

# 論文 加圧履歴に基づいたポンプ圧送性の室内評価試験方法における判定指標の検討

橋本 貴之\*1・梁 俊\*2・坂本 淳\*3・丸屋 剛\*4

**要旨:** 本研究は、コの字に設置した配管の両端にシリンダーを取り付けた室内試験装置を用いて、圧送中にコンクリートが受ける加圧履歴から求めた許容積算受圧量を、ポンプ圧送性を判定する指標として検討した。その結果、圧送負荷と配管内圧力の加圧履歴から一波形の最大圧力比の変化を確認することでコンクリートの品質変化の特異点を特定し、配管内のスランプ低下量と積算受圧量の関係を確認することで許容積算受圧量の妥当性を示した。さらに、本試験方法を用いて配合選定を行った結果、ポンプ圧送に最適な配合を特定できたことから、本試験の許容積算受圧量をポンプ圧送性の判定指標に適用できる可能性を示した。

**キーワード:** ポンプ圧送性, 配管閉塞, 室内試験, 加圧履歴, 許容積算受圧量

## 1. はじめに

近年、構造物の長大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高負荷を要する特殊配合（高強度や高流動コンクリートなど）の圧送が求められる工事が増加している。一方で、コンクリートのポンプ施工時におけるトラブルも発生しており、その大半は配管閉塞が占めている<sup>1)</sup>。配管閉塞が生じると、ポンプや配管に大きな負荷がかかるため、ポンプの故障や配管の破裂などの深刻な二次災害に見舞われることになる。配管閉塞の原因として、材料分離や圧送による骨材粒度の変動などコンクリートの材料要因が多く報告されている<sup>2),3)</sup>。以上のことから、コンクリートのポンプ圧送を行う工事では、施工管理及び品質確保の上で、事前に試験練りなどを行い、ポンプ圧送性に対して最適な配合を選定することが重要となる。

現在、コンクリートのポンプ圧送性を評価する簡易的な判定方法として、一般的に加圧ブリーディング試験や変形性評価試験<sup>4)</sup>が行われるが、これらの試験方法では圧送中に配管内でコンクリートが受ける繰返し加圧の影響を考慮することはできない。そのほか、配管に加速度センサーを取り付け、圧送中に管内で骨材の衝突などにより発生する振動を計測することで、コンクリートのポンプ圧送性を評価する方法<sup>5),6)</sup>が提案されているが、施工中の圧送・閉塞状態を現地で確認することを目的としており、閉塞を避けるために事前に配合選定する方法としては検討されていない。

これらに対して著者らはベント管と直管をコの字に組み立て、配管端部に設置したシリンダーによって交互にピストンで圧送する室内試験装置を作製し、圧送中に

コンクリートが受ける加圧履歴から許容積算受圧量を算定してポンプ圧送性を評価する方法<sup>7)</sup>を提案した。また、その装置を用いた試験により定量的に配合選定が可能であることを示した。しかし、本試験方法ではポンプ圧送性を判定する指標として許容積算受圧量を定義したが、その算定方法や結果の妥当性などについて詳細な検討を行っておらず、定量的なポンプ圧送性の評価方法の確立には多くの課題が残されている。

そこで本研究では、室内試験装置を用いて圧送に伴う配管内でのコンクリートの品質変化を確認し、積算受圧量との関係を把握することで、許容積算受圧量の妥当性を検証した。さらに、本試験方法を用いた配合選定を行い、本試験の許容積算受圧量がポンプ圧送性の判定指標として適用することが可能か検証した。

## 2. 加圧履歴に基づいたポンプ圧送性室内試験

### 2.1 試験概要

圧送に伴い配管内のコンクリートは、加圧によってブリーディング水が発生した場合、減圧しても分離した水は完全に元に戻ることはない。さらに、加圧・減圧の繰返しで最初に生じた水の道筋に沿ってブリーディング水が集中するため、配管内のコンクリートで水が多い箇所と骨材が多い箇所のように偏りが発生する。このように配管の延長方向にコンクリートを構成する材料の分布が不均一となる場合、圧送圧が大きいほど、また加圧回数が多いほどブリーディング水の量が多くなるため、その不均一性が進行して閉塞に至る。

上述の圧送に伴う繰返し加圧による配管閉塞のメカニズムを再現できるように、配管内のコンクリートの状

\*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)

