

論文 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

山地 功二*¹・橋本 親典*²・渡辺 健*³・石丸 啓輔*⁴

要旨：普通コンクリートより粘性の大きいフライアッシュⅣ種混入コンクリートについて変形性評価試験方法を用いて定量的に評価し，ポンプ圧送性を実験的に検討したものである。本研究では，平均ポンプ油圧および油圧の変動係数による順調圧送の判定基準の有効性について調査した結果，平均ポンプ油圧 0.50MPa 以下，油圧の変動係数 15%以下と判断され，普通コンクリートの判断基準とは異なる。またフライアッシュⅣ種のコンクリートへの混入は，油圧の変動係数の低減に大幅に寄与し，管内閉塞を回避させる。

キーワード：フライアッシュⅣ種，変形性，テーパ管，ポンプ油圧，平均値，変動係数

1. はじめに

近年，安定した電力エネルギー確保の観点から埋蔵量の豊富な石炭による火力発電が各地で稼働運転している現状にある。中でも四国地域においては，徳島県橋湾に大規模石炭火力発電所が常時運転されている。それに伴い大量発生する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コンクリート2次製品に混入することが石炭灰有効利用の至急命題である。

一方，海砂採取規制により，粗粒率の大きい砕砂のみを使用することは，単位水量の増大，s/a の増加，さらにはポンプ施工性への悪影響が懸念されている。

筆者らは石炭灰のうちフライアッシュⅣ種を細骨材の一部に代替使用したコンクリートを生コンクリート工場で製造し，普通コンクリートと同程度のフレッシュ性状，良好な強度発現および耐久性，また斜めシュートおよびバケットによる現場施工において問題なく実施できることを確認している^{1), 2)}。

ポンプ圧送性能として変形管を流動するコンクリートの圧送状態は，「フレッシュコンクリートの変形性評価試験方法」によって，平均ポンプ油圧 P_{ave} (MPa) が 0.20MPa 以下でかつ油圧の変動係数 P_{var} (%) が 15%以下であれば，順調圧送であるとされている³⁾。しかし，フライアッシュⅣ種混入コンクリートの変形性に関する報告例は皆無に等しい。

本研究は，変形性評価試験方法を用い，普通コンクリートと比較して，フライアッシュⅣ種を細骨材容積の 10~20%置換した粘性の大きいコンクリートの変形抵抗性を定量的に評価し，普通コンクリートの順調圧送に関する平均ポンプ油圧と変動係数の判定基準のフライアッシュⅣ種混入コンクリートへの有効性について実験的検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント，骨材および混和剤

*1 日本興業(株)開発部 工修 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 徳島大学助手 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*4 徳島大学技官 工学部建設工学科 (正会員)

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）、細骨材は、香川県小豆島産砕砂（密度 2.61g/cm^3 、吸水率 0.81% 、F.M.2.75）、粗骨材は、徳島県市場町産砕石（最大寸法 20mm 、密度 2.58g/cm^3 、吸水率 1.70% 、粒径判定実績率 59.9% ）を用いた。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能減水剤および AE 助剤を使用した。

(2) フライアッシュIV種

細骨材の一部に代替使用したフライアッシュIV種（密度 2.20g/cm^3 、比表面積 $1870\text{cm}^2/\text{g}$ 、強熱減量 1.1% 、活性度指数 $28\text{day-}74\%$ 、 $91\text{day-}86\%$ ）は、四国の火力発電所産でI種フライアッシュ製造時に副産されたものを使用した。

2.2 コンクリートの配合

実験に使用したコンクリートの配合は、一般土木用コンクリート2次製品（主として道路製品）を対象とし、粗骨材の最大寸法 20mm 、水セメント比 45% で一定とした。細骨材率を 38 、 42 、 44.1 および 46% の4種類に変更し、コンクリート中の粗骨材とモルタルの容積比 V_g/V_m を変化させた。またフライアッシュIV種は全細骨材容積に対し、 0 、 10 および 20% 置換使用し、所要スランブおよび空気量は高性能減水剤および AE 助剤によって調整を行った。

