

論文 パラフィンエマルジョンを混和したコンクリートの圧送性 および耐凍害性

田場 祐道*1・岡田 明也*1・早川 隆之*2・橋本 紳一郎*3

要旨: 本研究では、凍害対策に有効なパラフィンエマルジョンを使用したコンクリートの圧送性および圧送前後のコンクリートのフレッシュ性状や凍結融解抵抗性を中心に検討した。その結果、パラフィンエマルジョンを使用したコンクリートは、圧送管内での脱水量が少なく変形性に優れるため、閉塞の危険性が低く、安定した圧送が可能であった。また、圧送により空気量は減少するが、パラフィンエマルジョンを使用したコンクリートは、コンクリート中に形成されるパラフィン集合体によって、圧送後のコンクリートにおいても優れた凍結融解抵抗性を有していた。

キーワード: 圧送, 空気量, パラフィン, エマルジョン, 凍結融解抵抗性

1. はじめに

日本の寒冷地域では、コンクリートの凍害による劣化が問題となっている。一般に、コンクリートの凍結融解抵抗性を向上させる方法として、AE 剤によるエントレインドエアの導入があり、JISA 5308 (レディーミクストコンクリート) では、凍結融解抵抗性等の観点から普通コンクリートの空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ と定めている¹⁾。さらに、東北地方では、凍害劣化に関する独自のガイドラインが制定されており、各地域の凍害ランクに応じた対策が示されている。例えば、特に厳しい凍害環境下においては、目標空気量を $5.0 \sim 6.9\%$ とし、水セメント比 45% 程度とするか、あるいは、目標空気量を 7.0% (JIS 適用外) としている²⁾。

しかし、コンクリートの練上り直後に所定の空気量が確保できた場合においても、アジテートや施工時の圧送、バイブレータによる振動締固め等により、打込時の空気量は $1 \sim 2\%$ 程度減少することが報告されており^{3), 4)}、管理下限値を下回る可能性が懸念される。また、 6.0% 以上の空気の導入は圧縮強度の低下や乾燥収縮の増加を招くほか、レディーミクストコンクリート工場で製造する際、混和剤量の調整が難しいこと等が課題としてあげられる。

そのため、連行空気に寄与しない新たな凍害対策が求められている。先行技術の一つに、疎水性化合物であるパラフィンエマルジョンの添加が挙げられる。これを混和したコンクリートは、低空気量にも関わらず凍結融解

抵抗性を向上することが報告されている⁵⁾。一方で、施工性の定量的な評価や施工後のコンクリートの耐久性は評価されていない。そこで本検討では、パラフィンエマルジョンを混和したコンクリートをピストン式コンクリートポンプ車で圧送を行い、パラフィンエマルジョンの添加有無による圧送性への影響ならびに圧送前後のコンクリートを採取し、フレッシュ性状、強度発現性、水分浸透抵抗性、凍結融解抵抗性について評価した。

2. 試験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を表-1 に、コンクリートの配合を表-2 に示す。パラフィンエマルジョン (以下、エマルジョン) は、市販品である平均粒子径が $0.5 \mu\text{m}$ 、固形分率 30% のものを使用した。配合は PL を基本として、単位水量の 4.5kg/m^3 をエマルジョンに置換した PEm の 2 配合とした。また、荷卸し時の目標スランプは $12.0 \pm 2.5 \text{cm}$ 、目標

表-1 使用材料

材料	記号	種類・名称	密度 (g/cm ³)
練混ぜ水	W	上水道水	1.00
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16
細骨材	S	陸砂	2.60*
粗骨材	G	砕石	2.62*
AE 減水剤	Ad	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体	—
パラフィンエマルジョン	P	パラフィン平均粒子径: $0.5 \mu\text{m}$ パラフィン固形分率: 30%	1.00

*表乾密度

表-2 コンクリート配合

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad (kg/m ³)	P (kg/m ³)
					W	C	S	G		
PL	12 ± 2.5	4.5 ± 1.5	58.6	42.0	170	290	757	1053	1.74	—
PEm										

