

論文 建設汚泥固化物を細骨材の一部に置換したコンクリートに及ぼす各種要因による影響

甲把 浩基*¹・横井 克則*²・宮崎 健治*³・福富 隼人*⁴

要旨： これまでに建設汚泥固化物を細骨材の一部として使用したコンクリートは、ブリーディングの抑制効果が確認されたが、強度特性及び耐久性の低下が問題となった。本研究では、建設汚泥固化物を使用したコンクリートの性能向上を目指して、建設汚泥固化物の細骨材に対する置換率をすべての配合で30%に設定し、セメントの種類及びフライアッシュの置換方法を変化させたコンクリートの強度特性及び耐久性の調査を行った。その結果、高炉セメントの使用により潜在水硬性の効果が促進され、さらに、フライアッシュの使用によって、長期強度の向上及び長さ変化の抑制に効果があることが明らかとなった。

キーワード： 建設汚泥固化物, 高炉セメント, フライアッシュ, 細骨材置換, 強度特性, 耐久性

1. はじめに

建設汚泥は地下埋設工事や基礎杭工事等で行われる掘削時に孔壁保護の目的で使用されるセメントミルクや安定液等の混合土砂であり、元の土砂と水に分離することのできない泥状のものである¹⁾。平成20年度における建設汚泥の排出量はコンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊に次ぐ第3位となっている。その再資源化率は、コンクリート塊及びアスファルト・コンクリート塊がほぼ100%を達しているのに対して69.8%にとどまっており、改善傾向にあるとはいえコンクリート塊及びアスファルト・コンクリート塊の再資源化率と比較すると低い水準となっている²⁾。このため、建設汚泥の有効利用を拡大させ、最終処分量を減少させることは緊急の課題となっており、公共工事の削減によって余剰量の増加が見込まれる建設汚泥のさらなる用途拡大が期待されている。一方で、コンクリート用細骨材の現状は、川砂、川砂利や海砂等の骨材資源が大量に使用されたことによる良質な骨材の枯渇化及び海砂の大量採取による漁獲量の減少等により、漁業資源の保全意識が高まったことから主に海砂の採取を厳密化している。このため、特に瀬戸内海では海砂の採取禁止が強化され、天然細骨材に代わるコンクリート用細骨材の安定確保が緊急の課題となっている³⁾。以上のことから、建設汚泥をコンクリート用細骨材として使用することができれば、建設汚泥の有効利用の拡大とコンクリート用細骨材の安定確保という課題を解決できると考えられる。

著者らは、建設汚泥を高炉セメントB種で固化させた建設汚泥固化物をコンクリート用細骨材に用いた研究を継続的に行っている。その結果、普通コンクリートと比

較して、フレッシュコンクリートの性質として、ブリーディングの抑制といった建設汚泥固化物を細骨材に使用することによる利点が明らかとなった⁴⁾。また、建設汚泥固化物をコンクリート用細骨材として大量置換した場合のコンクリート性状の検討を行うために、コンクリート用細骨材の容積に対する建設汚泥固化物の置換率を65%及び全量となる100%と大きくした場合の性状の調査を行った。その結果、建設汚泥固化物をコンクリート用細骨材として使用することで、その置換率が30%までは、強度及び耐久性の著しい低下は見られなかったが、置換率が65%及び100%まで大きくなるとコンクリートの強度及び耐久性の低下は顕著となり、建設汚泥をコンクリート用細骨材として有効利用することは困難になることが明らかとなった⁵⁾。

本研究では、建設汚泥固化物を使用したコンクリートの実用化を期待して、建設汚泥固化物の細骨材置換率をすべての配合で強度及び耐久性の低下があまり見られなかった30%に設定し、セメントの違いによる影響、フライアッシュの使用による影響を検討した。セメントは普通セメントと潜在水硬性による長期強度の向上が期待できる高炉セメントを使用して比較検討を行った。次に、フライアッシュはセメント置換で使用した場合と、セメント置換に比べて初期強度の発現及び中性化の抑制効果を期待できる⁶⁾ことから、細骨材置換した場合を設定し、以上のことをフレッシュコンクリート試験でフレッシュ性状を確認し、硬化コンクリート試験で強度特性及び耐久性を評価した。

*1 高知工業高等専門学校専攻科建設工学専攻 専攻科生 (学生会員)

*2 高知工業高等専門学校環境都市デザイン工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 宮崎基礎建設(株) 博士(工学) (正会員)

