

論文 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

三浦 健太*¹・横井 克則*²・宮崎 健治*³・甲把 浩基*⁴

要旨：建設汚泥固化物の一部を細骨材として使用することで、ブリーディングの抑制や耐凍害性に効果がある。しかし、使用量が増加すると、圧縮強度の低下及び乾燥収縮の増大が課題となる。本研究では、さらなる建設汚泥固化物の有効利用を促進させるため、フライアッシュⅡ種を利用することで建設汚泥固化物の細骨材置換率を大きくし、コンクリートの強度特性及び耐久性の検討を行った。また、約2年前に製造された建設汚泥固化物を用いたコンクリートとの比較も行った。フライアッシュを置換させることで、長期強度の増進及び乾燥収縮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, 細骨材置換, フライアッシュ, 強度特性, 耐久性

1. はじめに

我が国の建設分野から発生する産業廃棄物の一つに建設汚泥が挙げられる。この建設汚泥は平成20年度の国土交通省の調査によると、再資源化率は約69%であり、コンクリート塊やアスファルト・コンクリート塊の再資源化率はほぼ100%に対して低い水準に留まっている¹⁾。建設汚泥にセメントを用いて固化させた建設汚泥固化物は、一般に埋戻し材や路盤材として使用されている²⁾。しかし、公共工事の削減に伴い需要が安定していないことから余剰状態となっており、余剰状態が長期になると、品質低下の懸念もある¹⁾。また、建設汚泥を再資源化させても、長期間野積み状態で放置されていると、廃棄物扱いになる。そのため、建設汚泥の有効利用及び用途拡大が必要となっている。一方で、最近のコンクリート用骨材事情としては、河川の維持管理、生態系及び環境保全の立場から川砂や海砂のような天然骨材の採取が規制されており、コンクリート用細骨材の安定確保が課題となっている。このため、建設汚泥をコンクリート用細骨材として使用できれば、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の二つの課題の解決が期待できる。

これまでに著者らは、発生場所及び発生工法の異なった建設汚泥をセメントで固化させ、その汚泥固化物をコンクリート用細骨材に用いた研究を行った³⁾。その結果、建設汚泥固化物無混入のコンクリートと比較して、建設汚泥固化物の細骨材置換率30%の配合では、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、硬化コンクリートの性質では耐凍害性の確保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を明らかに

した。さらに、発生場所及び発生工法の異なる建設汚泥固化物であっても、コンクリートの諸性状に及ぼす影響はほとんどみられなかった。一方で、建設汚泥固化物の細骨材置換率が30%以上になると、圧縮強度は低下し、中性化及び乾燥収縮については増大することも確認した。

また、細骨材に熔融スラグ骨材を用いたコンクリートの欠点であったブリーディングの増大や耐凍害性の低下が問題となる。そこで、著者らは熔融スラグに加えて、ブリーディングの抑制に効果のあった建設汚泥固化物を細骨材として用いた⁴⁾。その結果、欠点であったブリーディングの抑制が確認された。さらに、熔融スラグのみを細骨材に用いた配合は耐凍害性が著しく低下したが、熔融スラグと建設汚泥固化物を用いた配合は耐凍害性の低下が見られなかった。また、圧縮強度に関しても、建設汚泥固化物は、細骨材の容積置換率が15%程度であれば、建設汚泥固化物を用いないコンクリートと比較して同等の圧縮強度を得ることが可能であることを確認した。

本研究では、建設汚泥固化物の使用量の増大を目的とし、建設汚泥固化物の細骨材置換率を既往の研究の30%を基本として、65%及び全量となる100%置換した場合についてコンクリートのフレッシュ性状、強度特性及び耐久性について検討した。次に、建設汚泥固化物を大量使用した場合、コンクリートの強度の低下及び乾燥収縮の増大が懸念されるため、その対策としてフライアッシュ(以下、FA)をセメントの代替材として使用し、その効果について検討を行った。また、置換率30%については2年前の結果³⁾と比較することで、製造後2年経過した建設汚泥固化物を利用した場合におけるコンクリートへ与える影響について検討を加えた。