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所

*3 千葉工業大学 創造工学研究科 都市環境工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

表-3 試験項目

試験項目	規格	コンクリートを採取した工程	備考
フレッシュ性状	スランブ試験	JIS A 1101	練直, 荷卸し時, 圧送後, 再圧送後, 静置後
	空気量試験	JIS A 1128	練直, 荷卸し時, 圧送後, 再圧送後, 静置後
	加圧ブリーディング試験	JSCE-F 502	荷卸し時
	ベーンせん断試験	JGS 1411	荷卸し時, 圧送後
圧送性	管内圧力	—	—
	振動加速度	—	—
硬化性状	圧縮強度試験	JIS A 1108	練直, 荷卸し時, 圧送後, 再圧送後
	凍結融解試験	JIS A 1148	練直, 荷卸し時, 圧送後, 再圧送後
	気泡間隔係数の測定	ASTM C457-16	練直, 荷卸し時, 圧送後, 再圧送後
	水分浸透抵抗性試験	JSCE-G 582	荷卸し時, 圧送後

空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

2.2 コンクリートの製造および運搬

コンクリートの練り混ぜは、レディーミクストコンクリート工場で行った。練量は 3.0m^3 とし、練混ぜ時間は 120 秒とした。排出後、フレッシュ性状を確認して、アジテータ車 (10t 車) に積載し千葉県多古町の圧送試験場まで運搬した。運搬時間は 30~35 分であった。



写真-1 試験場の全景

2.3 圧送試験

(1) 配管

圧送試験場の全景を写真-1 に示す。試験には、125A (5B) の水平管、流入側と流出側の外径が異なる 3 種類 (流入側→流出側: 175A (7B)→150A (6B), 150A (6B)→125A (5B), 125A (5B)→100A (4B)) のテーパ管、90° ベント管 (5B) およびフレキシブルホース (4B) を使用し、これらを図-1 に示すように支持架台上に水平となるよう配置した。また、管内圧力計を水平換算距離 19.1m (P1), 31.6m (P2), 50.5m (P3), 63.0m (P4), 84.9m (P5), 94.4m (P6), 110.3m (P7) の 7ヶ所に、振動加速度計を水平換算距離 37.6m にある水平管の入口 (A1) とベント管内 (A2) に計 2ヶ所に取り付けた。この時の全体の水平換算距離は 148.5m であった。なお、圧送の際に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を設けることで満管状態を維持できるようにした。

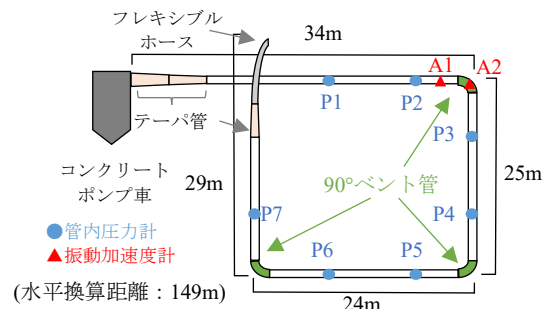


図-1 配管図

(2) コンクリートの圧送

圧送試験場に到着したコンクリートのフレッシュ性状を確認した後、ピストン式ポンプ車 (最大吐出量: $50\text{m}^3/\text{h}$) で圧送した。試験当日の外気温は 12°C 程度であった。圧送速度は、 $20\text{m}^3/\text{h}$, $30\text{m}^3/\text{h}$ および $40\text{m}^3/\text{h}$ とした。また途中、施工時の中断を模擬して、圧送を 30 分間停止させた後、再圧送 (圧送速度 $30\text{m}^3/\text{h}$) を行った。

(3) 試験項目

試験項目を表-3 に、試験フローを図-2 に示す。コンクリートは、練上がり直後 (練直)、現場到着時 (荷卸し時)、吐出量 $30\text{m}^3/\text{h}$ で圧送後 (圧送後)、および吐出量

