

論文 フレッシュコンクリート試験と平均管内圧力による圧送性評価の関係

太田 健司*1・南 浩輔*2・橋本 紳一郎*3・北野 潤一*4

要旨：本研究では、配合条件の異なるコンクリートに対して加圧ブリーディング試験や間隙通過性試験、タンピング試験を適用し、得られたフレッシュ性状試験の結果に対して、平均管内圧力を用いて圧送性評価を行った。その結果、前述のフレッシュ性状試験の結果に、新たな着目点として加圧ブリーディング試験の初期における脱水量やタンピング回数とフローの変化量などを評価に取り入れることで、コンクリートの圧送に与える配合の特性が評価できる可能性を示した。

キーワード：フレッシュコンクリート、管内圧力、加圧ブリーディング、タンピング、間隙通過性

1. はじめに

建設現場のコンクリート工事においては、少子高齢化に伴い技術者が減少していることなどから施工の省力化や効率化が進められている。コンクリートの打込みについても、現在はコンクリートポンプを用いた打込みが主流となり搬送効率の飛躍的な向上が図られている。一方、コンクリートの製造にあたっては、天然骨材の枯渇を補う手段として、混和剤の技術が発展し、性能が飛躍的に向上した結果、使用できる材料は多様化し、施工の用途に応じて多種多様な配合が産み出されている。

このようにコンクリートが多様化している中でも、フレッシュコンクリートの品質管理はスランプ試験や空気量試験による受入検査で判断されている。しかし、受入検査で品質管理値を満足したフレッシュコンクリートにおいても、圧送中に生じる材料分離等の影響で配管が閉塞するトラブルや、場合によっては配管破裂に至る事故が発生している。このような中で、フレッシュコンクリートの圧送性を事前に評価する簡易な試験方法として、「土木学会 コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版]」¹⁾においては、加圧ブリーディング試験や変形性評価試験といった試験方法が提案され、「土木学会 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針[2016 年版]」²⁾（以下、施工性能指針と記す）においては、ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験やタンピング試験を用いたフレッシュコンクリートの品質評価手法の検討が進められている。

本研究では、単位セメント量や単位粗骨材量をパラメーターとした配合の異なるフレッシュコンクリートを用いて、加圧ブリーディング試験や間隙通過性試験、タンピング試験により得られる情報と、圧力計を用いた管内

圧力計測により得られる平均管内圧力とを比較することで、圧送性評価について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合の選定条件

本実験で使用した使用材料を表-1に、配合とフレッシュコンクリート受入検査結果を表-2に示す。なお、実験に使用したコンクリートはアジテータ車に 4.25m³ 積載し運搬した。

実験で検討した配合については、レディーミクストコンクリート工場において JIS 認証されている配合：24-8-20N を基準とし、単位水量および単位粗骨材量一定のもと、施工性能指針を参考に、スランプ 8cm のフレッシュコンクリートにおける圧送性を確保するための単位セメント量の下限値の目安を下回る配合として、単位セメント量を 30kg/m³ 低減したものをを用いた。また、基準配合と同等の粘性とするため、単位水量および単位セメント量を一定（ペースト量一定）として、単位粗骨材量が最大で 400l/m³ 程度となるように細骨材率を 3%低減させた配合とした。その他の配合として、単位セメント量を 30kg/m³ 増加した配合や細骨材率を 3%増加した配合についても検討を行った。

上記に示した配合については、事前に室内配合試験を実施し、品質管理目標のスランプおよび空気量を満たすことを確認している。室内配合試験における品質管理基準は、実機ミキサによる練り混ぜ効率の変動やアジテータ車による運搬等を考慮して、目標スランプ 11.0±1.0cm、目標空気量 5.0±0.5%として管理した。なお、圧送実験における荷卸し地点の品質管理は、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」に準拠し、スランプ 8.0±2.5cm、

*1 前田建設工業(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 前田建設工業(株) 技術研究所 生産性革新技術研究室 工修 (正会員)

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博(工) (正会員)

*4 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

空気量 4.5±1.5%で管理した。

室内配合試験における目視観察では、C-30kg や s/a-3% の配合は変形性が悪く、材料分離傾向にあった。一方、C+30kg の配合については粘性が高い配合であり、s/a+3% については良質なフレッシュ性状を示した。このように室内配合試験では、コンクリートの配合によるフレッシュ性状の差を確認することができた。

