

論文 フライアッシュを細骨材を補充する混和材として用いたコンクリートのポンプ圧送性能に関する研究

橋本 紳一郎^{*1}・橋本 親典^{*2}・石井 光裕^{*3}・加地 貴^{*4}

要旨: フライアッシュ(FA)を細骨材を補充する混和材として用いたコンクリートのポンプ圧送性能を明らかにするために, FA はⅡ種とⅣ種, セメントは普通ポルトランドと高炉B種を使用し, 合計7配合のコンクリートを生コン工場の実機プラントを用いて製造し, 実機ポンプを用いて圧送実験を行った。ポンプ圧送時の管内圧力データの経時変化から水平管とベント管の管内圧力損失, 圧力の脈動から乱れの程度を求めた。その結果, FA 混入コンクリートは無混入コンクリートと比較して, 水平管, ベント管ともに管内圧力損失は大きい, ベント管での圧力の乱れを抑制する効果があることが明らかになった。

キーワード: フライアッシュ, 圧送量, 管内圧力損失, 水平管, ベント管, 脈動, 変動係数

1. はじめに

近年, 国内の電力エネルギーは安定確保の観点から石炭火力発電所が多く建設されるようになり, それに伴い発電所から発生する副産物である石炭灰の発生量が飛躍的に増大することが予想されている。

現在, 発電所から発生される石炭灰は, 海域あるいは陸域で埋め立て処理されている。今後は, 石炭灰をコンクリート用材料として生コンクリートおよび2次製品に混入することで大量かつ安全なリサイクル資源として有効利用されることが望まれている。また, 研究の分野にも取り入れられ, 石炭灰を有効利用した施工例や研究も多く報告されている^{1),2)}。

一方, フライアッシュを混入したコンクリートのポンプ圧送に関する施工性の研究はあまりなされていない³⁾。日本建築学会や土木学会のポンプ施工やフライアッシュに関する各施工指針^{4),5)}にもフライアッシュコンクリートのポンプ圧送性能に関してはあまり言及されていない。

本研究は, フライアッシュ混入の有無がポンプ圧送時の管内圧力損失に与える影響を明らか

にするため, 実機ポンプを用いて圧送実験を行った。

実験には, 四国地方で多く使用されている高炉セメントB種と普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートにⅡ種フライアッシュおよびⅣ種フライアッシュを全細骨材容積に対して混入した。コンクリートの圧送量を10m³/hおよび50m³/hの2段階に変化させ, 管内圧力データの経時変化から水平管とベント管の管内圧力損失, さらに圧力の脈動から乱れの程度を比較・検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³, 比表面積:3340cm²/g)と高炉セメントB種(密度:3.04g/cm³, 比表面積:3700cm²/g)を使用した。

(2) フライアッシュおよび骨材

Ⅱ種フライアッシュ(密度:2.27g/cm³, 比表面積:3040cm²/g, 強熱減量:1.4%), Ⅳ種フライ

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 四国電力(株) 建設部 石炭灰有効活用拡大プロジェクトチーム主査 工博 (正会員)

*4 四国電力(株) 建設部 石炭灰有効活用拡大プロジェクトチーム 工修 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

配合種別	水結合材比 (%)	容積置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位量(Kg/m ³)							
				水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	混和剤(cc/m ³)		
									AE 減水剤	AE 剤(1)	AE 剤(2)
PB	55	0	45	147	268	0	849	1041	712	8	0
IV-10B		10	42	147	268	66	713	1099	712	47	0
IV-20B		20	37	158	288	114	545	1162	765	0	86
IV-30B		30	32	169	308	145	401	1226	819	0	231
II-20B		20	37	155	282	118	550	1170	749	0	85
PN		0	45	147	268	0	852	1047	712	4	0
IV-20N		20	37	161	293	114	542	1162	779	0	70

