

論文 酸性雨と凍結融解の複合劣化を受けた超高性能コンクリートの耐久性

伊藤祐二*1・来海豊*2・田中健治郎*3・田中斉*4

要旨：近年，社会的要求に応えるための高強度・高耐久や自己充填性等を特長とする超高性能コンクリートの研究開発が盛んに行われている。当然，超高性能コンクリート構造物の場合には，供用期間は現状構造物の場合よりも長くすることが期待される。一方，我国においても酸性雨の発生頻度が高まり，これによる構造物耐久性への悪影響が懸念される。本研究は，酸性雨と凍結融解の複合劣化作用をモデル化した試験により，超高性能コンクリートの耐久性を通常のコンクリートと比較検討したものである。その結果，複合劣化作用に対する超高性能コンクリートの優位性が明らかとなった。

キーワード：超高性能コンクリート，酸性雨，凍結融解，複合劣化作用

1. はじめに

近年，社会的要求に応えるための高強度，高耐久や自己充填性等を特長とする超高性能コンクリート¹⁾の研究開発が盛んに行われており，超高性能コンクリート構造物の場合には，供用期間は現状構造物の場合よりも長くすることが期待される。一方，我国においても酸性雨²⁾の発生頻度が高まり，これによる構造物耐久性への悪影響が懸念される。

「S. Q. C. 構造物 開発・普及協会」に設置された耐久性部会では，調査・研究活動として超高性能コンクリートを対象とした一連の実験を実施している。本報は，超高性能コンクリートが酸性雨と凍結融解の複合劣化作用を受けた場合の耐久性に着目し，複合劣化作用をモデル化した試験により超高性能コンクリートの耐久性を通常のコンクリートと比較検討したものである。

2. 複合劣化試験

2.1 試験方法

図-1に複合劣化試験のフローを示す。

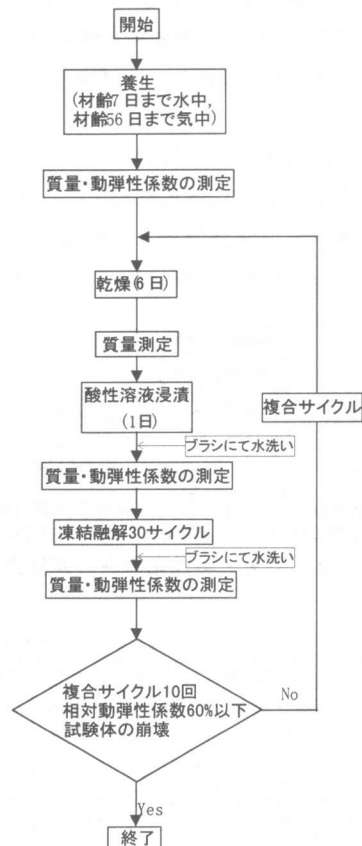


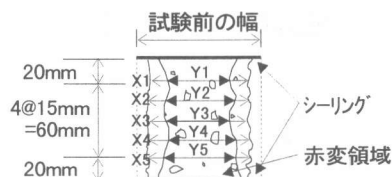
図-1 複合劣化試験のフロー

*1 (株)フジタ技術研究所 主任研究員 工修 (正会員)
 *2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 工博 (正会員)
 *3 (株)熊谷組技術研究所 主席研究員 工修 (正会員)
 *4 飛島建設(株) 技術研究所 材料研究室室長 (正会員)

本試験は基本的には養生を終了した試験体に、乾燥・酸性溶液浸漬・凍結融解の繰返しサイクルを与えるものであり、実施工を考慮した養生として、材齢 7 日までを水中、その後材齢 56 日までで気中養生とした。表-1 に試験条件を示す。乾燥条件および酸性溶液浸漬時間は予備試験として、圧縮強度 60 および 90N/mm² の高強度コンクリートの乾燥・吸水繰返しを行い、質量変化勾配が十分小さくなることより決定した。浸食・中性化深さは試験開始前に試験体の幅を図-2 に示す位置で測定しておき、事前に定めた複合サイクルにおいて試験体の幅および未中性化領域の幅を測定し、試験前の幅との差より算出した。酸性溶液浸漬槽は pH=3.0 を維持可能な構造とし、20℃の恒温室内に設置して、試験を行った。