2.2 試験概要

2.2.1 フレッシュ性状試験

フレッシュコンクリート試験は、JSCE-F 502「加圧ブリーディング試験方法（案）」、JSCE-F 701「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法(案)」に準拠して実施した。また、タンピング試験は、施工性能指針を参考にした。

2.2.2 圧送試験で用いた配管経路および圧力計測位置

写真－１に圧送試験で用いた配管経路の全景および実験状況を、図－１に配管図を示す。本検討における圧送試験では、ピストン式のコンクリートポンプ車（標準圧送時の最大吐出量 100m³/h、最大吐出圧力 5.6MPa）を用いてフレッシュコンクリートを圧送した。配管は、外径が 125A（5B）の水平管および流入側と流出側の外径が異なる 2 種類（流入側→流出側：175A（7B）→150A（6B）、150A（6B）→125A（5B））のテーパ管を用いた。配管の経路は、コンクリートポンプ車の吐出口から、外径が 7B→6B および 6B→5B のテーパ管を接続し、その後、配管の延長が 35.9m（水平換算距離：40.9m）となるように 5B の水平管を配管した。また、圧送の際に配管内の未充填による管内圧力計測への影響を排除するため、筒先に対して上り勾配（本検討では約 4.4%）を設けることで満管状態を維持できるように配慮した。圧力計測は、水平換算距離 10.65m（P1）、13.15m（P2）、15.65m

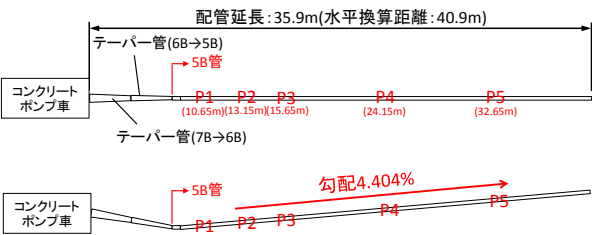
（P3）、24.15m（P4）、32.65m（P5）の位置でそれぞれ測定を行い、圧送速度は、理論吐出量で 30m³/h、40m³/h および 50m³/h の 3 水準とした。なお、本稿においては圧送速度 30m³/h および 50m³/h で圧送した結果を用いて説明する。

3. 粗骨材の粗粒率がフレッシュコンクリートの間隙通過性試験およびタンピング試験に与える影響

本検討においては、配管長や配管径の影響なども考えられるが、単位セメント量や細骨材率を変化させたにも関わらず、どの配合においても順調に圧送できる結果となった。また、受入れ時の目視観察から、事前の室内配合試験に比べ、配合による明確な差を確認することができず、いずれも良好なコンクリートと判断された。そのため、要因の検討として圧送に使用した同じロットの骨材を貯蔵ビンから採取して骨材試験を実施した。試験は、JIS A1102「骨材のふるい分け試験方法」、JIS A 1103「骨材の微粒分量試験方法」に準拠した。その結果、本検討で使用した粗骨材は、粗骨材粒径 15mm 以上の骨材が含まれる割合が 10%程度と粒径が全体的に細かいこと、また、骨材中に含まれる 75μm 以下の微粒分量が 0.9～2.7% 含まれており（表－１参照）、骨材中の総粉体量が 30kg/m³ 以上になることが確認された。事前の室内配合



写真－１ 配管経路の全景



図－１ 配管図（上側：平面図，下側：側面図）

表－１ 使用材料

項目	記号	種別	密度(再試験) [g/cm³]	骨材の 微粒分量[%]	骨材の 粗粒率[%]
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	-	-
水	W	工業用水・上澄水	1.00	-	-
山砂	S1	千葉県君津市産	2.61	0.879	2.75
砕砂	S2	栃木県佐野市産	2.63(2.61)	2.657	3.09
碎石2005	G1	北海道北斗市産	2.70(2.71)	2.734	6.35
	G2	栃木県栃木市産	2.71	1.204	6.54
混和剤	Ad1	AE減水剤(高機能タイプ)	1.04~1.10	-	-
	Ad2	AE剤	1.03~1.06	-	-

