

論文 フライアッシュコンクリートの室内試験および曝露試験による耐久性について

齋藤 敏樹*1・関谷 美智*2・開 洋介*3

要旨: フライアッシュコンクリートの耐久性について室内試験および10年間の曝露試験を実施し、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種との比較を行った。その結果、同一単位結合材量における材齢28日までの強度発現性は、フライアッシュコンクリートが最も小さく、室内における凍結融解試験の耐久性も普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用したコンクリートより小さいが、10年間北海道江別市に曝露した結果は、フライアッシュコンクリートが最も高い耐久性能を示した。

キーワード: フライアッシュ, 曝露試験, 耐久性, 凍結融解, 塩化物イオンの見掛けの拡散係数, 乾燥収縮

1. はじめに

近年、資源の有効利用および環境問題の観点から産業副産物の利用が推進されてきている。電力業界においても石炭火力発電所から副産されるフライアッシュの有効利用が進められているが、その多くは粘土代替材としてのセメント原料に頼っているのが現状である。代表的なポゾラン材であるフライアッシュは、古くからコンクリート用混和材やセメント混合材として土木用コンクリートを中心に幅広く利用されていたが、石炭原料の国内炭から海外炭への移行に伴い品質の低下と品質変動が拡大し、徐々に利用が衰退した。

その後、各学会などからフライアッシュコンクリートの各種指針・ガイドラインの発刊^{1,2,3)}や研究論文が数多く報告^{4,5,6)}され、普及へ向けて整備されている状況にある。他方、北海道電力(株)では、苫東厚真発電所において高性能分級装置、自動品質分析装置、ブレンディングサイロおよび製品サイロなどを拡充し、平成16年度より一般生コン会社への販売を再開したところである。

本実験は、海外炭フライアッシュの本格的な実用化に向け、実施に即応した技術資料を取得する目的で市場流通品による公共土木配合の検討とともに、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用したコンクリートとの性状比較を行った。また、北海道江別市の曝露試験場に作製した供試体を曝露し、10年が経過したのでその結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表-1に示す。

2.2 配合条件・実験ケース

本実験の配合条件を表-2に、実験ケースを表-3に示す。

表-1 使用材料

種類	諸元
セメント	普通 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3.340cm ² /g
	高炉B種 密度 3.05g/cm ³ , 比表面積 3.880cm ² /g
フライアッシュ (JIS II種)	強熱減量 1.2%, SiO ₂ 71.4%, MB吸着量 0.47% 密度 2.15g/cm ³ , 比表面積 3.830cm ² /g 45μmふるい残分 17%, フロー値比 106% 活性度指数28日 86%, 活性度指数91日 95%
細骨材 (陸砂)	表乾密度 2.69g/cm ³ , 吸水率 1.71% 単位容積質量 1.78kg/L, 実積率 67.3% 安定性損失量 2.6%, 粗粒率 2.62
粗骨材 (碎石2505)	表乾密度 2.68g/cm ³ , 吸水率 1.90% 単位容積質量 1.62kg/L, 実積率 62.1% 安定性損失量 5.3%, 粗粒率 6.96
混和剤	AE減水剤 リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE剤 樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤
練混ぜ水	上水道水
食塩	塩化ナトリウム (JIS K 8150) 99.5%以上

表-2 配合条件

設計基準強度	配合強度	粗骨材の最大寸法	スランブ	空気量	最大水結合材比	最小単位結合材量
f'_{ck} ※1)	f'_{cr} ※2)	(mm)	(cm)	(%)	(%)	(kg/m ³)
(N/mm ²)	(N/mm ²)					
21	27.9	25	8±1.5	5±0.5	55	280

