

論文 脈動を発生させた変形性評価試験方法に関する基礎研究

山地 功二^{*1}・栗田 工^{*2}・橋本 親典^{*3}・加地 貴^{*4}

要旨：本研究では、脈動による分離抵抗性を含んだ試験方法の確立を目的として、変形性試験に用いる小型ポンプ圧送試験装置に脈動発生装置を付加し、普通コンクリートとフライアッシュ混入コンクリートについて、脈動を発生させた変形性試験を行った。その結果、小型ポンプ圧送試験装置のピストンの可動と停止を制御することで、実際のポンプ圧送で生じるような脈動波を発生させることが可能であった。また、実際のポンプ圧送による圧力損失と比較して、脈動を発生させた変形性試験の圧力損失は、普通コンクリートに対しては大きい、粘性の高いコンクリートに対しては小さく、変形性試験の結果は危険側となった。

キーワード：変形性、脈動、平均ポンプ油圧、変動係数、フライアッシュ、管内圧力損失

1. はじめに

ポンプ施工指針¹⁾では、圧送条件の検討として、コンクリートポンプにかかる圧送負荷ならびに管内閉塞に対する安全度の2つの条件を考慮する必要があると記述されている。このうちコンクリートポンプにかかる圧送負荷については照査および検査の方法が確立されている。管内閉塞に対する安全度については、実際に圧送するコンクリートを用いて、圧送現場を想定した試験圧送を実施し、閉塞発生の有無を確認することが最も信頼できる。しかし、現場実験は、費用、期間および現場の条件などの制約で実施可能とは限らない。このため簡易な試験方法として、加圧ブリーディング試験と変形性評価試験方法が提案されている。

コンクリートを適切にポンプ圧送するためには、(1)管壁でコンクリートが滑動するための流動性、(2)管内のコンクリートが形状変化できる変形性および(3)圧力の時間的、位置的変動に耐える分離抵抗性の3つの性質が必要である。上述した加圧ブリーディング試験と変形性評価試験方法は、(1)の流動性と(2)の変形性を評価する

試験方法である。これに対して(3)の分離抵抗性は、脈動流の特性が把握されていないため、評価試験方法は未だに提案されていない。しかし、これら3つの性質は互いに独立しているのではなく、微妙に影響している性質のため、(1)の流動性と(2)の変形性が把握できれば、(3)の分離抵抗性もある程度予測可能といえる。

本研究は、脈動による分離抵抗性を含んだ試験方法の確立を目的として、変形性試験に用いる小型ポンプ圧送試験装置に脈動発生装置を付加し、脈動を発生させたコンクリートの室内流動実験を行った。実験に供したコンクリートは、一般的な生コン工場で製造される普通コンクリートのほかに、環境問題やポンプ圧送時の圧力変動を抑制し変形性の改善に有効とされているフライアッシュIV種を細骨材として混入したコンクリート²⁾と高流動コンクリートを取り扱った。また、脈動を発生させた変形性試験のテーパ管吐出位置の管内圧力損失と著者らが行った実機ポンプによる現場圧送実験結果³⁾の水平管の管内圧力損失の比に関する相似性を検討した。

*1 日本興業（株） 開発部 工修（正会員）

*2 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

*3 徳島大学 工学部建設工学科教授 工博（正会員）

*4 （株）四国総合研究所 土木技術部 工修（正会員）

表-1 コンクリートの配合（普通およびフライアッシュIV種混入コンクリート）

種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	フライアッシュ容積置換率 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
							水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤			
							W	C	F	S1	S2	G	A1	A2	A3
N18	25	18±2	4.5±1.5	53	0	49	173	327	0	608	255	908	4.17	0	1.14
N 8		8±2					173	327	0	608	255	908	4.17	0	1.14
F18		18±2			30	41	188	354	172	490	0	1010	0	4.60	3.54
F 8		8±2					188	354	172	490	0	1010	0	3.54	3.89

注) 容積置換率は細骨材全容積に対するフライアッシュの容積割合, Fはフライアッシュ, S1は最大寸法5.0mmの砂, S2は最大寸法2.5mmの砂, A1はAE減水剤, A2は高性能AE減水剤およびA3はAE剤を示す。また配合N8は, N18の経時変化にて作製した。