なお、実験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。

2.3 試験方法

(1) フレッシュ性状に関する試験

フレッシュコンクリートのスランブと空気量は、スランブ試験（JIS A 1101）および空気量試験（JIS A 1128）に従い測定した。

(2) フレッシュコンクリートの変形性評価試験

フレッシュコンクリートの変形性評価試験方法³⁾に規定されているテーパ管を有する小型圧送試験装置（図-1）を用いて変形性評価試験を実施した。ピストンを引き込み、水平面から 9.2 度の仰角に設置し、シリンダ部およびテーパ管部にコンクリートを詰めた。ポンプ施工指針⁴⁾の試験方法では、仰角は 20 度であるが、本試験装置では、設置場所の設備条件から 9.2 度とした。ただし、 10 度程度の仰角の違いによる圧送中のポンプ油圧の経時変化に与える影響は小さく、無視できるものと判断される。また仰角 9.2 度でも十分コンクリートを管出口まで詰め、試験実施が可能である。コンクリートを圧送管に充てんした後、ピストンを 1.25cm/s の速度で圧送し、圧送状態、平均ポンプ油圧 P_{ave} (MPa) および油圧の変動係数 P_{var} (%) を図-2の式により求めた。なお土木学会規準「フレッシュコンクリートの変形抵抗性試験方法（案）」(JSCE-F 509-2000)³⁾に従い、圧送開始後および終了前 10 秒間は、油圧が不安定なため削

表-1 コンクリートの配合

FAIV種置換率 (%)	M.S (mm)	sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	粗骨材濃度 V_g/V_m (%)	水 W	セメント C	細骨材S		粗骨材G 2005	高性能減水剤 使用量 $C \times \%$	AE助剤 使用量 $C \times \%$
									砕砂	FAIV種			
							1.00	3.16	2.61	2.20	2.58		
0	20	規定せず	4.5 ±1.5	45	46.0	55.4	173	384	793	0	920	0.30	0.20
0						170	378	766	0	960	0.40	0.20	
10					44.1	59.2	170	378	689	65	960	0.50	0.30
20						170	378	613	129	960	0.60	0.40	
0					42.0	63.6	167	371	735	0	1003	0.40	0.30
20						167	371	588	124	1003	0.50	0.50	
0					38.0	73.0	161	358	675	0	1089	0.35	0.35
20						161	358	540	114	1089	0.45	0.60	

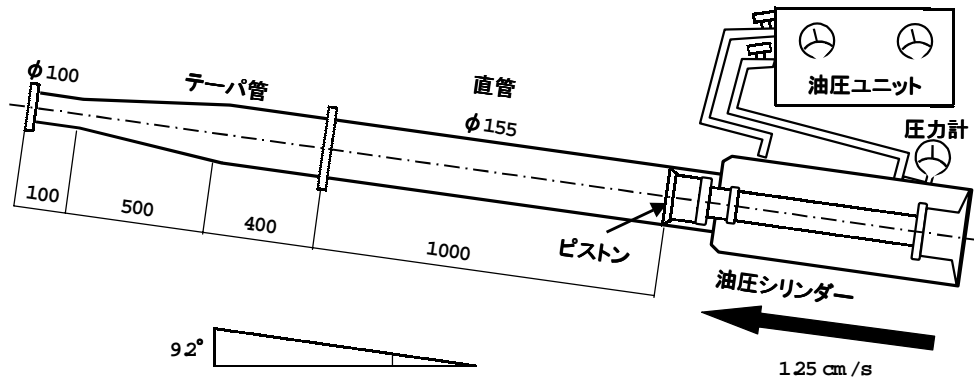
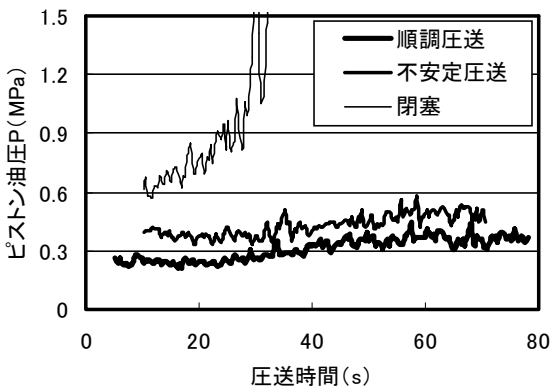


図-1 小型圧送試験装置

除することとする。圧送状態の判定は、ポンプ施工指針⁴⁾の参考指標編7.フレッシュコンクリートの変形性評価試験方法(案)の解説に記載されている判定基準に準じて行った。