表－２ 配合表と受入検査結果の一覧

No.	配合名	W/C	s/a	単位量(kg/m³)								スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T (°C)	圧送
				W	C	S1	S2	G1	G2	Ad1	Ad2				
1	24-8-20N	59.2	45.6	162	274	632	210	518	520	2.74	1.0A	10.0 5.5	3.5 2.6	19.4 22.3	順調
2	C+30kg	53.2	44.9	162	304	613	205	518	520	3.34	1.5A	10.0 5.0	3.5 2.6	21.2 24.5	順調
3	C-30kg	66.2	46.4	162	244	650	218	518	520	2.93	0.5A	9.5 5.5	4.1 2.5	19.6 21.1	順調
4	s/a+3%	59.2	48.6	162	274	673	224	491	491	3.56	0.5A	8.5 4.5	4.0 3.2	19.9 20.6	順調
5	s/a-3%	59.2	42.6	162	274	590	197	548	547	2.33	2.0A	9.5 5.0	4.9 2.9	19.6 19.9	順調

※フレッシュ試験結果：上段が荷卸し時、下段が圧送後

表－３ 骨材に含まれる微粒分を考慮した配合

No.	配合名	W/P	s/a	単位量 (kg/m³)								スランブ (cm)	空気量 (%)	C. T (°C)	圧送
				W	C+P	S1	S2	G1	G2	Ad1	Ad2				
1	24-8-20N	53.0	45.9	162	306	626	204	504	514	2.74	1.0A	10.0 5.5	3.5 2.6	19.4 22.3	順調
2	C+30kg	48.3	45.1	162	335	608	200	504	514	3.34	1.5A	10.0 5.0	3.5 2.6	21.2 24.5	順調
3	C-30kg	58.7	46.6	162	276	644	212	504	514	2.93	0.5A	9.5 5.5	4.1 2.5	19.6 21.1	順調
4	s/a+3%	53.1	48.8	162	305	667	218	478	485	3.56	0.5A	8.5 4.5	4.0 3.2	19.9 20.6	順調
5	s/a-3%	52.9	42.9	162	306	585	192	533	540	2.33	2.0A	9.5 5.0	4.9 2.9	19.6 19.9	順調

※フレッシュ試験結果：上段が荷卸し時、下段が圧送後

表－４ 使用材料

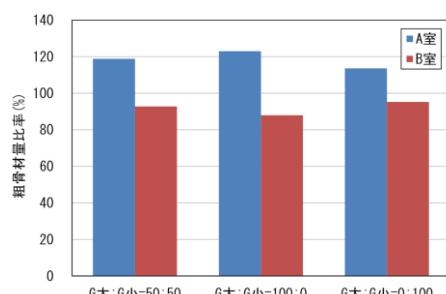
項目	記号	種別	密度 [g/cm³]	骨材の 粗粒率 [%]
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	-
水	W	上水道水	1.00	-
山砂	S	千葉県君津市産	2.58	2.47
碎石	G _大	両神産碎石 (2010)	2.71	7.07
	G _小	両神産碎石 (1305)	2.67	6.23
混和剤	Ad1	AE減水剤	1.04~1.08	-

表－５ 粗骨材の粗粒率が異なるコンクリートの配合

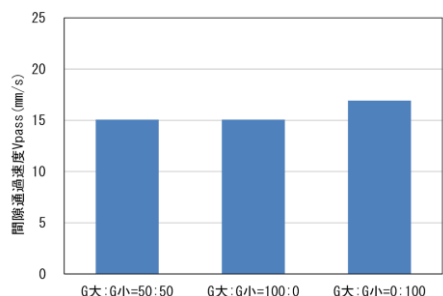
配合名	W/C	s/a	G _{max} (mm)	単位量 (kg/m³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	C. T (°C)
				W	C	S	G _大	G _小			
G _大 :G _小 =50:50	53.3	45.0	20	157	295	818	521	521	9.0	4.7	16.8
G _大 :G _小 =100:0	53.3	45.0	20	157	295	818	1050	0	12.0	4.5	17.1
G _大 :G _小 =0:100	53.3	45.0	13	157	295	818	0	1035	8.0	4.3	17.5



