい傾向を示している。

養生条件が被害が発生する時期(被害が発生する凍融回数)に与える影響は、N55側面、BB55側面の場合F0は試験開始直後から被害が発生するが、F5はN55側面では凍融140回、BB55側面では凍融30回から被害が発生した。またFB55では側面でF5も凍融開始直後から被害が発生し、60側面、BB60側面、FB60側面では、凍融10回

後からF0とF5がほとんど同時に被害が発生した。このように水セメント比が高くなると被害発生の時期に差はなくなる。(下の写真は高炉セメント水セメント比60%の側面の養生なしと5日水中養生の比較である。)

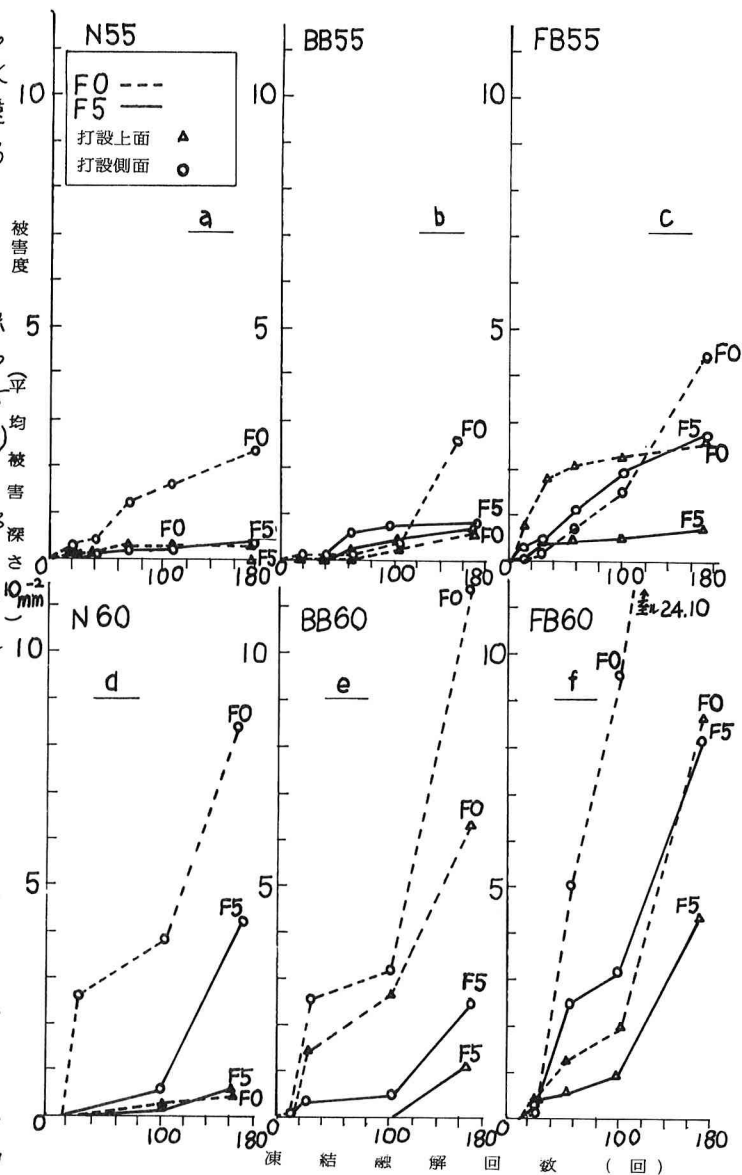
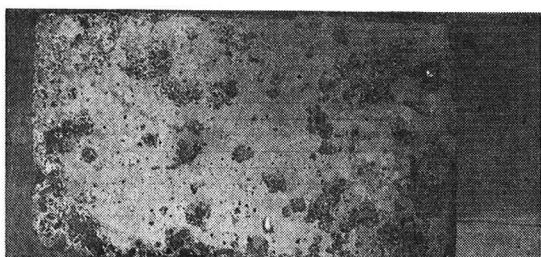


図-2 養生日数と被害の関係



写真-1 BB60 F0側面

(凍融176回)



