

報告 斜張橋主塔におけるコンクリートの高所圧送性と空気量の変化

高木智子*1・橋本 学*2・松本修治*3・清水恒一郎*4

要旨：高所へ圧送した際のコンクリートの圧送性および圧送前後の空気量の変化を確認する目的で、施工中の斜張橋主塔を対象にこれらのデータを取得した。その結果、計測された圧送負荷は土木学会および日本建築学会に示される値よりも大きくなる結果が得られた。また、フレッシュコンクリートの空気量は、圧送前と比較して圧送後に増加しており、硬化コンクリートについても同様であった。気泡径分布については、1mm以上の気泡径の空気量が減少し、0.3mm未満の気泡径の空気量が増加していることが明らかとなった。

キーワード：高所圧送、管内圧力損失、空気量、気泡径分布、高性能 AE 減水剤

1. はじめに

高橋脚や高層ビルなどでは、コンクリートを打込む際に、高所への圧送を余儀なくされる場合がある。高所へ圧送した際の管内圧力損失や圧送前後のフレッシュコンクリートの性状変化は、圧送条件や使用材料、スランプ、水セメント比などによって異なることが知られている。そのため、実施工中に生じる圧送負荷は、土木学会のコンクリートのポンプ施工指針〔2012 年版〕¹⁾（以下、土木ポンプ指針）や日本建築学会のコンクリートポンプ工法施工指針・同解説 第4版²⁾（以下、建築ポンプ指針）により計算した圧送負荷から大きく乖離する場合がある³⁾。特に、高所へ圧送した際に、想定以上の圧送負荷が作用することがあり、コンクリートポンプの停止や配管の破損、加圧による脱水⁴⁾が原因となる配管閉塞が懸念される。また、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〕⁵⁾（以下、施工性能指針）では、水平換算距離が長くなるほど、スランプの低下量は大きくなることが示されており、スランプの低下による配管閉塞や未充填の発生といった予期せぬ事態が発生する可能性もある。そこで、土木ポンプ指針では、高所へ圧送する場合、実規模の圧送実験を行うことを推奨しているが、圧送実験用のヤードを確保しなければならないことや、高所への圧送は再現できないことから、土木ポンプ指針に基づいて設定した机上検討のみによって圧送計画を立案し、施工される場合がほとんどである。

一方、圧送後のフレッシュコンクリートの性状に関して、施工性能指針⁵⁾では、水平換算距離が長くなるほど空気量が減少することが示されているが、高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートを圧送した場合、空気量が増加するという報告⁶⁾もあり、圧送後のコンクリートの品質変化は明らかにされていないのが現状である。その

ため、事前に、圧送条件やコンクリートの配合に応じた管内圧力損失の設定と圧送前後のコンクリートの品質変化を考慮した配合を選定する必要がある。

そこで本検討では、斜張橋主塔に用いられる単位結合材量が 400kg/m³、水結合材比が 43%のコンクリートを高所へ圧送した際の、圧送条件と圧送負荷および圧送前後のコンクリートの品質変化との関係を明らかにすることを目的とし、施工中の橋梁においてコンクリートポンプのピストン前面圧、管内圧力、圧送前後のフレッシュコンクリートのスランプと空気量、硬化コンクリートの空気量および圧縮強度を測定した結果について述べる。

2. 試験概要

本検討は、愛媛県発注の岩城橋を対象とし、施工中のデータを取得した。岩城橋は、瀬戸内海に浮かぶ岩城島と生名島を結ぶ橋長 735m（中央支間 475m）の 5 径間連続鋼コンクリート混合斜張橋であり、主塔は高さ約 137m のコンクリート製である⁷⁾。

コンクリートの圧送性については、高所圧送した際のコンクリートポンプのピストン前面圧および管内圧力を 2 箇所にて測定した。フレッシュコンクリートは、スランプおよび空気量を、硬化コンクリートは、空気量と圧縮強度について確認した。