※1) 設計基準強度の材齢は28日

$$※2) f'_{cr} = f'_{ck} \times \frac{1}{1 - \frac{1.645 V}{100}}$$

ここで、V(変動係数)は15%とした

表-3 実験ケース

実験ケース	略号	セメント種類	フライアッシュ置換率 F/(C+F) (%)	実験項目					
				配合試験	圧縮強度試験	塩水浸せき試験	乾燥収縮試験	凍結融解試験	曝露試験
N	N280	普通	—	○	○	○	○	○	○
BB	BB280	高炉B種	—	○	○	○	○	○	○
FB	FB280	フライアッシュB種	15	○	○	○	○	○	○
FC	FC280	フライアッシュC種	25	○	○	○	○	○	○

*1 北電総合設計(株) 技術研究所 土木試験室 (正会員)

*2 北海道電力(株) 火力部 石炭灰リサイクル推進室

*3 北海道電力(株) 火力部 石炭灰リサイクル推進室

配合条件は、北海道開発局仕様の土木用生コンクリートの RC-a に相当する。配合表を表-4 に示す。なお、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートを N、高炉セメント B 種を使用したコンクリートを BB、フライアッシュを使用したコンクリートのうちフライアッシュ置換率 15% を FB、フライアッシュ置換率 25% を FC という。また、フライアッシュセメントはフライアッシュの品質および置換率を明らかにするため、室内で普通ポルトランドセメントと混合して使用した。

予備強度試験の結果、全てのケースで配合強度を得るための単位結合材量が 280kg/m³ 以下となり、配合条件を満足しない結果となった。したがって、単位結合材量を 280kg/m³ として各実験を行った。

2.3 実験項目・方法

実験項目および方法を表-5 に示す。

(1) 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、公称容量 55L の強制練り二軸ミキサを使用した。フライアッシュおよびセメントを投入して 30 秒練り混ぜた後、水および混和剤を投入し 120 秒練り混ぜ、かき落としを行い、骨材を投入し 120 秒練り混ぜた後排出し、練板にて手練りを行った。その後、フレッシュ性状を測定し供試体を作製した。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度は JIS A 1108 に準拠し実施した。材齢 1, 3, 7, 28, 56, 91 および 182 日で測定を行った。供試体は直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体とし、1 材齢/ケース当たり 3 本作製した。供試体作製後材齢 1 日で脱型し所定材齢まで水中養生(温度 20±2℃)した。

(3) 塩水浸せき試験

塩水浸せき試験は JSCE-G 572 に準拠し実施した。供試体は、1 ケース当たり 3 本作製した。材齢 28 日から塩化ナトリウム水溶液(濃度 10%)に浸せきし、浸せき期間 26 週で供試体を取り出し、乾燥後深さ 0~1cm, 1~2cm, 2~3cm, 3~4cm および 4~5cm に乾式カッターにより切り出し、全塩化物イオン濃度を測定し、見掛の拡散係数を算出した。

(4) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は JIS A 1129 のコンパレータ方法に準拠し実施した。供試体は、1 ケース当たり 3 本作製した。

供試体作製後材齢 1 日で脱型し水中養生(温度 20±2℃)後材齢 7 日において基長を測定した後、温度 20±1℃、相対湿度 60±5%の恒温恒湿室に保存し供試体の長さ変化率を測定した。

(5) 凍結融解試験

凍結融解試験は JIS A 1148 の A 法に準拠し実施した。供試体は 1 ケース当たり 3 本作製した。供試体作製後材齢 1 日で脱型し材齢 28 日まで水中養生(温度 20±2℃)した後凍結融解を開始し、300 サイクルまで 30 サイクル毎に測定した。

(6) 曝露試験

曝露試験の供試体は、1 ケース当たり 3 本作製した。供試体の寸法は、直径 150mm、高さ 300mm とし、供試体の中心温度が測定できるようにサーミスタを埋め込んだ供試体を別に作製した。供試体作製後材齢 1 日で脱型し材齢 28 日まで水中養生(温度 20±2℃)した後、供試体の質量および縦振動の一次共鳴振動数による動弾性係数を測定し基準とした。その後、北海道江別市の曝露試験場のステンレステーブル(高さ 700mm)上に供試体を設置し、日照、降雨および降雪の影響を受ける自然環境下に