なお本試験では、練混ぜ直後にスランプおよび空気量試験を行った後、圧送試験を実施した。その後経過時間に伴いスランプロスさせたコンクリートにおいて同様な圧送試験を行い、最終的にテーパ管内で閉塞が発生する時点まで繰り返し行った。



$$\text{圧力経時変化: } P(t) = P_1(t) - P_2(t)$$

$P_1(t)$: テーパ管ありの油圧

$P_2(t)$: テーパ管なしの油圧

$$\text{平均ポンプ油圧: } P_{ave} \text{ (MPa)} = \frac{\sum P(t)}{n}$$

$$\text{油圧の変動係数: } P_{var} \text{ (\%)} = \frac{\sigma_{P(t)}}{n} \times 100$$

n : 圧送時間 t の測定データ個数

$\sigma_{P(t)}$: 油圧の標準偏差

図-2 フライアッシュIV種置換率0%のピストン油圧の経時変化の一例

表-2 変形性評価試験結果

細骨材率 (%)	置換率 (%)	経過時間 (分)	実測スランプ (cm)	平均ポンプ油圧 P_{ave} (Mpa)	変動係数 P_{var} (%)	圧送状態
46	0	0	17.0	0.214	5.5	順調
		30	11.0	0.212	18.2	
		45	8.0	0.322	9.0	
44.1	0	0	16.0	0.307	18.2	順調
		30	10.5	0.349	15.6	不安定
		45	6.0	0.439	13.2	不安定
		0	17.0	0.296	25.6	順調
		30	10.0	0.322	7.8	不安定
		45	8.5	0.358	10.9	閉塞
	10	60	6.0	0.453	36.0	閉塞
		80	4.0	-	-	閉塞
		0	22.0	0.146	13.0	順調
		30	15.0	0.221	16.4	閉塞
		45	7.0	0.579	26.7	閉塞
		0	21.5	0.203	6.2	順調
20	30	16.0	0.137	16.2	不安定	
	45	8.5	0.429	12.5	不安定	
	60	5.0	0.491	11.1	不安定	
	0	19.5	0.241	23.4	順調	
	30	7.5	0.256	28.0	不安定	
	45	6.0	0.829	30.4	閉塞	
42	0	0	13.0	0.219	47.3	閉塞直前
		30	9.0	0.406	23.0	不安定
		0	19.0	0.271	22.4	順調
	20	30	10.0	0.447	9.3	不安定
		45	8.0	0.503	14.1	不安定
		60	6.5	0.590	12.0	不安定
38	0	0	11.5	0.335	38.7	閉塞直前
		30	6.5	0.398	18.7	不安定
		35	6.5	0.561	26.7	閉塞
	20	0	12.0	0.367	6.4	順調
		30	8.0	0.360	21.8	不安定
		45	6.0	0.466	10.4	不安定

3. 実験結果および考察

変形性評価試験結果を細骨材率およびフライアッシュIV種置換率による配合要因と実測スランプ値の結果と合わせて表-2に示す。なお、閉塞した実験データのうち、閉塞が圧送開始後30秒以降で発生した場合は、ポンプ油圧1.0MPa以下の範囲で平均ポンプ油圧と変動係数を算出し、以下の考察では順調圧送や不安定圧送と同様に取り扱った。

