

論文 透水性コンクリートへの飛灰焼成骨材の利用に関する研究

大野 佑介*¹・添田 政司*²・大和 竹史*³

要旨: 都市ごみ焼却飛灰から製造した骨材（以下、飛灰焼成骨材とする）は、重金属類やダイオキシン類の揮発除去や溶出防止に優れており、有効利用が期待できる。そこで、本研究では飛灰焼成骨材の特性を明らかにするとともに、緑化コンクリートや舗装コンクリートへの利用の可能性について検討を行った。その結果、飛灰焼成骨材は高強度で急速な吸水性と放水性を有することが分かった。また、重金属類やダイオキシン類についても安全性が確認された。緑化コンクリートとしては、6号砕石を用いた場合と比べても遜色は見られず、舗装コンクリートとしても利用可能であることが明らかとなった。

キーワード: 焼却飛灰, 焼成骨材, 重金属, 緑化コンクリート, 舗装コンクリート

1. はじめに

現在、一般廃棄物は年間5000万トン排出され、その80%は焼却炉で焼却処分されており、焼却灰の発生量は440万トン、焼却灰の最終処分量330万トンとなっている。また、最終処分場の残余年数の低下や用地の確保難が問題となっており、焼却灰の減容化のみならず、有効利用が求められている。特に焼却飛灰の有効利用は進んでおらず、排出される焼却飛灰は焼却灰全体の25%であり、そのほとんどが埋立処分されている。また、焼却により発生したダイオキシン類の約80%は飛灰に取り込まれると言われ、重金属類も高濃度で含まれており、有害物質が溶出する恐れがあるので適切な処理を行った後、埋立処分されているのが現状である。

従来の焼却飛灰中間処理技術にはセメント固化、薬剤処理、酸抽出処理、熔融固化があり、熔融固化以外は埋立処分されているのが現状である。一方、焼成法は、①高温で焼成処理されるため、焼却飛灰に含まれる重金属類を揮発除去し、溶出防止、長期安定性に優れている ②焼成温度が1000～1250℃であるので、ダイオキシン類の無害化も可能となる ③揮発分離した鉛、亜鉛などを精錬所で地金として再資源化できる ④2次廃棄物がほとんど発生しない等の特徴がある。このように焼成法は従来の方法に比べ、焼却飛灰の有効利用の可能性が高く、こ

の処理飛灰を焼結固化した飛灰焼成骨材は路盤材やコンクリート用骨材などの建設資材への利用が期待できる。しかし、その有効利用例はほとんど報告されていないのが現状である。

そこで本研究では、飛灰焼成骨材の化学的、物理的特性を明らかにするとともに、緑化コンクリートや舗装コンクリートへの有効利用について検討を行った。

2. 飛灰焼成骨材の特性

2.1 製造方法

飛灰焼成骨材は、焼却飛灰に化学組成調整用副原料を添加して、混合、微粉碎後に5～15mm程度に造粒して乾燥後、ロータリーキルンで約2時間かけて1000～1250℃で焼成処理したものである。**図-1**に飛灰焼成骨材の製造工程のフローを、**写真-1**に飛灰焼成骨材の写真を示す。

2.2 化学的性質

重金属類の溶出量試験については、環境省告示46号において、Pb, Cdともに0.001mg/l以下、Crは0.01mg/l以下、As, Seともに0.001mg/l以下と全ての重金属類において土壤環境基準を満足し、安全性が確認されている。また、重金属類の含有量試験についても、Pb, Cd, As, Seは15mg/kg以下、Crは25mg/kg以下と全ての重金属類において土壤汚染対策法の土壤基準値を十分満足している。ダイオキシン類については、飛

*1 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 修士(工学) (正会員)

*2 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学専攻 助教授 博士(工学) (正会員)