表-2 コンクリートの配合（フライアッシュIV種混入高流動コンクリート）

種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	自己充填性ランク	スランプフロー (cm)	V漏斗硫化時間 (秒)	空気量 (%)	W/C (%)	フライアッシュ容積置換率 (%)	水粉体容積比 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
										水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤	
										W	C	F	S1	G	A2	A3
高	25	2	65±5	7~13	4.5±1.5	49	30	92.2	48	175	350	170	742	807	7.18	3.86

注) 水粉体容積比では, 粉体とは, セメント (普通) とフライアッシュを合計したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用したセメントは, 高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm³) である。細骨材として使用したフライアッシュIV種 (密度 2.15g/cm³, 比表面積 1560cm²/g, 強熱減量 1.2%) は, 四国電力の橘湾石炭火力発電所産のものを使用した。細骨材は, 徳島県阿南市下大野町那賀川産玉石砕砂 (最大寸法 5.0mm, 表乾密度 2.62g/cm³, 吸水率 1.29%, F.M.2.80) と愛媛県越智郡伯方町産砕砂 (最大寸法 2.5mm, 表乾密度 2.57g/cm³, 吸水率 1.94%, F.M.1.90) を用いた。粗骨材は, 徳島県阿南市下大野町那賀川産玉石砕石 (最大寸法 25mm, 表乾密度 2.63g/cm³, 吸水率 0.90%, 実積率 62.0%) を用いた。混和剤には, リグニンスルホン酸系の AE 減水剤, ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤およびロジン酸系の AE 剤を使用した。

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を表-1 および表-2 に示す。フライアッシュIV種と最大寸法 2.5mm の砂は, 細骨材の全容積に対して 30%使用した。

本実験で圧送したコンクリートは, 普通コンクリートとフライアッシュIV種を細骨材に使用

したコンクリートおよび高流動コンクリートの 3 種類である。普通コンクリートとフライアッシュIV種を細骨材に使用したコンクリートは, 粗骨材の最大寸法 25mm, 空気量 4.5±1.5%, 水セメント比 53%で一定として, それぞれにスランプが 18±2cm, 8±2cm と変化させた 2 種類を作製した。高流動コンクリートでは, フライアッシュIV種を細骨材に使用し, 普通コンクリートと同様に粗骨材の最大寸法 25mm, 空気量 4.5±1.5%, 水セメント比 49%としたスランプフローが 65±5cm となるランク 2 の高流動コンクリートを作製した。なお, 所要のスランプおよびスランプフローと空気量は混和剤にて調整した。

2.3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜには, 水平二軸強制練りミキサ (公称容量 50 リットル) を使用した。

練混ぜ方法は, 水と混和剤を除く全材料を投入し 30 秒間空練りを行い, あらかじめ混和剤を混入した水を加え 90 秒間練り混ぜた。高流動コンクリートでは, 水を投入後 5 分間練り混ぜた。

実験では, ミキサ容量の制限から, 35 リットルずつ 2 バッチ練り混ぜた。

2.4 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プ, スラン

プフローおよび空気量は、スランプ試験(JIS A 1101)、スランプフロー試験 (JIS A 1150) および空気量試験(JIS A 1128, JSCE-F 513)に従い測定した。高流動コンクリートは、充てん装置を用いた間げき通過性試験 (JSCE-F 511) において、障害 R2 の流動障害を、漏斗を用いた流下試験 (JSCE-F 512) においては、V 漏斗を使用して、練混ぜ直後の流下時間を測定した。

(2) 変形性評価試験方法

フレッシュコンクリートの変形性試験(JSCE-F 509) は、規定¹⁾されているテーパ管を有する小型圧送試験装置を用いて、仰角 9.2 度、ピストン速度 1.25cm/s で実施し、圧送状態、平均ポンプ油圧および油圧の変動係数を測定した。実験では、ピストンと管壁との摩擦およびコンクリートの自重による影響を排除するため、直管先端にテーパ管を取り付けた場合の油圧 (P1) と直管のみの場合の油圧 (P2) を差し引いてテーパ管部の油圧 (P1-P2) とした (図-1)。油圧は、動ひずみ計を用いて 0.1 秒間隔で測定したが、圧送開始後と終了前の 10 秒間は油圧が不安定なため削除した。なお、仰角は通常 20 度であるが、本試験では、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込むことができ、試験実施が可能である。

