

論文 流動床灰を多量に使用したコンクリートに関する基礎的研究

岡本 修一^{*1}・宇治 公隆^{*2}・松村 勘寿^{*3}

要旨：加圧流動床型式の石炭火力発電所から発生する石炭灰（流動床灰）の有効利用法として、流動床灰がもつ膨張特性に着目し、鋼繊維と組み合わせ、ひび割れ抵抗性を有した材料としての利用法について基礎検討を行った。流動床灰を多量に使用したモルタルによる実験の結果、一般の膨張材と同様に膨張歪みを拘束し内部応力を発生させることが可能であること、圧縮強度の大幅な向上が期待できることが明らかとなった。また、コンクリートとしても、流動床灰と鋼繊維を併用することで曲げひび割れ発生荷重の改善が可能であり、この改善効果は乾燥後も残存することが認められた。

キーワード：流動床灰、資源の有効利用、砂置換、鋼繊維、ひび割れ抵抗性

1. はじめに

加圧流動床型式の石炭火力発電所は、従来型式の石炭火力発電所と比較し、発電効率の改善や環境負荷の低減が図れるため、今後の増加が期待されている。この型式の特徴は、燃焼温度が低いこと、および石灰石微粉末を原料炭に混合し燃焼させ脱硫することにある。

しかし、そのため発生する石炭灰（流動床灰）には、現行のフライアッシュと比較し SO_3 や CaO 含有量が多くなる傾向が認められる。また、 SiO_2 の比率が低くフライアッシュJIS規格を満足しないため、コンクリート用混和材として利用できない状況にあり、現在、その有効利用方法の研究が行なわれている¹⁾。

一方、鋼繊維と膨張材を併用して使用すると、コンクリートの乾燥収縮ひび割れの発生やひび割れ幅低減に対して有効であることが明らかにされている^{2), 3)}。

SO_3 や CaO を多く含有する流動床灰をコンクリートに混入した場合、コンクリートは膨張挙動を示すものと考えられる。

そこで著者らは、流動床灰と短繊維と組み合

わせることで、コンクリートにケミカルプレストレスを導入し、ひび割れ抵抗性を改善できるものと考えた。

本研究は、この膨張に着目した利用方法が可能であるかの確認と基礎データを得ることを目的として行ったものである。

2. 実験概要

2.1 実験の基本方針

有効利用の観点からは、できる限り多量の流動床灰が利用されることが望ましい。そこで本実験では、フライアッシュセメントのようなセメント置換ではなく、コンクリート中の細骨材の一部と見なす“砂置換”を前提とした。

しかし、通常の水セメント比程度のコンクリートの配合で砂置換して使用した場合、実質的な粉体量が増大するために、十分なワーカビリティが確保できないことが予想される。この点に関しては、高強度コンクリートや高流動コンクリートと同じく高性能AE減水剤を使用することで対応するものとした。

また、今回の検討に使用したモルタルの基準

*1 大成建設（株）技術研究所 工修（正会員）

*2 大成建設（株）技術研究所 工博（正会員）

*3 長岡技術科学大学大学院 （学生会員）

配合は、一連の実験の配合の統一を図るため、後述するコンクリートの配合表（表-3）中の基準配合No.1から粗骨材を除いた配合である。

検討は、流動床灰の膨張性や強度特性の把握を目的とするシリーズⅠと、ひび割れ抵抗性の改善効果の把握を目的とするシリーズⅡの2シリーズについて行った。

2.2 使用材料および実験内容

(1) 使用材料

実験で使用した材料と、その諸元を表-1に示す。また、表-2に、セメント、流動床灰、膨張材の化学組成を示す。今回使用した流動床灰は、SiO₂の含有量が低くJISのフライアッシュの規格を満足しないものである。