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

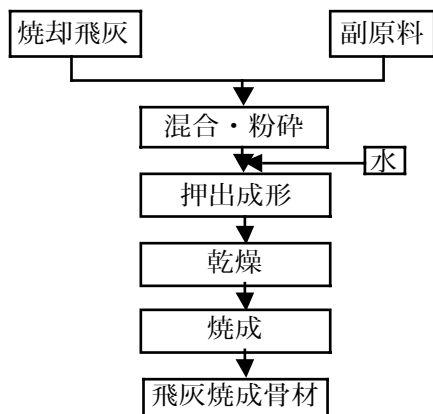


図-1 製造フロー

表-1 重金属溶出・含有試験結果

単位：mg/l

単位：mg/kg

	溶出量	土壤環境基準	含有量	土壤汚染対策法基準
Pb	<0.001	<0.01	<15	<150
Cd	<0.001	<0.01	<15	<150
Cr	<0.01	<0.05	<25	<250
As	<0.001	<0.01	<15	<150
Se	<0.001	<0.01	<15	<150
T-Hg	<0.00005	<0.00005	<1.5	<15

灰焼成骨材中のダイオキシンが0.001ng-TEQ/g以下と環境基準値を満足している。表-1に重金属類の溶出・含有試験結果を示す。

2.3 物理的特性

飛灰焼成骨材の物理試験結果を表-2に示す。飛灰焼成骨材は、6号砕石（表乾密度：2.93g/cm³，吸水率：1.55%）と比較すると密度は小さいが、市販されている人工軽量骨材（表乾密度：1.44g/cm³，吸水率：10.1%，圧潰荷重：4.9N）と比較すると密度や圧潰荷重が大きく、人工軽量骨材に比べて高強度な骨材であることが分かった。24時間吸水率も人工軽量骨材と比べて13.3%と高い吸水率となった。吸水率の経時変化を図-2に示す。吸水率は吸水開始1時間後に吸水率が12.5%と高い吸水率を示し、その後も継続的に増加して吸水開始192時間後に吸水率は15.4%になった。また、人工軽量骨材や再生骨材などの吸水率が高い骨材と比べ、吸水開始1時間後の吸水率が高い特徴があり、吸水開始1時間後の吸水率は24時間吸水率の約90%に達している。放水率の経時変化を図-3に示す。放水率は、乾燥開始6時間後から放水率の増加は見られなくなっているため、乾燥開始6時間で絶乾状態になったと思われる。また、他の骨材と比べ、絶乾状態に達するまでの時間が速く、吸水性と同様に急速な放水性を有していることが分かった。



写真-1 飛灰焼成骨材

表-2 物理試験結果

試験項目	単位	飛灰焼成骨材
絶乾密度	g/cm ³	1.85
表乾密度	g/cm ³	2.09
吸水率	%	13.3
実積率	%	62.6
単位容積質量	kg/l	1.15
圧潰荷重	N	9.3
BS破砕値	%	26.4

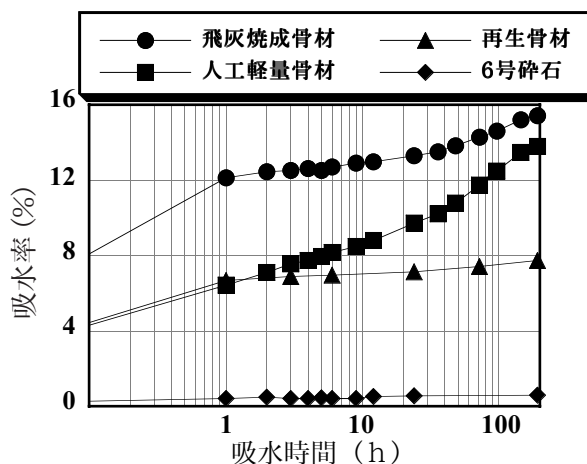


図-2 吸水率経時変化

3. 実験概要

3.1 使用材料

結合材として普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³，略号：C），混和材としてシリカフューム（密度：2.09g/cm³，略号：SF），粗