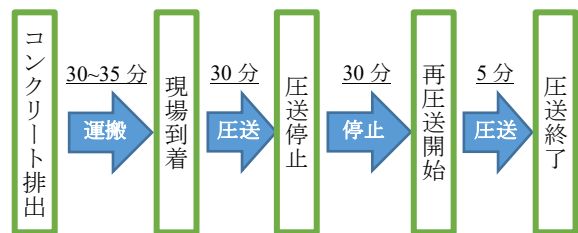


図-2 試験フロー

$30\text{m}^3/\text{h}$ で再圧送後の工程において採取することを基本とした。なお、スランブおよび空気量試験に限り、荷卸し時から 30 分間練船で静置させたコンクリートについても実施した。

圧縮強度試験、水分浸透抵抗性試験、凍結融解抵抗性試験、および気泡間隔係数測定用の供試体の養生は、気中 (現場) にて 3 日間型枠内に静置後、25 日間水中養生 (20°C) とした。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

(1) スランプ

各工程において採取したコンクリートのスランプを図-3に示す。いずれの配合においても荷卸し時のスランプは目標値の範囲内であった。PLのスランプは、練直(13.0cm)→荷卸し時(12.5cm)→圧送後(11.5cm)の順で小さくなった。30分練船静置したものは、9.0cmであった。一方、PEmのスランプは、練直、荷卸し時および30分練船静置は同程度であったが、圧送後は4.0cm増加し、16.0cmであった。これは、3.1(3)で後述する通り、圧送によりコンクリートの変形性が向上したことが影響しているものと考えられる。また、PLとPEmではAE減水剤の量が異なっており、この差が圧送後におけるコンクリートのスランプに影響を及ぼしている可能性も考えられるが、宮田らが行った調査⁹⁾によれば、AE減水剤を使用したコンクリートの圧送後のスランプは圧送前と比べて減少する傾向を示すと報告されており、本研究においてもPLが同様の傾向を示していることから、PEmのスランプの増加はエマルジョンを混和したことによる影響の可能性が高いものと考えられる。

(2) 空気量

各工程で採取したコンクリートの空気量および気泡間隔係数を表-4に示す。いずれの配合においても荷卸し時の圧力法で測定した空気量は、目標値である $4.5 \pm 1.5\%$ を満足した。また、PLの硬化体の空気量はフレッシュ時の空気量に比べて、若干小さい傾向を示した。施工工程別に比較すると、練直と荷卸し時の値には大きな差は認められないが、圧送後の空気量の低下が著しい。この空気量の低下の程度は、練船に30分間静置(荷卸し時から)していたものより大きいことから、圧送工程によって、気泡が破泡したためと考えられる⁴⁾。一方、PEmのフレッシュ時の空気量は、PLと同様の傾向を示すものの、硬化体の空気量は荷卸し時から圧送後および再圧送後にかけて、若干空気量は低下するものの4.0%以上を維持していた。

福田ら⁷⁾は、エマルジョンを混和したコンクリートの気泡間隔を測定する場合、コンクリート中で集合したパラフィン集合体を気泡として測定してしまうことを報告している。また、岡田ら⁹⁾は、そのパラフィン集合体のサイズが、凍結融解抵抗性の向上に寄与する気泡と同等のサイズ(20~200 μm)であり、エントレインドエアを導入した場合と同様に凍結時の膨張圧を低減し、凍結融解抵抗性を向上することを示している。本測定でも同様に、気泡間隔の測定から算出される硬化コンクリートの空気量は、コンクリート中に存在する20~200 μm 程度のパラフィン集合体を測定しているものと考えられる。このこ