表-5 実験項目および方法

実験項目	実験方法	
配合試験	コンクリートの練混ぜ	JIS A 1138 「試験室におけるコンクリートの作り方」
	スラブ試験	JIS A 1101 「コンクリートのスラブ試験方法」
	空気量試験	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力法)」
	温度測定	アルコール温度計により測定
圧縮強度試験	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」	
塩水浸せき試験	JSCE-G 572 「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法(案)」 前養生：20℃水中28日 (材齢21日で供試体シール) 浸せき溶液：食塩水(NaCl 10%(mass))	
乾燥収縮試験	JIS A 1129-1 「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法-第1部：コンパレータ方法」 前養生：20℃水中7日(基長) 保存条件：気中養生 (温度 20±1℃、相対湿度 60±5%)	
凍結融解試験	JIS A 1148 「コンクリートの凍結融解試験方法」 A 法 前養生：20℃水中28日	
曝露試験	北海道江別市の曝露試験場にステンレステーブル(高さ700mm)上に曝露し、JIS A 1127 「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」の縦振動による動弾性係数および質量を1回/年測定した。また、供試体中心温度および気温を1時間間隔で測定した。 前養生：20℃水中28日	

表-4 配合表

実験ケース	略号	フライアッシュ置換率 F/(G+F) (%)	水結合材比 W/(G+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								フレッシュ性状				
					水 W	結合材 C+F	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤				スラブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
											AE減水剤 (g/m ³) (%)		AE助剤 (g/m ³) (%)				
N	N280	0	52.5	44	147	280	280	—	846	1,072	700 (0.25)	4.48 (0.0016)	9.0	4.7	20.7		
BB	BB280	0	51.4	44	144	280	280	—	845	1,072	700 (0.25)	5.32 (0.0019)	8.5	4.9	20.0		
FB	FB280	15	49.6	43	139	280	238	42	828	1,094	700 (0.25)	19.04 (0.0068)	9.0	5.0	20.5		
FC	FC280	25	48.6	43	136	280	210	70	827	1,092	700 (0.25)	29.40 (0.0105)	8.5	5.0	20.9		

おける曝露を平成18年6月から開始した。曝露試験中は、供試体中心温度および百葉箱に設置した温度計により気温を1時間間隔で測定した。他方、供試体の経年変化は、質量および縦振動の一次共鳴振動数による動弾性係数を毎年9～10月に1回測定した。なお、曝露試験場は、海岸から直線距離で約20kmあり、海からの飛来塩分の影響は受けない地域である。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験

材齢と圧縮強度の関係のうち材齢28日までを図-1に、材齢182日までを図-2に示す。

配合強度(材齢28日)は27.9N/mm²であるが、N280およびBB280は35N/mm²以上の強度発現であった。これは、予備強度試験の結果、配合強度を満足する単位結合材量は280kg/m³以下となり、配合条件の最小単位結合材量280kg/m³を満足させるため単位結合材量を280kg/m³としたため、水結合材比が小さくなり圧縮強度が配合強度より大きくなったものである。材齢28日では、N280が最も高い圧縮強度であり、次いでBB280、FB280となり、FC280が最も低い圧縮強度であった。しかし、材齢が182日になるとBB280が最も高い圧縮強度になるが、N280、FB280およびFC280は同程度の圧縮強度になり、フライアッシュのポゾラン反応による強度増進効果が認められた。

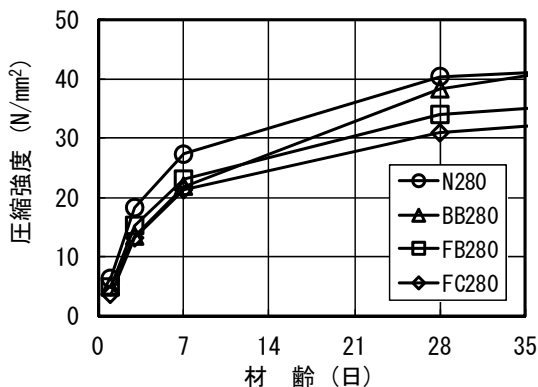


図-1 材齢と圧縮強度の関係(材齢28日まで)

