

論文 粃殻を燃料とした火力発電所から排出される粉碎処理を施さない粃殻灰を混入したコンクリートの耐久性

梶原 教裕^{*1}・上原 匠^{*2}・齊藤 和秀^{*3}・平原 英樹^{*4}

要旨: 火力発電所より排出される粃殻灰を環境負荷低減材料と位置付け、排出時の微粉碎処理を施さない状態でコンクリート用結合材として有効利用することを目的に、粃殻灰の混入がコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に与える影響について実験に基づいて検討した。さらに、フレッシュ性状改善のため単位水量 175 kg/m³、水結合材比 50%、粃殻灰置換率 30% の配合に対して、単位水量 195 kg/m³、水結合材比 50%、粃殻灰置換率 30% の配合でも同様な試験を行い、強度発現、乾燥収縮、耐凍害性に問題がないことを明らかにした。

キーワード: 粃殻灰、火力発電所、ポゾラン反応、乾燥収縮、耐凍害性、環境負荷低減材料

1. はじめに

近年、東南アジアのタイ王国では、粃殻を燃料にした火力発電が稼動を始め、今後の電力使用量の増加に伴い、粃殻灰の排出量も増加傾向にあることから、その有効利用が課題として挙げられる。ところで日本では、東日本大震災に端を発した原子力発電の推進の見直しから、火力発電へのシフトが進められている。そこで、将来、日本においても粃殻を燃料とした小規模火力発電の推進が検討される場合に備えて、事前に粃殻灰の有効利用を図ることも今後社会的に重要な課題の1つと考えられる。

粃殻灰はその生成方法により、活性度を有する粉体であることが認識されている。日本でも中嶋らが研究を行っていたが¹⁾、日本では実用化には至らず、性能の確認で終了したまま現在に至っている。その最大の原因は経済性にある。粃殻灰は施工性の確保と活性度を向上させるために、微粉碎する必要がある。すなわち、有効利用しやすい粃殻灰を生成するために新たなプラントを建設しなければいけないこと、さらに、粃殻灰を混入したコンクリートを打設する時に多量の化学混和剤を必要とすることなども影響している²⁾。しかし、最も大きな障害は、粃殻の集積コストが挙げられる。したがって、現段階では日本国内での粃殻灰の実用化は困難な状況にある。

既往の研究^{1,2,3)}では、高い活性度を有する混和材料として粃殻灰を微粉碎の状態を利用を考えたのに対して、本研究では産業副産物の有効利用の観点から排出される状態（負荷低減材料と位置付け）での使用とした。

既報⁴⁾において、微粉碎処理を施していない排出された状態の粃殻灰でも高い活性度を有していること、粃殻灰を混入したコンクリートの強度および施工性の制御が可能であることなどが報告されている。セメントの内割置換で粃殻灰を使用する事により、単位セメント量を低減させ、CO₂の排出量抑制が期待できる。ただし、実用化に向けた今後の課題として、施工性の改善方法の再検討に加えて耐久性の検討が挙げられている。

そこで本研究では、環境負荷低減材料として粃殻灰をコンクリート用結合材に使用する場合の耐久性に及ぼす影響の把握を目的に、乾燥収縮および耐凍害性能の把握を試みた。産業副産物は地産地消での利用が望まれることから現地の基準に沿った試験が必要となるが、日本の基準を適用した方が、粃殻灰の影響度合いを精度良く把握でき、性能を理解しやすいと考えたこと、東日本大震災後の電力不足に対して日本での小規模バイオマス発電の可能性も考え、各種試験は JIS 規格に準拠して実施した。