2.1 コンクリートの使用材料および配合

コンクリートの使用材料を表-1 に、配合を表-2 に示す。コンクリートの種類は 40 18 20 N で、単位結合材量が 400kg/m³であり、温度ひび割れを抑制する目的で膨張材をセメントの内割で 20kg/m³ 使用した。混和剤には PAE 化合物を主成分とする高性能 AE 減水剤を使用した。なお、受入れ時に所定の空気量を確保する目的で、AE 剤を適宜添加した。

*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 研究員 工修（正会員）

*2 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 工博（正会員）

*3 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 主任研究員（正会員）

*4 東予地方局今治土木事務所上島架橋建設課

表－1 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	地下水・上澄み水
セメント	C	普通ポルトランドセメント， 密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 3,230cm ² /g
膨張材	Ex	水酸化カルシウム系膨張材， 密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 3,760cm ² /g
細骨材	S	広島県東広島市黒瀬町小多田，砕砂， 表乾密度 2.58g/cm ³ ，F.M. 2.72
粗骨材	G	広島県東広島市黒瀬町小多田，碎石 2005，表乾密度 2.63g/cm ³ ，実積率 58.6%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤，主成分 PAE 化合物
	AE	空気量調整剤，主成分アルキルエーテル 系陰イオン界面活性剤

表－2 コンクリートの配合

水 結合 材比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	Ex	S	G	SP	AE
43.0	47.1	172	380	20	798	913	4.6	1A*

※1A= (C+Ex) × 0.001%

AE 剤は所定の空気量を確保するため，適宜使用した。

2.2 コンクリートの製造および場外運搬

コンクリートの製造は岩城島内のレディーミクストコンクリート工場で行い，練混ぜは 1.0m³ 練りの強制二軸ミキサを用い，1 バッチあたりの練混ぜ量を 1.0m³ とした。現場までの運搬時間は 10～15 分程度であった。

2.3 圧送条件

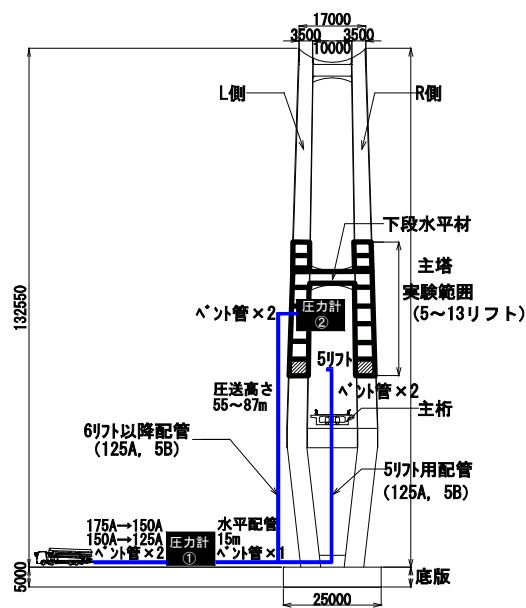
本実験の配管条件を図－1 に示す。今回対象としたリフトは，表－3 に示すように 5～13 リフトで，1 リフトの高さは 1.0～4.5m である。地上からの圧送高さは，55.0～87.0m であり，配管の水平換算距離¹⁾は 312～445m となる。5 リフトのみ L 側と R 側の中央部から配管を立ち上げたが，6 リフト以降は L 側から配管を立ち上げた。

コンクリートポンプは，最大吐出量 77m³/h，理論吐出圧力 7.9MPa (標準圧仕様)，43m³/h，15.4MPa (高圧仕様) を使用し，5～8 リフトは標準圧仕様，9～13 リフトは高圧仕様で圧送した。輸送管の径は 125A (5B) であり，高圧仕様のものを用いた。

2.4 測定項目

測定項目を表－4 に示す。コンクリートの圧送性については，高所圧送した際のポンプのピストン前面圧，配管に設置した 2 箇所の管内圧力計により，管内圧力を測定した。管内圧力は，図－1 に示すように地上部を圧力計①，鉛直管の上部を圧力計②として測定した。なお，圧力計②は圧送高さに応じて打込みごとに盛り替えた。

