

合理的手法に基づく
コンクリートポンプ工法の圧送計画に関する研究

平成30年9月

宮田敦典

合理的手法に基づくコンクリートポンプ工法の圧送計画に関する研究

目 次

第 1 章 序論

1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本研究に用いる用語の定義	4
1.3	本研究の構成と概要	5

第 2 章 コンクリートポンプ工法の現状と問題点

2.1	ポンプ指針における圧送計画の現状	8
2.1.1	ポンプ指針における圧送計画の立案方法	
2.1.2	圧送計画に関する関連指針との比較	
2.2	ポンプ指針における圧送計画の経緯と建築で用いられるコンクリートの仕様 ・規定の変遷	16
2.3.1	ポンプ指針における圧送計画の経緯	
2.3.2	建築で用いられるコンクリートの仕様の変遷	
2.3	コンクリートポンプ工法の問題点の抽出	21
2.4	本研究の位置付け	23

第 3 章 圧送前後のコンクリートの品質変化に及ぼす圧送距離の影響

3.1	本章の目的	26
3.2	圧送前後のコンクリートの品質変化に関する文献的検討	27
3.2.1	文献調査の概要	
3.2.2	圧送前後のスランプ、スランプフローおよび空気量の変化	
3.2.3	圧送前後の圧縮強度の変化	
3.2.4	文献調査による圧送前後のコンクリートの品質変化の傾向	
3.3	圧送に伴うコンクリートの品質変化に関する実験的検討	36
3.3.1	圧送実験の概要	
3.3.2	管内圧力損失	
3.3.3	圧送によるスランプ、スランプフローおよび空気量の変化	
3.3.4	圧送によるコンクリートの圧縮強度の変化	
3.3.5	圧送による空気量の変化が単位容積質量、凍結融解抵抗性および中性 化抵抗性に及ぼす影響	

3.3.6	圧送実験のまとめ	
3.4	まとめ	50
3.5	圧送計画における圧送前後の品質変化の合理化に関する検討	51
第4章 水平管の管内圧力損失に及ぼす各種要因の影響		
4.1	本章の目的	54
4.2	直管の管内圧力損失に関する文献的検討	55
4.2.1	文献調査の概要	
4.2.2	ポンプ指針に示される管内圧力損失との比較	
4.2.3	直管の管内圧力損失に及ぼす調合要因	
4.2.4	文献調査による直管の管内圧力損失の傾向	
4.3	ベント管の管内圧力損失に関する文献的検討	65
4.3.1	文献調査の概要	
4.3.2	ベント管の管内圧力損失に及ぼす調合要因	
4.4	水平管の管内圧力損失に関する実験的検討	71
4.4.1	圧送実験の概要	
4.4.2	圧送前後のコンクリートの品質変化	
4.4.2	直管の管内圧力損失	
4.4.3	ベント管の管内圧力損失	
4.5	まとめ	77
4.6	圧送計画における水平管の管内圧力損失の合理化に関する検討	78
第5章 鉛直管の管内圧力損失に及ぼす各種要因の影響		
5.1	本章の目的	85
5.2	鉛直管の管内圧力損失に関する文献的検討	86
5.2.1	文献調査の概要	
5.2.2	管内圧力損失に及ぼす各種要因	
5.3	圧送施工における鉛直管の管内圧力損失	93
5.3.1	測定の概要	
5.3.2	コンクリートの圧送前後の品質変化	
5.3.3	管内圧力および管内圧力損失	
5.4	まとめ	100
5.5	圧送計画における鉛直管の管内圧力損失の合理化に関する検討	101
第6章 合理的手法に基づくコンクリートポンプ工法の圧送計画の提案		
6.1	本章の目的	104

6.2	圧送計画の合理的手法の提案	105
6.2.1	合理的手法の検討項目	
6.2.2	コンクリートポンプ工法における圧送計画の合理的手法の提案	
6.3	本研究で提案した圧送計画の合理的手法	118
6.4	合理的手法に基づくコンクリートポンプの機種を選定例	123
6.4.1	圧送負荷の算定によるコンクリートポンプの機種を選定	
6.4.2	計算図表に基づくコンクリートポンプの機種を選定	
6.5	合理的手法に基づく圧送計画の有用性の検証	127
6.6	まとめ	130
第7章	総括	
7.1	各章の要約	132
7.2	今後の展望	135

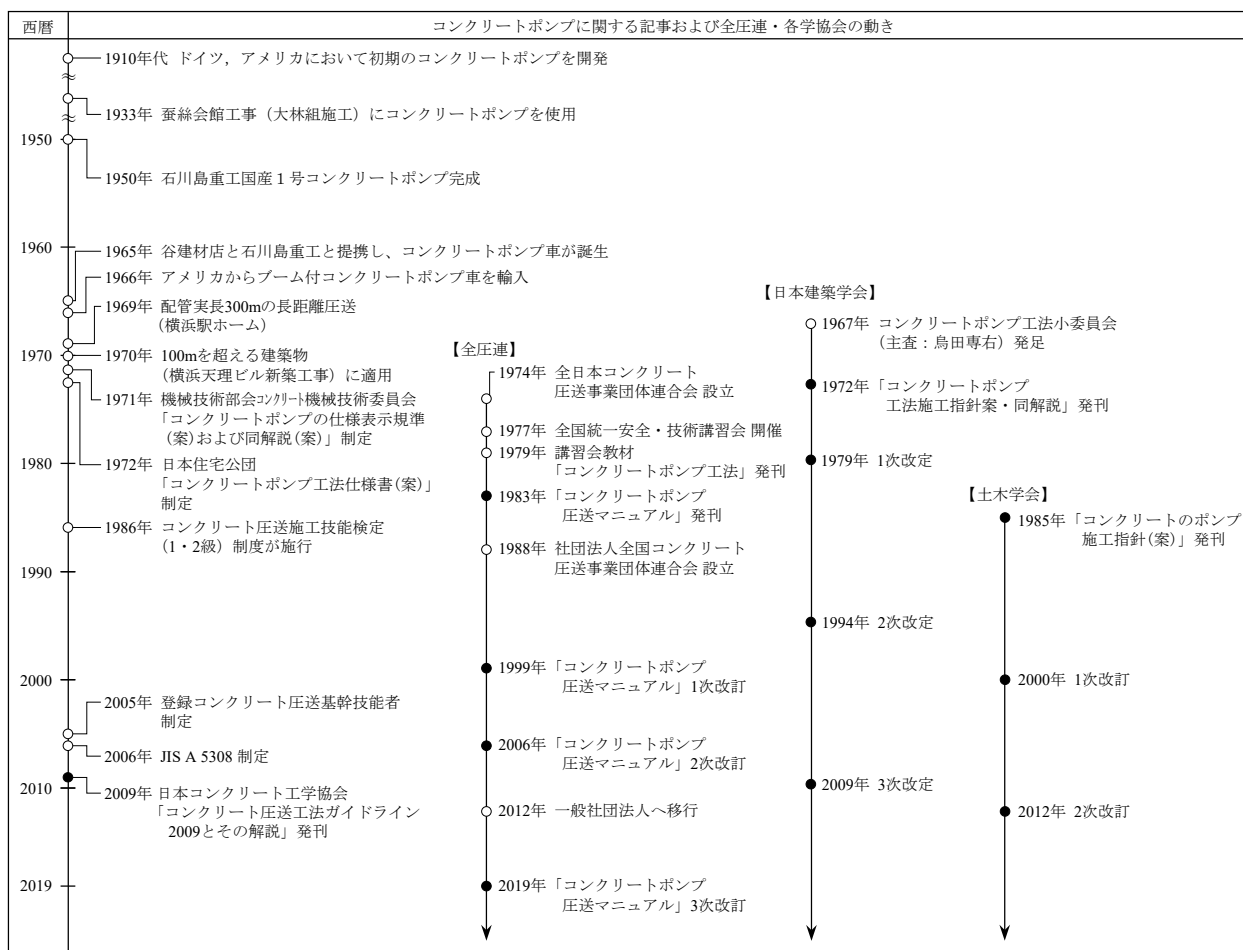
第 1 章 序論

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

コンクリートポンプ工法は、現在のコンクリート工事において欠かすことのできない工法となっており、その利用は、ブーム付きのコンクリートポンプ車で圧送できる程度の比較的短い距離の圧送工事から高さ150mを超える超高層建築物への高所圧送や1000mを超える長距離圧送など多岐にわたっている。

コンクリートポンプ工法の沿革をまとめると図1.1.1のようになる。コンクリートポンプ工法は、1960年代にわが国の建築工事に導入され、コンクリートを打込み箇所まで連続して大量かつ迅速に運搬できるという施工の利便性から1960年代後半に急速に普及し始めた工法である。しかし、コンクリートポンプ工法が普及し始めた当時は、コンクリートの圧送性だけが重要視される傾向にあり、圧送作業の効率を向上させるためにスランブが過大に設定されていたことや現場においてコンクリートに頻繁に加水が行われていたことから、打ち込まれたコンクリートの材料分離や品質低下などの問題が多く生じていた¹⁾。このような背景を踏まえて、日本建築学会では、1967年にコンクリートポンプ工法小委員会を発足し、圧送に伴うコンクリートの品質変化によって構造体コンクリートの品質や性能が損なわれることを防止するとともに、工事の円滑な進行に役立つことを目的として、1972年に「コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説」¹⁾（以降、



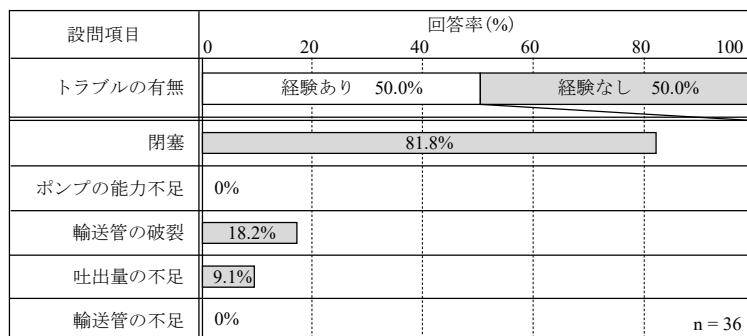
○：関連出来事，●：指針，マニュアル等の発刊または改定

図1.1.1 コンクリートポンプ工法の沿革^{1), 2)}を基に作成

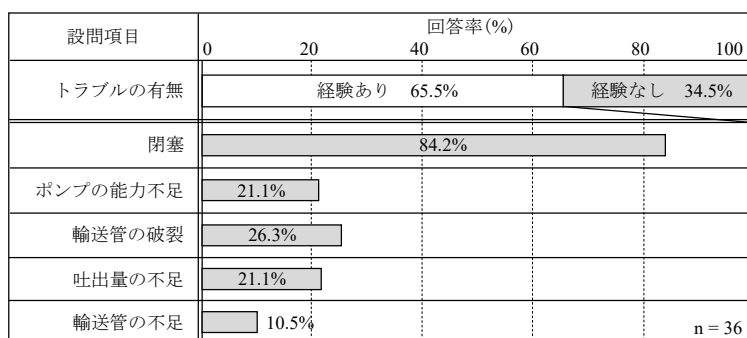
ポンプ指針という)を発売した。その後、全国コンクリート圧送事業団体連合会「コンクリートポンプ圧送マニュアル」²⁾(以降、圧送マニュアルという)、土木学会「コンクリートのポンプ施工指針(案)」³⁾(以降、土木学会のポンプ指針という)および日本コンクリート工学協会(現:日本コンクリート工学会)「コンクリート圧送工法ガイドライン2009および解説」⁴⁾(以降、ガイドラインという)などのコンクリートポンプ工法に関する指針や技術書が発刊され、圧送実績が蓄積されるとともに現在のようなコンクリートポンプ工法の圧送技術が確立されてきた。

コンクリートポンプがわが国に導入された当時、コンクリートポンプによる施工は、圧送中の閉塞やコンクリートポンプの故障などのトラブルに見舞われることが多かった¹⁾。さらに、当時のコンクリートポンプの性能は、現在の機種のように十分な能力を有していなかったため、圧送計画において圧送の可否の判断が重要であった。近年は、コンクリートポンプの性能の向上や圧送技術の確立、圧送作業に従事する圧送技能者の経験が豊富となり、コンクリートポンプがわが国に導入された当時のように綿密な圧送計画を立案せずに圧送施工が行えるようになってきた。しかし、近年においても、コンクリートポンプに係わるトラブルや事故は少なからず発生しており⁵⁾、特に、圧送中の閉塞は、圧送時に発生する最も多いトラブルの一つとなっている。

図1.1.2は、圧送業者を対象としてコンクリートポンプに係わるトラブルの実態を調査したアンケート結果である。コンクリートポンプに係わるトラブルを経験したことがあるとした回答は、圧送計画の立案の有無にかかわらず半数以上であり、そのうち閉塞を経験したという回答はいずれも8割以上とトラブルの中で最も多い。さらに、閉塞以外のトラブルは、圧送計画を立案する



(a) 圧送計画を立案せずに生じたトラブル



(b) 圧送計画を立案して生じたトラブル

図1.1.2 圧送計画の立案の有無によるトラブルの発生状況

ことでその発生を低減できることを示唆しているものの、閉塞の回答率は圧送計画の立案の有無にかかわらず同程度である。すなわち、現在の推定式などを用いて圧送計画を立案しても、閉塞の発生を抑制できていないことが読み取れる。

圧送中に発生する閉塞は、管内においてコンクリートが材料分離を起こすこと、圧送によるコンクリートの品質変化が著しく大きくなることおよびコンクリートポンプの能力が不足していることなど、圧送するコンクリートの品質や圧送条件の様々な要因が複合して発生するものと考えられる。閉塞が圧送計画の立案にかかわらず頻繁に発生している背景を踏まえると、実施工において、圧送によるコンクリートの品質変化が想定よりも大きくなっていることや、コンクリートポンプの機種を選定するための管内圧力損失および圧送負荷を適切に算定できていないことなど、現状の圧送計画が実施工に十分対応できていないと考えられる。さらに、近年は、高強度コンクリートや高流動コンクリートのような粘性の大きいコンクリートが多用されるようになったことや、建築物の高層化に伴う圧送高さの増大および鋼管充填コンクリートの圧入施工などの高度な技術を必要とする圧送が増えつつあることから、圧送計画をより一層綿密に立案する必要があるといえる。

そこで、本研究では、これまでに報告された圧送実験結果や施工記録を精査し、現在の圧送施工において頻繁に発生している閉塞などのトラブルの低減を目的とした圧送計画の合理的手法を提案することとした。ここでは、圧送条件やコンクリートの調合条件に応じた圧送前後のコンクリートの品質変化および圧送負荷の算定方法について、文献調査ならびに圧送実験により調査・検討し、これらの結果に基づいた圧送計画の合理的手法について検討している。なお、本研究では、コンクリートポンプにかかわる事象・現象を整理分析し、その中から法則を見出し、安全で円滑な圧送作業を行うための圧送計画の手法を合理的手法として扱っている。

1.2 本研究に用いる用語の定義

本論文に用いる用語は次のように定める。なお、次の用語は、ポンプ指針⁶⁾に則っている。

AE 減水剤コンクリート	: 化学混和剤に AE 減水剤を用いたコンクリート
高性能 AE 減水剤コンクリート	: 化学混和剤に高性能 AE 減水剤を用いたコンクリート
水平換算係数	: ベント管, テーパ管, フレキシブルホースなどの管内圧力損失と、同じ長さの水平直管の管内圧力損失との比から、それぞれの管を水平直管の長さに換算するための係数
水平換算距離 (m)	: ベント管, テーパ管, フレキシブルホースなどを水平直管に換算したときの距離で、ベント管, テーパ管, フレキシブルホースなどの実長に水平換算係数を乗じたもの、水平換算長さともいう
圧送負荷 P (N/mm^2)	: 各種輸送管の圧力損失に応じて生じる圧力負荷の総和で、コンクリートポンプの根元出口に作用する圧力
理論吐出量 Q_{th} (m^3/h)	: コンクリートシリンダの容積とストローク数から算定したコンクリートポンプから吐き出される 1 時間あたりのコンクリート量
実吐出量 Q_d (m^3/h)	: 実際にコンクリートポンプから吐き出される 1 時間あたりのコンクリート量
機械効率 η_m	: 理論吐出量に対する実吐出量の割合
水平管の管内圧力損失 K_H ($N/mm^2/m$)	: 水平管をフレッシュコンクリートが管内を流動するときの輸送管単位長さあたりの抵抗圧力
鉛直管の管内圧力損失 K_V ($N/mm^2/m$)	: 鉛直管をフレッシュコンクリートが管内を流動するときの輸送管単位長さあたりの抵抗圧力
ベント管の管内圧力損失 K_B ($N/mm^2/m$)	: ベント管をフレッシュコンクリートが管内を流動するときの輸送管単位長さあたりの抵抗圧力

1.3 本研究の構成と概要

本研究は、全7章から構成されている。本論文の構成を図1.3.1に示し、各章の概要を以下に示す。

第1章「序論」では、研究の背景として、コンクリートポンプ工法の沿革とコンクリート工事におけるコンクリートポンプの役割と現状について述べ、本研究の目的および圧送計画の合理的手法の位置付けについて示している。また、本論文で用いる用語の定義および本研究の構成と概要を示している。

第2章「ポンプ指針における圧送計画の現状と問題点」では、ポンプ指針における圧送計画の立案方法やポンプ指針とその他のコンクリートポンプに関連する指針・技術書との違いについて整理している。また、現在の圧送計画に至った経緯や建築で用いられるコンクリートの仕様の変化について取りまとめ、現状の圧送計画の問題点を抽出し、本研究の位置付けを明確にしている。

第3章「圧送前後のコンクリートの品質変化に及ぼす圧送距離の影響」では、コンクリートの種別をAE減水剤コンクリートと高性能AE減水剤コンクリートに分類し、文献調査によって圧送前後のコンクリートの品質変化の傾向を系統的に明らかにしている。また、圧送距離約200mの圧送実験によって、圧送に伴うコンクリートの品質変化を明らかにするとともに、文献調査によって得られた傾向と同様の傾向であることを確認している。さらに、これらの調査・実験結果から、圧送距離に応じたスランプおよびスランプフローの低下量の目安を提案している。

第4章「水平管の管内圧力損失に及ぼす各種要因の影響」では、文献調査によって水平管における直管およびベント管の管内圧力損失に及ぼすコンクリートの品質や調合条件などの影響を系統的に明らかにしている。また、圧送実験により水平管における直管およびベント管の管内圧力損失を明らかにするとともに、文献調査によって得られた傾向と同様の傾向であることを確認し、その結果について述べている。さらに、これらの調査・実験結果から、従来の管内圧力損失の標準値に代わる新たな管内圧力損失の標準値を提案している。

第5章「鉛直管の管内圧力損失に及ぼす各種要因の影響」では、文献調査により水平管と鉛直管の管内圧力損失の関係に及ぼすコンクリートの種類や品質などの影響を系統的に明らかにしている。また、高層建築物の2つの施工現場において、水平管および鉛直管の高所圧送時の管内圧力損失を測定し、文献調査によって得られた傾向と同様の傾向であることを確認している。さらに、これらの調査・実験結果から、高所圧送時の圧送負荷を安全に算定できる算定式を提案している。

第6章「合理的手法に基づくコンクリートポンプ工法の圧送計画の提案」では、圧送によるコンクリートの品質変化や管内圧力損失に及ぼす各種要因を考慮した合理的手法に基づく圧送計画

について提案している。また、第6章で提案した圧送計画の合理的手法を実際の圧送施工に適用した結果を示し、合理的手法の有用性を示している。

第7章「結論」では、第2章から第6章における研究成果を要約し、総括と今後の検討について述べている。

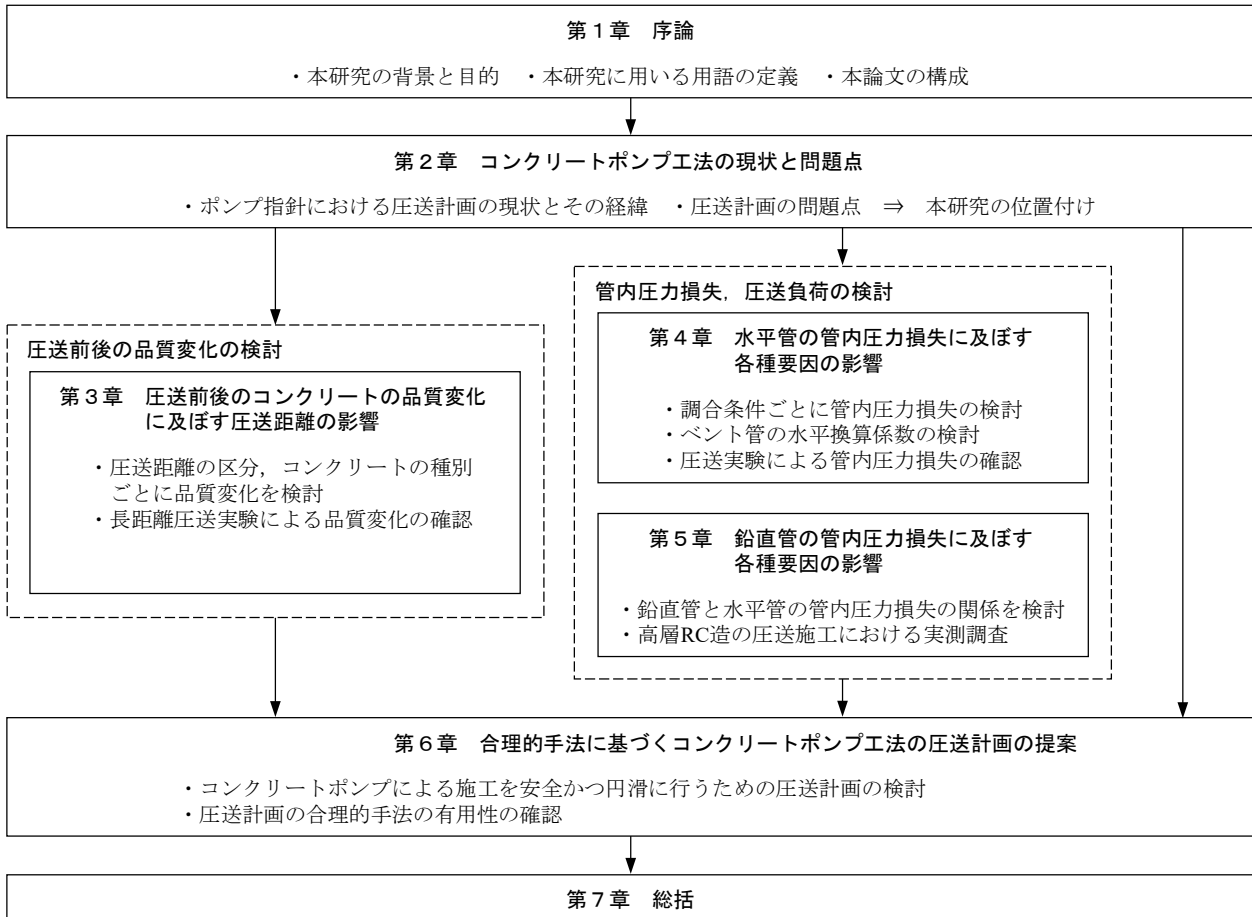


図 1.3.1 本論文の構成

【第1章の参考文献】

- 1) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説，1972
- 2) 全国コンクリート圧送事業団体連合会：コンクリートポンプ圧送マニュアル 2006年版，2006.8
- 3) 土木学会：コンクリートポンプ施工指針 2012年版，2012.6
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートポンプ施工技術調査委員会報告書，2007.9
- 5) 黒川海人，中田善久，大塚秀三，山柿建人：コンクリートポンプにおける事故の発生状況に関する実態調査 その1 調査概要および発生状況，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.925-926，2018.9
- 6) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009

第2章 コンクリートポンプ工法の現状と問題点

第2章 コンクリートポンプ工法の現状と問題点

本章は、合理的手法に基づくコンクリートポンプ工法の圧送計画を検討する先立って、現状のポンプ指針¹⁾における圧送計画の立案方法を整理するとともに、これまでの圧送計画の変遷と年代によるコンクリートの仕様の変化について調査し取りまとめた。また、これらの調査から圧送計画の問題点を抽出し、本研究の位置付けを示すこととした。

2.1 ポンプ指針における圧送計画の現状

2.1.1 ポンプ指針¹⁾における圧送計画の立案方法

ポンプ指針では、圧送計画を立案するにあたり、コンクリートポンプの機種を選定と合理的な配管方法について検討し、圧送時におけるコンクリートの品質変化ができるだけ小さくなるようにすることを規定している。また、コンクリートポンプの機種・台数の決定方法として図 2.1.1 に示すフローが示されている。ポンプ指針におけるコンクリートポンプの機種・台数の決定フローを要約すると次のようである。

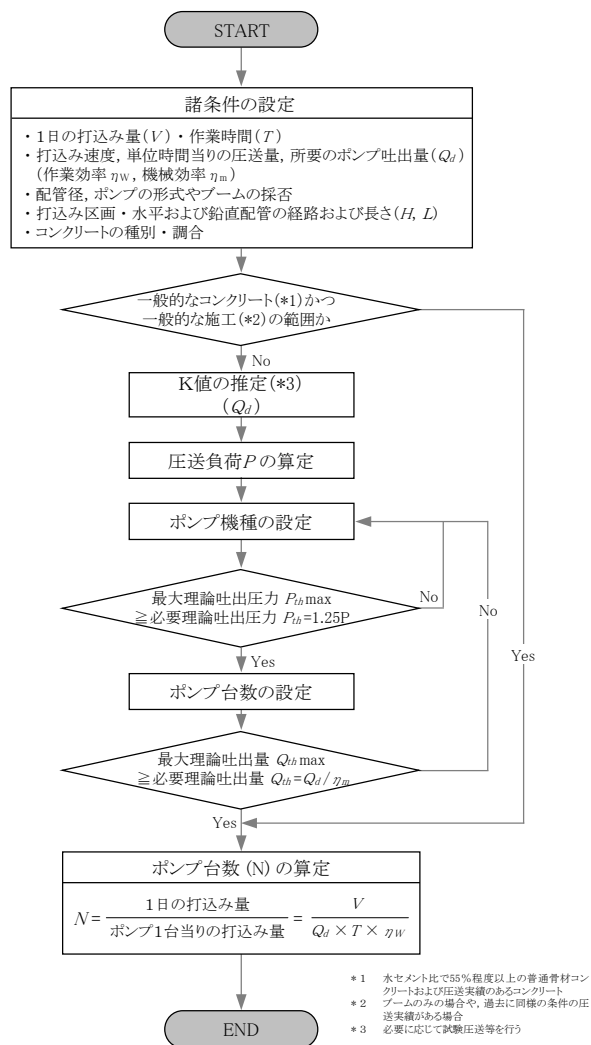


図 2.1.1 ポンプ機種・台数の決定フロー¹⁾

1 日の打込み量，作業時間および締め固め速度などから打込み速度および単位時間当りの圧送量

を設定する。このとき、作業時間に対する実圧送時間の比である作業効率を見込んで検討する必要がある。ポンプ指針では、作業効率を打ち込む部材ごとに表 2.1.1 のように示している。また、輸送管径、配管経路などを設定し、使用するコンクリートが水セメント比 55% 程度以上の普通骨材コンクリートおよび圧送実績のあるコンクリートであり、かつ、コンクリートポンプのブームのみの場合や、過去に同様の条件の圧送実績がある場合は、圧送負荷の算定を省略することができるとしている。なお、ポンプ指針では、上記のようなコンクリートおよび施工の範囲を一般的なコンクリートおよび一般的な施工の範囲と表現している。しかし、このように圧送負荷の算定が省略できるとする計画手法は、施工会社や圧送業者（圧送従事者）の圧送計画に対する意識が希薄になってしまう一因であると考えられる。

表 2.1.1 作業効率¹⁾

部 位	トラックアジテータ 1台付	トラックアジテータ 2台付
土 間 等	0.55	0.85
普通 軀 体	0.50	0.75
基礎・逆梁	0.45	0.65
逆打ち・壁等	0.40	0.40

一般的なコンクリートでない場合や一般的な施工の範囲でない場合は、圧送負荷を算定するための管内圧力損失を推定する。ポンプ指針では、これまでに建築工事で使用されてきた一般的なコンクリートの管内圧力損失の標準値をコンクリートの種別およびスランブごとに図 2.1.2 のように示している。さらに、近年多用されるようになった高強度コンクリートや高流動コンクリートの管内圧力損失が従来 of 管内圧力損失の標準値よりも大きくなるとする報告を踏まえて、骨材の種類、水セメント比の区分および化学混和剤の種類より分類したコンクリートの種別ごとの実吐出量と管内圧力損失の関係を図 2.1.3 のように示している。ここでは、水セメント比が 45% より大きいコンクリートの場合、従来から使用されてきた管内圧力損失の標準値をほぼそのまま使用できるとしており、水セメント比が 45% 以下の場合、使用材料や調合により管内圧力損失が大

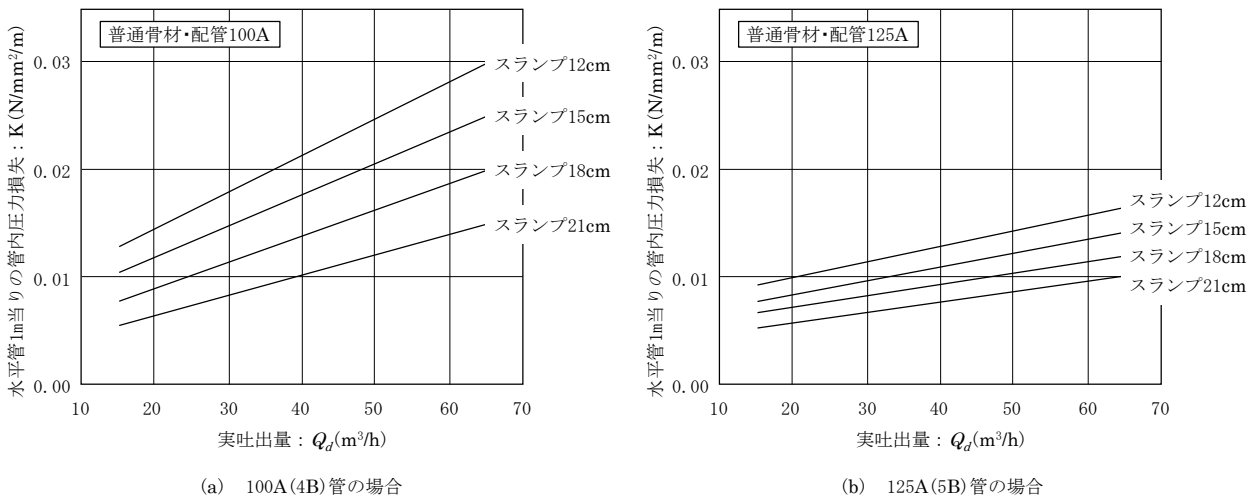


図 2.1.2 普通骨材コンクリートの水平配管 1m あたりの管内圧力損失¹⁾ から一部抜粋

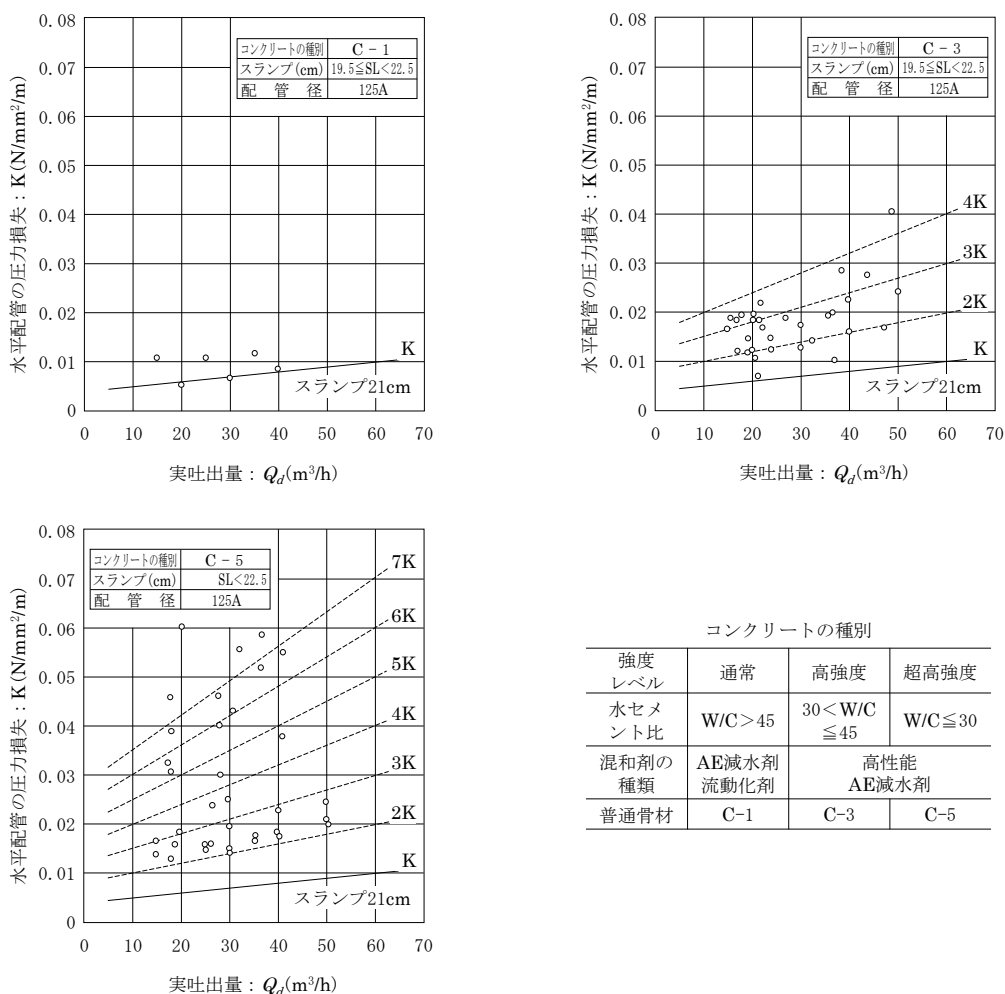


図 2.1.3 実吐出量と水平配管内圧力損失（普通骨材コンクリート） 1) から一部抜粋

大きく異なるため、実際に使用するコンクリートを用いて試験圧送を行い、実施工に応じた管内圧力損失を把握することが望ましいと解説している。

コンクリートポンプに加わる圧送負荷は、これまでのステップにおいて設定した配管経路および推定した管内圧力損失から次の (2.1.1) 式から算定することとなっている。

$$P = K (L + 3B + 2T + 2F) + WH \times 10^{-3} \quad \dots (2.1.1) \text{ 式}$$

ここに、P：コンクリートポンプに加わる圧送負荷 (N/mm²)，K：水平配管の管内圧力損失 (N/mm²/m)，L：直管の長さ (m)，B：ベント管の長さ (m)，T：テーパ管の長さ (m)，F：フレキシブルホースの長さ (m)，W：フレッシュコンクリートの単位容積重量 (kN/m³)，H：圧送高さ (m) である。コンクリートポンプに加わる圧送負荷は、水平配管の管内圧力損失と水平換算長さの積に鉛直管のコンクリートヘッド (自重) を加えて算定できるとしており、ベント管 (B)，テーパ管 (T) およびフレキシブルホース (F) の係数は、それぞれの水平換算係数を意味している。

コンクリートポンプの機種は、計画で必要とする吐出量に対して、算定された圧送負荷を 1.25 倍した値以上の最大理論吐出圧力を有するものを選定する。また、このとき、コンクリートポンプの理論吐出量に対して、実際の吐出量にはロスが生じるため、コンクリートポンプの機種の選定には、これらのことも考慮する必要がある。理論吐出量と実吐出量の間には、(2.1.2) 式のよう

な関係がある。

$$Q_d = Q_{th} \times \eta_m \quad \dots (2.1.2) \text{ 式}$$

ここに、 Q_d :実吐出量 (m^3/h), Q_{th} :理論吐出量 (m^3/h), η_m :コンクリートポンプの機械効率である。ポンプ指針では、この機械効率を骨材の種類やスランプごとに表 2.1.2 のように示している。

表 2.1.2 コンクリートポンプの機械効率¹⁾

骨材の種類	スランプ(cm)	ピストン式	スクイーズ式
普通骨材	12~17	0.70~0.90	0.75~0.90
	18~21	0.85~0.90	0.85~0.90
軽量骨材	18~20	0.50~0.75	0.70~0.80
	21~23	0.80~0.85	0.85~0.90

2.1.2 圧送計画に関する関連指針との比較

(1) 圧送前後の品質変化

コンクリートポンプ工法において圧送によりコンクリートの品質が変化することは周知の事実である。ポンプ指針¹⁾では、圧送による普通コンクリートの品質変化の限度を表2.1.3のように規定しており、普通コンクリートにおける圧送による品質変化の傾向について、スランプが-0.5cmとなる傾向と空気量が-0.2%となる傾向を解説している。JASS 5³⁾において、コンクリートのワーカビリティは、「打込み箇所および打込み・締固め方法に応じて、型枠内および鉄筋周囲に密実に打ち込むことができ、かつブリーディングおよび材料分離が少ないものとする。」と規定されている。コンクリートのワーカビリティとスランプは別の概念であるものの、本来、スランプは、JASS 5³⁾に規定されているように打込み箇所において要求される品質を満足するように設定されるものである。しかし、打込み箇所におけるスランプは、荷卸し地点におけるスランプと同義語となっている現状がある。そのため、ポンプ指針では、圧送によるスランプの低下を見込んで荷卸し地点のスランプを定めることを推奨している。

表 2.1.3 普通コンクリートの品質変化の限度¹⁾

スランプの差	空気量の差
2.0 (2.5) cm	1.0%

圧送前後の品質変化について、ガイドライン⁴⁾も同様に、「圧送前のコンクリートの品質は、圧送後に所要の性能が得られるよう、圧送条件や環境温度によるコンクリートの品質の変化を考慮して設定する。」としており、圧送条件に応じたスランプ低下として表2.1.4に示す標準値を示している。ここでは、圧送距離が長いほど、また、圧送前のスランプが小さいほど圧送によるスランプ低下が大きくなることを表している。しかし、この数値は、一部の実験結果と委員会内における議論に基づいて設定されたものであり、閉塞等のトラブルが生じている実態を踏まえると、