表-1 使用材料

種別	記号	物性値
普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm ³ 比表面積:3290cm ² /g(UM社製)
細骨材	砕砂	S 表乾密度:2.67g/cm ³ 絶乾密度:2.64g/cm ³ 吸水率:1.24% 粗粒率:2.77
粗骨材	砕石 2005	G 表乾密度:2.72g/cm ³ 絶乾密度:2.70g/cm ³ 吸水率:0.53% 粗粒率:6.64 実積率:58.9%
結合材	粃殻灰 ⁴⁾	RHA 密度:2.41g/cm ³ 平均粒径:80.1 μm 比表面積:321000cm ² /g 未燃カーボン:3.5%
混和剤	高性能AE減水剤	SP 主成分:ポリカルボン酸系 非空気連行タイプ
	AE剤	AE 主成分:高級脂肪酸および非イオン系界面活性剤

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 工修 (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 准教授 工博 (正会員)

*3 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 グループリーダー (正会員)

*4 名古屋工業大学 技術グループ (正会員)

2. 使用材料

使用した材料の種類および物性値を表-1 に示す。本研究で使用した粉砕灰は、火力発電所の燃焼炉底部と燃焼炉内の集じん機で回収された粉砕灰が混合（約 9 : 1 の割合）されて排出されたものであり、特徴として、粒形にばらつきがあること、多孔質構造であることが挙げられる。なお粉砕灰は、火力発電の燃料として約 800°C で燃焼利用されていることから、粉砕灰の主成分である SiO₂ は活性度が高いことが明らかにされている⁴⁾。細骨材には砕砂（瀬戸産）、粗骨材には碎石（瀬戸産）を使用した。また、混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤、高級脂肪酸および非イオン系界面活性剤を主成分としたフライアッシュ用 AE 剤、消泡剤を用いた。

3. 実験概要および試験項目

本報では、まず、示方書（施工編：2007 年制定）に準拠して、単位水量の上限である 175kg/m³ 一定の基、粉砕灰をセメントの内割置換した配合を対象に乾燥収縮性状の把握を試みた（シリーズ A）。次に、シリーズ A の結果を踏まえて、単位水量を増加させることによる施工性改善方法の検討と単位水量を増加させることによる耐久性への影響把握を目的に長さ変化率試験と凍結融解試験を実施した（シリーズ B）。

コンクリートの練混ぜには、公称容量 0.06m³ の水平 2 軸型強制練りミキサーを使用した。材料の投入は既報⁴⁾と同様に、碎石の半分、砕砂の半分、セメント、粉砕灰、残りの砕砂、碎石の順序で行い、練混ぜ時間は粉砕灰の混入量が増加するに従い適宜調整した。フレッシュ性状評価は同一条件とはならないが、材料分離がなく、空気量が許容範囲内であれば、硬化後の物性評価は可能と判断し実験を続行した。練混ぜ終了後、コンクリートを練り板に受け、均一になるように 2 往復切り返した後に直ちにフレッシュ試験を行い、供試体を作製した。

コンクリートの試験項目は、フレッシュ性状に対しては、スランブ試験（JIS A 1101-1998）、空気量試験（JIS A 1128-1999）、単位容積質量試験（JIS A 1116-1997）とし、硬化コンクリートに対しては、圧縮強度試験（JIS A 1108-1999）、静弾性係数試験（JSCE-G 502-1999）、長さ変化率試験（JIS A 1129-3-2001）、凍結融解試験（JIS A 1148:2001）とした。圧縮強度の試験材齢、静弾性係数の試験材齢は適宜設定し、長さ変化試験は材齢 26 週まで、凍結融解試験は 300 サ

イクルまで実施した。

4. 粉砕灰混入コンクリートの乾燥収縮性状（シリーズ A）

4.1 配合

表-2 に配合表を示す。シリーズ A の実験では、粉砕灰の混入量を変化させ乾燥収縮試験を実施した。水結合材比 50% 一定で、粉砕灰をセメント質量の 0%、10%、30%（それぞれ Base-A、R10-A、R30-A と表記）と置換した配合を設定した。試験項目は、基本的な物性試験と質量変化率試験および長さ変化率試験である。これらの供試体の養生方法は翌日脱型後材齢 7 日まで水中養生を行い、基長と基準になる質量を測定した後、一般的な条件下である温度 20°C、湿度 60% の条件において試験を実施した。なお、長さ変化率試験の測定方法については、ダイヤルゲージ法を適用した。