骨材として6号碎石（粒径：5～13mm，密度：2.93g/cm³，吸水率：1.55%，実積率：57.1%，略号：G）と飛灰焼成骨材（粒径：5～13mm，密度：2.09g/cm³，吸水率：13.3%，実積率：62.6%，略号：G），混和剤としてポリカルボン酸系の高性能AE減水剤（略号SP）を用いた。

3.2 配合

緑化コンクリートの配合は，水結合材比（W/P）を25%で一定とし，目標空隙率を5～25%に変化させた。普通ポルトランドセメントとシリカフェームは全結合材量の体積比で9対1とした。ペーストフロー値は高性能AE減水剤により200±10mmに調整した。舗装コンクリートの配合は，水結合材比（W/P）を25%で一定とし，目標空隙率を5～15%に変化させた。普通ポルトランドセメントとシリカフェームは全結合材量の体積比で9対1とした。ペーストフロー値は高性能AE減水剤により200±10mmに調整した。表-3にコンクリートの配合表を示す。

3.3 練混ぜ方法および供試体作製

練混ぜ方法はセメントと混和材をモルタルミキサー（容量30l）で120秒間空練りした後，高性能AE減水剤を混入した水を投入し，300秒間練り混ぜた。出来上がったフレッシュペーストはJIS R 5201に準じてフロー試験を行った。その後，出来上がったフレッシュペーストと粗骨材を可傾式ミキサー（容量70l）で60秒間練り混ぜる分離方式を用いた。供試体作製は，ポーラスコンクリートの供試体の作り方（案）¹⁾に準じて行った。

3.4 試験方法

圧縮強度試験は円柱供試体（φ10×20cm）

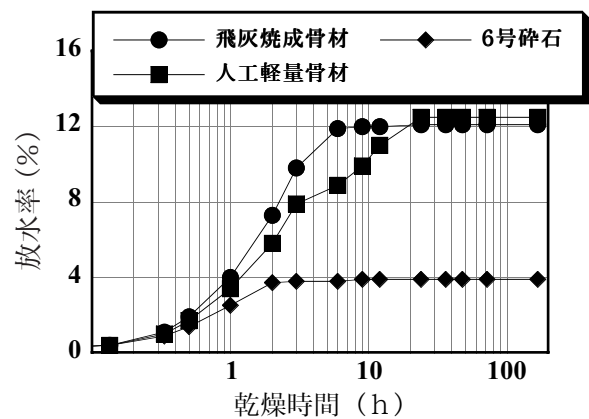


図-3 放水率経時変化

を用いて，供試体の両面にキャッピングを施しJIS A 1108に準じて行った。

曲げ強度試験は，10×10×40cmの角柱供試体を用いて，JIS A 1106に準じて行った。

空隙率試験は，ポーラスコンクリートのフレッシュ時の空隙率試験（案）¹⁾とポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）¹⁾に準じて行った。

透水性試験はポーラスコンクリートの透水試験方法（案）¹⁾に準じて行った。

芝の植生試験は，コンクリートからのアルカリ分の溶出を考慮して材齢28日まで水中養生を行った30×30×6cmの平板コンクリートを供試体として用いて，芝には西洋芝を用いた。供試体に培養土を充填し，その上に芝の種を蒔き，さらに培養土を覆土厚が3cmになるように播種した。播種後，供試体を室内の日中ガラス越しに太陽が当たる窓際に設置し，1日1回散水を行った。さらに，比較のため，土壌（培養土）のみにも播種を行った。芝の生育状況の測定は，5日毎に芝の長さが最大のものから5本を定規を用いて測定し，その平均を芝の生育長さとした。

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の種類	W/P (%)	目標空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (P×%)	ペーストフロー値 (mm)
			W	C	SF	G		
6号碎石	25	25	87	327	24	1606	0.8	204
飛灰焼成骨材	25	5	151	563	41	1256	0.8	195
		10	129	484	36	1256	0.8	197
		15	108	401	29	1256	0.8	200
		20	86	321	24	1256	0.8	194
		25	65	239	18	1256	0.9	206