圧送後のコンクリートの品質に関する各種測定および供試体作製は，各リフトの天端付近で行ったため，地上から約 55～87m に位置する。硬化後の空気量および気泡径分布は ASTM C 457 に従い，φ100mm の円柱供試体を



図－1 配管条件と測定対象部位

表－3 測定対象リフト

打込み リフト	打込み 箇所	リフト 高さ (m)	地上からの 圧送高さ (m)	水平 換算距離 (m)
5	L	4.5	55.0	364
	R	4.5		381
6	L	4.5	58.0	312
	R	4.5		330
7	L	4.5	62.5	332
	R	4.5		350
8	L	4.5	67.0	348
	R	4.5		365
9	L	4.5	75.0	380
	R	4.5		397
10	水平材	4.0	79.0	425
11	R	1.0	80.0	417
12	L	3.4	83.5	416
	R	3.4		433
13	L	3.2	87.0	428
	R	3.2		445

表－4 測定項目

測定項目	試験方法・測定方法
ピストン前面圧	圧送が定常状態になったときに測定 (コンクリートポンプの主油圧から換算)
管内圧力	輸送管上に設置した圧力変換器 (ダイヤフラム圧力計) から測定 (圧力計①，②にて測定)
スランプ	JIS A 1101 「コンクリートのスランプ試験方法」
フレッシュコンクリートの空気量	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」
硬化後の空気量 気泡径分布	ASTM C 457 「リニアトラパース法」
圧縮強度	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」

作製後、材齢 28 日以降にて中心部を厚さ 20mm でスライスし、測定面の鏡面研磨を施した後にリニアトラバース法により測定を行った。スランプ、空気量、圧縮強度は JIS に従い、圧縮強度試験は材齢 28 日に実施した。

3. 試験結果

3.1 コンクリートの圧送性

(1) コンクリートポンプのピストン前面圧

水平換算距離とピストン前面圧の関係を図-2 に示す。図に用いた水平換算距離は、土木ポンプ指針¹⁾より算出し、ピストン前面圧は、ポンプの主油圧を圧力比で除して算出した。図より、水平換算距離が長くなるほどピストン前面圧がほぼ線形で大きくなる結果が得られた。

(2) 管内圧力

水平換算距離と圧力計①、②の管内圧力の関係を図-3 に示す。地上に設置した圧力計①は、水平換算距離が長くなるほど管内圧力も大きくなる結果が得られた。これは、ポンプ車の吐出圧力と水平換算距離の関係を示した図-2 と同様の傾向であった。鉛直管の上部に設置した圧力計②については、水平換算距離と管内圧力に関係は認められなかった。

(3) 圧送負荷

125A (5B) の輸送管を用いた場合の土木ポンプ指針と建築ポンプ指針それぞれのコンクリートポンプに加わる圧送負荷の算定式を式 (1) および (2) に示す。

$$P=K(L_1+4L_2+3T+6B+20/F) \quad (1)$$

$$P=K(L+2T+3B+2F)+0.01WH \quad (2)$$

P : コンクリートポンプに加わる圧送負荷 (N/mm²)

K : 水平管 1m あたりの管内圧力損失 (N/mm²/m)

L₁ : 水平管の長さ (m)

L₂ : 上向き垂直管の長さ (m)

T : テーパー管の長さ (m)

B : ベント管の長さ (m)

F : フレキシブルホースの長さ (m)

L : 直管の長さ (m) (水平管+鉛直管)

H : 圧送高さ (m)

W : 単位容積質量 (kN/m³)

理論吐出量と圧送負荷について、今回測定した 5~13 リフトのうち圧送高さが 58m と低い 6 リフト R 側と最も高い 87m の 13 リフト R 側の測定結果を図-4 および図-5 に示す。なお、この他のリフトについても同様の傾向を示したため、本報では割愛した。この時の圧送負荷は、管内圧力計①の実測値とした。併せて、土木ポンプ指針¹⁾のスランプ 18cm、125A (5B) 管および高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートの管内圧力損失 K を式 (1) に代入して、圧送高さ 58m と 87m の場合の圧力計①の位置での圧送負荷を算出した結果を実線で示した。