今回、目標スランブは特に設定せず（10cm 程度）、供試体作製時において材料分離せず、適切な流動性と空気量（4.5% 程度）を有している事を確認して実験を実施した。圧縮強度用供試体の養生は、打設の翌日に脱型した後試験材齢まで水中養生を行った。圧縮強度などの試験材齢は 28 日とした。

4.2 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状

表-2 にフレッシュ試験結果を示す。Base-A 以外の R10-A、R30-A のスランブは 7cm と小さめの値となったが、施工可能なコンシステンシーを有している事を確認して許容範囲内と判断した。空気量は、ばらつきはあるが 4.5±1.0% の範囲内に収まった。これから、混和剤使用量と練混ぜ時間の調整により、施工性を確保することが可能であることが確認できた。なお、目視観察から R10-A、R30-A においてブリーディングは見られなかった。

(2) 硬化性状

材齢 28 日での圧縮強度および静弾性係数試験結果を図-1 に示す。Base-A、R10-A はほぼ同等の圧縮強度試験結果を示したが、R30-A のみ低い圧縮強度試験結果となった。これは、R30-A における空気量が 5.5% と高めである事も要因として挙げられるが、粉砕灰混入量が増加すると単位セメント量の低下から、初期強度が低下すると考えられる。静弾性係数については、強度と同様に粉砕灰混入量が多いほど小さな値となった。

表-2 配合表およびフレッシュ試験結果（シリーズ A）

配合名	粉砕灰置換率 (%)	W/(C+RHA) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (C+RHA x%)	AE (C+RHA x%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (Kg/m ³)	練上り温度 (°C)	練混ぜ時間 (分)
				W	C	RHA	S	G							
Base-A	0	50	39.6	175	350	0	708	1099	0.5	0.02	12.0	4.7	2.324	25.5	1.5
R10-A	10				315	35	704	1094	1.0		7.0	5.4	2.284	25.4	2
R30-A	30				245	105	697	1082	2.1		7.0	5.5	2.304	25.6	4

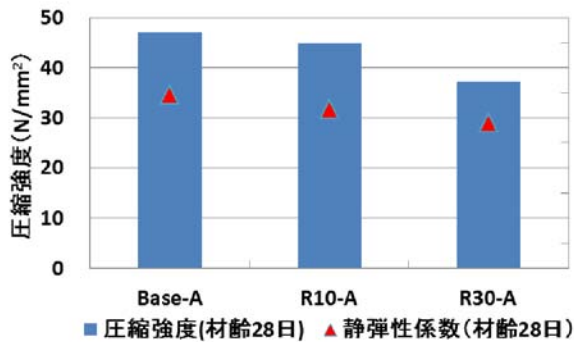


図-1 単位水量 175kg/m³ とした配合 (シリーズ A) における圧縮強度と静弾性係数の関係

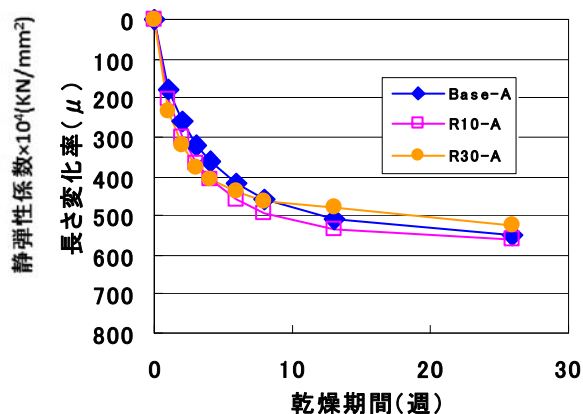


図-3 長さ変化率試験結果 (シリーズ A)