*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を使用した。骨材は高知県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砕石を用いた。FAはJIS規格のFAⅡ種に該当する品質のものを使用した。練混ぜ水は上水道水を用いた。

2.2 建設汚泥固化物

建設汚泥固化物は、既成コンクリート杭工法を用いた現場で発生した建設汚泥を固化させ、破砕機にて粒径を調整したものである。建設汚泥そのものに固化作用はないため、高炉セメントB種のみを固化材として混入させている。そして、製造された建設汚泥固化物は屋根がないストックヤードで保存した。2年前に製造された直後の杭汚泥固化物K(以下、K汚泥)と本研究で使用したその後2年経過した杭汚泥固化物KN(以下、KN汚泥)の品質を

表-1 使用材料

材料名	備考
普通セメント	密度3.16g/cm ³
建設汚泥固化物(杭汚泥K)	密度1.86g/cm ³
建設汚泥固化物(杭汚泥KN)	密度1.88g/cm ³
硬質砂岩砕砂	密度2.59(g/cm ³), 吸水率1.68%
硬質砂岩砕石	密度2.61(g/cm ³), 吸水率1.25%
FAⅡ種	密度2.27(g/cm ³)
AE減水剤	リグニンスルホン酸系
AE調整剤	変性ロジン酸化合物系(100倍希釈)

表-2 建設汚泥固化物の品質

汚泥種類	杭汚泥K	杭汚泥KN
表乾密度(g/cm ³)	1.86	1.88
絶乾密度(g/cm ³)	1.36	1.40
吸水率(%)	35.12	34.26
微粒分量(%)	9.1	8.4
単位容積質量(kg/L)	0.98	1.04
実積率(%)	76.8	74.3
PH	12.3	12.0

表-2に示す。なお、試料を採取するときは、中性化やサンプリングの誤差の影響がないように試料の表面部ではなく、深部の試料を採取した。調査の結果をみると、どちらもほぼ同等の値となっており、2年の経年による品質の差は少ないと考えられる。また、pHは12以上であり、汚泥固化物そのものはアルカリ性を有している。

2.3 配合

コンクリートの配合は、土木配合で目標スランプを8.0±2.5 cm、目標空気量を5.0±1.5%とした。粒径の小さい建設汚泥固化物やFAの使用により、目標とするスランプ及び空気量を確保するために建設汚泥固化物やFAの置換率に伴い、混和剤であるAE減水剤とAE調整剤の使用量を変化させた。建設汚泥固化物は細骨材の容積率に対して置換率を30%、65%及び100%と変化させた。FAはセメントの重量に対して置換率を10%及び20%と変化させた。また、すべての配合において水セメント比及び水結合材比は55%、細骨材率は38%、単位水量は160 kg/m³で一定とした。表-3に配合表を示す。ここでKN30FA10といった配合名があるが、KN30は、建設汚泥固化物を細骨材の容積に対して30%置換していることを示し、FA10は、FAをセメント重量に対して10%置換していることを示す。

2.4 実験方法

練混ぜは、強制練りミキサーを用いて全材料投入後、2分間練り混ぜた。フレッシュコンクリートの試験として、スランプ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。次に耐久性に関する試験として、促進中性化試験、凍結融解試験及び長さ変化試験を行った。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、その他の試験についてはφ100×200mmの円柱供試体とし、水温を20±2℃に保った養生層にて

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	スランプ(cm)	空気量(%)				
							砕砂	建設汚泥固化物									
KN30	55	-	38	160	291	-	481	150	1129	727	1455	8.0	4.7				
KN65							240	324			2036	6.0	4.0				
KN100							0	499			2909	10.0	4.6				
KN30FA10	-	55	38	160	262	29	478	149	1124	655	1309	9.0	3.7				
KN65FA10							239	322			1832	7.5	4.1				
KN30FA20							233	58			476	148	1118	582	1629	7.5	3.6
KN65FA20											238	321			2327	10.0	3.9

表-4 試験概要

項目	試験	試験方法	測定時期
フレッシュコンクリート	空気量	空気量試験	JIS A 1128
	スランブ	スランブ試験	JIS A 1101
硬化コンクリート	圧縮強度	圧縮強度試験	JIS A 1108
	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
	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
	凍結融解抵抗性	凍結融解試験	JIS A 1148(A法)

