

フライアッシュを用いた低強度モルタル

LOW-STRENGTH MORTAR USING FLY ASH

玉井元治*・谷 高広**

by Motoharu TAMAI and Takahiro TANI

1. はじめに

人類の持続可能な発展を目指し、我が国では生産から流通、消費、廃棄にいたるまで資源の有効利用やリサイクルを推進する方法で「循環型社会」の構築を計っている。その代表的なものは、2001年に施行された「循環型社会形成推進基本法」がある。こうした社会的背景をうけ、これまで廃棄物を循環して利用する技術や工法の開発が行われている。

本研究は、発生量が増加しているフライアッシュに着目した。フライアッシュは、石炭火力発電所における燃焼過程で発生する高温履歴型の粉体廃棄物である。現在、石油資源の枯渇予測と価格の高騰により、可採埋蔵量の多い石炭が注目され石炭火力発電設備が増加し、全国の石炭灰の発生量は平成14年度約920万トンが、平成19年度には約1,000万トンに達すると予測されている。フライアッシュは、セメント原料や埋立材としての利用が中心である¹⁾。しかし、今後セメント需要の減少や新たな埋立地の確保が困難になると考えられている。有効利用に関する過去の研究は、コンクリート用の混和材やセメントとの混合による地盤改良、建設汚泥処理への利用等が検討されてきた。しかし、これらの研究はフライアッシュを添加材として利用しているため大量利用の点で効果が低いようである。

そこで、フライアッシュを従来よりも大量利用できるものとして、フライアッシュとセメント、および粘土系物質（ベントナイト）を混入した低強度モルタルを提案する。現在、地下構造物の埋め戻し材や裏込め材として山砂が使用されている。しかし、山砂の採掘による自然破壊等が問題となってきた。山砂の代替材として低強度モルタルの利用を検討した。材料の物性は、流動挙動としてポンプ圧

送が可能であり、水中不分離性能を有し、充填材として利用するため体積収縮が少ないことが必要条件である。また、強度は再掘削を考慮し土の10倍程度を有する材料を開発することである。

2. 試験概要

2.1 使用材料と供試体の作製方法

使用材料を表-1に、フライアッシュの試験成績表を表-2、配合を表-3に示す。フライアッシュの品質は燃焼ボイラや石炭の種類の影響をうけるため、今回使用したフライアッシュは品質変動を抑えるため JIS A 6201 に規定されるⅡ種を用いた。また、水中不分離性を高めることを目的としてベントナイトを使用した。

表-1 使用材料

使用材料	記号	密度(g/cm ³)
普通ポルトランドセメント	C	3.14
フライアッシュ	F	2.19
ベントナイト(妙義)	B	2.50
一般水道水	W	1.00

表-2 本研究に使用したフライアッシュの物性

主成分(%)				密度	比表面積	強熱減量
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	(g/cm ³)	(cm ² /g)	(%)
69.78	18.86	2.79	0.87	2.19	4100	4.0

表-3 配合表(1m³当り)

配合	B / W	C / W	F / W	W / (C + F)	W (kg)	B (kg)	C (kg)	F (kg)
No.1	5%	10%	157%	60%	566	28	57	886
No.2			190%	50%	521	26	52	989
No.3			240%	40%	465	23	47	1117
No.4		15%	152%	60%	568	28	85	861
No.5			185%	50%	523	26	78	967
No.6			235%	40%	467	23	70	1097
No.7		20%	147%	60%	570	29	114	836
No.8			180%	50%	525	26	105	944
No.9			230%	40%	468	23	94	1077
No.10	10%	10%	144%	65%	578	58	58	831
No.11			172%	55%	538	54	54	925
No.12			212%	45%	490	49	49	1039
No.13		15%	139%	65%	580	58	87	806
No.14			167%	55%	540	54	81	901
No.15			207%	45%	491	49	74	1018
No.16		20%	134%	65%	583	58	117	780
No.17			162%	55%	542	54	108	877
No.18			202%	45%	493	49	99	997

