

論文 加圧履歴に基づいたポンプ圧送性の室内試験評価方法に関する研究

橋本 貴之^{*1}・梁 俊^{*2}・坂本 淳^{*3}・丸屋 剛^{*4}

要旨：本研究は、コの字に設置した輸送管の両端にシリンダーを取り付け、圧送中に配管内のコンクリートが受ける圧力を測定する装置を考案・試作し、コンクリートのポンプ圧送性を室内試験で定量的に評価する方法を検討した。さらに、本試験方法及び装置の妥当性を検証するため、試験条件やコンクリートの配合を種々に変化させて、室内圧送試験による基礎的な検討を行った。その結果、閉塞までの加圧回数から本試験装置における適切な試験条件を選定することができ、圧送中にコンクリートが受ける加圧履歴から許容受圧量を算定して、ポンプ圧送性に対する最適な細骨材率及び単位セメント量を特定することができた。

キーワード：ポンプ圧送性、配管内閉塞、室内試験、加圧回数、加圧履歴、許容受圧量

1. はじめに

近年、建築物の高層化や耐震補強による鉄筋の高密度化に伴い、コンクリートの長距離圧送や特殊配合（高強度や高流動など）による高負荷条件下でのコンクリート圧送が求められる工事が増加傾向にある。このような工事では、ポンプ圧送性がコンクリートの施工管理及び品質確保に関して重要となる。

コンクリートの圧送時における配管内の状態は、施工環境や圧送条件、コンクリートの配合によって異なり、定常状態で圧送されているわけではない。また、通常の現場では圧送中のコンクリートの状態を確認・評価して施工することはないため、突然、配管内閉塞などのトラブルに見舞われる。特に配管内閉塞は、コンクリートのポンプ施工時におけるトラブルの中で大半を占めており、配管内閉塞が発生した場合には、その復旧作業が生じるだけでなく、閉塞時にポンプや配管に大きな負荷がかかるため、ポンプの故障や輸送管の破裂など重大なトラブルに繋がる危険性もある。したがって、コンクリートのポンプ圧送性を把握することは非常に重要である。

一般に、コンクリートのポンプ圧送性の簡易的な判定方法として、加圧ブリーディングや変形性評価の試験が行われている²⁾。しかし、これらの試験方法では、コンクリートの圧送中の品質変化を反映していないことや、繰返し加圧によるコンクリートへの影響を考慮していないため、現場の圧送条件を反映したポンプ圧送性の評価となっていない。そのほか、ベント管に加速度計を取り付け、コンクリートの圧送中における粗骨材の衝突もしくは管壁との摩擦による振動を測定することによりポンプ圧送性を定量的かつ相対的に評価する方法^{3),4)}などが研究されているが、現状では室内で定量的に評価できる試験方法は確立されておらず、多大な費用や手間を必要

とする実施規模の圧送試験に依存している。

そこで本研究は、コンクリートのポンプ圧送性を考慮した配合の選定方法を検討することを目的に、室内にて圧送中のコンクリートが受ける圧力を測定する試験装置を製作し、その試験方法及び装置の妥当性を検証した。

2. 加圧履歴に基づいたポンプ圧送性室内試験

2.1 試験装置の機構

ポンプによる圧送中、コンクリートはブリーディング水が発生し、繰返し加圧により配管内は不均一となって材料分離が生じる。その状態が進行すると、骨材同士のアーチング現象により配管内は閉塞する。このときの配管内におけるコンクリートの加圧履歴、閉塞までの加圧回数、ピストンのストローク長、ピストン一押しの時間をパラメータとし、コンクリートのポンプ圧送性を定量的に評価する装置を製作した。

本試験装置の概略平面図を図-1、設置状況を写真-1に示す。本装置は、輸送管（直管・ベント管）を繋いでコの字とし、両端にシリンダー及びロードセルを取り付け、近傍に圧力計をそれぞれ設置したものである。なお、輸送管は一般的に多く用いられている 125A (5B) とし、