態をモデル化したポンプ圧送性評価を行う室内試験装置を設計・製作した。なお、本試験では普通コンクリート（スランプ8～21cm）の長距離圧送を対象とした。

(1) 試験装置

本試験に用いる装置全体を写真-1、概略平面図を図-1にそれぞれ示す。本装置は、125A（5B）のベント管と直管をコの字に組み立て、配管の両端部にシリンダーを取り付けたものである。また、シリンダー端部にロードセル、ベント管の近傍に圧力計をそれぞれ両側に設置している。なお、本装置の全長は約3m、幅は約0.7mで、シリンダーのストローク長を0～500mm、ポンプの油圧範囲を0～5MPaに調整することが可能な機構である。

(2) 試験手順

- 本装置でのポンプ圧送性室内試験手順を以下に示す。
- ①配管内に規定容量（約32リットル）のコンクリートを詰めて充填する。
  - ②ロードセルと圧力計を起動し、圧送を開始して圧送圧及びピストンのストローク長などを設定する。
  - ③圧送負荷が規定圧送圧を超え、配管閉塞で装置が停止するまで、ロードセルと圧力計で加圧履歴を測定する。
  - ④③の加圧履歴から許容積算受圧量を算定する。

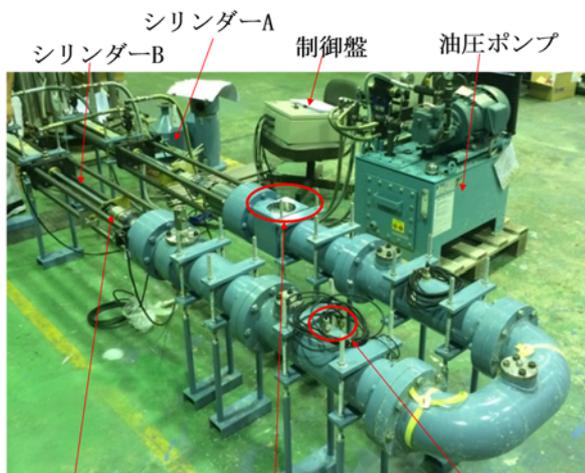


写真-1 ポンプ圧送性室内試験装置全体

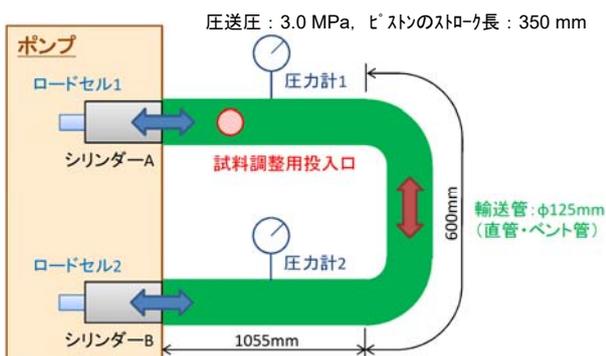


図-1 ポンプ圧送性室内試験装置の概略平面図

2.2 ポンプ圧送性の判定指標

圧送に伴い配管内のコンクリートは、ブリーディング水の発生による材料分離で不均一性が起き、骨材が偏り凝集したアーチング現象によって閉塞が生じると、まず圧送負荷が大きくなり、それに追従して配管内圧力が上昇する。その後、閉塞箇所で凝集した骨材の間を水が抜けていくため、配管内圧力は低下する。このような現象を捉えるため、本試験では加圧履歴としてロードセルで圧送負荷、圧力計で配管内圧力をそれぞれ測定している。ここで、本試験により計測した圧送負荷及び配管内圧力の履歴の一例を図-2、図-3に示す。これらの加圧履歴には、配管内に充填するコンクリート量の微調整や圧送圧及びピストンのストローク長の設定を行う準備区間と、圧送開始から圧送負荷が規定圧送圧に達して閉塞するまでの試験区間とに分かれる。

著者らは、圧送中にコンクリートが受ける加圧履歴から許容積算受圧量を求め、ポンプ圧送性の判定指標として定義した。なお本研究では、圧送試験中に測定された加圧履歴のうち配管内圧力から式(1)により、許容積算受圧量を算定する。