表-1 使用材料の諸元

セメント (C)	密度：3.14g/cm ³ フレン値：3400cm ² /g
細骨材 (S)	木更津産山砂（密度：2.63g/cm ³ 吸水率：1.84 F.M.：2.6）
粗骨材 (G)	青梅産砕石（密度：2.66g/cm ³ 吸水率：0.75）
流動床灰 (R)	密度：2.69g/cm ³ フレン値：4160cm ² /g
膨張材 (E x)	CaO系膨張材 密度：3.14g/cm ³ フレン値：3550cm ² /g
石灰石微粉末	比重：2.78 フレン値：4450cm ² /g
高性能AE減水剤 (SP)	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体
鋼繊維	端部フック型 繊維長：30mm 直径：0.5mm 密度：8.0g/cm ³

表-2 化学組成

	密度 (g/cm ³)	強熱減量 (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)
流動床灰	2.69	3.7	40.3	21.3	6.23	23.3	2.1	0.2
セメント	3.14	0.7	21.2	64.3	2.4	4.5	2.2	1.5
膨張材	3.14	0.5	9.5	66.9	18.5	2.5	1.3	0.2

(2) 実験内容

a) シリーズⅠ

シリーズⅠは、流動床灰を砂置換で使用した場合の基本性状を把握するものである。流動床灰による膨張歪みを拘束した場合に、一般の膨張材と同様に内圧として作用するか否か、また、圧縮強度の発現状況についてモルタル供試

体で検討した。

拘束応力発生の確認試験では、基準配合の細骨材体積に対し、流動床灰を30%、40%、50%砂置換したものと、CaO系膨張材をセメントに15、25、35kg/m³内割りで混入したものを比較することとした。試験は、4×4×16cmの矩形供試体を用いJIS A 6202 附属書に準拠し、鋼棒と鋼板で供試体長手方向を拘束した場合と無拘束の場合における長さ変化の測定を行った。

圧縮強度試験では、基準配合ならびに細骨材体積の50%を流動床灰、セメントあるいは石灰石微粉末で置換した場合について、強度発現特性を把握した。試験は、φ10×20cmの供試体を用いJIS A 1108に準拠して行った。

なお、各試験とも、供試体の養生条件は、脱型後20℃水中養生とした。

b) シリーズⅡ

シリーズⅡでは、流動床灰を砂置換した場合の、膨張を鋼繊維で拘束することによるひび割れ抵抗性の改善効果について検討した。

試験はモルタルならびにコンクリートで行った。コンクリートの配合を表-3に示す。表中の基準配合である配合No.1は、W/C=0.55、単位セメント量=320kg/m³程度で、繊維を混入することを前提にスランブが18cm程度となる配合である。目標空気量は、4.5±1.5%である。

モルタル供試体では、流動床灰の置換率を0%、40%、50%とし、各々鋼繊維を全体積の1%混

表-3 コンクリートの配合

No.	置換率 (Vol.%)	W (C+R)	繊維混入率 (Vol.%)	単位置量(kg/m ³)					混和剤		
				W	C	S	G	流動床灰(R)	鋼繊維	AE減水剤	SP
1	0	0.55	0	175	318	731	1110	—	—	C*0.25%	—
2	30	0.32	0	175	318	512	1110	224	—	—	C*1.6%
3	40	0.28		175	318	439	1110	299	—	—	C*2.6%
4	50	0.25		175	318	366	1110	374	—	—	C*3.5%
5	30	0.32	1.0	175	318	512	1110	224	80	—	C*1.6%
6	40	0.28	1.0	175	318	439	1110	299	80	—	C*2.6%
7	40	0.28	2.0	175	318	439	1110	299	160	—	C*2.6%
8	50	0.25	1.0	175	318	366	1110	374	80	—	C*3.5%

入したものと、無混入の場合について試験を行った。試験には、 $10 \times 10 \times 40$ cmの矩形供試体を用いた。長さ変化に関してはJIS A 1129に準拠し測定を行った。また、ひび割れ抵抗性に関しては、JSCE-G552に準拠し、曲げタフネス試験時のひび割れ発生荷重を比較することとした。