表 2.1.4 圧送条件に応じたスランプ低下の標準値⁴⁾

圧送条件		スランプの低下量 (cm)	
水平換算距離	輸送管の接続条件	圧送前のスランプが 12cm未満の場合	圧送前のスランプが 12cm以上の場合
50m未満	—	0	0
50m以上 150m未満	一般	0	0
	テーパー管を使用し 100A (4B) 以下の配管を接続	1	1
150m以上 300m未満	一般	1.5	1
	テーパー管を使用し 100A (4B) 以下の配管を接続	2	1.5
その他特殊条件下		既往の実績や試験圧送による	

注1) 日平均気温が25℃を超える場合は、上記の値に1cmを加える。

注2) 連続した上方、あるいは下方の圧送距離が20m以上の場合、上記の値に1cmを加える。

注3) スランプの低下量が3cm以上となる場合は、配(調)合および圧送条件を見直す。

圧送距離とコンクリートの品質変化の関係について更なる検討が必要であると考えられる。

また、ポンプ指針¹⁾では、近年多用されるようになった高強度コンクリートおよび高流動コンクリートの品質変化の目安として、表 2.1.5 に示す範囲内になるように設定することが望ましいと解説している。さらに、高強度コンクリートおよび高流動コンクリートの圧送前後の品質変化の傾向として、図 2.1.4～図 2.1.7 に示すように、従来使用されてきた AE 減水剤を用いたコンクリートと高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの圧送前後の品質を比較した結果を示している。この結果によると、高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートのスランプおよびスランプフローは、圧送後に低下する傾向を示し、AE 減水剤を用いたコンクリートよりも低下量が大きくなる傾向を示している。一方、高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの空気量は、圧送後に増加する傾向を示し、AE 減水剤コンクリートとは異なる傾向を示している。このように、化学混和剤の種

表 2.1.5 高強度コンクリートおよび高流動コンクリートの品質変化の限度¹⁾

品質変化の項目		品質変化の限度
スランプフロー	60cm	10cm
	50cm	7.5cm
スランプ	21cm	2cm
空気量		1.0%

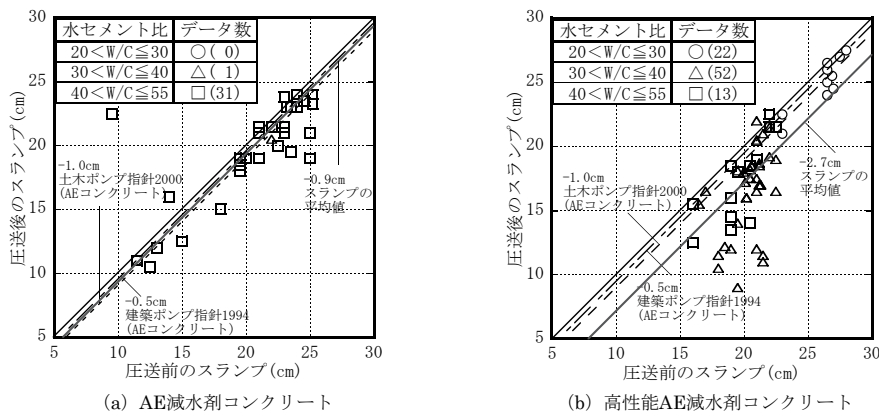


図 2.1.4 圧送前後のスランプの変化¹⁾

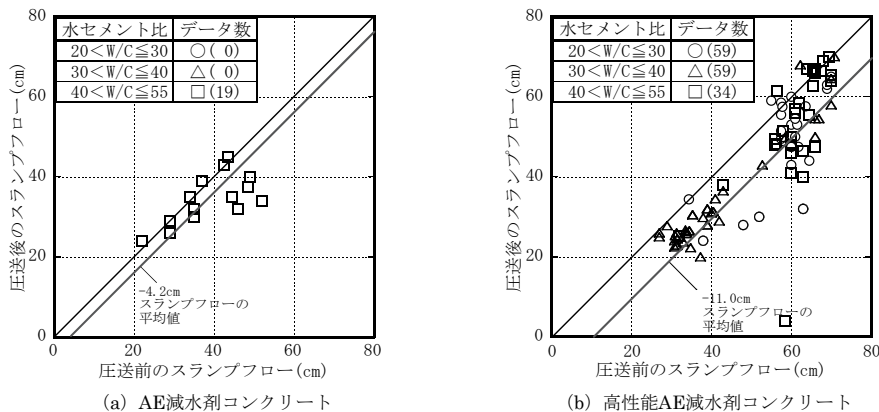


図 2.1.5 圧送前後のスランプフローの変化¹⁾

類などによって圧送前後の品質変化の傾向が異なるため、ポンプ指針では、特殊なコンクリートを用いる場合や特殊な圧送条件の場合に、圧送性と品質変化の両面から事前検討が必要であることを解説している。

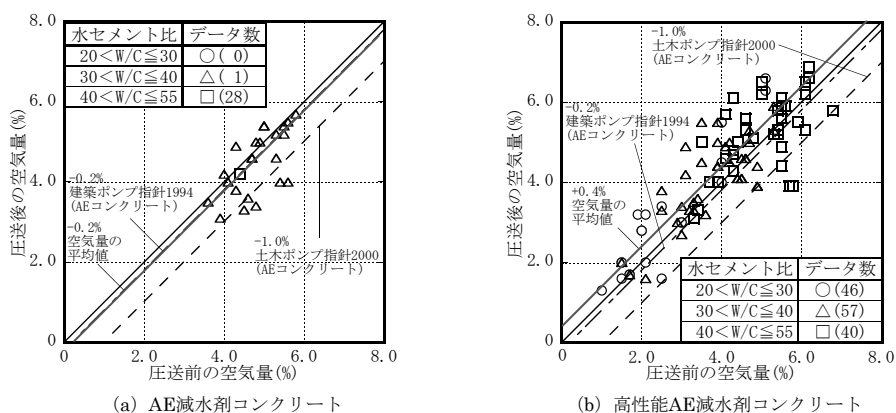


図 2.1.6 圧送前後の空気量の変化¹⁾

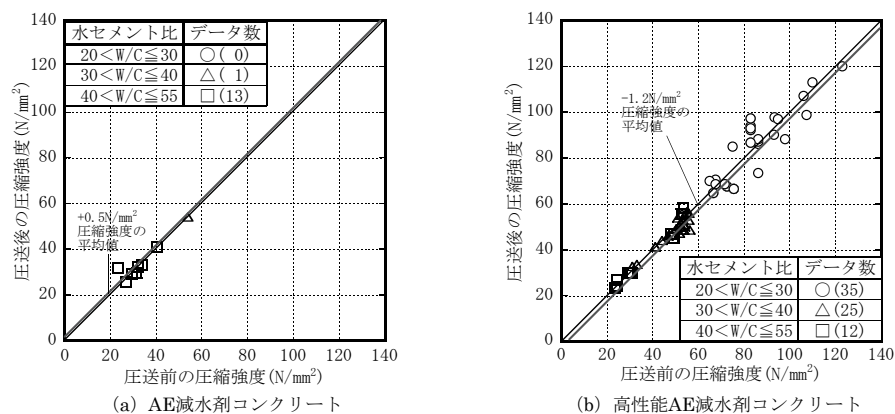


図 2.1.7 圧送前後の圧縮強度の変化¹⁾

(2) コンクリートポンプに加わる圧送負荷の算定方法

ポンプ指針¹⁾において、コンクリートポンプに加わる圧送負荷は、前述したように(2.1.1)式から算定することとなっている。これに対して、土木学会のポンプ指針⁵⁾では、コンクリートポンプに加わる圧送負荷を算定するときの水平換算係数を表2.1.6に示すように設定している。土木学会のポンプ指針⁵⁾の水平換算係数は、建築学会に比べて多少大きめに設定されている(例えば、ベント管の水平換算係数は、建築学会が3に対して、土木学会が6である。)ものの、水平管の管内圧力損失と水平換算係数の積で求めるという圧送負荷の算定する基本的な考え方は同じである。しかし、建築学会と土木学会の両学会における鉛直管の圧送負荷の算定方法は異なり、建築学会のポンプ指針¹⁾における鉛直管の管内圧力損失は、水平管の管内圧力損失にコンクリートの単位容積重量と加えたもので表現される。一方、土木学会のポンプ指針⁵⁾において、鉛直管の管内圧力損失は、水平管の管内圧力損失に水平管の管内圧力損失との比である水平換算係数を乗じて算出するものとして表現している。土木学会の水平換算係数は、コンクリートの単位容積重量を23kN/m³として、水平管1m当りの管内圧力損失の標準値から得られた吐出量と上向き垂直管の水平換算係数の関係から安全を見込んで設定されたものである(図2.1.8)。故に、建築学会および土木学会の両学会の表現は異なるものの、鉛直管の管内圧力損失は、水平管の管内圧力損失にコンクリートの単位容積重量を加えたもので算出できるとする考え方は同じである。

表 2.1.6 水平換算係数 (普通コンクリート) ⁵⁾

項目	単位	呼び寸法	水平換算係数
上向き垂直管		100 A (4 B)	3
		125 A (5 B)	4
		150 A (6 B)	5
テーパ管*	1 m 当り	175 A → 150 A 150 A → 125 A 125 A → 100 A	3
ベント管		90° r=0.5m r=1.0m	6
フレキシブルホース		—	$\frac{20}{L}$ **

* 水平換算係数は、小さい方の径に対する値である。
 ** L : フレキシブルホースの長さ (5m ≤ L ≤ 8m)
 注) 高性能AE減水剤を用いた場合は、図2.1と図2.2から読み取った値の比率を求め、これを水平換算係数に乗じて求める。

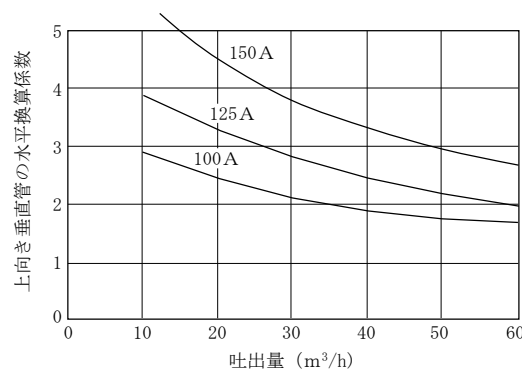


図 2.1.8 上向き垂直管の水平換算係数 (普通コンクリート) ⁵⁾

2.2 ポンプ指針における圧送計画の経緯と建築で用いられるコンクリートの仕様・規定の変遷

2.2.1 ポンプ指針における圧送計画の経緯

(1) 圧送前後の品質変化

1972年にポンプ指針⁶⁾が制定され、圧送前後の品質変化をできるだけ少なくなることや構造体コンクリートが所定の品質を確保できるようにすることを目的として、それまでの多くの研究報告から圧送前後の品質変化の許容差が表2.2.1のように定められた。また、後述するが、当時のJASS 5⁷⁾において、コンクリートの検査の試料の採取場所は、「できるだけ、型枠に打込む直前」とされていたため、圧送前後の品質変化の許容差の他に、表2.2.2に示すように圧送されたコンクリートのスランプと所要のスランプとの差の許容差も規定されていた。その後、1979年以降のポンプ指針⁸⁾の圧送によるスランプおよび空気量の許容差(限度)は、JASS 5のコンクリートの運搬における品質変化の許容差(限度)に準拠して規定されてきた。

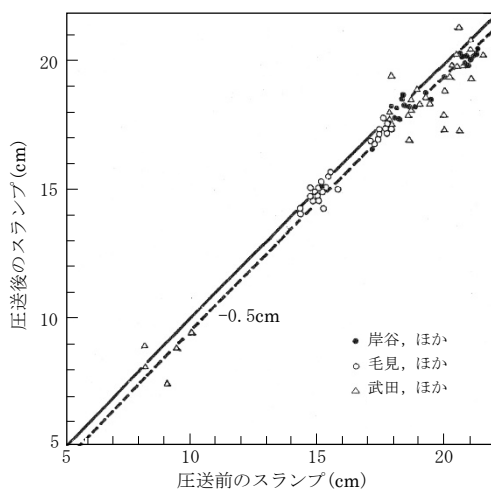
表 2.2.1 圧送前後の品質の許容差⁶⁾

品 質	砂・砂利および 砕石を用いたコ ンクリート		軽量コンクリート			
			1, 2種		3, 4, 5種	
ス ラ ンプ (cm)	5以上 18以下	18を こえる	5以上 18以下	18を こえる	5以上 18以下	18を こえる
	1.5	1	2.5	2.0	2.0	1
空 気 量 (%)	1		1		1	
単位容積重量 (kg/m ³)	—		40		40	

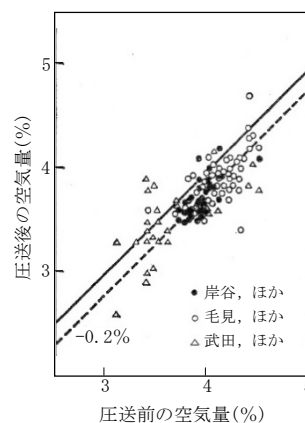
[注] 空気量については、AEコンクリートの場合に適用する。

表 2.2.2 スランプの許容差⁶⁾

所要スランプ (cm)	スランプの許容差 (cm)	
	砂・砂利・砕石 コンクリート	軽量コンクリート
8 未 満	±1.5	—
8以上18以下	±2.5	±3.0
18をこえる	±1.5	±2.0



(a) スランプ (普通コンクリート)



(b) 空気量 (普通コンクリート)

図 2.2.1 普通コンクリートの圧送前後における品質変化⁸⁾

圧送前後のコンクリートの品質変化の傾向について、1972年のポンプ指針⁶⁾の制定時には使用材料や圧送条件、研究者ごとに多くの品質変化の傾向が示されていた。その後、1979年のポンプ指針⁸⁾の改定において、圧送前後の品質変化に関する代表的な研究成果^{9)~12)}を基に、普通コンクリートのスランプおよび空気量の変化の傾向は図2.2.1のように示され、現在のポンプ指針においても普通コンクリートのスランプおよび空気量の変化として同様の図が示されている。

1990年頃から高性能AE減水剤の開発によって少ない単位水量で高い流動性が得られるようになり、高強度コンクリートや高流動コンクリートが頻繁に使用されるようになった。この中で、高性能AE減水剤を用いた場合、圧送後に空気量が大きくなる事例が多く報告され、これを踏まえて、中田ら¹³⁾は、近年報告された高性能AE減水剤を用いたコンクリートの圧送前後の品質変化に関する文献調査を行った。その結果、高性能AE減水剤を用いたコンクリートの空気量は、従来のAE減水剤を用いたコンクリートと異なり、圧送後に大きくなる傾向を示すことを明らかにし、2009年のポンプ指針¹⁾には、AE減水剤を用いたコンクリートと高性能AE減水剤を用いたコンクリートに大別した圧送前後の品質変化の傾向が示された。

(2) コンクリートポンプに加わる圧送負荷の算定方法

1972年に日本建築学会からポンプ指針⁶⁾が発刊された。このときのコンクリートポンプの機種を選定方法は、表2.2.3に示す水平換算長さから配管全体の水平換算距離を求めて、コンクリートポンプの性能に表示されている最大輸送距離（水平）が水平換算距離を上回るものを選定する方法であった。

表 2.2.3 各種輸送管の水平換算長さ表⁶⁾

項 目	単位	呼び寸法	水平換算長さ (m)
上向き垂直管	1 m 当り	100 A (4B)	4
		125 A (5B)	5
		150 A (6B)	6
テ ー パ 管	1 m 当り	175 A→150 A	4
		150 A→125 A	10
		125 A→100 A	20
ベント管	半径 0.5m	90度	12
	半径 1.0m		9
フレキシブルホース	5~8mのもの1本		30

しかし、当時の圧送可否の判定方法（水平換算距離方式）には、次の①~③に示す問題点¹⁴⁾があった。

- ① 圧送可否の判定基準が水平換算距離のみとなっているために、実際には非常な大きな要因であるコンクリートの種類、スランプ、吐出量の影響などが考慮されていないこと。
- ② 各種のコンクリートポンプの最大水平輸送可能距離がメーカー毎にまちまちに設定されていること。
- ③ 最大水平輸送可能距離のあいまいさを水平換算長さの安全率でカバーしているために、水平管

とそれ以外の配管条件で安全率に甚だしい差が生ずること。即ち、水平配管の長い場合には逆に危険側の推定になること。

1977年に佐久田¹⁴⁾は、水平換算距離方式の問題点を指摘した上で、新たな圧送可否の判定方法として(2.2.1)式に示す圧送負荷算定方法を提案し、この方法による圧送負荷の算定例を示した。

$$P = \sum K_n L_n + \frac{1}{10}PH + 3 \sum K_n M_n + 2 \sum K_n N_n \quad \dots (2.2.1) \text{ 式}$$

ここに、P：コンクリートポンプに加わる圧送負荷 (kg/cm²)，K_n：径 n の水平管 1m あたりの圧力損失 (kg/cm²/m)，L_n：径 n の配管の実長 (m)，ρ：コンクリートの比重，H：圧送高さ (m)，M_n：曲り管 (90度) の数 (径 n)，N_n：フレキシブルホースの長さ (m)，但し、テーパ管は、径の小さい方の管とみなす。

ポンプ指針は、1979年に第1次改定⁸⁾され、コンクリートポンプの機種を選定方法について、従来の水平換算距離方式に加えて、佐久田¹⁴⁾が提案した圧送負荷算定方式が追記された。その後、1994年のポンプ指針の第2次改定¹⁵⁾において、コンクリートポンプの機種を選定方法は、圧送負荷算定方式のみとなり、コンクリートポンプの性能から最大輸送距離の項目が削除され、現在に至っている。

一方、圧送負荷を算定する上で重要となる管内圧力損失については、圧送負荷算定方式が導入された1979年のポンプ指針の改定において、普通コンクリートの管内圧力損失の標準値が示された。この管内圧力損失の標準値は、1970年代当時の毛見¹⁶⁾、森永¹⁷⁾、佐久田¹⁸⁾らの研究を基に示されたものである。1990年代になると、高性能AE減水剤が開発され、高強度コンクリートや高流動コンクリートのような粘性の大きいコンクリートが主流となっていった。このようなコンクリートの管内圧力損失は、従来の管内圧力損失の標準値よりも著しく大きい値を示すことが報告され、このような結果を踏まえて、1997年のポンプ指針の改定を目的として発足された小委員会では、高強度コンクリートなどの圧送可否の判定方法を試みた。しかし、高強度コンクリートなどは、それぞれに強い個性を持っているため、管内圧力損失の標準値などを現時点で示すことができないとした¹⁵⁾。そこで、ポンプ指針¹⁵⁾には、水セメント比や化学混和剤などにより分類したコンクリートの種別ごとの実吐出量と管内圧力損失の関係について、水セメント比が45%以下のコンクリートをスランプ21cmの普通コンクリートの管内圧力損失の標準値(K値)に対して、K、2K、3K、...のように示している。

このように、ポンプ指針に示されている圧送負荷の算定方法や管内圧力損失の標準値は、1970年代の圧送実験や施工において測定された結果から導かれたものであり、現在まで特段の変更がなされていない。そのため、1970年代当時からコンクリートの使用材料および品質が変化してきたことやコンクリートポンプの性能および施工条件が大きく変化してきたことを踏まえると、圧送負荷の算定方法や管内圧力損失の標準値がそのまま使用できるか不明な点が残る。

2.2.2 建築で用いられるコンクリートの仕様の変遷

JASS 5³⁾におけるコンクリートの設計基準強度の変遷を図 2.2.2 に示す。ポンプ指針の管内圧力損失の標準値の基となった圧送実験が行われた 1970 年頃のコンクリートの設計基準強度は、135～225kgf/cm²であったのに対して、現在の JASS 5³⁾は 18～36N/mm²までに引き上げられている。また、高強度コンクリートは、1975 年の JASS 5 の改定¹⁹⁾において新たに規定され、現在では、設計基準強度が 36～60N/mm²または 60N/mm²を超えるものまで幅広くなっている。

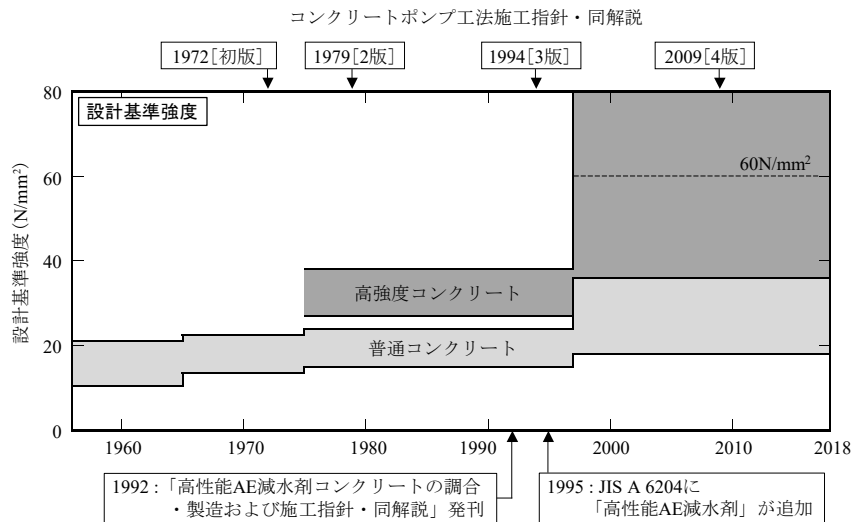


図 2.2.2 JASS 5 におけるコンクリートの設計基準強度の変遷³⁾

日本建築学会「コンクリートの調合設計指針・同解説」（以下、調合設計指針という。）²⁰⁾に示される W/C=50% のときの単位水量の標準値および単位粗骨材かさ容積の標準値を図 2.2.3 に示す。これは、普通ポルトランドセメント・砕石・砕砂および AE 減水剤を使用した普通コンクリートの単位水量の標準値および単位粗骨材かさ容積の標準値である。調合設計指針²⁰⁾における単位水量の標準値は、1970 年頃に調合設計指針がなかったため特に示されていなかったが、年代が進むとスランプごとに小さくなり、現在の JASS 5³⁾において「単位水量の最大値を 185kg/m³とし、できるだけ小さな値とすること」となっている。W/C=50% のときの単位粗骨材かさ容積の標準値は、単位水量の標準値と同様に 1970 年頃に調合設計指針がなかったため特に示されていなかったが、年代が進むとスランプごとに小さくなり、現在の JASS 5³⁾において「3 節に示すコンクリートの品質が得られるように適切な値を確保する。」となっている。

このように、近年のコンクリートは、1970 年頃に比べて設計基準強度が高くなっている他に、単位水量および単位粗骨材かさ容積が小さくなり、単位細骨材量や細骨材率が大きくなっていることが示唆され、コンクリートの品質が大きく変化している可能性がある。

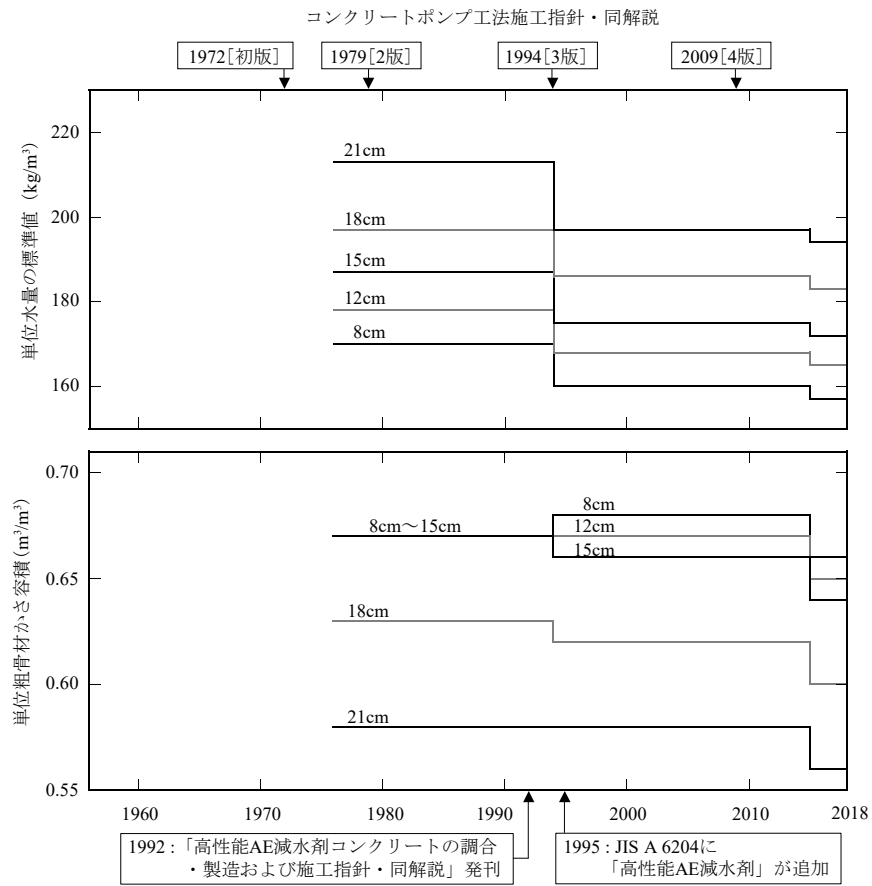


図 2. 2. 3 単位水量の標準値および単位粗骨材かさ容積の標準値²⁰⁾

2.3 コンクリートポンプ工法の問題点の抽出

ポンプ指針¹⁾における圧送計画の現状とその経緯，建築工事で用いられるコンクリートの仕様の変遷を俯瞰すると、現状の圧送計画に対して次の4項目が問題点としてあげられる。

- (1) 圧送計画の立案方法
- (2) 圧送前後の品質変化の標準値
- (3) 管内圧力損失の標準値
- (4) 圧送負荷の算定方法

以下に、各項目の問題点について要約する。

(1) 圧送計画の立案方法に関する問題点

- ① ポンプ指針では、一般的なコンクリートかつ一般的な施工の範囲の場合、圧送負荷の算定を省略できるとしているものの、このような圧送工事においても閉塞などのトラブルは少なからず発生している。
- ② コンクリートポンプの性能が大幅に向上し、さらに高所圧送および長距離圧送に伴う高压化や建築工事の大規模化に伴う大容量化が進む中、ますます綿密な圧送計画が重要となることが考えられるものの、ポンプ指針における圧送計画の基本的な概念は1979年の改定で示されて以降、特段の改定が行われていない。

(2) 圧送前後の品質変化の標準値に関する問題点

- ① レディーミクストコンクリートの発注者が目標スランプの許容差の上限値（目標スランプ18cmの場合、許容差の上限である20.5cm）で発注することが多く見られ²⁶⁾、圧送によるスランプの低下を見込んで荷卸し地点のスランプを1ランク大きいものを発注することは一部の工事に留まっている。
- ② 圧送前後のコンクリートの品質変化は、圧送条件や環境条件によって異なるため、圧送によるコンクリートの品質変化を計画に反映させにくい現状にある。
- ③ ポンプ指針に示されている普通コンクリートの圧送前後の品質変化の傾向は、1979年のポンプ指針⁸⁾から変更されておらず、コンクリートの使用材料や調合条件が変化してきた今日では、圧送によるコンクリートの品質変化の傾向も大きく変化している可能性がある。
- ④ 圧送前後の品質変化の傾向として、ガイドライン⁴⁾に示される圧送条件に応じたスランプ低下の標準値があるものの、この数値は、既往の実験結果や委員会内における議論に基づいて設定されたものであり、圧送距離と品質変化の関係について更なる検討の余地がある。

(3) 管内圧力損失の標準値に関する問題点

- ① ポンプ指針における管内圧力損失の標準値は1970年頃の圧送実験を基にした値であり、コンクリートの使用材料や調合条件は1970年代から現在までに大きく変化してきていることが考えられ、現状の管内圧力損失の標準値をそのままの使用できるか不明な点が残る。

- ② ポンプ指針では、高強度コンクリートの管内圧力損失について、普通コンクリートにおけるスランプ21cmの管内圧力損失の標準値を基準（K値）とし、K, 2K, 3K...のように表現しているものの、ポンプ指針に示される高強度コンクリートの管内圧力損失には大きな幅があり、実際にどの値を用いれば良いか不明瞭であり、圧送計画に反映しにくいものとなっている。

（4）圧送負荷の算定方法に関する問題点

- ① ポンプ指針における圧送負荷の算定方法は1970年頃の圧送実験を基にした値であり、近年主流となってきた高強度コンクリートや高流動コンクリートの圧送にそのままの使用できるか不明な点が残る。
- ② 実務において、圧送負荷は、圧送技能者の経験に基づいて算定している場合が多く、圧送負荷を算定せずに圧送施工している場合がある。

2.4 本研究の位置付け

現在のポンプ指針における圧送計画の基本的な概念は、1960年代から1970年代にかけて行われた圧送実験や施工報告を基に、1979年のポンプ指針（2版）⁸⁾の改定において構築されたものである。一方で、コンクリートの調合や使用材料が年々変化してきており、1978年のJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の改正からレディーミクストコンクリートの標準品は「AE剤」もしくは「AE減水剤」を使用したAEコンクリートとなった²⁷⁾。さらに、1990年頃に普及し始めた高性能AE減水剤の開発により、高強度コンクリートや高流動コンクリートなどコンクリートが多様化してきたことは言うまでもない。ポンプ指針は、1979年（2版）の改定以降、1994年（3版）¹⁵⁾および2009年（4版）¹⁾に2度の改定が行われ、最新の研究成果やコンクリートポンプ工法の技術情報が取り入れられてきた。しかし、圧送計画については、1979年のポンプ指針（2版）⁸⁾に示された圧送によるコンクリートの品質変化や圧送負荷の算定方法を踏襲して改定されたに過ぎず、閉塞などのトラブルが頻繁に発生していることを踏まえると、近年の実施工に十分対応できているとは言い難い。

そこで、本研究では、このような背景を踏まえて、1990年頃以降の圧送実験や施工報告を集約し、コンクリートの調合や圧送条件が圧送前後の品質変化や管内圧力損失に及ぼす影響を検討した。さらに、これらの傾向を取り入れ、前項2.3で抽出したコンクリートポンプ工法の問題を改善させ、閉塞などのトラブルを低減できる圧送計画の合理的手法について提案している。

【第2章の参考文献】

- 1) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009.12
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートポンプ施工技術調査委員会報告書，2007.9
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2015.7
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート圧送工法ガイドライン 2009 および解説，2009.6
- 5) 土木学会：コンクリートポンプ施工指針 2012 年版，2012.6
- 6) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説，1972
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，1969
- 8) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説，1979
- 9) 岸谷孝一，掛貝安雄：中央大学多摩校地施設新築工事のコンクリート工事における一連の研究
その1～その6，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.407-408，1977.10
- 10) 毛見虎雄ほか：都営住宅 50H-3101（白鬚東）工事に於ける高級コンクリート工事の施工報告，
戸田建設，1978.3
- 11) 武田一久ほか：大成建設社内資料，1979
- 12) 西野敬史，田中健治郎：新都心6番目の超高層新宿野村ビルの施工，施工，1979.3
- 13) 中田善久，大塚秀三，毛見虎雄：ポンプ圧送に伴う高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後
の品質変化に関する文献的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.223-228，
2007.7
- 14) 佐久田昌治：コンクリートポンプの圧送負荷の算定方法に関する一提案，日本建築学会関東支
部研究報告集，pp.349-352，1977
- 15) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，1994
- 16) 毛見虎雄：コンクリートポンプの施工に関する研究，セメント・コンクリートジャーナル，
No.302，pp.2-12，1972.4
- 17) 森永繁：コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究，コンクリートジャーナル，Vol.9，
No.7，pp.1-11，1971.7
- 18) 佐久田昌治，嵩英雄，佐藤忠博，山根昭：フレッシュコンクリートの管内流動 Bingham body
としての性状と軽量コンクリートの圧力分布の非線型性について，日本建築学会関東支部研究
報告集，pp.145-148，1974
- 19) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，1975
- 20) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説，2015
- 21) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，1953
- 22) 日本建築学会：高性能 AE 減水剤コンクリートの調合・製造および施工指針（案）・同解説，
1992.6
- 23) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，1997
- 24) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，1986

- 25) 全国コンクリート圧送事業団体連合会：コンクリートポンプ圧送マニュアル 2006年版，2006.8
- 26) コンクリートポンプ施工技術調査委員会：コンクリートポンプ施工技術調査委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.47-49，2007.9
- 27) 笠井芳夫，坂井悦郎：新セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，pp.175-188，2007

第3章 圧送前後のコンクリートの品質変化 に及ぼす圧送距離の影響

第3章 圧送前後のコンクリートの品質変化に及ぼす圧送距離の影響

3.1 本章の目的

コンクリートポンプ工法において、圧送前後のコンクリートの品質変化は、コンクリートの調合や圧送計画を立案する上で無視することができない重要な要因であり、特に圧送によるコンクリートのスランプおよびスランプフローの変化が重要視されている。コンクリートのスランプおよびスランプフローは、構造体コンクリートに要求される品質や施工条件を考慮して定める必要があり、ポンプ指針¹⁾では、圧送によるコンクリートの品質の変化を見込んで荷卸し地点のスランプを定めることを推奨している。しかしながら、施工現場において、荷卸し地点のスランプは発注者の判断に任されており、必ずしも圧送によるコンクリートの品質の変化を見込んで荷卸し地点のスランプを定めているとは言い難い現状がある。この理由の一つに、圧送によってコンクリートの品質がどの程度変化するか把握しにくいことが考えられる。

圧送によるコンクリートの品質変化について、ポンプ指針¹⁾では、普通コンクリートにおけるスランプの低下量が -0.5cm となる傾向と空気量の変化量が -0.2% となる傾向を解説しており、この傾向は、1970年頃に岸谷ら²⁾、毛見ら³⁾、武田ら⁴⁾、西田ら⁵⁾などの研究成果を基に示されたものである。これに対して、近年のコンクリートの使用材料や調合が変化してきたことから中田ら⁶⁾が行った文献調査では、高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートが、AE 減水剤を用いたコンクリートとは異なり、圧送後に空気量が増加するという傾向を報告している。しかし、これまでの圧送による品質変化は、圧送前後の観点のみの検討であり、この中にはコンクリートの経時変化、環境条件および圧送距離（水平換算距離）などの要因が含まれている。

一方、水平換算距離とスランプの低下量の関係について、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（案）」⁷⁾では、圧送距離が長くなるとスランプの低下量が大きくなることを示している。また、2009年に発刊された JCI ガイドライン⁸⁾では、圧送条件に応じたスランプ低下の標準値が示され、このスランプ低下の標準値は、現在の圧送計画の立案に大きな役割を果たしている。しかし、浦野らの報告^{9), 10)}のように、水平換算距離とスランプの低下量に比例関係が認められない報告もあり、フィールド実験が主であるコンクリートポンプに関する研究は、実験数を多くできないことやいろいろな条件によって結果にばらつきがあることから結論を導きにくい側面がある。

そこで、本章は、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コンクリートの品質変化に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。ここでは、高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの圧送前後の品質変化が AE 減水剤を用いたコンクリートとは異なるという報告⁶⁾を踏まえて、AE 減水剤を用いたコンクリート（以降、AE 減水剤コンクリートという）および高性能 AE 減水剤を用いたコンクリート（以降、高性能 AE 減水剤コンクリートという）に大別し、文献調査により圧送距離（水平換算距離）ごとの品質変化を系統的に調査した。さらに、圧送によるコンクリートの品質変化を実験的に調べることで、文献調査による圧送前後の品質変化の妥当性を確認した。

3.2 圧送前後のコンクリートの品質変化に関する文献的検討

3.2.1 文献調査の概要

(1) 調査対象とする文献およびデータ

対象とする文献は、1990年以降に、日本建築学会、土木学会および日本コンクリート工学会において発表されたコンクリートポンプ工法に関する文献とした。このうち、圧送実験または実施工において圧送前後の品質変化を検討している220編を対象とした。なお、この文献の中には、圧入に至るまでの圧送過程でコンクリートの品質変化を検討しているものも含まれている。

(2) 調査対象としたデータの水平換算距離と調査条件

圧送前後の品質変化は使用材料、調査および圧送条件などにより異なることが容易に推察できる。そのため、検討対象とするデータは、化学混和剤にAE減水剤または高性能AE減水剤を用いて、ピストン式ポンプ車により配管形式（配管径5B）のものに限定した。また、骨材に軽量骨材を用いているもの、水平換算距離が不明なものおよび300m以上のものは除外した。

AE減水剤コンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートの水平換算距離の分布を図3.2.1に示す。水平換算距離が文献中に表記されていない場合、輸送管の構成が示されているものは、土木学会「コンクリートのポンプ施工指針 平成12年版」¹¹⁾の換算方法に準拠し算出した値を用いた。既往の研究における水平換算距離は、いずれの混和剤においても100m～250mの範囲が多