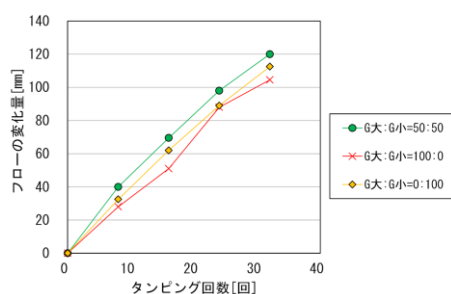
写真－２ 材料分離状況



図－２ 粗粒率と粗骨材量比率の関係



図－３ 粗粒率と間隙通過速度の関係

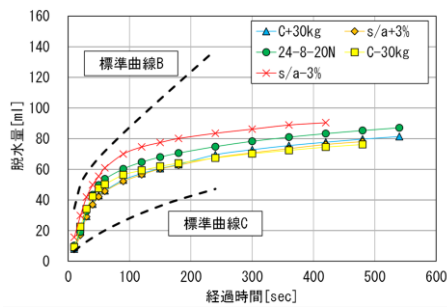


図－４ 粗粒率とタンピングの関係

試験で用いた骨材は、試料調整する際に自然と微粒分がふるい落とされた影響で、微粒分量が少ない傾向にあったと推察される。一方、圧送実験で使用した骨材については、骨材の微粒分がふるい落ちることなくコンクリートが製造され、室内配合試験よりも良好なコンクリートであったと考えられる。骨材試験の結果から、骨材に含まれる微粒分を考慮して修正した配合を表－３に示す。

以上を踏まえて、粗骨材の粗粒率の違いがフレッシュコンクリートの間隙通過性やタンピングに与える影響について改めて検討を行った。使用材料を表－４に示す。なお、骨材の種類は異なるが、基準となる配合は表－２の 24-8-20N と同等の水セメント比ならびに単位セメント量となるよう選定した。しかし、写真－２に示すように、スランブ試験において崩れが生じ、明らかな材料分

離が認められた。この要因として、粗骨材の粗粒率の影響を検討した本実験では砂岩を用いており、骨材中に微粒分がほとんど含まれていない。そのため、コンクリート中の単位粉体量が足りず、材料分離が生じたと考えられる。そこで、セメント量を増加させ、表－３に示す骨材に含まれる微粒分を考慮した配合 (24-8-20N) と同程度の粘性 (水粉体比) となるように配合を再度調整した。修正後の配合を表－５に示す。配合を修正した結果、圧送に用いた配合と同程度の材料分離抵抗性を有する配合を得ることができた。このことから、今回の圧送実験で使用した配合は、骨材の微粒分量がコンクリートの材料分離抵抗性や粘性に強く影響したものと考えられる。この結果は、施工性能指針に示されている圧送性を確保するための、荷卸しのスランブと単位セメント量の関係か



図－5 各種配合と加圧ブリーディングの関係

らは確認できなかった骨材の影響を反映している。

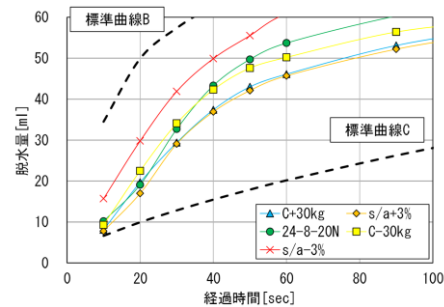
間隙通過性試験で得られた粗骨材の粗粒率と粗骨材量比率の関係を図－2に、間隙通過速度の関係を図－3に示す。試験は、 $G_{大}:G_{小}=50:50$ の配合を基準として、粗粒率の影響を確認するため粗骨材の粗粒率以外の条件は全て同じとした。本検討に用いた粗骨材の粗粒率は、 $G_{大}:G_{小}=100:0$ で7.09、 $G_{大}:G_{小}=50:50$ で6.81、 $G_{大}:G_{小}=0:100$ で6.52である。図－2より、 $G_{大}:G_{小}=100:0$ の配合でA室とB室の粗骨材量比率の差が最大となり、以下、 $G_{大}:G_{小}=50:50$ 、 $G_{大}:G_{小}=0:100$ の順に差分値が小さくなり、粗粒率の違いが粗骨材量比率に表れる結果となった。一方、図－3に示す通り、本検討の範囲では間隙通過速度に大きな差は認められず、単位粗骨材量が $400l/m^3$ より少なく、モルタルの材料分離抵抗性が確保されている条件では、粗骨材の粗粒率が間隙通過速度に与える影響は小さいことがわかる。