* AE 剤(1)：ロジン酸系，AE 剤(2)：アルキルカルボン酸系

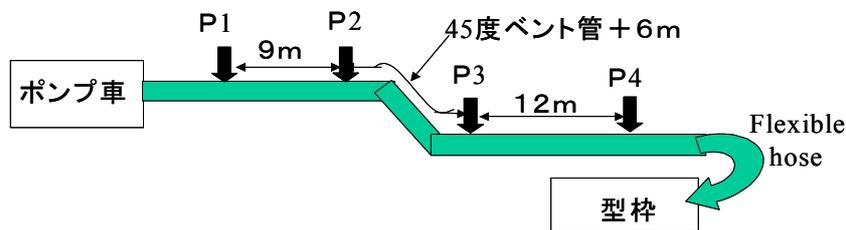


図-1 ポンプ圧送配管と小型圧力計の位置

アッシュ(密度:2.20g/cm³, 比表面積:1930cm²/g, 強熱減量:1.2%)は、四国電力橋湾発電所産を使用した。

骨材としては、細骨材は徳島県阿南市下大野町那賀川産玉石砕砂(密度:2.62g/cm³, F.M.:2.98),粗骨材は最大寸法25mmの徳島県阿南市下大野町那賀川産玉砕石(密度:2.63g/cm³, F.M.:6.85)を用いた。

(3) 混和剤

混和剤は、リグニンスルホン酸系のAE減水剤とロジン酸系またはアルキルカルボン酸系のAE剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合および製造

使用したコンクリートの配合を表-1に示す。なお、種類の「PB」は高炉セメントB種、「PN」は普通ポルトランドセメントを使用し、フライアッシュを用いていないコンクリートを意味する。「IV-10B」は高炉セメントB種を使用し、IV種フライアッシュを全細骨材容積に対して10%代替使用したものを意味する。「IV-20N」は普通ポルトランドセメントを使用し、IV種フ

ライアッシュを全細骨材容積に対して20%代替使用したものを意味する。その他の表記についても同様である。

コンクリートは、練混ぜてから60分間の攪拌後の荷卸し時に、スランプ8.0±2.5cm,空気量4.5±1.5%となるようロスを考慮し、練上がり時の目標スランプを10.0±2.5cm,目標空気量を5.0±1.5%とした。

コンクリートの練混ぜは、水平二軸強制練りミキサー(容量2000l)を用いて120秒間の練混ぜを行った。

2.3 配管位置および圧送方法

(1) 配管位置

本実験のポンプ圧送管の配置と圧送負荷を計測する小型圧力計の位置を示したのが図-1である。小型圧力計は、ポンプ車から型枠までの間にP1~P4の合計4点を取り付けた。

(2) 圧送方法

コンクリートは水平二軸強制練りミキサーで練り混ぜた後、現場施工に要する運搬時間を考慮し、ミキサー車で60分間攪拌したものを配管



写真-1 コンクリートの圧送状況

内に圧送した。実際のコンクリートをポンプ車から圧送している状況を写真-1に示す。

ポンプの圧送量はポンプ車で調節し、目標圧送量として、10m³/h および 50m³/h の2種類である。フライアッシュの影響でコンクリートの粘性が変化するため、実際に一定時間内に圧送された量は各圧送実験毎に異なる。実質圧送量は、打設時間と型枠への打設容積より求めた。

2.4 管内圧力の測定方法

ポンプの圧力負荷は、P1～P4の4つの小型圧力計により測定を行った。データは、動ひずみ計により計測時間間隔 0.05sec で処理を行った。

図-2は、一例として高炉セメントB種を使用し、IV種フライアッシュを全細骨材容積に対して30%代替した配合名:IV-30Bの圧力のデータを示す。図中の左側の脈動流は目標圧送量10m³/hの経過時間に伴う圧力の変化を示し、右側の脈動流は目標圧送量50m³/h時における圧力変化を示す。2種類の圧送量に対する個々の脈動1波毎に統計処理を行い、管内圧力損失を求めた。図-3に拡大した脈動1波を示す。