*4 高知工業高等専門学校専攻科建設工学専攻 専攻科生 (非会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料を表-1に示す。セメントは普通セメント及び高炉セメント B 種を使用した。骨材は高知市春野町で採取製造された硬質砂岩砕砂及び硬質砂岩碎石を用いた。なお、骨材の密度は表乾状態のものを表示した。フライアッシュは JIS 規格のフライアッシュ II 種に該当する品質のものをを使用した。混和剤はリグニンスルホン酸系の AE 減水剤及び変性ロジン酸化合物系の AE 調整剤を使用した。

2.2 建設汚泥固化物の品質

建設汚泥は徳島県内の既成コンクリート杭工法を用いた現場から発生したものを使用した。建設汚泥には固化作用がないため建設汚泥の固化材として高炉セメント B 種を使用した。本研究では建設汚泥を高炉セメント B 種で固化させた材料を建設汚泥固化物と称している。コンクリート用細骨材として使用する場合は建設汚泥固化物をクラッシャー機により 40mm 以下に破碎を行い、最後に選別機を用いて分級されたものを使用した。建設汚泥固化物の品質を表-2に示す。建設汚泥固化物の特徴は通常の細骨材と比較して、密度が小さい、吸水率が大きい、微粒分が多い及び pH が高い等が挙げられる。そのため、

表-1 使用材料

材料名	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率(%)	実積率(%)
普通セメント	3.16	-	-	-
高炉セメントB種	3.04	-	-	-
建設汚泥固化物	1.88	34.26	-	74.3
砕砂(硬質砂岩砕砂)	2.59	1.68	2.60	64.3
砕石(硬質砂岩碎石)	2.6	1.42	6.65	59.5
フライアッシュII種	2.31	-	-	-
AE減水剤	1.02~1.06	-	-	-
AE調整剤	1.04~1.08	-	-	-

表-2 建設汚泥固化物の品質

項目	杭汚泥
表乾密度(g/cm ³)	1.88
絶乾密度(g/cm ³)	1.40
吸水率(%)	34.26
微粒分量(%)	8.4
単位容積質量(kg/l)	1.04
実積率(%)	74.3
pH	12.0

建設汚泥固化物の細骨材置換率が大きくなると強度及び耐久性の低下が顕著となる⁵⁾。

2.3 配合

コンクリートの配合は土木配合とし、目標スランブ値を 8±2.5cm、目標空気量を 5±1.5%と設定した。フレッシュ性状は目標スランブ値及び目標空気量を得るために、試験練りを繰り返し、混和剤量を変化させることによって調整した。建設汚泥固化物及びフライアッシュの置換率が増加するに伴いコンクリート中の粉体量が多くなり、空気量の確保が困難となったため、AE 調整剤の使用量を増加させた。すべての配合で水セメント比及び水結合材比は 55%、細骨材率は 38%、建設汚泥固化物の置換率は容積に対して 30%と設定した。セメントは普通セメント及び高炉セメントを使用した配合を設定した。フライアッシュはセメント置換及び細骨材置換で用いた。セメント置換の場合は質量に対して置換率を 10、20%と変化させ、細骨材置換の場合は容積に対して置換率を 10%とした。配合表を表-3に示す。本配合は表乾状態で設計を行った。ここで N は普通セメント、B は高炉セメント B 種の使用を示す。K30 は建設汚泥固化物の置換率 30%、FA10 はフライアッシュの置換率 10%を示す。また、末尾の C はフライアッシュのセメント置換、S はフライアッシュの細骨材置換を示す。

2.4 実験方法

コンクリートの練混ぜは、容量 60L の強制練りミキサーを使用した。粗骨材、セメント、フライアッシュ、細骨材及び建設汚泥固化物を順に投入した後に水と混和剤を投入して 2 分間の練混ぜを行った。フレッシュコンクリートの試験として、スランブ試験及び空気量試験を行った。硬化コンクリートにおいては、強度特性に関する試験として圧縮強度、引張強度、曲げ強度、静弾性係数及び動弾性係数試験を行った。耐久性に関する試験として長さ変化試験、促進中性化試験及び凍結融解試験を行った。耐久性全般の試験及び曲げ試験は 100×100×400mm の角柱供試体を用いて行い、その他の試験は φ 100×200mm の円柱供試体を用いて実験を行い、試験日数まで標準養生を行った。それぞれの試験概要を表-4に示す。