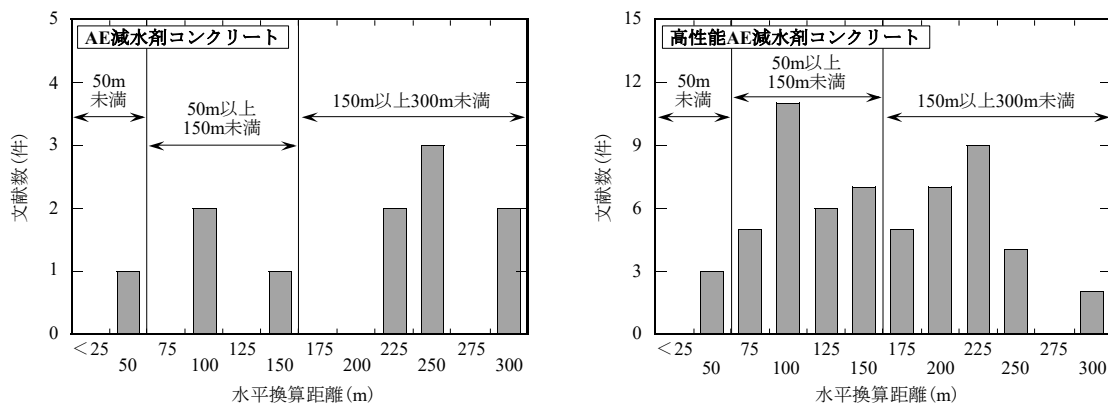


図 3.2.1 AE 減水剤コンクリートおよび高性能 AE 減水剤コンクリートの水平換算距離の分布

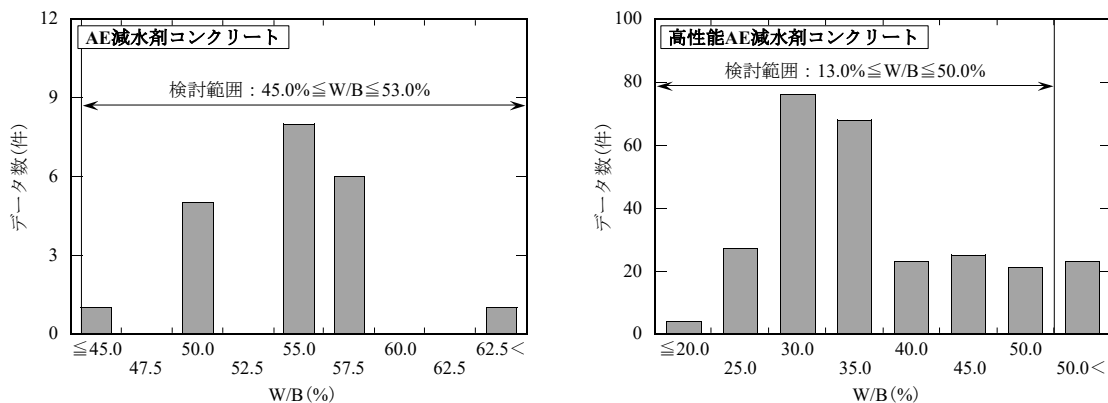


図 3.2.2 AE 減水剤コンクリートおよび高性能 AE 減水剤コンクリートの W/B の分布

く検討されている結果となった。また、水平換算距離の最短は36mであり、最長は296mであった。これを踏まえて、圧送前後のスランブ、スランブフロー、空気量および材齢28日における圧縮強度の変化は、水平換算距離を「50m未満」、「50m以上150m未満」および「150m以上300m未満」の3つに区分して検討した。なお、この区分は、ガイドライン⁸⁾における圧送条件に応じたスランブ低下の標準値の水平換算距離の区分と同様にした。

以上の条件で調査した結果、AE減水剤コンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートの水セメント比の分布は図3.2.2に示すようになった。水セメント比は、AE減水剤コンクリートにおいて55%前後が多く検討されており、高性能AE減水剤コンクリートにおいて35%前後が多く検討されている結果となった。また、AE減水剤コンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートの標準的な調合を検討するために、AE減水剤コンクリートのW/Cが45.0%未満のもの、高性能AE減水剤コンクリートのW/Cが50.0%を超えるものを排除した。本章で対象となるAE減水剤コンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートのデータ数は表3.2.1に示すようになり、AE減水剤コンクリートのW/Bの範囲は、45.0～62.0%となり、高性能AE減水剤コンクリートのW/Bの範囲は、13.0～50.0%となった。

表3.2.1 対象となるデータ数

種類	水平換算距離の区分	スランブ	スランブフロー	空気量	材齢28日圧縮強度
AE 減水剤 コン クリ ート	50m未満	0	2	2	0
	50m以上150m未満	4	3	4	2
	150m以上300m未満	9	2	10	3
高 性 能 A E 減 水 剤 コ ン ク リ ート	50m未満	0	11	9	3
	50m以上150m未満	13	106	103	42
	150m以上300m未満	56	73	123	52

3.2.2 圧送前後のスランプ、スランプフローおよび空気量の変化

(1) AE 減水剤コンクリートの品質変化

AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプの変化を図 3.2.3 に示し、AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプフローの変化を図 3.2.4 に示す。AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプおよびスランプフローの変化は、これまでのポンプ指針⁸⁾で解説されているように、低下する傾向を示し、水平換算距離が長くなるとその低下量が大きくなる傾向を示した。これは、コンクリートの調合および輸送管径がほぼ同一の場合、水平換算距離が長くなると輸送管内のコンクリートにかかる圧送圧力が増加することに加え、輸送管内、特にベント管における強制的なせん断力が増大したこと¹²⁾がスランプおよびスランプフローの低下量に影響したものと考えられる。また、圧送前のスランプおよびスランプフローが小さいほど低下量が大きくなる傾向を示した。

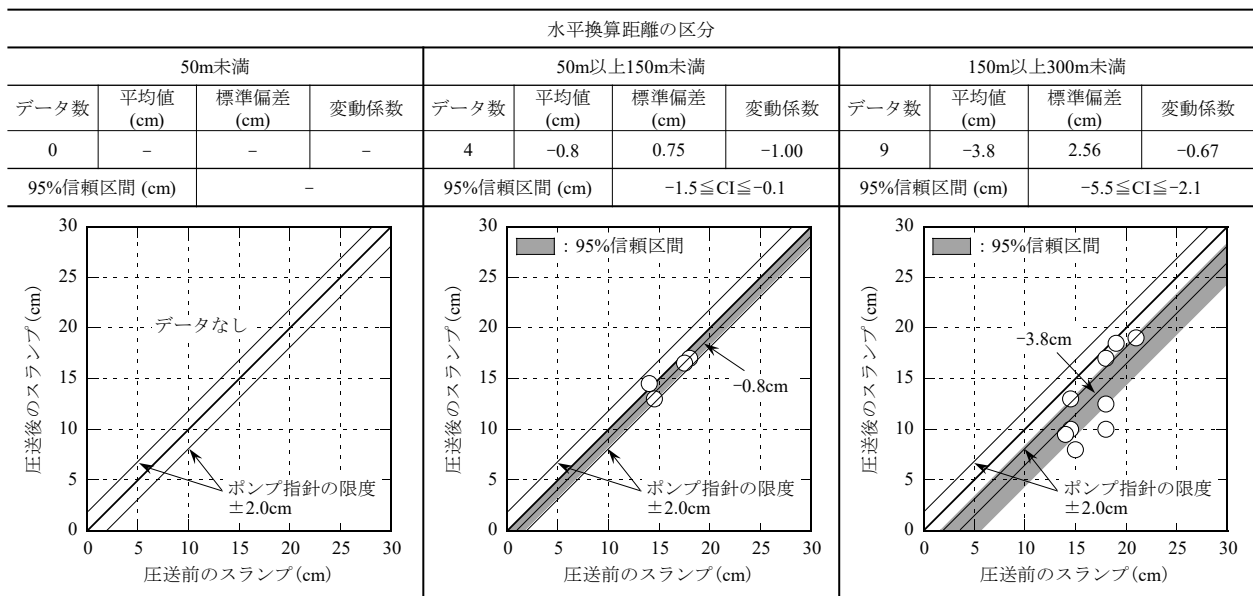


図 3.2.3 AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプの変化

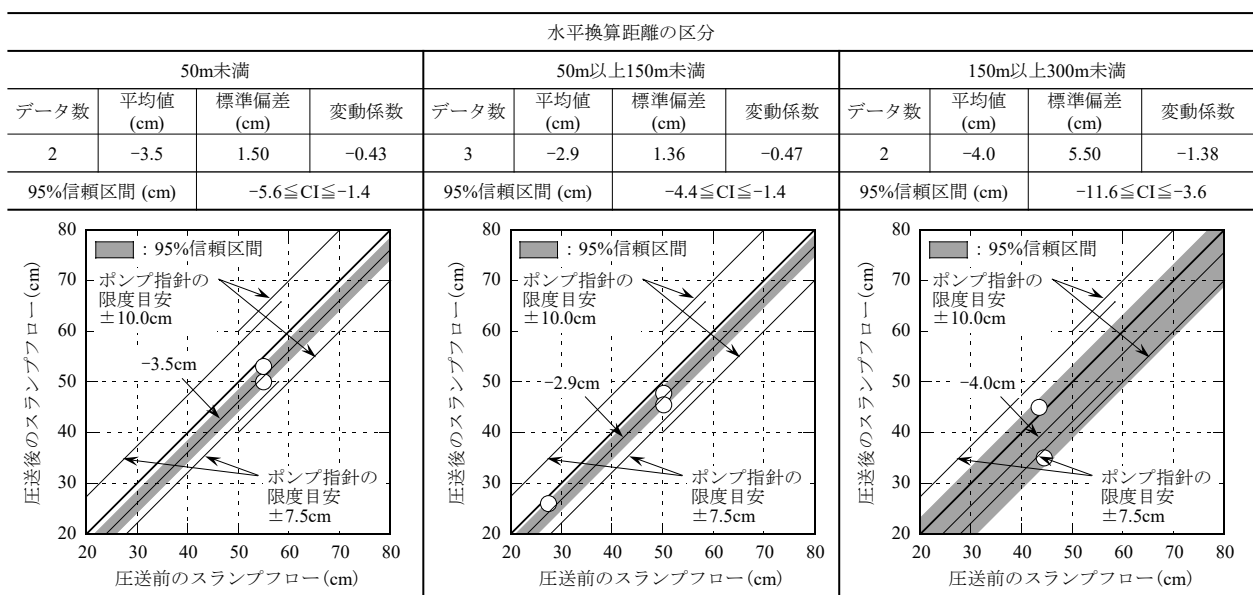


図 3.2.4 AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプフローの変化

圧送前のスランプおよびスランプフローが小さいコンクリートは、単位セメント量や総ペースト量が小さくなること、混和剤の使用量が少ないことおよびこれによる圧送負荷が増大したことが影響したためと考えられる。水平換算距離が150m以上300m未満のスランプは、ポンプ指針¹⁾のスランプの限度の範囲を超える傾向を示した。

AE減水剤コンクリートの圧送前後の空気量の変化を図3.2.5に示す。AE減水剤コンクリートの圧送前後の空気量の変化は、僅かに増加する傾向を示し、これまでのポンプ指針¹⁾に示される傾向と異なる傾向を示した。1997年のJASS 5¹³⁾の改定において、設計基準強度の上限値および下限値が引き上げられた。その改定に伴い、従来よりも水セメント比が小さくなり、単位セメント量が増大している可能性が大きい。この単位セメント量の増加がコンクリートの粘性を増大させ、圧送によりコンクリート中の空気が抜けにくくなったためと考えられる。しかし、水平換算距離が圧送前後の空気量の変化に及ぼす明確な傾向は見られず、水平換算距離が圧送前後の空気量の変化に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

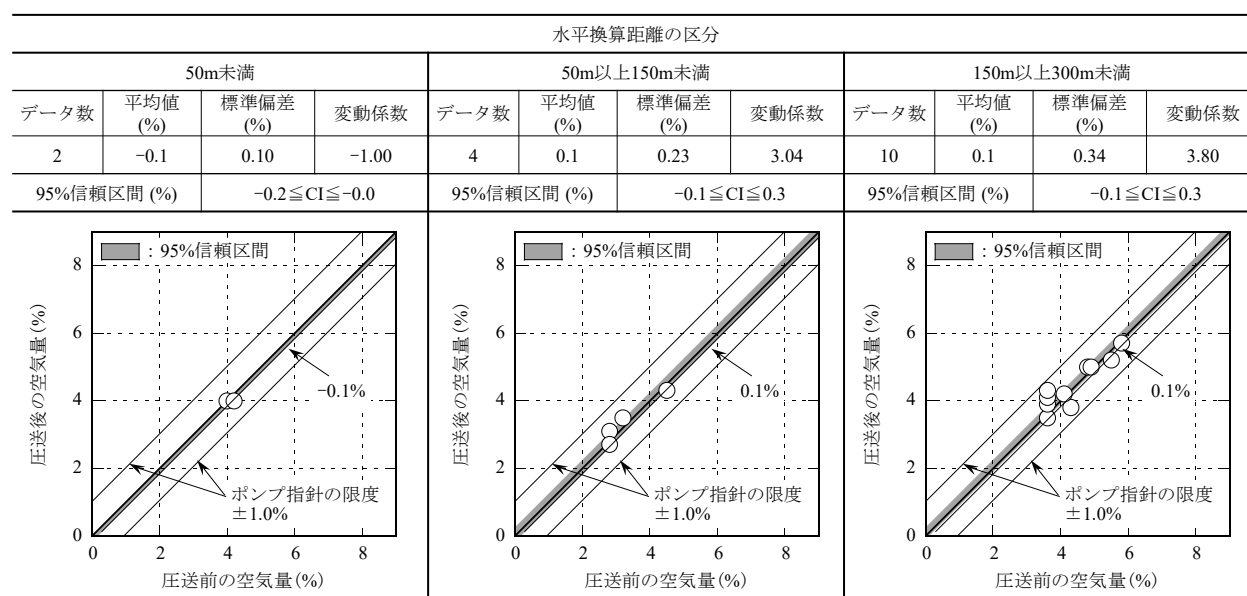


図 3.2.5 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の空気量の変化

(2) 高性能 AE 減水剤コンクリートの品質変化

高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプの変化を図3.2.6に示し、高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプフローの変化を図3.2.7に示す。高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプおよびスランプフローは、(1) AE 減水剤コンクリートと同様に、低下する傾向を示し、水平換算距離が長くなるとその低下量が大きくなる傾向を示した。また、高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプおよびスランプフローの低下量は、AE 減水剤コンクリートに比べて大きくなる傾向を示した。高性能 AE 減水剤コンクリートは、AE 減水剤コンクリートに比べて W/B が小さいため圧送負荷が大きくなることや、AE 減水剤よりも減水効果が大きく、同一のスランプであっても AE 減水剤コンクリートよりも総ペースト量が少なくなることが影響していると考えられる。さらに、AE 減水剤と高性能 AE 減水剤の減水作用が異なる

こともこの要因の一つであると考えられるものの、更なる検討が必要であるといえる。高性能 AE 減水剤コンクリートが圧送後にスランプが低下する傾向は、本文献調査のデータ数のうち約 80% で見られ、岩竹らの報告¹⁴⁾している 70 調査中、約 80% の調査が低下したというものとほぼ同程度であった。

圧送前のスランプおよびスランプフローが小さいコンクリートは、低下量が大きくなる傾向を示した。これは、(1) AE 減水剤コンクリートと同様に、圧送前のスランプおよびスランプフローが小さいとき、単位セメント量や総ペースト量が小さくなること、混和剤の使用量が少ないことおよびこれによる圧送負荷が増大したためと考えられる。また、水平換算距離が 150m 以上 300m 未満のスランプおよびスランプフローは、ポンプ指針¹⁾のスランプの限度およびスランプフローの限度目安の範囲を超える傾向を示した。

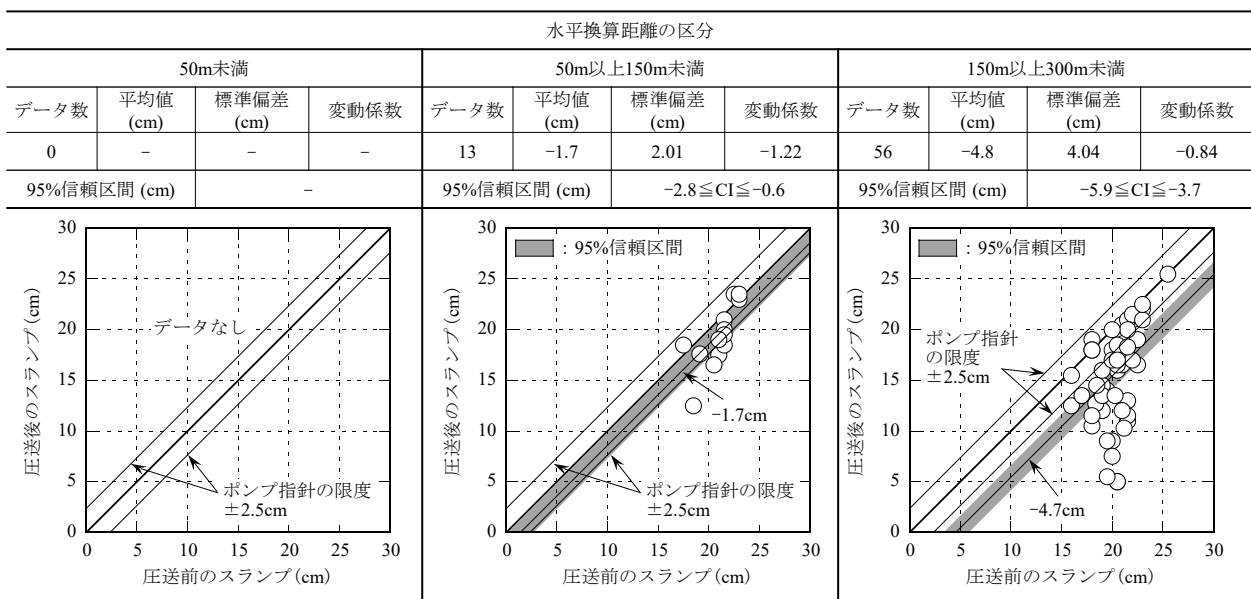


図 3.2.6 高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプの変化

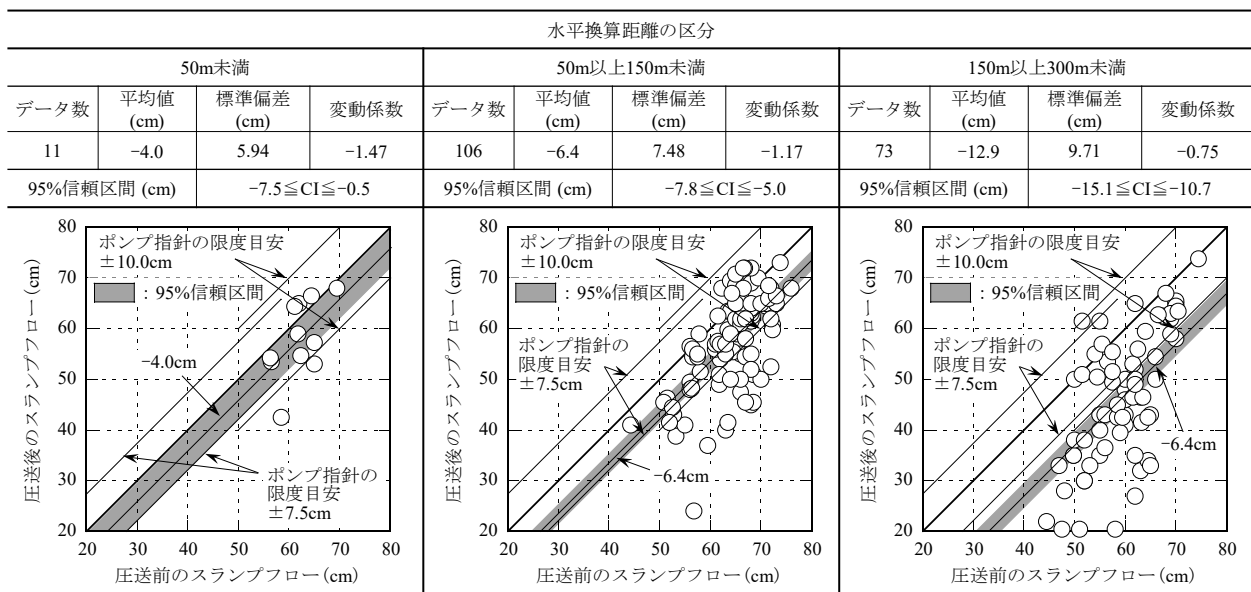


図 3.2.7 高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプフローの変化

高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の空気量の変化を図 3.2.8 に示す。高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の空気量は若干増加する傾向を示し、その増加量は AE 減水剤に比べて大きくなった。これは、高性能 AE 減水剤コンクリートの単位セメント量が大きくなり、コンクリートの粘性を増大させ、圧送によりコンクリート中の空気が抜けにくくなったためと考えられる。この空気量が増加する傾向は、本文献調査のデータ数のうち約 70% で見られ、岩竹らの報告¹⁴⁾している 69 調査中、約 80% の調査が増加したというものとほぼ同程度であった。しかし、水平換算距離が圧送前後の空気量の変化に及ぼす明確な傾向は見られず、水平換算距離が空気量の変化に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

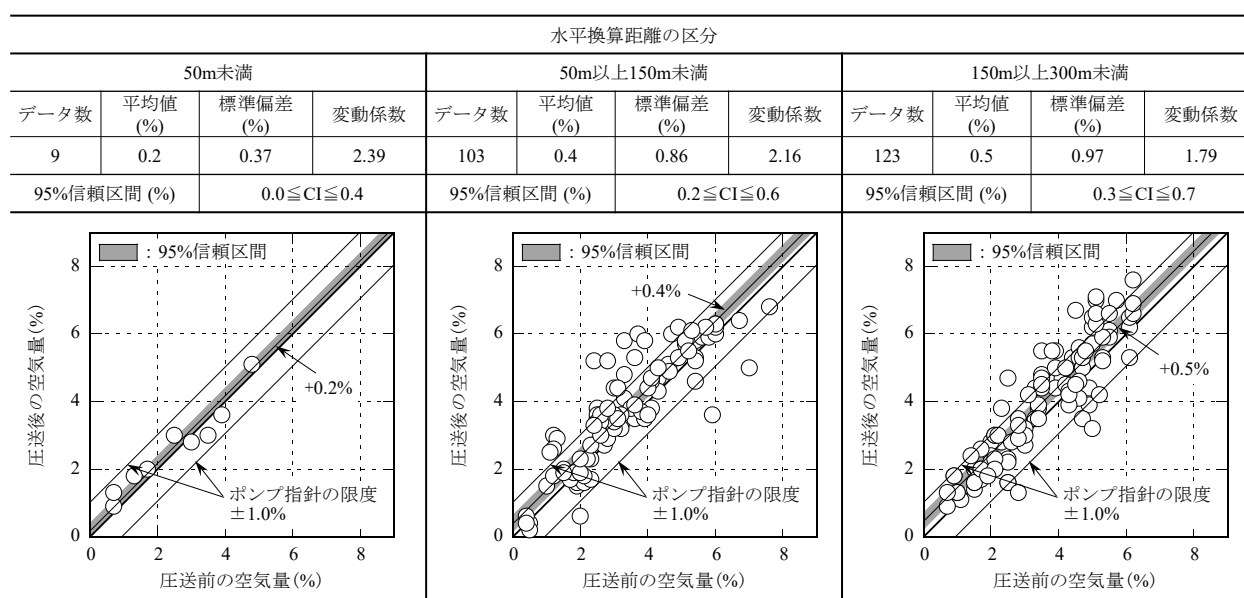


図 3.2.8 高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の空気量の変化

3.2.3 圧送前後の圧縮強度の変化

(1) AE 減水剤コンクリートの品質変化

AE 減水剤コンクリートの圧送前後の圧縮強度の変化を図 3.2.9 に示す。AE 減水剤コンクリートの圧送前後の圧縮強度は、水平換算距離にかかわらずほぼ同等の値を示した。しかし、水平換算距離が長くなるとデータ数に差があるものの標準偏差が大きくなる傾向を示した。すなわち、圧送前後の圧縮強度の変化は小さいものの、水平換算距離が長くなるとそのばらつきが大きくなる傾向を示した。

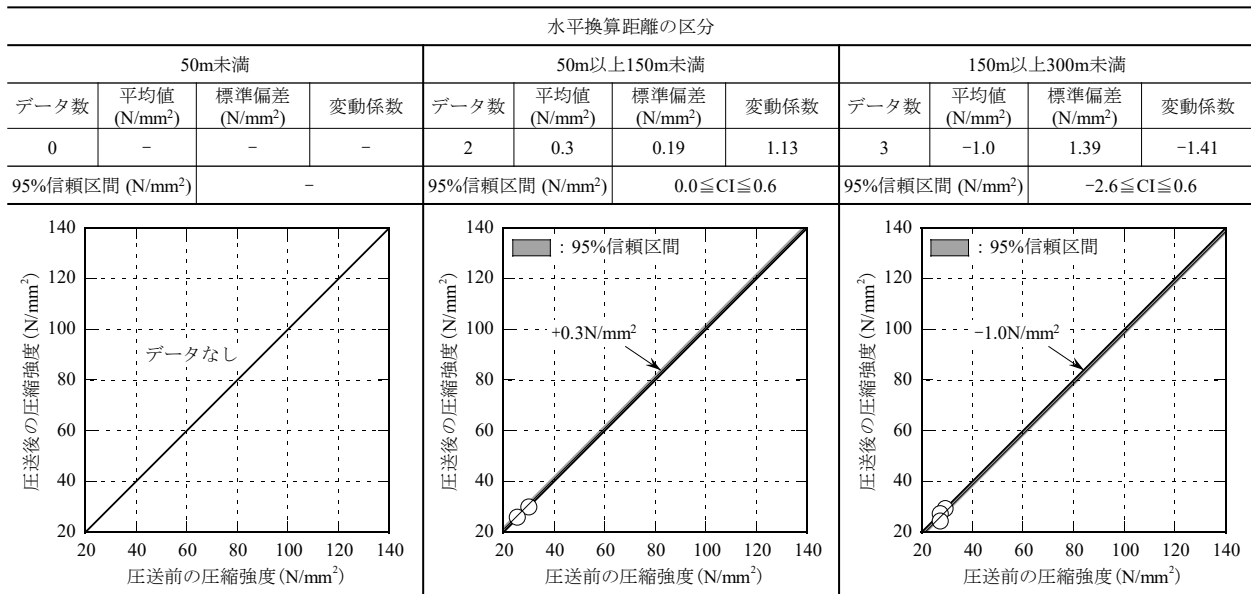


図 3.2.9 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の圧縮強度の変化

(2) 高性能 AE 減水剤コンクリートの品質変化

高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の圧縮強度の変化を図 3.2.10 に示す。高性能 AE 減

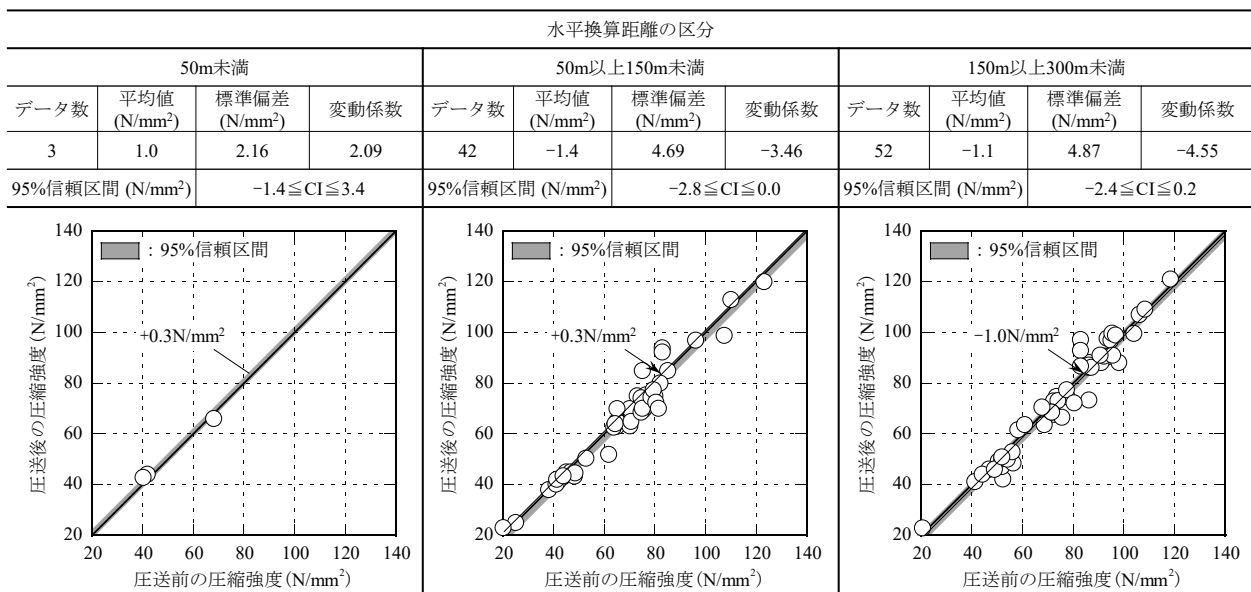


図 3.2.10 高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の圧縮強度の変化

水剤コンクリートの圧送前後の圧縮強度は、水平換算距離にかかわらず僅かに変化する傾向を示した。これは、圧送前後の空気量が増加したことや品質のばらつきが影響したためと考えられる。また、水平換算距離が長くなるとばらつきが大きくなる傾向を示した。

3.2.4 文献調査による圧送前後のコンクリートの品質変化の傾向

1990年以降に発表されたコンクリートポンプ工法に関する文献を調査し、圧送前後のスランブ、スランブフロー、空気量および材齢28日における圧縮強度の変化を水平換算距離50m未満、50m以上150m未満および150m以上300m未満の3つに区分して検討した。その結果、文献調査によるコンクリートの圧送前後の品質変化の傾向をまとめると表3.2.2に示すようになる。

(1) スランブおよびスランブフロー

コンクリートの圧送前後のスランブおよびスランブフローは、化学混和剤の種類にかかわらず水平換算距離が長くなるとその低下量が大きくなる傾向を示し、水平換算距離150m以上の場合に、ポンプ指針のスランブの限度およびスランブフローの限度目安の範囲を超える傾向を示した。また、圧送前後の品質変化は、高性能AE減水剤コンクリートの方がAE減水剤コンクリートに比べて大きくなる傾向を示した。

(2) 空気量

コンクリートの圧送前後の空気量は、化学混和剤の種類にかかわらず若干増加する傾向を示し、この増加量は、高性能AE減水剤コンクリートの方がAE減水剤コンクリートに比べて大きくなる傾向を示した。しかし、水平換算距離が圧送前後の空気量に及ぼす明確な傾向は見られず、圧送前後の空気量の変化量は、いずれもポンプ指針の空気量の限度の範囲内であった。

(3) 圧縮強度

コンクリートの圧送前後の圧縮強度は、化学混和剤の種類にかかわらず、ばらつきがあるものの概ね同等の値を示し、このばらつきは水平換算距離が長くなると大きくなる傾向を示した。また、圧送前後の空気量の変化が圧縮強度に及ぼす影響は見られなかった。

表 3.2.2 文献調査によるコンクリートの圧送前後の品質変化

種類	水平換算距離の区分	スランブ	スランブフロー	空気量	材齢28日圧縮強度
A E コン クリ ート 減 水 剤	50m未満	—	-3.8cm	-3.8%	—
	50m以上150m未満	-0.8cm	-2.9cm	0.1%	0.3N/mm ²
	150m以上300m未満	-3.8cm	-4.0cm	0.1%	-1.0N/mm ²
高 性 能 A E コン クリ ート 減 水 剤	50m未満	—	-4.0cm	0.2%	1.0N/mm ²
	50m以上150m未満	-1.7cm	-6.4cm	0.4%	-1.4N/mm ²
	150m以上300m未満	-4.8cm	-12.9cm	0.5%	-1.1N/mm ²

■ : データが無いまたは著しく少ないものを示す

3.3 圧送に伴うコンクリートの品質変化に関する実験的検討

3.3.1 圧送実験の概要

前項 3.2 において、コンクリートポンプ工法における圧送距離（300m 程度以下）が圧送前後の品質変化に及ぼす影響を明らかにするために、AE 減水剤コンクリートおよび高性能 AE 減水剤コンクリートについて、文献調査により圧送距離（水平換算距離）ごとの品質変化を系統的に調査した。これは、コンクリートポンプに関する研究が実験数を多くできないことやいろいろな条件によって結果にばらつきがあることから結論を導きにくいいため、既往の研究を調査したものである。しかし、コンクリートの品質変化は、図 3.3.1 に示すように圧送による影響に加え、コンクリートの製造からの時間を含めた経過時間や輸送管内の滞留時間などの影響も考慮する必要がある。そのため、前節 3.2 の文献調査による傾向は、コンクリートの経時変化などを踏まえた検討とは言えず、実験結果の系統的な検討にすぎない。

そこで、ここでは、圧送によるコンクリートの品質変化を明らかにするために、AE 減水剤コンクリートおよび高性能 AE 減水剤コンクリートについて圧送に伴う 7 箇所の品質変化と経時変化（静置および傾胴式ミキサ）を比較検討した。

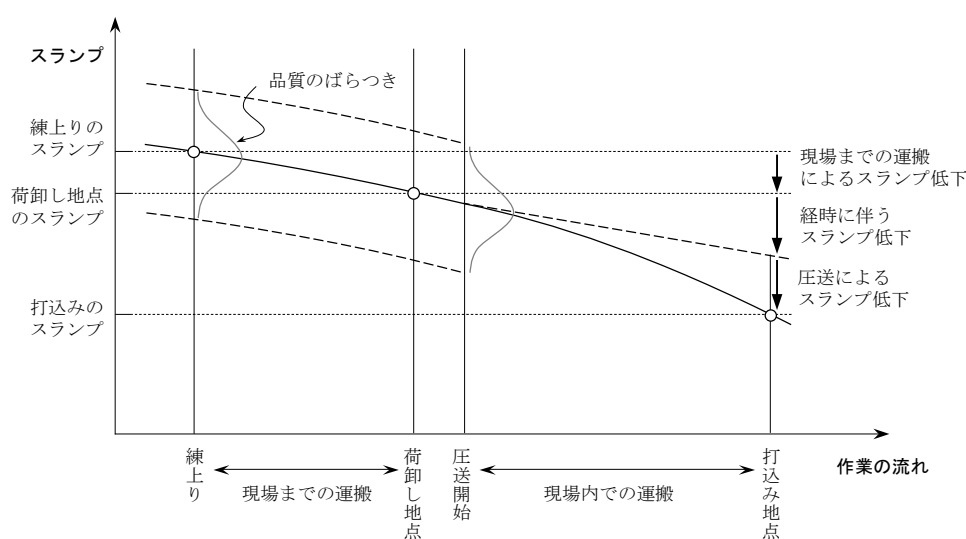


図 3.3.1 コンクリートの運搬に伴うスランプの変化の概念図

(1) 実験の要因と水準

圧送するコンクリートの種類は、3.2 の文献調査結果において AE 減水剤コンクリートおよび高性能 AE 減水剤コンクリートの代表的な調合となるものとして、AE 減水剤コンクリートに呼び名：普通 33-18-20-N および高性能 AE 減水剤コンクリートに呼び名：高強度 60-60-20-N を用いた。さらに、ポンプのエンジン回転数は 1,000, 1,200 および 1,800rpm とし、AE 減水剤コンクリートにおける理論吐出量は $31.5\text{m}^3/\text{h}$, $34.5\text{m}^3/\text{h}$ および $43.0\text{m}^3/\text{h}$ の 3 水準と変化させた。また、高性能 AE 減水剤コンクリートにおける理論吐出量は $28.8\text{m}^3/\text{h}$, $32.6\text{m}^3/\text{h}$ および $41.0\text{m}^3/\text{h}$ の 3 水準と変化させた。

(2) コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料を表 3.3.1 に示し、調合を表 3.3.2 に示す。荷卸し地点における目標値は、AE 減水剤コンクリートをスランプ 18±2.5cm とし、高性能 AE 減水剤コンクリートをスランプフロー 60±10cm とした。また、空気量の目標値はいずれも 4.5±1.5% とした。なお、いずれのコンクリートともレディーミクストコンクリート工場において製造され、トラックアジテータにより運搬されたものである。

表 3.3.1 コンクリートの使用材料

材料	名称・種類	品質・性状・主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm ³
水	地下水	-
細骨材	栃木県栃木市尻内町産 陸砂	表乾密度：2.61g/cm ³ 粗粒率：2.75
粗骨材	栃木県佐野市会沢町産 石灰砕石2005	表乾密度：2.70g/cm ³ 実積率：60.0%
化学混和剤	AE減水剤(標準形 I 種)	リグニンスルホン酸塩, キカルボン酸塩
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物

表 3.3.2 コンクリートの調合

種類	W/C (%)	SL, SF (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
AE減水剤コンクリート	47.5	SL=18	4.5	45.3	185	390	765	935	4.680 ^{※1}
高性能AE減水剤コンクリート	31.0	SF=60	4.5	48.4	170	549	773	851	6.588 ^{※2}

※1：AE減水剤，※2：高性能AE減水剤

(3) 試験・測定項目および方法

試験・測定項目および方法を表 3.3.3 に示す。試験項目は、いずれのコンクリートもスランプ、

表 3.3.3 試験・測定項目および方法

試験および測定項目		試料採取位置 または 測定位置	試験および測定方法	測定概要
管内圧力	ピストンの 前面圧	P0	油圧ゲージの 目視観察	ピストンの主油圧から下式によりピストンの 前面圧を算出した。 $P0=Ph \times id^2/R^2$ ここに、P0：ピストンの前面圧 Ph：ピストンの主油圧 id：油圧シリンダ内径(110mm) R：コンクリートシリンダ径(205mm)
	輸送管の 管内圧力	P1, P2	スチール製ゲイワラム式 圧力変換器	-
スランプ試験 スランプフロー試験		出荷 および F0~F5	JIS A 1101 JIS A 1150	-
空気量試験			JIS A 1128	製造直後：無注水法 F0~F5：注水法
単位容積質量			JIS A 1116	-
圧縮強度試験			JIS A 1108	試験材齢28日
凍結融解試験			F0, F5	JIS A 1148(B法)
促進中性化試験		F0, F5	JIS A 1153	促進期間26週

スランプフロー，空気量および圧縮強度とした。試料は、製造直後，F0（荷卸し地点），F1（ホッパ内），F2～F4（圧送過程）およびF5（筒先）の合計7箇所において図3.3.2に示す位置で採取した。F1（ホッパ内）の試料は、ホッパにコンクリート投入後、90秒間かくはんした試料を採取した。