3.1 フライアッシュIV種無混入の普通コンクリートの変形性評価

フライアッシュIV種無混入の場合における、各細骨材率による平均ポンプ油圧と油圧の変動

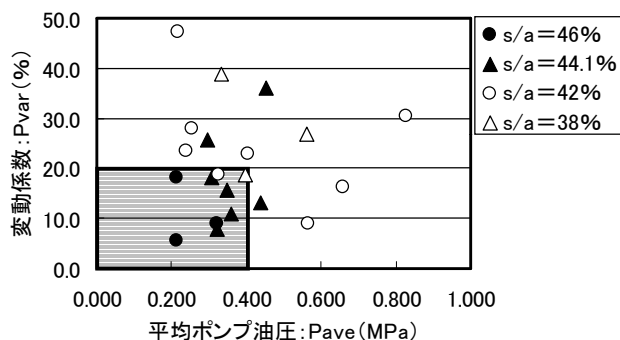


図-3 平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係

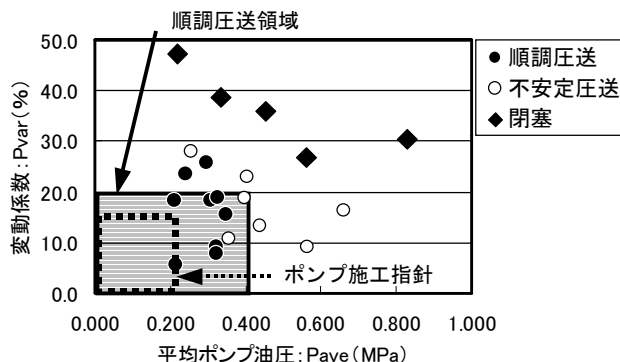


図-4 各圧送状態による平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係

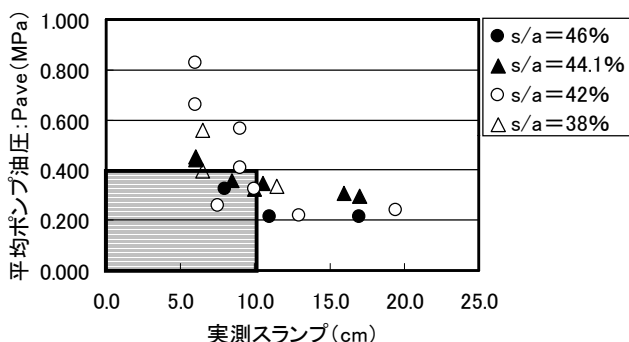


図-5 各細骨材率による実測スランプと平均ポンプ油圧との関係

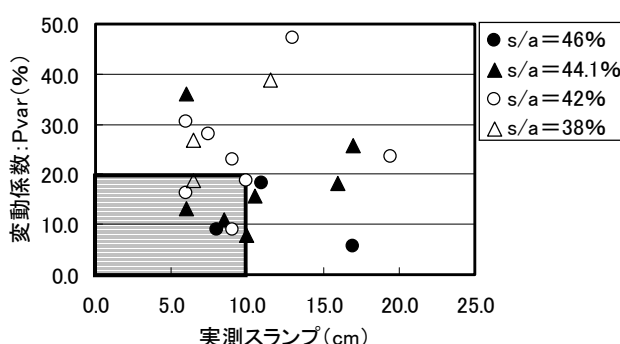


図-6 各細骨材率による実測スランプと油圧の変動係数との関係

係数との関係を図-3, 圧送状態による平均ポンプ油圧と変動係数との関係を図-4に示す。圧送状態において順調圧送の限界領域は、本実験では、平均ポンプ油圧が 0.40MPa, 油圧の変動係数は 20%程度が妥当と判断されるが、施工指針の判定基準(平均ポンプ油圧 0.20MPa 以下, 油圧の変動係数 15%以下)⁴⁾の領域外となる。これはポンプ施工指針⁴⁾の参考の試験条件と比較して骨材、特に細骨材が川砂から砕砂を用いるようになり、変形管を流動する際の管内圧力やその乱れが大きくなったためと思われる。またテーパ管と直管の連結部内壁の仕上げ面等による試験装置自体の影響と思われる。

各細骨材率による実測スランプと平均ポンプ油圧との関係を図-5に示す。スランプが低下するに従い、平均ポンプ油圧が増大する傾向にある。特にスランプが 10cm 以下になると急激に平均ポンプ油圧が大となり、不安定および閉塞領域となる。また図-5より、閉塞領域にお

ける限界スランプは 5.0cm 程度であると判断することができる。

図-6に各細骨材率による実測スランプと油圧の変動係数との関係を示す。図-5の平均ポンプ油圧と異なり、スランプの大小に関わらず、油圧の変動係数はばらつく傾向にある。

3.2 フライアッシュIV種混入コンクリートの変形性評価

細骨材率 44.1%の平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係を図-7, 実測スランプと油圧の変動係数との関係を図-8に示す。細骨材率 44.1%では、フライアッシュIV種無混入の普通コンクリートと比較して、フライアッシュIV種を混入することにより、平均ポンプ油圧の大小に関わらず、油圧の変動係数は小さくなる。またその傾向は、置換率が増加するにつれてより顕著となり、フライアッシュIV種微粉末が変動係数の低減に多大に寄与し、順調圧送領域を拡大しているものと思われる。また普通コンクリ