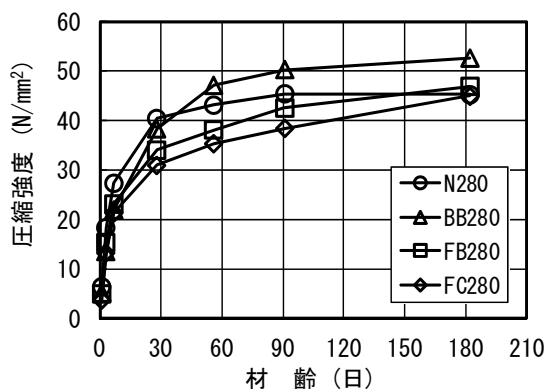


図-2 材齢と圧縮強度の関係(材齢182日まで)

3.2 塩水浸せき試験

材齢28日から26週間浸せきした時の供試体深さと全塩化物イオン濃度の関係を図-3に、見掛けの拡散係数を図-4に示す。

図-3より、全塩化物イオン濃度は深さ0～1cmでは0.7%程度で配合ケースによる相違は小さい。深さ1～2cmではBB280が0.2%程度と最も小さく、次いでFB280とFC280が0.3%程度、N280が0.4%程度となり、深さ2～3cmではBB280は0.03%、FB280とFC280は0.1%程度、N280は0.2%程度となった。深さ3～4cmではBB280、FB280およびFC280の全塩化物イオン濃度は0%となり、N280だけが0.05%を示し塩化物イオンが浸透している結果であり、高炉セメントB種およびフライアッシュセメントは塩化物イオンの浸透抵抗性が高いことが認められた。

図-4より、見掛けの拡散係数はBB280が最も小さく、次いでFC280、FB280となり、N280が最も大きい結果であった。これは、一般に知られている高炉セメントB種およびフライアッシュセメントは普通セメントより塩化物イオンに対する耐久性が高いことと一致する結果である。