粗骨材の粗粒率とタンピング試験の関係を図－4に示す。従来の評価方法に加えて新たな評価軸として、0打時を起点としたフローの変化量とタンピング回数の関係に着目することで、配合が有する特性について検討を試みた。図－4より、いずれの配合も同程度の傾きを有していることがわかる。タンピング試験は、8回毎、断続的に外力を与える試験のため、前述の傾きは配合が持つ粘性や降伏応力の影響を表していると考えられ、定量的なエネルギーを与えた際の変化量（材料分離がない場合）を評価することは、粘性や降伏応力にもとづくモルタルやコンクリートの変形性能の評価につながる可能性が考えられる。なお、本検討の範囲では、粗骨材の粗粒率の違いがタンピング試験におけるフローの変化量に与える影響に大きな差は認められなかった。

4. 配合の違いや圧送の影響がコンクリートのフレッシュ試験に与える影響

4.1 加圧ブリーディング試験

図－5に加圧ブリーディング試験の結果を示し、加圧開始から10秒、20秒、30秒、60秒、120秒、240秒における脱水率を図－6に示す。図－5より、今回の実験では、全ての配合で最終脱水量は標準曲線Bおよび標準



図－6 配合と脱水率の関係

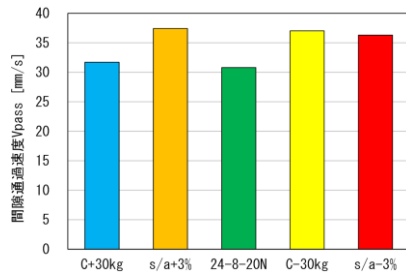
曲線Cの範囲内に収まる結果となっている。

本検討では、従来の評価方法に加えて新たな評価軸として、加圧開始後30秒程度までの加圧初期の脱水量に着目し、配合が有する特性について評価を行った。その結果、s/a-3%で脱水量は最も多く、より軽微な外力を与えることによって脱水すると考えられ、今回の配合の中では材料分離抵抗性が小さいコンクリートと考えられる。一方、C+30kgやs/a+3%は初期においても脱水量が少なく、最終脱水量も少ない。そのため、5配合の中では粘性や材料分離抵抗性の高い配合と考えられる。標準配合の24-8-20Nは中間に位置していることから、試験結果は概ね配合の傾向を捉えていると考えられる。また、脱水量が多くなると予想されるC-30kgの最終脱水量は少なくなっているが、加圧開始から30秒程度までの初期においてs/a-3%を除いた他の配合に対して脱水量が多いことがわかる。その後、時間の経過とともに脱水が抑制され、最終脱水量は小さくなっている。この理由として、出荷時間や出荷量による骨材の表面水率のばらつきや試料採取などが影響した可能性も考えられるが、原因の特定には至っておらず、今後の検討課題としたい。本検討結果より、加圧ブリーディング試験では、最終脱水量に加えて初期の脱水量に着目することで、フレッシュコンクリートが有する材料分離抵抗性や粘性等の圧送への影響を詳細に評価することが可能と考えられる。