標準養生を行い、それぞれの試験日程に応じて実験を行った。表-4 にそれぞれの試験の概要を示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状

各配合におけるフレッシュ性状の値を表-3 に示す。建設汚泥固化物やフライアッシュの置換率の変化に伴い、AE 減水剤の量を変化させてすべての配合で目標値を確保した。建設汚泥固化物を用いたとき、スランブが低下したが、FA の利用により、スランブを回復させることができた。これは、FA は表面が滑らかで、球形の粒子であることで流動性が向上したと考えられ、AE 減水剤の使用量の低減が可能となることを確認できた。次に、空気量は、微粒分量が多い建設汚泥固化物や微細粒子である FA を用いたことにより空気連行性が小さくなり、表-3 の配合表に示すようにフライアッシュの置換率が 20% になると、AE 調整剤の量を増加させて目標値を確保した。

3.2 コンクリートの見掛け密度

図-1 に材齢 28 日におけるコンクリートの見掛け密度を示す。建設汚泥固化物の置換率が大きくなるほど、コンクリートの見掛け密度は小さくなる傾向にある。これは、建設汚泥固化物の密度が砂岩碎石の密度と比較して小さいことがコンクリートの見掛け密度に影響していると考えられる。そのため、一般的なコンクリートと比較して建設汚泥固化物を細骨材に用いたコンクリートの見掛け密度は小さくなり、コンクリートの重量が大きく関係する構造物に使用するには配慮が必要となる。一方で、KN30 及び KN65 シリーズは FA 無置換の配合と FA を置換させた配合を比較すると、見掛け密度はほぼ同等である。これは、本研究では FA はセメント置換であり、FA の使用量が少ないため、コンクリートの見掛け密度への FA が与える影響は小さかったと考えられる。

3.3 圧縮強度

図-2 に圧縮強度を示す。建設汚泥固化物の置換率が大きくなると、圧縮強度は低下している。これは、既往の研究で明らかにされた傾向と同じで、置換率が 100% とな

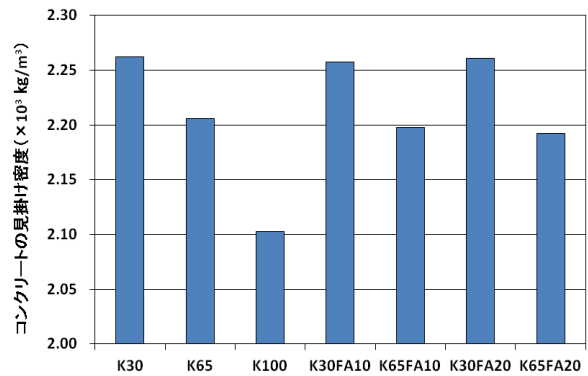


図-1 コンクリートの見掛け密度

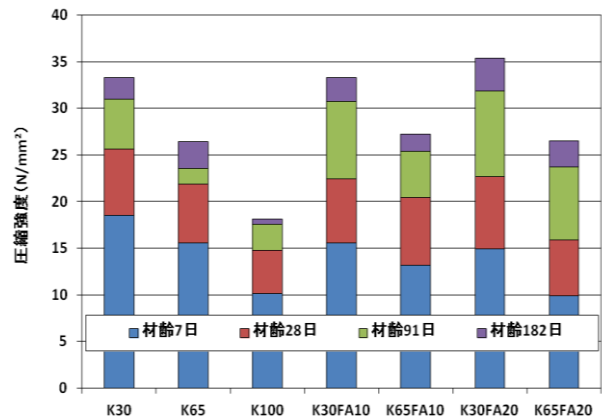


図-2 圧縮強度

ると、強度発現もその他の配合と比較して大きく低下している。これは、吸水率の高い建設汚泥固化物が全量であるため、コンクリートの内部組織が多孔質であり、密実でないと考えられる。ここで、KN30 は圧縮強度が 31N/mm² となっているが、2 年前に行った同じ建設汚泥固化物の置換率 30% の試験結果では 29N/mm² となっており³⁾、ほぼ同等の値となっている。そのため、コンクリートの圧縮強度は、建設汚泥固化物の経年による影響は小さいと考えられる。次に、FA を置換させた場合、KN30 及び KN65 シリーズ共に初期強度は小さいが、材齢 91 日における圧縮強度をみると、FA の置換の有無に関係なく