P=C+SF

温度測定試験は、30×30×6cmの平板コンクリートを40℃の乾燥機で一定の温度にした後、熱電対をポーラスコンクリートに2カ所設置し、温度変化を測定した。約20℃の恒温室内に放置し、試験開始後最初の1時間は10分毎、その後1時間毎に温度を測定した場合と、試験開始5分後に10℃の水を散水し、試験開始後最初の1時間は10分毎、その後1時間毎に温度を測定した場合の2パターンで行った。

4. 実験結果および考察

4.1 緑化コンクリート

飛灰焼成骨材を用いた緑化コンクリートの各材齢における目標空隙率と圧縮強度の関係を図-4に示す。飛灰焼成骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、目標空隙率の低下に伴って、圧縮強度の増加が見られた。特に目標空隙率15%以下では著しい圧縮強度の増加が見られた。これは、ポーラスコンクリートの圧縮強度は、空隙率等に依存しており²⁾、飛灰焼成骨材を用いた場合でも、空隙率による影響があることが確認できた。目標空隙率20%で飛灰焼成骨材を用いたコンクリートは、目標空隙率25%で6号砕石を用いたコンクリートと同等の値を示し、緑化重視の設計目標強度³⁾である10N/mm²を満足することができた。また、目標空隙率15%、10%の場合、強度重視の設計目標強度³⁾である18N/mm²を満足することができた。

飛灰焼成骨材を用いた緑化コンクリートの目標空隙率とフレッシュ時の空隙率、硬化後の空隙率の関係を図-5に示す。いずれの目標空隙率においても、目標空隙率とフレッシュ時の空隙率、硬化後の空隙率との間に顕著な差は見られず、配合どおりのコンクリートが作製できたと言える。

飛灰焼成骨材を用いた緑化コンクリートの目標空隙率と透水係数の関係を図-6に示す。目標空隙率の低下に伴って、透水係数の低下が見られた。ポーラスコンクリートの透水性は空隙率等に依存しており²⁾、飛灰焼成骨材を用いることによるコンクリートの透水性に及ぼす影響はなく、飛灰焼成骨材を用いたコンクリートの透水性は、砕石を用いた場合と同様に、空隙率等に依存し、空隙率と相関関係があることが確認できた。