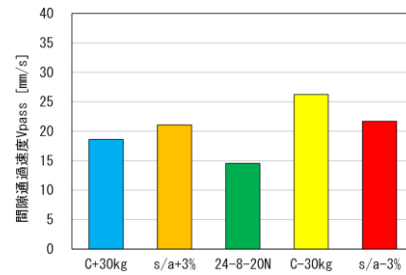
4.2 間隙通過性試験

図－7、図－8に圧送前後の間隙通過速度の結果を、図－9、図－10に圧送前後の粗骨材量比率の結果を示す。

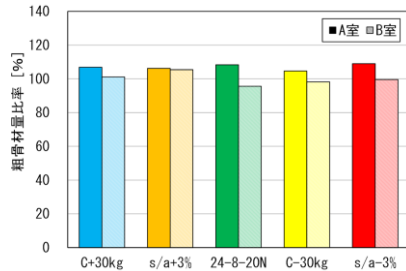
図－7より、間隙通過速度はいずれの配合も30mm/s



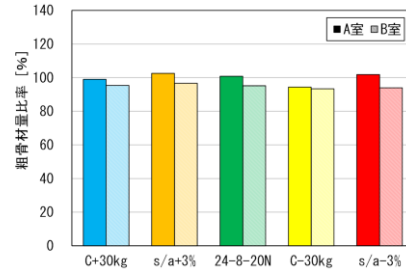
図－７ 荷卸し時の間隙通過速度と配合の関係



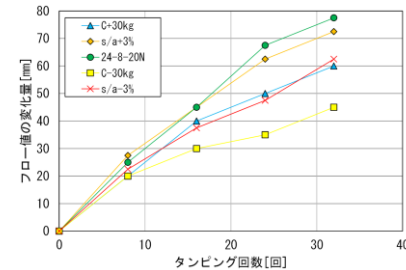
図－８ 圧送後の間隙通過速度と配合の関係



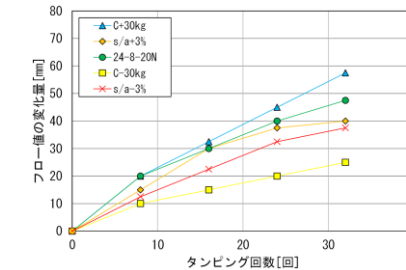
図－９ 荷卸し時の粗骨材量比率と配合の関係



図－１０ 圧送後の粗骨材量比率と配合の関係



図－１１ 荷卸し時のフローの変化量



図－１２ 圧送後のフローの変化量

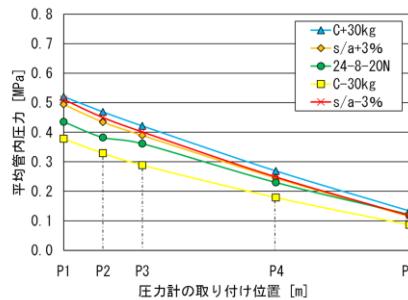
以上となっている。これは、砂岩を用いて実施した間隙通過速度（図－３参照）と比較しても高い値を示している。今回実験に用いた配合は、微粒分の影響により単位粉体量が 275kg/m^3 以上含まれていたことから、コンクリート中のモルタル分もある程度確保されたこと、粗骨材の粒径が比較的細かったことから、いずれの配合も間隙通過性が良好となり、配合の違いが表れにくい結果になったものと考えられる。また、間隙通過性試験は、加振源に棒状のロングバイブレータを用いており、流動障害（鉄筋）の近傍に加振源があることや加振エネルギーの大きさから、ある程度良好なコンクリートでは差が生じにくかったものと推察される。一方、図－８に示すように経時変化や圧送に伴うフレッシュコンクリートの変化は、間隙通過速度の大幅な低下として明確に捉えられており、施工性能指針にも示されているように、圧送や打込みに対して不具合が生じ易いフレッシュ性状を有する配合に対しては有用な試験方法と考えられる。

図－９より粗骨材量比率について比較すると、粗骨材の粗粒率をパラメータとした試験結果（図－２参照）ほど明確ではないが、単位粗骨材量の最も多い s/a-3% で A 室と B 室の差が大きく、単位粗骨材量が最も少ない s/a+3% で最小を示し、粗骨材の影響が結果に表れている。

また、圧送後についても、流動障害を通過した B 室における粗骨材量比率が全て 100% 未満となり、間隙通過速度と同じように経時変化や圧送に伴うフレッシュコンクリートの変化が表れているものと考えられる（図－１０参照）。

4.3 タンピング試験

図－１１および図－１２に圧送前後のタンピング試験におけるフロー値の変化量を示す。図－１１より、圧送前は 16 打以降の変化量の伸びが小さくなる等、配合間の差が出る結果となったが、C-30kg を除き配合の違いは明確ではない。これは、いずれの配合も単位粉体量がある程度確保された配合であり、練上がりから間もない荷卸し時は、コンクリートの流動性の差が小さかったためと考えられる。一方、図－１２より、圧送後の結果に着目すると、C+30kg を除いて大幅にフロー値の変化量が低下している。フロー値の変化量は、C-30kg が最も小さく、次いで s/a-3% が小さい値を示しており、圧送によるフレッシュ性状の変化が大きい配合と考えられる。また、空気量の低下も他の配合に比べ 1.0% 余り大きく低下している（表－３参照）。一方、C+30kg は、圧送前後でフロー値の変化量に大きな差はなく、打たれ強い（圧送による品質の変化が小さい）圧送性に富んだ配合と推察され