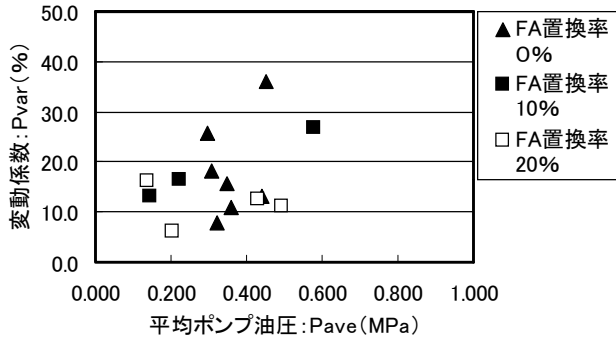


図-7 細骨材率 44.1%の平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係

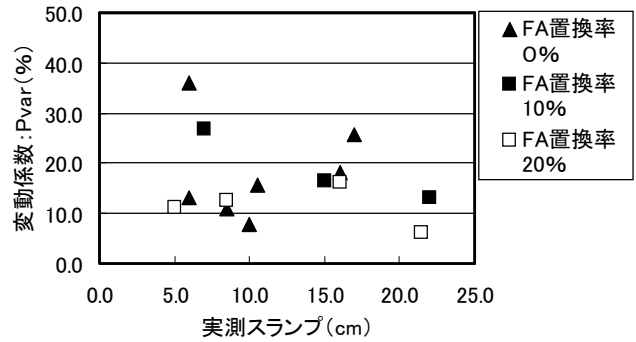


図-8 細骨材率 44.1%の実測スランプと油圧の変動係数との関係

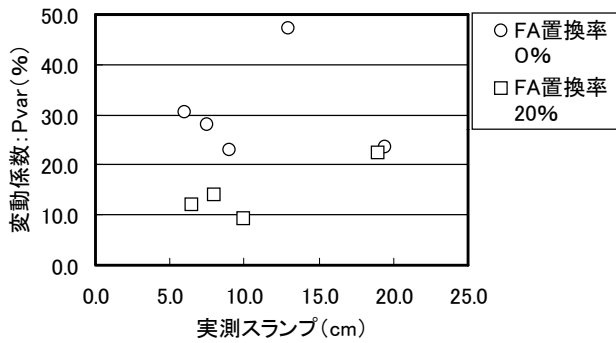


図-10 細骨材率 42%の実測スランプと油圧の変動係数との関係

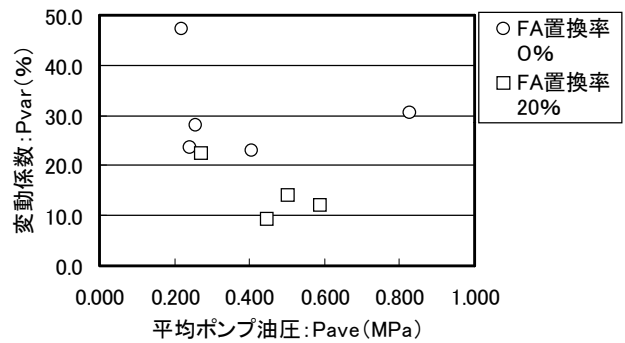


図-9 細骨材率 42%の平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係

ートはスランプが小さくなるにつれて油圧の変動係数がばらつく傾向にあるが、フライアッシュIV種置換率 20%のコンクリートは、管内閉塞しない限り、軟から硬までの広範囲なスランプのコンクリートを連続的に吐出口から排出し、油圧の変動係数が小さい状態にする。

細骨材率 42%の平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係を図-9、実測スランプと油圧の変動係数との関係を図-10に示す。細骨材率 42%では、順調および不安定圧送領域が狭くなっている普通コンクリートに比べ、フライアッシュIV種混入コンクリートは、20%置換することにより、油圧の変動係数を大幅に小さくすることができる。平均ポンプ油圧については粗骨材濃度がやや高いため、幾分大きな値を示しているが、管内閉塞は確認されず、変形抵抗性が向上していることを示していると思われる。

図-11に細骨材率 38%の平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係、図-12に実測スラン

プと油圧の変動係数との関係を示す。細骨材率 38%、粗骨材濃度 73%の普通コンクリートにおいては、表-2に示すとおり、スランプに関係なく管内閉塞を誘発させる粗骨材濃度であり閉塞しやすい配合である。一方、フライアッシュIV種を 20%混入したコンクリートは、スランプが最小 6.0cm まで低下しても管内閉塞せず、変動係数も最大 20%程度であり、ある程度良好なポンプ圧送性能を示す傾向にある。

したがって、コンクリート中の粗骨材濃度が小さい配合になるにつれて、フライアッシュIV種混入コンクリートをポンプ圧送施工することによる効果は、平均ポンプ油圧増大の緩和、油圧の変動係数の低減等が考えられる。それに伴い、圧送領域が拡大し、管内閉塞を回避できるものと判断できる。

フライアッシュIV種混入コンクリートの平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係を図-13に示す。順調圧送の判定基準においてフライ