注) B/W: ベントナイト水比

*近畿大学教授 理工学部社会環境工学科
(〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

**近畿大学大学院総合理工学研究科博士課程前期
課程

ベントナイトの種類は、水への分散が良好なものとして群馬産豊順ベントナイト（200 メッシュ）を使用した。

表-3 は、準備実験において、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準じてフロー試験を行い、その結果よりポンプ圧送に適した流動性として、フロー値 160 以上となる F/W を決定した配合を示す。試料の作成手順は、水とベントナイトをオムニミキサーで 60 秒攪拌し、続いてフライアッシュを入れ 30 秒間攪拌し、その後セメントを添加し 90 秒間攪拌することにより作成した。

2.2 試験手順

(1) フロー試験

流動化土の試験に使用される JHS A 313「エアモルタルおよびエアミルクの試験方法」に準じてフロー試験を行い、JIS 型のフロー試験との相関性を検討した。

(2) 水中不分離性試験

水中もしくは水分の多い泥水中への現場施工を考慮して、水中打設時における濁度、pH を測定した。試験方法は、30×50×16cm の水槽の中心にφ5×10cm の円柱型枠を設置した。試料をビニール袋に入れアクリルパイプを介して絞り出しながら、水中に置いた型枠に打設面から 5cm 離れた位置で圧入し水中打設を行った。型枠から上面 3cm 側面 3cm の一定の箇所から 1 分おきに 5 回 200cc の水を採取し、濁度センサー TE-30（笠原理化学工業株式会社製）、pH メーター D-22S（HORIBA 製）を用いて濁度と pH を測定した²⁾。

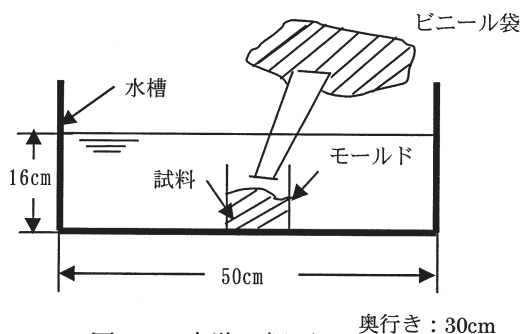


図-1 実験の概要

(3) ブリージング試験

水結合材比が極めて大きいため、材料分離を起こし易いと考えられる。そこで、JSCE-1986「プレパックド用コンクリートの注入モルタルのブリージング試験方法」に準じて行った。流動化土においてブリージング率の許容範囲が定められていないが、用途が同じスラリー状の埋め戻し材である CLSM（Controlled

low-strength materials）の基準値 3.0%を満たすことを確認した³⁾。

(4) 沈下量試験

単位水量の多い配合では打設後、試料の沈下が起こり易いと考えられる。試料沈下の試験方法はφ5×10cm の円柱供試体を作成し湿潤養生を行い、打設後 1 日おきに 6 日間沈下量を測定した。

(5) 一軸圧縮試験

JSF T 511-1990「土の一軸圧縮試験方法」に準じて円柱供試体を圧縮し、最大圧縮応力を求めた。打設後に水中養生を行い、材齢は 14、28、56、91 日として実施した。

(6) X線回折試験

測定試料は、使用材料と配合した混合系ならびにそれぞれの材齢 14、28、56 日供試体の一部を採取し測定した。特にセメントの水和反応で生成される Ca(OH)_2 とフライアッシュならびにベントナイトとの反応状態について検討した。作成した試料は、デシケータ内で乾燥させた後にメノウ乳鉢で 200 メッシュ以下に粉碎させた。これを X線回折装置 RINT2500 によって測定を行った。測定条件は X線 Cu K-ALPHA1 、管電圧 40kV、管電流 80mA、スキャンスピード $3^\circ/\text{min}$ 、スキャンスキップ 0.02° 、走査範囲 $3\sim90^\circ$ 、照射時間 0.4 秒とした。