同等の値となっている。これはFAを置換させたことにより、ポズラン反応の効果によるものであると考えられる。また、FAの置換率が大きいほど、長期強度の伸びは大きくなる傾向にある。しかし、材齢182日目における圧縮強度をみると、建設汚泥固化物の置換率の増加に伴う圧縮強度低下の改善効果に関しては、FAの置換率の有無に関係なく圧縮強度が同程度となっているため、強度改善効果は小さいと考えられる。

3.4 弾性係数

図-3に動弾性係数を示し、図-4に静弾性係数を示す。動弾性係数及び静弾性係数は材齢28日のコンクリートで測定を行った。コンクリートの圧縮強度が大きくなると、動弾性係数は、大きくなる傾向にある。しかし、KN65とKN30FA10は、材齢28日における圧縮強度は同等であるが、動弾性係数は、KN65がKN30FA10と比較して、約 $2.0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 低下している。コンクリートの弾性係数は、圧縮強度以外に、骨材の品質の影響を受けやすいと報告がある⁵⁾。そのため、密度が低く、吸水率の大きい建設汚泥固化物の置換率の増加が動弾性係数の低下を招いたと考えられる。

次に静弾性係数は、動弾性係数と同様に、圧縮強度の増加に伴い、値は大きくなる傾向にある。また、普通コンクリートの静弾性係数 E_c と圧縮強度 f'_c の関係を示す理論式(図-4中の式)⁶⁾と比較すると、圧縮強度や建設汚泥固化物の置換率の違いの影響に関係なく、全ての配合で理論式の値以下になっている。これについても動弾性係数の考察で述べたように、弾性係数と骨材の密度は密接な関係があるため、骨材の密度が大きくなると、静弾性係数は大きくなる⁵⁾と報告されている。本研究で使用している建設汚泥固化物は密度が小さく、さらに吸水率も大きいことから静弾性係数の理論式の値より小さくなったと考えられる。

3.5 引張強度及び曲げ強度

表-5に引張強度及び曲げ強度、さらに各試験の圧縮強度に対する強度比を示す。引張強度の圧縮強度との強度比は約1/9.1~1/11.2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⁷⁾と比較して若干大きくなっている。

次に曲げ強度と圧縮強度との強度比は、1/4.1~1/6.2と一般的なコンクリートの強度比1/5~1/7の範囲⁷⁾と比較して若干大きくなっている。

3.6 凍結融解抵抗力

図-5に凍結融解抵抗力有無の評価指標である相対動弾性係数を示す。また、図-6に凍結融解試験における質量減少率を示す。凍結融解210サイクル目までの結果では、建設汚泥固化物の置換率が大きいほど、相対動弾性係数は小さくなる傾向にあり、KN100は150サイクル目

に破壊が確認された。また、KN30及びKN65シリーズは共にFAを置換させると、凍結融解抵抗力は小さくなった。特に、FAの置換率が20%になると、相対動弾性係数60%以下となっていることから、KN30FA20及びKN65FA20は凍結融解抵抗力を保持できないといえる。これは、両配合の空気量が4%を下回っており、凍結融解抵抗力が発揮できる空気量4~6%の範囲を下回ったことが原因であると考えられる。

2年前に行った凍結融解試験³⁾では、建設汚泥固化物の置換率が30%においても相対動弾性係数は高い値を維持していたが、本研究ではKN30も約90%と高い相対動弾性係数を維持しており、コンクリートの凍結融解抵抗力には建設汚泥固化物の長期間の保存による影響は小さいと考えられる。