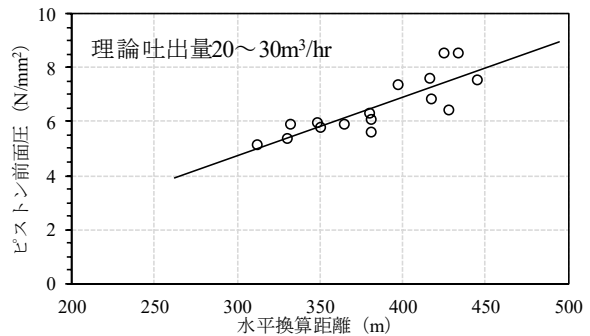


図-2 水平換算距離とピストン前面圧の関係（ポンプ車）

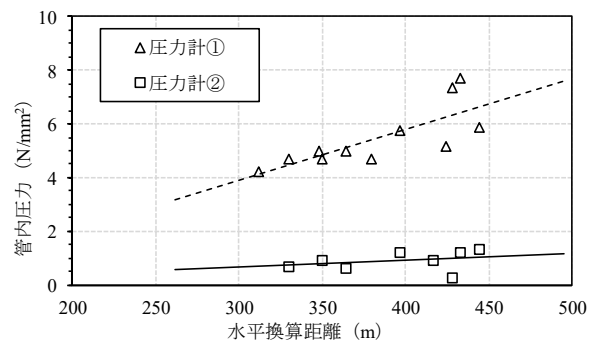


図-3 水平換算距離と管内圧力の関係（管内圧力計）

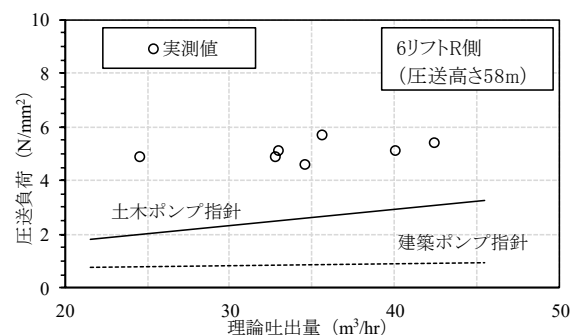


図-4 圧送負荷と理論吐出量の関係（6 リフト R 側）

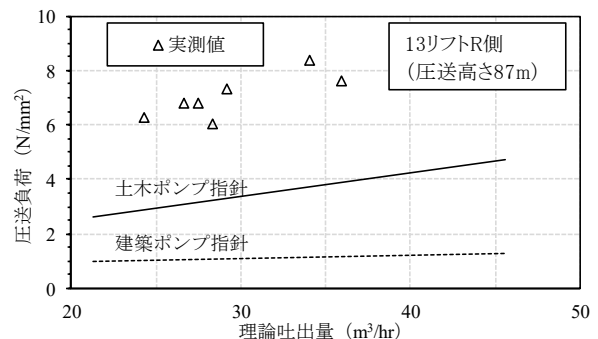


図-5 圧送負荷と理論吐出量の関係（13 リフト R 側）

同様に、建築ポンプ指針²⁾のスランプ 18cm、125A (5B) を使用したコンクリートの管内圧力損失 K を式 (2) に代入した結果を破線で図に示した。圧送高さにかかわら