3. 試験結果および考察

3.1 フロー試験

図-2、3 は、それぞれ B/W=5、10%に固定し、各配合の JIS 型、JHS 型のフロー試験の結果を示したものである。配合 No.1~3 において、フライアッシュが増加するにつれ、のフロー値の差が大きくなっている。これはフライアッシュの増加に伴って単位水量が低下したためと考えられる。さらに、ベントナイトの影響は、図-2、3 から添加量が多くなると、凝集作用により粘性が増加することを示している。

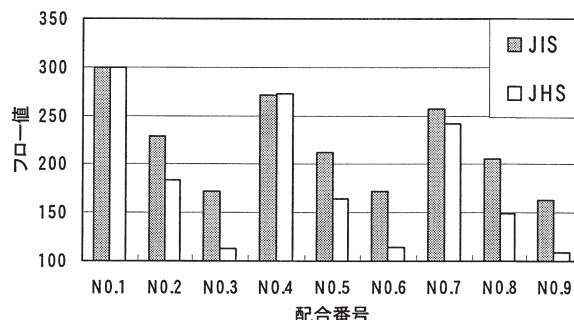


図-2 フロー値の比較 (B/W=5%)

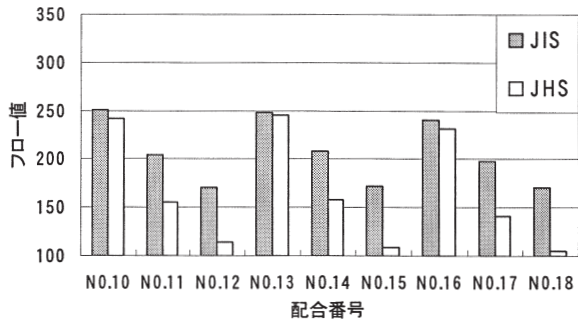


図-3 フロー値の比較(B/W=10%)

3.2 不分離性試験

濁度とpHの測定結果の一部を図-4～7に示す。すべての配合において、時間の経過とともに濁度・pHが減少傾向を示す。これは、ベントナイトの凝集作用により濁度が、緩衝作用によりpHが共に低下したものと考えられる。また、B/W=0%では、濁度 87.0、pH 9.74 となり、B/Wが高い配合は、濁度・pHが低いことから、ベントナイトにより水中での分離を抑制したものと考えられる。