なお、養生は、脱型後28日まで 20°C 水中養生とし、以後、脱型後91日まで気中養生(20°C , R.H.60%)とした。

3. 実験結果および考察

3.1 拘束応力発生性状

図-1に、材齢28日時点での供試体の膨張率を示す。図より、通常の膨張材と同様に流動床灰の置換率が大きくなると、無拘束状態での膨

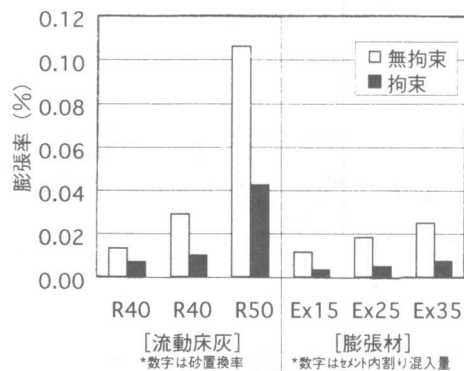


図-1 供試体の膨張率 (材齢28日)

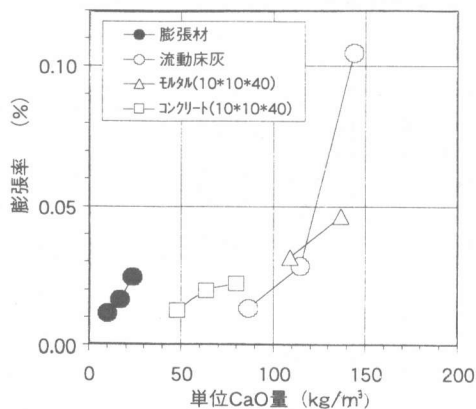


図-2 単位CaO量と膨張率の関係

張率は大きくなる。また、対応する供試体中心に配置した銅棒と端板により一軸拘束した場合においても、流動床灰の置換率増大にともない、拘束膨張も増加する傾向が認められた。

すなわち、流動床灰を使用した場合も、通常の膨張材と同様、自由膨張を拘束した場合に、端部拘束板を押し広げるだけの膨張圧が供試体内部に発生することが確認された。

この流動床灰混入による供試体の膨張を、単純にCaO系膨張材と同様な機構で生ずるものと考え、単位体積当りのCaO量と材齢28日時点での膨張率の関係を整理すると図-2のようになる。図中には、シリーズIIの結果も併記している。ここでの単位CaO量とは、単位体積当りの膨張材もしくは流動床灰の使用量に、表-2で示した化学分析から求めたCaOの割合を乗じて算出したものである。

図より、流動床灰および膨張材いずれの場合も、単位体積当りのCaO量が多くなると膨張量は大きくなるのがわかる。しかし、膨張材に比べて流動床灰は、同じ膨張量を得るために必要なCaO量が多くなる傾向が認められる。したがって、流動床灰の混入により通常の膨張材と同程度の膨張量を確保するためには、流動床灰の大量使用が必要となる。

3.2 強度発現性

強度試験結果を図-3に示す。流動床灰を50%砂置換した供試体は、材齢28日、91日いずれに

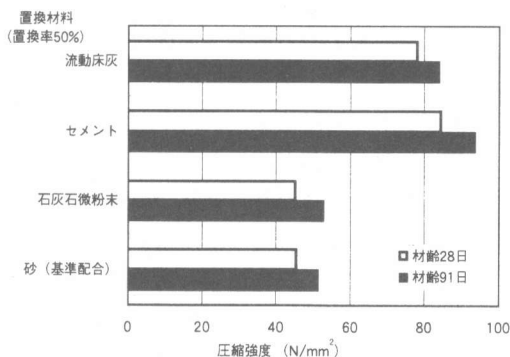


図-3 モルタルの強度試験結果

においても、セメントを同容量置換した場合の約90%程度の強度発現を示している。

一方、強度発現に殆ど寄与しないと考えられる石灰石微粉末や砂を同容量置換した場合では、流動床灰で置換した場合の約60%程度の強度発現となっている。つまり流動床灰は、セメントと同程度の強度発現性を示し、砂置換すると圧縮強度が大幅に向上することが確認された。