高流動コンクリートでは、テーパ管先端で自由表面が存在する開水路流れとなる。そこで、直管およびテーパ管先端においてコンクリートが管水路流れになるように、テーパ管の先端には、90 度ベント管 (呼び径 100A, 曲率半径 0.3m) を 45 度に傾けて取り付けた。また、直管の先端には、JIS A 1101 に規定されたスランプコーンを取り付けた。

(3) 脈動を発生させた変形性評価試験方法

脈動を発生させた変形性試験は、油圧ユニットに脈動発生装置を取り付け、通常の変形性試験と同様な方法で行った (図-2)。通常の変形

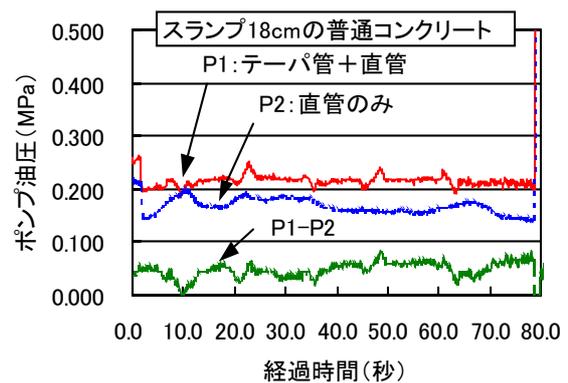


図-1 通常の変形性試験によるポンプ油圧の経時変化

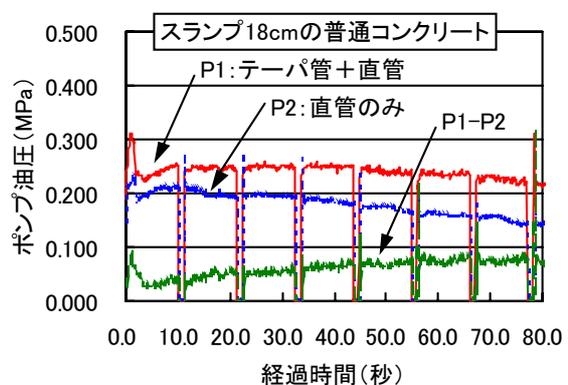


図-2 脈動を発生させた変形性試験によるポンプ油圧の経時変化

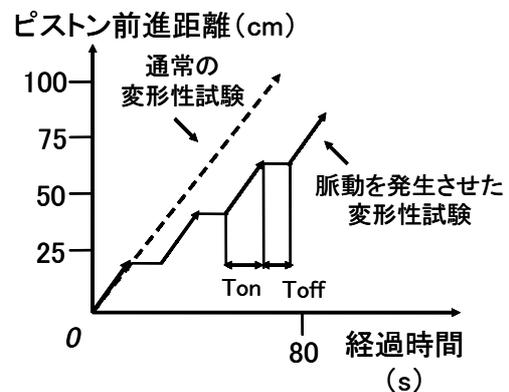


図-3 前進距離と経過時間の関係

性評価試験の場合と脈動発生装置を使った場合のピストン前進距離と経過時間の違いを図-3に示す。

本実験で取り付けた脈動発生装置は、ピストンの押し引きのスイッチングの ON, OFF を電氣的に制御することによって、ピストンを断続的に前進させることが可能で、ピストン可動時間間隔 Ton とピストン停止時間間隔 Toff を、1/100

秒単位で任意に設定することができる。実験では、脈動をこの可動時間間隔と停止時間間隔を変えることで発生させた。本実験で設定したピストン可動時間間隔 T_{on} とピストン停止時間間隔 T_{off} を表-3に示す。ここで、高流動コンクリートでは脈動2のみを発生させた。なお、ピストンの圧送速度は、脈動を発生させる場合も、通常の変形性評価試験と同じ1.25cm/sとした。

表-3 発生させた脈動

脈動の種類	Ton(秒)	Toff(秒)
1	10	1
2	4	0.5
3	3	0.5

3. 実験結果および考察

通常および脈動を発生させた変形性試験結果を表-4に示す。また、通常の変形性試験による平均ポンプ油圧と油圧の変動係数との関係を図-4に示す。なお、図中のN, Fおよび高は、普通コンクリート、フライアッシュIV種を細骨材に使用したコンクリートおよび高流動コンクリートを示しており、18および8はスランブの値を示している。