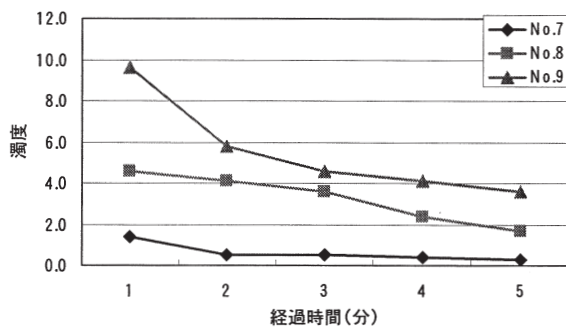


図-4 経過時間と濁度の関係

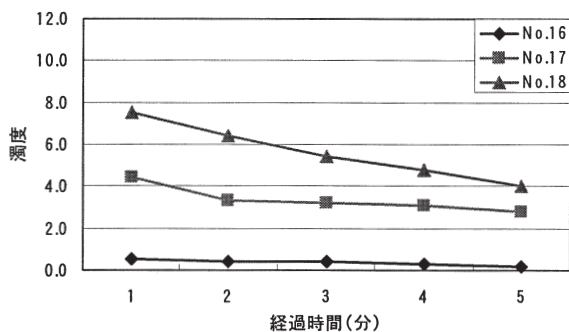


図-5 経過時間と濁度の関係

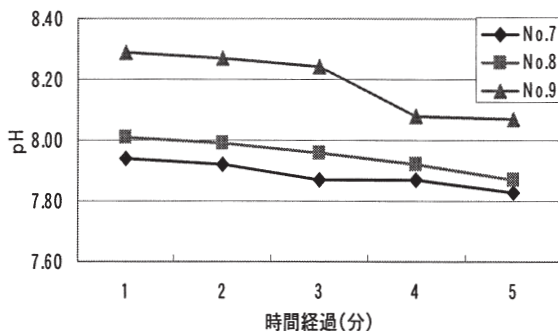


図-6 経過時間と pH の関係

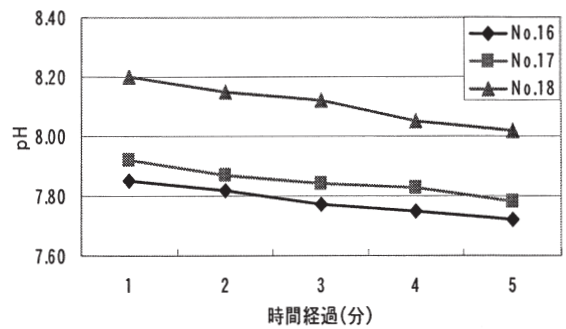


図-7 時間による pH の変化 (No. 16～No. 18)

3.3 ブリージング試験

ブリージング率の大きい配合の試験結果を図-8、9に示す。全配合において CLSM の基準値 3.0% を満たし、24 時間後においても 0.6～2.7% の値をとり、基準を満たす結果となった。ベントナイト混入率が增加するとブリージング率が低下する。これは、ベントナイトの凝集作用により混合系が網状組織化し、自由水を多量に含んだ状態でも水の分離を阻止したものと予測される。

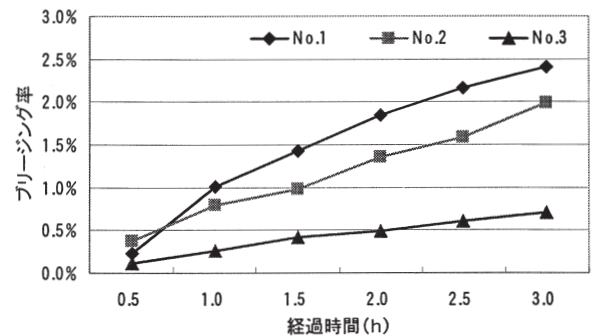


図-8 ブリージング率試験

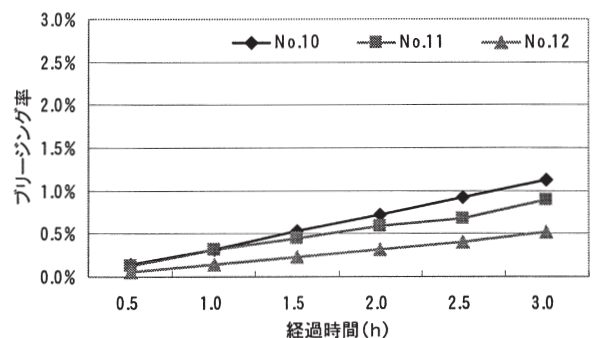


図-9 ブリージング率試験

3.4 沈下量試験

沈下量試験の結果のうち B/W=5、10%において沈下率の大きいものを図-10、11に示す。これらの結果から、沈下は3～4日経過すると収束する。これはセメントの水和反応による初期強度の発現のためと考えられる。ベントナイト混入率が增加すると沈下量が減少することから、ベントナイトの凝集作用による自由水の減少に起因するものと考

えられる。また、フライアッシュの混入率が増加するにつれ沈下率は減少している。これは単位水量の低下によるもので、沈下率への影響は配合に占める水の割合が重要な要素であることを示している。