表-3 配合表及びフレッシュ性状

配合名	W/C	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)						混和剤(cc/m ³)		フレッシュ性状	
				W	C	FA	細骨材		粗骨材	AE減水剤	AE調整剤	スランブ(cm)	空気量(%)
							砕砂	建設汚泥固化物					
NK30	55	-	38	160	291	-	481	150	1125	655	14.55	8.0	4.2
BK30							478	149	1119				
NK30FA10C	-	55			262	29	476	148	1118	582	13.09	9.0	3.7
NK30FA20C					233	58	476	148	1118	582	16.29	7.5	3.6
NK30FA10S	55	-			291	60	412	150	1125	655	23.27	8.5	3.5
BK30FA10S							410	149	1119				

表-4 試験概要

項目	試験名	試験方法	測定時期
フレッシュコンクリート試験	空気量	空気量試験	JIS A 1128
	スランプ値	スランプ試験	JIS A 1101
硬化コンクリート試験	動弾性係数	動弾性係数試験	JIS A 1127
	静弾性係数	静弾性係数試験	JIS A 1149
	圧縮強度	圧縮強度試験	JIS A 1108
	引張強度	引張強度試験	JIS A 1113
	曲げ強度	曲げ強度試験	JIS A 1106
	長さ変化	長さ変化試験	JIS A 1129-2
	中性化深さ	促進中性化試験	JIS A 1153
	耐凍害性	凍結融解試験	JIS A 1148(A法)

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュコンクリート試験の結果を表-3に示す。建設汚泥固化物は微粒分が多いため、使用するとコンクリートの空気量が低下すると報告されている⁵⁾。このため、空気量の確保には通常より多くの AE 調整剤を使用した。また、フライアッシュの使用量の増加に伴い空気量は減少したため、AE 調整剤の使用量をさらに増加させることにより目標範囲内におさめた。一方で、スランプ値は比較的容易に目標範囲内におさまった。フライアッシュを使用した配合は、フライアッシュが球形微細粒子であることから流動性が改善され、NK30FA20C の配合のように AE 減水剤の使用量を減少させた場合でも、目標値を達成できることを確認できた。

3.2 見掛けの密度

材齢 28 日におけるコンクリートの見掛けの密度を図-1に示す。建設汚泥固化物をすべての配合で使用しているため、見掛けの密度は通常のコンクリートより小さくなっている。過去の研究では建設汚泥固化物の細骨材置換率を容積に対して 100%まで大きくしたため、置換率の増加に伴い見掛けの密度が小さくなる傾向がみられた⁵⁾が、本研究では細骨材置換率をすべての配合で 30%と設定しており、すべての配合で大きな違いはみられなかつた。

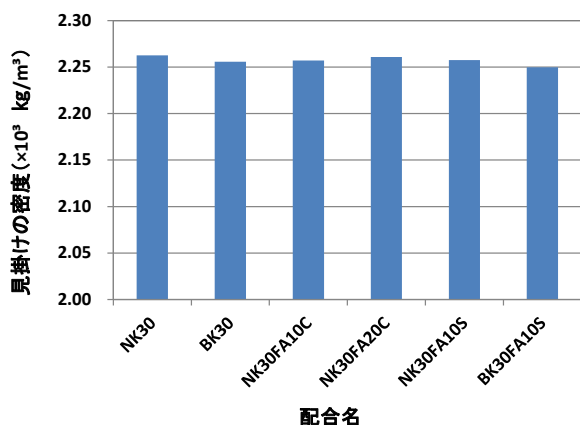


図-1 見掛けの密度

一方、見掛け密度の配合からの計算値は 2189~2218kg/m³ の範囲にあったが、実測値は 2250~2270kg/m³ の範囲であった。これは、本実験では、標準養生を 28 日間行った円柱供試体の質量及び寸法により算出したため、硬化によりコンクリートが緻密化したことと、水中養生から取り出し、水分を拭き取った直後に測定を行ったため、コンクリートの含水率が気乾状態に比べて大きくなっているためと考えられる。