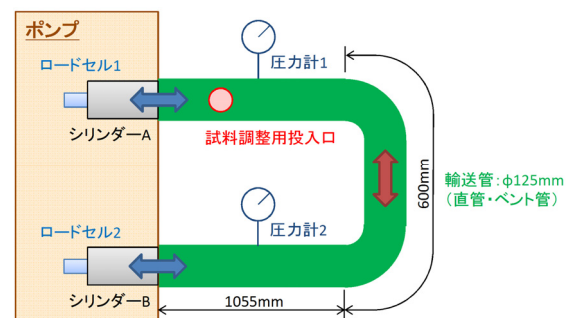


図-1 ポンプ圧送性室内試験装置の概略平面図

^{*1} 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部材工研究室先端施工チーム 研究員 修(工) (正会員)

^{*2} 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部材工研究室構造設計チーム 副主任研究員 博(工) (正会員)

^{*3} 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 主席研究員 博(工) (正会員)

^{*4} 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部 主幹研究員 工博 (正会員)

圧力計の位置や、シリンダーのストロークでコンクリートがベント管を通過するように考慮して管長を設定した。

試験装置の機構は以下の通りである。なお、**図－1**のシリンダーAのピストンが引いた状態かつシリンダーBのピストンが押している状態の配管内に試料（コンクリート）が既に詰まっている状況とする。

- ①シリンダーAのピストンによる圧力で試料が配管内を移動する。このとき、管壁面の摩擦力和シリンダーBのピストンを押してAと反対側へ動かす力が発生するが、試料が受ける圧力は小さい。
- ②シリンダーBのピストンが押されて移動可能距離が0になると反力が発生する。
- ③シリンダーAのピストンのストローク長が設定値まで達したら、シリンダーAの圧力が低下してシリンダーBのピストンが試料を反対側へ押し出す。
- ④①～③より加減圧が繰り返され、配管内の試料は不均一な状態となる。このときに粗骨材の凝集などで配管内閉塞が生じ、規定圧送圧よりも大きくなると装置が停止するように設定した。閉塞状況の一例を**写真－2**に示す。



(a) 装置全体



(b) 試料調整用投入口

写真－1 ポンプ圧送性室内試験装置の設置状況

2.2 試験手順

本装置を用いたポンプ圧送性室内試験の手順は、下記の通りである。

- ①配管内にコンクリートを詰める。なお、**写真－1(b)**に示す試料調整用投入口からコンクリートを少量投入し、シリンダーAのピストンで押し出して配管内を充填する。
- ②圧力計及び加圧回数のカウンタ等の計器を起動させ、ピストンのストローク長を設定して試験を開始する。
- ③ピストンの一押しにかかる時間を測定する。
- ④輸送管に取り付けたロードセルと圧力計にて、配管内の加圧履歴及び加圧回数を閉塞するまで測定する。
- ⑤配管内の加圧履歴より、圧送中にコンクリートが受ける許容受圧量を式(1)から算定する。

$$E = \int_0^T p_x dx - P_0 T \quad (1)$$

ここで、 E ：許容受圧量[MPa・分]、 T ：閉塞までの圧送時間[分]、 p_x ：圧力強度[MPa]、 P_0 ：初期設定圧力[MPa]である。

3. 試験条件に関する実験

本試験における条件のうち、ポンプの圧送圧及びピストンのストローク長がコンクリートのポンプ圧送性に与える影響を検討した。

3.1 使用材料及びコンクリート配合

使用材料として、セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）、細骨材は千葉県君津産山砂（表乾密度 2.62g/cm³、吸水率 1.56%）、粗骨材は青梅産石灰石碎石（最大寸法 20mm、表乾密度 2.60g/cm³、吸水率 2.86%、F.M.6.39）を用いた。混和剤は、リグニンスルホン酸系の遅延性減水剤を使用し、アルキルエーテル系の AE 剤により空気量を調整した。**表－1**に示すコンクリートの



写真－2 ポンプ圧送性室内試験装置の閉塞状況

表－1 試験条件に関する実験におけるコンクリートの配合

組骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメン ト比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	減水剤 <i>A</i>
20	12.0	50.0	4.5	44.0	155	310	809	1042	$C \times 2.0\%$

目標スランプ：12.0±2.5cm、目標空気量：4.5±1.5%

配合は、本試験での加圧段階におけるコンクリートのスランプロスを制御するため、フレッシュ性状（目標スランプ $12.0 \pm 2.5\text{cm}$ ，目標空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ ）を試験開始後 90 分間保持できる配合とした。