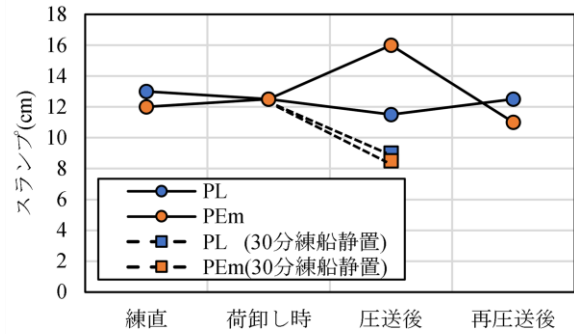


図-3 各工程におけるスランプ

表-4 空気量および気泡間隔係数

配合	採取工程	空気量(%)	硬化体空気量(%)		気泡間隔係数(μm)
			全空気量	150 μm 以下空気量	
PL	練直	3.8	3.5	1.1	306
	荷卸し時	3.9	3.4	1.0	242
	圧送後	2.4	2.8	0.3	468
	再圧送後	2.2	2.1	0.4	415
	荷卸し時+30分静置	2.9	-	-	-
PEm	練直	4.5	4.1	1.6	241
	荷卸し時	4.5	4.7	1.7	248
	圧送後	2.8	4.2	0.9	315
	再圧送後	3.1	4.0	0.7	331
	荷卸し時+30分静置	4.1	-	-	-

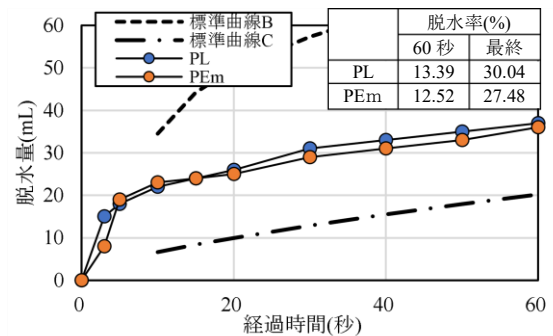


図-4 加圧ブリーディング試験における脱水量

とを裏付けるように、PEmの150 μm 以下の空気量は、測定したいずれの工程においてもPLより多く、圧送後においては3倍以上であった。また、それに対応するように気泡間隔係数についてもPEmの方が小さい傾向を示し、圧送後であっても315 μm であった。

以上のことを踏まえれば、コンクリートは圧送することによって空気量は減少するものの、エマルジョンを添加することで、圧送後のコンクリートにおいてもパラフィン集合体が凍結融解抵抗性の向上に寄与するサイズで存在し、高い凍結融解抵抗性を示した可能性がある。

(3) 加圧ブリーディングおよびベーンせん断試験

加圧ブリーディング試験における経時時間と脱水量の関係を図-4に示す。本検討では、加圧後から3~60秒間の脱水量に着目した。エマルジョンを混和したPEmの脱水量および脱水率は、PLに比べて小さくなったことか

