

V-24

汀線部コンクリートの凍害劣化挙動

北海道大学工学部	正 員	藤田 嘉夫
〃	学生員	武田 均
〃	正 員	佐伯 昇
〃	〃	中津川 汪

1. まえがき

寒冷地のコンクリート構造物にとって凍結融解作用は、重要な劣化の原因となる。特に、海洋コンクリート構造物における汀線部のコンクリートは、潮の干満、波しぶきにより乾湿の繰り返しを受ける環境となるため、凍結融解作用により最も劣化されやすい部分となる。海洋の環境においては、凍結融解作用による損傷が局部的なものであっても、かぶりコンクリートの損失によるコンクリート中の鋼材の腐食など構造物にとって重要な問題となる可能性がある。本研究は、汀線部の環境をシュミレートした凍結融解試験装置を用い、耐久性改善のため各種の混和材料を配合した供試体について実験し、凍結融解作用による劣化の進行を凍結融解回数と含水率により検討したものである。

2. 実験方法

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、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。骨材は表-1に示すようなA、Bの2種を使用した。混和剤はAE剤、AE減水剤、流動化剤を使用した。また混和材料として、シリカフューム、高炉スラグ微粉末（粉末度4100、6000、8000 cm^2/g の3種）を用いた。

(2) 供試体および配合

供試体は、直径15cm、高さ30cmの円柱供試体を用いた。水セメント比は40、45、50、55%、細骨材率は、骨材Aについては40%、骨材Bについては40.5%、目標スランブ8.0cm、空気量5.0%とした。配合および材令28日圧縮強度を表-2に示す。練り混ぜには強制練りミキサーを用い、締め固めはバイブレーターを使用した。打設後1日は麻袋で湿潤養生し、打型後材令28日まで20℃水中養生した。

表-1 骨材の品質

	骨材A		骨材B	
	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材
産地	勇払産砂	静内産川砂利	広島産砂	砂川空知大産砂利60% 手稲金山産砕石 40%
絶乾比重	2.70	2.78	2.54	2.62
単位容積重量 (kg/m^3)	1770	1682	1696	1603
吸水率(%)	2.00	1.17	2.51	1.50
粗粒率	2.69	7.77	3.01	7.37
品質評価係数	10.59	3.92	9.14	3.62

※ (品質評価係数) = $-1.47 \times (\text{粗粒率}) + 4.42 \times (\text{絶乾比重}) - 0.54 \times (\text{吸水率}) + 3.69$

Frost Damage of Concrete at Sea Water Line

by Yoshio FUJITA, Hitoshi TAKEDA, Noboru SAEKI and Hiroshi NAKATSUGAWA

表-2 供試体の種類および圧縮強度と剥離発生時の凍結融解回数と汀線部含水率

記号	W/C (%)	混和材料	置換率 (%)	骨材A使用 供試体			骨材B使用 供試体		
				圧縮強度 (kgf/cm ²)	N ₀ (回)	γ ₀ (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	N ₀ (回)	γ ₀ (%)
NN45	45			339	120	3.29	326	151	2.46
NN50	50			316	120	3.04	314	93	2.34
NN55	55			265	120	3.41	286	101	2.26
BB45	45			290	120	3.04	306	92	1.98
BB50	50			291	120	3.22	282	82	1.98
BB55	55			241	71	3.62	260	71	2.00
FB50	50			250	101	3.00	283	112	2.29
10SF40	40	シリカフェーム	10	455	201	3.37	446	121	2.06
10SF45	45		10	381	201	2.84	413	60	1.79
15SF45	45		15	418	201	3.24	424	251	2.15
35FS4 50	50	スラグ 微粉末	35	326	82	3.14	353	202	2.24
50FS4 50	50	粉末度	50	273	93	2.77	321	162	2.32
65FS4 50	50	4100cm ² /g	65	225	40	2.78	285	168	3.39
50FS6 45	45	スラグ 微粉末	50	400	130	2.98	358	130	3.51
50FS6 50	50	粉末度	50	343	80	2.87	275	60	3.51
		6000cm ² /g							
35FS8 50	50	スラグ 微粉末	35	345	251	3.63	375	80	3.08
50FS8 50	50	粉末度	50	311	76	3.52	368	60	3.35
65FS8 50	50	8000cm ² /g	65	299	40	3.09	379	17	2.91