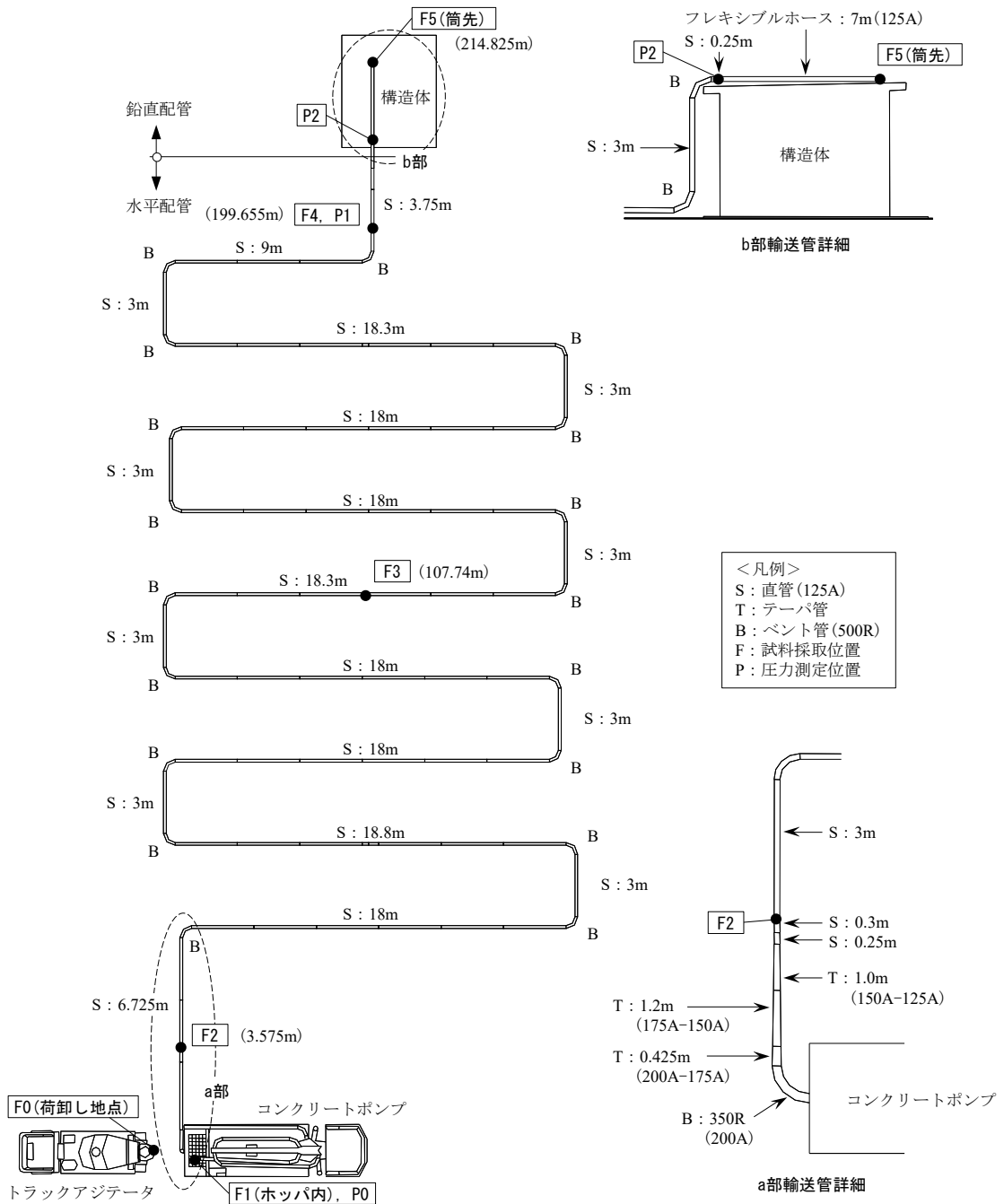


図 3.3.2 配管条件



写真 3.3.1 T字管（F2, F3 および F4）による試料採取状況

した。なお、F2～F4（圧送過程）の試料は、写真3.3.1に示すようにT字管を用いて採取した。空気量試験は、製造直後において無注水法のみとし、F0（荷卸し地点）～F5（筒先）において注水法を行った。また、コンクリートの経時変化による影響を明らかにするために、いずれのコンクリートも荷卸し地点において採取して静置した試料および傾胴式ミキサ（容量60L）によりかくはんした試料（以下、かくはん試料という）の2種類について測定した。測定方法は、荷卸しから約90分および約140分経過した後にスランプ、スランプフローおよび空気量の試験を行った。なお、単位容積質量は、空気量の試験のときの容器を用いて求めた。

圧送による空気量の変化が品質に及ぼす影響を明らかにするために、F0（荷卸し地点）およびF5（筒先）より採取した試料において凍結融解試験および促進中性化試験を行った。凍結融解試験は、JIS A 1148に準拠し、材齢4週まで標準養生した供試体を用いた。促進中性化試験は、JIS A 1153に準拠し、材齢4週まで標準養生した後、湿度 $60\pm 5\%$ 、温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温恒湿室に材齢8週まで静置した供試体を用いた。その後、促進中性化試験は、二酸化炭素濃度 $5\pm 0.2\%$ とし、促進期間26週の結果について検討を行った。

（4）コンクリートの圧送方法

輸送管の構成は、呼び径が125A（5B）を基本として、圧送距離が先端ホースを含む総実長で214.8mであり、うち水平配管を203.0m、鉛直配管を3m、水平換算距離を344.0mとした。

コンクリートの圧送は、先送りモルタル 0.5m^3 （AE減水剤コンクリートは1：3モルタル、高性能AE減水剤コンクリートはコンクリートの粗骨材を除いたモルタル）を先行圧送した後、前述したように吐出量を3水準に変化させて、1水準あたり 5m^3 ずつ圧送した。

使用したコンクリートポンプ（N社製：DC-SL1100BD-M26）は、高圧圧送において最大理論吐出量が $68\text{m}^3/\text{h}$ であり、最大理論吐出圧力が 8.2MPa の性能を有し、ホッパの容量が 0.45m^3 、コンクリートシリンダの内径×ストローク長が $205\times 1800\text{mm}$ の2本の油圧シリンダを有したピストン式である。なお、いずれの吐出量においても高圧圧送とした。

3.3.2 管内圧力損失

理論吐出量と管内圧力損失の関係を図3.3.3に示す。管内圧力損失は、いずれの理論吐出量においてもAE減水剤コンクリートより高性能AE減水剤コンクリートの方が大きくなった。これは、コンクリートの粘性の違いによるものである。また、AE減水剤コンクリートの管内圧力損失は、ポンプ指針¹⁾に示される管内圧力損失の標準値（K値）の3倍（3K）に近似し、高性能AE減水剤コンクリートの管内圧力損失は標準値の4倍（4K）に近似する値を示した。

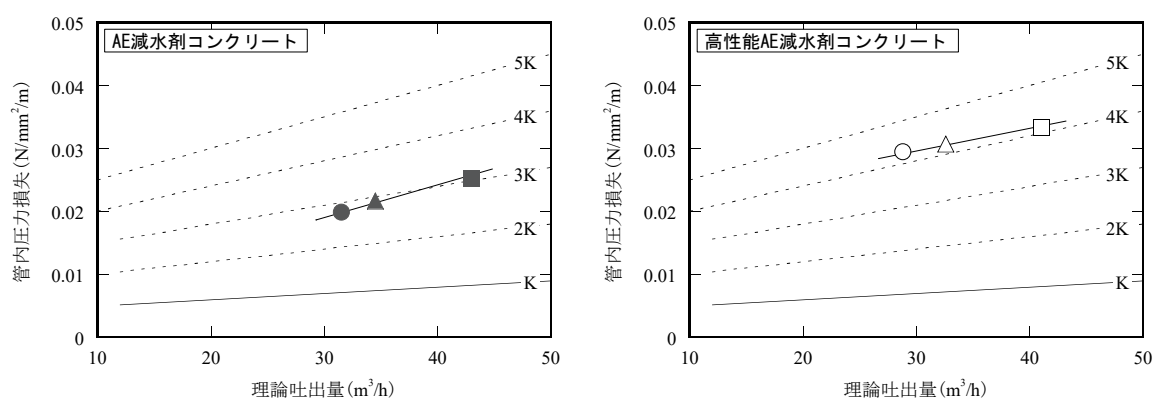


図 3.3.3 理論吐出量と管内圧力損失の関係

3.3.3 圧送によるスランプ，スランプフローおよび空気量の変化

(1) AE 減水剤コンクリート

圧送による AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプの変化を図 3.3.4 に示す。圧送による AE 減水剤コンクリートのスランプは、理論吐出量の変化にかかわらず圧送距離が長くなると、ばらつきがあるものの低下する傾向を示した。また、この傾向は、文献調査による傾向と概ね一致した。

製造直後からの経過時間によるスランプの変化は、圧送した試料と経時変化用試料（静置した試料およびかくはん試料）とほぼ同等な傾向を示した。この結果から、AE 減水剤コンクリートにおける圧送前後のスランプの変化は、圧送による影響よりも経時変化による影響の方が大きいものと考えられる。

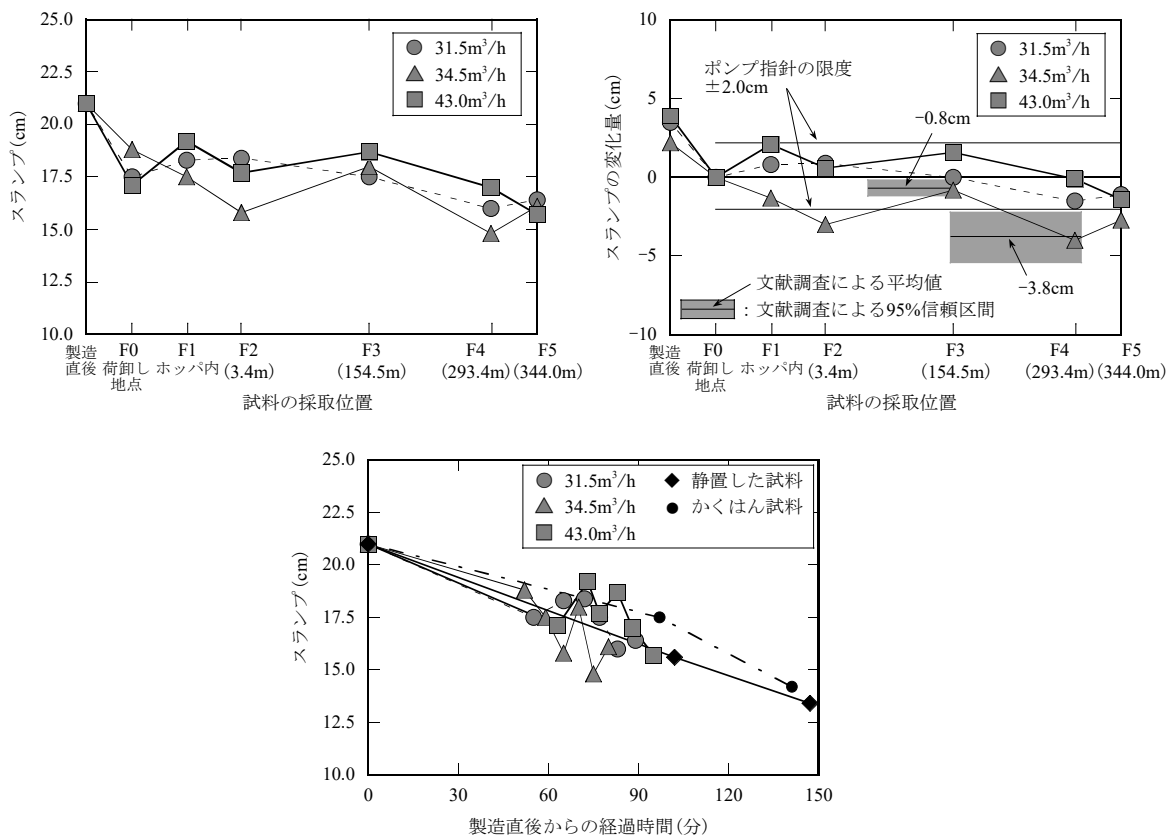


図 3.3.4 圧送による AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプの変化

圧送による AE 減水剤コンクリートの圧送前後の空気量の変化を図 3.3.5 に示す。圧送による AE 減水剤コンクリートの空気量は、理論吐出量の変化にかかわらず圧送距離が長くなると、ばらつきがあるものの増加する傾向を示し、文献調査による傾向と概ね一致した。この圧送による空気量の変化は、ホップ内において増加し F2 において著しく低下した後、圧送距離が長くなると増加する傾向を示した。

製造直後からの経過時間による空気量の変化は、経時変化用試料（静置した試料およびかくはん試料）よりも圧送した試料の方が若干大きくなる傾向を示した。この結果から、AE 減水剤コン

クリートにおける圧送前後の空気量の変化は、経時変化による影響よりも圧送による影響の方が大きいものと考えられる。これは、杉本らの報告¹⁵⁾と同様な傾向であり、ホップ内においてコンクリートをかくはんしたときエントラップトエアが増加し、圧送した直後（F2）において圧送圧力がかかりその空気が抜けたためと考えられる。この圧送により空気量が増加する傾向について、村田ら¹⁶⁾は「フレッシュコンクリートが輸送管を圧送されて行く過程でコンクリート中の大きな気泡が微小気泡に分割された」という考察をしている。しかし、この理由であれば、空気量自体の総量に変化が見られないことになる。さらに、ジョイント（継手）部分から空気が入ることは考えられにくい。本実験は、F2→F3においてベント管が9箇所あり、F3→F4においてベント管が9箇所あった。この点を踏まえると、断定できないものの、ベント管の中でせん断層流の複雑な動きにより起泡作用が再活性されたこと、または、ベント管の外側部と内側部の流速の違いから生じる圧力差により気泡が発生（キャビテーション）し、その気泡が消滅せずにコンクリート中に取り込まれたことなどにより空気量が増加した可能性が考えられる。

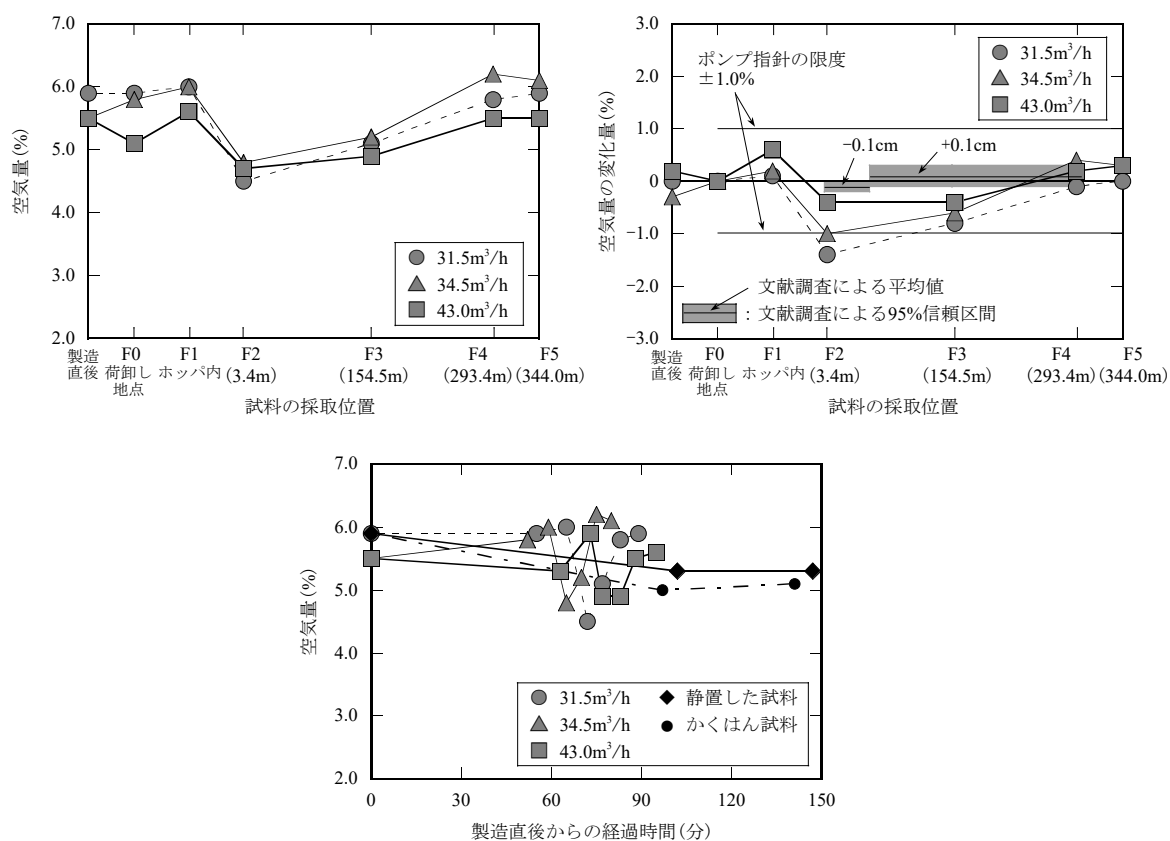


図 3.3.5 圧送による AE 減水剤コンクリートの圧送前後の空気量の変化

(2) 高性能 AE 減水剤コンクリート

圧送による高性能 AE 減水剤コンクリートのスランプフローの変化を図 3.3.6 に示す。圧送による高性能 AE 減水剤コンクリートのスランプフローは、吐出量の変化にかかわらず低下する傾向を示し、文献調査による傾向と概ね一致した。また、スランプフローの変化量は、圧送距離が 150m より長くなるとポンプ指針¹⁾のスランプフローの限度目安の範囲を超える傾向を示した。

製造直後からの経過時間によるスランプフローの変化は、経時変化用試料（静置した試料およびかくはん試料）よりも圧送した試料の方が著しく低下する傾向を示し、経時変化による影響よりも圧送による影響の方が大きいものと考えられる。これは、ベント管の中でコンクリートのせん断層流の複雑な動きによりセメント粒子からカルシウムイオンや硫酸イオンが分解され、これに高性能 AE 減水剤のポリマーが吸着してスランプが低下したためと考えられる。カルシウムイオンや硫酸イオンの分散量は、圧送距離が長くなるにつれて累加して多くなり、スランプの低下量に影響したものと考えられる。

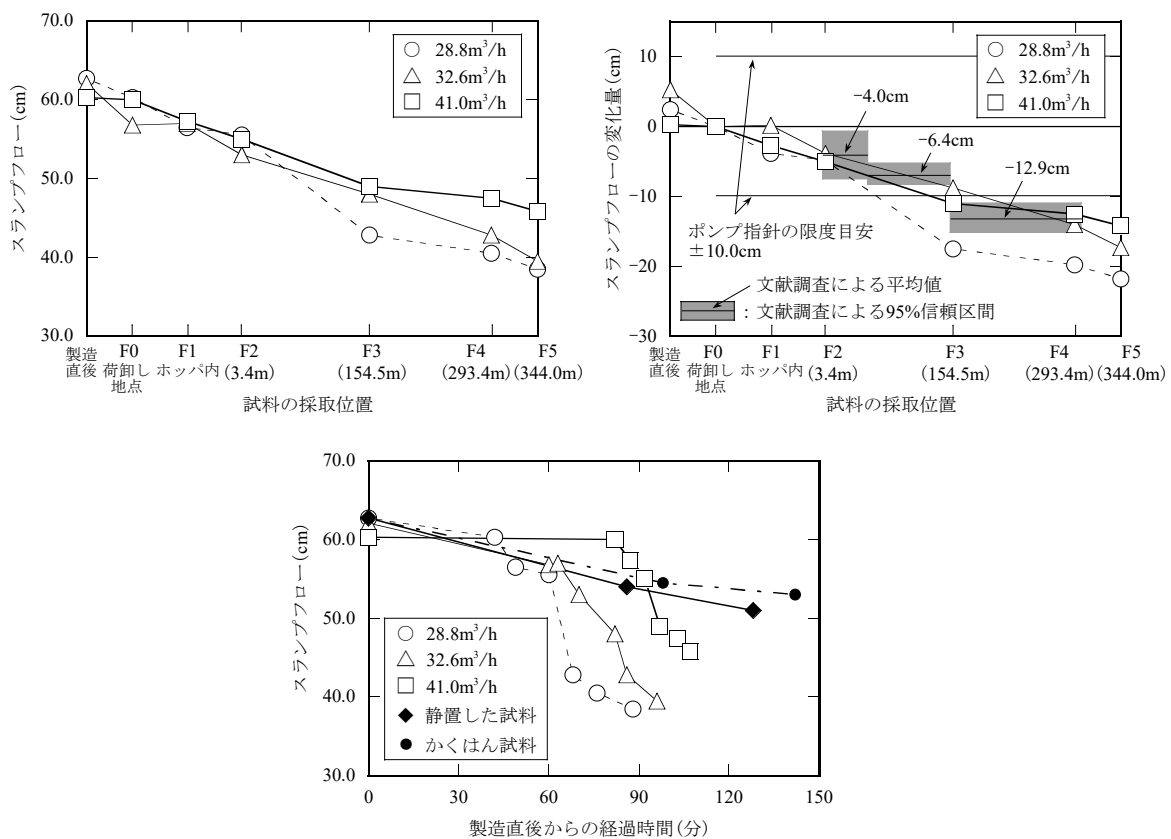


図 3.3.6 圧送による高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後のスランプフローの変化

圧送による高性能 AE 減水剤コンクリートの空気量の変化を図 3.3.7 に示す。圧送による高性能 AE 減水剤コンクリートの空気量は、AE 減水剤コンクリートと同様に、ばらつきがあるものの増加する傾向を示し、文献調査による傾向と概ね一致した。この現象は、前述した AE 減水剤コンクリートと同様な傾向であり、断定できないものの、前述したようなベント管の中での起泡作用が再活性やキャビテーションなどにより空気量が増加した可能性が考えられる。製造直後からの経過時間による空気量の変化は、経時変化用試料（静置した試料およびかくはん試料）よりも圧送した試料の方が著しく大きくなる傾向を示し、経時変化による影響よりも圧送による影響の方が大きいものと考えられる。また、高性能 AE 減水剤コンクリートは、AE 減水剤コンクリートよりも圧送による影響が大きいものと考えられる。

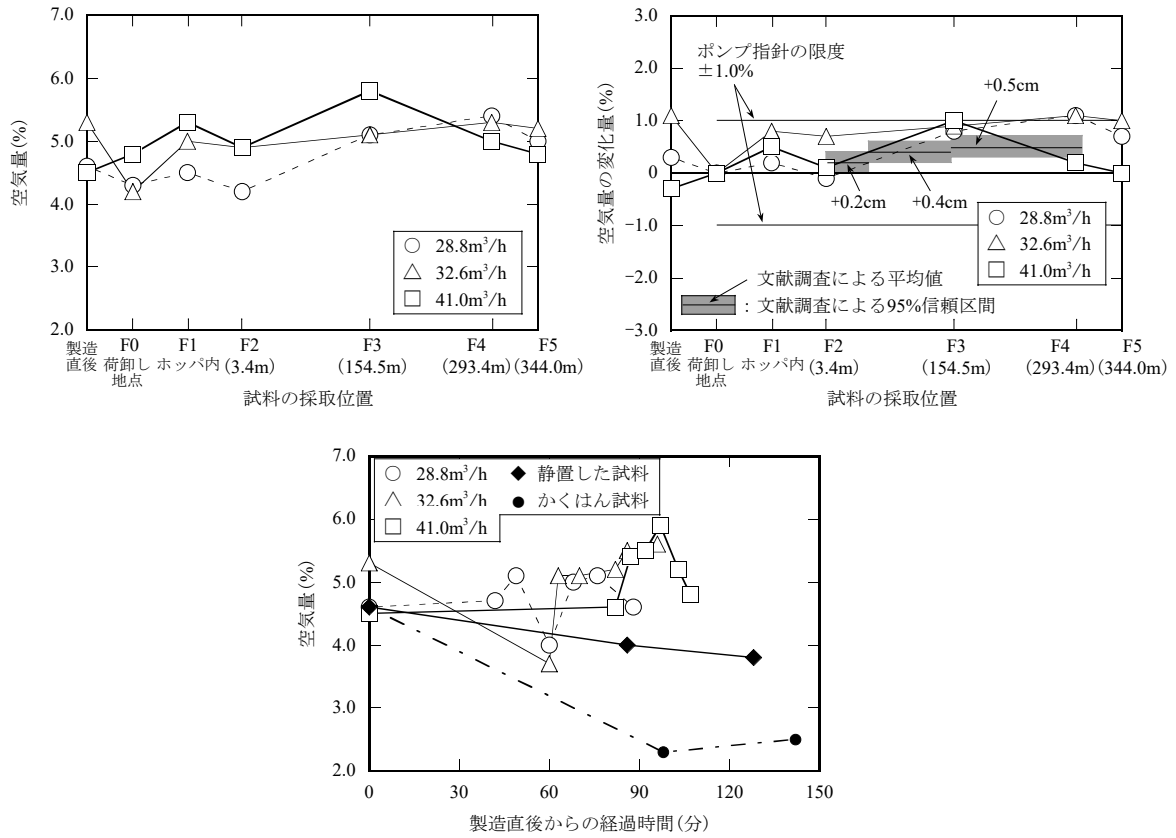


図 3.3.7 圧送による高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の空気量の変化

3.3.4 圧送によるコンクリートの圧縮強度の変化

圧送による AE 減水剤コンクリートの圧縮強度の変化を図 3.3.8 に示し、圧送による高性能 AE 減水剤コンクリートの圧縮強度の変化を図 3.3.9 に示す。圧送による AE 減水剤コンクリートおよび高性能 AE 減水剤コンクリートの圧縮強度は、荷卸し地点から筒先までの間でばらつきがあるもののほぼ同等な値を示し、いずれも文献調査による傾向と概ね一致した。しかし、理論吐出量の違いや前述した空気量の増加による影響は小さいものと考えられる。また、文献調査から得られた圧送距離が長くなると圧縮強度のばらつきが大きくなる傾向は、本実験結果において確認できなかった。

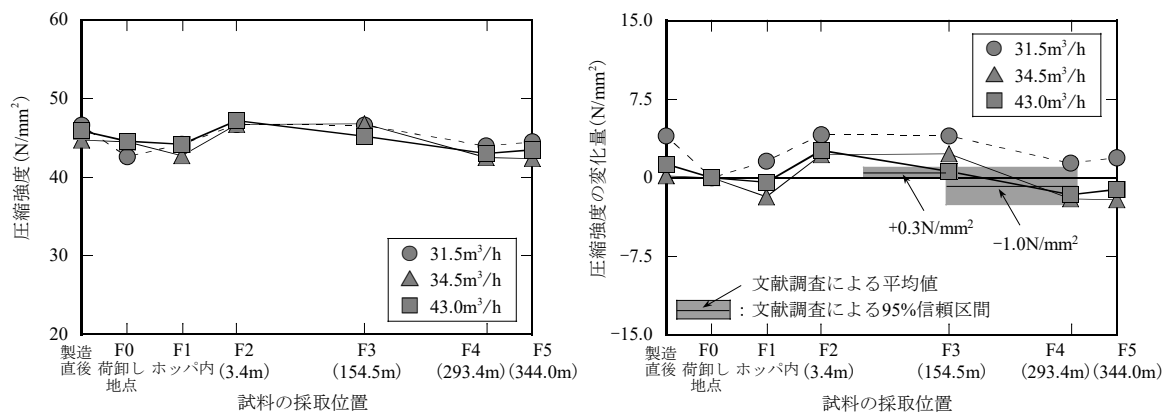


図 3.3.8 圧送による AE 減水剤コンクリートの圧送前後の圧縮強度の変化

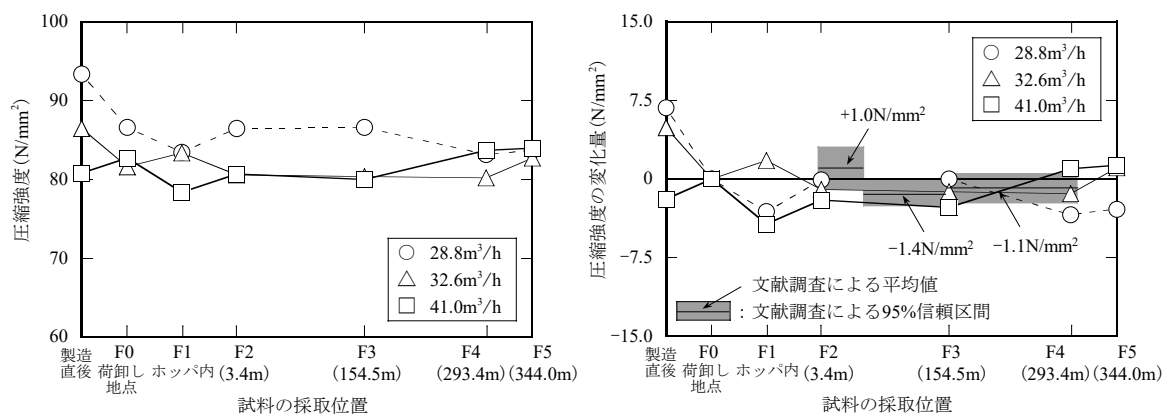


図 3.3.9 圧送による高性能 AE 減水剤コンクリートの圧送前後の圧縮強度の変化

3.3.5 圧送による空気量の変化が単位容積質量，凍結融解抵抗性および中性化抵抗性に及ぼす影響

(1) コンクリートの単位容積質量

空気量と単位容積質量の関係を図 3.3.10 に示す。単位容積質量は、いずれのコンクリートも理論吐出量の変化にかかわらず、空気量が増加すると減少する傾向を示した。また、空気量が増加すると、調合上の単位容積質量より小さくなる傾向を示した。圧送による空気量の変化が単位容積質量に及ぼす影響は若干あるものと考えられる。

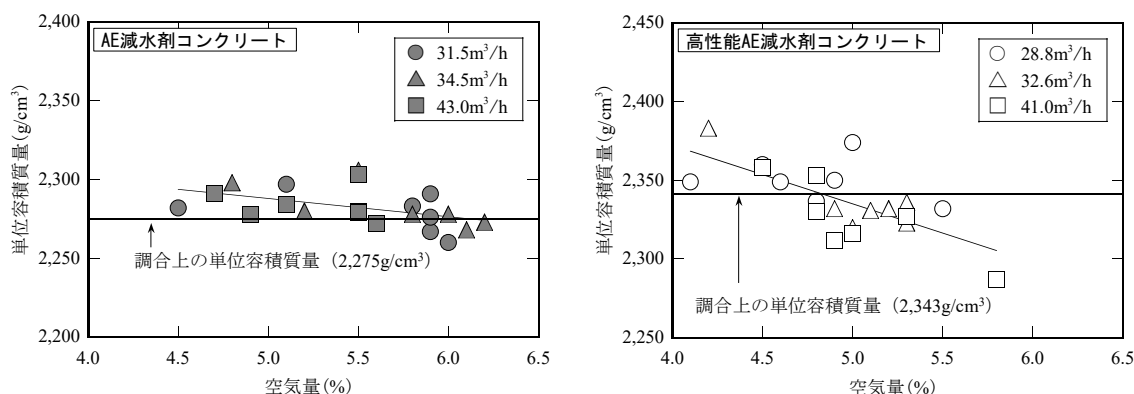


図 3.3.10 空気量と単位容積質量の関係

(2) 凍結融解抵抗性

圧送前後のコンクリートの凍結融解 300 サイクル後における相対動弾性係数の変化を図 3.3.11 に示す。いずれのコンクリートも圧送前後の相対動弾性係数の変化は、ばらつきがあるものの F0 (荷卸し地点) に比べて F5 (筒先) の方が若干大きくなる傾向を示した。これは、前述した起泡作用が再活性されて微細な気泡が若干増加した可能性があると考えられる。圧送前後の気泡について村田ら¹⁶⁾が 50 ~ 250 μm の気泡数が増加するという報告もあり圧送による空気量の変化が僅かであるが凍結融解抵抗性に有利になる傾向を示した。

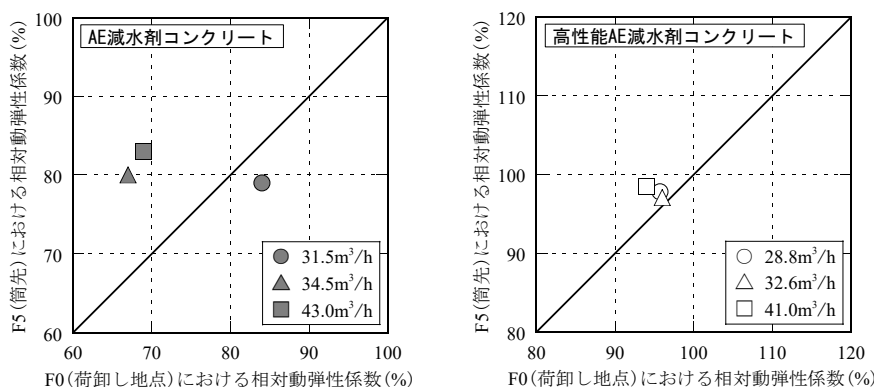


図 3.3.11 圧送前後のコンクリートの凍結融解 300 サイクル後における相対動弾性係数の変化

(3) 中性化抵抗性

圧送前後の中性化深さの変化を図 3.3.12 に示す。いずれのコンクリートも中性化深さはばらつきがあるものの、F0（荷卸し地点）と F5（筒先）とほぼ同等の値を示した。圧送による空気量の変化が中性化抵抗性に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

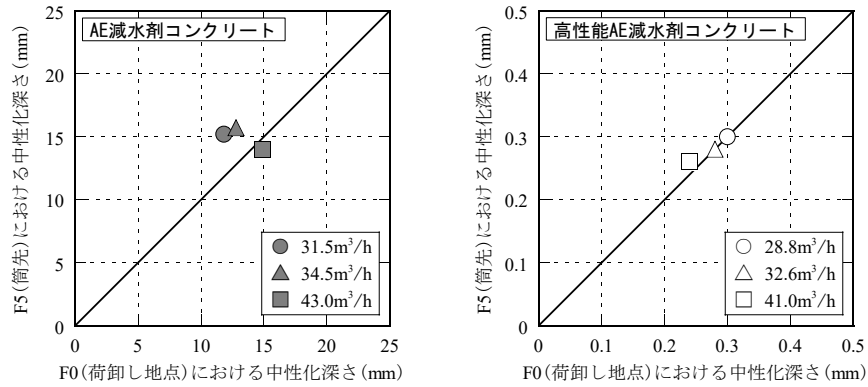


図 3.3.12 圧送前後の中性化深さの変化

3.3.6 圧送実験のまとめ

圧送実験における AE 減水剤コンクリートの品質変化を表 3.3.4 に示し、圧送実験における高性能 AE 減水剤コンクリートの品質変化を表 3.3.5 に示す。

(1) スランプおよびスランプフロー

圧送によるコンクリートのスランプおよびスランプフローは、圧送距離が長くなると低下する傾向を示した。また、圧送による AE 減水剤コンクリートのスランプは経時変化による影響が大きい傾向を示し、高性能 AE 減水剤コンクリートのスランプフローは圧送による影響が大きい傾向を示した。

(2) 空気量

圧送によるコンクリートの空気量は、圧送距離が長くなると増加する傾向を示すものの、ポンプ指針の限度の範囲となった。

(3) 圧縮強度

圧送によるコンクリートの圧縮強度は、ばらつきはあるもののほぼ同等の値を示し、圧送によ

図 3.3.4 圧送実験における AE 減水剤コンクリートの品質変化

試験項目	水平換算距離の区分			
	ホッパ内	50m未満	50m以上150m未満	150m以上
スランプ	ほぼ同等の値を示す。	圧送距離が長くなると、ばらつきはあるものの低下する傾向を示し、文献調査による傾向と概ね一致する傾向を示す。経時変化による影響が大きいものの、ポンプ指針の限度の範囲を超える可能性がある。		
空気量	僅かに増加する傾向を示す。	圧送により著しく減少する傾向を示す。	圧送距離が長くなると、ばらつきはあるものの増加する傾向を示し、文献調査による傾向と概ね一致する傾向を示す。圧送による影響が大きいものの、概ねポンプ指針の限度の範囲となる。	
圧縮強度	ばらつきはあるもののほぼ同等の値を示し、圧送による影響が小さい。			
単位容積質量	小さくなる傾向を示し、圧送による空気量の増加の影響が大きい。			
相対動弾性係数 [※]		-		若干大きくなる傾向を示し、圧送による影響が小さい。
中性化深さ [※]		-		ほぼ同等の値を示し、圧送による影響が小さい。

※：相対動弾性係数および中性化深さは、圧送前後の結果を比較している

図 3.3.5 圧送実験における高性能 AE 減水剤コンクリートの品質変化

試験項目	水平換算距離の区分			
	ホッパ内	50m未満	50m以上150m未満	150m以上
スランプフロー	僅かに減少する傾向を示す。	圧送距離が長くなると低下する傾向を示し、文献調査による傾向と概ね一致する傾向を示す。	圧送距離が長くなると、ばらつきはあるものの低下する傾向を示し、文献調査による傾向と概ね一致する傾向を示す。圧送による影響が大きいものの、ポンプ指針の限度目安の範囲を超える可能性が大きい。	
空気量	僅かに増加する傾向を示す。	圧送により減少する傾向を示す。	圧送距離が長くなると、ばらつきはあるものの増加する傾向を示し、文献調査による傾向と概ね一致する傾向を示す。圧送による影響が大きいものの、概ねポンプ指針の限度の範囲となる。	
圧縮強度	ばらつきはあるもののほぼ同等の値を示し、圧送による影響が小さい。			
単位容積質量	小さくなる傾向を示し、圧送による空気量の増加の影響が大きい。			
相対動弾性係数 [※]		-		若干大きくなる傾向を示し、圧送による影響が小さい。
中性化深さ [※]		-		ほぼ同等の値を示し、圧送による影響が小さい。