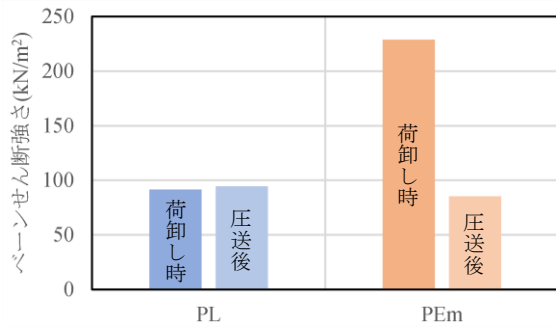


図-5 ベーンせん断強さ

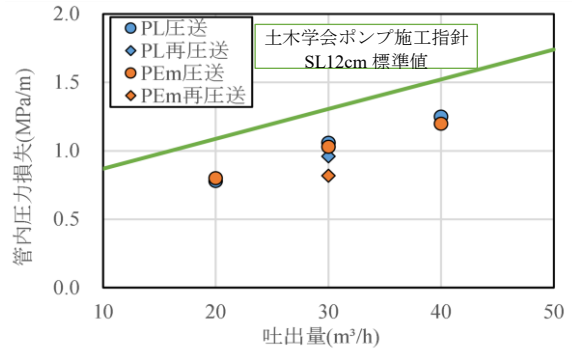
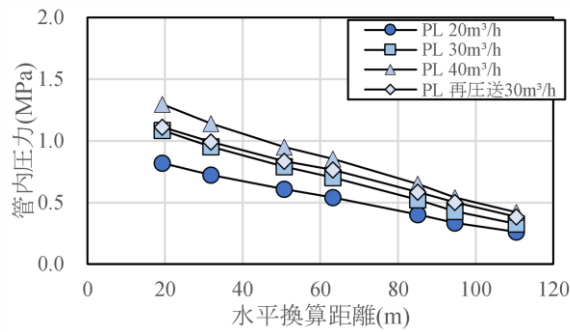
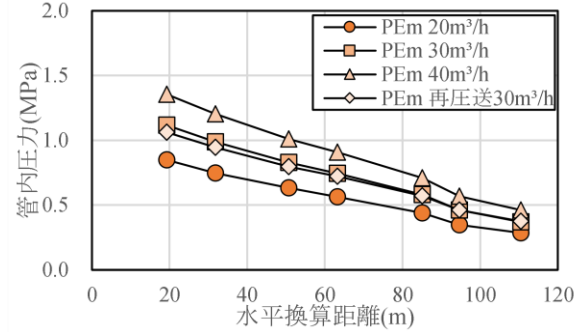


図-6 管内圧力損失

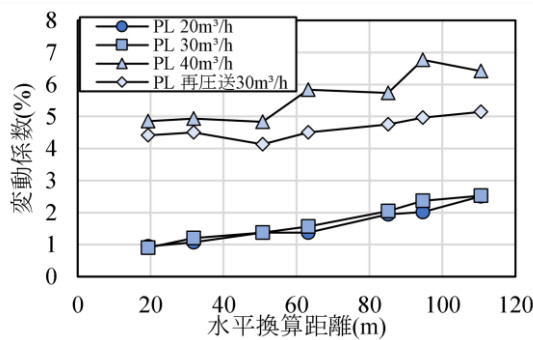


a) PL

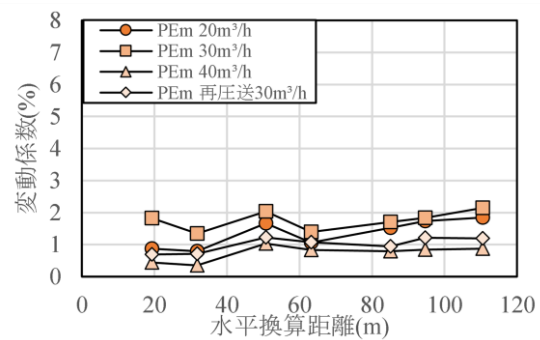


b) PEm

図-7 管内圧力



a) PL



b) PEm

図-8 管内圧力の変動係数

ら、管内閉塞しにくいコンクリートであると考えられる。

荷卸し時および圧送後におけるフレッシュコンクリートのベーンせん断強さを図-5に示す。PLのベーンせん断強さは圧送することで若干増加した。PEmのベーンせん断強さは荷卸し時で230kN/m²であり、同工程時のPLと比べて2倍以上の値であった。これは、エマルジョンを混和することで、コンクリートの粘性が増加することを意味している。一方、圧送後においては、荷卸し時の1/2以下まで減少しPLの圧送後と同程度であった。これらの結果は、スランプ試験の結果とも対応しており、圧送後のPEmのスランプは荷卸し時から大きくなっている。既往の研究⁹⁾において、スランプが16.0cm以下のコンクリートを圧送した場合、配管内において壁面付近のコンクリートがせん断変形するのみで、中心部分のコンクリートは変形せず移動するため圧送後の流動性が低下すると報告されている。しかし、PEmはエマルジ

ンの混和によってパラフィン粒子がセメント粒子の間に充填されることで粘性が増加するものの、圧送時において材料分離を起こさなくコンクリートは変形することとなり、管内のせん断変形領域の増加につながり、結果として圧送後の流動性が高くなったものと考えられる。