2.2 コンクリートの配合

表-2 および 3 に使用材料とコンクリートの配合を示す。試験対象としては、超高性能コンクリート(設計基準材齢 56 日)に 6 配合



試験体の幅(X1~X5)を測定し、平均浸食深さを算出
未中性化幅(Y1~Y5)を測定し、平均中性化深さを算出

図-2 浸食・中性化深さの測定方法

表-1 試験条件

養生条件	水中(20±3℃の水中に所定の材齢まで静置) 気中(温度 20±3℃,湿度 60±3%の気中に所定の材齢まで静置)
複合劣化試験	
試験体寸法	動弾性係数測定用:10×10×40cm 浸食・中性化深さ測定用:10×10×8cm(両側面を評価対象) 試験体数:各2体
凍結融解試験	JSCE-G-501-1986
促進中性化試験	文献4)参照
浸食・中性化深さ	図-2参照
酸性溶液条件	pH=3.0,温度 20±3℃ 硫酸:硝酸=2:1
乾燥条件	温度 20±3℃,湿度 60±3%
複合サイクル	乾燥 6 日+酸性溶液浸漬 1 日 +凍結融解 30 サイクル

表-2 使用材料

材料種別	材料名および物性
セメント	普通ポルトランドセメント(OPC) (比重:3.16)
	低熱ポルトランドセメント(LC) (比重:3.26)
	高強度・高流動コンクリート用ハイライトセメント[BL] (比重:3.20)
混和材	フライアッシュ[FA] (比重:2.11,比表面積:3,480cm ² /g)
	高炉スラグ微粉末[BS] (比重:2.89,比表面積:5,830cm ² /g)
	シリカフェーム[SF] (比重:2.20,比表面積:200,000cm ² /g)
	高炉スラグ微粉末[BSS] (比重:2.91,比表面積:15,000cm ² /g)
細骨材	川砂(表乾比重:2.54,吸水率:2.70%,粗粒率:2.61)
粗骨材	硬質砂岩 2005 砕石(表乾比重:2.65,粗粒率:6.52,実積率:60.1%)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤[Ad1] リグニンスルホン酸系 AE 減水剤[Ad2] 変性アルキルカルボン酸系 AE 剤[Ad3]

表-3 コンクリートの配合

配合名	設計基準強度 (N/mm ²)	配合強度 (N/mm ²)	目標スランブロー (mm)	水結合材比 (%)	水粉体容積比 (%)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)							
									水 (W)	結合材(B)		粗骨材 (G)	混和剤(B×%)			
										セメント (C)	混和材 (Adm)		骨材 (S)	Ad1	Ad2	Ad3
LC72	60	72	600	38.6	126.0	4.0	52.9	0.312	165	427*1	0	891	827	1.00	0	0.0020
FA72	60	72	600	34.9	100.2	4.0	50.0	0.312	165	378*2	98*3	809	827	1.25	0	0.0075
BS72	60	72	600	41.5	125.2	4.0	52.9	0.312	165	199*2	199*4	891	827	1.05	0	0.0025
BL96	80	96	650	32.6	104.3	3.5	52.3	0.306	165	506*5	0	852	811	1.35	0	0.0020
SF120	100	120	650	25.7	78.7	3.0	49.6	0.300	165	578*5	64*6	750	795	1.50	0	0.0045
BS120	100	120	650	22.0	69.7	3.0	47.2	0.300	165	675*5	75*7	681	795	1.75	0	0.0012
OPC29	24	29	12*8	59.9	189.4	4.5	45.1	0.390	160	267*5	0	813	1034	0	0.25	0.0030

*1:LC, *2:OPC, *3:FA, *4:BS, *5:BL, *6:SF, *7:BSS, *8:スランブ(cm)