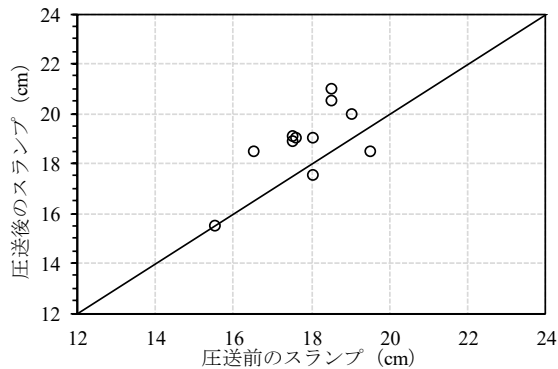


図-6 圧送前後のスランプ

ず、土木ポンプ指針の圧送負荷は建築ポンプ指針よりも大きくなった。これは、日本建築学会の単位水量の上限値が 185kg/m^3 と土木学会の 175kg/m^3 よりも大きいため、土木ポンプ指針の方が粘性の高い配合のデータを取得していると考えられる。また、圧力計①の管内圧力は計算値よりも実測値の方が大きくなり、土木ポンプ指針の2倍程度となった。これは、骨材に砕石および砕砂を使用していることや、コンクリート配合の細骨材率が47.1%と比較的大きく、水結合材比が43%と小さいためコンクリートの粘性が高いことなどが要因として考えられる。今回実施した高所へ圧送する条件で、コンクリートの粘性が高い配合では、土木、建築のポンプ指針で計算される値に対し大きく乖離することが明らかになった。本工事では、土木ポンプ指針の圧送負荷よりも実測の圧送負荷が大きかったことから、配管の破損などのトラブルを未然に防ぐために、全ての打込み箇所ですべて圧送負荷を確認し、配管の変更などを行いながら無事に施工を完了した。

3.2 コンクリートの圧送前後のスランプおよび空気量

(1) 圧送前後のスランプ

圧送前後のスランプの関係を図-6に示す。図示するように、おおむね全ての測定箇所ですべて圧送後にスランプが増加する結果となった。その理由として、後述する圧送後の空気量が増加したことが要因として考えられる。

(2) 圧送前後の空気量（フレッシュコンクリート）

圧送前後のフレッシュおよび硬化後の空気量を測定した結果を表-5に示す。フレッシュと硬化後の空気量の比較において、増加する場合と減少する場合の両方の結果が得られた。既往の研究⁸⁾では1%程度増減する傾向にあることが示されている。本試験では圧送後に空気量が2%増加する結果が得られており、この理由について定かでなく、引き続き検討が必要である。また、圧送前後のフレッシュコンクリートの空気量を測定した結果を図-7に示す。図示するように、おおむね圧送後に空気量が増加する結果となった。なお、5リフトや6リフトは、圧送前後の空気量がほとんど変わらなかったが、打

表-5 圧送前後の空気量の試験結果

測定箇所	リフト	位置	フレッシュコンクリートの空気量 (%)		硬化後の空気量 (%)	
			圧送前	圧送後	圧送前	圧送後
5	L		4.0	5.0	4.6	5.9
			4.4	5.0	—	—
	R		4.8	4.6	4.9	5.4
			4.8	4.6	—	—
6	L		3.7	3.9	4.6	5.9
	R		4.3	4.8	4.9	5.4
7	R		4.4	5.6	—	—
8	L		4.6	5.1	4.4	5.0
	R		4.0	5.4	4.2	6.3
9	L		4.5	—	3.7	5.4
	R		3.7	5.2	2.9	5.8
11	R		4.0	4.3	3.7	5.1
12	R		3.1	5.9	3.5	5.9
13	R		4.0	6.1	3.8	5.3