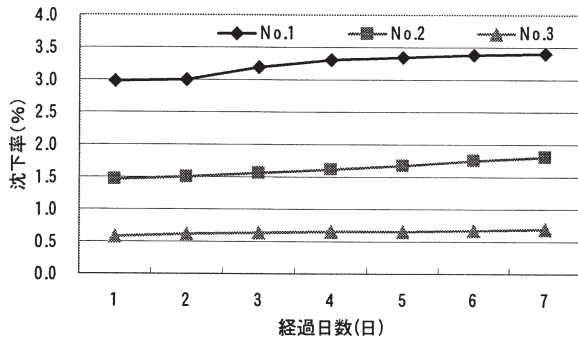


図-10 沈下率試験結果

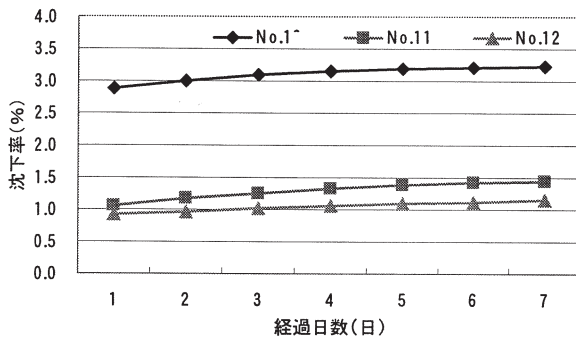


図-11 沈下率試験結果

3.5 一軸圧縮試験

北米で普及しているスラリー状の材料である CLSM の強度特性は、材齢 28 日において 8.3N/mm^2 程度である。これは、再掘削の必要性の無い捨てコン等に利用することを目的としている。本研究の低強度モルタルは国内では統一された品質規格や施工指針等が定まっていない。これらの材料は、施工後に再掘削される箇所への利用も可能としているため、工学的特性がほぼ同じである流動化土に関する技術マニュアルの基準値を参考とした。これは、バックホーで容易に掘削できる強度として材齢 28 日で $0.5\sim 1.0\text{N/mm}^2$ と記されている⁴⁾。圧縮試験結果を図-12～17 に示す。殆どの配合において、目標強度を達成できた。ポゾラン反応による強度発現は材齢 28 日目以降で現れており、フライアッシュによる強度増加が確認された。強度特性は、 C/W に正比例の関係を示し、さらにベントナイトは初期から長期にわたり、セメントの相互反応により水和反応を促進させるのに対し、フライアッシュは初期強度での影響は少ないが長期強度においては大きく影響をおよぼすと考えられる。

強度発現はセメントによる水和反応とフライアッシュおよびベントナイトのポゾラン反応によると考えられるので、セメント水比およびフライアッシュ混入率により強度を推定することもできると考えられる。材齢 56 および 91 日強度は、材齢 28 日の約 1.2 ～1.8 倍となりベントナイト混入率が上昇する程、強度が増加傾向を示す。しかし、単位セメント量が低い No. 1～3、No. 10～12 の配合では上昇率が低い値を示した。