3.3 圧縮強度

各材齢における圧縮強度を図-2に示す。高炉セメントを使用した BK30 は NK30 と比較して初期強度は小さいが、材齢 28 日までの強度増進が大きく、材齢 182 日で同程度となった。これは、高炉セメントを使用した場合に生じる潜在水硬性による影響で徐々に硬化が進行したと考えられる。しかし、今回のように材齢 28 日までに強度増加が確認できたのは、細骨材の代わりに高アルカリである建設汚泥固化物を使用したため、潜在水硬性が通常よりも早期に生じたためと考えられる。次に、フライアッシュをセメント置換した場合に初期強度は低下したが、長期強度はポゾラン反応により、NK30 と比較して同程度となった。一方で、細骨材置換した場合は初期強度が NK30 及び BK30 と同等かそれ以上となっており、材齢

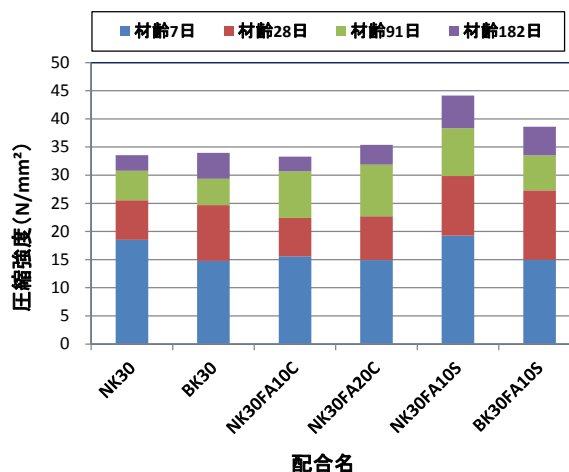


図-2 圧縮強度

182 日においても強度の増加が確認できたため、細骨材置換した配合の方が強度増加は見込める結果となった。

3.4 弾性係数

静弾性係数試験の結果を図-3、動弾性係数試験の結果を図-4 に示す。静弾性係数及び動弾性係数は材齢 28 日のコンクリートで測定を行った。静弾性係数は圧縮強度の増加に伴い大きくなる傾向にあった。次に、普通コンクリートの静弾性係数 E_c と圧縮強度 f'_c の関係を表している土木学会コンクリート標準示方書に示される推定式である式(1)で計算した値を推定値⁷⁾として図-3中に示し、実験結果と比較すると、全ての配合で推定値を 15%以内程度下回っていた。

$$E_c = \left(2.2 + \frac{f'_c - 18}{20} \right) \times 10^4 \quad f'_c < 30 \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

ここで、 E_c は静弾性係数、 f'_c は圧縮強度を示す。

コンクリートの弾性係数は圧縮強度以外に、骨材の種類と品質の程度によって、また、産地によって大きく変動することが知られている⁷⁾。さらに、既往の研究⁵⁾では建設汚泥固化物の置換率が容積に対して 65%及び 100%と大きくなると、式(1)の推定値を下回ることが分かった。このため、密度が小さく、吸水率の大きい建設汚泥固化物を細骨材として用いると、静弾性係数が低下したと考えられる。以上より、建設汚泥固化物の細骨材置換率を 30%にした場合のコンクリートの静弾性係数は、式(1)と比較して 15%程度小さくなるため、設計等で用いる場合は考慮する必要がある、図-3 中には式(1)に 0.85 を乗じた推定値も示した。

動弾性係数も静弾性係数と同様にコンクリートの圧縮強度が増加するほど大きくなる傾向にあった。動弾性係数の静弾性係数との比は 1.1~1.4⁸⁾とされており、図-4 に示す推定値は、静弾性係数の推定式である式(1)に下限値の 1.1 及び上限値の 1.4 を乗じた式(2)で求めた値とした。

$$E_D = \text{式(1)} \times T \quad (2)$$

ここで、 E_D は動弾性係数、 T は静弾性係数と動弾性係数の比(1.1~1.4)を示す。

その結果、動弾性係数の推定値である式(2) ($T=1.1\sim 1.4$) 比較すると、その範囲とならない配合があった。建設汚泥固化物を用いたコンクリートの静弾性係数は 15%の低下がみられたため、図-4 に動弾性係数の推定式に 0.85 を乗じた値を示す。この推定値と動弾性係数を比較すると、すべての配合で推定値の範囲内になっており、建設