BB60 F5側面

図-3は水セメント比と被害との関係を示す。凍融160回での被害度は、N55・F5側面では、 $w/c=60\%$ の値は $w/c=55\%$ のものの9倍で、BB・F5側面（高炉セメントB種水中5日養生、側面）では $w/c=60\%$ で、 $w/c=55\%$ の2.5倍、FB・F5側面（フライアッシュセメント、水中5日養生、側面）は2.6倍であった。また $w/c=45\%$ はほとんど被害が発生していなかった。

また被害の発生時期は、普通セメント(N)と高炉セメント(BB)を使用したものは $w/c=55\%$ では、各々凍融40回、35回で発生するのに対し水セメント比が高い、 $w/c=60\%$ では、各々の凍融30回、15回で被害が発生し、 $w/c=55\%$ の時に比べ被害が発生する凍融回数が10回～20回ぐらい早くなっている。

また、FBのF5側面で $w/c=45\%$ は、凍融92回でわずかに被害が認められた。このように水セメント比が小さくなると被害の発生する時期がかなり遅れる。なお、北海道の海岸地帯は、一冬で数十回の凍結融解作用があり、打設後一冬起えたコンクリート構造物に被害が発生している。本実験では $w/c=55\%$ 以上のときは凍融50回以内でほとんど被害が発生しているの、現場の被害の状況がほぼ再現されているものと考えられる。

さらに実験による被害の進行（被害度:Hmmの増加）のようすを表現するために、被害の進行度： H' の定義とする。

$$H'(\text{進行度: mm/回}) = \frac{H_b(\text{凍融回数 } b \text{ の被害度: mm}) - H_a(\text{凍融回数 } a \text{ の被害度: mm})}{(b-a): \text{その間の凍融回数の差(回)}} \quad (\text{ただし } b > a)$$

また、凍融開始（凍融0回）からその凍融回数までの進行度を平均進行度： $\bar{H}$ mm/回 とする。

H' 、 $\bar{H}$ とは、図-3に示すグラフの傾きのことである。

図-3(c)のFB・F5の側面の凍融100回までの平均進行度： $\bar{H}$ は、 $w/c=55\%$ で 2.0×10^{-4} mm/回で、 $w/c=60\%$ では、 3.2×10^{-4} mm/回であるが、凍融160サイクルまでの平均進行度は、 $w/c=55\%$ で、 1.6×10^{-4} mm/回、 $w/c=60\%$ では 4.8×10^{-4} mm/回である。ここで $w/c=55\%$ は凍融100回以後、平均進行度が減少しているのに対し、 $w/c=60\%$ では増加している。この傾向はBBでもはつきりみられ、 N でも傾向があらわれている。水セメント比の高い $w/c=60\%$ では、凍融100回を超すと進行度が増して、下に凸のグラフになり、水セメント比の低い $w/c=55\%$ は上に凸のグラフを示し、被害の今後の進行は、 $w/c=60\%$ はさらに激しくなる傾向があると考えられる。以上のことから、凍融被害の発生する時期とその後の進行には水セメント比が大きな役割を果たしている。

図-4はセメント種と被害との関係である。水セメント比は55%、養生は水中5日間(F5)のものであり、これを打設方向に対して、上面、側面、底面に分けて示した。

上面については普通ポルトランドセメントは被害が発生していなかったが、フライアッシュセメントB種(NB)と高炉セメントB種(BB)では被害が発生した。側面について、 N に対して、BB、FBが N の被害を上回