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

ここで、 $E$ ：許容積算受圧量[MPa・分]、 $T$ ：コンクリートの品質が変化するまでの圧送時間[分]、 $p_x$ ：配管内圧力[MPa]である。

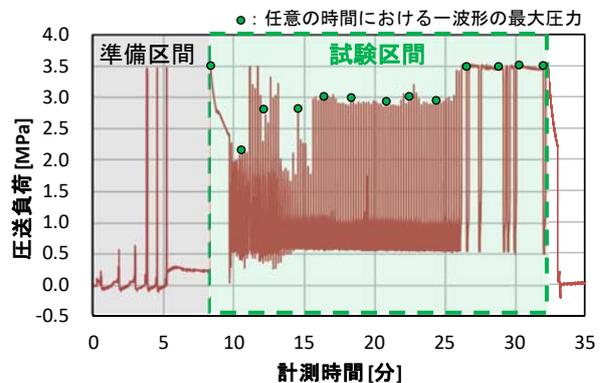


図-2 ロードセルで得られた圧送負荷の履歴

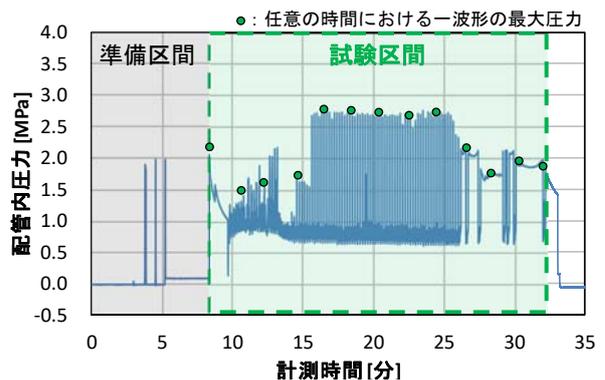


図-3 圧力計で得られた配管内圧力の履歴

式(1)に示す通り、圧送開始からコンクリートの品質が変化するまでの配管内圧力の積分値を許容積算受圧量として、ポンプ圧送性能を評価している。ここで、圧送開始から閉塞に至るまでの試験区間の加圧履歴からコンクリートの品質が変化する点を特定するため、ロードセルの圧送負荷(図-2)と圧力計の配管内圧力(図-3)の履歴から任意の時間における一波形の最大圧力の比を、それぞれプロットすると図-4となる。この図より圧送負荷と配管内圧力の一波形の最大圧力の比が大きく変化した時点をコンクリートの品質変化の特異点と定義し、圧送開始から上記品質変化特異点までの積算受圧量を、そのコンクリートが有する許容積算受圧量とした。

### 3. 圧送に伴うコンクリートの品質変化の検討

#### 3.1 実験概要

本試験での許容積算受圧量の算定では、室内圧送試験で得られた圧送負荷と配管内圧力の加圧履歴からコンクリートの品質変化特異点を特定する必要がある。今回、コンクリートの品質変化特異点の妥当性を検証するため、積算受圧量に対する配管内のスランブ低下量を確認した。

ここでの実験は、同一配合のコンクリートに対して、任意の積算受圧量を与えられるように加圧回数を調整し、室内圧送試験を行う。各圧送試験後には毎回、ベント管を除く2本の直管(シリンダーA側及びB側)内にあるコンクリートをそれぞれ取り出し、それぞれの試料に対してスランブを測定してその低下量を確認した。

#### 3.2 使用材料およびコンクリートの配合

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/cm<sup>3</sup>)、細骨材は千葉県君津産山砂をベースにした混合砂(表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.11%),

粗骨材は青梅産石灰石砕石(最大寸法 20mm, 表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.67%, F.M.6.57)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とポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を使用した。

本試験では圧送試験の間に発生するコンクリートの経時に伴うスランブのロスを制御するため、フレッシュ性状(目標スランブ 12.0±2.5cm, 目標空気量 4.5±1.5%)を圧送試験開始後 90 分間保持できる配合とした。今回の実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。

#### 3.3 実験結果

今回の実験で得られた積算受圧量に対するスランブの低下量を図-5に示す。この結果から、圧送に伴う繰返し加圧によりコンクリートの積算受圧量が大きくなるほど、スランブの低下量は大きくなり、シリンダーA側とB側の直管内でのスランブ低下量の差も徐々に大きくなっていく。これは、圧送により配管内でコンクリートが繰返し加圧され、積算受圧量が大きくなるほど材料分布の不均一性が進むため、スランブ低下量の差も大きくなると考えられる。なお、シリンダーA側はB側よりスランブ低下量が大きいため閉塞が進行している。また、図-5の許容積算受圧量を超えたスランブ低下量の変化を見るとシリンダーA側とB側の差が最も大きくなり、閉塞時にはA側とB側で同じスランブ低下量となった。