※：相対動弾性係数および中性化深さは、圧送前後の結果を比較している

る影響は小さい傾向を示した。

(4) 単位容積質量

圧送によるコンクリートの単位容積質量は小さくなる傾向を示し、圧送による空気量の増加の影響が大きい傾向を示した。

(5) 相対動弾性係数および中性化深さ

圧送前後のコンクリートの相対動弾性係数および中性化深さは概ね同等の値を示した。

3.4 まとめ

コンクリートポンプ工法における圧送距離（300m程度以下）が圧送前後の品質変化を明らかにするために、文献調査により圧送距離ごとの品質変化を系統的に調査し、圧送によるコンクリートの品質変化を実験的に検討した結果、以下の傾向が明らかとなった。

- (1) AE減水剤コンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートの圧送前後のスランプおよびスランプフローは、低下する傾向を示し、圧送距離が長くなるとこの低下量が大きくなる傾向を示した。さらに、この低下量は、圧送距離が150mより長くなると、ポンプ指針のスランプの限度の範囲およびスランプフローの限度目安の範囲を超える可能性があると考えられる。
- (2) AE減水剤コンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートの圧送前後の空気量は、ポンプ指針の空気量の限度の範囲内で増加する傾向を示した。この空気量の増加は、断定できないものの、ベント管における流動特性が影響していると考えられる。
- (3) AE減水剤コンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートの圧送前後の圧縮強度は、圧送距離にかかわらずほぼ同等な値を示し、圧送による空気量の増加する傾向の影響は小さいものと考えられる。
- (4) AE減水剤コンクリートおよび高性能AE減水剤コンクリートの圧送前後の相対動弾性係数および中性化深さは、圧送前後でほぼ同等の値を示し、圧送による空気量の増加する傾向の影響は小さいものと考えられる。

3.5 圧送計画における圧送前後の品質変化の合理化に関する検討

圧送によりコンクリートの品質が変化することは周知の事実となっており、本章では、圧送によりスランプや空気量などのフレッシュコンクリートの品質変化が大きく、圧縮強度や耐久性などの硬化コンクリートの品質変化が小さいことを明らかにした。特に、スランプおよびスランプフローは、圧送前後の品質変化が大きくなる可能性があるため、圧送計画を立案する上で無視することができない重要な要因であるといえる。

現状のポンプ指針では、圧送計画において圧送前後の品質変化が取り入れられていないのが実態であり、使用するコンクリートを選定するときに、圧送によるスランプの低下を見込んで荷卸し地点のスランプを定めることを推奨している。しかし、ポンプ指針には、具体的な圧送前後の品質変化の傾向は示されておらず、ガイドラインの圧送条件に応じたスランプ低下の標準値がその役割を担っている。本来、圧送前後の品質変化は、圧送計画の立案において配慮しなければならない重要な要素であるにもかかわらず、実施工において軽視される傾向にある。さらに、実際に発注されるコンクリートのスランプは、発注者に委ねられており、一般には、圧送によるスランプの変化を考慮していないことがほとんどである。

このような第2章で抽出した(2)圧送前後の品質変化の標準値に関する問題点に対して、ここでは、圧送計画における圧送前後の品質変化の合理化するために、本章の調査結果およびガイドライン⁸⁾における圧送条件に応じたスランプの低下の標準値を踏まえた圧送距離に応じたスランプおよびスランプフローの低下量の目安を表3.5.1のように設定し、圧送計画のフローに取り入れることを提案する。圧送前後のコンクリートの品質変化は、圧送距離のみならずコンクリートの調合条件や外気温などの影響を受けるため、圧送による品質変化を見込んだスランプおよびスランプフローを一概に選定することは困難であるものの、計画段階において、表3.5.1の低下量の目安を参考にし、必要に応じて発注するスランプおよびスランプフローを1ランク上を発注を選定するとよいと考えられる。なお、日平均気温が25℃を超える場合、表3.5.1の数値に、スランプは1.0cmを加え、スランプフローは2.5cmを加えることとした。本章において、外気温と圧送前後の品質変化の関係について検討していないものの、外気温が高いとき一般に圧送前後のコンクリートの品質変化が大きいことが経験的に知られており、圧送前後の品質変化を考慮する上で外気温が重要な要因となるため、ここでは、ガイドラインを参考に上記のように設定した。

表 3.5.1 圧送距離に応じたスランプおよびスランプフローの低下量の目安

圧送距離	スランプの低下量 (cm)		スランプフローの低下量 (cm)
	AE減水剤	高性能AE減水剤	
50m未満	0	0	0
50m以上 150m未満	1.0	1.5	5.0
150m以上 300m未満	2.0	2.5	10.0
その他	圧送実績または信頼できる資料による		

注1) 日平均気温が25℃を超える場合、上記の値にスランプは1.0cmを加え、スランプフローは2.5cmを加える

注2) 圧送距離が150m以上の場合、原則として、スランプ、スランプフローの選定を1ランク上に変更するなどの対策を講じる

また、空気量は圧送による僅かに増加する傾向を示すものの、その増加量の傾向がポンプ指針¹⁾の品質変化の限度である1%以下であることや、空気量の変化が強度や耐久性に及ぼす影響が小さいことを踏まえると、圧送による空気量の変化は、圧送計画において特段考慮する必要がないものと考えられる。しかしながら、圧送による空気量の変化が大きくなることが懸念される場合は、コンクリートの調合条件を見直すなどの対策を講じる必要があるといえる。

【第3章の参考文献】

- 1) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009.12
- 2) 岸谷孝一他：中央大学多摩校地施設新築工事のコンクリート工事における一連の研究 その1～その6，日本建築学会大会学術講演梗概集，1977.10
- 3) 毛見虎雄他：都営住宅50H-3101（白鬚東）工事に於ける高級コンクリート工事の施工報告，戸田建設，1978.3
- 4) 武田一久他：大成建設社内資料，1979
- 5) 西野敬史，田中健治郎：新都心6番目の超高層新宿野村ビルの施工，施工，1979.3
- 6) 中田善久，大塚秀三，毛見虎雄：ポンプ圧送に伴う高性能AE減水剤コンクリートの圧送前後の品質変化に関する文献的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.223-228，2007.7
- 7) 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（案），2007.3
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリート圧送工法ガイドライン2009および解説，2009.6
- 9) 浦野真司，熊野知司，名倉健二，河井徹：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実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.445-450，1999.6
- 10) 浦野真司，名倉健二，栗田守朗，田中博一：ポンプ圧送によるフレッシュコンクリートの流動性の変化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.343-348，2000.6
- 11) 土木学会：コンクリートポンプ施工指針2012年版，2012.6
- 12) 大友健，田辺清，中川修，松木田正義：地下連続壁用低発熱高流動コンクリートの特性に関する研究，コンクリート工学論文集，第5巻，第2号，pp.33-47，1994.7
- 13) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，1997.1
- 14) 岩竹秀昭，山崎順二，中村成春，杉本勝幸，中村瑞士，川崎裕司：コンクリートの圧送性に及ぼす粗骨材径およびベント管形状の影響に関する研究 その6 骨材径がフレッシュコンクリートの性状変化に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 分冊，pp.605-606，2012.9
- 15) 杉本勝幸，岩竹秀昭，岩清水隆，木村芳幹，元木亮，永田哲夫：コンクリートの圧送性に及ぼす粗骨材径およびベント管形状の影響に関する研究 その12 空気量の変動に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 分冊，pp.617-618，2012.9
- 16) 村田隆男，高橋洋，杉本勝幸，木村芳幹，高見錦一，山崎順二：コンクリートのポンプ圧送性評価手法に関する研究 その3 ポンプ圧送がコンクリートの気泡間隔係数に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 分冊，pp.923-924，2008.7

第4章 水平管の管内圧力損失に及ぼす 各種要因の影響

第4章 水平管の管内圧力損失に及ぼす各種要因の影響

4.1 本章の目的

コンクリートポンプ工法における圧送可否の判定は、計画された圧送条件の圧送負荷を求め、この負荷に対応できる能力を有するコンクリートポンプを選定することが原則である。ポンプ指針¹⁾において、圧送負荷は、直管、ベント管、テーパ管およびフレキシブルホースから求めた水平換算長さ²⁾と管内圧力損失の積に鉛直管のコンクリートヘッド（自重）を加えて算出するとしている。この算定方法は、1979年のポンプ指針²⁾の改定において導入されたものである。また、同指針²⁾には、それまでの研究報告^{3)~5)}を基にした管内圧力損失の標準値が示され、この管内圧力損失の標準値は、現在も圧送負荷の算定に大きな役割を占めている。

1990年代になると、高性能 AE 減水剤が開発され、高強度コンクリートや高流動コンクリートのような粘性の大きいコンクリートが主流となっていった。これを踏まえて、1994年に改定されたポンプ指針⁶⁾には、水セメント比45%以下を含めて水セメント比や化学混和剤などにより分類したコンクリートの種別ごとの実吐出量と管内圧力損失の関係が示された。しかし、水セメント比が45%以下になると、管内圧力損失は使用材料や調合によって大きく異なるため、1994年のポンプ指針⁶⁾では、既往のデータを参考にするか、実際に使用するコンクリートを用いて試験圧送を行い、実施工に応じた管内圧力損失を把握することが望ましいとしている。一方、水セメント比が45%より大きいコンクリートの場合は、従来から使用されてきた管内圧力損失の標準値がほぼそのまま使用できると解説されている。

しかしながら、高強度コンクリートや高流動コンクリートに限らず、一般的に使用される普通コンクリートについても、その使用材料や調合条件は、ポンプ指針¹⁾のコンクリートポンプに加わる圧送負荷の算定方法（水平換算係数）や管内圧力損失の標準値の基となっている圧送実験が行われた1970年頃から大きく変化しているものと考えられる。特に、設計基準強度が大きくなり、高性能 AE 減水剤が幅広く普及している中で、ポンプ指針¹⁾の水平換算係数や管内圧力損失の標準値が実測値に十分対応できるとは言い難く、普通強度レベルの水セメント比が45%より大きいコンクリートの場合も従来の水平換算係数や管内圧力損失の標準値をそのまま使用できるかは不明な点が残る。

そこで、本章は、近年のコンクリートにおける直管およびベント管の管内圧力損失を明らかにするために、2017年までに掲載された管内圧力に関する文献を調査し、コンクリートの調合条件や圧送条件ごとに直管およびベント管の管内圧力損失について調べたものである。さらに、文献調査によって得られた直管およびベント管の管内圧力損失の傾向の妥当性を圧送実験により確認することとした。

4.2 直管の管内圧力損失に関する文献的検討

4.2.1 文献調査の概要

(1) 調査対象とする文献およびデータ

直管の管内圧力損失を調査するための文献は、1990年から2017年の間に日本建築学会（構造系論文集，技術報告集および大会学術講演梗概集）に掲載されたコンクリートポンプに関するものとし、このうち、ピストン式コンクリートポンプを用いて配管形式により圧送実験を行ったものとした。また、対象とするデータは、セメントに普通ポルトランドセメントおよび粗骨材に砕石を用いたものとし、W/Cが65%以下のスランプ12～25cmおよびスランプフロー45～60cmのものに限定した。さらに、特殊な骨材（軽量骨材およびスラグ骨材など）を用いたもの、分離

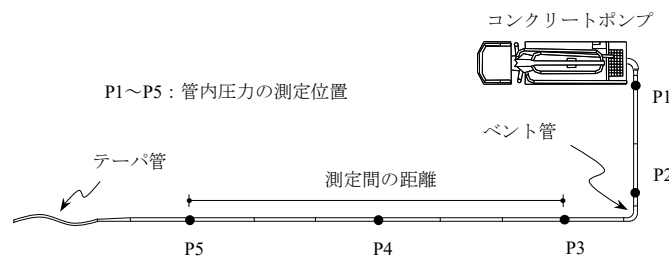


図 4.2.1 配管条件の一例

表 4.2.1 対象となる文献の概要^{7)～28)}

No	調合						圧送条件			吐出力 (m ³ /h)			調査数	データ数	文献番号
	W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	s/a (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	圧送距離 (m)	圧送高さ (m)	測定間の距離 (m)	実吐出力	理論吐出力	設定吐出力			
1	25.0～40.0	160～170	425～640	40.2～43.7	18～25	-	116	3.6	45.3	12.5～58.4	-	20～50	8	24	7
2	40.0	175	438	43.2	20	-	不明	3.0	24.3	22.5～46.8	-	-	2	13	8
3	30.0	170	567	46.1	24	50	181	6.0	24.0	-	-	20～40	1	2	9
4	27.0～49.0	166～173	339～630	40.4～47.2	15～21	50～60	122	11.6	65.8	-	21.2～52.9	-	8	31	10
5	28.5	165	579	40.0	-	60	36	0	88.1	21.4～50.0	-	-	1	2	11
6	36.0	170	472	49.9	18	-	101	2.5	22.0	-	26.0～44.0	30～50	1	3	12
7	27.0	165	612	44.0	-	45	122	2.5	57.5	-	17.5～31.0	20～40	1	3	13
8	30.0	165	550	43.0	-	55	103	0	21.0	19.0～42.0	-	-	1	3	14
9	30.0	170	567	42.3	16.5～21	-	95	3.0	52.0	-	19.0～41.0	20～40	2	5	15
10	30.0～45.0	170	378～567	46.0～50.0	21	60	不明	不明	61.0	-	16.3～43.5	-	2	8	16
11	31.0～46.0	165～170	370～532	44.9～47.6	21	50～55	不明	6.3	30.3	20.0～50.0	-	-	3	9	17
12	55.0	181	330	48.1	18	-	53～56	0	50.0	22.6～48.6	-	-	1	4	18
13	35.0	170	486	48.9	-	60	130	0	52.0	12.5～44.1	-	-	1	4	19
14	50.0	180	360	47.0	18	-	89	0	39.3	20.0～46.7	18.0～42.0	20～50	1	5	20
15	36.2	170	470	48.8	-	60	160	0	90.0	26.8～36.6	23.4～33.2	20～40	1	3	21
16	44.0～57.0	173～185	316～409	42.6～49.8	12～21	-	185	0	24.3	-	6.2～44.4	-	6	84	22
17	57.0	175	307	44.8	12	-	84	0	18.3	-	14.2～53.6	-	1	14	23
18	50.0	180	360	49.9	18	-	132～224	0	91.3	-	10.1～62.8	10～60	2	51	24
19	50.0	180	360	49.9	18	-	90	0	30.8	-	70.9～74.6	-	3	3	25
20	50.0	180	360	48.3～49.9	18	-	108	0	33.5	-	24.8～63.0	-	2	12	26
21	50.0	175～185	350～370	48.0～52.5	12～21	-	146	0	61.0	-	23.2～68.2	-	6	26	27
22	50.0	175～185	350～370	48.0～52.5	12～21	-	145	0	61.0	-	27.0～79.1	-	6	30	28

低減剤（増粘剤など）を用いたものおよび混和材料（フライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームなど）を用いたものは、その品質や使用量によって管内圧力損失に大きな影響を及ぼすことが考えられるため、ここではあえて除外した。

本調査は、水平管の直管における管内圧力損失を対象とした。そのため、途中にベント管やテーパ管などを含まない輸送管径 125A（5B）の直管部分において管内圧力損失を測定しているデータを対象とし、複数の箇所において直管の管内圧力損失を測定しているものは最長の直管部分から算出した値を使用した。例えば、図 4.2.1 のような配管状況の場合、対象としたデータは配管の中で最長の直管部分となる P3～P5 の管内圧力損失とした。このように、対象となるデータを抽出した結果、表 4.2.1 に示す 22 件の文献^{7)～28)} が該当し、対象となるデータ数は 339 件となった。

(2) 調査対象としたデータの調査条件

対象となるデータは、W/C=25.0～65.0%の範囲となり、このデータを W/C の区分とスランブおよびスランブフローの区分ごとに分類すると表 4.2.2 に示すようになる。なお、この W/C の区分は、ポンプ指針¹⁾ に解説されている実吐出量と水平管 1m 当りの管内圧力損失の関係において種別されているものと同様とし、データ数は 45% < W/C ≤ 65% が 228 件、30% < W/C ≤ 45% が 71 件および 25% ≤ W/C ≤ 30% が 40 件の合計 339 件である。

対象データの調査条件を図 4.2.2 に示す。単位水量の範囲は、160～185kg/m³ であり、単位セ

表 4.2.2 対象となるデータ数

スランブ [*] 、スランブフローの区分 (cm)	水セメント比 (%)		
	25 ≤ W/C ≤ 30	30 < W/C ≤ 45	45 < W/C ≤ 65
12 ≤ SL < 15	0	0	34
15 ≤ SL < 18	2	0	40
18 ≤ SL < 21	0	38	125
21 ≤ SL	9	20	29
45 ≤ SF < 55	15	3	0
55 ≤ SF	14	10	0
合計	40	71	228

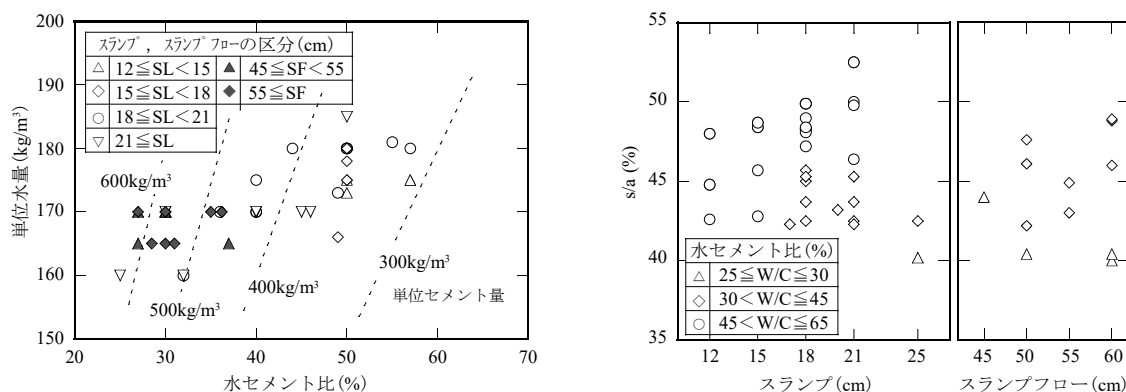


図 4.2.2 対象となるデータの調査条件

メント量の範囲は、 $265 \sim 640\text{kg/m}^3$ であった。また、s/aの範囲は、 $40.0 \sim 52.5\%$ であり、対象データの調合は、普通強度レベルから高強度レベルの一般的な調合の範囲²⁹⁾であった。

(3) 吐出量の取扱い方法

一般的に、管内圧力損失は実吐出量との関係で示され、ポンプ指針¹⁾においても管内圧力損失の標準値を実吐出量との関係で表現している。これを踏まえて、本章における吐出量は、ポンプ指針¹⁾と同様に、実吐出量を用いることとした。なお、文献から実吐出量が読み取ることができないものについて、理論吐出量が記載されているものは機械効率を0.85と仮定して実吐出量を算出し、設定吐出量が記載されているものはそのままの値を実吐出量として用いることとした。機械効率を0.85と仮定した理由は、ポンプ指針¹⁾に示される機械効率（解説表3.3）や既往の研究を参考にしたものである。

4.2.2 ポンプ指針に示される管内圧力損失との比較

実吐出量と管内圧力損失の関係を図4.2.3に示す。ここでは、前述したように、ポンプ指針¹⁾を参考にW/Cの区分ごとに図示している。管内圧力損失は、W/Cの区分にかかわらず、実吐出量が大きくなると大きくなる傾向を示し、この傾向はポンプ指針¹⁾と同様の傾向であった。また、 $45\% < W/C \leq 65\%$ の管内圧力損失は、実吐出量が大きくなると概ね比例的に大きくなり、ポンプ指針の管内圧力損失のスランプ21cmの標準値に対して1~3倍(K~3K)程度であった。これは、コンクリートの調合や使用材料の変化していることや、今回の文献調査に高性能AE減水剤を用いたものが含まれているためと考えられる。一方、 $W/C \leq 45\%$ の管内圧力損失は、 $45\% < W/C \leq 65\%$ に比べて著しく大きくなる傾向を示し、さらに、管内圧力損失のばらつきも大きくなる傾向を示した。これは、W/Cが小さいためコンクリートの粘性が高くなっている^{例えば³⁰⁾}ことや、

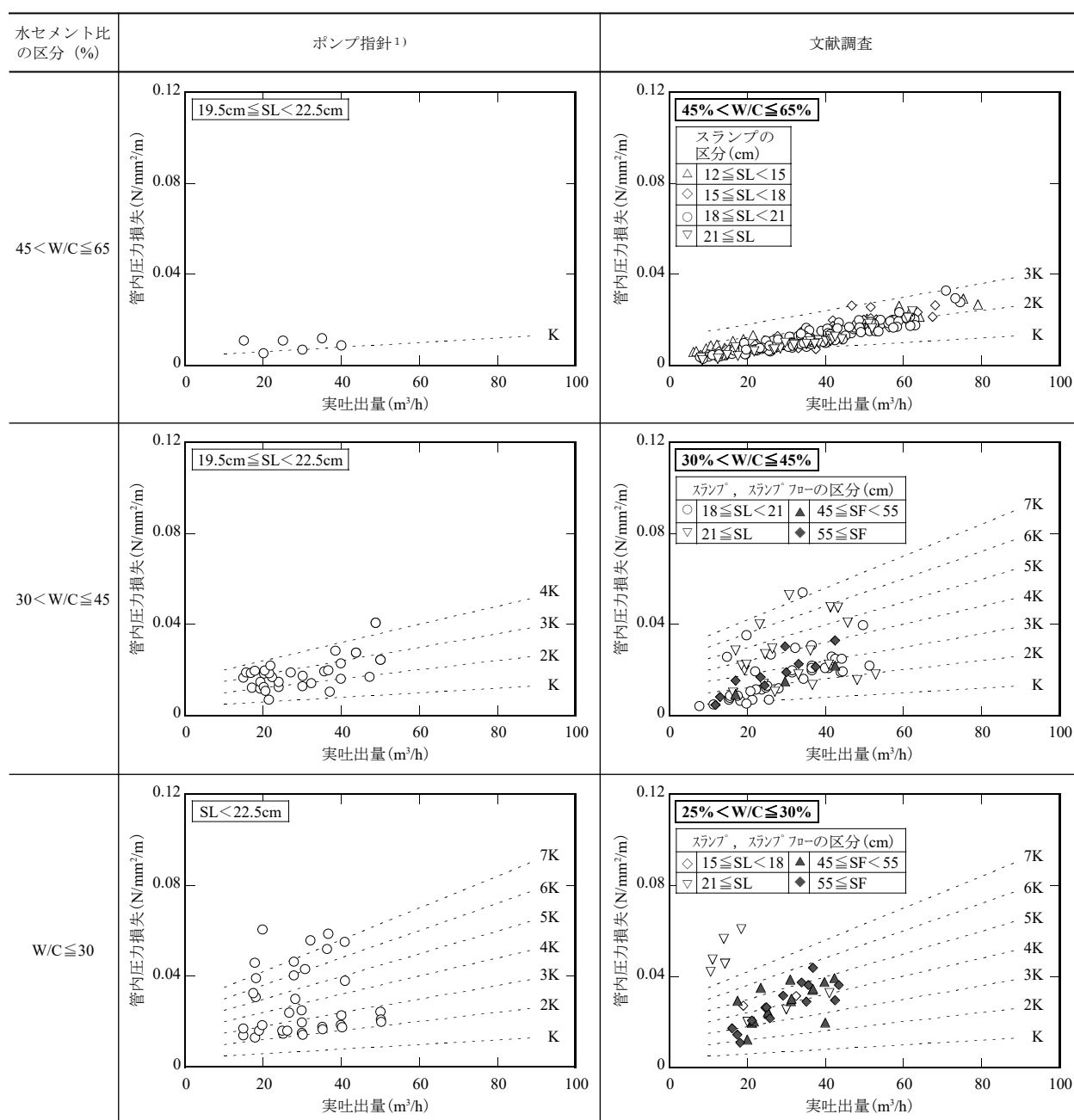


図 4.2.3 実吐出量と管内圧力損失の関係

W/C が小さいほど調合や使用材料の違いによる影響が顕著に表われるためと考えられる。また、これらの結果とポンプ指針¹⁾に示されているコンクリートの種別ごとの実吐出量と管内圧力損失の関係を比較すると、 $30\% < W/C \leq 45\%$ は、ポンプ指針が概ね $K \sim 4K$ 程度であったのに対して、文献調査の結果が最大で $7K$ 程度であり、管内圧力損失が大きくなっていることがわかる。この他の $W/C \leq 30\%$ は、一部のデータに突出して大きいデータがあるものの、ポンプ指針¹⁾と文献調査の結果が概ね $7K$ 程度以下と同程度であった。

ポンプ指針¹⁾では、W/C が 45% より大きいコンクリートの場合、従来から使用されてきた管内圧力損失の標準値をほぼそのまま使用できることが解説されている。そこで、 $45\% < W/C \leq 65\%$ を対象として、スランプごとに示されているポンプ指針¹⁾の標準値（ポンプ指針¹⁾解説図 3.13）を用いて実吐出量から管内圧力損失を求めた（以下、ポンプ指針¹⁾から求めた管内圧力損失という。）。ポンプ指針¹⁾から求めた管内圧力損失と実測の管内圧力損失の関係を図 4.2.4 に示す。ポンプ指針¹⁾から求めた管内圧力損失と実測の管内圧力損失の関係は、管内圧力損失が小さいときポンプ指針から求めた管内圧力損失の方が大きくなる傾向を示し、管内圧力損失が大きいとき実測の管内圧力損失の方が大きくなる傾向を示した。また、両者の関係は、スランプが大きいほど両者の差が大きくなる傾向を示し、実測の管内圧力損失の方が 2 倍以上大きいものもあった。これは、ポンプ指針¹⁾に示される管内圧力損失の標準値が 1970 年頃の圧送実験を基にしたものであり、コンクリートの調合や使用材料の変化によるものと考えられる。

以上のことを踏まえると、ポンプ指針¹⁾の管内圧力損失の標準値を用いて圧送負荷を算定すると危険側になる可能性があり、 $45\% < W/C \leq 65\%$ のコンクリートについて、新たな管内圧力損失の標準値を検討する必要があるといえる。

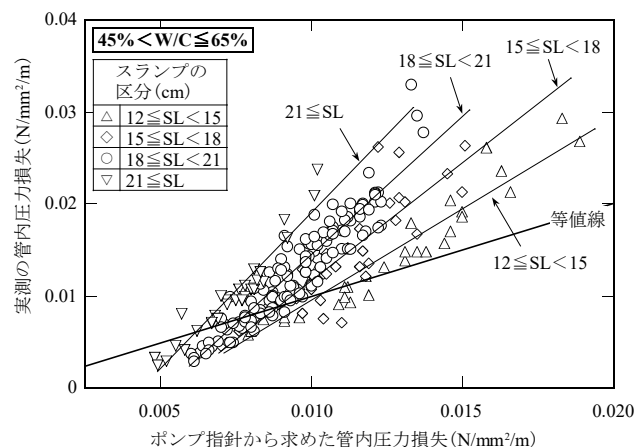


図 4.2.4 ポンプ指針から求めた管内圧力損失と実測の管内圧力損失の関係

4.2.3 直管の管内圧力損失に及ぼす調合要因

(1) 検討方法

管内圧力損失に及ぼすコンクリートの調合要因として、W/C、単位水量、スランプ、スランプフロー、使用材料の品質および化学混和剤の使用量など様々な要因が考えられる。その中で、対象とした文献に共通して記載されているものは、W/C、単位水量、スランプおよびスランプフローであった。このうち、W/Cはコンクリートの粘性に直接的に起因するため管内圧力損失に及ぼす影響が大きいと考えられる。この点について、図4.2.3からもW/Cの区分により管内圧力損失が顕著に異なることがわかる。そこで、本調査では、W/Cを主要因として捉えて検討することとした。また、W/Cが45%よりも大きい粘性が比較的小さいコンクリートのとき、管内圧力損失に及ぼす調合要因として、コンクリートの流動性が支配的であると考えられ、ポンプ指針¹⁾の管内圧力損失の標準値のようにスランプの区分ごとに分類し、管内圧力損失を検討する必要があると考えられる。一方、W/Cが45%以下の粘性が比較的高い場合、後述するが同一のスランプ、スランプフローの場合でも調合条件により著しく粘性が変化している可能性がある。そのため、W/Cが45%以下の場合には、単位水量の区分ごとに分類して検討することとした。

(2) W/Cの影響

同一の調合および圧送条件下において実測された管内圧力損失は、ほとんどの文献で、吐出量に伴い概ね比例的に大きくなっている。そこで、ここでは、管内圧力損失を実吐出量で除した値（以下、 K/Q_d という。）で検討した。 C/W と K/Q_d の関係を図4.2.5に示す。 K/Q_d は C/W が大きくなると大きくなる傾向を示し、これは、 C/W が大きいほど粘性が大きくなる^{例えば³⁰⁾}ためと考えられる。また、 C/W と K/Q_d の関係を指数関数で表すと(4.2.1)式となり、その相関係数は0.787となっている。

$$K/Q_d = 0.0784 \cdot (C/W)^{2.05} \quad \dots (4.2.1) \text{ 式}$$

この結果を踏まえて、管内圧力損失を C/W の2乗で除した値（以下、 $K/(C/W)^2$ という。）を算出し検討することとした。

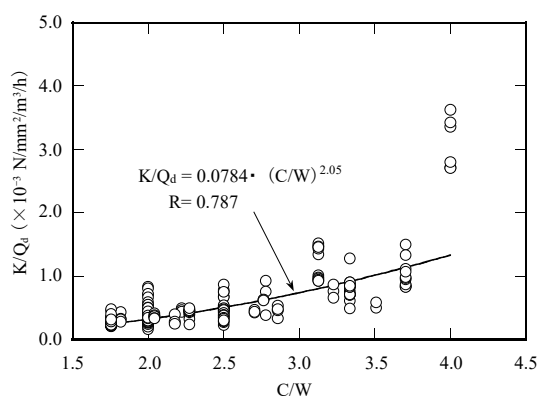


図4.2.5 C/Wと K/Q_d の関係

(3) スランプ、スランプフローの影響

45% < W/C ≤ 65% におけるスランプの区分ごとの実吐出量と $K/(C/W)^2$ の関係を図 4.2.6 に示す。なお、ここでは、実吐出量と管内圧力損失の関係式をスランプの区分によらず同一の切片となるように最小二乗法により求め、その結果を図中に示している。 $K/(C/W)^2$ は実吐出量が大きくなるとスランプの区分ごとに比例的に大きくなる傾向を示し、スランプの区分ごとの相関係数も高い傾向を示している。また、関係式の傾きは、スランプの区分が小さくなると傾きが大きくなる傾向を示し、この傾向はポンプ指針の管内圧力損失の標準値と同様の傾向であった。

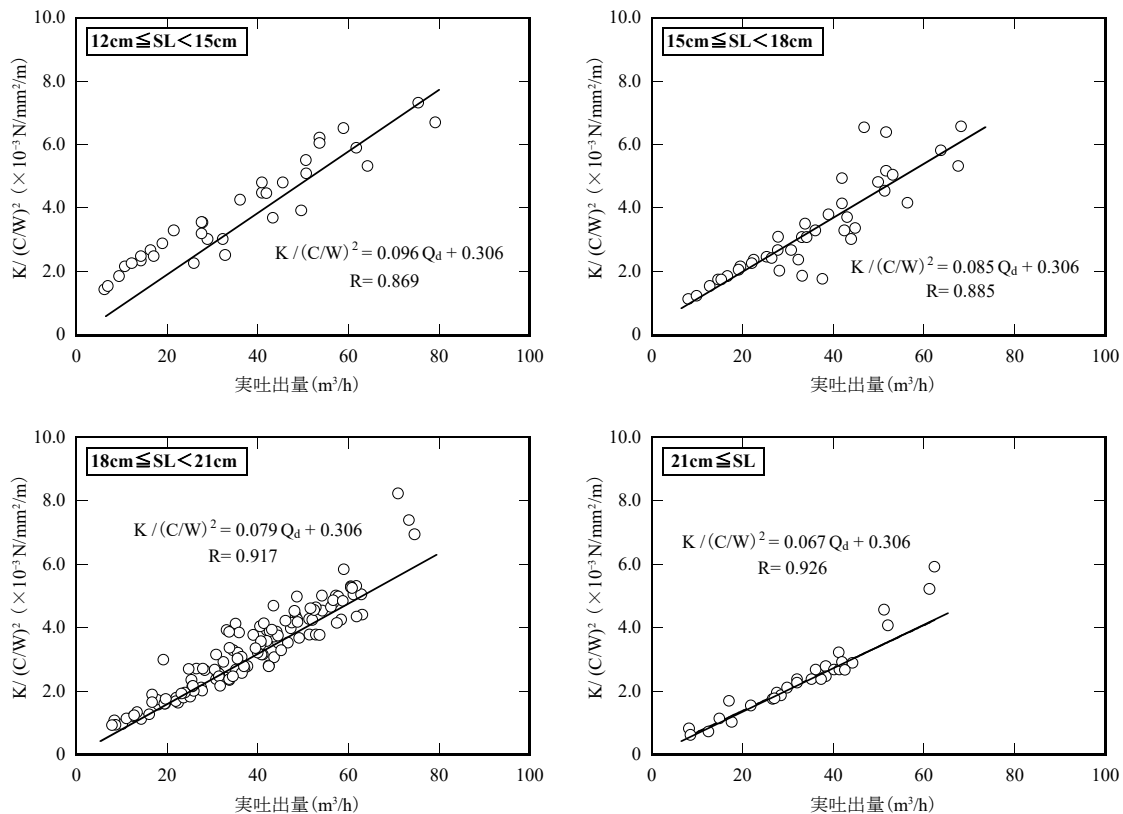


図 4.2.6 45% < W/C ≤ 65% におけるスランプの区分ごとの実吐出量と $K/(C/W)^2$ の関係

W/C ≤ 45% におけるスランプ、スランプフローの区分ごとの実吐出量と $K/(C/W)^2$ の関係を図 4.2.7 に示す。 $K/(C/W)^2$ は実吐出量が大きくなると大きくなる傾向を示したものの、スランプ、スランプフローの区分による明確な傾向は見られなかった。これは、近年、高性能 AE 減水剤により、化学混和剤の使用量のみで容易にコンクリートのスランプ、スランプフローを調整できるようになり、同一のスランプ、スランプフローにおいてもコンクリートの粘性が大きく異なっている可能性があるためと考えられる。しかし、実吐出量と $K/(C/W)^2$ の関係をスランプとスランプフローに大別すると、スランプフローの方が小さくなる傾向を示している。これは、コンクリートの降伏値の違いによる影響と考えられ、降伏値が小さいスランプフローの方が管内流動における栓流半径が小さく、せん断層流による流量が大きくなる^{例えば 31)}ためと考えられる。

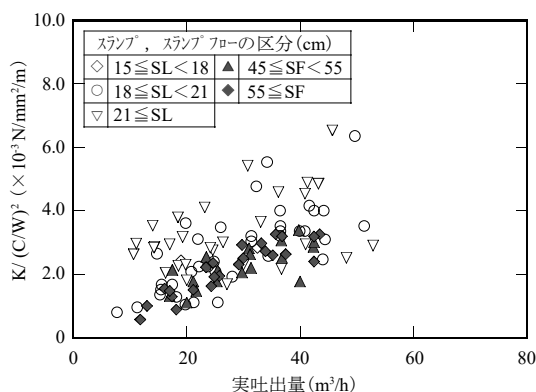


図 4.2.7 W/C ≤ 45% におけるスランプ，スランプフローの区分ごとの実吐出量と $K/(C/W)^2$ の関係

(4) 単位水量の影響

W/C ≤ 45% における単位水量の区分ごとの実吐出量と $K/(C/W)^2$ の関係を図 4.2.8 に示す。なお、図 4.2.7 の結果を踏まえて、スランプ，スランプフローごとに同一の切片となるように、最小二乗法により求めた結果を図中に示した。 $K/(C/W)^2$ は、実吐出量が大きくなると大きくなる傾向を示し、単位水量の区分が小さいほど傾きが大きくなった。これは、単位水量が少ない、すなわちセメントペースト量が少ないため、同一の流動性を得るために必要な化学混和剤の使用量が多くなり、コンクリートの粘性が増大した^{例えば 30)}ためと考えられる。また、 $K/(C/W)^2$ は、スランプのものに比べてスランプフローの方が大きいほど小さくなる傾向を示した。これは、前述したようにコンクリートの降伏値の違いによる影響と考えられ、降伏値が小さいスランプフローの方が管内流動における栓流半径が小さく、せん断層流による流量が大きくなる^{例えば 31)}ためと考えられる。