(60N/mm² クラス 3 配合, 80N/mm² クラス 1 配合
および 100N/mm² クラス 2 配合), 比較の対象と
して通常のコンクリート(設計基準材齢 28 日,

設計基準強度 24N/mm²)を 1 配合とした。超高
性能コンクリートの配合・練混ぜ方法・練混
ぜ時間は、事前の試験³⁾にてフレッシュ時およ
び硬化後の強度特性を確認し、決定した。

表-4 コンクリートの試験結果

配 合 名	フレッシュ時の特性					強度特性*1	
	スラン プ フ ロー (mm)	500mm フロー 到達時 間 (秒)	V漏 斗流 下時 間 (秒)	空 気 量 (%)	コン クリ ート 温度 (°C)	圧縮 強度 (N/mm ²)	ヤング 係数 (KN/mm ²)
LC72	565	6.7	13.1	4.3	20.0	70.6	33.9
						51.5	27.2
FA72	580	4.6	8.0	4.2	19.5	67.2	31.8
						59.6	28.4
BS72	615	3.9	10.6	3.7	20.0	67.2	32.2
						60.6	28.3
BL96	620	4.4	10.5	4.5	22.0	95.5	35.8
						92.9	34.8
SF120	655	5.5	12.4	2.7	21.5	121.9	38.6
						124.9	39.1
BS120	685	6.9	19.2	3.1	22.0	112.6	38.6
						112.6	39.0
OPC29	11.5*2	-	19.2	4.4	20.0	39.7	30.4
						34.1	25.0

*1: 上段は水中養生, 下段は水中養生(材齢 7 日ま
で)後、気中養生(材齢 56 日まで)

*2: スランプ(cm)

コンクリートは練混ぜ後、フレッシュ時の
特性を確認し、強度および耐久性試験用試験
体を作成した。

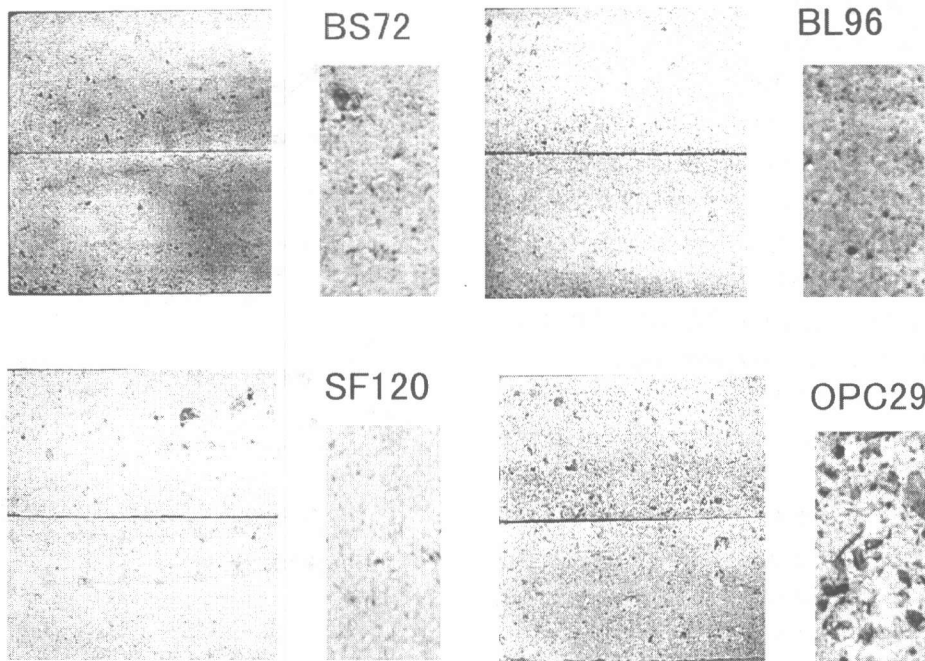
3. コンクリートの特性

フレッシュ時および硬化コンクリートの試
験結果の一部を表-4 に示す。この表より、
超高性能コンクリートのフレッシュ時の性能
は自己充填型の高流動コンクリートとしての
性能⁵⁾をほぼ満足していることが分かる。超高
性能コンクリートの材齢 56 日強度は 50~
120N/mm² 程度であり、一部配合を除いて水中+
気中養生の場合でも設計基準強度を満足した。