圧縮強度(材齢28日)と全塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係を図-5に示す。

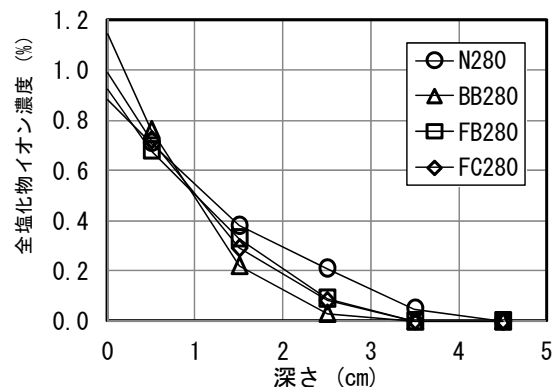


図-3 深さと全塩化物イオン濃度の関係

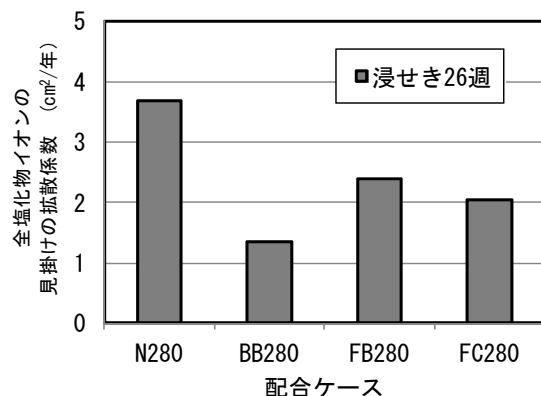


図-4 全塩化物イオンの見掛けの拡散係数

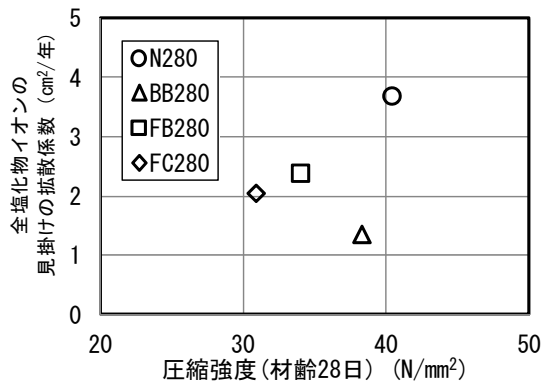


図-5 圧縮強度(材齢28日)と全塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

図-5より、N280は材齢28日の圧縮強度が 40N/mm^2 以上であるが全塩化物イオンの見掛けの拡散係数が最も大きいことが分かる。FB280とFC280では圧縮強度が高いFB280が全塩化物イオンの見掛けの拡散係数が大きく、フライアッシュ置換率により塩化物イオンに対する効果が異なることが推察される。BB280はFB280およびFC280より全塩化物イオンの見掛けの拡散係数が小さい。これは、BB280の圧縮強度はFB280およびFC280より大きいことが影響していると考えられる。

圧縮強度は細孔量が少なくなると大きくなる関係が知られており、細孔量が少ないほど塩化物イオンの浸透抵抗性が高いと考えられるが、セメントの種類により塩化物イオンの細孔への吸着・固定化の相違があると考えられ、細孔分布および塩化物イオンの吸着・固定化については、今後の検討課題である。

3.3 乾燥収縮試験

保存期間と長さ変化率の関係を図-6に示す。

図-6より、保存期間182日までの長さ変化率は、配合ケースよる相違は明瞭ではなく、全ての配合ケースで同程度の0.065%程度であった。

3.4 凍結融解試験

材齢28日から開始した凍結融解試験における凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を図-7、凍結融解サイクルと質量減少率の関係を図-8に示す。

図-7より、N280およびBB280の300サイクル時の相対動弾性係数は90%程度であり、FB280およびFC280は85%程度とN280およびBB280より若干小さいものの優れた耐久性であった。

図-8より、N280およびBB280の300サイクル時の質量減少率は2%程度であり、FB280およびFC280は3.5%程度とN280およびBB280より大きい質量減少率であった。