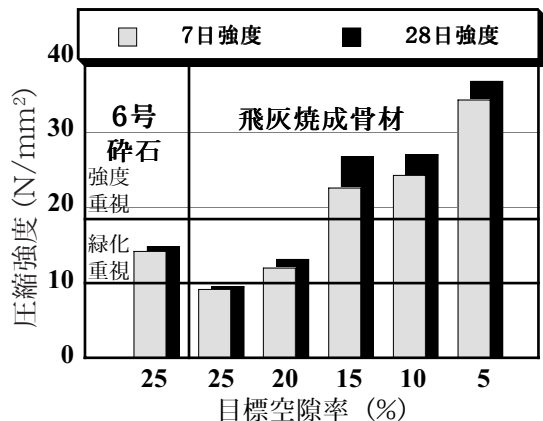


図-4 目標空隙率と圧縮強度の関係

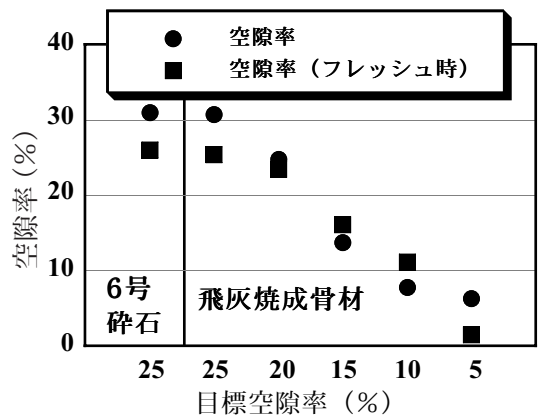


図-5 目標空隙率と空隙率の関係

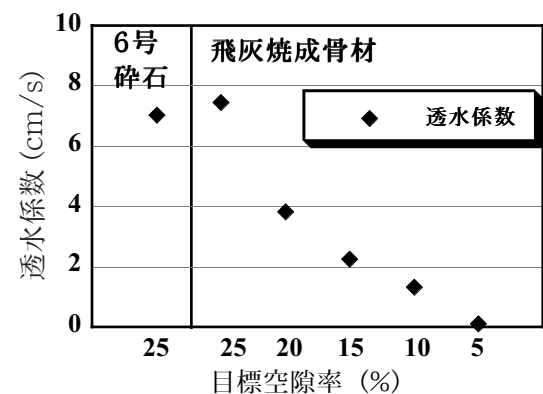


図-6 目標空隙率と透水係数の関係

コンクリートの吸水率の経時変化を図-7に示す。飛灰焼成骨材を用いたコンクリートは、飛灰焼成骨材の個々にペーストを付着させた場合と円柱供試体の場合の2パターンで行った。飛灰焼成骨材を用いたコンクリートの吸水率は、吸水開始直後から高い値を示しており、断続的に増加した。特に飛灰焼成骨材の個々にペーストを付着させた場合は、円柱供試体よりも高い値を示した。これは、飛灰焼成骨材の個々にペーストを付着させた場合、コンクリートの表面積が増加するの

で、水と接する面が広くなり吸水率が高くなったと考えられる。また、飛灰焼成骨材を用いたコンクリートの吸水率は、6号砕石を用いたコンクリートの吸水率よりも高くなった。これは、骨材自体の吸水率の影響が大きいと考えられる。

飛灰焼成骨材および6号砕石を用いたコンクリートを植生基盤として播種した芝の生育長さを図-8に示す。飛灰焼成骨材は前述した強度試験の結果より、目標強度を満足した目標空隙率20%、15%、10%のコンクリートを使用した。飛灰焼成骨材および6号砕石を用いたコンクリートにおける芝の生育長さは、播種から約1週間で発芽した後、順調に成長し、70~80mm程度まで達し、土壤に播種した芝の成長長さとはほぼ同程度であった。飛灰焼成骨材を用いたコンクリートにおける芝の生育長さは、6号砕石を用いたコンクリートよりも大きくなった。これは、図-7に示すように、飛灰焼成骨材を用いたコンクリートは、6号砕石を用いたコンクリートよりも吸水率が高いので、コンクリート自体の吸水力が大きくなり、芝の成長に影響を及ぼしたものと考えられる。また、空隙率の違いによる芝の成長長さに若干の違いが認められ、空隙率の増加に伴って、芝の成長長さも大きくなった。これは、芝の成長長さは、空隙率等に大きく依存しているためと考えられる。

4.2 舗装コンクリート

飛灰焼成骨材を用いた透水性コンクリートの各材齢における目標空隙率と曲げ強度の関係を図-9に示す。飛灰焼成骨材を用いたコンクリートの曲げ強度は、目標空隙率の低下に伴って、曲げ強度の増加が見られた。舗装コンクリートとしての目標曲げ強度を車道用は4.5N/mm²以上、歩道用は3N/mm²以上と設定しており³⁾、飛灰焼成骨材を用いたコンクリートの曲げ強度は、車道用の曲げ強度は満足できなかったが、いずれの場合においても歩道用の曲げ強度は材齢28日の曲げ強度で確保できた。

飛灰焼成骨材を用いた透水性コンクリートの目標空隙率と透水係数の関係を図-10に示す。飛灰焼成骨材を用いたコンクリートの透水性は空隙率等に依存しており、空隙率の低下による透水係数の低下が見られた。舗装コンクリートとしての目標透水係数を車道用は 1.0×10^{-2} cm/s以上、歩道用は 1.0×10^{-1} cm/s以上と設