3.2 実験結果

(1) ポンプ圧送圧による影響

本試験条件のうちポンプ圧送圧を 1～5MPa に変化させ、コンクリートが閉塞するまでの加圧回数を測定した。なお、このときのピストンのストローク長は 350mm，吐出量約 $15\text{m}^3/\text{h}$ として設定した。

図-2 のポンプ圧送圧による影響を検討した結果より、ポンプ圧送圧が大きいほど閉塞（写真-2 参照）までの加圧回数は少ない。これは、コンクリートが受ける圧力が大きいとブリーディング水の量が多くなり、配管内の不均一が助長されるためである。このことから、実際の施工時においてコンクリートの打込み時間が長くなっても、スランプロスを制御できる範囲でポンプ圧送圧を小さくして吐出量を少なくした方が、配管内の閉塞を防ぐことに効果的であると分かる。

配管内のコンクリートから発生するブリーディング水の最大量は一定のため、コンクリートが受ける圧力が一定値以上になるとポンプ圧送圧による影響は小さくなると考えられる。本装置では、図-2 よりポンプ圧送圧 5.0MPa 以上で加圧回数が一定に収束する傾向が見られたため、本装置の最大圧送圧を 5.0MPa とした。また、ポンプ圧送圧が 0 の場合、理論的にはコンクリートに圧力が作用しないため、配管内で不均一が生じない。しかし、現実的にはコンクリートと管壁との間に摩擦があるためポンプ圧送圧 0 はありえない。今回の結果から本装置の最小圧送圧は、図-2 より 1.25MPa とした。

(2) ピストンのストローク長による影響

本試験条件のうちピストンのストローク長を 150～480mm に変化させ、コンクリートが閉塞するまでの加圧回数を測定した。なお、このときのポンプ圧送圧は 5.0MPa，吐出量約 $15\text{m}^3/\text{h}$ として設定した。

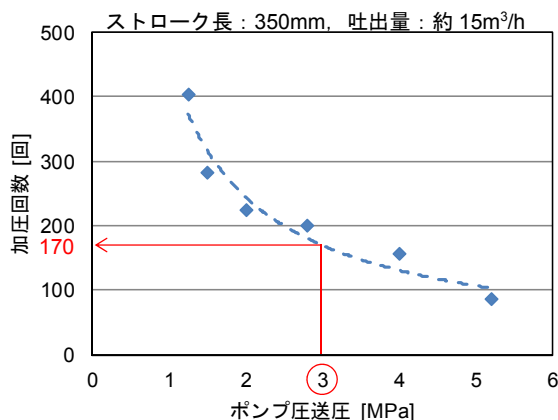


図-2 ポンプ圧送圧による影響の検討結果

図-3 のピストンのストローク長による影響を検討した結果より、ストロークが 300mm 以上であれば、閉塞までの加圧回数に対するピストンのストローク長による影響はほとんどない。これは、試験装置に用いたベント管の長さが 300mm であり、ピストンのストローク長が 300mm 以下の場合にはコンクリートがベント管を完全に通過しきらずに往復移動することになる。つまり、コンクリートがベント管を通過していない分、断面変形による抵抗が小さくなり、閉塞までの加圧回数が多くなったと考えられる。なお、ストロークが 150mm の場合には、加圧回数が 1000 回を超えても閉塞が発生しない結果となった。

ここで、ピストンのストローク長がベント管長さよりも小さい場合に、閉塞までの加圧回数が大きくなる原因を確認するため、ベント管のない直管のみの試験装置を用いて実験を行った。なお、試験条件は、ポンプ圧送圧を 3.0MPa，ピストンのストローク長を 350mm とした。その結果、直管のみの試験装置では閉塞までの加圧回数が 1015 回以上となり、ベント管の試験装置の結果（図-2 より同条件下で加圧回数は 170 回）に比べて加圧回数が非常に多くなった。このことから、コンクリートが凝結せずにフレッシュ性状を保持している間は、直管内にて不均一な状態になっても、管壁側のモルタルが潤滑作用を果たすために閉塞が発生しにくくなることが分かった。つまり、コンクリートが不均一な状態でベント管などの圧力損失が大きいところを通ると、コンクリートが変形して粗骨材間の摩擦が大きくなり、配管内でアーチング現象が発生して閉塞することが確認できた。