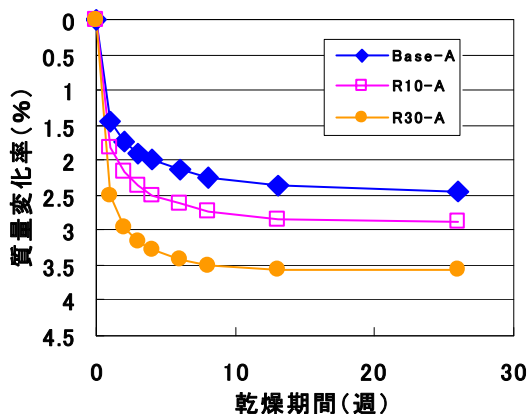


図-2 質量変化率試験結果 (シリーズ A)

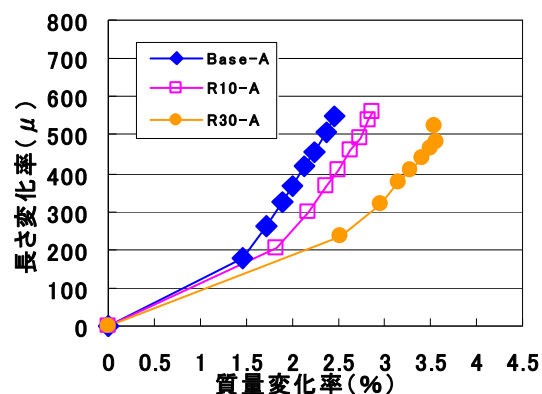


図-4 質量変化率-長さ変化率 (シリーズ A)

図-2 に質量変化率試験結果を示す。図-2 より、珪殻灰の混入量が多いほど質量変化率が大きくなっていることがわかる。また、珪殻灰混入量の多い配合は、特に乾燥初期の質量変化が大きく、2 週目以降については各配合の傾きはほぼ同じ結果となった。珪殻灰の混入量が増加すると、珪殻灰の密度がセメントと比較して小さいことから、単位ペースト量(容積)が増加すること、珪殻灰の粒形にばらつきがあることや多孔質構造であることから、コンクリート内部の細孔径が大きいと推察される。その結果、珪殻灰コンクリートの保水能力が高くなり、乾燥初期の段階では水和反応に寄与していない水分が蒸発しやすくなると考えられる。

図-3 に長さ変化率試験結果を示す。図-3 より、すべての配合において長さ変化率は 500~600 μ 程度に収束するとみられ、珪殻灰を混入した場合の乾燥収縮性状については、有効利用上の問題はないといえる。また、珪殻灰を混入した配合は初期の変化率が大きく、期間が経つにつれて収縮量が小さくなる傾向がみられる。26 週時点では、R30-A の変化率が最も小さくなった。珪殻灰の混入量が増加すると、乾燥環境下では反応初期のコンクリートから水分が逸散しやすくなるため、乾燥初期の長さ変化

率が大きくなると推察される。また、期間が経つに従い珪殻灰のポズラン反応が進行することにより、組織が緻密化することで強度増進が図られ、収縮しにくくなり、長さ変化率が収束すると考えられる。⁴⁾

図-4 に質量変化率と長さ変化率の関係を示す。各配合の 1 サイクル目以降のグラフを直線近似した場合の傾きは、珪殻灰混入量が多いほど小さくなっている。(傾きを数値で表記すると、Base-A : 220.59, R10-A : 191.38, R30-A : 136.81 となった。)したがって、珪殻灰を混入した配合は、Base-A に比べて同じ質量変化率に対する長さ変化率が小さいといえる。以上より、珪殻灰を混入したコンクリートはブリーディングが見受けられないため保水性が高く、収縮への影響が小さい水分が存在し、その結果、蒸発量が普通コンクリートに比べて多いと考えた。コンクリートの収縮を引き起こすとされている毛細管張力は、コンクリート中の細孔径が小さいほど強くなる。今回の試験結果では、珪殻灰混入コンクリートは水分逸散に伴う収縮量が小さいことが明らかとなったことから、細孔径が大きいと考えられる。また、珪殻灰が多孔質であり、比表面積が大きいことにより、珪殻灰自体が吸着していた水分の蒸発も生じていると推察される。以上より、珪殻灰