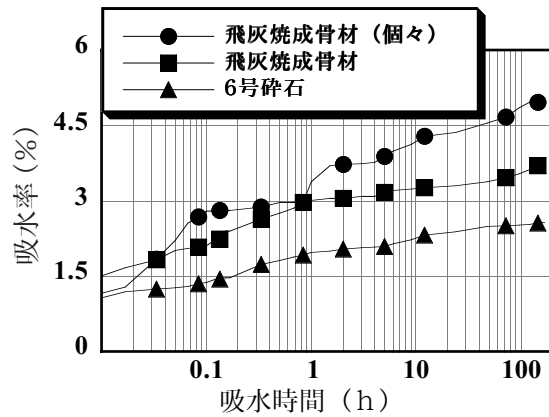


図-7 吸水率経時変化

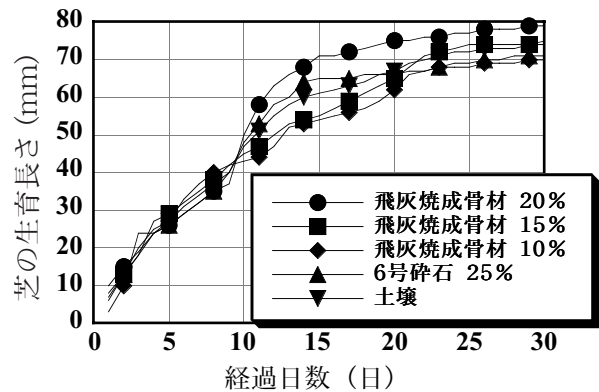


図-8 芝の生育長さ

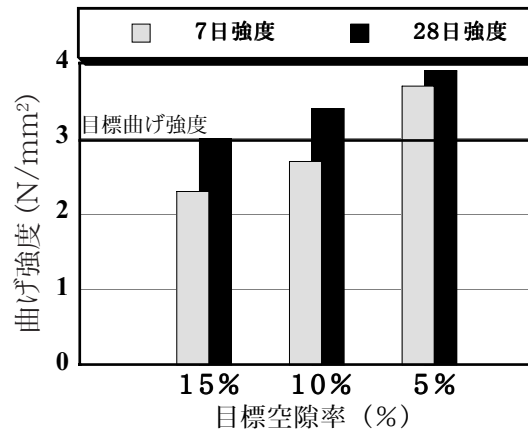


図-9 目標空隙率と曲げ強度の関係

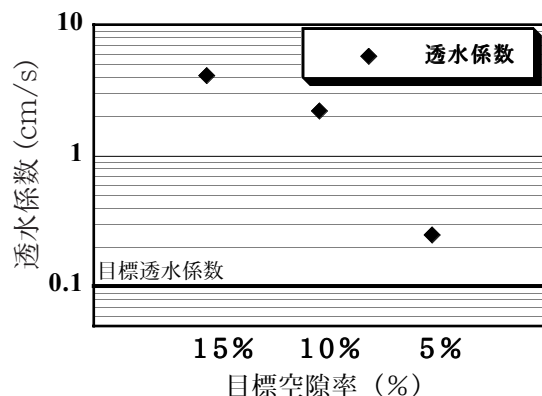


図-10 目標空隙率と透水係数の関係

定しており³⁾、飛灰焼成骨材を用いたコンクリートの透水係数は、車道用、歩道用の透水係数をいずれの場合においても満足できた。

各種コンクリートの時間経過に伴う温度変化を図-11に示す。いずれのコンクリートにおいても測定開始約10分後から、温度低下が見られ試験終了時には、室温とほぼ同程度の温度となった。飛灰焼成骨材を用いたコンクリートは、6号砕石を用いたコンクリート、普通コンクリートと比べ、温度低下が見られた。また、透水性コンクリートは普通コンクリートと比べて温度低下が見られた。空隙率の違いによる顕著な差は見られなかった。試験開始5分後に散水した場合の各種コンクリートの時間経過に伴う温度変化を図-12に示す。いずれの場合にも散水した直後に温度低下が見られるが、飛灰焼成骨材を用いたコンクリートでは急激な温度低下が見られ、普通コンクリートと約10℃の温度差が見られた。これは飛灰焼成骨材を用いたコンクリートは吸水率が高いので、水分を多く吸収し、その吸収した水分を放出する時の気化熱の影響があると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- 1) 飛灰焼成骨材は、人工軽量骨材と比較すると密度や圧潰強度が大きく、高強度な骨材であると言える。また、吸水率が13.3%と高い値を示し、急速な吸水性と放水性を有していることが確認された。