4. コンクリート配合に関する実験

現行のコンクリートの配合選定は、以下の手順に従う。

- ①設計での特性値による水セメント比の決定
- ②配筋条件や施工条件によるスランプの決定
- ③既往の配合を参考に細骨材率及び単位水量を仮定
- ④細骨材率を調整した試験により最適細骨材率を決定

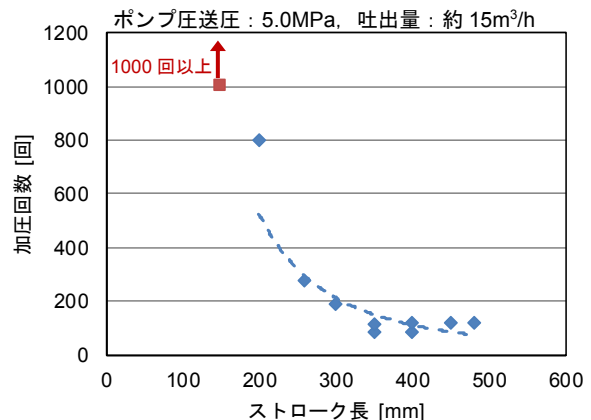


図-3 ピストンのストローク長による影響の検討結果

- ⑤単位水量を調整してスランプ設定 → 配合決定
 ⑥特殊な配合・施工条件の場合、実施工規模の圧送試験によってポンプ圧送性を確認

ここで、上記④と⑤の間に、今回のポンプ圧送性室内試験を追加することにより、⑥を省略して経済的かつ効率的にポンプ圧送性を確認できる可能性がある。また、通常のコンクリート配合や一般的な施工条件の現場でも、事前に室内でポンプ圧送性を確認できるため、閉塞などのトラブルを未然に防ぐことができると考えられる。

4.1 使用材料及びコンクリート配合

使用材料のうち粗骨材の表乾密度は 2.66g/cm^3 であり、それ以外は 3.1 と同じ材料を使用した。また、混和剤はポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤も用いた。

コンクリートの配合も 3.1 と同様に、フレッシュ性状（目標スランプ $12.0\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5\pm 1.5\%$ ）を試験開始後 90 分間保持できる配合とし、細骨材率を 37, 42, 44, 49% に変化させた 4 配合（表-2 の No.1-1~1-4）、単位セメント量を 282, 292, 302, 312kg に変化させた 4 配合（表-2 の No.2-1~2-4）とした。

4.2 実験結果

試験条件は、ポンプ圧送圧 3.0MPa 、ピストンのストローク長さ 350mm とした。

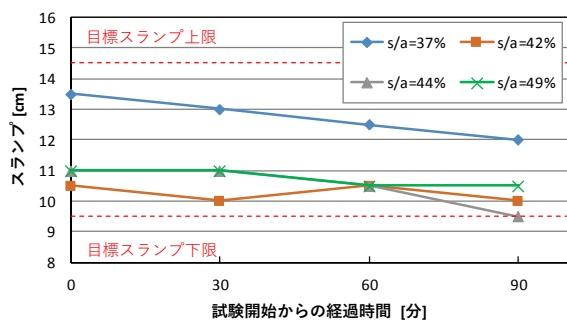


図-4 細骨材率(s/a)によるスランプの経時変化

(1) 細骨材率による影響

細骨材率により変化したコンクリートのフレッシュ性状のうち、スランプの経時変化を図-4 に示す。この図から、細骨材率が 37, 42, 44, 49% のすべての配合にて、目標スランプ $12.0\pm 2.5\text{cm}$ 以内であった。なお、本試験装置の配管内にコンクリートを詰める等の準備作業に 30 分程度の時間を要するため、スランプを含むフレッシュ性状が練上がり後 30~120 分間を満足するように配合を調整した。

細骨材率 37%（表-2 の No.1-1）の配合における圧送試験の結果のうち、圧送中にコンクリートが受ける加圧履歴を図-5 に示す。ここで、試験開始時から配管内で一定圧力（初期設定圧力、図-5 より 0.5MPa ）が計測されているが、本試験では試験開始時からの圧力の変動を用いて許容受圧量を算定し、ポンプ圧送性を評価する。そのため、初期設定圧力を閉塞までの圧送時間に掛けた $5.23\text{MPa}\cdot\text{分}$ を控除することとした。