※BBは高炉セメントB種(高炉スラグの分量50%)、FBはフライッシュセメントB種(フライッシュの分量15%)、BB、FB以外は普通ポルトランドセメントを使用した。

N₀は、剥離発生時の凍結融解回数。γ₀は、剥離発生時の汀線部含水率。

(3) 実験および測定

汀線部の環境をシュミレートするために用いた凍結融解試験装置を図-1に示す。海水を電熱線により+2℃に保ち、供試体の上面から1/4の高さの供試体中央部に熱電対を埋め込み、この点の温度を基準にして温度サイクル(-20～+2℃)の制御を行った。凍結融解サイクルは1日2サイクルとした。

測定は供試体の重量W、汀線部の含水率γ、動弾性係数E_D、供試体の表面に剥離が発生したときの凍結融解回数N₀、その時の汀線部の含水率γ₀、表面剥離の最大深さδ、剥離片の重量W_s、また、試験終了後、供試体の絶乾重量W₀と剥離片の絶乾重量W_{s0}を測定した。ここで汀

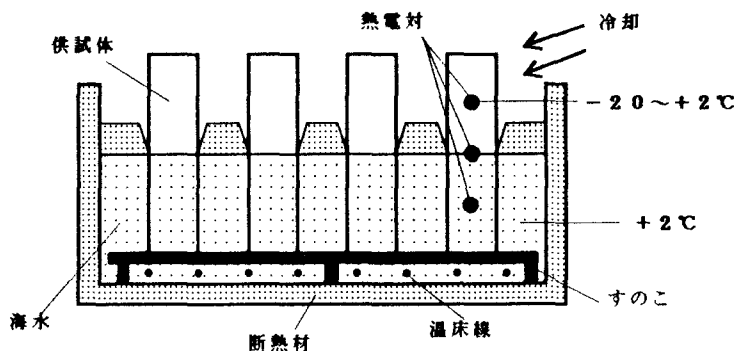


図-1 凍結融解試験装置

線部の含水率の状態は、海水に浸漬している部分における水の浸透および空中部における乾燥により決まる。ここではこの含水状態は空中、浸漬と1/2づつに置かれている供試体の重量W（空中部の乾燥による減少重量と浸漬部の水の浸透による増加重量の和が入っている）によって捕らえられると仮定し、次式により汀線部の含水率 γ （%）を求めた。

$$\gamma = \left(\frac{W + W_s}{W_0 + W_{s0}} - 1 \right) \times 100 \quad \text{----- (1)}$$

また表面剥離による劣化進行係数Dは、次式のように定義されている。このDは表面剥離発生時の N_0 および γ_0 を基本にして、凍結融解回数に対しては N_0 の倍数に比例し、含水率に対しては $10^{\frac{\gamma_i}{\gamma_0}-1}$ に比例するとし、これらの積により劣化進行の指標とされている。

$$D = \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_i}{N_0} \cdot 10^{\frac{\gamma_i}{\gamma_0}-1} \right) \quad \text{----- (2)}$$

- ここで、n：表面剥離が発生後からの全測定回数
- i：表面剥離発生後からの測定回数
- N_0 ：表面剥離が生じた時の凍結融解回数
- N_i ：i-1からiまでのサイクル数
- γ_0 ：表面剥離が生じた時の汀線部の含水率
- γ ：i-1からiまでサイクルをかけたときの含水率の平均値