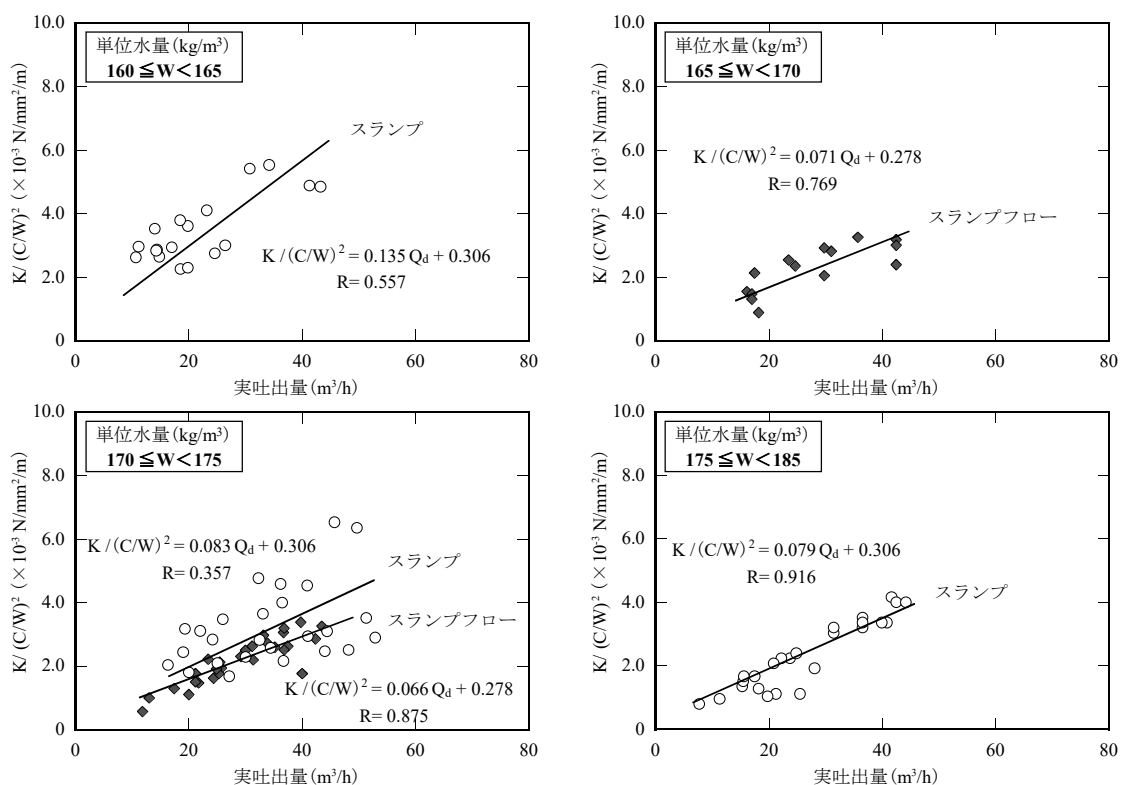


図 4.2.8 W/C ≤ 45% における単位水量の区分ごとの実吐出量と $K/(C/W)^2$ の関係

4.2.4 文献調査による直管の管内圧力損失の傾向

W/C が 65% 以下の普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの輸送管径 125A (5B) の直管部分において測定された管内圧力損失を調査ごとに検討した。ここでは、対象となるデータのうち、 $45\% < W/C \leq 65\%$ をスランプの区分ごとに分類し、 $W/C \leq 45\%$ を単位水量ごとに分類して管内圧力損失を検討した。その結果、 $45\% < W/C \leq 65\%$ における管内圧力損失は、スランプの区分が小さくなると大きくなる傾向を示し、 $W/C \leq 45\%$ における管内圧力損失は、単位水量の区分が小さくなると大きくなる傾向を示した。これらの結果から得られた実吐出量と $K/(C/W)^2$ の関係式を管内圧力損失について解くと表 4.2.3 および表 4.2.4 に示すようになる。 $45\% < W/C \leq 65\%$ のコンクリートの関係式は、スランプごとに相関性も高く、一般的な圧送工事において、表 4.2.3 に示す $45\% < W/C \leq 65\%$ の関係式を管内圧力損失の標準値として使用できるものと考えている。一方、 $W/C \leq 45\%$ のコンクリートの関係式は、本検討に用いたデータ数が $45\% < W/C \leq 65\%$ に比べて著しく少ないこと、単位水量ごとの相関係数に低いものがあることおよび使用材料や圧送条件などに大きく影響を受けることが懸念される。そのため、 $W/C \leq 45\%$ のコンクリートは、ポンプ指針¹⁾に解説されているように、試験圧送により実施工に応じた管内圧力損失を把握することが望ましく、表 4.2.4 に示す関係式は、試験圧送における参考値として使用できるものと考えられる。

表 4.2.3 $45\% < W/C \leq 65\%$ における管内圧力損失と実吐出量の関係式

スランプ	単位水量 (kg/m ³)	管内圧力損失と実吐出量の関係式 ($\times 10^{-3} \text{N/mm}^2/\text{m}$)	相関係数
12cm	165 \leq W \leq 185	$K = (0.096 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$	R= 0.869
15cm		$K = (0.085 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$	R= 0.885
18cm		$K = (0.079 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$	R= 0.917
21cm		$K = (0.067 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$	R= 0.926

表 4.2.4 $W/C \leq 45\%$ における管内圧力損失と実吐出量の関係式

スランプ	単位水量 (kg/m ³)	管内圧力損失と実吐出量の関係式 ($\times 10^{-3} \text{N/mm}^2/\text{m}$)	相関係数
スランプ フロー	160 \leq W<165	$K = (0.135 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$	R= 0.557
スランプ	170 \leq W<175	$K = (0.083 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$	R= 0.357
	175 \leq W \leq 185	$K = (0.079 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$	R= 0.916
スランプ フロー	165 \leq W<170	$K = (0.071 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$	R= 0.769
	170 \leq W<175	$K = (0.066 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$	R= 0.875

表 4.2.3 および表 4.2.4 に示す関係式から算出した管内圧力損失と実測された管内圧力損失の関係を図 4.2.9 に示す。関係式から算出した管内圧力損失は、概ね精度良く管内圧力損失を推定できていると考えられる。また、管内圧力損失の算定に關係式を用いる場合、95% 上限信頼限界を割り増しすることで十分に安全を見込んだ管内圧力損失を算定できるものと考えられる。

さらに、本調査において得られた表 4.2.3 の管内圧力損失と実吐出量の関係式から、スランプと係数の関係を図示すると図 4.2.10 のようになる。スランプと係数の関係は概ね比例関係となっ

ており、係数はスランプが小さくなると大きくなる傾向を示している。本調査において、スランプ 12cm 以下のコンクリートは、そのデータ数が少ないことや建築工事において使用される頻度が低いことから検討の対象外としたものの、スランプ 12cm 以下においてもこの比例関係が成立するものと考え、係数はスランプ 8cm が 0.118 となり、スランプ 12cm が 0.108 となる。この係数の妥当性は確認できておらず、更なる検討が必要であるものの、圧送の実績がない場合には管内圧力損失の参考値として使用できるものと考えられる。

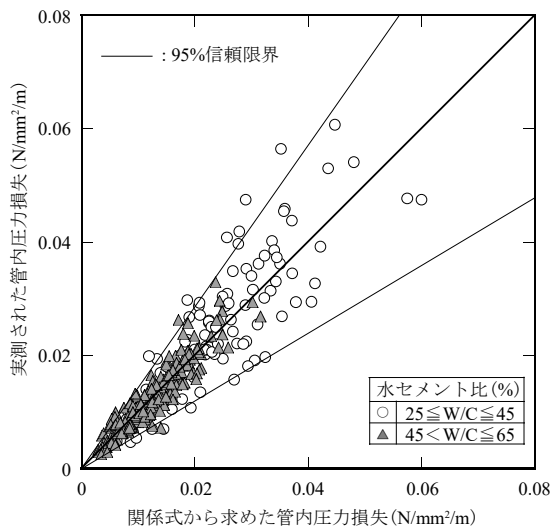


図 4.2.9 関係式と実測値の比較

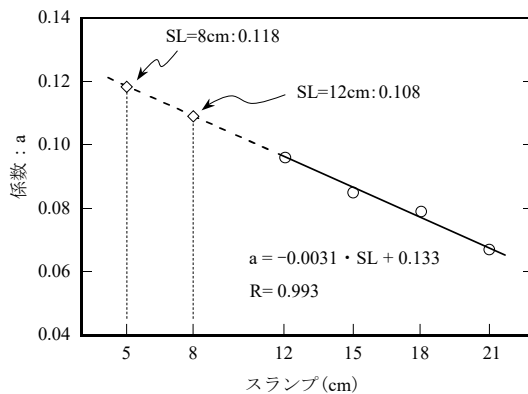


図 4.2.10 スランプと係数の関係

4.3 ベント管の管内圧力損失に関する文献的検討

4.3.1 文献調査の概要

(1) 調査対象とする文献およびデータ

ベント管の管内圧力損失を調査するための文献は、1990年から2017年の間に日本建築学会（構造系論文集，技術報告集および大会学術講演梗概集）およびコンクリート工学会（論文集および年次論文集）に掲載されたコンクリートポンプに関するものとし、このうち、ピストン式コンクリートポンプを用いて配管形式（輸送管径125A）により圧送実験を行ったものとした。また、ベント管の半径は、1.0m（1000R）と0.5m（500R）のものを対象とし、その他のベント管の半径のものおよび水平管と立上りの鉛直管を接続するベント管は、著しくデータ数が少なかったため対象外とした。

本調査は、水平管のベント管における管内圧力損失を対象とした。そのため、ベント管の前後において管内圧力（管内圧力損失）を測定しているものとし、さらに、直管の管内圧力損失と比較するために、途中にベント管やテーパ管などを含まない輸送管径125A（5B）の直管部分において管内圧力損失を測定しているデータを対象とした。なお、複数の箇所において直管の管内圧力損失を測定しているものは、前項4.2と同様に、最長の直管部分から算出した管内圧力損失を使用した。また、対象となるデータのうち、ベント管の前後において管内圧力の差がマイナスとなる、すなわちベント管の根元圧力よりも出口の管内圧力の方が大きくなるデータがあり、このような現象は複数の文献において報告されている^{例えは³²⁾}。しかしながら、通常のすべりやせん断変形を伴う流れの中で、ベント管の前後で管内圧力が逆転することは考えにくいいため、本調査において、ベント管の前後において管内圧力の差がマイナスとなるデータは除外することとした。ただし、この現象については、今後さらなる分析が必要であるといえる。

このように、対象となるデータを抽出した結果、表4.3.1に示す12件の文献が該当し、対象と

表 4.3.1 対象となる文献の概要^{8), 10), 13), 15), 17), 19), 33) ~ 38)}

No	調合						使用材料		ベント管の数		吐出力 (m ³ /h)			調査数	データ数	文献番号
	W/B (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	s/a (%)	スタンプ (cm)	スタンプフロー (cm)	セメント	混和材	1000R	500R	実吐出力	理論吐出力	設定吐出力			
1	27.5~45.0	173	385~629	41.3~48.1	21	-	N	-	-	1	16.7~43.7	-	20~40	3	11	33
2	35.0	150	429	40.2	21	-	N	-	2	-	16.3~39.2	-	20~40	1	36	34
3	30.0	170	567	45.6	-	55	HB	-	2	-	15.9~37.8	-	-	4	8	35
4	27.0	165	612	44.0~44.3	-	45	N, HB	-	3	-	17.5~31.0	-	-	2	6	13
5	30.0	170	567	42.3	16.5~21	-	N	-	2	-	19.0~32.5	-	20~40	2	10	15
6	25.0~40.0	165	413~660	42.5~45.6	18~21	50~60	N	-	-	1	-	40.0	-	4	4	36
7	31.0~32.0	160~165	500~532	不明	-	55	N, L	-	-	1	-	20.0~50.0	-	2	6	17
8	15.0~20.0	150~155	775~970	32.2	-	65~70	3成分	-	2	-	10.3~44.8	-	-	2	12	37
9	28.0~46.5	170	366~608	45.8~50.0	-	50~60	N, エコ	-	1	1	-	10.5~44.1	-	4	20	19
10	27.0	170	630	40.4	-	50	N	高炉	2	-	21.7~42.4	-	20~50	1	10	10
11	16.0	150	938	40.1	-	70	N	石膏, シカ	1	-	10.0~25.4	-	10~30	1	6	38
12	40.0	175	438	43.2	20	-	N	-	1	-	-	25.0~52.0	-	2	13	8

N：普通ポルトランドセメント，L：低熱ポルトランドセメント，HB：高ビーライトセメント，エコ：エコセメント，3成分：高強度用3成分配合セメント，シカ：シリカフェーム，高炉：高炉スラグ，石膏：スラグ石膏，

なるデータ数は142件となった。

(2) 調査対象としたデータの調合条件および使用材料

対象となるデータは、水結合材比（以下、W/Bとする）15.0～46.5%の範囲となり、このデータをベント管の半径、W/Bの区分、スランブおよびスランブフローの区分ごとに分類すると表4.3.2に示すようになる。セメントの種類は、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、エコセメントおよび高強度用に3成分を混合させたセメントなどがあり、混和材として高炉スラグ微粉末やシリカフェームを使用しているものもあった。ただし、本調査では、直管に対するベント管の管内圧力損失を相対的に検討することを主眼としたため、コンクリートの使用材料を限定せず検討することとした。

表 4.3.2 対象となるデータ

スランブ, スランブフロー の区分(cm)	1000R				500R			
	W/B \leq 30%	30% $<$ W/B \leq 45%	45% $<$ W/B \leq 65%	合計	W/B \leq 30%	30% $<$ W/B \leq 45%	45% $<$ W/B \leq 65%	合計
15 \leq SL $<$ 18	0	0	0	0	4	0	0	4
18 \leq SL $<$ 21	0	1	0	1	0	13	0	13
21 \leq SL	5	7	0	12	6	36	0	42
40 \leq SF $<$ 50	0	0	0	0	6	0	0	6
50 \leq SF $<$ 60	1	6	3	10	18	0	3	21
60 \leq SL	4	3	0	7	21	5	0	26
合計	10	17	3	30	55	54	3	112

(3) 吐出量の取扱い方法

吐出量は、前項4.2と同様の理由により、実吐出量を用いることとした。なお、文献から実吐出量が読み取ることができないものについて、理論吐出量が記載されているものは機械効率を0.85と仮定して実吐出量を算出し、設定吐出量が記載されているものはそのままの値を実吐出量として用いることとした。

4.3.2 ベント管の管内圧力損失に及ぼす調査要因

コンクリートがベント管内を流動するとき、流速はベント管内側よりも外側の方が速くなり、大きなせん断変形を生じながら流動していることが考えられる。故に、ベント管の管内圧力損失は、コンクリートの降伏値や塑性粘度などの変形特性に大きく影響を受けることが考えられる。そこで、ここでは、W/Bの区分およびスランプ、スランプフローに大別して検討することとした。

実吐出量とベント管の管内圧力損失の関係を図4.3.1に示す。ベント管の管内圧力損失は、一部の区分において、実吐出量が大きくなるほど大きくなる傾向を示しているものの、スランプおよびスランプフローの違いによる影響やベント管の半径の違いによる影響に明確な傾向は見られなかった。また、管内圧力損失は、1000Rにおいて、W/Bの区分が小さくなるほど大きくなる傾向を示しているものの、500Rにおいてその傾向は見られなかった。

実吐出量と直管の管内圧力損失に対するベント管の管内圧力損失（以降、 K_B/K_L という）の関

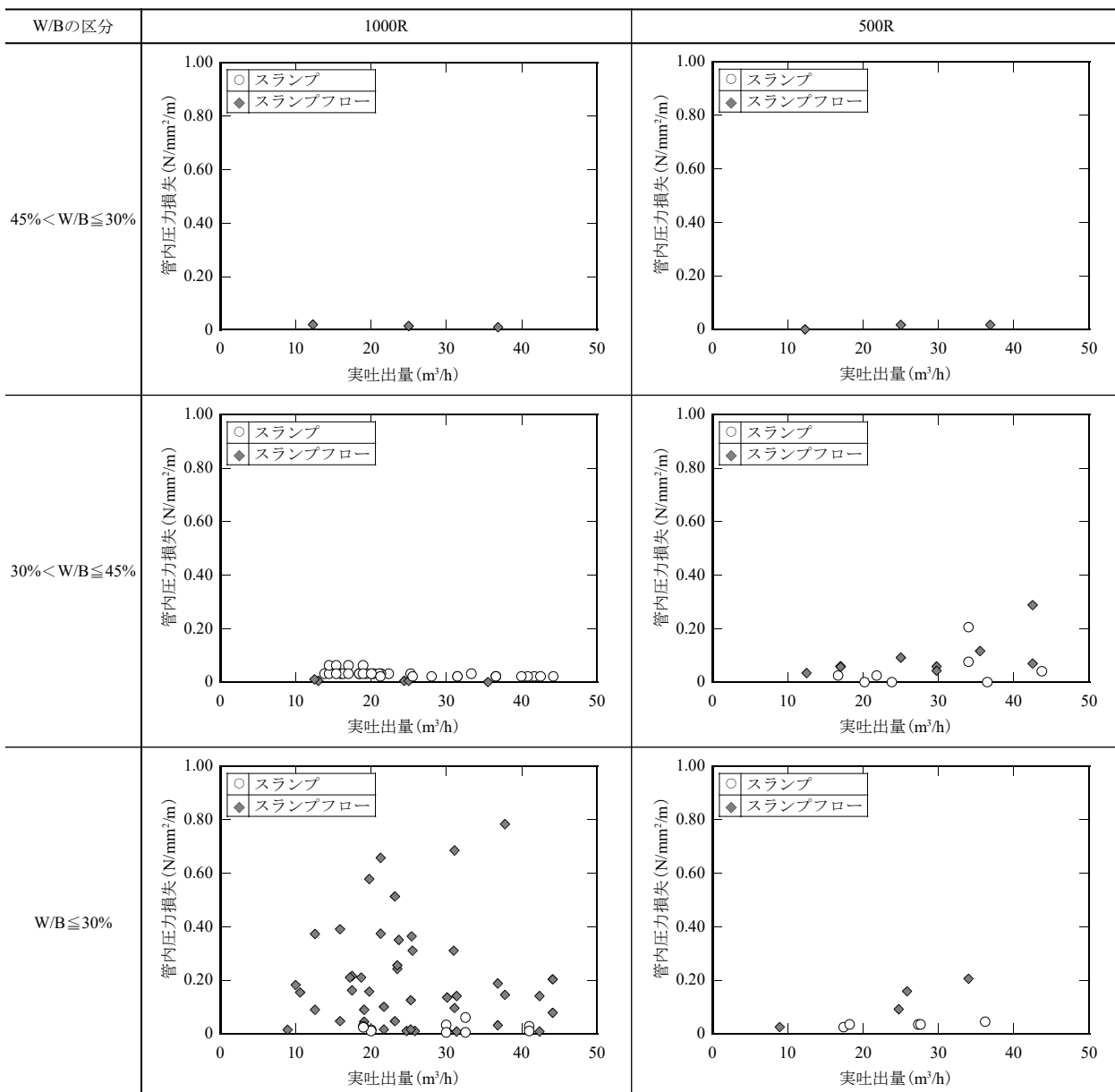


図 4.3.1 実吐出量とベント管の管内圧力損失の関係

係を図 4.3.2 に示す。実吐出量と K_B/K_L の関係に明確な傾向は見られなかった。また、 K_B/K_L は、建築学会のポンプ指針の水平換算係数 3 や土木学会のポンプ指針の水平換算係数 6 を上回るデータもあった。しかし、ベント管の半径や W/B, スランプおよびスランプフローの区分による明確な傾向は見られなかった。

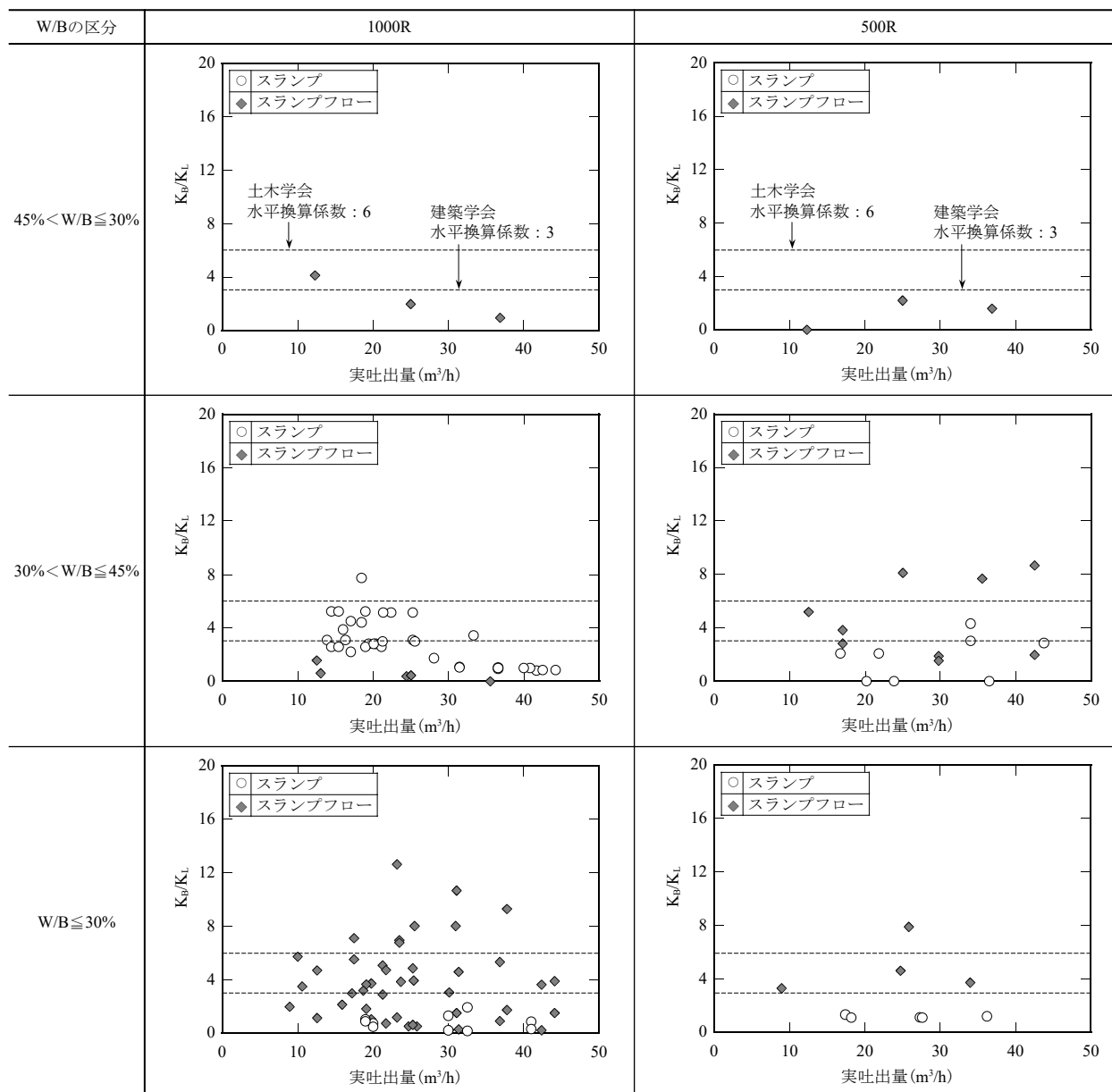


図 4.3.2 実吐出量と K_B/K_L の関係

K_L と K_B の関係を図 4.3.3 に示す。 K_B は、 K_L が大きくなると大きくなる傾向を示した。これは、 K_B が K_L と同様にコンクリートの降伏値や塑性粘度などのレオロジー定数や流速などに影響を受けることを示しており、 K_B は K_L の比（水平換算係数）で表すことが適切であるといえる。しかし、 K_L と K_B の関係に W/B の違いによる明確な傾向は見られなかった。

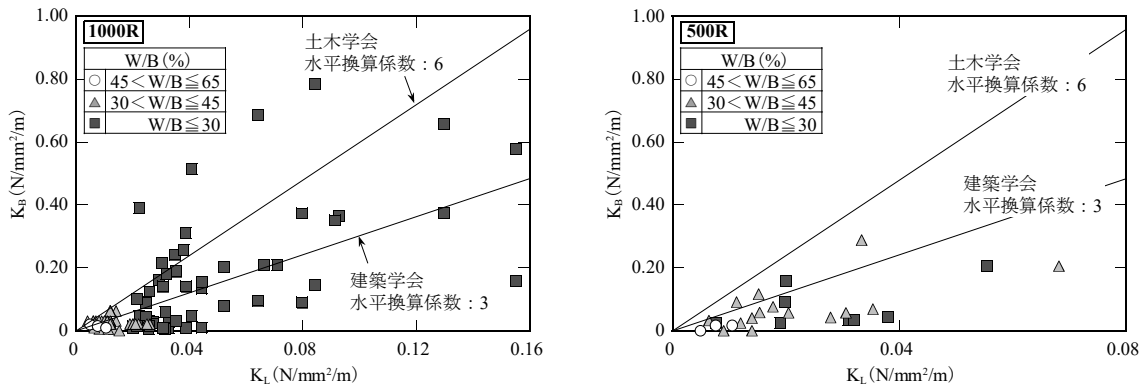


図 4.3.3 K_L と K_B の関係

このように、 K_B や K_L と K_B の関係について、 W/B やスランプおよびスランプフローの違いによる明確な傾向は見られなかった。しかし、ベント管内の圧力損失は、コンクリートのレオロジー定数や流速の影響のみならず、ベント管内を流動する際の圧送圧力によっても左右されることが考えられる。そこで、ここでは、ベント管の直前で測定された管内圧力（以降、ベント管の根元圧力という）が明確なデータを抽出し、ベント管の根元圧力と K_B/K_L との関係について検討した。ベント管の根元圧力と K_B/K_L の関係を図 4.3.4 に示す。 K_B/K_L は、ベント管の根元圧力が大きくなると大きくなる傾向を示しているものの、ばらつきが大きい傾向を示している。これは、コンクリートの使用材料や調合の違いなどによる影響が考えられる。そのため、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートのみを示したものが図 4.3.5 になる。 K_B/K_L は、ベント管の根元圧力が大きくなると大きくなる傾向を示していることが読み取れる。これより、高圧となる可能性がある場合や配管根元に近い位置にベント管を設置する場合は、筒先に近い位置に設置するより

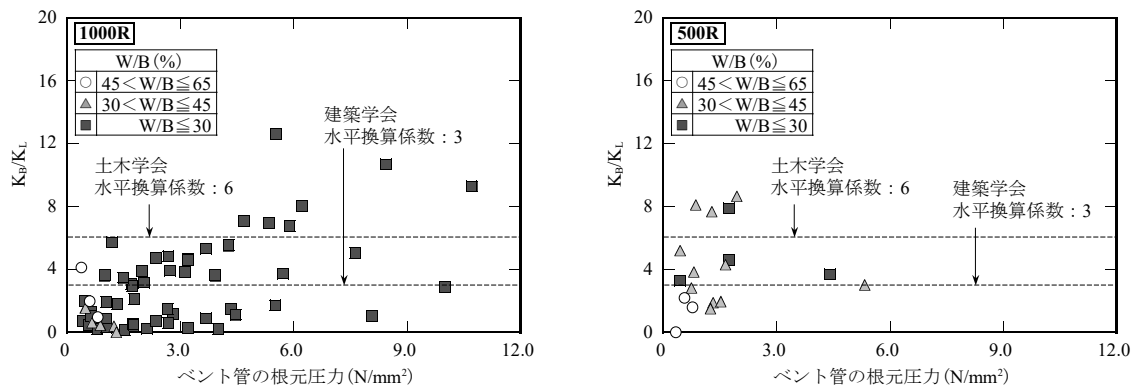


図 4.3.4 ベント管の根元圧力と K_B/K_L の関係

も管内圧力損失を大きく見込む必要があるといえる。しかし、500R のとき上記のような傾向は見られず、今後さらなる検討が必要であるといえる。また、ベント管の半径による管内圧力損失の差の違いは見られなかった。

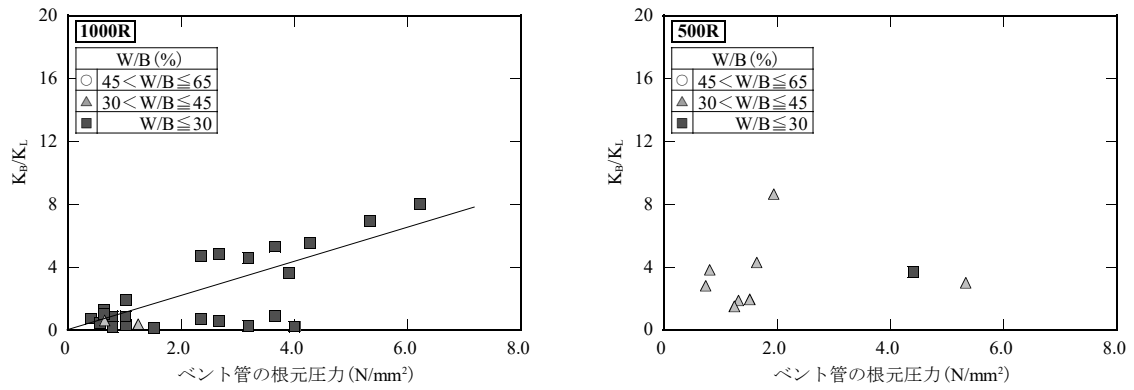


図 4.3.5 ベント管の根元圧力と K_p/K_L の関係（普通ポルトランドセメントのみ）

4.4 水平管の管内圧力損失に関する実験的検討

前項 4.2 において、直管におけるコンクリートの調合の影響を検討し、スランプ、スランプフローおよび W/C の区分ごとに実吐出量と管内圧力損失の関係式を示した。また、4.3 において、ベント管の管内圧力損失が、ベント管の根元圧力が大きくなるほど大きくなる傾向を明らかにした。そこで、ここでは、前項において明らかにした直管およびベント管の管内圧力損失の傾向の妥当性を検証するために、コンクリートの調合および吐出量を変化させて圧送実験を実施し、文献調査による傾向と比較検討した。

4.4.1 圧送実験の概要

(1) 要因と水準

圧送するコンクリートの種類は、W/C=47.5%（呼び名：普通 33-18-20-N）の普通コンクリートおよび W/C=31.0%（呼び名：高強度 60-60-20-N）の高強度コンクリートの 2 水準とした。また、吐出量は、目標吐出量を 40m³/h、50m³/h および 70m³/h の 3 水準で変化させた。配管状況を図 4.4.1 に示す。配管状況は、ベント管の半径を 1.0m（1000R）と 0.5m（500R）に変化させた 2 水準とし、すべての輸送管の呼び径を 125A（5B）とした。また、ベント管の半径を 1.0m とした配管（以降、配管 I という）は、圧送距離を 84.4m、水平換算距離を 100.0m、ベント管の半径を 0.5m とした配管（以降、配管 II という）は、圧送距離を 85.0m、水平換算距離を 95.8m とした。なお、圧送実験は 9 月（外気温 26℃）に行ったものである。

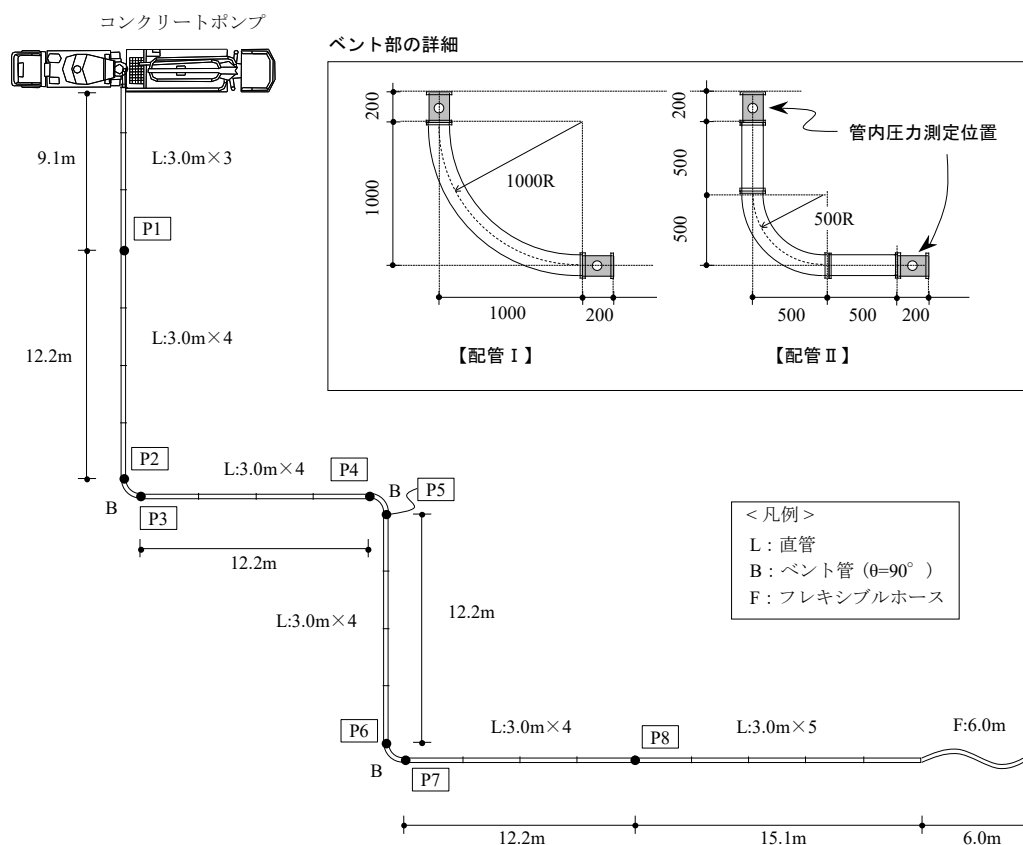


図 4.4.1 配管条件および測定位置

(2) コンクリートの使用材料および調査

コンクリートの使用材料を表 4.4.1 に示し、調査を表 4.4.2 に示す。荷卸し地点におけるスランプおよびスランプフローの目標値は、W/C=47.5% をスランプ 18±2.5cm とし、W/C=31.0% をスランプフロー 60±10cm とした。いずれのコンクリートとも同一のレディーミクストコンクリート工場において製造されたものであり、製造から 30 分後にフレッシュコンクリート試験を実施し、その後、圧送を行った。

表 4.4.1 コンクリートの使用材料

材料	名称・種類	品質・性状・主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm ³
水	地下水	-
細骨材	栃木県栃木市尻内町産 陸砂	表乾密度：2.61g/cm ³ 粗粒率：2.75
粗骨材	栃木県佐野市会沢町産 石灰碎石2005	表乾密度：2.70g/cm ³ 実積率：60.0%
化学混和剤	AE減水剤(標準形 I 種)	リク [®] ニスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物

表 4.4.2 コンクリートの調査

種類	W/C (%)	SL, SF (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
AE減水剤コンクリート	47.5	SL=18	4.5	45.3	185	390	765	935	4.680 ^{*1}
高性能AE減水剤コンクリート	31.0	SF=60	4.5	48.4	170	549	773	851	6.588 ^{*2}

*1：AE減水剤，*2：高性能AE減水剤

(3) 試験・測定項目および方法

試験・測定項目は、管内圧力およびフレッシュコンクリート試験としてスランプ、スランプフローおよび空気量とした。管内圧力は、図 4.4.1 に示す位置において、ダイヤフラム式圧力計を輸送管の上部に取り付け測定した。直管部分における管内圧力の測定間をいずれも同一（12.2m）としたため、ここでは、管内圧力損失に直管部分 4 箇所（P1～P2，P3～P4，P5～P6 および P7～P8）の管内圧力損失の平均値を用いた。また、配管Ⅱ（500R）のベント管前後の管内圧力の測定は、図 4.4.1 に示すように 500mm×2 本の直管が含まれているため、ベント管の管内圧力損失の算定には、500mm×2 本の直管部分の管内圧力損失を差引いて算出した値を用いた。なお、吐出量については、理論吐出量から機械効率を 0.85 と仮定し算出した実吐出量を用いている。

スランプ、スランプフローおよび空気量は、荷卸し地点（圧送前）および筒先（圧送後）において試料を採取し、試験を実施した。筒先における試料の採取は、目標吐出量 40m³/h のときに排出されたコンクリートとした。

4.4.2 圧送前後のコンクリートの品質変化

圧送前後のコンクリートの品質変化を表4.4.3に示す。圧送後のスランプおよびスランプフローは、いずれのコンクリートおよび配管状況においても低下する傾向を示した。また、圧送後の空気量は、高性能AE減水剤を用いたW/C=31.0%のとき増加する傾向を示した。一部の結果において、ポンプ指針の圧送前後の品質変化の限度および限度目安を超える結果を示したものの、概ね3章の傾向と同様であった。なお、ベント管の半径が圧送前後のコンクリートの品質変化に及ぼす明確な傾向は見られなかった。

表 4.4.3 圧送前後のコンクリートの品質変化

試験項目	配管条件	W/C=47.5%			W/C=31.0%		
		圧送前	圧送後	変化量	圧送前	圧送後	変化量
スランプ スランプフロー (cm)	配管 I	20.5	15.0	-5.5	66.5	63.0	-2.5
	配管 II	20.5	19.0	-1.5	69.0	50.0	-19.0
空気量 (%)	配管 I	3.1	3.5	+0.4	3.7	5.6	+1.9
	配管 II	3.0	2.9	-0.1	3.8	4.9	+1.1

4.4.3 直管の管内圧力損失

圧送距離と管内圧力の関係を図4.4.2に示す。管内圧力は、ポンプ根元から筒先に向けて小さくなる傾向を示し、ベント管において傾きが大きくなる傾向を示した。なお、ベント管の管内圧力損失については、次項4.4.4で後述する。また、管内圧力は、同一の目標吐出量のとき、