圧縮強度(材齢28日)と相対動弾性係数の関係を図-9に示す。

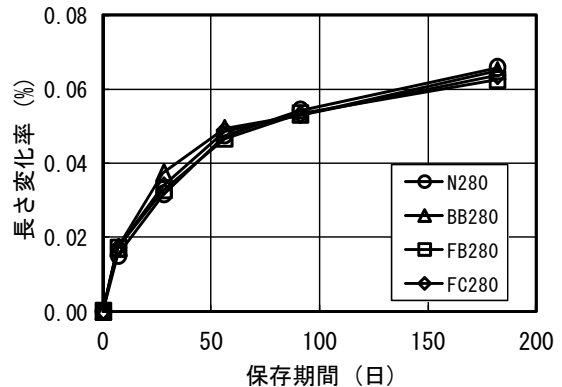


図-6 保存期間と長さ変化率の関係

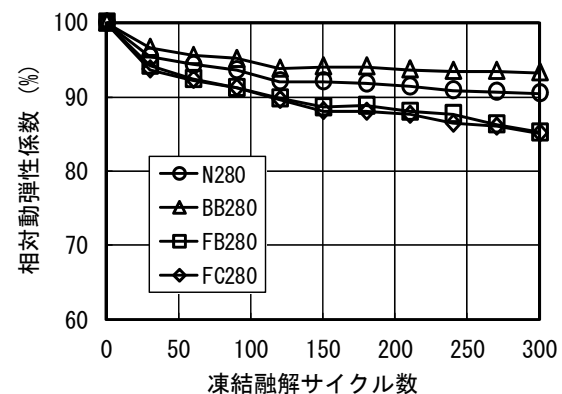


図-7 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

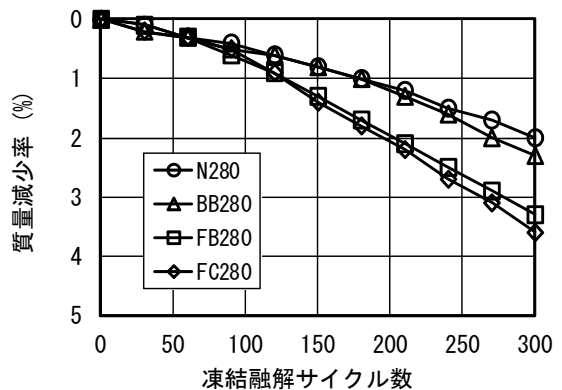


図-8 凍結融解サイクルと質量減少率の関係

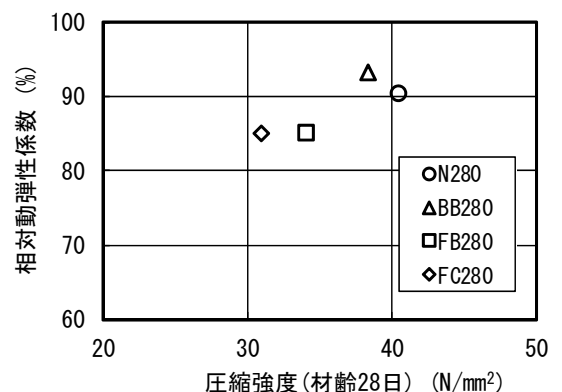


図-9 圧縮強度(材齢28日)と相対動弾性係数の関係

図-9より、圧縮強度が高くなるほど相対動弾性係数は大きくなる傾向が認められた。これは、一般に知られている圧縮強度が高くなるほど耐久性が高くなることと同傾向であった。

他方、耐凍害性はコンクリートの気泡間隔係数との相関性があるとされている。本実験では気泡間隔係数を測定していないため明確ではないが、本実験結果は気泡間隔係数の影響も考えられる。一般に、フレッシュ時の空気量はコンクリートが硬化するまでに減少することが知られている。また、フライアッシュに含まれる未燃分はエントレインドエアを消泡させることがあり、本実験ではフレッシュ時の空気量は $5 \pm 0.5\%$ であったが、FB280およびFC280の硬化後の空気量がN280およびBB280より若干少なくなり、気泡間隔係数が少し大きくなった可能性も否定できない。

3.5 曝露試験

曝露供試体の相対動弾性係数の経年変化を図-10に、質量減少率の経年変化を図-11に示す。

図-10より、相対動弾性係数の経年変化は配合ケースにより異なり、N280は時間の経過にしたがい相対動弾性係数は徐々に低下し、曝露期間10年で相対動弾性係数は約85%まで低下した。BB280は曝露開始後2年間程度は相対動弾性係数は100%以上を示し、その後時間の経過にしたがい徐々に低下し、曝露期間10年で約90%になった。FB280は曝露直後から1~2%の相対動弾性係数の低下が認められるが、その後曝露期間10年までは大きな変動はなく約98%の値を示した。FC280は曝露直後に1%程度の相対動弾性係数の低下が認められるが、その後曝露期間7年まで徐々に高くなり102%程度を示し、その後徐々に低下し曝露期間10年では約100%の値を示した。

曝露期間10年では、フライアッシュセメントの耐久性が高く、次いで高炉セメントB種となり、普通ポルトランドセメントが最も耐久性が小さい結果となった。

図-11より、質量減少率の経年変化はN280、FB280およびFC280が同様な変化を示し、曝露開始後1年で約99%に低下し、その後徐々に低下し曝露期間10年では約98.5%の値を示した。BB280の質量減少率の経年変化は他の配合ケースより低下率が0.5%程度小さく、曝露期間10年では約99%の値を示した。

供試体中心温度および気温の測定結果の一例を図-12に示す。

図-12より、供試体の中心温度がマイナスになるのは11月から翌4月までの期間で、その期間中、供試体の中心温度はプラスからマイナス、マイナスからプラスとなり凍結融解を繰り返しているのが分かる。