3.2 圧送評価

圧送時の管内圧力損失と吐出量の関係を図-6に示す。いずれの配合においても管内圧力損失は、土木学会が定める基準値を下回る値であった。一方、吐出量に関わらずPEmの管内圧力損失はPLに比べて若干小さい値を示した。これは、エマルジョンを混和することにより圧送後の流動性が向上するため、管内壁面との摩擦による圧力損失が小さくなったためだと考えられる。

圧送時のPLおよびPEmの管内圧力を図-7に、変動係数を図-8に示す。いずれの配合においても管内圧力は同程度であり、吐出量の増加に伴い管内圧力は上昇す

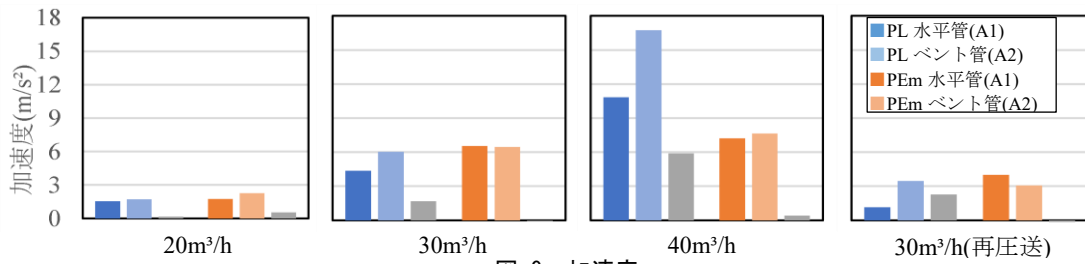


図-9 加速度

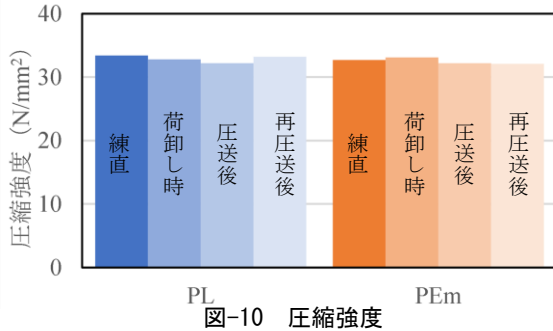


図-10 圧縮強度

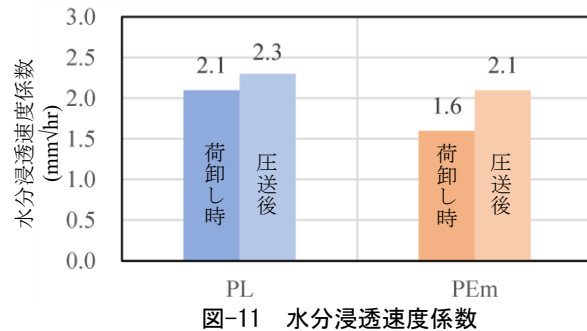
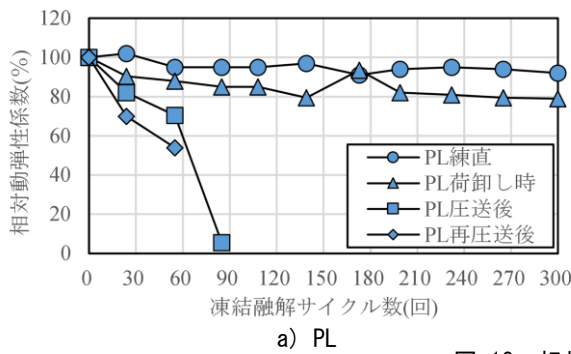
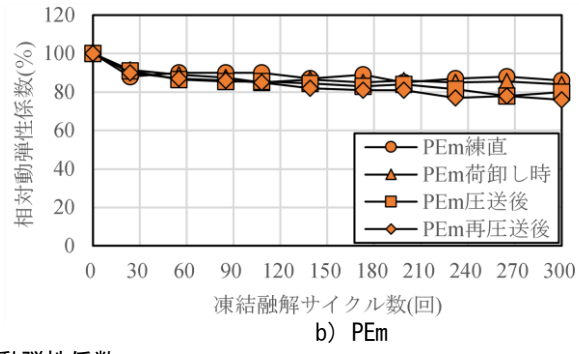