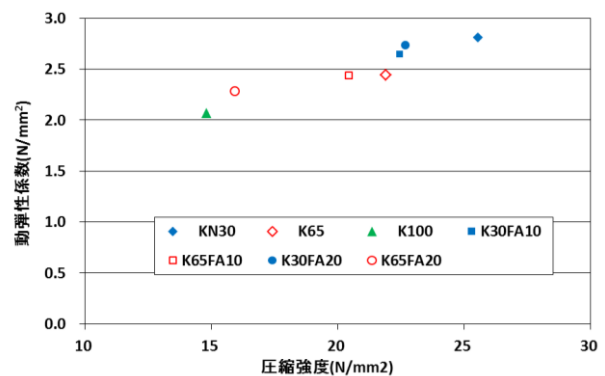


図-3 動弾性係数

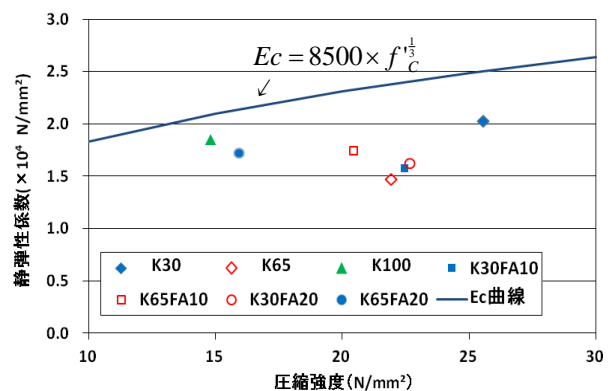


図-4 静弾性係数

表-5 引張強度及び曲げ強度

配合名	引張強度試験		曲げ強度試験	
	引張強度(N/mm ²)	強度比	曲げ強度(N/mm ²)	強度比
KN30	2.44	1/10.5	4.12	1/6.2
KN65	2.19	1/10.0	3.88	1/5.1
KN100	1.48	1/10.0	2.66	1/5.6
KN30FA10	2.33	1/9.6	3.94	1/4.6
KN65FA10	1.82	1/11.2	4.05	1/4.8
KN30FA20	2.19	1/10.3	4.01	1/5.1
KN65FA20	1.75	1/9.1	3.89	1/4.1