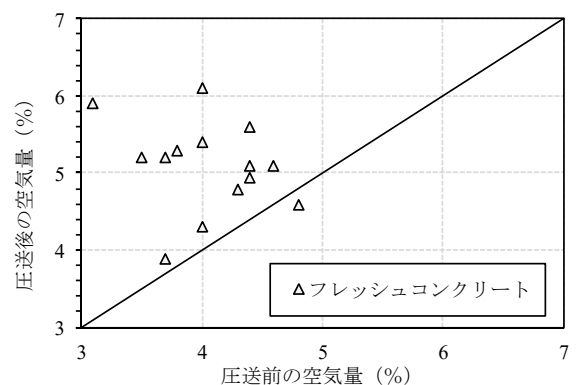


図-7 圧送前後の空気量（フレッシュコンクリート）

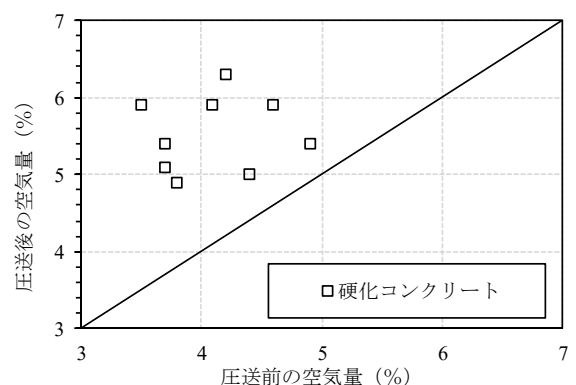


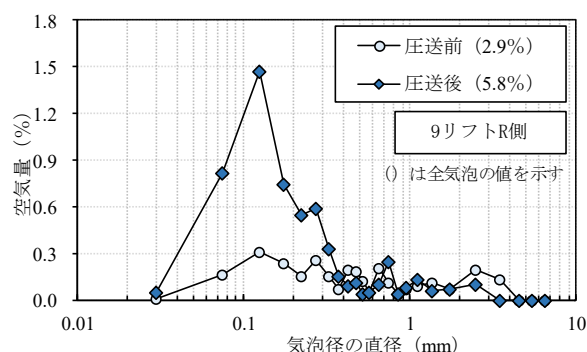
図-8 圧送前後の空気量（硬化コンクリート）

込み時期が夏期であったため空気量が相殺されやすい条件であったことが要因と考えられる。

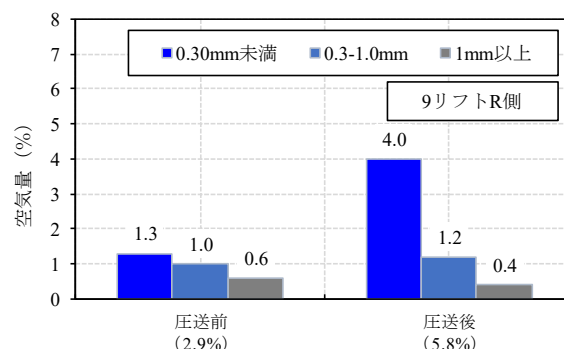
(3) 圧送前後の空気量（硬化コンクリート）

圧送前後の硬化コンクリートの空気量の増減を図-8に示す。図示するように、硬化コンクリートの空気量についても圧送後に増加する結果となった。

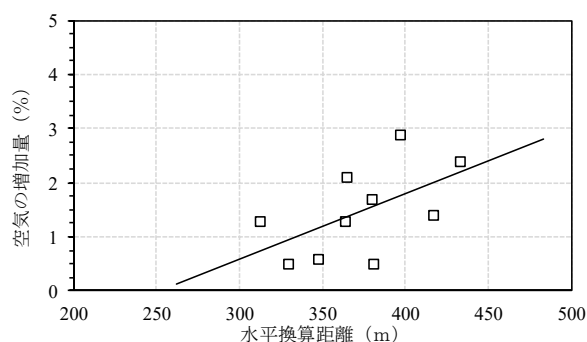
一般に、圧送によって空気量は低下すると言われる⁵⁾が、高性能 AE 減水剤を使用した配合の場合は増加する