3. 実験結果および考察

(1) 表面剥離発生時の凍結融解回数

表面剥離発生時の凍結融解回数（ N_0 ）と汀線部の含水率（ γ_0 ）を表-2に示した。表面剥離発生時の凍結融解回数は、骨材Aを使用した場合は水セメント比による差はあまりみられなかった。骨材Bを使用した場合は、ばらつきはあるものの水セメント比が大きいほど早い時期に剥離が発生する傾向があった。混合セメントの使用による差はあまりみられなかった。混和材の混入による影響は、10%、15%のシリカフェュームの混入により普通ポルトランドセメントの場合に比べ、剥離発生の時期が遅くなる傾向があった。また、高炉スラグ微粉末の置換率が35%と65%とでは、剥離発生の凍結融解回数に大きな差があり、65%では早い時期に剥離が発生していた。骨材Aを使用した供試体と骨材Bを使用した供試体を比較すると、骨材Bを使用したものは、Aを使用したものに対して、低い含水率で早い時期に損傷が発生する傾向があった。

圧縮強度との関係では、圧縮強度の大きなシリカフェューム混入のものは他のものに比べて遅い時期に軽微な損傷が発生した。

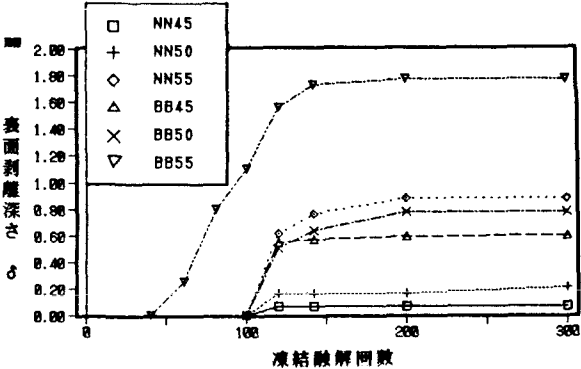


図-2 凍結融解回数と表面剥離深さの進行

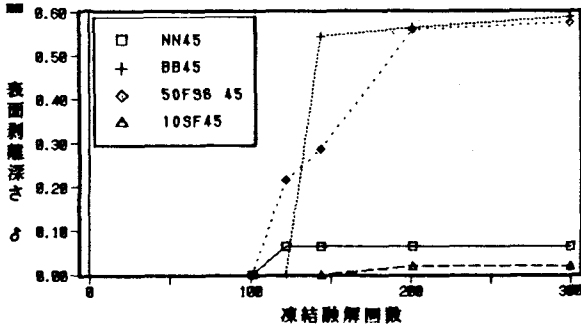


図-3 凍結融解回数と表面剥離深さの進行

(2) 凍結融解回数と表面剥離深さの進行

図-2～図-6は凍結融解回数と表面剥離深さの関係を示したものである。表面剥離の進行はある深さレベルまで急激に進行し、その後、緩やかな進行となる傾向があった。

図-2は水セメント比の影響を骨材A、NN（普通ポルトランドセメント）、BB（高炉セメントB種）の場合を用いて示したものである。水セメント比が大きな場合には、小さな場合に比べ大きな損傷となり、40%と50%の剥離深さの差よりも、50%と55%の剥離深さの差の方が大きい。

図-3はセメントの種類による差を骨材A、水セメント比45%の場合を用いて示したものである。BB45（高炉セメントB種）、50FS6 45（高炉スラグ微粉末、粉末度6000 (cm²/g)50%置換）、NN45（普通ポルトランドセメント）、10SF45（シカフェムA10%置換）の順に損傷の程度が大きい。特に、10SF45は軽微な損傷しか起こらなかった。

図-4は骨材の種類による差を示したものである。NN（普通ポルトランドセメント）では、骨材Aの方が小さな損傷であった。BB（高炉セメントB種）とFB（フライアッシュセメントB種）では骨材Bの方が小さな損傷であった。

図-5は骨材B、水セメント比50%の場合を用いて、高炉スラグの置換率の違いによる影響を示したものである。置換率が小さいほど、起こる損傷も小さい傾向がある。この傾向はスラグの粉末度が大きいほど顕著であった。置換率50%で300サイクルまでに8mm近くも剥離したもののあった。