供試体中心温度が $+1^{\circ}\text{C}$ 以上から -1°C 以下になりその後 $+1^{\circ}\text{C}$ 以上になった時を凍結融解回数1回とし、曝露期間

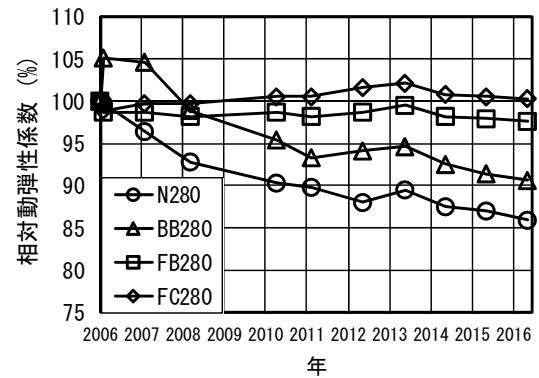


図-10 相対動弾性係数の経年変化

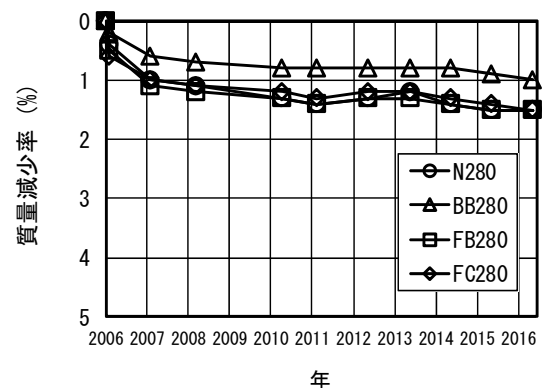


図-11 質量減少率の経年変化

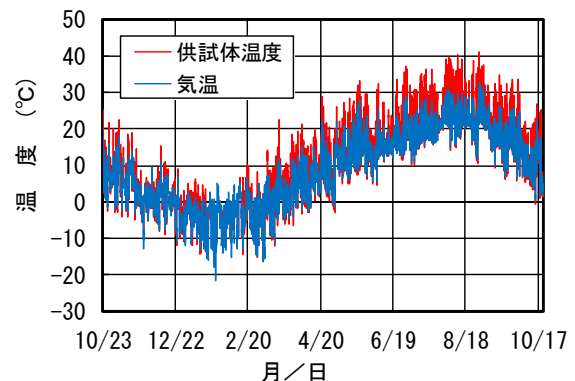


図-12 供試体温度と気温の測定例

中の凍結融解回数を数えた。

凍結融解回数と相対動弾性係数の関係を図-13に、凍結融解回数と質量減少率の関係を図-14に示す。

温度履歴が異なるが、曝露試験(図-13, 14)と室内試験(図-7, 8)における凍結融解回数300回での比較を行う。

N280は室内試験では相対動弾性係数は約90%で、曝露試験では約90%と同程度の値であった。他方、質量減少率は室内試験の方が1%程度大きい結果であった。

BB280は室内試験は相対動弾性係数は約93%で、曝露試験では約97%であった。質量減少率は室内試験の方が曝露試験より1%程度大きい結果であった。

FB280は室内試験では相対動弾性係数は約85%で、曝露試験では約98%であった。質量減少率は室内試験の方

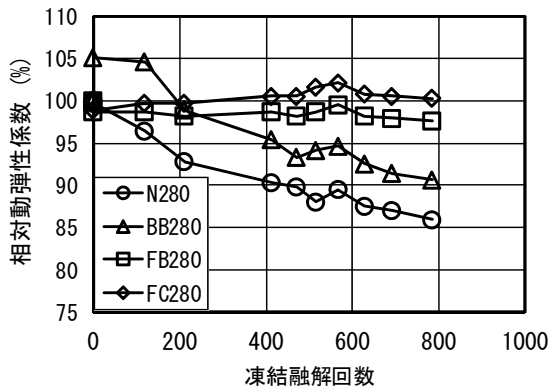


図-13 凍結融解回数と相対動弾性係数の関係

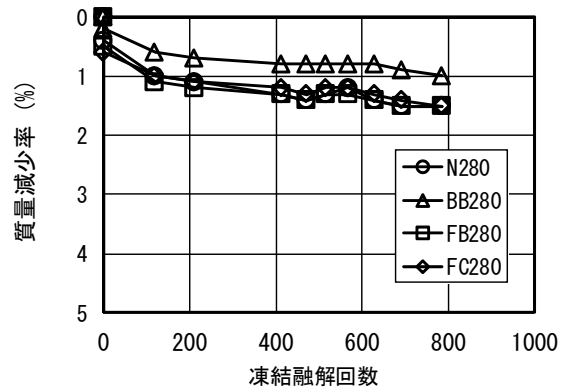


図-14 凍結融解回数と質量減少率の関係

が曝露試験より2%程度大きい結果であった。

FC280は室内試験では相対動弾性係数は約85%で、曝露試験では約100%であった。質量減少率は室内試験の方が曝露試験より2%程度大きい結果であった。

室内試験の凍結融解サイクルと曝露試験の凍結融解回数は温度履歴が異なるため、一概に比較することは出来ないが、曝露期間10年、凍結融解回数約800回の相対動弾性係数は、N280およびBB280は室内試験と同程度の結果となった。しかし、FB280およびFC280は室内試験結果より耐久性が高く、N280およびBB280より優れている結果であった。

この要因として、フライアッシュのポズラン反応は長期間ゆっくりと継続し、冬期の劣化が夏期に修復される作用(自己修復)⁷⁾が生じていることが考えられる。

他方、材齢28日から開始した室内試験による凍結融解試験結果と曝露試験結果を比較すると、NおよびBBは大きな相違は認められないが、FBおよびFCの場合、双方に大きな乖離が生じ、室内試験結果から判断されるFBおよびFCの耐久性は非常に小さく評価される可能性があることが示唆された。