新谷らの研究¹⁾においても、流動床灰をセメントに置換して使用した場合に、 SO_3 やCaO含有量が多い影響で強度改善されることが報告されている。

今回のように、砂置換として多量に流動床灰を使用することで、高強度のコンクリートが得られるものと考えられる。

3.3 ひび割れ抵抗性改善効果

(1) 鋼繊維による膨張の拘束

長さ変化試験について、モルタルの結果を図-4に、コンクリートの結果を図-5に示す。基本的に鋼繊維は、水中養生期間中（材齢28日まで）においては膨張を、気中養生期間中（材齢28日から材齢91日）においては収縮を拘束する。

モルタル供試体の場合、材齢28日までの膨張区間においては、流動床灰の置換率が大きくなるほど、無拘束と鋼繊維で拘束した供試体の膨張率の差が大きくなっており、鋼繊維で流動床灰混入による膨張を拘束できることがわかる。

また、材齢28日以降の乾燥区間について見てみると、材齢91日における供試体収縮率の絶対値は、置換率が大きくなるほど、流動床灰無混入のものに比べ小さくなっており、通常の膨張材と同じような乾燥収縮補償効果が認められる。ただし、収縮開始材齢である材齢28日からの変化量については、繊維混入と無混入の差は明確でなかった。

次に、コンクリート供試体の場合、

材齢28日までの膨張区間においては繊維混入率が1%の場合、流動床灰の混入率が大きくなっていても、モルタル供試体の場合ほど拘束効果は明確でなかった。しかし、置換率40%で鋼繊維混入率2%の供試体においては拘束効果が明瞭となる。

これは、今回の試験で使用した繊維の長さが30mmであるのに対し、コンクリートの粗骨材最大寸法が20mmであること、粗骨材が存在することにより絶対的な膨張が小さく抑えられていることなどが影響し、拘束効果が現われにくかったものと考えられる。

乾燥区間においては、モルタル供試体と同様な傾向が認められた。

以上のような、モルタルあるいはコンクリート供試体でみられた、水中養生期間中には鋼繊維の拘束効果が認められるが、引続いて乾燥させた場合の収縮性状に差異が現れない傾向は、

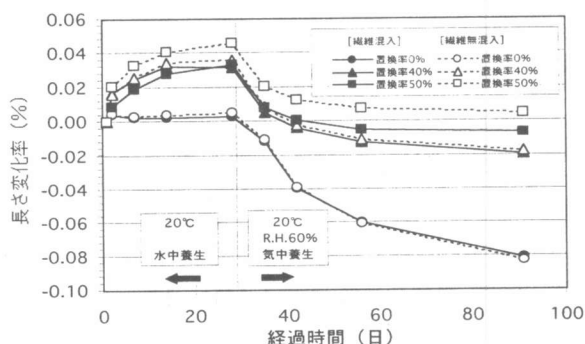


図-4 長さ変化試験結果（モルタル）

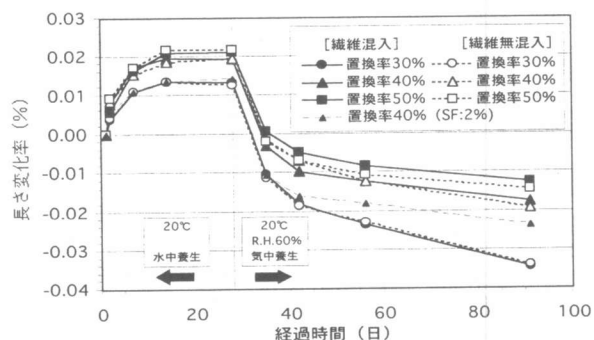


図-5 長さ変化試験結果（コンクリート）

通常の膨張材と鋼繊維を併用したコンクリートの場合^{4), 5)}と同じ傾向である。

以上、長さ変化試験の結果より、流動床灰の膨張量を鋼繊維で拘束することは可能であることが判明した。今後、実用化に向けて、流動床灰を使用し効率的に膨張を得るための配合検討、ならびに、繊維の種類、長さ、形状に関しても検討が必要と思われる。