図-6は高炉スラグの粉末度の違いによる影響を示したものである。骨材B、水セメント比50%、高炉スラグ置換率は50%の場合である。粉末度が大きいほど剥離損傷が小さくなる傾向があった。

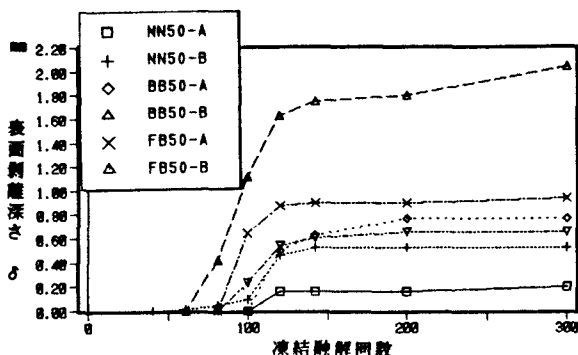


図-4 凍結融解回数と表面剥離深さの進行

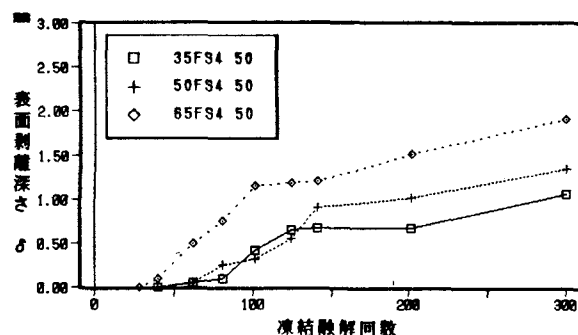


図-5 凍結融解回数と表面剥離深さの進行

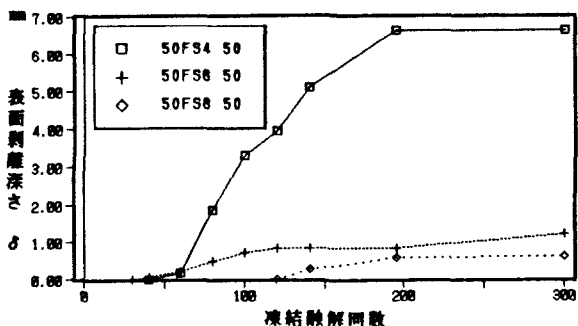


図-6 凍結融解回数と表面剥離深さの進行

(3) 劣化予測式の検討

表面剥離による劣化の最大深さ δ を、劣化進行係数 D により予測するための予測式を最小2乗法により求めた。表-4に予測式とその係数および相関率を示した。

相関率は概ね0.7程度以上であった。骨材AのNN45（普通ポルトランドセメントの水セメント比45%のもの）とSF（シリカフェームを混入したものは、表面剥離発生後、300サイクルまで深さが一定値だったので、係数 $a=0$ となった。（NN45,10SF40,10SF45,15SF45）

図-7はBB（高炉セメントB種）の場合で水セメント比45%では $\delta=0.59D^{0.04}$ 、50%では $\delta=0.76D^{0.17}$ 、55%では $\delta=1.19D^{0.36}$ となり、水セメント比が小さいほど耐凍害性が増す傾向が明らかである。

図-8は、骨材Aの、50FS 50（高炉スラグ微粉末,50%置換、水セメント比50%）の場合であり、高炉スラグの粉末度の違いによる差を示したものである。予測式による計算の結果は劣化進行係数 D が3.5程度よりも小さな範囲では、粉末度6000 cm^2/g のものが4100 cm^2/g 比べて損傷の度合いが大きい、3.5程度より大きくなると、4100 cm^2/g のものが6000 cm^2/g のものに比べ損傷の度合いが大きくなることを示している。