4. 複合劣化試験結果

4.1 試験体の劣化状況

写真-1 に複合 10 サイクル終了時の試験



(左半分側面および端面の拡大写真)

写真-1 複合 10 サイクル終了時の試験体の外観

体を示す。通常コンクリート(OPC29)の場合には表面のモルタルが剥落し、粗骨材が表面全体に認められた。一方、超高性能コンクリートの場合には表面のペーストが多少浸食されて細骨材が現れ、表面がざらついてきた程度であった。すなわち、表面劣化状況からは超高性能コンクリートの優位性が明らかであった。

4.2 相対動弾性係数

図-3に複合サイクル終了時における相対動弾性係数と複合サイクル数の関係を示す。複合劣化を受けた7配合とも、相対動弾性係数は100%以上を示しており、この傾向および値は酸性溶液浸漬終了時(凍結融解前)の場合にも同様であった。今回の複合劣化試験において相対動弾性係数が低下しなかったのは、複合劣化が表面的作用の段階であるため、試験体全体の劣化を対象とする相対動弾性係数には検出されなかったと考えられる。

4.3 質量変化率

図-4に質量変化率と複合サイクル数の関係を示す。質量変化率はいずれも正であり、劣化作用による質量減少よりも、吸水による質量増加の方が大きいことが分かる。

複合10サイクルにおける質量変化率は低強度の場合ほど大きく、高強度ほど小さくなっている。すなわち、組織が緻密で空隙が少ないSF120やBS120の場合には、劣化による質量減少も吸水による質量増加も小さい。

また、質量変化率の最大値は複合1サイクル時に認められ、それ以後は減少する傾向となっている。

図-5に質量変化率の差と複合サイクル数の関係を示す。質量変化率の差は前回複合サイクル終了時の質量変化率から、今回のそれを差し引いて求めており、値が負であることは質量の減少を示す。試験体の質量減少率の差は複合3サイクル以降では、負または0を

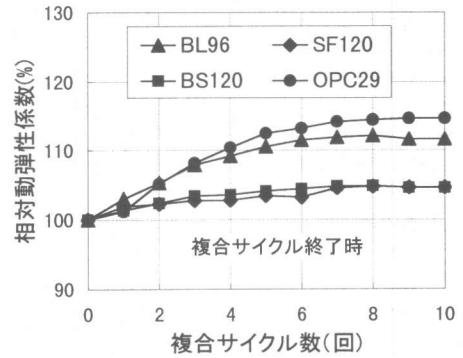
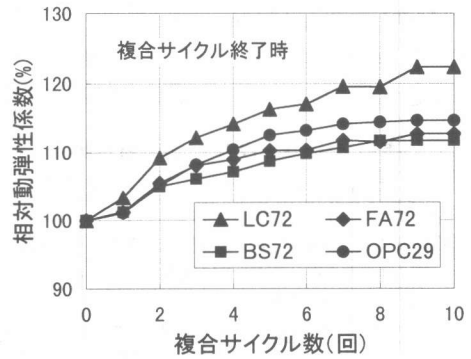


図-3 相対動弾性係数と複合サイクル数の関係

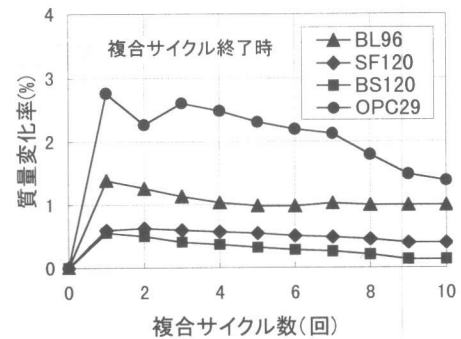
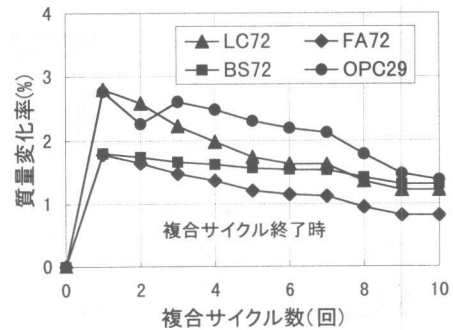