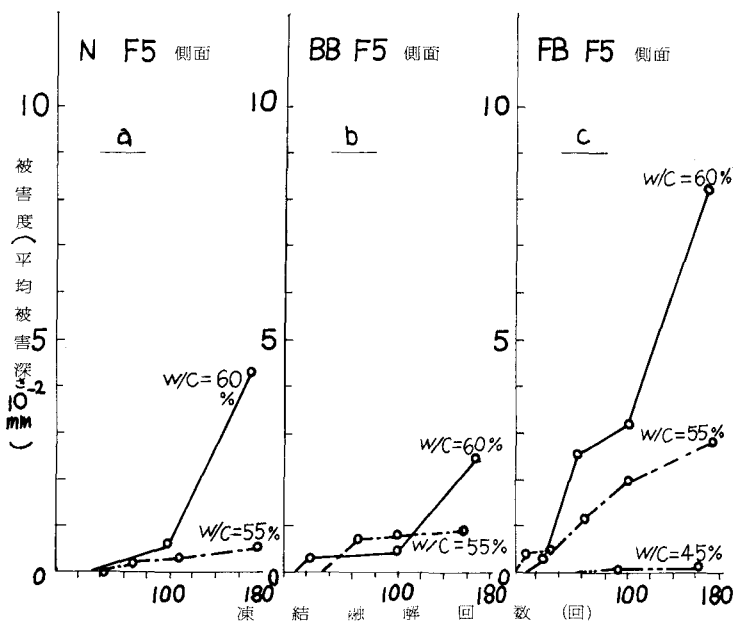


図-3 水セメント比と被害の関係

っている。打設方向に対して上面、側面、底面を比べると、上面の被害は少ない。表面粗さの一方の原因にブリージングがあるが、もしブリージングによるならば、上面がもっと被害を受けるはずであるがそのような結果は得られなかった。(写真-2)

図-5は凍結融解回数と動弾性係数の関係である。全体の傾向として、水中養生をしないF0の動弾性係数が増加しており、N55で凍融0回の動弾性係数(F0)に対する、凍融130回の比はF0で1.27倍、F5で1.11倍であった。他に同じような傾向を示している。