本実験で行った変形性試験では、脈動の有無およびコンクリートの配合に関わらず、順調圧送可能である。普通コンクリートでは、ポンプ施工指針における判定基準（平均ポンプ油圧0.20MPa以下、油圧の変動係数は15%以下）¹⁾の順調圧送領域外となる。これは、ポンプ施工指針の試験条件と比較して、細骨材が川砂でなく砕砂を用いているため、変形管を流動する際の管内圧力の乱れが大きくなったことや、テーパ管と直管の連結部内壁の仕上げ面などによる試験装置自体の影響と思われる。また、著者らの実験結果²⁾から、フライアッシュIV種を細骨材として使用したコンクリートは、普通コンクリートに比べ、油圧の変動係数は小さくなるが平均ポンプ油圧は大きくなると考えられていた。しかし、本実験からフライアッシュIV種を細骨材の容積に対し30%の多量使用すると、油圧の

表-4 変形性試験結果

脈動	種類	フライアッシュ容積置換率 (%)	スランブフロー (cm)	平均ポンプ油圧 (MPa)	変動係数 (%)	圧送状態
無	N18	0	18	0.047	27.9	順調
	N 8		8	0.076	22.2	
	F18	30	18	0.042	9.9	
	F 8		8	0.068	12.4	
1	N18	0	18	0.055	56.4	
	N 8		8	0.079	51.3	
	F18	30	18	0.037	79.1	
	F 8		8	0.076	45.6	
2	N18	0	18	0.040	71.5	
	N 8		8	0.038	144.4	
	F18	30	18	0.038	70.7	
	F 8		8	0.077	77.9	
3	N18	0	18	0.062	68.3	
	N 8		8	0.071	96.9	
	F18	30	18	0.048	61.2	
	F 8		8	0.053	91.7	
無 2	高	30	65	0.058	9.6	
			65	0.073	138.4	

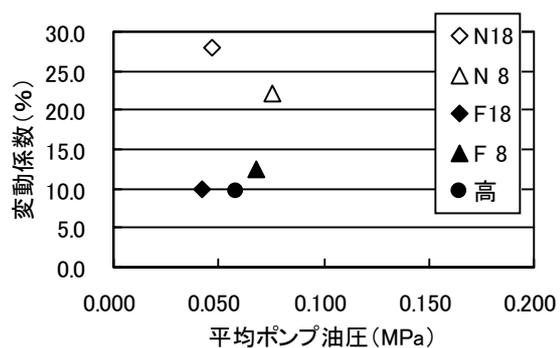


図-4 通常の変形性試験による平均ポンプ油圧と変動係数との関係

変動係数を低減させるだけでなく、平均ポンプ油圧を幾分低下させる効果も確認された。

3.1 脈動を発生させた変形性試験と通常の変形性試験との比較

通常および脈動を発生させた変形性試験から得られた平均ポンプ油圧の違いを図-5に示す。

脈動を発生させない場合と発生させた場合の結果を比べると、平均ポンプ油圧は、脈動の種類やコンクリートの種類に関わらず大差ない値となる。しかし、表-3および図-6から、油圧の変動係数では、コンクリートの種類に関わらず、脈動を発生させると変動係数が大幅に増加する。特に、その増加傾向は、脈動2および

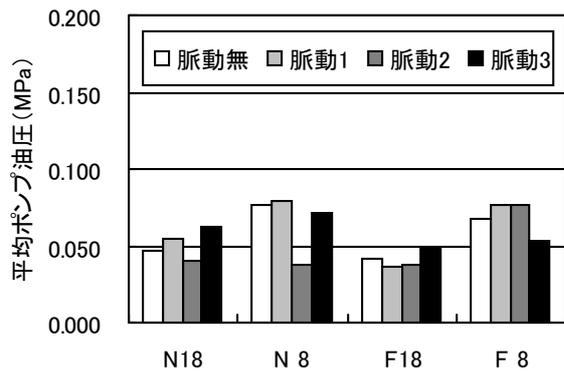


図-5 変形性試験の平均ポンプ油圧

3のように可動時間間隔と停止時間間隔を短くして、脈動波を多く発生させた結果ほど大きくなる。これは、図-1と図-2から、ポンプ油圧の値が連続的となるような脈動を発生させない場合に比べ、脈動を発生させた場合では、ピストンが停止し再び可動し始めるまで、ポンプ油圧が不安定な値を取り続けるためと考えられる。また、脈動波が増加すると、この不安定な値が多く存在することになり、変動係数がさらに大きくなる。しかし、脈動を発生させた場合、直管先端にテーパ管を取り付けた場合の油圧と直管のみの場合の油圧を、完全に波を重ね差し引くことは不可能で、この際に生じた誤差も増加の原因である。