以上より、本試験におけるコンクリートの品質変化の特異点は、シリンダーA側とB側のスランブ低下量の差が徐々に大きくなる過渡期にあり、配管中での材料分布の不均一性がある程度進んだ段階にある。このことから、本試験方法による許容積算受圧量とコンクリートの品質変化特異点との整合性を確認できたため、ポンプ圧送性を判定する指標として、その妥当性を示すことができた。

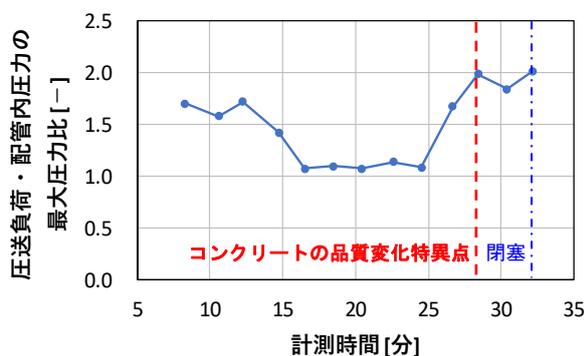


図-4 圧送負荷・配管内圧力の最大圧力比の変化

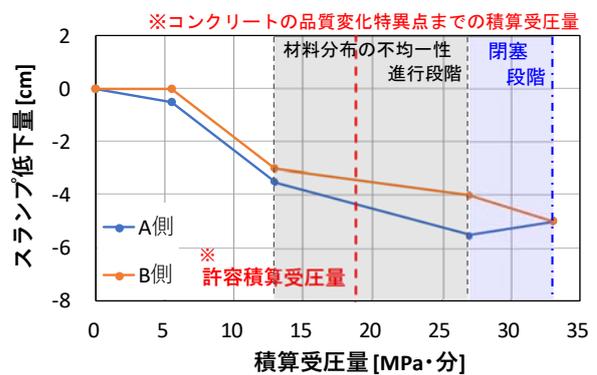


図-5 積算受圧量に対するスランブの低下量

表-1 圧送に伴うコンクリートの品質変化特異点を確認するための実験に使用するコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 [mm]	水セメント比 [%]	スランブ [cm]	空気量 [%]	細骨材率 [%]	単体量 [kg/m <sup>3</sup> ]					
					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	46	148	296	859	1018	C×1.5%	C×1.0%

目標スランブ : 12.0±2.5cm, 目標空気量 : 4.5±1.5%

#### 4. ポンプ圧送性に適したコンクリートの配合選定

##### 4.1 本試験による配合選定フロー

従来のコンクリートの配合選定は、図-6 に示す通り、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 W/C の設定
- ②配筋条件や施工条件によるスランブの決定
- ③既往配合から細骨材率 s/a と単位セメント量 C 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
- ⑤単位水量 W を調整し、スランブ及びその保持性を検討  
→ 配合の決定
- ⑥特殊な配合・施工条件の場合には、実施工規模の試験圧送によってポンプ圧送性を確認

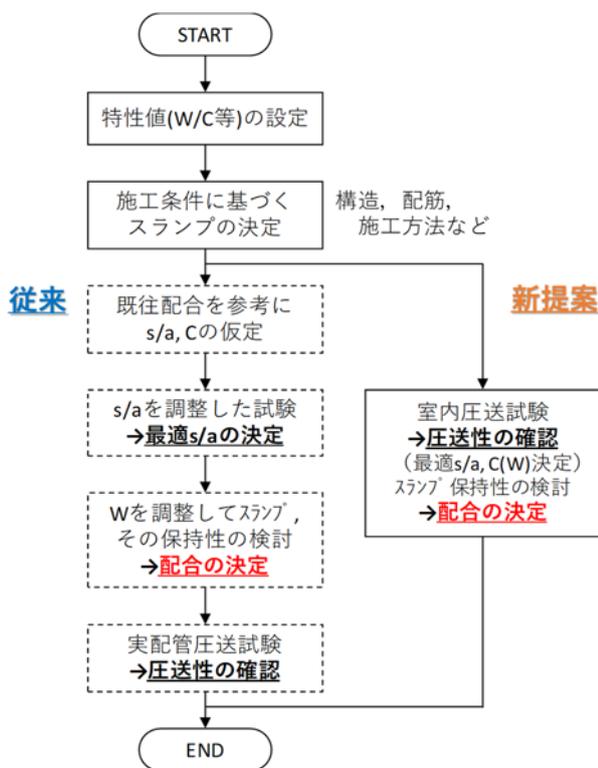


図-6 ポンプ圧送性を考慮した配合選定フロー

著者らは、ポンプ圧送性を考慮したコンクリートの配合選定に関して、本試験を用いた新たな方法を検討したり。その配合選定フローを図-6 に示す。新たに提案する方法は従来と同様に①、②を設定し、③～⑥に代わって室内圧送試験を実施する。新提案の室内圧送試験による配合選定は、次のステップで行う。