供試体の劣化の様子を写真-1に示す。

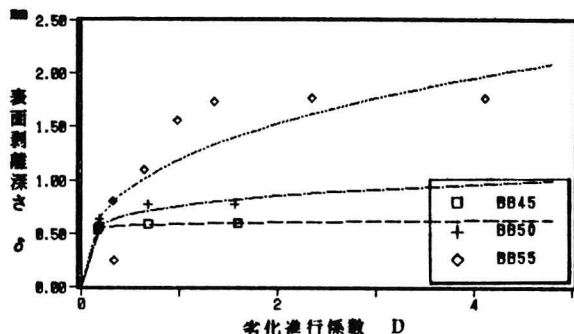


図-7 劣化進行係数と表面剥離深さの進行

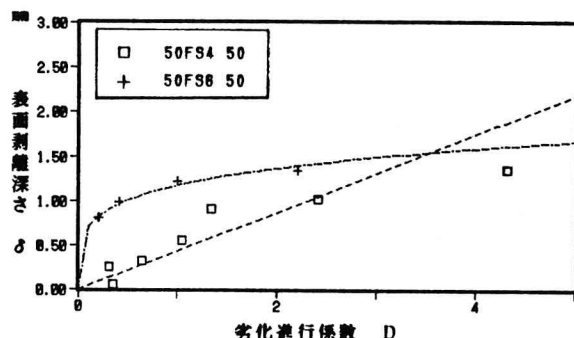


図-8 劣化進行係数と表面剥離深さの進行



写真-1 供試体の凍害状況

表-3 劣化進行予測式の係数とその相関率

予測式: $\delta = b D^a$

δ : 表面剥離深さ a, b : 係数 n : 標本数

D : 劣化進行係数 r : 相関率

1) 骨材A使用供試体

配合	a	b	r	n	配合	a	b	r	n	配合	a	b	r	n
NN45	0.00	0.06	—	4	10SF40	0.00	0.04	—	2	FB50	0.10	0.91	0.67	5
NN50	0.08	0.19	0.81	4	10SF45	0.00	0.02	—	2	50FS6 45	0.41	0.54	0.92	4
NN55	0.13	0.87	0.83	4	15SF45	0.00	0.01	—	2	50FS6 50	0.22	1.17	0.99	5
BB45	0.04	0.59	0.94	4	35FS8 50	1.08	1.04	1.00	2	35FS4 50	1.04	0.36	0.66	7
BB50	0.17	0.76	0.86	4	50FS8 50	0.29	5.03	0.83	9	50FS4 50	1.01	0.43	0.73	7
BB55	0.36	1.19	0.79	7	65FS8 50	0.81	0.33	0.98	8	65FS4 50	0.81	0.53	0.81	8

2) 骨材B使用供試体

配合	a	b	r	n	配合	a	b	r	n	配合	a	b	r	n
NN45	0.41	0.30	0.94	5	10SF40	3.98	20.43	1.00	2	FB50	0.27	0.61	0.64	5
NN50	1.25	0.16	0.87	7	10SF45	1.03	0.51	1.00	2	50FS6 45	0.18	0.62	0.90	4
NN55	0.04	0.58	0.68	5	15SF45	0.72	0.35	1.00	4	50FS6 50	0.04	0.90	0.90	8
BB45	0.87	0.72	0.96	6	35FS8 50	0.40	0.82	0.68	3	35FS4 50	0.28	1.41	0.84	6
BB50	0.41	1.51	0.84	6	50FS8 50	0.46	0.87	0.79	4	50FS4 50	1.01	2.65	0.68	7
BB55	0.50	1.03	0.99	7	65FS8 50	0.50	0.64	0.88	7	65FS4 50	1.28	0.07	0.95	11

4. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

- 1) シリカフェウム10%の混入で、普通ポルトランドセメントに比べ、汀線部コンクリートの耐久性が改善される傾向がある。
- 2) 高炉スラグの混入が、耐久性に及ぼす影響は大きく、高炉スラグの置換率が大きくなるほど耐久性は低下する傾向がある。凍結融解作用を受ける可能性のある環境下では、高炉スラグの置換率を35%以下にすべきであると考えられる。
- 3) 300サイクルの凍結融解試験の結果から、ある程度妥当な予測式が得られる。

謝辞: 本研究に対して多大なご協力をくださった小村利夫氏に感謝の意を表します。