を混入してもコンクリートの長さ変化率はほぼ同等となることが明らかとなった。

5. 単位水量増加による乾燥収縮性状および凍結融解抵抗性の検討(シリーズB)

5.1 配合

配合表を表-3に示す。シリーズAの配合では、単位水量を高性能AE減水剤を使用する上限値の175kg/m³に設定したが、珪灰混入量が増加するに従い、混和剤使用量が増え、不経済になる課題があった。そこで、シリーズBの配合では、単位水量を増加させることで混和剤使用量を抑制しつつ、更なる施工性の向上を目的にした。事前の試験練りを基に、単位水量を195kg/m³に設定した珪灰置換率30%の配合を対象にした。基本的な物性試験および乾燥収縮率試験に加えて凍結融解試験を実施した。凍結融解試験に関する、既往の研究⁵⁾では、珪灰混入コンクリートの耐凍害性は、適切な空気量を確保すれば普通コンクリートと同等かそれ以上であると報告されている。しかし、微粉砕していない珪灰を混入したコンクリートについての耐凍害性に関する報告がないこと、今回は単位水量を増加していること、以上の理由から、単位水量を195kg/m³に設定した珪灰置換率30%の配合を対象に凍結融解試験を実施した。

本実験で作製した供試体は、単位水量195kg/m³、珪灰をセメント質量と30%置換(R30-Bと表記)した配合と、比較のため無混入の配合(Base-Bと表記)を設定した。無混入の配合については、単位水量195kg/m³では材料分離が生じ適切なフレッシュ性状を保つことができなかったため、示方書で示されている上限値より10kg/m³多い、単位水量185kg/m³とした。

水結合材比は50%である。ところで、乾燥収縮性状の把握を目的としたことから、表-2の各配合の粗骨材量を基準に細骨材率を設定した。その結果、既報⁴⁾による適切な流動性を得る目安となる細骨材率40%より低い値となった。混和剤は粉体比(セメント+珪灰)で添加することとした。目標スランプは特に設定せず(10cm程度)、供試体作製において材料分離せず、適切な流動性と空気量(4.5%程度)を有していることを確認した後、供試体を作製した。

長さ変化率試験では、供試体脱型後、材齢7日まで水中養生した後、温度20℃、湿度60%で乾燥を開始した。

凍結融解試験では、供試体脱型後、材齢28日まで水中

養生した後、300サイクルまで試験を実施した。

なお、圧縮強度用供試体(JIS A 1132に準拠)については所定の試験材齢まで水中養生を行った。シリーズAのR30-Aの配合では、材齢28日の強度がBase-Aよりも低くなったこと、また長さ変化率試験の考察では材齢が進むにつれてBase-Aと同程度の強度を有すると考察を行ったことから、シリーズBでの試験は材齢28日に加えて、91日でも実施した。

5.2 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状

表-3にフレッシュ性状試験結果を示す。Base-Bについては、空気量がやや少なかったが、スランプは目安の10cm程度となり目標性能を確保した。R30-Bについては、空気量は目標どおりとなったが、スランプ値がやや小さく硬いコンクリートとなった。しかし、施工可能な範囲内であると判断し供試体を作製した。これまでの供試体と比較すると、練混ぜ時間がやや長くなり、ワーカビリティも良くなかったが、高性能AE減水剤の使用量をシリーズAの実験での半分以下にすることができ、経済的であるといえる。また、珪灰を混入することにより適切な粘性が得られ、単位水量を増加しても材料分離しにくくなった。

(2) 硬化性状

圧縮強度試験および静弾性係数試験結果を図-5に示す。図-6には比較のため既報⁴⁾の結果から、シリーズAと同配合の供試体による28日および91日の圧縮強度と静弾性係数を示す。図-6より、珪灰をセメント質量の30%置換した単位水量195kg/m³の配合での各材齢における圧縮強度は、単位水量175kg/m³の配合と同等の値を