細骨材率 37, 42, 44, 49% の各配合に対する許容受圧量の結果を図-6 に示す。なお、細骨材率による許容受圧量の結果は、相関係数 $R^2=0.994$ で相関性が高い。

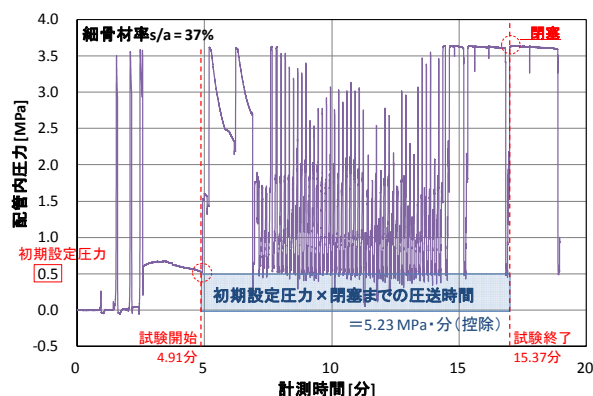


図-5 細骨材率 s/a=37% 配合の加圧履歴

表-2 コンクリート配合に関する実験におけるコンクリートの配合

組骨材の最大寸法 [mm]	水セメント比 [%]	スランプ [cm]	空気量 [%]	No.	細骨材率 [%]	単位量 [kg/m ³]					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 AI	高性能 AE 減水剤 A2
20	50.0	12.0	4.5	1-1	37.0	154	308	682	1179	C×2.0%	—
				1-2	42.0	155	310	772	1083	C×2.0%	—
				1-3	44.0	158	316	804	1038	C×2.0%	—
				1-4	49.0	165	330	880	930	C×2.0%	—
20	50.0	12.0	4.5	2-1	42.8	141	282	813	1103	C×1.5%	C×2.0%
				2-2	42.8	146	292	804	1090	C×1.5%	C×1.4%
				2-3	42.8	151	302	794	1078	C×1.5%	C×0.9%
				2-4	42.8	156	312	785	1065	C×1.5%	C×0.7%

目標スランプ： $12.0\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量： $4.5\pm 1.5\%$

No.1-1~1-4 は細骨材率、No.2-1~2-4 は単位セメント量をパラメータ（表中太字）とする

一般に、細骨材率が小さいコンクリートは単位粗骨材量が多くなり、単位セメント量が少なくなることにより、管壁との潤滑作用を果たすモルタルが少なくなる。そのため、配管内のコンクリートが不均一になると粗骨材の凝集によって閉塞が生じやすくなる。一方で、細骨材率が大きくなるとコンクリートのフレッシュ性状は良好になるが、スランプを保持するために単位水量が多くなるため、加圧によるブリーディング水が増加して材料分離による閉塞が生じやすくなる。

図－6 より、上記の傾向が確認でき、今回の結果から最適細骨材率は42.8%であった。

(2) 単位セメント量による影響

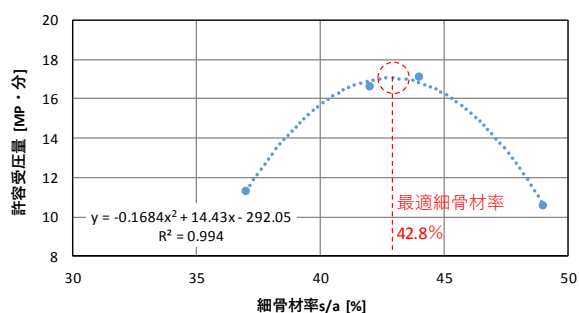
単位セメント量により変化したコンクリートのフレッシュ性状のうち、スランプの経時変化を図－7 に示す。この図から、単位セメント量が 282, 292, 302, 312kg/m³ のすべての配合にて、目標スランプ 12.0±2.5cm 以内であった。なお、4.2(1)と同様に、配管内にコンクリートを詰めるなどの準備作業に約 30 分の時間を要するため、スランプを含むフレッシュ性状が練上がり後 30~120 分間を満足するように配合を調整した。