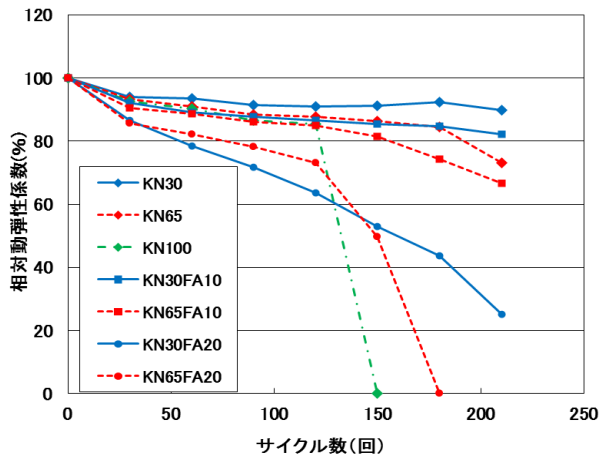


図-5 凍結融解抵抗性

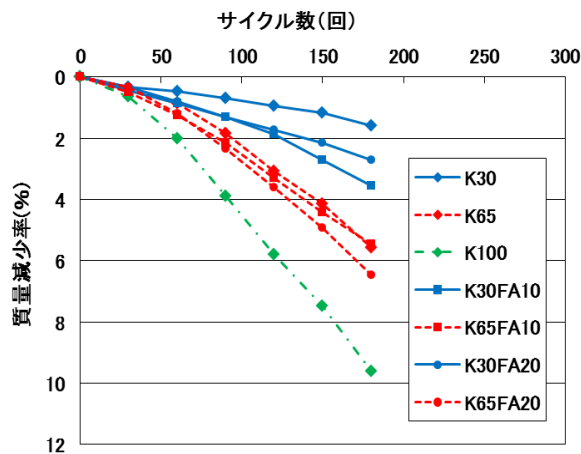


図-6 質量減少率

次に、質量減少率をみると、建設汚泥固化物の置換率の増加に伴い、質量減少率も大きくなっている。KN100は、質量減少率が全ての配合の中で、一番大きくなっている。これは、建設汚泥固化物の置換率が大きくなると、吸水率の大きい建設汚泥固化物の使用量が多くなるため、コンクリートの表面部の組織が多孔質で脆弱になったことでスケーリングが進行したと考えられる。また、圧縮強度や引張強度が小さくなることもコンクリート表面部のスケーリングが進行しやすくなったと考えられる。また、FAを置換させた配合では、質量減少率がFA無置換の配合より大きくなった。凍結融解抵抗性と同様に、FAを置換させることで空気量が少ないことが質量減少率にも影響があったと考えられる。

3.7 促進中性化

図-7に促進中性化試験の結果を示す。促進中性化試験は、試験層内の条件としてCO₂濃度5±0.5%、湿度60±5%及び温度20±3℃で実施した。実験結果は8週目までのデータである。建設汚泥固化物の置換率が大きくなるほど、促進中性化深さは大きくなっている。特にKN100

となると、促進中性化深さは、KN30と比較して、約2倍増加している。これは、吸水率の大きい建設汚泥固化物を使用することで、コンクリートの硬化後材齢が増すとともにコンクリート内部の水分が逸脱してしまい、内部組織が多孔質になったと考えられる。また、KN65はKN30FA10及びKN30FA20よりも促進中性化深さが小さくなっている。次に、KN30及びKN65シリーズは、FAの無置換の配合FAを置換させた配合を比較すると、FAを置換させた配合は中性化が大きくなった。これはFAをセメントの重量で置換しているため、単位セメント量が低下することが原因であると考えられる。しかし、FAを置換させた配合の場合でも、KN30シリーズではFAの置換率が10～20%でも同等の値となっているが、KN65シリーズでは、FAの置換率が10%から20%になると、中性化は著しく増加した。

建設汚泥固化物の置換率が30%の配合では、2年前の促進中性化試験の8週目の実験結果³⁾と比較すると、本実験結果は約15mmである。一方で、2年前の促進中性化の値は約15mmとなっており、促進中性化は同等の値となっているため、建設汚泥固化物その経年によるコンクリートの中性化に影響はほとんどみられなかった。

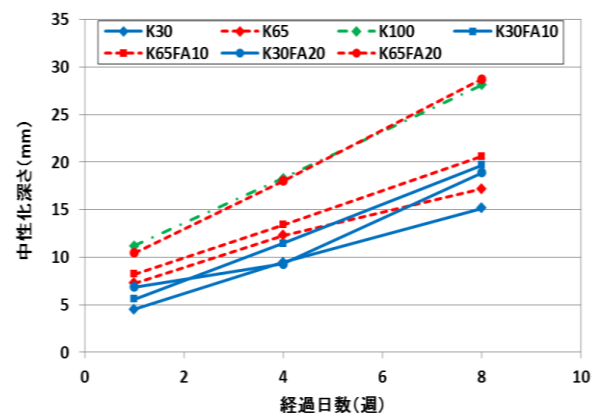


図-7 促進中性化深さ

3.8 長さ変化

図-8に長さ変化を示す。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±3℃の条件で、表-4に示した経過日数に応じて測定を行った。なお、実験結果は126日目までの長さ変化率である。建設汚泥固化物の置換率が大きいほど、長さ変化も大きくなっている。特に、KN65及びKN100は、126日において、土木学会で目安とされている1000μを超過している⁸⁾。KN65及びKN100は、KN30と比較して、吸水率の大きい建設汚泥固化物の使用量が多くなるため、乾燥の過程で、コンクリート内部の水分が逸脱するため、乾燥収縮が大きくなったと考えられる。そのため、建設汚泥固化物の細骨材置

換率を増加させたことで、長さ変化が大きくなったと考えられる。このことから、長さ変化は細骨材の吸水率が大きく影響するといえる。また、FAの置換率が大きくなると、長さ変化は小さくなった。これはFAをセメント置換していることからFA無置換の配合と比較して、FAを置換させたことによるボゾラン反応の効果でコンクリートの内部組織が緻密になったと考えられる。また、その置換率が大きいほど、長さ変化を抑制できた。