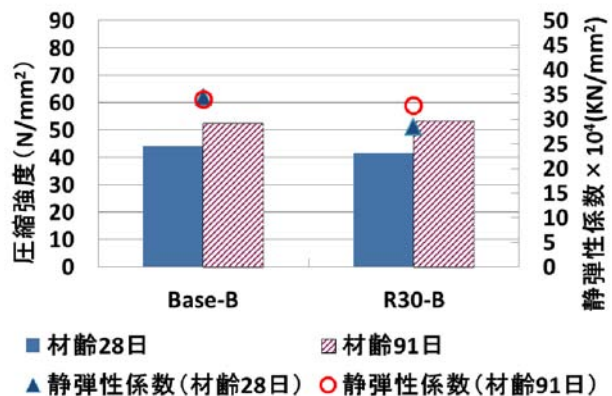


図-5 単位水量を増加させた配合(シリーズB)における圧縮強度と静弾性係数の関係

表-3 配合表およびフレッシュ試験結果(シリーズB)

配合名	珪灰置換率(%)	W/(C+RHA)(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)					SP(C+RHA x %)	AE(G+RHA x %)	スランプ(cm)	空気量(%)	単位容積質量(Kg/m ³)	練上り温度(°C)	練混ぜ時間(分)
				W	C	RHA	S	G							
Base-B	0	50	38.1	185	370	0	664	1067	0.2	0.04	10.5	3.6	2.341	27.8	1.5
R30-B	30		36.3	195	273	117	606	1051	1.0		5.0	4.5	2.252	28.5	7

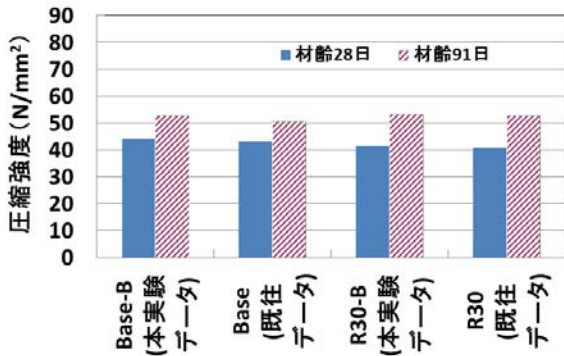


図-6 シリーズB(本実験データ)とシリーズAと同配合の供試体(既往データ)と比較した圧縮強度関係

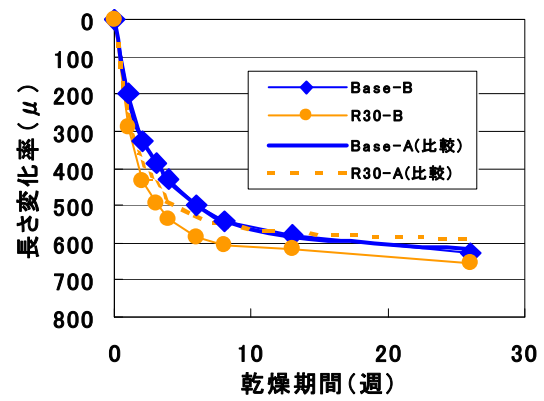


図-8 長さ変化率試験結果(シリーズB)

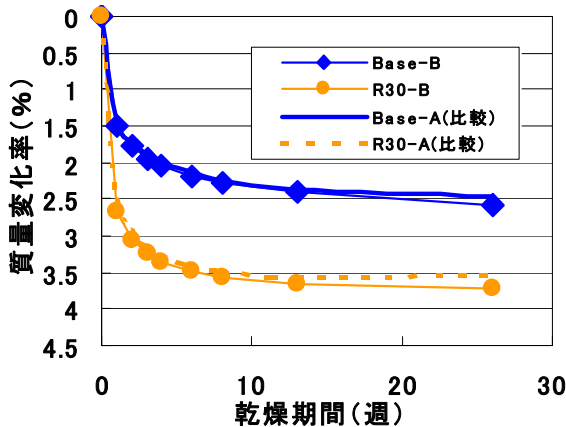


図-7 質量変化率試験結果(シリーズB)