図-4 質量変化率と複合サイクル数の関係

示し、複合サイクル間の劣化による質量減少が、吸水による質量増加を上回っていることを示している。

本複合劣化試験には乾燥・吸水(酸性溶液)サイクルが含まれているため、複合10サイクル終了時では劣化による質量減少よりも、試験サイクル初期の吸水による質量増加の方が大きかったと考えられ、試験体内部の劣化を明瞭にとらえるには、より長期の試験を行うか、試験条件をより厳しくする必要がある。

4.4 浸食・中性化深さ

図-6に平均浸食深さと複合サイクル数の関係を示す。本複合試験の場合、複合10サイクル終了時の浸食深さは最大で1.5mm程度(OPC29)であり、それほど大きくない。コンクリートの浸食深さは強度レベルが大きいほど小さくなる傾向があり、ペースト組織の緻密さと関係している。

図-7に平均中性化深さと複合サイクル数の関係を示す。なお、BL96, SF120, BS120の3配合の場合には、試験体断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧すると、全断面が赤変するため、浸食深さを中性化深さと見なした。複合10サイクル終了時における中性化深さは、強度レベル(24, 60, 80, 100N/mm²)ごとの値を示しており、結合材種別の影響は比較的小さい。また、通常コンクリートの複合10サイクル終了時での中性化深さは5.5mmで、一般に行われている促進中性化試験⁴⁾と比べてかなり小さい。事前に行った促進中性化試験結果では通常コンクリートの中性化深さ(材齢26週)は18mm程度であったので、本試験による中性化負荷は複合10サイクル終了時で1/3程度と考えられる。

図-8に平均中性化深さと試験開始時圧縮強度の関係を示す。この図には、試験開始時に試験体中心部より採取した試料より求めた総細孔容積も示している。平均中性化深さは圧縮強度が大きい(総細孔容積が小さい)ほど