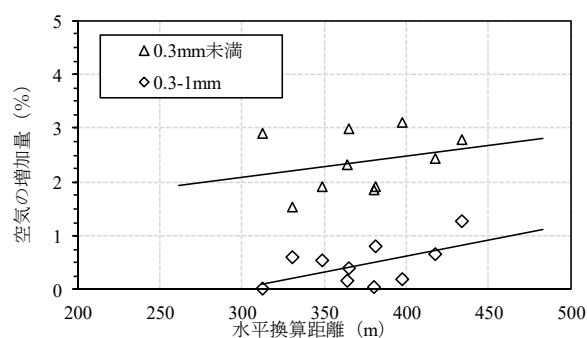
図－9 圧送前後の気泡径分布の比較（9 リフト R 側）



図－10 気泡径ごとの空気量の比較（9 リフト R 側）



図－11 硬化後の試験体による
水平換算距離と空気の増加量（全気泡）

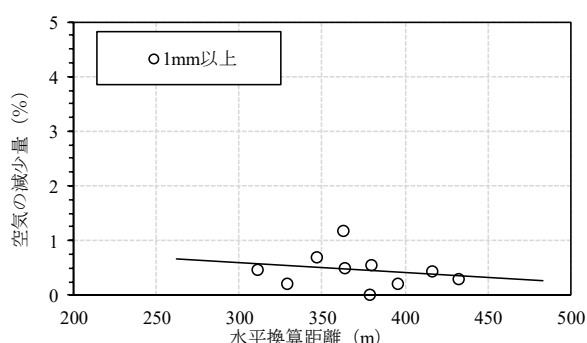


図－12 硬化後の試験体による
水平換算距離と空気の増加量（1mm 未満）

結果も報告されている⁶⁾。この理由について、コンクリートポンプ車のホッパ内での攪拌によって空気量が増加しやすい傾向にあること⁶⁾、圧送中についてはベント管内でせん断層流の複雑な動きにより化学混和剤の気泡作用が再活性されること⁶⁾が報告されている。今回の結果については、これらの要因に加えて、本試験で使用した配合が粉体量 400kg/m^3 と多く、粘性が高い性状を示すことから、圧送中に空気が抜けにくい状態となっていることも一因として考えられる。

硬化後の空気量について、9 リフト R の圧送前後の硬化後の気泡径分布の比較を図－9 に、気泡径分布から硬化後の 0.30mm 未満、0.3 から 1.0mm 未満、1.0mm 以上の気泡径に分類したものを図－10 に示す。なお、その他のリフトについては同様の傾向であった。図示するように、圧送によって 0.3mm 未満の気泡径の空気量が増加していることがわかる。圧送前後で全気泡の空気量が 2.9% から 5.8% まで 2.9% 増加したのに対して、0.3mm 未満の空気量は 1.3% から 4.0% まで 2.7% 増加し、1mm 以上の気泡径の空気量は 0.6% から 0.4% まで 0.2% 減少した。

図－11 に水平換算距離と全気泡の空気の増加量の関係を示す。図より、ばらつきはあるものの、圧送高さが高くなり水平換算距離が長くなるほど、空気量が増加する傾向が認められた。図－12 に水平換算距離と 0.3mm 未満と 0.3 から 1mm 未満の気泡径の空気の増加量の関係



図－13 水平換算距離と空気の減少量（1mm 以上）

を、図－13 に水平換算距離と 1mm 以上の気泡径の空気の減少量の関係を示す。図より、水平換算距離が大きくなるほど 1mm 未満の気泡径の空気量は増加し、1mm 以上の気泡径の空気量は 0 から 1.2% の範囲で減少する傾向が得られた。図より、0.3mm 未満の気泡径の空気量の増加が 0.3 から 1mm 未満の気泡径の空気量の増加よりも多い傾向を示した。0.3mm 未満の気泡径の空気量はエントレインドエアとして分類され⁹⁾、主に、AE 剤などの化学混和剤によって連行されるものである。今回の実験では、高性能 AE 減水剤に含まれる AE 剤が、ホッパの攪拌および圧送によって再活性されたことにより増加したものと考えられる。また、圧送の過程で配管中に流れるコンクリートがベント管などでせん断力を受け、粗大な

空気が分断されることで 1mm 以上の気泡径の空気量が減少し、1mm 未満の気泡径の空気量が増加したものと考えられた。空気量の増加に関して、ホップの攪拌、圧送の影響およびせん断力による気泡の分断のそれぞれの影響度合いについては、今回の検討では明らかにすることができなかったため、今後の課題としたい。