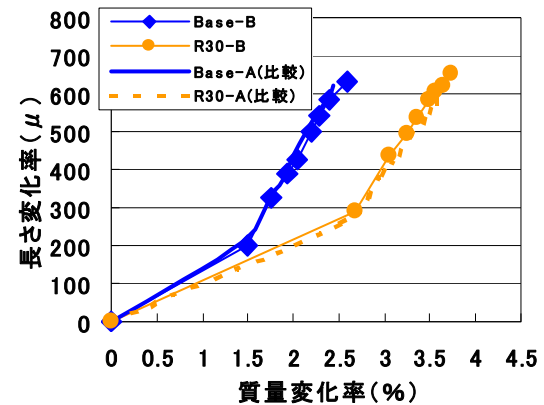


図-9 質量変化率-長さ変化率(シリーズB)

示すことがわかる。また、材齢 28 日から 91 日にかけての強度増進も同等であり、ポズラン反応による強度増進が期待できると考えられる。以上より、珪灰混入コンクリートは単位水量を増加しても強度発現に関しては問題ないことが明らかとなった。Base-B と R30-B との比較から材齢 91 日での強度差はほとんど無く、R30-B が僅かに高いことがわかる。

図-7 に質量変化率試験結果を示す。単位水量の違いの影響を検討するために、図-7 中にシリーズ A の質量変化率試験結果を示す。実線が Base-A、点線が R30-A である。図-7 より、単位水量 175 kg/m^3 の配合結果と同様、珪灰を混入した配合の質量変化率が大きくなった。このことから、珪灰を混入したコンクリートは水分が逸散しやすいといえる。シリーズ A の結果と比較すると、Base-B は単位水量が増加しても質量変化率はほとんど変わっていない。R30-B においては、単位水量を増加した配合の質量変化率が若干大きくなった。単位水量を増加した結果、単位セメント量も増加し、コンクリート全体に占める珪灰の割合が増加したため、シリーズ A の結果よりも多くの水分が保水された後、蒸発したと考えられる。

図-8 に長さ変化率試験結果を示す。比較のため、図-8 中にシリーズ A の結果を示す。図-8 より、長さ変化率は

600~700 μ 程度に収束すると予測され、単位水量を増加した配合についても、最終的な乾燥収縮量に関しては問題ないといえる。また、初期の変化率は R30-B のほうが大きい、期間が経つに従い Base-B に追いつく傾向がある。シリーズ A の結果と比較すると、Base-B は単位水量を増加した配合の測定値が、シリーズ A とほぼ同じ値となっている。R30-B は単位水量を増加した配合の測定値が大きく、最終的な変化率はシリーズ A より若干大きくなると予測される。これらの結果は質量変化率試験の傾向と一致しており、R30-B は水分逸散量が増加した分、長さ変化率も僅かではあるが増加したと考えられる。

図-9 に質量変化率と長さ変化率の関係を示す。比較のため、図-9 中にシリーズ A の結果を示す。直線近似した場合の傾きは 1 サイクル以降、これまでと同様に珪灰を混入した配合が大きくなった。(傾きを数値で表記すると、Base-B : 240.88, R30-B : 167.56 となった)。

図-10 は各凍結融解サイクル時点における質量変化率を、図-11 は各凍結融解サイクル時点における相対動弾性係数を、写真-1 は R30-B の測定開始時および 300 サイクル終了時の供試体の様子を示す。試験が進むに従い、スケールリングやポップアウトにより、質量が減少したが、質量が増加に転じなかったことから、致命的なひび割れは発

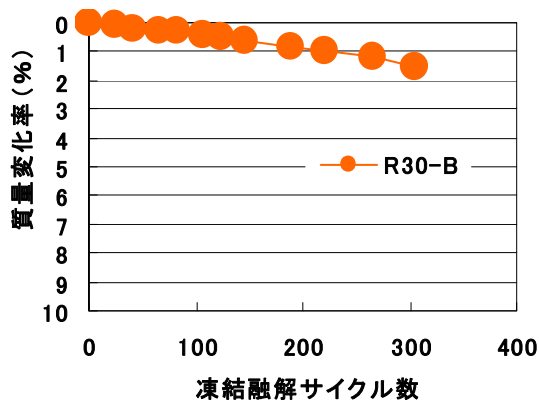


図-10 凍結融解試験による質量変化率 (R30-B)