図-11 水分浸透速度係数



a) PL



b) PEm

図-12 相対動弾性係数

る傾向を示した。また、変動係数については、いずれの測定位置においても PEm の方が小さく、特に吐出量 40m³/h および再圧送時（吐出量 30m³/h）においてその傾向は顕著であった。これらのことから、エマルジョンを使用することにより、管内圧力に大きな影響を及ぼすことなく、特に、吐出量が多い場合や工事中断後の圧送圧が高くなる場合において、脈動が少ない安定的な圧送が可能になるものと考えられる。

次に、加速度の結果を図-9 示す。一般に、ベント管は水平管よりも圧送圧が大きくなるため加速度は上昇しやすく、水平管とベント管の加速度の差が大きい程、管内圧力損失の増加や閉塞の危険性が高くなるといわれている⁹⁾。いずれの配合においても管内の加速度は吐出量が増えるにつれ増加する傾向にあり、水平管よりもベント管内において高い傾向がみられた。一方、PEm の水平管とベント管の差分値は PL と比べて小さく、その傾向は吐出量の多いもので顕著であった。既往の研究¹⁰⁾では、コンクリート圧送時の管内閉塞機構として、①加圧によって脱水し骨材とセメントペーストの材料分離が生じ、骨材と圧送管壁面の間で摩擦が生じると圧力が高くなり閉塞する場合と、②コンクリート中の粗骨材や細骨

材、セメントの粒子同士が圧送時の圧力によって摩擦やかみ合いが生じ、最終的に水が分離して閉塞を起こす場合、の二通りがあると報告されている。

上述の通り、PEm は加圧環境下において脱水量が減少し、材料分離抵抗性が向上するとともに、コンクリートの変形性が向上するため、配管内部のコンクリートのせん断変形領域は大きくなり粒子同士の摩擦が小さくなると考えられる。従って、エマルジョンを使用することで、いずれの閉塞条件に対しても対策が可能であり、未混和のものよりも閉塞の危険性が低いコンクリートの製造が可能である。

3.3 圧縮強度および水分浸透抵抗性

圧縮強度試験の結果を図-10 に示す。PL および PEm の圧縮強度は、いずれの工程で採取したコンクリートも同程度であった。

水分浸透抵抗性試験の結果を図-11 に示す。PEm の水分浸透速度係数は、PL と比較して荷卸し時および圧送後ともに小さく、防水性が向上していることが確認された。

3.4 凍結融解抵抗性

凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-12 に示す。PL の練直および荷卸し時に採取したコンク

リートの 300 サイクルにおける相対動弾性係数は、92% および 79%であった。それに対して、圧送後のコンクリートにおいては、85 サイクルにおける相対動弾性係数が 5%となり、再圧送後では 55 サイクルにおいて 60%を下回った。一方、エマルジョンを混和した PEm の相対動弾性係数は、圧送後および再圧送後に採取したコンクリートにおいても 300 サイクル時点で 80%以上を維持しており、優れた凍結融解抵抗性を有していた。これは、前述の通り、エマルジョン中のパラフィン粒子が凍結時の膨張圧力を緩和しているためと考えられる。