これを図-2と比較すると、表層部に剥離被害を受けてもコンクリートの内部は強度が増加していることを示している。

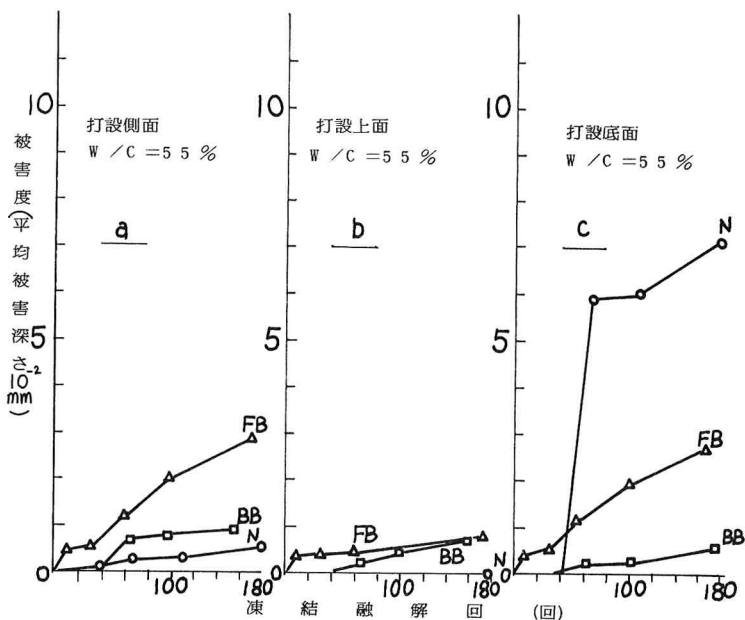


図-4 セメントの種類と被害との関係

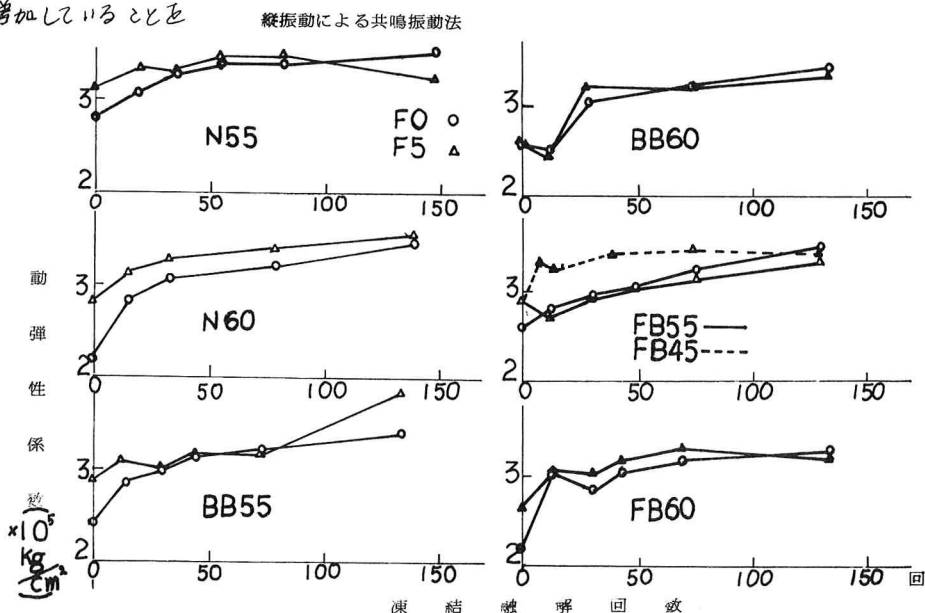


図-5 凍結融解回数と動弾性係数の関係

写真2④
N55F5
上面

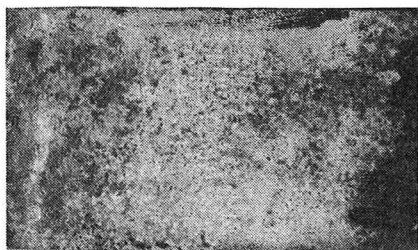
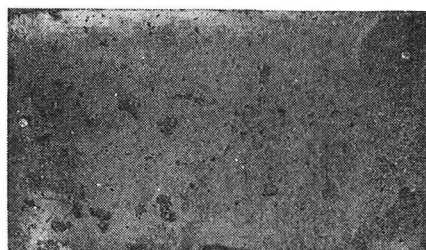


写真2④
N55F5
側面



4. まとめ

1) 打設後5日間水中養生したコンクリートの表面剝離被害は、水セメント比55%で普通ポルトランドセメントを使用したものは凍結融解40回で、高炉セメントB種では凍結融解35回で被害が発生したが、これに対して、水中養生しなかったコンクリートでは、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種を使用したものは、凍結20回前後で剝離し、打設後養生することにより剝離の発生の時期が遅くなった。しかし、水セメント比60%では、養生条件の違いが被害発生時期に与える効果はあまりなかった。また、水中養生しなかったものと、5日間水中養生したものを、凍結160回での、側面の被害度で比べると、普通ポルトランドセメントで5.3倍、高炉セメントB種で2.6倍、フライアッシュセメントB種で1.3倍であった。

2) 水セメント比が低い $w/c = 45\%$ 、フライアッシュセメントB種を使用したコンクリートは、打設側面で凍結92回まで被害が発生せず、被害が発生しても試験終了の凍結170回までほとんど進行しなかった。

また水セメント比が高い $w/c = 60\%$ のときは、普通ポルトランドセメントと高炉セメントは凍結回数15回で被害が発生し、凍結100回を超えると急激に被害が進行しフライアッシュセメントB種はさらに急激である。これに対し、 $w/c = 55\%$ を見ると、フライアッシュセメントB種では、初期から被害が発生するが、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種では、凍結35~40回で発生し、凍結100回を過ぎても急激な進行はしない。

3) セメント種と被害の関係は打設上面、側面で普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べ、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種を使用したものが被害が発生する時期が早く、凍結160回での被害度も高い。

4) 表面剝離が進行し表層部が劣化しても、内部の劣化は認められなかった。

5) なお、表面剝離が表層部の単に美観的な問題にとどまるか、構造物の安全を阻害する最初の徴候なのかも把握するには、被害や被害の進行と、被害度(平均被害深さ: mm)や、進行度(mm/凍結回数)で表わし定量化することが有効であると考えられる。

最後に本実験は、北海道大学の中津川注教授と、横山正樹氏のカによるところが大きく、ここに感謝の意を表わす。

参考文献

- 1) 佐伯昇、鮎田耕一、花井宏「夏期に曝露されたコンクリートの表面剝離耐力に関する2,3の実験」セメント技術年報昭和55年
- 2) 高田宣之、佐伯昇、藤田喜夫「凍害による表面はく離に関する2,3の実験」土木学会第35回年次学術講演会講演概要集