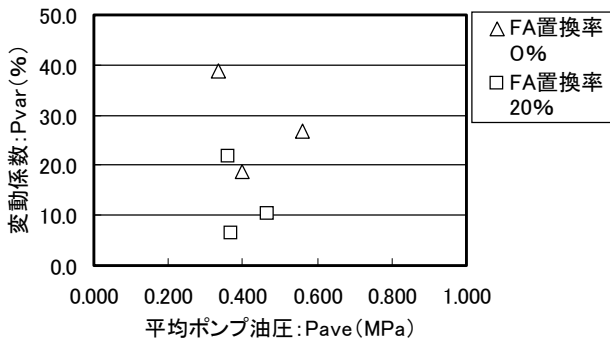


図-11 細骨材率 38%の平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係

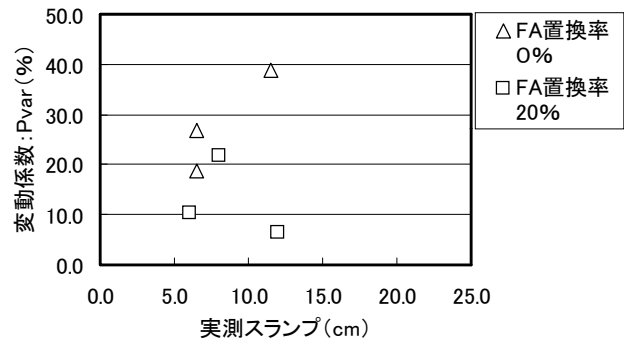


図-12 細骨材率 38%の実測スランプと油圧の変動係数との関係

アッシュIV種混入コンクリートは、平均ポンプ油圧が 0.50MPa 以下、油圧の変動係数は 15% 以下と判断される。順調圧送領域が普通コンクリートより広く、平均ポンプ油圧が大きくなるにも関わらず、その変動係数が小さく、かつ連続的にコンクリートが排出される状態となる。

4. まとめ

フライアッシュIV種混入コンクリートの変形性を評価するために、フライアッシュIV種を混入したフレッシュコンクリートの変形性評価試験を実施し、検討を行った。

本実験で得られた結果を、以下に報告する。

- (1) 普通コンクリートの順調圧送の限界領域として平均ポンプ油圧 0.40MPa、油圧の変動係数 20%が妥当と判断される。
- (2) 細骨材率が小さい（粗骨材濃度大）場合、平均ポンプ油圧は幾分大きくなるものの普通コンクリートより小さい。また油圧の変動係数を低減させる効果があり、管内閉塞を回避させることができる。
- (3) フライアッシュIV種混入コンクリートは普通コンクリートより、順調および不安定圧送領域が広く、平均ポンプ油圧は大きい、その変動係数が小さく、かつ連続的にコンクリートが排出される状態となる。
- (4) フライアッシュIV種混入コンクリートの順調圧送の判定基準は、平均ポンプ油圧 0.50MPa 以下、油圧の変動係数 15%以下と

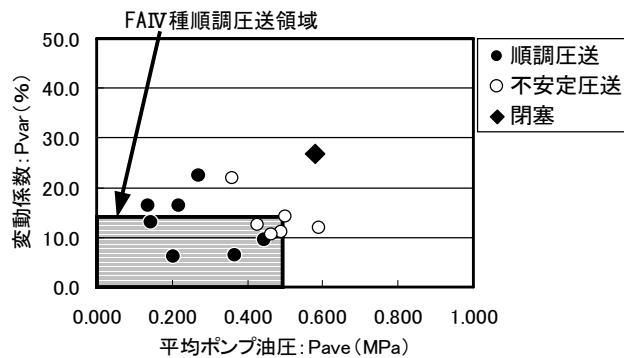


図-13 フライアッシュIV種混入コンクリートの平均ポンプ油圧と変動係数との関係

判断される。

参考文献

- 1) 山地功二, 橋本親典, 水口裕之, 石丸啓輔: III種およびIV種フライアッシュの性状がコンクリートの諸性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.103~108, 2000.6
- 2) 石丸啓輔, 橋本親典, 山地功二, 三岩敬孝: 実機プラントで製造したFAIV種混入コンクリートのフレッシュ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.181~186, 2001.6
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書(規準編)【2002年制定】, 2002.3
- 4) 土木学会: コンクリートのポンプ施工指針(平成12年版), コンクリートライブラリー100, 2000.2