2年前の長さ変化試験の結果³⁾と本研究の建設汚泥固化物の置換率が30%であるKN30と経過日数126日時点で比較すると、KN30は、約820 μ となっているが、2年前の試験結果も約820 μ となっており、長さ変化も促進中性化と同様に値はほとんど変化していない。このため、建設汚泥固化物の長期間の保存が、コンクリートの長さ変化に与える影響は小さいと考えられる。

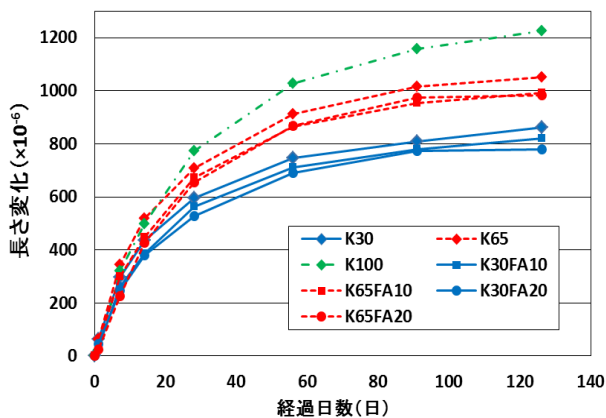


図-8 長さ変化率

4. まとめ

本研究では、はじめに約2年間保存した建設汚泥固化物の品質の調査を行った。次に、建設汚泥固化物をコンクリートの細骨材の一部に置換した場合、細骨材全量を建設汚泥固化物に置換した場合及び建設汚泥固化物の細骨材の一部置換に加えてFAをセメント置換した場合のコンクリートについて、以下の結論を得た。

- (1) 建設汚泥固化物そのものは、約2年経過しても品質は同等の値を示した。また、コンクリートに与える影響は、凍結融解抵抗性、促進中性化及び長さ変化にはみられなかったが、圧縮強度は大きくなった。
- (2) フレッシュ性状は、スランプは比較的容易に目標値を満足したが、空気量はFAの混入及び建設汚泥固化物の置換率の増加により、AE調整剤の量を多くする必要があった。
- (3) 圧縮強度は、建設汚泥固化物の置換率が大きくなる

と低下する傾向にあった。特に、置換率が100%となると、圧縮強度は著しく低下した。また、FAを置換させたことによる影響はほとんどみられず、圧縮強度の改善効果は小さかった。

- (4) 引張強度及び曲げ強度は、それぞれの強度比は一般的なコンクリートの強度比より大きくなった。
- (5) 弾性係数は、圧縮強度の増加に比例して、大きくなる傾向にあった。一方で、建設汚泥固化物の置換率が弾性係数に影響を与えることがわかった。
- (6) 凍結融解試験では、凍結融解抵抗性は建設汚泥固化物の置換率による変化による影響は小さいが、FAを置換させたことにより、凍結融解抵抗性及び質量減少率の低下が大きくなった。
- (7) 促進中性化は、建設汚泥固化物の置換率の増加により大きくなった。また、FAを置換させることで、さらに促進中性化深さが大きくなった。
- (8) 長さ変化は、建設汚泥固化物の置換率の増加により、長さ変化は大きくなった。一方で、FAの置換率が大きくなるほど、長さ変化を抑制できた。
- (9) 建設汚泥固化物を細骨材の全量に置換したコンクリートは、圧縮強度、弾性係数及び凍結融解抵抗性は低下した。さらに、中性化や長さ変化は著しく増大した。

参考文献

- 1) 国土交通省リサイクルホームページ：平成20年度建設副産物の実態調査，国土交通省総合政策局，2009
- 2) 江口仁平，横井克則，市原伸一：セメント固化した建設汚泥の路盤材への適用，廃棄物のコンクリートへの再資源化に関するシンポジウム論文集，pp.179-182，2002
- 3) 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
- 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) 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
- 6) 岡村甫著：三訂版 鉄筋コンクリート工学，市ヶ谷出版社，2000
- 7) 田澤栄一著：エース コンクリート工学，朝倉書店，2006
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2007