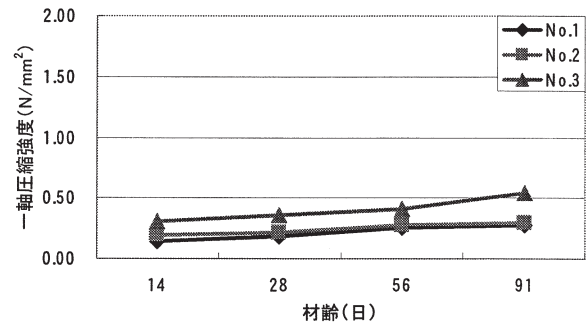


図-12 一軸圧縮強度

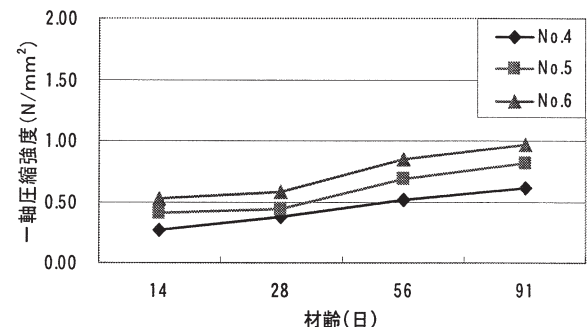


図-13 一軸圧縮強度

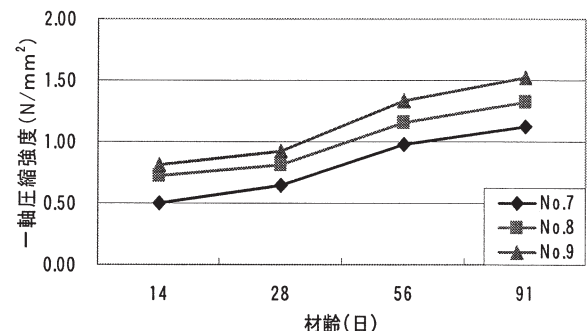


図-14 一軸圧縮強度

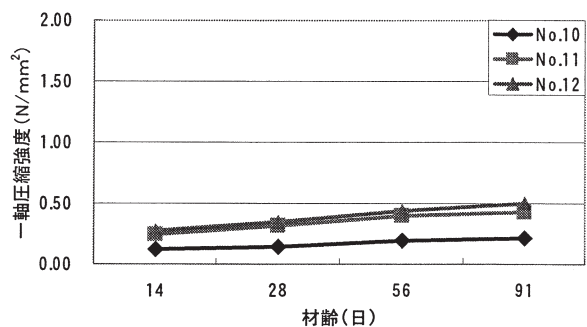


図-15 一軸圧縮強度

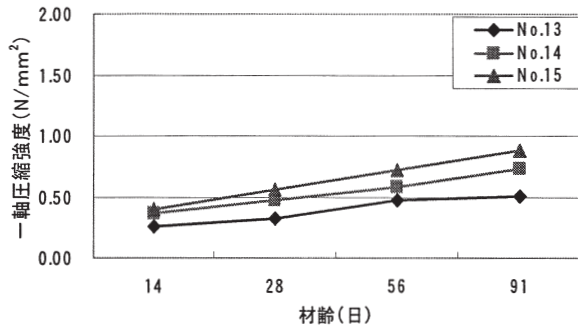


図-16 一軸圧縮強度

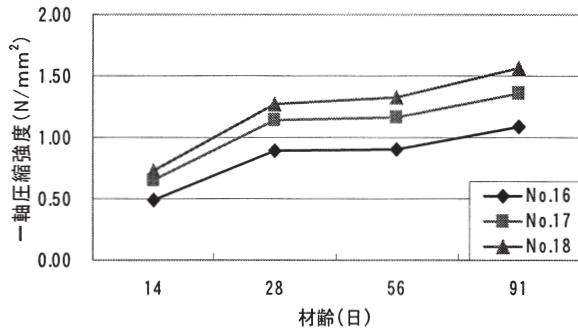
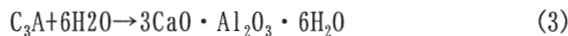
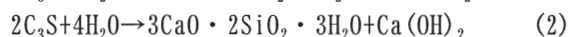
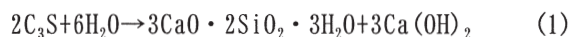


図-17 一軸圧縮強度

3.6 X線回折試験

使用材料と混合系の一部試料のX線回折試験結果を図-18～24に示す。また、グラフの縦軸を強度 (counts)、横軸を 2θ とした。フライアッシュとセメントの相互反応において、フライアッシュ中の SiO_2 や Al_2O_3 とポルトランドセメントの C_3S 、 C_2S の水和反応により生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応により、CSHgelやCAHgelを生成し、結晶化することで、強度増加につながるとされている。普通ポルトランドセメントの水和による生成物は一般的に次式によるものとされている。



(4)式中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は(1)(2)式で生成されたものが反応する。(1)～(4)式の反応において、大部分が水に不溶性の化合物であるが、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は可溶性の化合物である。これらの反応状態を明らかにするためX線回折の粉末試験法を用いて分析した。ポゾラン反応では、セメントの水和により生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と SiO_2 および Al_2O_3 が反応して、水に不溶性の安定なC-S-HおよびC-A-Hを生成する。そこでポゾラン反応に使われる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とQuartz(SiO_2)およびMullite($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$)について注目し、その増減を確認した。材齢14日以降では、C-S-H、C-A-Hの増加に伴い、Quartzと