- 2) 重金属溶出試験においては、いずれの分析項目においても土壤環境基準を満足しており安全性が確認された。また、重金属含有試験においても土壤汚染対策法基準を満足しており、安全性が確認された。ダイオキシン類についても安全性が確認された。
- 3) 飛灰焼成骨材を用いた緑化コンクリートにおいては、目標空隙率20%以下の場合、緑化コンクリートの設計目標圧縮強度を満足することができ、また、芝の植生試験においても土壤に播種した場合と同程度の成長が見られ、緑化コンクリートとして使用可能であると言える。
- 4) 飛灰焼成骨材を用いた舗装コンクリートにおいては、目標空隙率15%以下の場合、歩道用

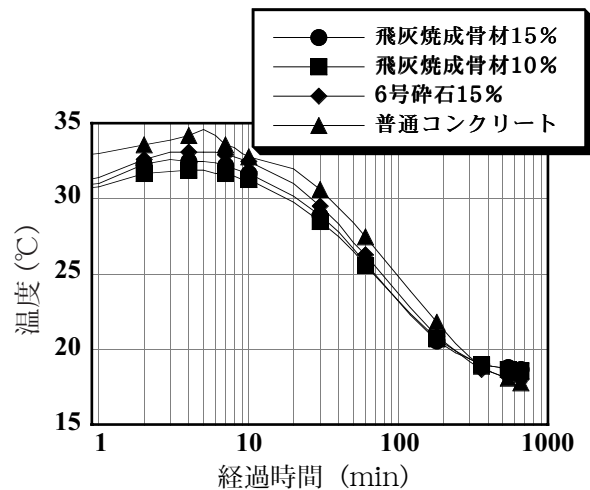


図-11 温度変化

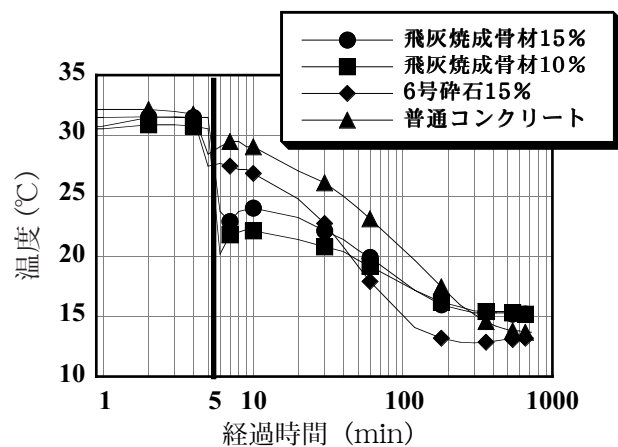


図-12 温度変化（散水あり）

の設計目標曲げ強度を満足することができ、また、飛灰焼成骨材を用いた場合は温度低減効果が確認でき、歩道用舗装コンクリートとして使用可能であると言える。

謝辞：本研究は平成15年度福岡県産炭地域振興センターの補助金により行い、飛灰焼成骨材は住友金属鉱山株式会社より提供いただきました。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書，pp176～191，2003
- 2) 岡本享久，安田登，増井直樹，佐藤文則：ポーラスコンクリートの製造・物性・試験方法，コンクリート工学，Vol.36，No.3，pp52-62，1998
- 3) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書，pp117，2003