3.2 脈動を発生させた変形性試験と現場ポンプ圧送実験との相似性の検討

脈動を発生させた変形性試験と実際のポンプ圧送による油圧（圧力損失）の経時変化を図-7～図-9に示す。なお、実際のポンプ圧送による圧力損失は、循環式の配管構成とした現場圧送の直管部で、圧送されているコンクリートの管内圧力を測定し、単位長さあたりの圧力損失を算出した現場実験結果である³⁾。また、コンクリートの配合や圧力の測定時間間隔などの条件は今回の変形性試験と同じである。脈動を発生させた変形性試験と実際のポンプ圧送による脈動数は、脈動1と圧送速度10m³/h、脈動2と圧送速度30m³/hおよび脈動3と圧送速度50m³/hとで同数発生し、各々対応している。この結果から、ピストンの可動と停止の制御により、変

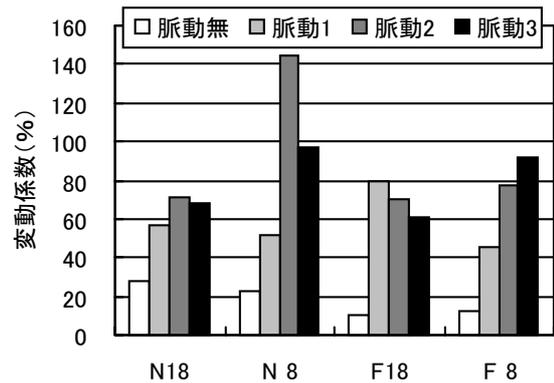


図-6 変形性試験の変動係数

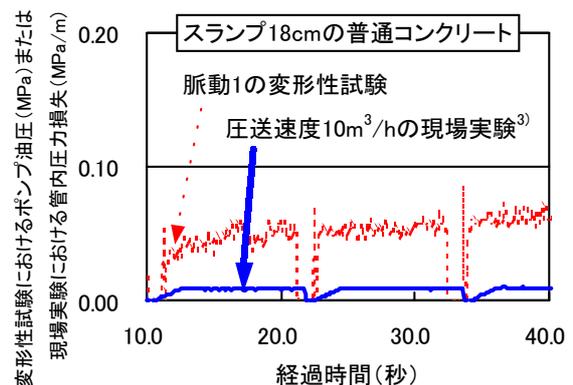


図-7 脈動を発生させた変形性試験と現場実験の結果（1）

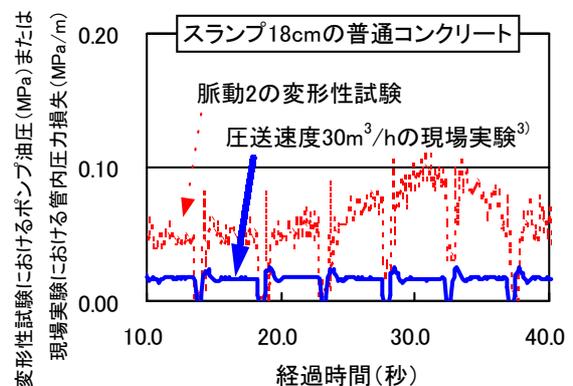


図-8 脈動を発生させた変形性試験と現場実験の結果（2）

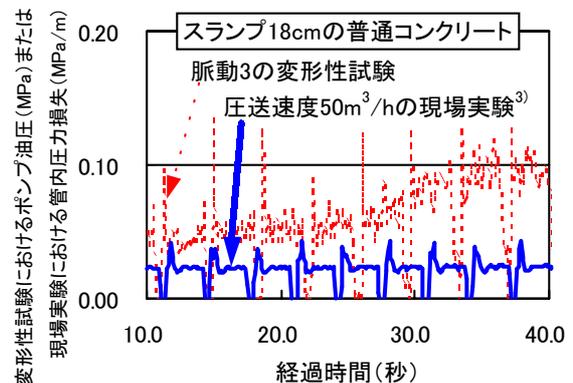


図-9 脈動を発生させた変形性試験と現場実験の結果（3）

形性試験においても、実際のポンプ圧送と同様な脈動が発生させることが確認できる。変形性試験のポンプ油圧が大きいのは、現場実験では圧送管の管壁の圧力を計測しているのに対し、変形性試験で計測している圧力がピストンシリンダー部の油圧のためである。テーパ管吐出側の直径が100mm、ピストンシリンダー径が63mmであるため、変形性試験のテーパ管吐出位置での圧送管の圧力損失の概略は、ポンプ油圧に0.4 ($= (63/100)^2$) を乗ずればよい。実際の現場でのポンプ圧送と脈動を発生させた変形性試験の圧送の相似性を検討するために、実際のポンプ圧送による管内圧力損失に対する変形性試験によるテーパ管吐出位置の管内圧力損失の比を指標とした。変形性試験の脈動時間間隔とほぼ一致する実機ピストンの脈動時間間隔に対応する圧送速度と管内圧力損失との比を図-10に示す。

管内圧力損失の比は、圧送速度が増加するに従い小さくなる。これは、実際のポンプ圧送では、圧送速度が増加するに従い圧力損失が大きくなるが、変形性試験の脈動では、ピストン速度を一定として時間間隔のみを変化させているためである。