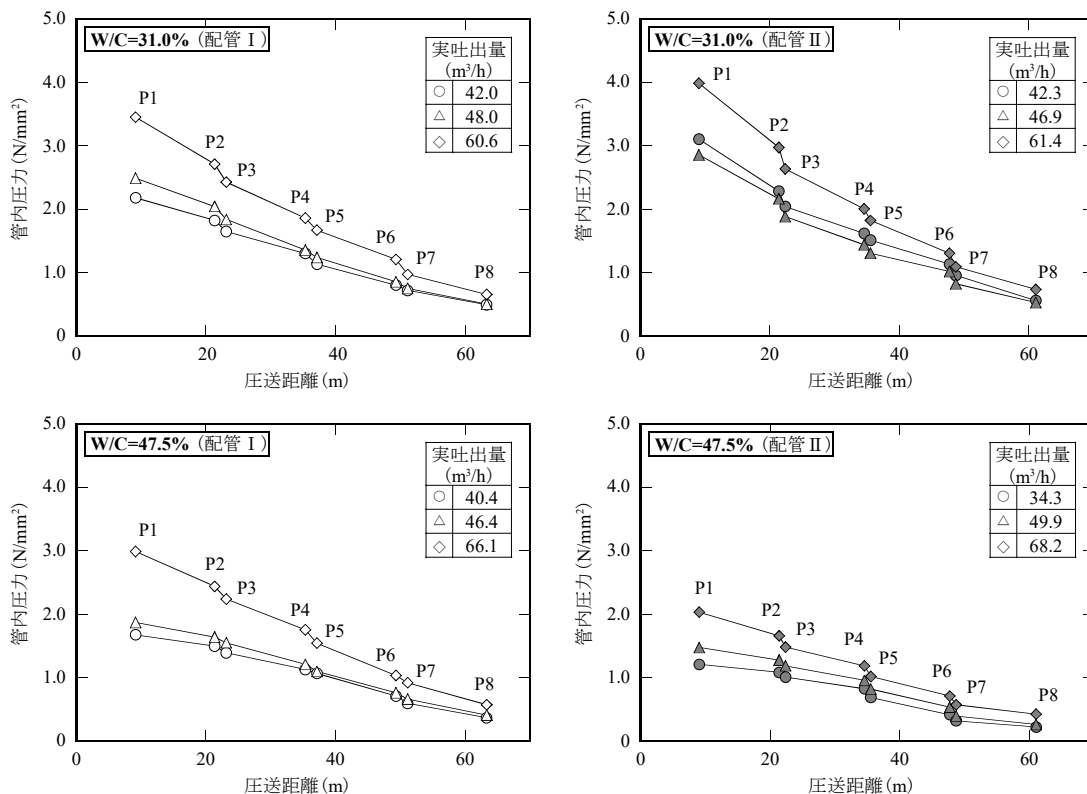


図 4.4.2 圧送距離と管内圧力の関係

W/C=31.0%の方がW/C=47.5%に比べて大きくなる傾向を示した。これは、W/Cが小さいためコンクリートの粘性が高くなっていることが影響しているものと考えられる。

実吐出量と管内圧力損失の関係を図4.4.3に示す。なお、図中には、前項4.3の文献調査による管内圧力損失の傾向および95%上限信頼限界、ポンプ指針¹⁾における管内圧力損失の標準値を示している。管内圧力損失は、いずれのコンクリートにおいても、文献調査による傾向と概ね一致した。また、本実験で得られた管内圧力損失の値は、ポンプ指針¹⁾の標準値に対してW/C=47.5%のとき1.5～3.0倍程度であり、W/C=31.0%のとき3.0～5.0倍程度であった。これより、前項4.3の文献調査による管内圧力損失の傾向は、概ね精度良く管内圧力損失を推定できているといえる。

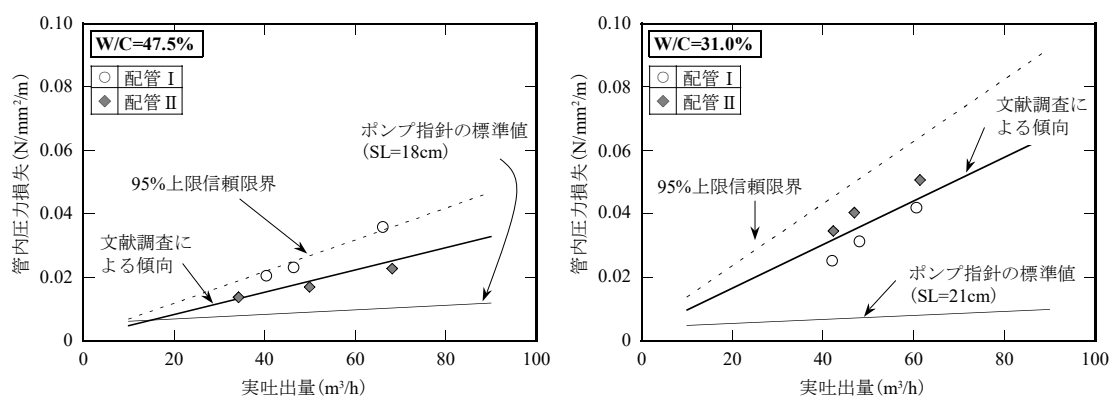


図 4.4.3 実吐出量と管内圧力損失の関係

4.4.3 ベント管の管内圧力損失

実吐出量と K_B/K_L の関係を図 4.4.4 に示す。実吐出量と K_B/K_L の関係は、文献調査による傾向と同様に、明確な傾向が見られなかった。また、 K_B/K_L は、1000R のとき 2～4 倍程度、500R のとき 2～8 倍程度であり、僅かに 500R の方が大きくなる傾向を示している。しかし、W/C の違いによる明確な傾向は見られなかった。

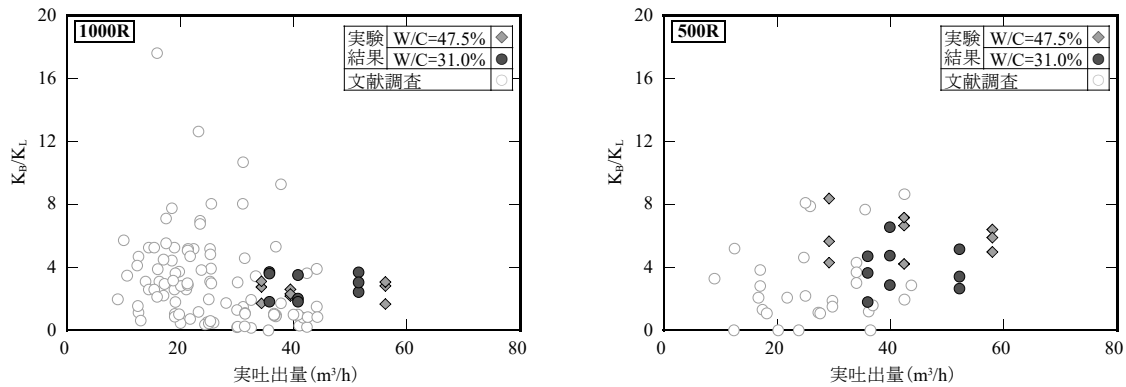


図 4.4.4 実吐出量と K_B/K_L の関係

ベント管の根元圧力と K_B/K_L の関係を図 4.4.5 に示す。 K_B/K_L は、1000R において、文献調査の傾向と同様に、ベント管の根元圧力が大きくなるほど大きくなる傾向を示した。しかし、W/C の違いによる明確な違いは見られなかった。一方、500R の K_B/K_L は、ベント管の根元圧力の違いによる明確な傾向は見られず、ばらつきが大きくなる傾向を示した。

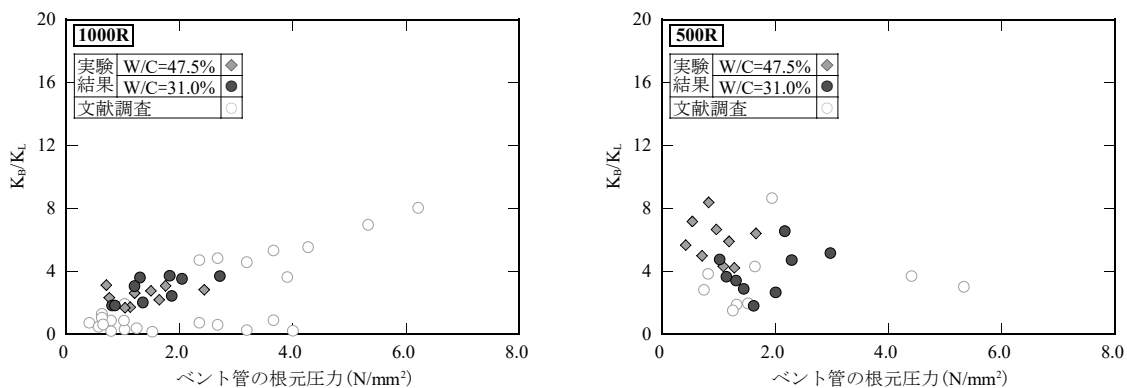


図 4.4.5 ベント管の根元圧力と K_B/K_L の関係

実験結果および文献調査結果の全データを含めた K_B/K_L の分布を図 4.4.6 に示す。1000R の K_B/K_L の分布は、建築学会の水平換算係数 3 以下が約 50% であり、土木学会の水平換算係数 6 以下が約 90% であった。また、500R の K_B/K_L の分布は、建築学会の水平換算係数 3 以下が約 40%、土木学会の水平換算係数 6 以下が約 80% であった。すなわち、現状の建築学会のポンプ指針の水平換算係数で算出すると危険側になる可能性が約半数あることを示している。しかし、ベント管

の長さは、1000R のとき約 1.6m、500R のとき約 0.8m であり、ベント管の水平換算係数を実際の値より小さく設定した場合も著しく水平換算距離が長くなる訳ではない。そのため、現状のポンプ指針の水平換算係数を採用しても大きな問題は生じないものの、ベント管の設置数が多い場合は水平換算係数を大きく見込んで設定するなどの対策が必要になるといえる。

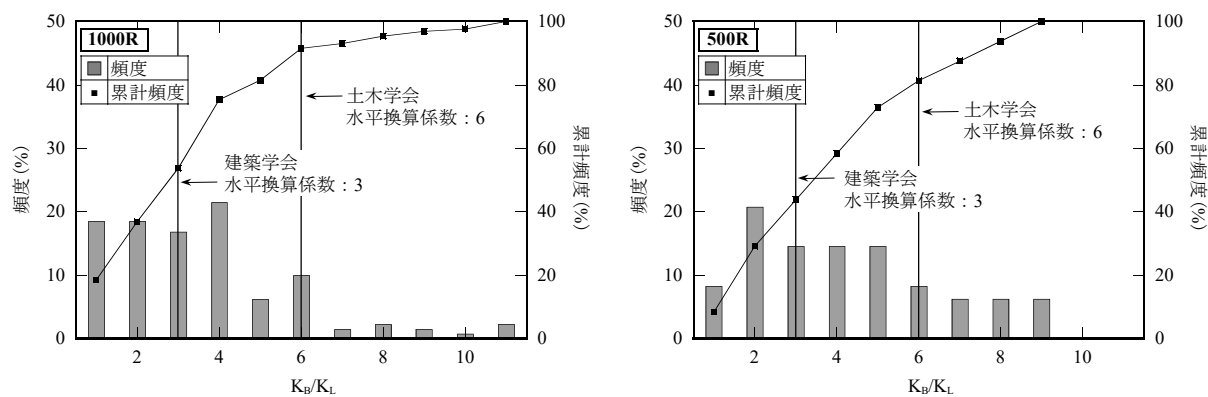


図 4.4.6 K_B/K_L の分布

4.5 まとめ

本章は、近年のコンクリートの直管およびベント管の管内圧力損失を明らかにするために、文献調査によりコンクリートの調合条件や圧送条件ごとに直管およびベント管の管内圧力損失について調べ、その妥当性を圧送実験により確認したものである。その結果、得られた知見を以下に示す。

(1) 直管の管内圧力損失

本章では、対象となるデータのうち、 $45\% < W/C \leq 65\%$ をスランプの区分ごとに分類し、 $W/C \leq 45\%$ を単位水量ごとに分類して管内圧力損失を検討した。その結果、 $45\% < W/C \leq 65\%$ における管内圧力損失は、スランプの区分が小さくなると大きくなる傾向を示し、 $W/C \leq 45\%$ における管内圧力損失は、単位水量の区分が小さくなると大きくなる傾向を示した。これらの結果から実吐出量と管内圧力損失の関係式を求め、 $45\% < W/C \leq 65\%$ の普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートにおける管内圧力損失の関係式として (4.5.1) 式を示した。

$$K = (aQ_d + 0.306) \cdot (C/W)^2 \quad \dots (4.5.1) \text{ 式}$$

ここに、 K : 管内圧力損失 ($N/mm^2/m$)、 a : スランプによる係数 [スランプ 12cm : 0.096, スランプ 15cm : 0.085, スランプ 18cm : 0.079, スランプ 21cm : 0.067], Q_d : 実吐出量 (m^3/h), C/W : セメント水比である。

また、 $W/C \leq 45\%$ の普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートにおける管内圧力損失の参考値を示した。さらに、文献調査により得られた管内圧力損失の関係式の妥当性を検証するために、コンクリートの調合および吐出量を変化させて圧送実験を行い、文献調査により得られた管内圧力損失の関係式は概ね精度良く管内圧力損失を推定できることを確認した。

(2) ベント管の管内圧力損失

普通ポルトランドセメントを用いた K_B/K_L は、ベント管の根元圧力が大きくなるほど大きくなる傾向を示したものの、 W/C 、スランプおよびスランプフローによる明確な違いは見られなかった。また、実験結果および文献調査結果の全データを含めて分析すると、1000R における K_B/K_L は、建築学会の水平換算係数 3 以下が約 50%、土木学会の水平換算係数 6 以下が約 90% であり、500R における K_B/K_L の分布は、建築学会の水平換算係数 3 以下が約 40%、土木学会の水平換算係数 6 以下が約 80% であった。すなわち、現状の建築学会のポンプ指針の水平換算係数で算出すると危険側になる可能性が約半数あることが明らかとなった。

4.6 圧送計画における水平管の管内圧力損失の合理化に関する検討

ポンプ指針¹⁾において、コンクリートポンプに加わる圧送負荷は、(4.6.1)式から算定することとなっており、これは管内圧力損失と水平換算距離の積にコンクリートヘッド（自重）を加えて算定できることを意味している。また、ベント管，テーパ管およびフレキシブルホースの係数は、それぞれの水平換算係数を指している。

$$P = K (L + 3B + 2T + 2F) + WH \times 10^{-3} \quad \dots (4.6.1) \text{ 式}$$

ここに、P：コンクリートポンプに加わる圧送負荷（N/mm²），K：水平配管の管内圧力損失（N/mm²/m），L：直管の長さ（m），B：ベント管の長さ（m），T：テーパ管の長さ（m），F：フレキシブルホースの長さ（m），W：フレッシュコンクリートの単位容積重量（kN/m³），H：圧送高さ（m）である。さらに、ポンプ指針には、管内圧力損失の標準値として図4.6.1が示されており、建築工事で使用されている通常のコンクリートであれば、管内圧力損失が概ね推定できることを解説している。しかしながら、圧送負荷を算定するための水平換算係数や管内圧力損失の標準値は、1970年代の圧送実験や施工報告を基に設定されたものであり、近年のコンクリートの使用材料の変化や多様化に十分対応できているとは言い難い。

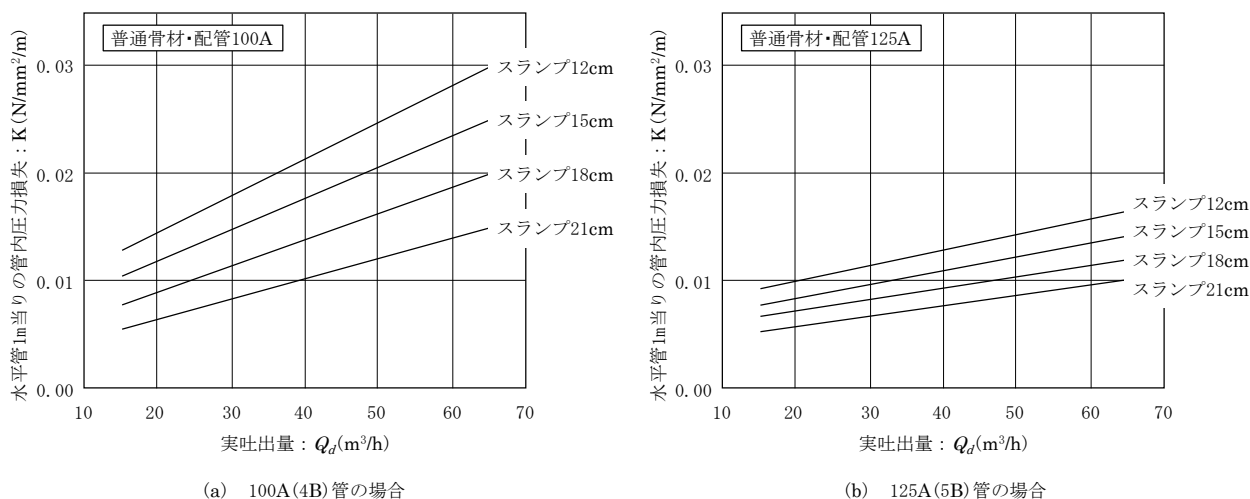


図 4.6.1 普通骨材を使用したコンクリートの水平配管 1m あたりの管内圧力損失¹⁾

このような第2章で抽出した(3)管内圧力損失の標準値に関する問題点に対して、ここでは、圧送計画における水平管の管内圧力損失を合理化するために、水セメント比45%を超えるコンクリートの管内圧力損失の標準値を本章の調査結果から(4.6.2)式のように提案する。

$$K = (a Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2 \quad \dots (4.6.2) \text{ 式}$$

ここに、K：管内圧力損失（N/mm²/m），a：スランブによる係数 [スランブ 12cm：0.096，スランブ 15cm：0.085，スランブ 18cm：0.079，スランブ 21cm：0.067]， Q_d ：実吐出量（m³/h），C/W：セメント水比である。また、水セメント比45%以下の場合は、表4.6.1に示す関係式から算定した管内圧力損失を試験圧送の参考値として用いるとよいと考えられる。

表 4.6.1 水セメント比 45% 以下の管内圧力損失の参考値

スランブ スランブフロー	単位水量 (kg/m ³)	管内圧力損失の関係式
スランブ	160 ≤ W < 165	$K = (0.135 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	165 ≤ W < 170	$K = (0.102 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$ *
	170 ≤ W < 175	$K = (0.083 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	175 ≤ W ≤ 185	$K = (0.079 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
スランブフロー	165 ≤ W < 170	$K = (0.071 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$
	170 ≤ W < 175	$K = (0.066 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$
	175 ≤ W ≤ 185	$K = (0.064 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$ *

* : その他のデータから補間して求めた数値

一般的な建築工事における配管計画は、輸送管径 125A (5B) を基本として用いることが多く、筒先付近でテーパ管を介して 100A (4B) に接続することが多い。本章では、管内圧力損失の調査対象を 125A (5B) としたため、100A (4B) の管内圧力損失は検討できていないものの、次の理由により 100A (4B) の管内圧力損失を算定できるものとして考えられる。なお、ここでは、表現を簡単にするために、せん断層流による流量は考慮していない。

管内を流動するときのすべり抵抗力は、すべり速度に比例する (4.6.3) 式で表される。

$$f_R = \eta v + \tau \quad \dots (4.6.3) \text{ 式}$$

ここに、 f_R : すべり抵抗力、 η : すべり粘性、 v : すべり速度、 τ : すべり降伏値である。直管における圧力損失は、図 4.6.2 に示すような釣り合いと考えると、(4.6.4) 式のように表すことができ、(4.6.4) 式に (4.6.3) 式を代入して、圧力損失 (dP/dx) について解くと (4.6.5) 式となる。

$$2\pi R \cdot dx \cdot f_R = \pi R^2 \cdot dP \quad \dots (4.6.4) \text{ 式}$$

$$\frac{dP}{dx} = \frac{2}{R} (\eta v + \tau) \quad \dots (4.6.5) \text{ 式}$$

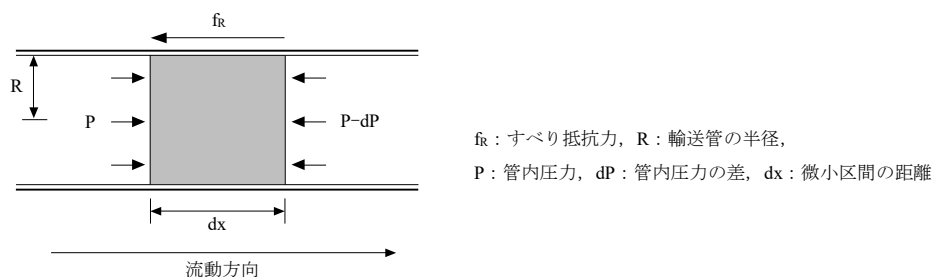
ここで、コンクリートの流量 (Q) は、輸送管の断面積 (πR^2) と流速 (v) の積で表されるため、(4.6.5) 式は、(4.6.6) 式のように表すことができる。

$$\frac{dP}{dx} = \frac{2\eta}{\pi R^3} Q + \frac{2\tau}{R} \quad \dots (4.6.6) \text{ 式}$$

このとき、

$$a = \frac{2\eta}{\pi R^3} Q, \quad b = \frac{2\tau}{R}$$

と置き換えると、コンクリートの流量を同一とした場合、100A (4B) の係数 a および b は、125A (5B)



f_R : すべり抵抗力、 R : 輸送管の半径、
 P : 管内圧力、 dP : 管内圧力の差、 dx : 微小区間の距離

図 4.6.1 管内における力の釣り合い

に対してそれぞれ 1.25^3 (約 1.95) 倍および 1.25 倍となる。そのため、ここでは、100A (4B) の係数 a および b を 125A (5B) の係数にそれぞれ 1.95 倍および 1.25 倍した値とした。

本章において、合理化した水平管の管内圧力損失をまとめると表 4.6.2 のようになり、従来のように実吐出量と管内圧力損失の関係を図示すると図 4.6.3 および図 4.6.4 のようになる。

表 4.6.2 水セメント比 45% を超える管内圧力損失の標準値

輸送管径	スランプ	管内圧力損失の関係式
100A (4B)	12cm	$K = (0.187 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
	15cm	$K = (0.166 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
	18cm	$K = (0.154 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
	21cm	$K = (0.131 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
125A (5B)	12cm	$K = (0.096 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	15cm	$K = (0.085 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	18cm	$K = (0.079 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	21cm	$K = (0.067 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$

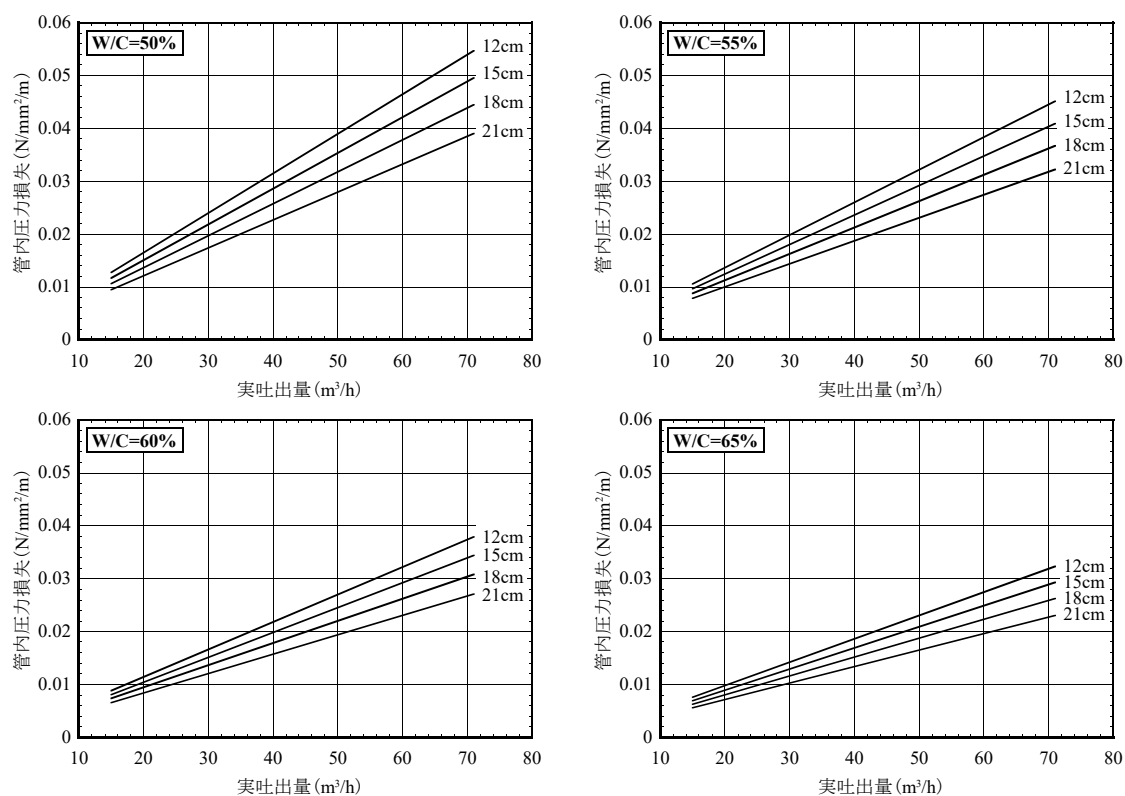


図 4.6.3 実吐出量と管内圧力損失の関係 (100A)

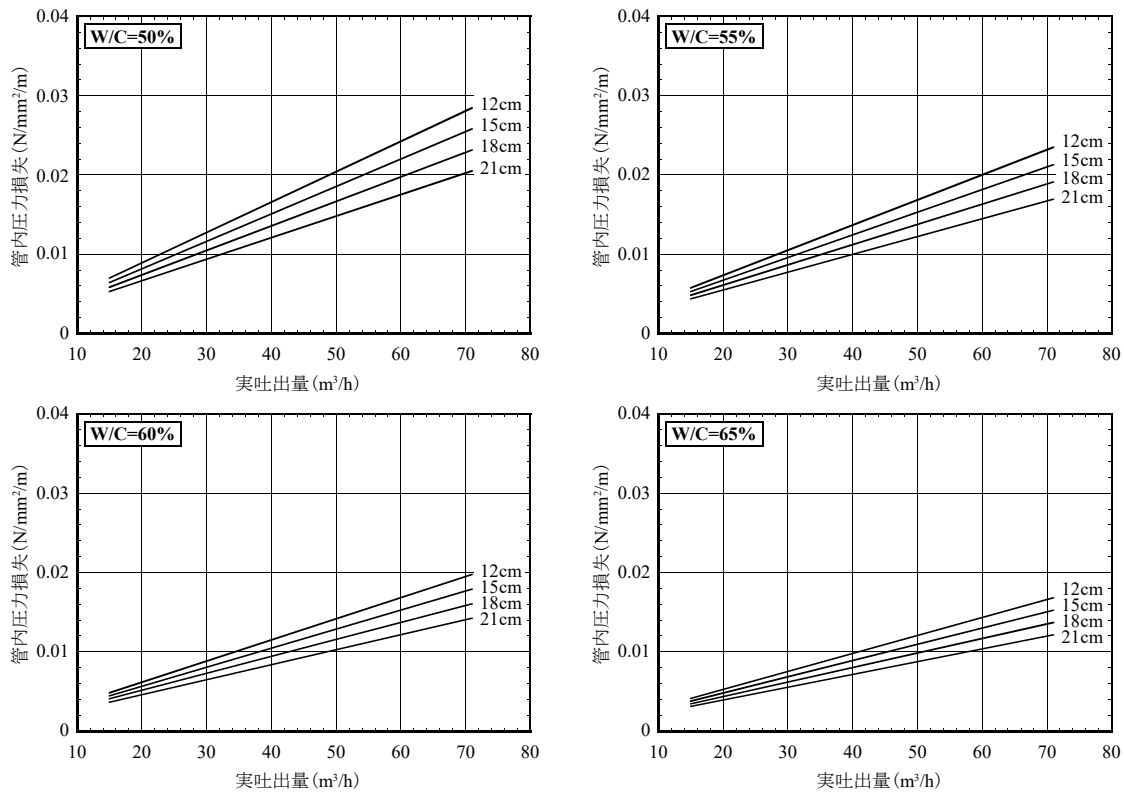


図 4.6.4 実吐出量と管内圧力損失の関係 (125A)

ベント管の水平換算係数は、現状のポンプ指針の水平換算係数：3 よりも大きくなるものが約半数ある。しかし、ベント管の水平換算係数を小さく見込んだ場合においても、圧送負荷が著しく大きくなる訳ではない。そのため、ここでは、ベント管の水平換算係数について、従来から用いられてきた水平換算係数から算定できるものとして扱っている。しかし、ベント管を設置する数が多い場合は、水平換算係数を必要に応じて 6 にするなどして圧送負荷を算定することが望ましいといえる。

【第4章の参考文献】

- 1) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009
- 2) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説，1979
- 3) 森永繁：コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究，コンクリートジャーナル，Vol.9，No.7，pp.1-11，1971.7
- 4) 毛見虎雄：コンクリートポンプの施工に関する研究，セメント・コンクリートジャーナル，No.302，pp.2-12，1972.4
- 5) 佐久田昌治，嵩英雄，佐藤忠博，山根昭：フレッシュコンクリートの管内流動 -Bingham Bodyとしての性状と軽量コンクリートの圧力分布の非線型性について-，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.145-148，1974
- 6) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，1997
- 7) 大村高慶，金田克夫，清水正樹，毛見虎雄，松尾忠，篠崎徹：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究，その3. ポンプ圧送による管内抵抗，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.565-567，1990.10
- 8) 柏木隆男，北山悟，浦野英男，黒島毅：高強度コンクリートのポンプ圧送性，その1，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.1105-1106，1993.9
- 9) 永井康淑，久保田昌吾，名和豊春，中根淳，田中光男：低熱セメントを用いた高強度コンクリート実大施工実験，その3. ポンプ圧送性，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.677-678，1993.9
- 10) 和美廣喜，桜本文敏，柳田克巳：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，No.466，pp.11-20，1994.12
- 11) 徳田浩，山崎庸行，西田朗，井上秀之，大村高慶：高強度・高流動コンクリートの実大施工実験，その2. ポンプ圧送性，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.365-366，1995.8
- 12) 明石峰子，毛見虎雄，藤井和俊，小長光公和：高流動コンクリートの実大部材へのポンプ圧送に関する実験研究，日本建築学会技術報告集，No.1，pp.75-80，1995.12
- 13) 起橋孝徳，上西隆，河野政典：低発熱セメントを用いた高強度コンクリートの施工実験，その1. ポンプ圧送性及び圧送による品質変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.187-188，1996.9
- 14) 岡田光弘，伊藤摂朗，寺添伸広，中尾圭司，安酸将城，山田吉博：高強度鉄筋コンクリートを用いた高層建築物の開発，その4. ポンプ圧送性および圧送による品質変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.729-730，1997.9
- 15) 柳田淳一，荒川玄，中根博：高層鉄筋コンクリート構工法の実大施工実験，高強度コンクリートのポンプ圧送性および品質変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.949-950，2000.9
- 16) 笠井浩，和美廣喜，稲垣和彦，藤木英一，齋藤昭雄，富岡一則：石炭灰を用いたコンクリート

用骨材の開発，その3. 石炭灰人工骨材を用いた高強度コンクリートのポンプ圧送性，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp. 693-694，2002.8

- 17) 池木誠，鈴木澄江，小野嗣修，馬場武志，坂野宏行，三谷高豊，阿部道彦：低発熱形セメントを用いた高強度コンクリートの実用化に関する実験研究，その5. ポンプ圧送性の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.1083-1084，2002.8
- 18) 大塚秀三，松本文彬，谷山教幸，佐藤宏紀，斉藤丈士，中田善久，高橋宏樹，藪内裕：ごみ焼却灰溶融スラグを細骨材に用いたコンクリートの実大施工実験，その3. コンクリートのポンプ圧送性の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.387-388，2003.9
- 19) 環境配慮型セメントを用いたコンクリート充填鋼管造に関する施工技術の開発コンソーシアム：エコセメントを用いた高強度・高流動コンクリートのポンプ圧送性と金属腐食に関する基礎的研究，日本建築学会技術報告集，No.14，pp.1-6，2008.6
- 20) 高見錦一，千々岩伸佐久，岸繁樹，吉見正，高橋洋，岩清水隆：コンクリートのポンプ圧送性評価に関する研究，その4.100mField 実験における管内圧力測定結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.925-926，2008.9
- 21) 片寄哲務，西田浩和，佐々木聡，横須賀誠一，塩田博之：高強度コンクリートを用いた実大CFT柱部材の圧入施工実験，その1. ポンプ圧送実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.977-978，2009.8
- 22) 中村瑞士，千々岩伸佐久，高見錦一，岩竹秀昭，庄野和隆，川崎裕司：コンクリートポンプ工法における閉塞危険性に関する研究：その13. 普通コンクリートの管内圧力測定結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.631-632，2010.9
- 23) 高橋洋，木村芳幹，千々岩伸佐久，山崎順二，織田哲也，庄野和隆：コンクリートポンプ工法における閉塞危険性に関する研究，その25. 普通コンクリートの管内圧力，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.791-792，2011.8
- 24) 元木亮，千々岩伸佐久，山崎順二，中村成春，福島和将，庄野和隆：コンクリートの圧送性に及ぼす粗骨材径およびベント管形状の影響に関する研究，その4. 管内圧力の測定結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.601-602，2012.9
- 25) 元木亮，岩清水隆，永田哲夫，濱岡利信，豊田裕，川崎裕司：調合条件の違いがコンクリートの圧送性に及ぼす影響，その5. 管内圧力の測定結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.565-566，2014.9
- 26) 高橋洋，岩清水隆，高見錦一，加藤安伸，元木亮，石井孝征：スランプと使用材料の違いが圧送性に及ぼす影響，その5. 直管の管内圧力損失，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.299-300，2015.9
- 27) 豊田裕，岩清水隆，高見錦一，小玉淳司，加藤安伸，松倉隼人：ポンプ機種が圧送性に及ぼす影響と閉塞危険性の評価，その9. 直管の管内圧力損失，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.809-810，2016.8
- 28) 豊田裕，岩清水隆，高見錦一，高橋洋，村田孝弘，元木亮：暑中期におけるコンクリートの圧

- 送性に関する研究, その 8. 直管の管内圧力損失, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.441-442, 2017.8
- 29) 日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, 2015
- 30) 村田二郎: まだ固まらないコンクリートのレオロジーの研究, コンクリートジャーナル, Vol.10, No.12, pp.1-10, 1972.12 (in Japanese)
- 31) 鈴木一雄, 越川茂雄, 伊藤康司: コンクリートの管内流動に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp.47-57, 2004.5
- 32) 米澤敏男, 和泉意登志, 三井健郎, 奥野亭: 高強度コンクリートのワーカビリティに関する L 型フロー試験法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.11, No.1, pp.171-176, 1989.6
- 33) 木村建治, 清水昭之, 本間敏明, 梅津裕二, 榊田佳寛, 阿部道彦, 崎山和隆, 島垣利久: 高強度コンクリートの品質と施工性に関する実験的研究 その 1. ポンプ圧送性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.545-546, 1990.10
- 34) 梅本宗宏, 平賀友晃, 篠崎徹, 寺井靖人, 佐治昭: 高強度コンクリートの品質と施工性に関する実験的研究 その 1. ポンプ圧送性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.745-746, 1991.9
- 35) 小高茂央, 和美廣喜, 桜本文敏, 鈴木清孝, 柳田克己: 高強度コンクリートのポンプ圧送実験 その 2. 圧力損失および流動特性値との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.261-262, 1994.9
- 36) 早川光敬, 三井建朗, 石川嘉崇, 浦川和也: フライアッシュを主原料とした高強度人工骨材を用いたコンクリートの施工実験 その 1. ポンプ圧送性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.619-620, 2000.9
- 37) 後藤和正, 黒岩秀介, 寺内利恵子, 並木哲, 松本修一, 陣内浩, 荒川友宏: Fc150 及び Fc100 を用いた CFT の実大施工実験 その 1. ポンプ圧送性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.805-806, 2010.9
- 38) 寺内利恵子, 早川光敬, 陣内浩, 黒岩秀介: 超高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 622 号, pp.25-31, 2007.12

第5章 鉛直管の管内圧力損失に及ぼす 各種要因の影響

第5章 鉛直管の管内圧力損失に及ぼす各種要因の影響

5.1 本章の目的

コンクリートポンプ工法において、使用するコンクリートポンプや輸送管は、圧送による圧力に耐え得る十分な能力を有するもので、コストや作業性の観点から合理的な選定が求められる。これらを安全でかつ合理的に選定するためには、コンクリートポンプに加わる圧送負荷や輸送管にかかる管内圧力を的確に把握することが重要となる。特に、高層RC造などの施工において実施される高所圧送は、水平配管に比べて著しく圧送負荷が大きくなるため、圧送圧力をより適確に把握することが望まれ、圧送負荷がコンクリートポンプの吐出圧力を超える場合には圧送不可に陥ることにも繋がる。

建築学会のポンプ指針¹⁾において、鉛直方向へ圧送を含む配管条件の圧送負荷は、水平管の管内圧力損失と水平換算距離の積にコンクリートの自重を加えて算定することになっている。すなわち、鉛直管の管内圧力損失は、水平管の管内圧力損失にコンクリートの単位容積重量（コンクリートの単位容積質量に重力加速度を乗じたもの）と加えたもので表現される。一方、土木学会のポンプ指針²⁾において、鉛直管の管内圧力損失は、水平管の管内圧力損失に水平管の管内圧力損失との比である水平換算係数を乗じて算定するものとして表現している。しかし、この水平換算係数は、水平管の管内圧力損失の標準的な値にコンクリートの単位容積重量を加えて算定される値から安全を見込んで設定されたものである。故に、建築学会および土木学会の両学会の表現は異なるものの、鉛直管の管内圧力損失は、水平管の管内圧力損失にコンクリートの単位容積重量を加えたもので算定できるとする考え方は同じである。

鉛直方向の管内圧力損失について、既往の研究では、水平管の管内圧力損失にコンクリートの単位容積重量を加えた値よりも小さくなるとする報告^{例え3)}や、反対に水平管の管内圧力損失にコンクリートの単位容積重量を加えた値よりも大きくなるとする報告^{例え4)}などがあり、この傾向が施工事例によって異なることが報告されている。もともと、鉛直管の管内圧力損失が水平管の管内圧力損失にコンクリートの単位容積重量を加えたもので算定できるとする考え方は、鉛直管と水平管の管内流動が同一である場合に成立するものであり、近年多く使用されるようになった高流動コンクリートなどの流動性の高いコンクリートや、高強度コンクリートのなどの粘性の高いコンクリートの場合に、従来の算定方法がそのまま適用できるか不明確である。

そこで、本章では、高所圧送時における圧送負荷の明らかにするために、鉛直管において管内圧力損失を測定している文献を調査し、水平管と鉛直管の管内圧力損失の関係について検討した。さらに、2つの高層建築物工事において鉛直管の管内圧力損失を測定し、文献調査によって得られた傾向と比較検討したものである。