水平管の圧力損失は、図-3に示す水平管部P1～P2間とP3～P4間の圧力の経時変化から式(1)により求めた。

$$\Delta P_{\text{straight}} = \{(P1 - P2)/L1 + (P3 - P4)/L3\}/2 \quad (1)$$

L1 : P1 と P2 との間隔, L3 : P3 と P4 との間隔

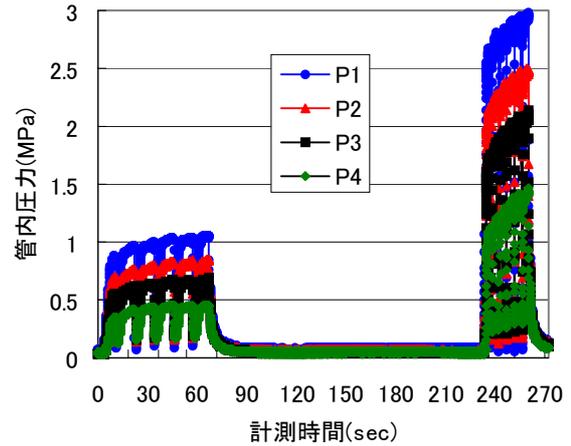


図-2 計測した全体のデータ

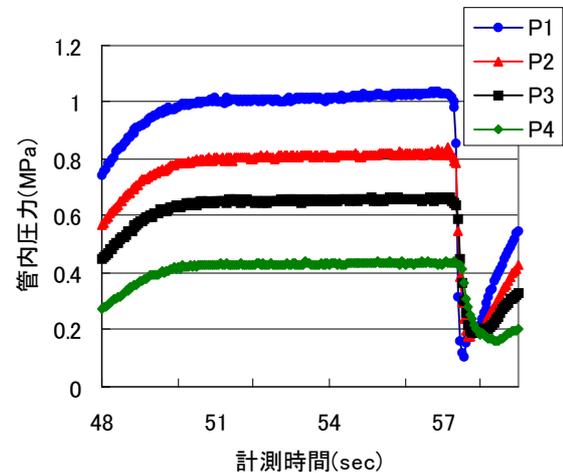


図-3 脈動1波のデータ

ただし、型枠の全容積の制限から、1回の圧送量に対して、6～7波程度の脈動しか得ることができない。よって、脈動が定常状態になるまえに圧送が終了してしまい、圧力が急激に変動する部分が存在する。圧力の急激な変動領域は削除し、脈動の比較的圧力が一定の山の部分を平均し、水平管1mあたりの圧力損失 $\Delta P_{\text{st.ave}}$ を求めた。

バント管(45度バント管の2本分)の圧力損失は、バント管部のP2～P3の圧力損失から、水平管部分の圧力損失を引くことによって式(2)により求めた。

$$\Delta P_{\text{bent}} = (P2 - P3) - \Delta P_{\text{straight}} \times L2 \quad (2)$$

L2 : P2 と P3 との間隔

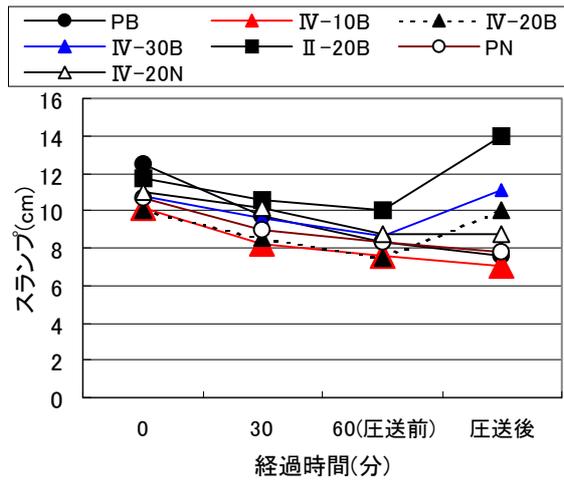


図-4 スランプの経時変化

ベント管の圧力損失は、水平管の圧力損失と同様に各計測時刻毎に求められるため、全てを平均してある圧送量に対するベント管 1m あたりの圧力損失 $\Delta P_{bent,ave}$ を求めた。