本実験では、28日間水中養生した供試体を使用した。これはそのコンクリートが持つポテンシャルを評価したものである。実構造物の場合、打込後3~7日で曝露されることもあり、今後、実施工を考慮した養生方法においても同様の効果が得られるかの確認を行い、データの蓄積によりその信頼性を向上させ、フライアッシュの有用性を耐久性評価および設計に活用したいと考える。

4. まとめ

RC-aに相当する配合条件において、N、BB、FBおよびFCの耐久性について実験を行った結果得られたことを以下にまとめる。

- 1) 全塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、FBおよびFCはNの1/2程度、BBはNの1/3程度であった。

- 2) 乾燥収縮による長さ変化は、N、BB、FBおよびFCは同程度であり、保存期間182日において0.065%程度であった。
- 3) 凍結融解試験における相対動弾性係数は、NおよびBBは90%以上、FBおよびFCは85%程度であった。
- 4) 北海道江別市に10年間曝露した供試体による相対動弾性係数は、Nは85%程度、BBは90%程度、FBは97%程度、FCは100%程度を示し、凍結融解試験とは異なる結果となり、FBおよびFCの耐久性が非常に高いことが分かった。

参考文献

- 1) (社)日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施工指針(案)・同解説, 1999.2.
- 2) (社)土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), コンクリートライブラリー, 第94号, 1999.4
- 3) (社)土木学会：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー, 第132号, 2009.12
- 4) (社)土木学会：フライアッシュコンクリートシンポジウム論文報告集, コンクリート技術シリーズ, No.27, 1997.12
- 5) (社)日本建築学会：フライアッシュの建築用コンクリートへの有効利用, 2005年度日本建築学会大会(近畿), 材料施工部門パネルディスカッション資料, 2005.9
- 6) (社)日本建築学会：セメント・コンクリート用混和材料およびそれらの基準化に関する技術の現状と論文集, 2006.9
- 7) 藤原佑美, 濱幸雄, 山城洋一, 齋藤敏樹：フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性と自己修復効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.873-877, 2008.7