Mulliteのピークが減衰している。この結果から、ポゾラン反応が進行していることを確認した。また、フライアッシュに含まれる SO_3 によりEttringiteやC-A-H系等が生成されるようである。

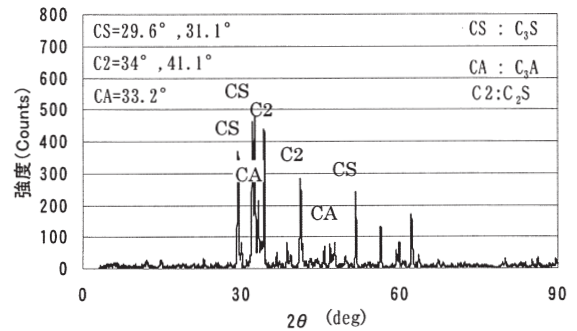


図-18 セメントのX線回折結果

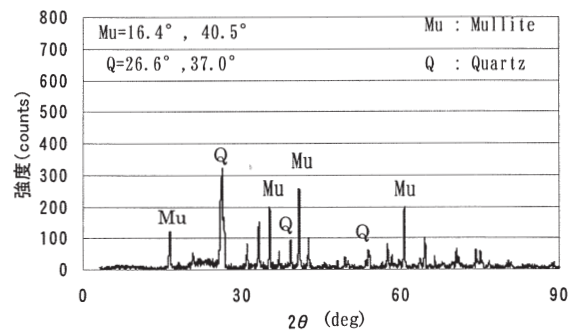


図-19 フライアッシュのX線回折結果

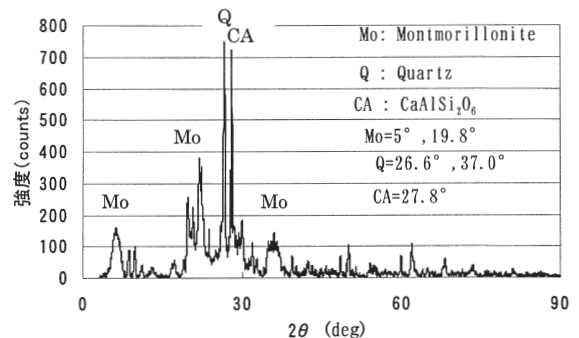


図-20 ベントナイトのX線回折結果

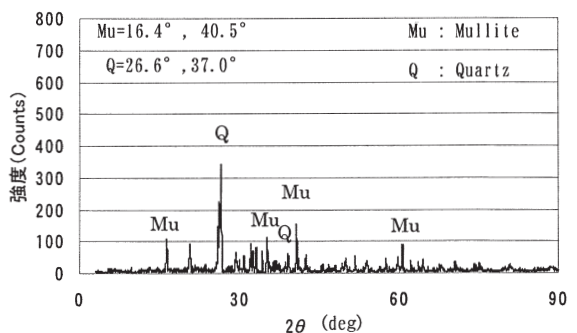


図-21 配合 No.10 の粉体混合物のX線回折結果

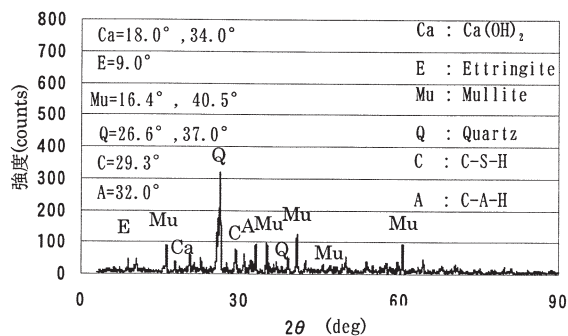


図-22 配合 No. 10 材齢 14 日の X 線回折結果

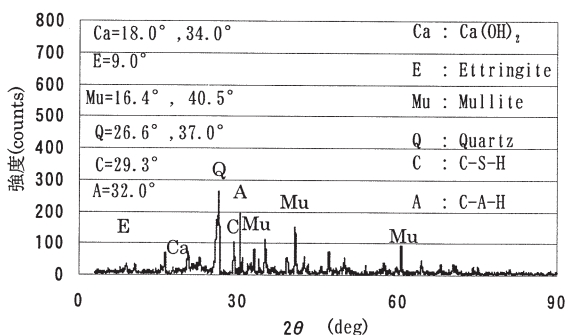


図-23 配合 No. 10 材齢 28 日の X 線回折結果

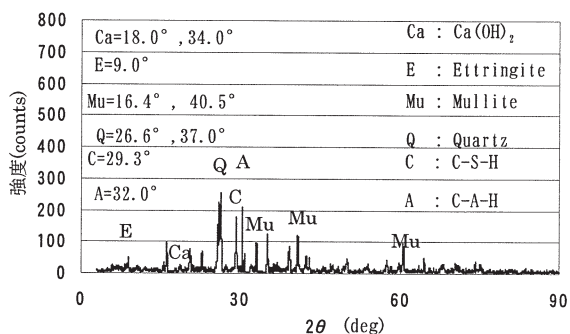


図-24 配合 No. 10 材齢 56 日の X 線回折結果

4. まとめ

本研究では資源循環型社会へ向けて、フライアッシュを大量に利用することを目的として、低強度モルタルの基礎的特性を検討し、次のことを明らかにした。

- (1) 流動挙動は、ベントナイトの凝集作用による粘性が増加することで流動性に影響を与える。
- (2) ベントナイトによる凝集作用により水中不分離性を向上することが確認できた。しかし、ベントナイトの増量は、その性能は向上する半面、流動性は低下するので施工箇所により調節する必要がある。
- (3) ブリージング率は、全配合において CLSM の基準値 3.0% を満たし良好であった。ブリージングは、ベントナイトやフライアッシュの増加により、抑制できると考えられる。
- (4) 沈下率は、単位水量の影響が大きいので、ブ