2.5 コンクリートのフレッシュ性状の測定

コンクリートは、練り上がり直後から所定の経過時間 {0 分, 30 分, 60 分(圧送前), 圧送後} において、スランプ試験 (JIS A 1101), 空気量試験 (JIS A 1128) およびコンクリートの温度測定を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

各コンクリートのスランプの経時変化を図-4 に示す。圧送前までのスランプ値は、経時変化とともに低下したが、いずれの配合も 8cm 前後の許容範囲内であった。以上から、実験に使用したコンクリートのスランプが圧送負荷に与える影響は無いものと考えられる。

圧送後のスランプ値は、配合名 : IV-20B, IV-30B, II-20B が増大した。これは、AE 減水剤の効果が遅かったことによる影響と考えられる。しかし、本実験では圧送時間は 30 秒程度で非常に短いため、遅延効果以外の原因も考えられる。この件に関しては、今後の検討課題としたい。

3.2 水平管とベント管の圧力損失

図-5 は本実験で得られた水平管の 1m 当た

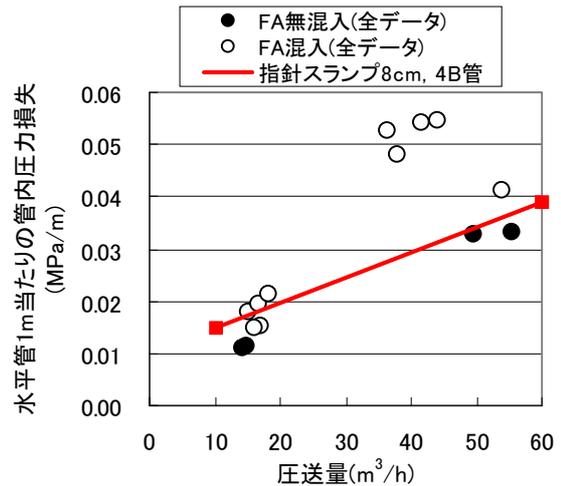


図-5 水平管1m当たりの管内圧力損失と圧送量の関係

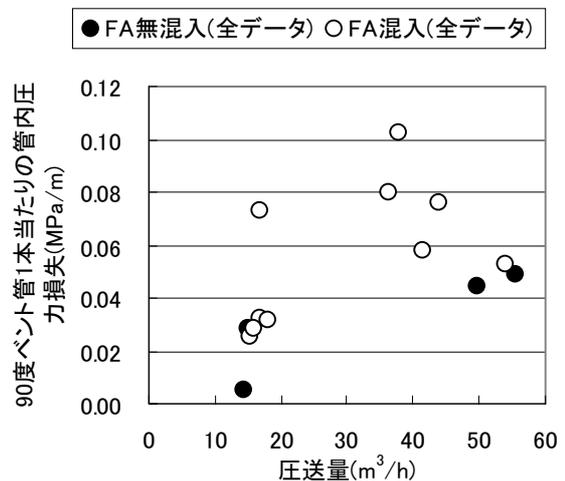


図-6 90度ベント管1本当たりの管内圧力損失と圧送量の関係

りの管内圧力損失の試験結果を示す。また、図中にコンクリートのポンプ施工指針⁴⁾で示されている普通コンクリートの圧送における水平管 1m 当たりの管内圧力損失の標準値も示す。図-6 は本実験で得られたベント管の管内圧力損失を示す。

水平管とベント管のいずれも圧送量が大きくなると、管内圧力損失が大きくなる傾向にある。また、フライアッシュ混入コンクリートの水平管 1m 当たりの圧力損失は、同一圧送量に対して、普通コンクリートの場合の約 2 倍程度である。これは、フライアッシュを混入したことにより粘性が高くなったためと考えられる。