- (1) 細骨材率を変化させた 4 配合について室内圧送試験を実施し、その結果からポンプ圧送性に関して最適な細骨材率を求める。
- (2) (1)の最適な細骨材率を用いて単位セメント量を変化させた 4 配合を対象に室内圧送試験を実施し、ポンプ圧送性に関して最適な単位セメント量を求める（ここで、水セメント比が一定であるため、単位水量も決まる）。
- (3) 上記(1), (2)より得られた最適な細骨材率及び単位セメント量（単位水量）を用いたコンクリートの配合を、ポンプ圧送性に対する最適配合として選定する。

このように本試験方法をコンクリートの配合選定に用いれば、通常の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して評価できるため、実際の施工時に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。

本試験方法を用いてポンプ圧送性を考慮したコンクリートの配合選定事例を以下に示す。

##### 4.2 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料は 3.2 と同じものを用いて、圧送試験の間に発生するコンクリートの経時に伴うスランブロスを制御するため、フレッシュ性状（目標スランブ  $15.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、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。表-2 にコンクリートの配合を示す。なお、細骨材率を 42, 46, 48, 52% 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 292, 302, 312, 322kg に変化させた 4 配合（表-2 の No.2-1～2-4）を対象にそれぞれ検討した。

表-2 ポンプ圧送性室内試験による配合選定に用いたコンクリートの配合 (1)

粗骨材の最大寸法 [mm]	水セメント比 [%]	スランブ [cm]	空気量 [%]	No.	細骨材率 [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 A1	高性能 AE 減水剤 A2
20	50.0	15.0	4.5	1-1	42	158	316	768	1068	C×2.0%	—
				1-2	46	160	320	836	992	C×2.0%	—
				1-3	48	163	326	867	947	C×2.0%	—
				1-4	52	169	338	925	862	C×2.0%	—
20	50.0	15.0	4.5	2-1	47	146	<b>292</b>	883	1005	C×1.5%	C×2.2%
				2-2	47	151	<b>302</b>	872	992	C×1.5%	C×1.7%
				2-3	47	156	<b>312</b>	862	981	C×1.5%	C×0.7%
				2-4	47	161	<b>322</b>	852	970	C×1.5%	C×0.1%

目標スランブ：15.0±2.5cm，目標空気量：4.5±1.5%

※No.1 は細骨材率，No.2 は単位セメント量をパラメータ（太字）とする

#### 4.3 ポンプ圧送性室内試験による配合選定の結果

##### (1) 最適細骨材率の特定

細骨材率 42, 46, 48, 52% の各配合に対して室内圧送試験を実施し、得られた加圧履歴から算定した許容積算受圧量の結果を図-7 に示す。この結果から、ポンプ圧送に最適な細骨材率を 47% として特定することができた。

##### (2) 最適単位セメント量の特定

単位セメント量 292, 302, 312, 322kg の各配合に対して室内圧送試験を実施し、得られた加圧履歴から算定した許容積算受圧量の結果を図-8 に示す。この結果から、最適単位セメント量を 304kg に特定することができた。なお、特性値である水セメント比が固定 (W/C=50%) であることから、単位セメント量に応じて単位水量も増減する。そのため、スランブは目標値 (15±2.5cm) となるように高性能 AE 減水剤の添加率を調整して設定する。つまり、本試験による最適単位セメント量の特定では、単位水量と混和剤添加率の最適なバランスも併せて特定することになる。

一般に、コンクリートの配合を選定する際に単位水量を減じて混和剤の添加率を上げるが、今回の知見より、ポンプ圧送性を考慮した場合には最適な単位水量と混和剤添加率のバランスを考慮する必要があることを示した。