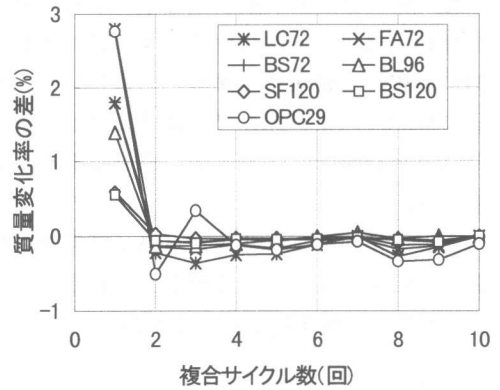


図-5 質量変化率の差と複合サイクル数の関係

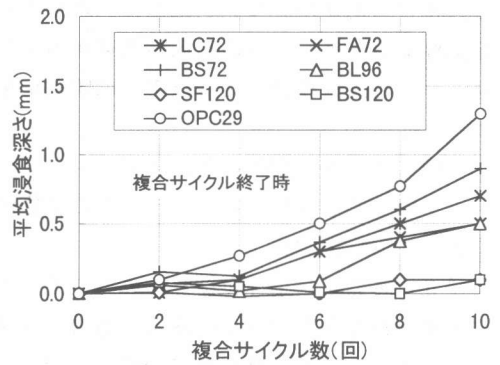


図-6 平均浸食深さと複合サイクル数の関係

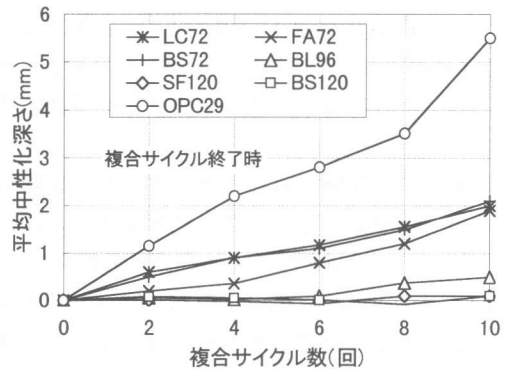


図-7 平均中性化深さと複合サイクル数の関係

小さくなっている。また、試験開始時圧縮強度が100N/mm²以上の場合、中性化はほとんど進行していない。

図-6～8より、酸性雨と凍結融解の複合劣化作用に対する耐久性は、コンクリート組織の緻密さと密接に関係し、通常コンクリートに比べて組織が緻密で、総細孔容積の小さい超高性能コンクリートが、優位であることが明らかであった。

ただし、複合10サイクル終了時では試験体の相対動弾性係数は100%以上の値を示し、より長期の試験を行う必要がある。

5. まとめ

超高性能コンクリートが酸性雨と凍結融解の複合劣化作用を受けた場合の耐久性に着目し、複合劣化作用をモデル化した試験により超高性能コンクリートの耐久性を通常のコンクリートと比較検討した。以下に試験結果をまとめる。

- ①表面劣化状況の観察より、通常コンクリートに比べて超高性能コンクリートの優位性は明らかであった。
- ②浸食深さおよび中性化深さはコンクリート組織の緻密さと密接に関係し、通常コンクリートに比べて組織が緻密な超高性能コンクリートが優位である。
- ③複合10サイクル終了時におけるSQCの中性化深さは強度レベルに応じて減少し、60N/mm²レベルの場合でも通常コンクリートの1/3程度で、結合材種別の影響は比較的小さかった。
- ④複合劣化試験を行ったコンクリート試験体は、いずれの配合および試験サイクルにおいても相対動弾性係数は100%以上を示した。
- ⑤複合劣化試験に乾燥・吸水(酸性溶液)サイクルが含まれているため、複合10サイクル終了時では劣化による質量減少よりも、試験サイクル初期の吸水による質量増加の方が大きかったと考えられる。

[謝辞]

本研究の計画・実施にあたって、東京大学・

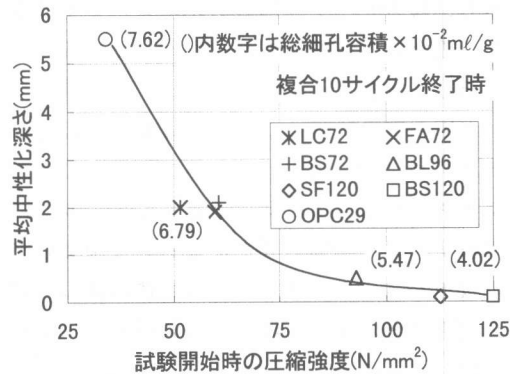


図-8 平均中性化深さと

試験開始時圧縮強度の関係

岡村甫教授、前川宏一教授、元東京大学助教授・小澤一雅氏および(財)鉄道総合技術研究所のご指導を頂きましたことを付記し、謝辞と致します。

[耐久性部会構成会社] (50音順)

青木建設、奥村組、国光製鋼、熊谷組、サンフロー、新日鐵化学、住金鹿島鉱化、住友大阪セメント、竹本油脂、太平洋セメント、鉄建建設、鉄道総合技術研究所、長大、東亜建設工業、戸田建設、飛鳥建設、間組、フジタ、不動建設、ポゾリス物産、前田建設工業、三井建設 [(財), (株)省略]

参考文献

- 1) 田中斉ほか、超高性能コンクリートの耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 1, pp. 227~232, 1998. 6
- 2) 川名英之：日本の公害—第12巻 地球環境の危機—, 緑風出版, 1995. 11
- 3) 例えば、伊藤祐二ほか：超高性能コンクリートの力学的特性に関する検討、土木学会全国大会講演概要集, V部門, pp. 138~139, 1998. 9
- 4) 日本建築学会：高耐久性コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 1991. 7
- 5) 土木学会：高流動コンクリート施工指針, 1998. 7