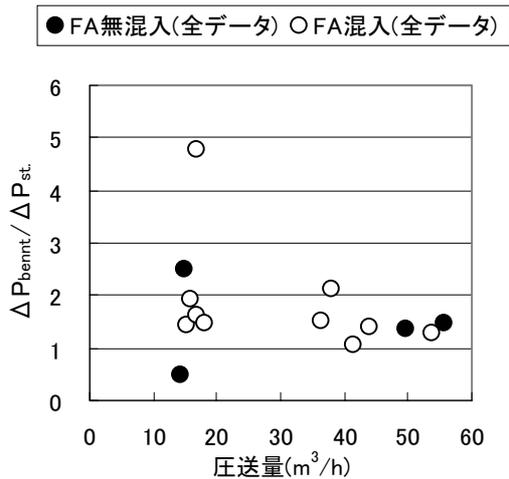


図-7 水平管とベント管の圧力損失比

図-7は、水平管とベント管の圧力損失比の関係を示す。水平管とベント管を比較した場合、ベント管 1m 当たりの管内圧力損失は最大でも水平管の 5 倍程度である。これは、ポンプ施工指針の 90 度ベント管 1 本当たりの水平換算長さは 6 倍 (6m) であることから、この値を満たしている。しかし、今回使用したベント管は、45 度ベント管を 2 つ逆方向に連結して 90 度ベント管に想定しているため、実際の 90 度ベント管では異なった値を示すことも考えられる。

3.3 フライアッシュ混入の影響

図-8は水平管における変動係数と 1m 当たりの管内圧力損失の関係を、図-9はベント管における変動係数と 1 本当たりの管内圧力損失の関係を示す。フライアッシュ有無の影響を検討するため、フライアッシュ置換率 20%のみを示す。

水平管に関しては、平均圧力損失の大きさに関係なく変動係数は、2~5%の範囲で一定であり、フライアッシュの置換の有無にほとんど影響を受けていない。これは、水平管は直管であるため、脈動流の変動そのものが小さく、コンクリートの種類による影響も小さかったためと考えられる。

一方、ベント管では、圧力損失が増大するに従い、変動係数が小さい傾向が認められる。フライアッシュを置換したコンクリートは、粘性が高いため圧力損失が大きくなるが、脈動流の

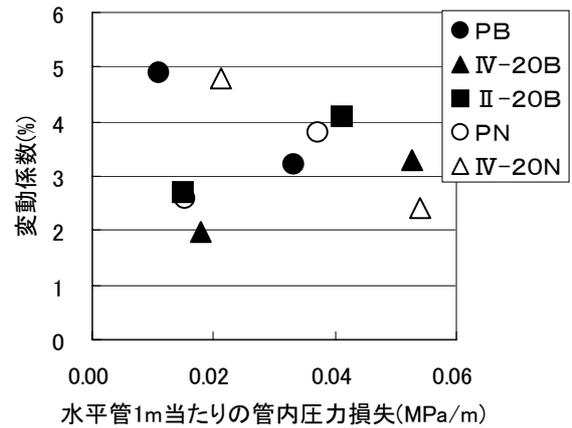


図-8 水平管1m当たりの管内圧力損失と変動係数の関係

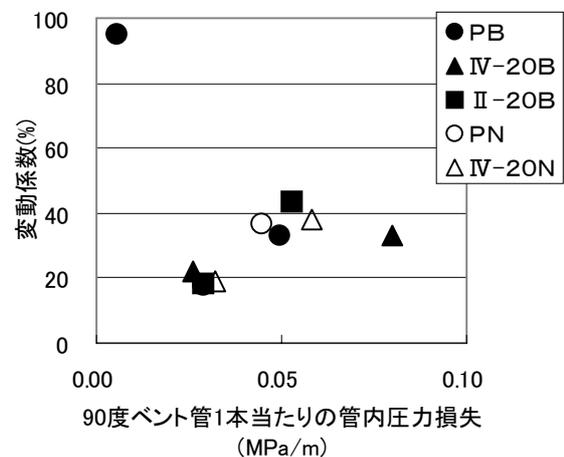


図-9 90度ベント管1本当たりの管内圧力損失と変動係数の関係

変動に対しては抑制効果があると考えられる。

なお、図-9における変動係数 100%付近のデータは、配合名: PBの低圧送量である。フライアッシュ無混入で低圧送量であったため、圧力損失自体が 0.001MPa 程度で非常に小さく、変動係数が非常に大きくなったものである。