4.2(1)と同様に、圧送試験より得られた配管内の加圧履歴では、試験開始時からの一定圧力（初期設定圧力）と閉塞までの圧送時間を掛けた値を控除した。

単位セメント量 282, 292, 302, 312kg/m³ の各配合に対する許容受圧量の結果を図－8 に示す。なお、単位セメント量による許容受圧量の結果は、相関係数 $R^2=0.9992$ で相関性が高い。

一般に、単位セメント量が小さいコンクリートは管壁との潤滑作用を果たすモルタルが少なくなり、単位粗骨材量が多くなるため、配管内が不均一になると粗骨材の凝集によって閉塞が生じやすくなる。一方で、単位セメント量が大きくなると単位水量が多くなるため、加圧によるブリーディング水が増加して材料分離によって閉塞が生じやすくなる。

図－8 より、上記の傾向が確認でき、今回の結果から最適単位セメント量は 296kg/m³ であった。



図－6 細骨材率(s/a)による影響の検討結果

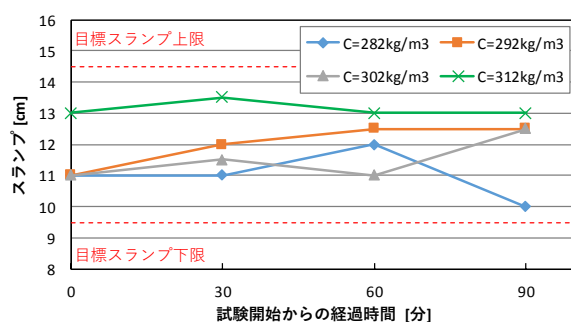
5. 加圧ブリーディング試験結果との比較

現在、コンクリートのポンプ圧送性の簡易的判定方法として実施されている試験のうち、加圧ブリーディング試験を実施した。なお、試験対象とした配合は表－2 に示す細骨材率を変化させた 4 配合と、単位セメント量を変化させた 4 配合とした。

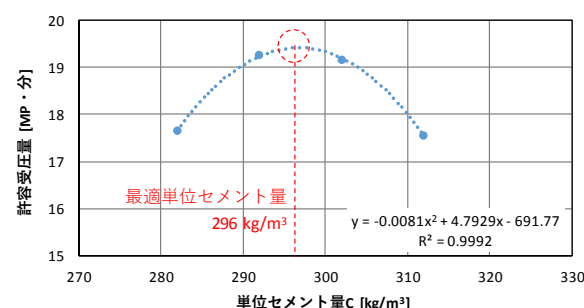
細骨材率(s/a)を変化させた配合に対する加圧ブリーディング試験の結果を図－9 に示す。この結果から、いずれの配合についても、標準曲線 B と C の間に脱水量の経時変化曲線が入っており、4 配合すべて圧送可能であると判定できる。

単位セメント量(C)を変化させた配合に対する加圧ブリーディング試験の結果を図－10 に示す。この結果から、単位セメント量が 282kg/m³ 以外の配合については、標準曲線 B と C の間に脱水量の経時変化曲線が入っており、これらの 3 配合のみ圧送可能であると判定できる。

以上より、加圧ブリーディング試験では、標準曲線 B（脱水量上限値）と標準曲線 C（脱水量下限値）の間に脱水量の経時変化曲線が入る配合であれば、ポンプ圧送可能であると判定される。それに対して、今回のポンプ圧送性室内試験では、図－6 と図－8 に示す通り、コンクリートのポンプ圧送性に最適な細骨材率と単位セメント量を特定することができる。そのため、本圧送試験は現行の簡易的な判定方法と比べて、具体的かつ精度良くポンプ圧送性の良いコンクリートの配合を選定することができると考えられる。