以上のことを踏まえれば、コンクリート用混和剤としてエマルジョンを使用することで、施工時の圧送性を向上させることができ、荷卸し時の空気量を JIS の目標値 ($4.5 \pm 1.5\%$) から増加させることなく、圧送後のコンクリートの凍結融解抵抗性を確保できるものと考えられる。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) パラフィンエマルジョンを混和したコンクリートのスランプは、練直および荷卸し時において目標値を満足した。一方、圧送後のコンクリートについては目標から 4cm 増加し 16cm となった。
- (2) パラフィンエマルジョンを混和したコンクリートの圧力法によって測定した空気量は、練直→荷卸し時→圧送後の順で小さくなり、特に圧送による影響が大きかった。一方、硬化後の空気量も同様の順で小さくなる傾向を示すが、その低下量は小さく、圧送後であっても 4.0%であった。これは、20~200 μm に集合したパラフィンを測定しているものと考えられた。
- (3) パラフィンエマルジョンを混和することにより、加圧ブリーディング量が少なく脱水率が減少し、材料分離抵抗性が向上した。
- (4) パラフィンエマルジョンを混和したコンクリートは、圧送管内での脱水量が少なく粘性の増加により変形性が向上したため、閉塞の危険性が低く、脈動が少ない安定した圧送が可能であった。
- (5) パラフィンエマルジョンを混和したコンクリートの圧縮強度は、採取工程に関わらず未混和のものと同程度であった。
- (6) 圧送後および再圧送後に採取した普通コンクリート (PL) は、それぞれ凍結融解 54 および 85 サイクル時点で相対動弾性係数 60%を下回ったのに対し、パラフィンエマルジョンを混和したコンクリートは、圧送後および再圧送後においても凍結融解 300 サイクル時における相対動弾性係数は 80%以上であり、優れた凍結融解抵抗性を有していた。
- (7) 以上のことを踏まえれば、コンクリート用混和剤としてパラフィンエマルジョンを使用することで、施工時の圧送性が向上させることができ、荷卸し時の空気量を JIS 目標値 ($4.5 \pm 1.5\%$) から増加させることなく、圧送後のコンクリートの凍結融解抵抗性を確保できるものと考えられる。

謝辞

本試験を実施するにあたり、千葉工業大学橋本研究室の大学院生の池田信義氏、花咲魁人氏ならびに(株)安藤産業多古生コンクリート工場に多大な協力を戴いた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) JISA5308 (2019) : レディーミクストコンクリート, p.6
- 2) 国土交通省東北地方整備局 : 東北地方における凍害対策に関する参考資料(案), pp.14-18, 2019
- 3) 林 大介, 橋本 学, 池田真理子, 坂田 昇, 緒方英彦 : コンクリートの振動締固めが硬化後の気泡分布に及ぼす影響に関する基礎実験, 土木学会年次学術講習会, pp.439-440, 2015
- 4) 小山田哲也, 太田和彦, 林 大介, 佐久間啓吾 : トンネル覆工コンクリートのスケーリング抵抗性確保に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.847-852, 2015
- 5) 岡田明也, 早川隆之, 中村浩章, 丸田 浩 : 特殊パラフィンエマルジョンによる凍害抑制技術, コンクリート工学, Vol.60, No.10, pp.902-908, 2022.10
- 6) 宮田敦典, 中田善久, 大塚秀三, 岡本佳市 : コンクリートポンプ工法における圧送距離が圧送前後の品質変化に及ぼす一考察, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.688, pp.1035-1044, 2013.6
- 7) 福田悠人, 森下将吾, 本多大希, 濱 幸雄 : 新型凍害抑制剤を添加した高強度コンクリートの凍結融解抵抗性の評価, コンクリート構造物の補修・補強, アップグレード論文集第 21 巻, pp.161-166, 2021
- 8) 芦澤良一, 坂井吾郎, 坂田 昇, 新藤竹文 : ポンプ圧送によるフレッシュコンクリートの性状変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1079-1084, 2006
- 9) 橋本紳一郎, 江本幸雄, 渡辺 健, 橋本親典 : 配管及び計測条件がコンクリートの簡易圧送性評価に与える影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, No.1, pp.268-274, 2014
- 10) 一色真人, 山崎 実, 岡村 甫 : ポンプ圧送時におけるフレッシュコンクリートの変形性, 土木学会論文集, 第 354 号, V-2, pp.91-98, 1985.2