3.4 フライアッシュの置換率の影響

図-10は水平管におけるIV種フライアッシュを全細骨材容積に対して30%まで代替した場合の変動係数と 1m 当たりの管内圧力損失の関係を示す。同様に図-11は、ベント管における場合を示す。

水平管では置換率の違いにより変動係数への

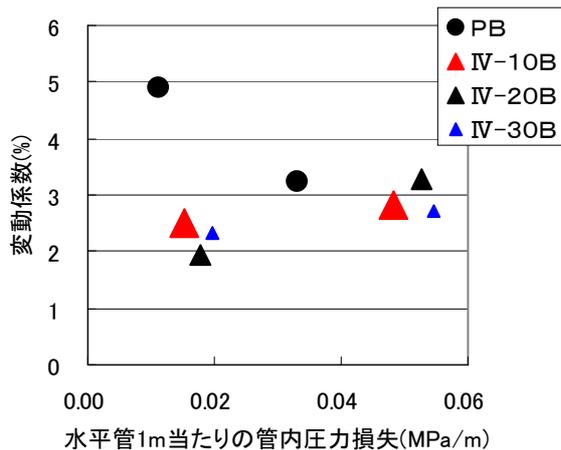


図-10 水平管1m当たりの管内圧力損失と変動係数の関係 (FAの置換率別)

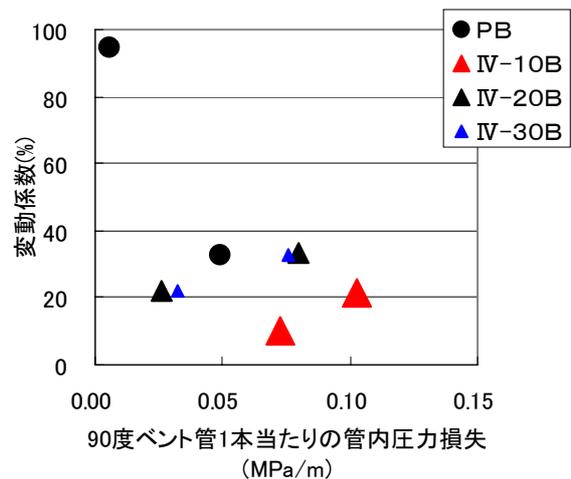


図-11 90度ベント管1本当たりの管内圧力損失と変動係数の関係 (FAの置換率別)

影響は無い。これに対し、ベント管では置換率の違いにより変動係数への影響が見られる。本実験の範囲では、10%置換した配合名：IV-10Bが最も変動係数に対する抑制効果大きい。

4. まとめ

本実験の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) フライアッシュ混入コンクリートの水平管1m当たりの圧力損失は、圧送量が増大するに従い、普通コンクリートの圧力損失の標準値よりも増加した。同一圧送量に対して、普通コンクリートの約2倍の圧力損失である。
- (2) フライアッシュ混入コンクリートのベント管1m当たりの圧力損失は、圧送量が増大するに従い、増大する傾向にある。ただし、ポンプ施工指針の90度ベント管1本当たりの水平換算長さ規準6倍よりも小さい。
- (3) フライアッシュ混入コンクリートは、粘性が高いため圧力損失が大きくなるが、脈動時の管内圧力の乱れを抑制する効果がある。この効果は、水平管よりベント管の場合、より顕著である。
- (4) 本実験の範囲内では、全細骨材容積に対してフライアッシュ10%置換が最も圧力の乱れに対する抑制効果が高い。

謝辞

本研究は土木学会四国支部の委員会活動の一環として行ったフィールド試験のデータを取りまとめたものであり、ご協力を頂いた河野委員長をはじめとする関係各位に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説, 1991
- 2) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), コンクリートライブラリー94, 1999.4
- 3) 山地功二, 橋本親典, 渡辺 健, 石丸啓輔：フライアッシュ混入コンクリートのポンプ圧送時の変形性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.129-134, 2002
- 4) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針(平成12年度版), コンクリートライブラリー100, 2000.2
- 5) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, 1994