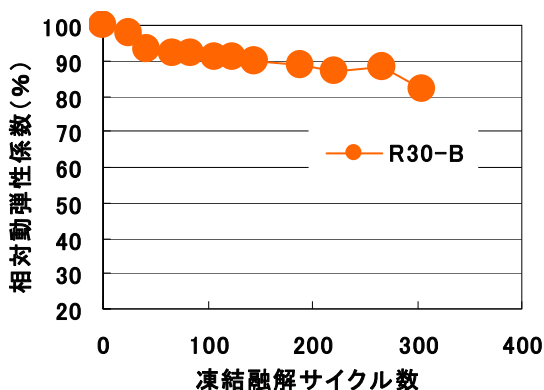


図-11 凍結融解試験による相対動弾性係数 (R30-B)



写真-1 凍結融解測定開始時(写真左)および300サイクル終了時(写真右)の供試体の様子 (R30-B)

生しなかったものと考えられる。相対動弾性係数は 300 サイクル終了時点でも 80%以上を保っている。

6. まとめ

6.1 シリーズ A

珪灰をセメントの内割 30% 混入した単位水量 175kg/m³、水結合材比 50%の珪灰混入コンクリートを対象に得られた知見を以下に示す。

(1) 珪灰の混入量が多いほど質量変化率が大きいことが明らかとなった。

(2) 乾燥収縮性状は、26 週時点での収縮量が 500~600 μ 程度となり、有効利用上の問題はないことが明らかとなった。

(3) 乾燥収縮ひずみは、乾燥初期に無混入のものより大きくなるが、長期材齢では無混入のものと同様かそれ以下となることが明らかとなった。

6.2 シリーズ B

水結合材比 50%、珪灰をセメントの内割 30%混入する条件下で、単位水量を 195 kg/ m³に増加させた珪灰混入コンクリートを対象に得られた知見を以下に示す。

(1)単位水量を 195 kg/ m³に設定したことで、高性能 AE 減水剤を単位水量 175 kg/ m³の場合の半分以下の使用量で施工性を確保することができた。

(2)単位水量 175 kg/ m³の場合と同等の圧縮強度を有することが明らかとなった。

(3)圧縮強度試験結果から、材齢 28 日では単位セメント量が少なく若干強度は低くなるが、材齢 91 日では強度増進が進み、単位セメント量が少なくても珪灰のポズラン反応効果により、遜色ない強度発現が得られることが明らかとなった。

(4)乾燥収縮性状について、26 週時点での収縮量が 600~700 μ 程度に収束し、単位水量を増加しても問題ないことがわかった。

(5)耐凍害性については、相対動弾性係数が 300 サイクル終了時点でも 80%以上を確保していることから、十分な凍結融解抵抗性を有することが明らかとなった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、珪灰の提供にご協力いただいた中部電力(株)、および本実験にご協力いただいた愛知県の前本昌宏氏に厚く御礼申し上げます。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中嶋清実,河野伊知郎ほか: コンクリート用混和材としてのもみ殻灰の利用について,コンクリート工学年次論文報告集,vol.16,pp.419-424,1994.6
- 2) 西松建設(株)技術研究所: 珪灰コンクリートの研究開発について,2005
- 3) 佐藤幸三ほか: コンクリート用混和材としてのもみ殻灰の利用に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.20,No.2,pp.193-198,1998
- 4) 梶原教裕ほか: 火力発電所から排出される珪灰を用いたコンクリートの配合設計に関する研究,セメントコンクリート論文集 No.63,pp.554-561,2009
- 5) 月岡存ほか: 珪灰を混入したコンクリートの性状に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,vol.19,No.1,1997