圧送速度に依存している傾向があるものの、概ね、普通コンクリートの管内圧力損失比は、3.0~0.8 倍程度である。一方、フライアッシュIV種混入コンクリートは 1.2~0.4 倍程度である。

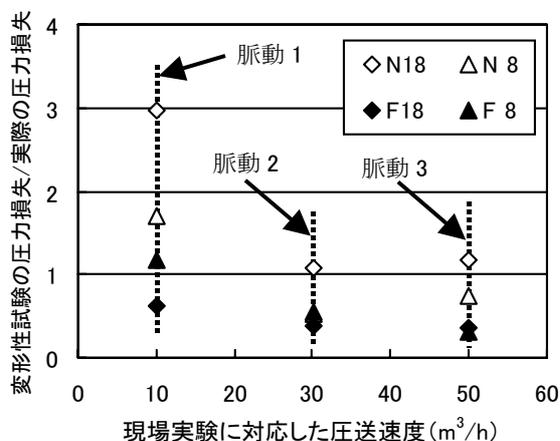


図-10 変形性試験の脈動時間間隔と同じ実機ピストンの脈動時間間隔に対応する圧送速度と管内圧力損失の比との関係

したがって、普通コンクリートの場合、変形性試験で再現している脈動の管内圧力の方が実際の現場より大きく、変形性試験の結果は安全側として評価できる。これに対し、フライアッシュIV種混入コンクリートでは、変形性試験で再現した脈動圧は実際より小さく危険側である。管内圧力損失に関する相似性では、本変形性試験の結果は、フライアッシュIV種混入コンクリートに対して危険側の評価をする可能性がある。

4. まとめ

変形性試験に用いる小型ポンプ圧送試験装置に脈動発生装置を付加し、脈動を発生させた変形性試験を実施した。本実験の範囲内で、得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 小型ポンプ圧送装置のピストンの可動と停止を制御することで、実際のポンプ圧送のような脈動波を再現させることができる。
- (2) 脈動を発生させた変形性試験は、通常の変形性試験に比べ、変動係数を大幅に増加させるが、平均ポンプ油圧には影響を与えない。
- (3) 実際のポンプ圧送と本変形性試験の管内圧力損失に関する相似性は、普通コンクリートに対しては安全側の評価であるが、フライアッシュIV種混入コンクリートに対しては変形性試験の結果が危険側の評価を与える可能性がある。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー100 コンクリートのポンプ施工指針 [平成12年版]、(社)土木学会、2000.2
- 2) 山地功二ほか：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, 2002.7
- 3) 栗田工ほか：現場循環によるフレッシュコンクリートのポンプ圧送性能評価に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26, No.1, pp.1371-1376, 2004.7