汚泥固化物の細骨材置換率を 30%に設定したコンクリートは普通コンクリートの静弾性係数の推定式に 0.85 を乗じた値を用いることが望ましいと考えられる。

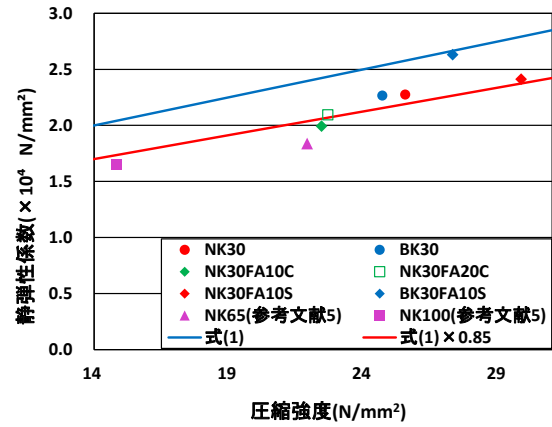


図-3 静弾性係数

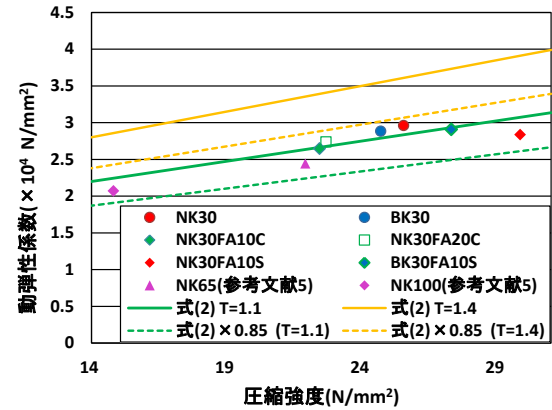


図-4 動弾性係数

3.5 引張強度及び曲げ強度

引張強度、曲げ強度及びそれぞれの圧縮強度に対する強度比を表-5 に示す。引張強度の圧縮強度との強度比は約 1/9.9~1/11.4 の範囲と一般的なコンクリートの強度比 1/10~1/13 の範囲⁹⁾とほとんど同じ値となったが、曲げ強度と圧縮強度との強度比は、1/4.6~1/6.4 と一般的なコンクリートの強度比 1/5~1/7 の範囲⁹⁾にならない配合があった。範囲外の供試体は、フライアッシュをセメント置換した配合であり、材齢 28 日ではまだ十分に強度が発現していなかった影響と考えられる。

表-5 引張強度及び曲げ強度

配合名	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	強度比 (引張/圧縮)	強度比 (曲げ/圧縮)
NK30	2.6	4.8	25.5	1/10	1/5.3
BK30	2.3	4.5	24.7	1/10.7	1/5.5
NK30FA10C	2.3	4.9	22.4	1/10	1/4.6
NK30FA20C	2.2	4.4	22.7	1/10	1/5.1
NK30FA10S	2.6	4.7	29.9	1/11.4	1/6.3
BK30FA10S	2.6	4.3	27.3	1/10.4	1/6.4

3.6 長さ変化

長さ変化を図-5に示す。長さ変化試験は、材齢7日の供試体を湿度60±5%及び温度20±2℃の条件で、表-4に示した経過日数に応じて測定を行った。本研究では吸水率の大きい建設汚泥固化物を使用したため、ほとんどの配合で経過日数182日において 800×10^{-6} 以上となっており、長さ変化は大きくなる傾向にあった。その中で、高炉セメントを使用したBK30はNK30と比較して長さ変化を182日の測定時点では大きく抑制した。BK30は、高炉セメントを使用することで起こる潜在水硬性がアルカリ性の高い建設汚泥固化物と共存することで促進され、通常の場合に比べて水和物の生成が早まり、コンクリート内部が早期に緻密化したためと考えられる。また、フライアッシュをセメント置換で使用した場合も長さ変化は抑制されており、フライアッシュの置換率の増加に伴い、その効果も大きくなった。これは、フライアッシュをセメント置換で用いたため、セメントの成分であるC₃Aが少なくなることでコンクリートの収縮が小さくなったことと、フライアッシュの使用によるポゾラン反応により、コンクリート内部が緻密になり、経過日数91日以降に収縮量の増加が抑えられたためと考えられる。しかし、フライアッシュを細骨材置換した場合においては、長さ変化の抑制効果は特に見られなかったことについては、検討課題とする。