##### (3) 最適配合の許容積算受圧量の確認

(1), (2) で特定された最適細骨材率と最適単位セメント量を用いた配合に対して同様に室内圧送試験を実施した。

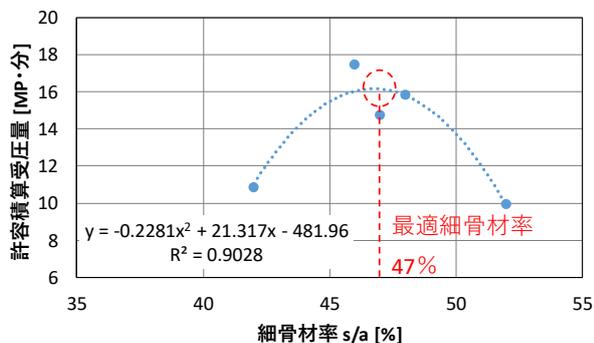


図-7 ポンプ圧送性に対する最適細骨材率

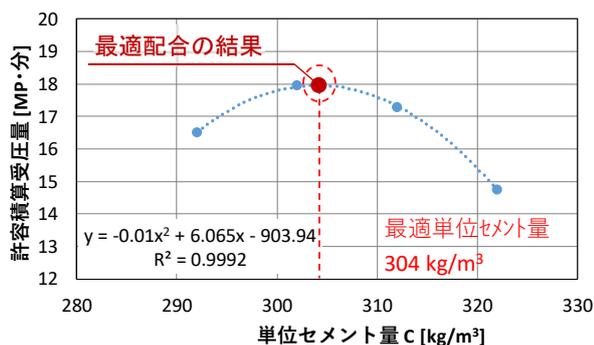


図-8 ポンプ圧送性に対する最適単位セメント量

その結果、最適配合の許容積算受圧量を図-8 に示すと最も大きい値を示したことから、ポンプ圧送性に対する最適配合であると判定できる。また、最適配合の許容積算受圧量が、図-8 に示す近似曲線上にプロットされたことから、本試験によるコンクリートの配合選定方法の妥当性を示すことができた。

#### 5. まとめ

本研究は、コの字に組み立てた配管の両端にシリンダーを設置した室内試験装置を用いて、圧送中にコンクリートが受けた加圧履歴から求めた許容積算受圧量を、ポンプ圧送性の判定指標として適用可能か検討した。

その結果、本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本試験にて圧送中にコンクリートが受けた加圧履歴のうち、ロードセルで計測した圧送負荷と圧力計で計測した配管内圧力から任意時間における一波形の最大圧力比の変化を確認した。その結果、最大圧力比が大きく変化した時点コンクリートの品質変化特異点として特定することができた。
- (2) 同一配合のコンクリートに対して、任意の積算受圧量となるように加圧回数を調整して室内圧送試験を実施し、2本の直管における各試料のスランブを確認した。その結果、加圧回数が多く、積算受圧量が高いほどスランブの低下量が大きく、各直管内のスランブ低下量の差が大きくなることが分かった。また、許容積算受圧量を超えて加圧すると、両方の直管内のスランブ低下量が最大値に達することが確認でき、コンクリートの品質変化特異点の妥当性を示すことができた。
- (3) 本試験による配合選定を行った結果、各配合の許容積算受圧量からポンプ圧送に最適な配合を特定することができた。この結果から、本試験の許容積算受圧量をポンプ圧送性の判定指標に適用できる可能性を示した。

今後、実機での試験圧送において配管内圧力の履歴や配管延長方向の圧力分布などを計測して、圧送中に筒元から筒先までにコンクリートが受ける積算受圧量を算定し、室内圧送試験での許容積算受圧量と比較する事例<sup>8)</sup>を増やす計画である。最終的には、本試験方法を用いて施工条件に応じたコンクリート配合の圧送可否の判定や圧送可能距離の算定などができるようにしたいと考えている。

#### 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) 共田昌一, 高見錦一, 中村成春, 岩清水隆, 木村芳幹, 山崎順二, 山田藍, 永田哲夫, 浅田武彦, 豊田裕, 岸繁樹: 近畿地区における圧送従事者への閉塞事例に関するアンケート調査の分析, 第1回全国圧送技術大会論文報告集, pp.31-34, 2018
  - 3) 豊田裕, 山崎順二, 中村成春, 岩清水隆, 木村芳幹, 高見錦一, 山田藍, 永田哲夫, 浅田武彦, 共田昌一, 岸繁樹: 実施工におけるコンクリートの閉塞事例に関する考察, 第1回全国圧送技術大会論文報告集, pp.35-38, 2018
  - 4) 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
  - 5) 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
  - 6) 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
  - 7) 橋本貴之, 梁俊, 坂本淳, 丸屋剛: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1143-1148, 2018
  - 8) 梁俊, 橋本貴之, 坂本淳, 丸屋剛, 古川成光, 三坂浩昭, 徳永光宏: 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よる圧送可能距離の検討, 土木学会第73回年次学術講演会, V-027, pp.53-54, 2018