リージング率と同じようにベントナイト、フライアッシュの増加により制御が可能である。また、全ての配合で 3、4 日後には初期強度発現のため、極めて小さな値になった。

- (5) 水中不分離性は、ベントナイトを混入することで向上が可能である。
- (6) 強度特性において、C/W が 20% の配合で 28 日強度 0.5~1.0N/mm² の強度を示しており、目標値を満足する結果となった。C/W およびフライアッシュ混入率により強度を推定することができると考えられる。
- (7) 強度特性はセメントの水和反応によって生成される Ca(OH)₂ とフライアッシュおよびベントナイトによるポゾラン反応の影響が大きい事を確認した。しかし、単位セメント量が低いと Ca(OH)₂ の不足に伴いポゾラン反応が鈍くなるようである。
- (8) X 線回折試験により、C-S-H、C-A-H の増加に伴い、Quartz と Mullite のピークが減衰したことから、ポゾラン反応の進行を確認した。

本研究では品質を一定化するために JIS 型 II 種のフライアッシュを用いたが、今後使用するフライアッシュの品質の幅を広げることにより、更なる有効利用の拡大が図れると考えられる。

【謝辞】

本研究の一部は、建設資源リサイクル研究会の研究助成金によったものでありここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 新技術エネルギー小委員会:石炭灰有効利用分科会 報告書:「石炭灰有効利用技術についてー循環型社会を目指してー」(2003)
- 2) 宮崎良彦・湯怡新・落合英俊 他:セメント混合処理土の水中打設強度と水中施工に伴う海域への影響,九州大学工学集報,第74巻,第2号,pp.99-106(2001)
- 3) 水口洋・小野寺収・堀口敬・井伊博之:CLSMの国内における適応について,コンクリート工学 Vol.42, No.10, pp.19-27(2004)
- 4) 久野悟郎:土の流動化処理工法(技報堂出版株式会社 1997)
- 5) 北海道循環資源利用促進協議会建設資材部会 石炭灰利用技術マニュアル作成ワーキンググループ:地盤材料としての石炭灰利用技術マニュアル(2005)

(2006年2月21日受付 2006年3月8日受理)