図－１３ 30m³/h 圧送時の平均管内圧力

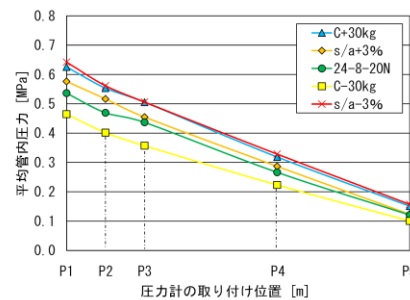
る。前節でも述べたが、今回実験に用いた配合は、単位粉体量が確保されており、いずれの配合も良好なフレッシュ性状を示していたが、圧送を経たことにより、配合が持つポテンシャルの差が表に現れたものと推察される。この結果は、粗骨材の粗粒率について検討した場合と同様に、タンピング回数とフローの広がり（傾き）に着目することで、コンクリートの粘性や降伏応力などを評価できる可能性が考えられる。

5. フレッシュコンクリートの配合と管内圧力計測による圧送性との関係

30m³/h および 50m³/h で圧送した際の平均管内圧力を図－１３および図－１４に示す。なお、平均管内圧力については、圧送開始直後と終了直前の計測値を除いて平均管内圧力の算出を行った。

図－１３より、30m³/h で圧送すると、C+30kg の平均管内圧力が最も高くなっており、高い粘性を有していると判断される。逆に、C-30kg の平均管内圧力は最も小さくなっており粘性が低いと考えられ、その他の配合は中間に位置している。この結果は、圧送後のタンピング試験結果（図－１２参照）と概ね一致しており、30m³/h 程度の圧送速度においてはタンピング試験で圧送性を評価できる可能性が示唆される。荷卸し時においても、例えばフレッシュコンクリートの変形性能評価試験実施後にタンピング試験を行うなど、圧送と同等の外力を与えることにより、圧送性を評価できる可能性が考えられる。

圧送速度を 50m³/h と速くすると、図－１４に示すように、平均管内圧力は s/a-3% が最も高くなっている。圧送速度を速くすることで、単位粗骨材量の影響など、粘性以外の原因が表れていると推察され、コンクリートの性状が変化しやすい配合と考えられる。ここで、間隙通過性試験の粗骨材量比率に着目すると、粗骨材の粗粒率や単位粗骨材量の多い配合（s/a-3%）で、A 室と B 室の粗骨材量に差が表れている（図－２、図－９参照）。これは、外力によって粗骨材同士の噛み合わせや鉄筋の障害により粗骨材が停滞する、すなわちコンクリートの性状が変化することを評価していると考えられる。また、加圧ブリーディング試験では s/a-3% の脱水量が多く、外力によ



図－１４ 50m³/h 圧送時の平均管内圧力

ってコンクリートの性状が変化する可能性が高いことが伺える。粗骨材量比率や加圧ブリーディングを比較することで、圧送におけるコンクリートの性状が変化する現象を捉えられると推察される。

加圧ブリーディング試験やタンピング試験、間隙通過性試験を適宜組み合わせることで評価することにより、コンクリートを圧送する際の粘性や粗骨材などの影響を評価できる可能性が示唆された。今後は、上記試験により評価されるフレッシュ性状と圧送性との関係について更に検討を進めることで、室内フレッシュ試験によりコンクリートの圧送に与える配合の特性を評価できるものと考えられる。

6. まとめ

本実験では、コンクリートの各種フレッシュ試験により得られたフレッシュ性状と圧力計測により得られる平均管内圧力の関係について検討した。以下、得られた結果を示す。

- (1) 加圧ブリーディング試験は、初期の脱水量に着目することで材料分離や粘性の傾向を相対的に評価できる可能性が示された。
- (2) タンピング試験は、圧送後においてフローの変化量を比較することで材料分離抵抗性や粘性などを評価できる可能性が示された。
- (3) 間隙通過性試験は、粗骨材量比率を比較することで、圧送性に及ぼす粗骨材量の影響を評価できる可能性が示された。
- (4) 加圧ブリーディング試験やタンピング試験、間隙通過性試験を適宜組み合わせることで、コンクリートの圧送に与える配合の特性を評価できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版], 土木学会, 2012
- 2) 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針[2016 年版], 土木学会, 2016