(4) 圧送前後の圧縮強度

圧送前後に採取した供試体の圧縮強度を図-14 に示す。なお、供試体を使用したコンクリートは圧送前後で同じアジテータ車のものを使用した。図より、全てのリフトで圧送後に圧送前よりも圧縮強度が低下する結果となった。これは、全てのリフトで圧送後に空気量が増加していることが原因と考えられ、その増加量は硬化後の空気量で 11 リフトが 1.4%，12 リフトが 2.4%，13 リフトが 1.5%であった。この時の圧縮強度の減少率はそれぞれ 2.2%，18.2%，6.2%であった。一般的に、空気量が 1% 増加するごとに圧縮強度が 5%低下するとされており¹⁰⁾、おおむね同様の傾向がみられた。

圧送後に強度は低下したが、設計基準強度である 40N/mm²は満足する結果が得られた。しかしながら、高所に長距離圧送する場合においては、事前に圧送負荷や管内圧力損失を確認するだけでなく、今回の施工のように、空気量の増加に伴う圧縮強度の低下についても検討した方がよい場合があることがわかった。

4. まとめ

高所へ圧送した際のコンクリートの圧送性および圧送前後の空気量の変化について検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 水結合材比 43%の配合を高所に圧送した際の圧送負荷は、土木ポンプ指針、建築ポンプ指針それぞれの指針の管内圧力損失を用いた圧送負荷よりも大きくなり、土木ポンプ指針の 2 倍程度となった。
- (2) 圧送前後のフレッシュおよび硬化コンクリートの空気量を測定した結果、フレッシュ、硬化後ともに圧送後に空気量が増加する結果が得られた。気泡径分布から各気泡径と水平換算距離の関係を確認した結果、水平換算距離が長くなるほど 1mm 未満の空気量は増加する傾向が認められた。一方で、1mm 以上の空気量は減少する結果となった。
- (3) 圧送前後の圧縮強度を比較すると、全てのリフトで圧送後の強度が低下する結果となった。今回の施工では、圧送距離が長くなるほど圧送前後の空気量の増加量は大きくなる可能性があり、空気量の増加に伴う圧縮強度の低下を考慮した方がよい場合がある。

今回取得したデータが同種工事の役に立てれば幸いである。

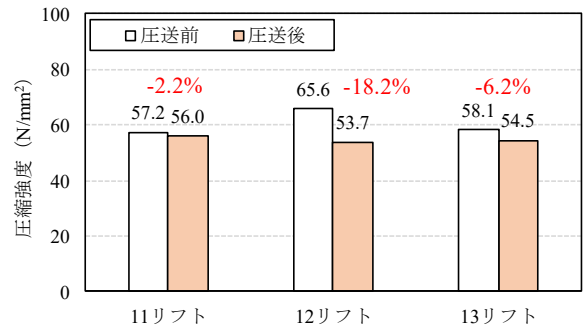


図-14 圧送前後の圧縮強度

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針 [2012 年版]，2012
- 2) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説 第 4 版，2009
- 3) 宮田敦典，中田善久，大塚秀三：コンクリートポンプ工法におけるコンクリートの調合条件ごとの管内圧力損失に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，第 83 巻，第 751 号，pp.1217-1227，2018.9
- 4) 西村拓也，六郷恵哲，堀江幸生，瀬川敦：急峻な地形での高橋脚施工におけるコンクリートポンプ圧送性の実証的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.229-234，2007
- 5) 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]，2016
- 6) 宮田敦典，中田善久，大塚秀三，岡本圭市：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，第 78 巻，第 688 号，pp.1035-1044，2013.6
- 7) 高木智子：岩城橋建設工事一夢の架け橋・ゆめしま海道一，コンクリート工学，Vol.58，No.4，pp.262-263，2020.4
- 8) 坂田昇，菅俣匠，林大介，作榮二郎：コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察，コンクリート工学論文集，第 23 巻第 2 号，pp.59-69，2012.5
- 9) 勝畑敏幸，古賀裕久，渡辺博志，渡邊健治：コンクリートの施工がエンタレインドエアに及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.68，No.1，pp.291-298，2014.
- 10) A.N.Talbot: A Proposed Method of Estimating the Density and Strength of Concrete and Proportioning the Materials by the Experimental and Analytical Consideration of Voids in Mortar and Concrete, Proc. ASTM, 1921