3.7 促進中性化深さ

促進中性化深さの結果を図-6に示す。促進中性化試験は、試験層内の条件としてCO₂濃度5±0.2%、湿度60±5%及び温度20±2℃で実施した。本研究では吸水率の大きい建設汚泥固化物を使用したため、建設汚泥固化物を使用していないNK0¹⁰⁾(W/Cなどの配合は本論文と同じ)に比べて、中性化深さの値は全ての配合で大きくなる傾向にあった。高炉セメントを使用したBK30はNK30と比較して中性化深さは大きくなった。高炉セメントは混合セメントであるため、普通セメントを使用した配合よりも中性化深さは大きくなったと考えられる。フライアッシュをセメント置換した場合も中性化深さが増加した。これは、フライアッシュの置換率が増加するほど単位セメント量が減少し、それに伴いアルカリ性が失われたことが原因であると考えられる。一方で、フライアッシュを細骨材置換した場合の中性化深さは若干減少した。これは、セメント置換した場合に比べて単位セメント量を確保できたことと、粉体量が多いことによるマイクロファイラー効果により、コンクリート表面や内部が緻密になったことが中性化抑制の要因として考えられる。

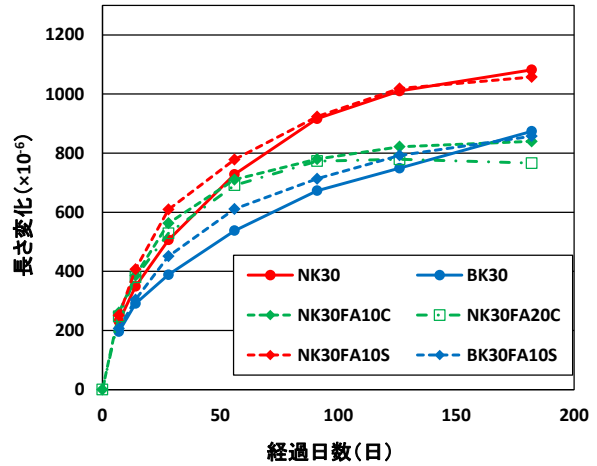


図-5 長さ変化

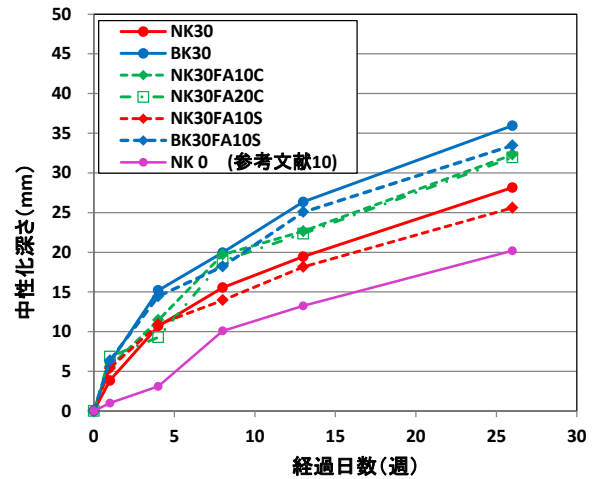


図-6 促進中性化深さ

3.8 耐凍害性

凍結融解試験における耐凍害性の評価指標である相対動弾性係数を図-7に示す。相対動弾性係数は高炉セメントを使用したBK30はNK30と比較して、300サイクル時の相対動弾性係数の値が小さくなった。これは、初期の30サイクル時に相対動弾性係数が約12%低下しており、これが影響したと考えられる。さらに、フライアッシュを使用した配合は使用していない配合と比較して低下する傾向にあった。コンクリートの耐凍害性のメカニズムは、コンクリートの強度と空気量に起因する。そのため、微粒分を多く含む建設汚泥固化物及び微細粒子であるフライアッシュを使用することでコンクリート中の空隙が充填され、空気量の確保が困難となり、それに伴い耐凍害性が低下したと考えられる。実際に、空気量は目標範囲内である $5 \pm 1.5\%$ におさまったが、ほとんどの配合で5%を下回っており低い傾向にあった。

次に、凍結融解試験における質量減少率を図-8に示す。質量減少率で見ると、フライアッシュを細骨材置換した配合は、フライアッシュを使用していない配合に比べて

質量減少率が小さくなっており、相対動弾性係数の結果とは異なった傾向を示した。これは、フライアッシュを細骨材置換した配合の28日強度がフライアッシュを使用していない配合に比べて大きかったためと考えられる。さらに、ポズラン材料をセメント置換した実験では、スケーリングを生じずに耐凍害性が低下する場合があると報告されており¹¹⁾、NK30FA20Cは、報告と同様の傾向が見られた。