(2) ひび割れ発生応力の改善

モルタル供試体の曲げ強度試験について、材齢28日での試験結果を図-6に、材齢91日での試験結果を図-7に示す。

図-6において、置換率0%で、鋼繊維無混入供試体の破壊強度が 5.9 N/mm^2 であるのに対し、鋼繊維を混入した供試体のひび割れ発生応力は 6.43 N/mm^2 であった。鋼繊維の混入によるひび割れ発生応力の改善効果は 0.53 N/mm^2 程度であり、一般的に言われているように鋼繊維を混入することのみでもひび割れ発生応力は改善される⁵⁾ことがわかる。

流動床灰を40%または50%置換すると、繊維無混入供試体の破壊強度と混入供試体のひび割れ発生応力の差、つまり、ひび割れ発生応力の改善効果は、 1.2 N/mm^2 または 2.3 N/mm^2 となり、鋼繊維混入のみによるひび割れ発生応力改善量以上の効果が認められる。これは、流動床灰置換率を増加させることによりケミカルプレストレスが導入され、ひび割れ発生応力が改善されたものと考えられる。なお、鋼繊維を混入することで、流動床灰の置換率の増加により、最終的な曲げ強度も増加している。

図-7において、材齢28日まで水中養生を行った後に、材齢91日まで気中養生した場合、鋼繊維無混入の供試体の曲げ強度および鋼繊維を混入した供試体のひび割れ発生応力は、ともに材齢28日時点の結果に比べ低下する。しかし、両者の差で示されるひび割れ抵抗性の改善効果は、乾燥開始時である材齢28日時点と同程度残存していることがわかる。また、最終的な曲げ強度は、鋼繊維を混入した供試体においては、

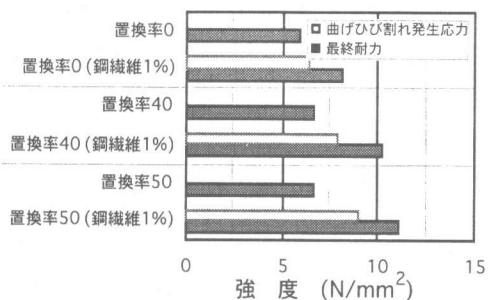


図-6 モルタル曲げ強度試験結果 (σ_{28})

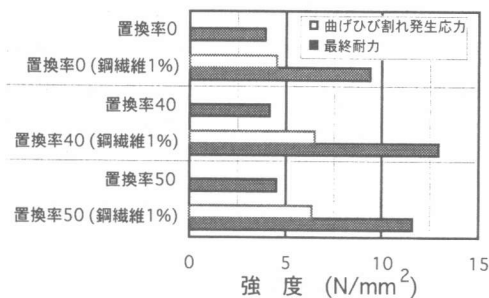


図-7 モルタル曲げ強度試験結果 (σ_{91})

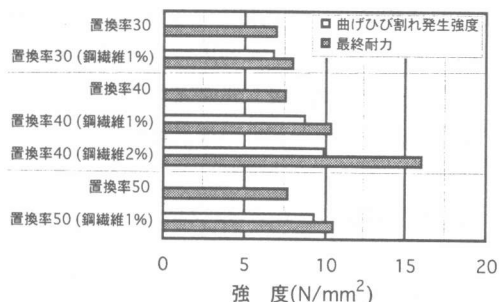


図-8 コンクリート曲げ強度試験結果 (σ_{28})