図－7 単位セメント量(C)によるスランプの経時変化



図－8 単位セメント量(C)による影響の検討結果

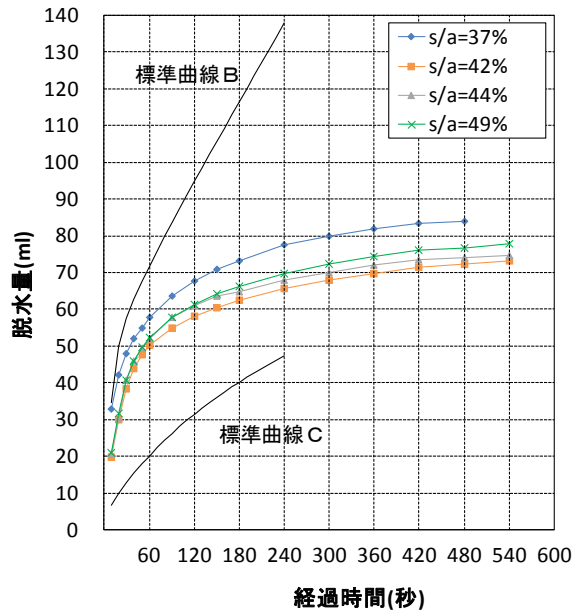


図-9 加圧ブリーディング試験結果 (s/a の検討)

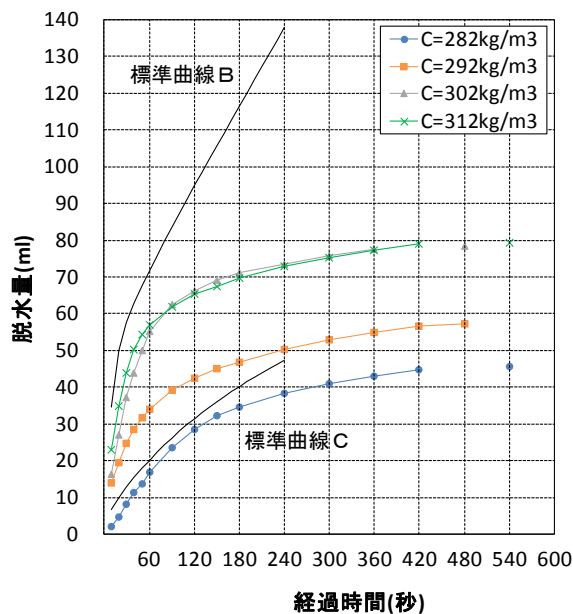


図-10 加圧ブリーディング試験結果 (C の検討)

6. まとめ

本研究は、輸送管をコの字に組み立て両端にシリンダーとロードセル、近傍に圧力計を設置した装置を考案・試作し、コンクリートのポンプ圧送性を室内試験で定量

的に評価する方法を検討した。その結果、圧送中にコンクリートが受けた加圧履歴から許容受圧量を算定して、コンクリートのポンプ圧送性を定量的に評価した。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 本試験条件のうち、ポンプ圧送圧及びピストンのストローク長がコンクリートのポンプ圧送性に与える影響を検討した。その結果、本装置はポンプ圧送圧を 1.25～5.0MPa、ピストンのストローク長を 300mm 以上に設定する必要があると分かった。
- (2) コンクリートの配合に関する実験として、細骨材率と単位セメント量をそれぞれ変化させた各 4 配合について、ポンプ圧送性室内試験を実施した。その結果、ポンプ圧送性に対して最適な細骨材率及び単位セメント量を特定することができた。
- (3) (2)のポンプ圧送性室内試験を実施した配合について加圧ブリーディング試験を行った。その結果を比較すると、加圧ブリーディング試験は相対的な評価による簡易判定に対して、本試験方法は具体的な評価であるため、精度良くポンプ圧送性に適した配合を選定できると考えられる。ただし、本試験方法による最適な細骨材及び単位セメント量を用いたコンクリートの配合に対するポンプ圧送性の良否については、実施工規模の圧送試験の結果と比較するなど、追加検討が必要である。

参考文献

- 1) 太田達見, 中田善久, 近松竜一, 大塚秀三: コンクリートポンプ工法における圧送の実状に関する調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.259-264, 2008
- 2) 土木学会編: 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 年度版], 2000
- 3) 案浦侑己, 橋本紳一郎, 渡辺健, 橋本親典: 振動加速度計を用いたコンクリートの圧送性簡易評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1201-1206, 2013
- 4) 橋本紳一郎, 平川恭奨, 南浩輔, 中島良光: コンクリートの簡易圧送性計測手法における配管条件及び圧送性判定の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, No.1, pp.272-278, 2015