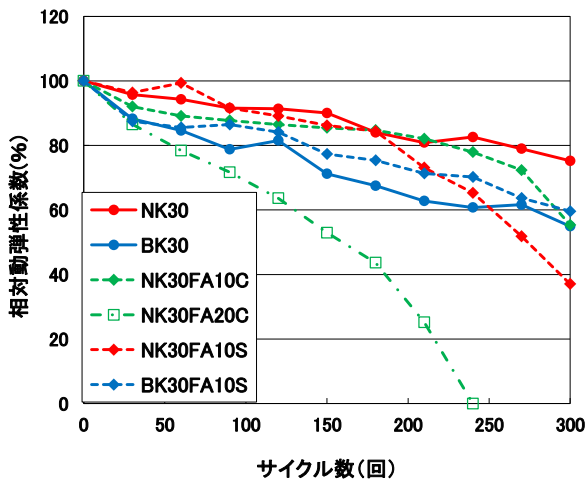


図-7 耐凍害性

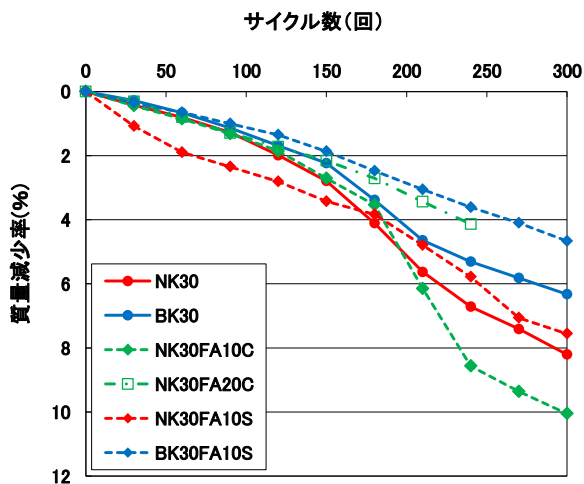


図-8 質量減少率

4. まとめ

本研究では、建設汚泥固化物の細骨材に対する置換率をすべての配合で強度及び耐久性の低下が小さかった30%に設定して性状を調査した。調査内容としては、普通セメント及び高炉セメントを使用した場合の影響、フライアッシュをセメント置換及び細骨材置換で使用した場合の影響を検討し、以下の結論を得た。

(1)高炉セメントとアルカリ性の高い建設汚泥固化物が共存することで潜在水硬性の効果が促進され、材齢7日からの強度増進が確認でき、さらに長さ変化も抑

制した。

(2)建設汚泥固化物を使用したコンクリートにフライアッシュを使用すると、細骨材置換した場合は強度特性、セメント置換した場合は長さ変化の抑制効果が大きく優れた。また、フライアッシュを細骨材置換した配合に関しては、耐凍害性を除いてフライアッシュの未使用の配合に比べて優れており、フライアッシュは細骨材の置換材としての使用が望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 宮崎健治：建設廃棄物の建設材料への有効利用に関する研究，徳島大学博士論文，2011
- 2) 国土交通省リサイクルホームページ：平成二十年度建設副産物の実態調査，国土交通省総合政策局，2009
- 3) 土木学会四国支部：フライアッシュコンクリートを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案），2003
- 4) 宮崎健治，天羽和夫，横井克則，水口裕之：溶融スラグ細骨材と建設汚泥固化物を補充材として用いたコンクリートの基礎的性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol31，No.1，pp.1813-1818，2009
- 5) 三浦健太，横井克則，宮崎健治，甲把浩基：建設汚泥固化物を細骨材の一部に置換させたコンクリートの基礎的性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol35，No.1，pp.73-78，2013
- 6) 甲把浩基，横井克則，原田隆敏，三浦健太，曾我部敏郎，田中光浩：フライアッシュⅡ種を細骨材の一部に置換したコンクリートの性状，平成二十四年度土木学会四国支部第十八回技術研究発表会講演概要集，pp.247-248，2012
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2012
- 8) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点，2011年
- 9) 西林新蔵，小柳治，渡邊史夫，宮川豊章編集：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，2009
- 10) 三浦健太，宮崎健治，横井克則，天羽和夫，水口裕之：建設汚泥固化物を細骨材補充材として用いたコンクリートの諸特性，平成二十三年度土木学会四国支部第十七回技術研究発表会講演概要集，pp.261-262，2011
- 11) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム，2006