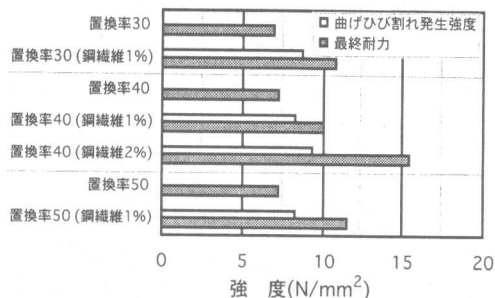


図-9 コンクリート曲げ強度試験結果 (σ_{91})

増加する傾向が認められる。

次に、コンクリート供試体の曲げ強度試験について材齢28日における試験結果を図-8に、材齢91日における試験結果を図-9に示す。図-8より、流動床灰の置換率を30%、40%、50%と増加させると、繊維無混入供試体の破壊強度と混入供試体のひび割れ発生応力の差は増大し、モルタル供試体と同様にひび割れ抵抗性が改善が認められる。

また、その改善効果は、混入する鋼繊維の量が1%から2%に増えることでも大きくなっている。これは、図-5で示したように、混入繊維量が増えることで拘束される膨張歪み量が大きくなったことに起因するものと考えられる。

さらに、図-9に示すように、コンクリート供試体においても、ひび割れ抵抗性改善効果が、乾燥後も残存することがでも確認された。流動床灰と鋼繊維を組み合わせるにより最終的な曲げ強度は増加する傾向についても、モルタル供試体と同様な傾向が認められた。

以上のように、流動床灰を多量に使用し鋼繊維と併用した場合、流動床灰の置換率を増大させる、あるいは、混入繊維量を増大することにより、通常の膨張材と鋼繊維を併用したコンクリートと同じく、供試体のひび割れ発生応力を改善できるものと考えられる。

4. まとめ

加圧流動床型式の石炭火力発電所から発生する石炭灰の有効利用方法として、流動床灰の膨張特性に着目し、鋼繊維と組み合わせることでケミカルプレストレスを導入することを考え、モルタルおよびコンクリートにより基礎実験を行った。今回の実験で得られた知見を以下に示す。

(1) 流動床灰を多量に使用した場合に生ずる膨張歪みを拘束した場合、一般の膨張材と同様に供試体内部に拘束応力を発生させることが可能である。

(2) 流動床灰を多量に使用することで、圧縮

強度の向上が期待できる。

(3) コンクリートとしても膨張は期待でき、この膨張は鋼繊維によって拘束は可能であり、流動床灰と鋼繊維を併用することで曲げひび割れ発生荷重の改善が認められた。

(4) この改善効果は乾燥後も残存することが認められた。

ただし、今回検討を行った配合は、基本性状を把握することが主目的であったため、単位セメント量固定で試験を行った。しかし、流動床灰の高い水硬性を考えると、セメント量を低減し一般的な強度レベルの配合での検討も必要と考える。また、流動床灰の強度への寄与効果や、反応生成物など化学的検討も、硬化体の耐久性と併せて、今後の実用化に向けての検討課題である。

〔謝 辞〕

本研究を実施するにあたり、流動床灰を提供して頂きました、中国電力(株)関係者の皆様方には感謝の意を表します。

《参考文献》

- 1) 新谷 登, 斎藤 直, 喜多達夫: 加圧流動床石炭灰(PFBC 灰)の有効利用に関する研究, 電力土木, No.274, pp.15-20, 1998
- 2) 小林一輔, 魚本健人, 峰松敏和: 鋼繊維補強コンクリートの乾燥収縮に関する研究(1), 生産研究, No.30, pp.274-277, 1978
- 3) 小林一輔, 魚本健人, 峰松敏和: 鋼繊維補強コンクリートの乾燥収縮に関する研究(2) -拘束条件下における収縮性状-, 生産研究, No.31, pp.767-770, 1979
- 4) 辻 幸和, 佐藤正勝, 佐藤喜悦: 鋼繊維膨張コンクリートの膨張収縮特性, 第 36 回土木学会年次学術講演会, pp.157-158, 1981
- 5) 小林一輔: 繊維補強コンクリート -特性と応用-, (株)オーム社, 1981