5.2 鉛直管の管内圧力損失に関する文献的検討

5.2.1 文献調査の概要

(1) 調査対象とする文献およびデータ

鉛直管の管内圧力損失を調査するための文献は、1990年から2018年までに日本建築学会（構造系論文集，技術報告集および大会学術講演梗概集）およびコンクリート工学会（論文集および年次論文集）に掲載されたコンクリートポンプに関するものとし、このうち、ピストン式コンクリートポンプを用いて配管形式（輸送管径125A）により鉛直方向への圧送を行ったものとした。さらに、水平管の管内圧力損失および鉛直管の管内圧力損失が記載されているものまたは読み取れるものを対象とし、水平管の管内圧力損失は鉛直管の直前において測定された値とした。また、目標スランプが21cmを超えるものおよび目標スランプフローが45cm未満のものは除外した。

このように、対象となるデータを抽出した結果、表5.2.1に示す14件の文献^{3), 5)~16)}が該当し、対象となるデータ数は186件となった。

(2) 調査対象としたデータの調査条件および使用材料

対象となるデータは、W/B=21.0～56.0%の範囲となり、W/Bの区分，スランプおよびスランプフローの区分ごとに分類すると表5.2.2に示すようになる。普通骨材を対象としたデータ数は136件であり、軽量骨材を対象としたデータは50件であった。なお、対象となるデータのセメントの種類は、普通ポルトランドセメント，低熱ポルトランドセメント，シリカフェームセメントなどがあり、混和材として高炉スラグ微粉末やシリカフェームなどを使用しているものもあった。管内圧力損失は、コンクリートの使用材料によって著しく異なることが考えられるものの、本調査では、水平管に対する鉛直管の管内圧力損失を相対的に検討することを主眼としたため、コン

表 5.2.1 対象となる文献の概要^{3), 5)~16)}

No	調合						使用材料			圧送高さ (m)	吐出量 (m ³ /h)			文献番号
	W/B (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	s/a (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	セメント	粗骨材	混和材		実吐出量	理論吐出量	設定吐出量	
1	27.5~45.0	173	385~629	41.3~48.1	21	-	N	普通	-	20.3	16.7~43.7	-	20~45	5
2	27.0~45.0	170	378~630	42.2~47.1	-	45~55	N, HB	普通	-	8.5	11.5~40.8	-	20~50	6
3	25.0~50.0	160~177	354~640	42.2~43.7	18	55	N, 粒度調整	普通	-	38.7	15.7~44.4	-	20~40	7
4	21.0~46.0	160~170	225~648	42.2~52.5	18.5~21.5*	56.5~64.3*	N	普通	シリカ, 高炉	9.0~40.0	17.2~53.4	-	20~40	8
5	32.2~34.0	175	268~544	50.2	-	65	N, HB	普通	高炉	11.0	18.9~43.0	-	20~40	9
6	31.0	175	565	48.0	-	55	SFC	普通	-	6.3	19.3~28.7	22.2~32.7	20~30	10
7	31.5~42.0	165~175	417~524	48.2~50.8	-	50~70	HB	普通	-	12.5	13.4~44.0	-	-	11
8	30.0	170	567	42.3	16.5~21	-	N	普通	-	3.0	19.2~41.7	-	20~40	12
9	31.0~32.0	160~165	500~516	45.7~46.4	-	55	N, L	普通	-	6.3	15.0~37.4	20.0~49.9	20~50	13
10	50.9	184	361	46.2~50.2	21	-	N	軽量	-	45.0	17.4~51.2	-	-	14
11	25.0~49.0	166~173	339~630	37.5~47.2	15~21	50~60	N	普通	シリカ, 高炉	11.6	19.7~57.5	-	20~60	15
12	36.5~45.5	169~175	372~471	43.5~51.8	21.0~21.5*	66.3~66.3*	N	普通	-	71.8	30.3~49.2	35.3~53.5	30~50	3
14	56.0	176	315	51.3	20	-	不明	軽量	-	67.0~100.6	19.2~46.4	-	-	17

N：普通ポルトランドセメント，L：低熱ポルトランドセメント，HB：高ビーライトセメント，SFC：シリカフェームセメント，粒度調整：粒度調整セメント，シリカ：シリカフェーム，高炉：高炉スラグ

*：荷卸し地点の実測値

クリートの使用材料を限定せず検討することとした。

表 5.2.2 対象となるデータ数

スランプ ^a , スランプフロー の区分 (cm)	普通骨材				軽量骨材	
	20% \leq W/B \leq 30%	30% $<$ W/B \leq 45%	45% $<$ W/B \leq 65%	合計	45% $<$ W/B \leq 65%	合計
15 \leq SL $<$ 18	2	0	4	6	0	0
18 \leq SL $<$ 21	0	5	6	11	19	19
21 \leq SL	6	15	2	23	31	31
45 \leq SF $<$ 50	0	4	0	4	0	0
50 \leq SF $<$ 60	35	22	0	57	0	64
60 \leq SL	11	22	2	35	0	0
合計	54	68	14	136	50	114

(3) 吐出量の取扱い方法

吐出量は、4章と同様の理由により、実吐出量を用いることとした。なお、文献から実吐出量が読み取ることができないものについて、理論吐出量が記載されているものは機械効率を0.85と仮定して実吐出量を算定し、設定吐出量が記載されているものはそのままの値を実吐出量として用いることとした。

5.2.2 管内圧力損失に及ぼす各種要因

管内を流れるコンクリートの総流量 Q をせん断層流による流量 Q_B とすべりによる流量 Q_S の和で表すと、一般的に (5.2.2) 式のようになる。

$$Q = Q_B + Q_S \quad \dots (5.2.1) \text{ 式}$$

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \left(\frac{P}{L}\right) - \frac{\pi R^3 \tau_f}{3\eta} + \frac{2\pi \tau_f^4}{3\eta} \left(\frac{P}{L}\right)^3 + \pi R^2 v_s \quad \dots (5.2.2) \text{ 式}$$

ここに、 Q : 総流量 (m^3/h)、 Q_B : せん断層による流量 (m^3/h)、 Q_S : すべりによる流量 (m^3/h)、 R : 輸送管の半径 (m)、 P : 管内圧力 (Pa)、 L : 配管長さ (m)、 τ_f : 降伏値 (Pa)、 η : 塑性粘度 ($Pa \cdot s$)、 v_s : すべり速度 (m/h) である。

コンクリートが鉛直管を流れるとき、コンクリートの自重による負荷が加わるため、鉛直管の P/L は、水平管に比べて大きくなるといえる。すなわち、水平管と鉛直管を流れるコンクリートの流動特性が変化しており、 P/L が大きくなる鉛直管は、総流量 Q に対するせん断層流による流量 Q_B が水平管に比べて大きくなっていることが考えられる。故に、スランプが小さいコンクリートは、水平管において総流量のほとんどがすべりによる流量である場合においても、鉛直管においてせん断層による流量を伴いながら流動していることが考えられる。そこで、ここでは、コンクリートの流動性が鉛直管の管内圧力損失に及ぼす影響が大きいと考え、文献調査のデータをスランプおよびスランプフローに大別し検討することとした。

(1) 文献調査の結果とポンプ指針における算定方法の比較

前述のように、建築学会のポンプ指針¹⁾では、鉛直管の管内圧力損失（以降、 K_V という）を水平管の管内圧力損失（以降、 K_H という）にコンクリートの単位容積重量を加えて算定することになっており、土木ポンプ指針では、 K_V を K_H と水平換算係数（輸送管径 125A のとき、普通コンクリー

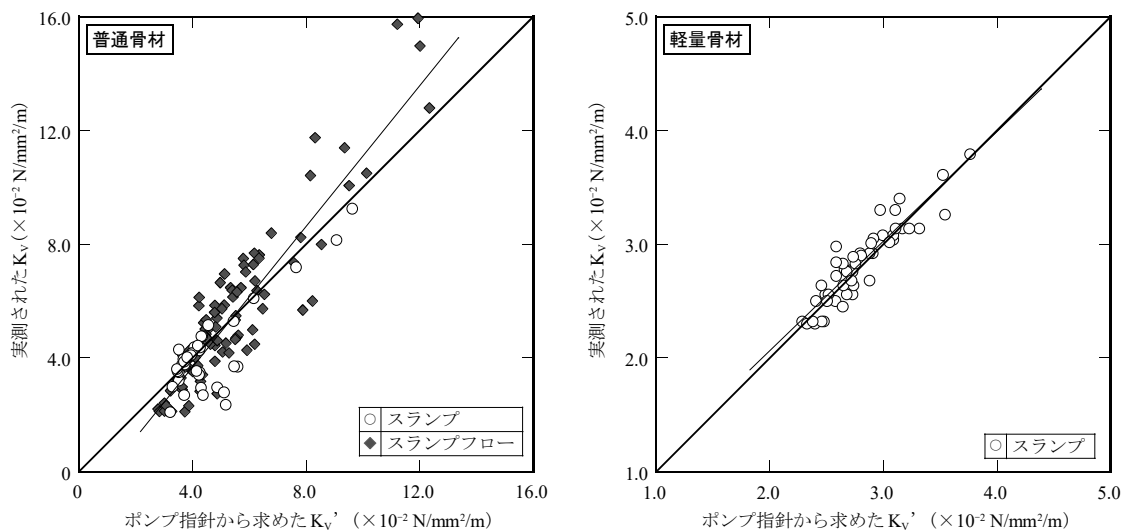


図 5.2.1 建築学会のポンプ指針から求めた K_V' と実測された K_V の関係

ト：4，軽量コンクリート：3）の積で算定することになっている。そこで、ここでは、建築学会¹⁾および土木学会²⁾のポンプ指針の算定方法により K_V （以降、ポンプ指針から求めた K_V' という）を求めた。

建築学会のポンプ指針から求めた K_V' と実測された K_V の関係を図 5.2.1 に示す。建築学会のポンプ指針から求めた K_V' と実測された K_V の関係は、 K_V が小さいとき建築学会のポンプ指針から求めた K_V' の方が大きくなる傾向を示し、 K_V が大きいとき実測された K_V の方が大きくなる傾向を示した。特に、この傾向は、軽量コンクリートのときに顕著な傾向を示している。また、実測された K_V が K_H とコンクリートの単位容積重量の和よりも大きくなる傾向は、和美らの報告⁴⁾と同様の傾向であり、現状の建築学会のポンプ指針における K_V の算定方法であると危険側に設定される可能性があることを示している。

土木学会のポンプ指針から求めた K_V' と実測された K_V の関係を図 5.2.2 に示す。土木学会のポンプ指針から求めた K_V' と実測された K_V の関係は、 K_V が小さいとき実測された K_V の方が大きくなる傾向を示し、 K_V が大きいとき土木学会のポンプ指針から求めた K_V' の方が大きくなる傾向を示した。これは、土木学会のポンプ指針の水平換算係数が十分な安全を見込んで設定されたものであるためである。そのため、両者の差は、大きいもので3倍を超えるものもあった。反対に、 K_V が小さいときに実測された K_V の方が大きくなる傾向は、 K_V を過小評価していることとなり、実務で土木学会のポンプ指針の算定方法を用いると危険側に設定されることになることを意味している。

このように、現状の建築学会および土木学会のポンプ指針の K_V の算定方法は、 K_V が危険側に算定される可能性があることや、反対に、過大に算定してしまい合理的に設定できていないことが考えられる。

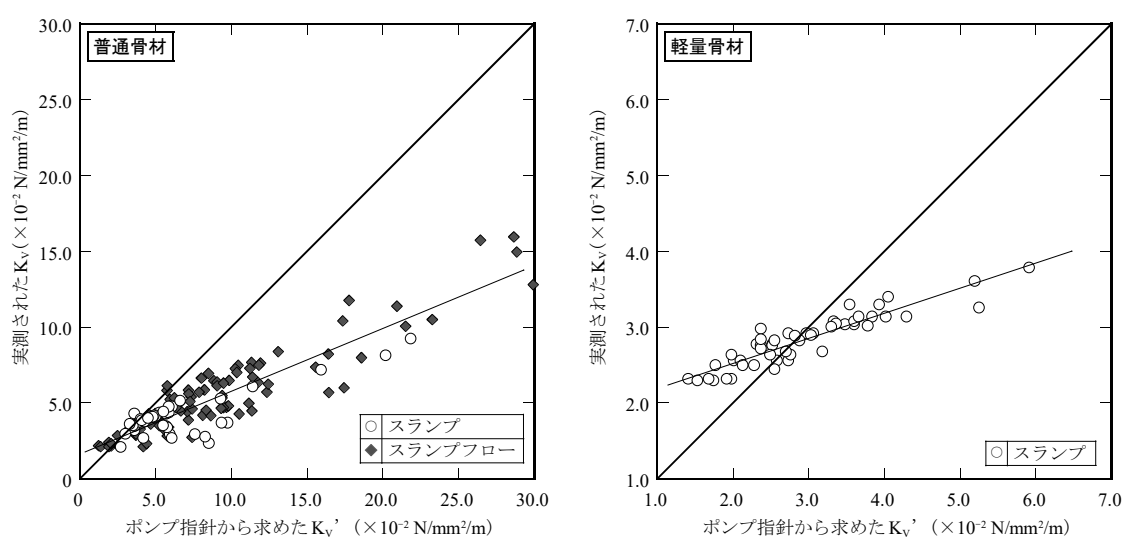


図 5.2.2 土木学会のポンプ指針から求めた K_V' と実測された K_V の関係

(2) 水平管と鉛直管の管内圧力損失の関係

実吐出量と管内圧力損失の関係を図 5.2.3 に示す。管内圧力損失は、実吐出量が大きくなると、水平管および鉛直管のいずれも大きくなる傾向を示した。また、管内圧力損失は、水セメント比の区分が小さくなると大きくなる傾向を示したものの、水セメント比の区分が小さくなるとそのばらつきが大きくなっている。

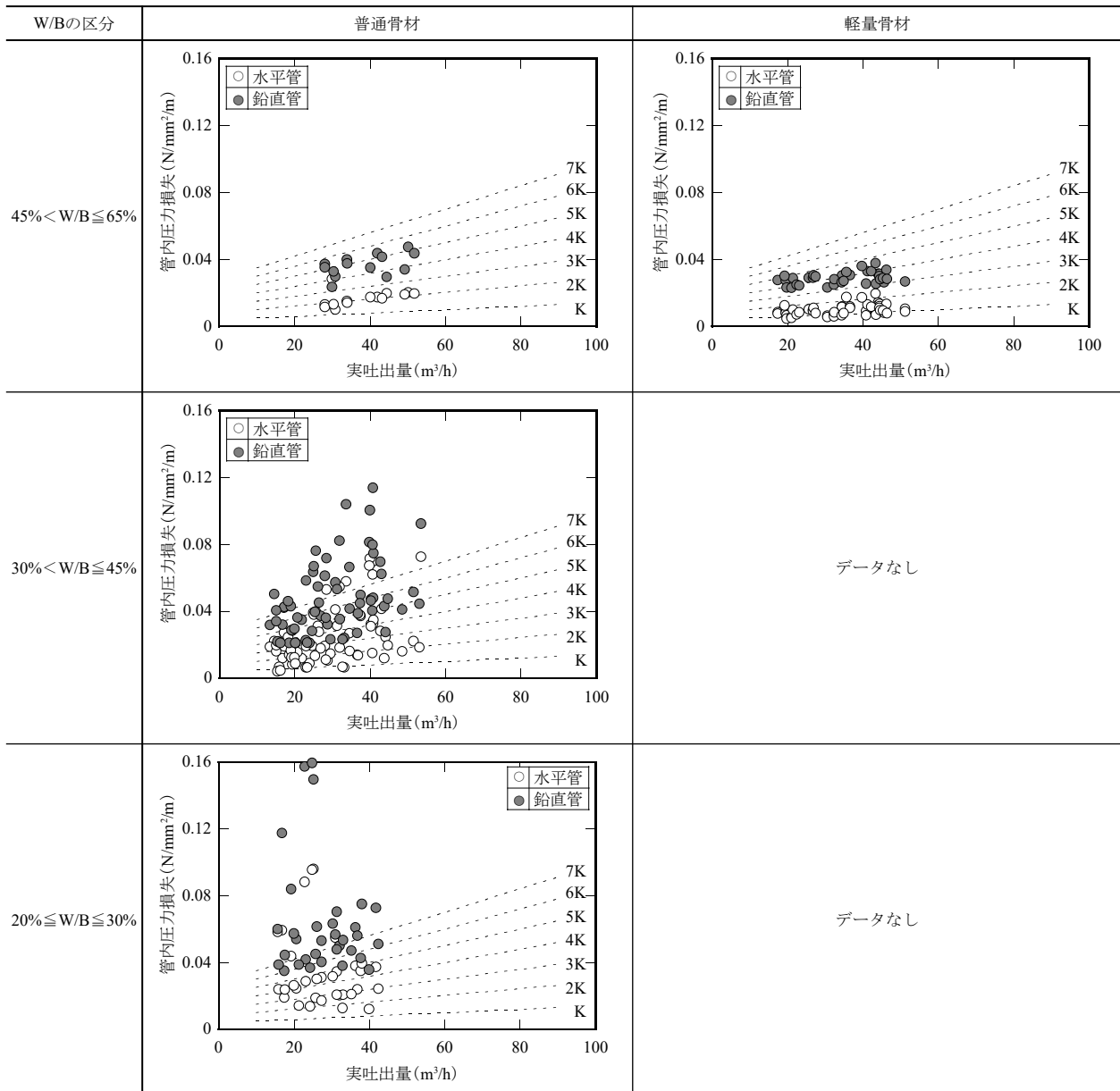


図 5.2.3 実吐出量と管内圧力損失の関係

実吐出量と K_V-K_H の関係を図 5.2.4 に示す。 K_V-K_H は、普通骨材および軽量骨材にかかわらず、実吐出量の違いによる明確な傾向は見られず、小高らのような⁶⁾ 吐出量に伴って K_V-K_H が大きくなるとする傾向は見られなかった。また、実吐出量と K_V-K_H の関係にスランプおよびスランプフローの違いによる影響は見られなかった。

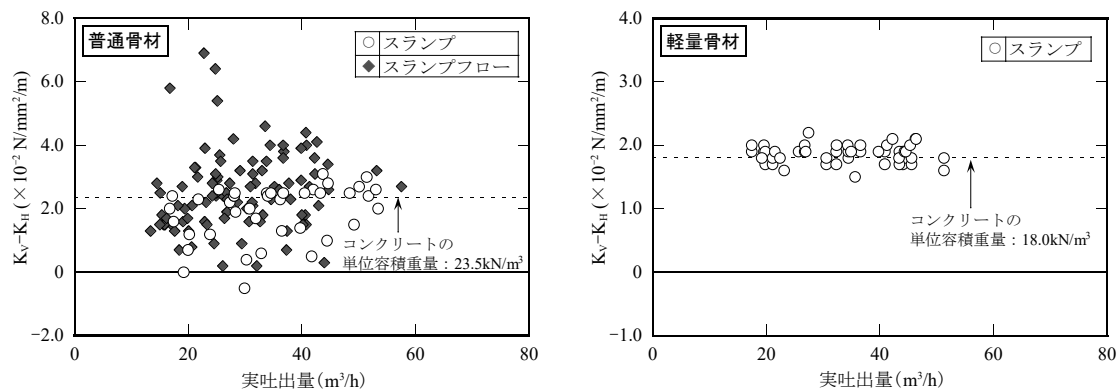


図 5.2.4 実吐出量と K_V-K_H の関係

実吐出量と K_V/K_L の関係を図 5.2.5 に示す。 K_V/K_L は、普通骨材および軽量骨材にかかわらず、実吐出量の違いによる明確な傾向は見られず、また、スランプおよびスランプフローの違いによる影響も見られなかった。

このように、実吐出量と K_V/K_L や K_V-K_H の関係からは、明確な傾向は読み取れなかった。既往の研究において、実吐出量と K_V/K_L や K_V-K_H の関係から K_H と K_V の関係を検討しているものが多いものの、本調査の結果を踏まえると、実吐出量から K_H と K_V の関係を検討することは困難であると考えられる。

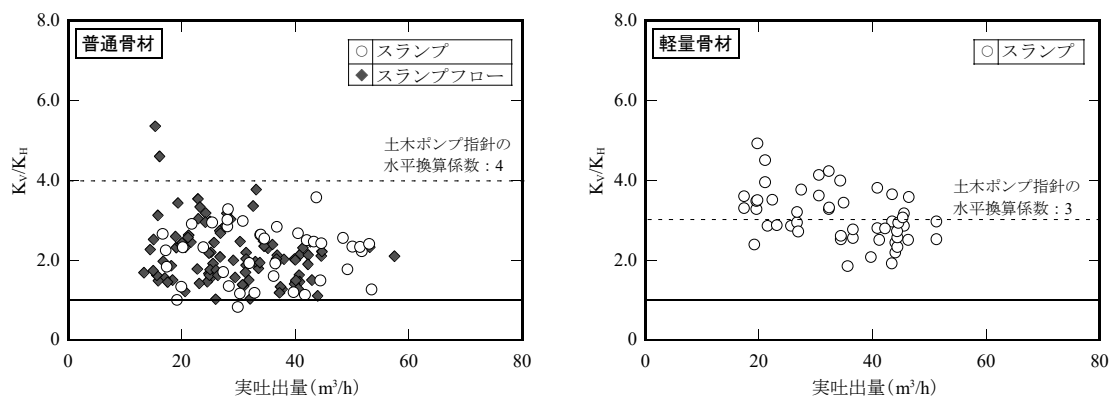


図 5.2.5 実吐出量と K_V/K_L の関係

K_H と K_V とコンクリートの単位容積重量の差（以降、 K_V-W という）の関係を図 5.2.6 に示す。 K_V-W は、普通骨材および軽量骨材のいずれも K_H が大きくなると概ね比例して大きくなる傾向を示したものの、スランブおよびスランブフローの違いが K_H と K_V-W の関係に及ぼす明確な傾向は見られなかった。また、 K_H と K_V-W の関係を K_V について解くと、普通骨材および軽量骨材はそれぞれ (5.2.3) 式および (5.2.4) 式となる。

普通骨材： $K_V = 1.07K_H + W$. . . (5.2.3) 式

軽量骨材： $K_V = 1.03K_H + W$. . . (5.2.4) 式

すなわち、 K_V が K_H にコンクリートの単位容積重量を加えたもので算定できるとする建築学会のポンプ指針の算定方法では危険となる可能性があることが読み取れる。また、十分に安全を見込んで K_V を算定する場合は、95% 上限信頼限界を割り増しした (5.2.5) 式および (5.2.6) 式から求めることが最適であると考えられる。

普通骨材： $K_V = 1.59K_H + W$. . . (5.2.5) 式

軽量骨材： $K_V = 1.24K_H + W$. . . (5.2.6) 式

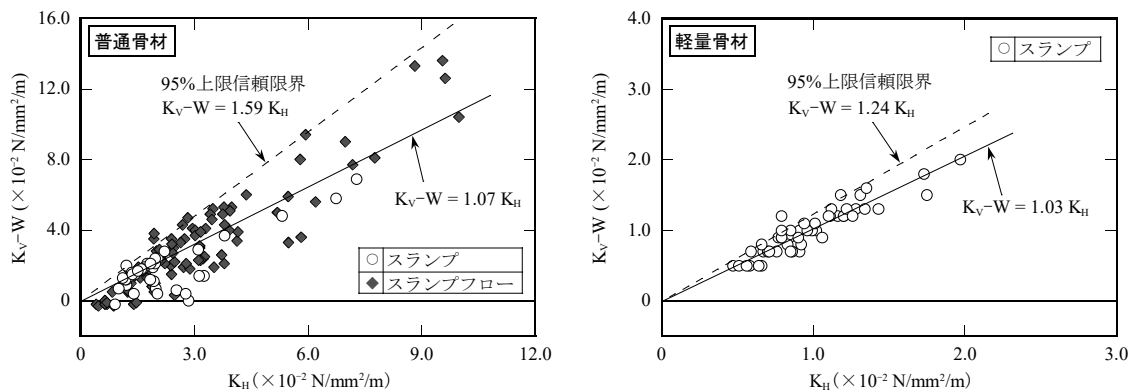


図 5.2.6 K_H と K_V-W の関係

なお、前述したように、水平管と鉛直管の流動特性の違いを考慮すると、 K_H と K_V の関係は、 W/B やスランブおよびスランブフローの違いによる影響が考えられる。しかし、本調査において、これらの違いによる明確な傾向は見られなかった。この理由の一つに、黒岩¹⁷⁾らの報告のような、 K_H の測定位置により数値が大きく異なるという理由が考えられる。すなわち、 K_H の測定位置により数値が異なるため、 K_H と K_V の関係も必然的に変わってくるというものである。このような報告を踏まえると、 K_H と K_V の関係に及ぼす影響は、コンクリートの単位容積重量、 W/B 、スランブおよびスランブフローなどの調査条件や使用材料の影響のみならず、配管条件の影響が大きいものと考えられる。しかしながら、本調査において、配管条件の違いが K_H と K_V の関係に及ぼす影響を検討するにはデータ数が乏しく、配管条件による影響について検討できていない。本調査結果は、配管条件の影響を包括した検討に留まっており、この点については、更なる検討が必要であるといえる。

5.3 圧送施工における鉛直管の管内圧力損失

前項 5.2 において、建築学会のポンプ指針¹⁾における K_v の算定方法では危険となる可能性があり、 K_v が K_H にコンクリートの単位容積重量を加えた値よりも大きくなる傾向を示した。そこで、ここでは、前項において明らかにした K_v の傾向の妥当性を検証するために、実施工における高所圧送時の管内圧力を測定し、文献調査の結果と比較した。

5.3.1 測定の概要

(1) 高所圧送の概要

配管条件を図 5.3.1 および図 5.3.2 に示す。測定した高所圧送の事例は、建物高さ 174.2m および 170.0m（以降、それぞれ高所圧送 I および高所圧送 II とする）の 2 事例であり、それぞれ 4 回ずつ測定を行った。また、いずれの工事も、施工階にディストリビュータが接続されている工事である。

試験および測定項目は、管内圧力およびフレッシュコンクリート試験としてスランプおよび空気量とした。管内圧力は、図 5.3.1 および図 5.3.2 に示す位置において、ダイヤフラム式圧力計を輸送管に取り付け測定した。なお、管内圧力の測定は、すべて輸送管径 125A (5B) において行っ

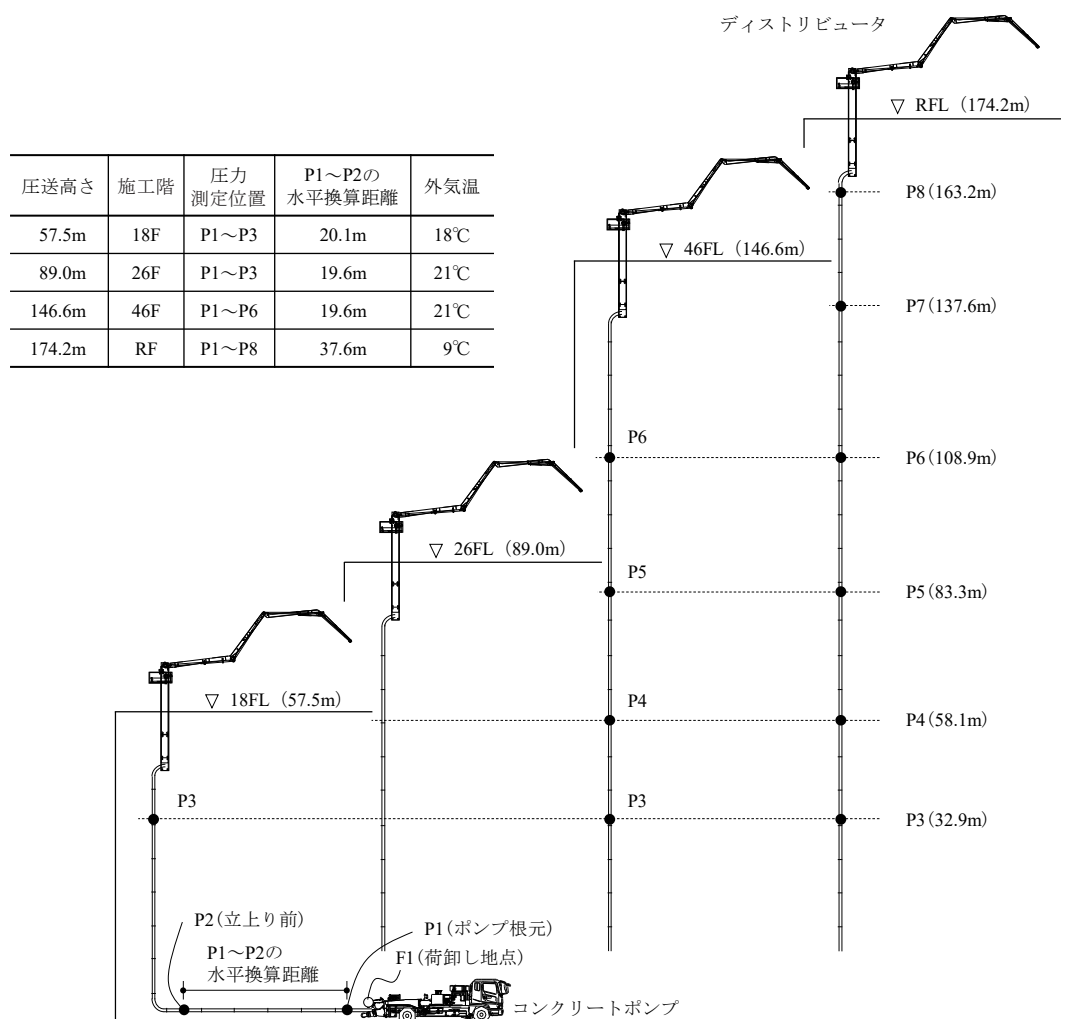


図 5.3.1 配管条件および測定位置（高所圧送 I）

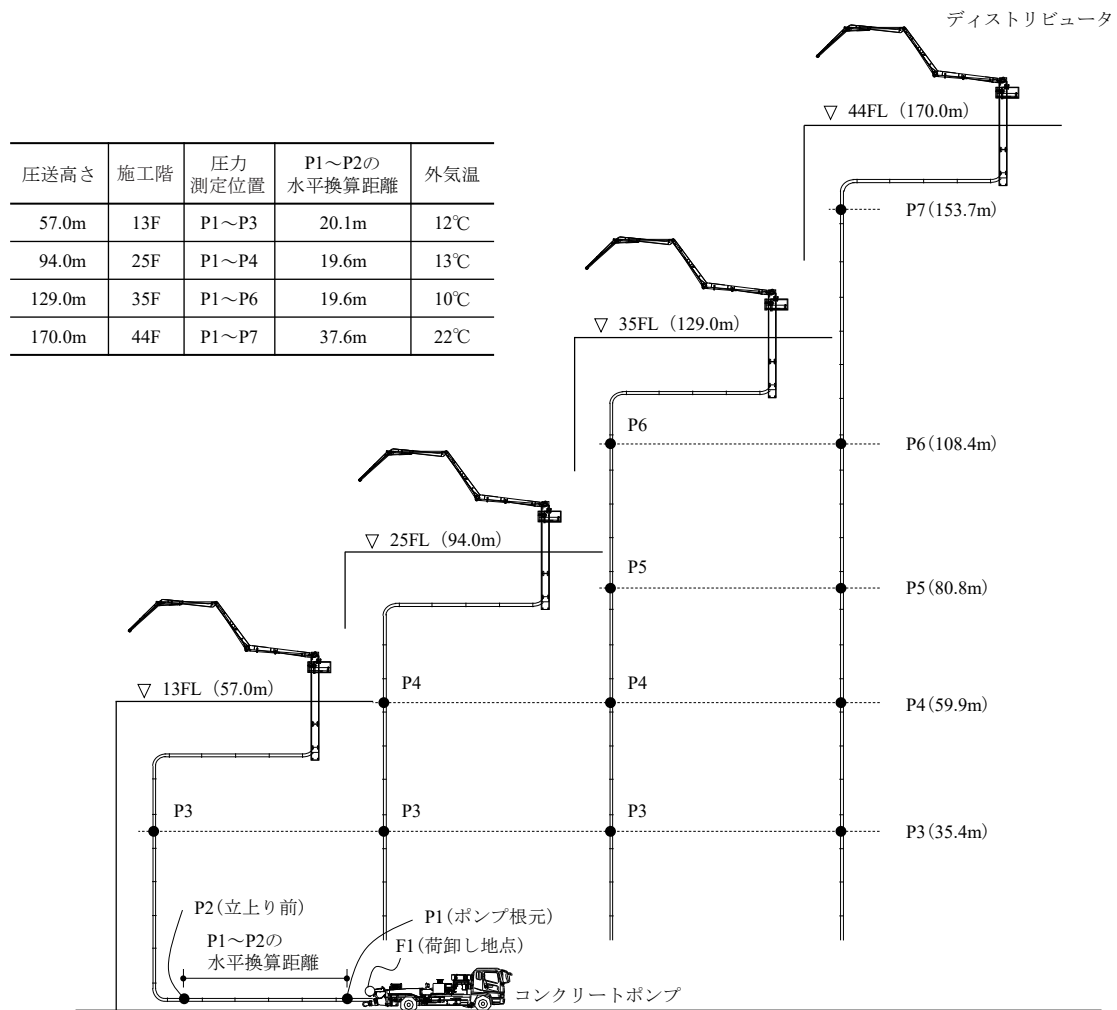


図 5.3.2 配管条件および測定位置（高所圧送Ⅱ）

た。また、水平部分である P1～P2 は、途中にベント管が含まれており、建築学会のポンプ指針¹⁾を参考に水平換算係数 3 として水平換算距離を求めた。スランプおよび空気量は、荷卸し地点（圧送前）および筒先（圧送後）において試料を採取し、試験を実施した。吐出量は、理論吐出量から機械効率を 0.85 と仮定し算定した実吐出量を用いている。

(2) コンクリートの調合および使用材料

コンクリートの調合を表 5.3.1 に示す。コンクリートの呼び強度は 33 ～ 62 の普通強度レベルから高強度レベルの範囲であり、水セメント比は 31.8 ～ 50.0% であった。荷卸し地点におけるスランブおよびスランブフローの目標値は、スランブが 18 ～ 23cm であり、スランブフローが 55cm であった。また、コンクリートの使用材料は、いずれのコンクリートも、細骨材および粗骨材が普通骨材であり、化学混和剤が高性能 AE 減水剤であった。

表 5.3.1 コンクリートの調合

事例	圧送高さ (m)	呼び強度	セメント の種類	SL, SF (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)			
							W	C	S	G
高所圧送 I	57.5	39	N	SL=18	42.6	47.0	170	399	812	940
	89.0	33	N	SL=21	50.0	49.5	175	348	870	912
	146.6	33	N	SL=21	50.0	49.5	175	350	870	912
	146.6	33	N	SL=21	50.0	49.5	175	350	849	928
高所圧送 II	57.0	62	M	SF=55	31.8	45.9	170	535	780	907
		40	N	SL=21	43.5	47.5	175	402	814	923
	94.0	60	M	SF=55	33.5	46.7	170	507	780	925
		42	N	SL=21	42.5	47.3	175	412	799	925
	129.0	57	M	SL=23	34.3	45.3	175	511	746	943
		40	N	SL=21	43.1	46.6	175	406	787	943
	170.0	48	M	SL=23	39.9	49.8	175	439	860	891

5.3.2 コンクリートの圧送前後の品質変化

圧送前後のスランプの変化を図5.3.3に示す。圧送後のスランプは、いずれのコンクリートも低下する傾向を示し、平均で-3.1cmであった。また、スランプの変化量は、圧送高さが高くなるほど大きくなる傾向を示し、特に、圧送高さ100m程度以上になると、ポンプ指針の限度を超えるものが多くなった。さらに、この傾向は、第3章で検討した圧送距離ごとのスランプの変化量の傾向と同様の傾向であった。これは、圧送高さが高くなるほど、コンクリートに加わる圧送圧力が大きくなることや、圧送により筒先から排出されるまでの時間が長くなることによるものと考えられる。

圧送前後の空気量の変化を図5.3.4に示す。圧送後の空気量は、増加する傾向を示し、平均で+0.4%であった。空気量の変化量は、一部ポンプ指針の限度を上回るデータはあったものの、概ね限度内で納まる傾向を示し、第3章の文献調査による傾向と同様に、圧送高さによる影響は見られなかった。

これらのことから、ある程度の圧送高さを超える場合（ここでは、100m程度）は、圧送によるスランプの低下を見込んで荷卸し地点のスランプを設定する必要があるといえる。

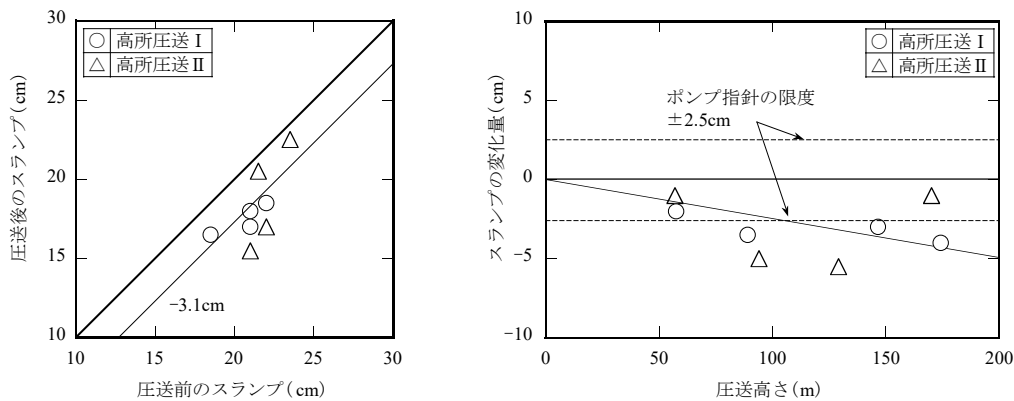


図 5.3.3 圧送前後のスランプの変化

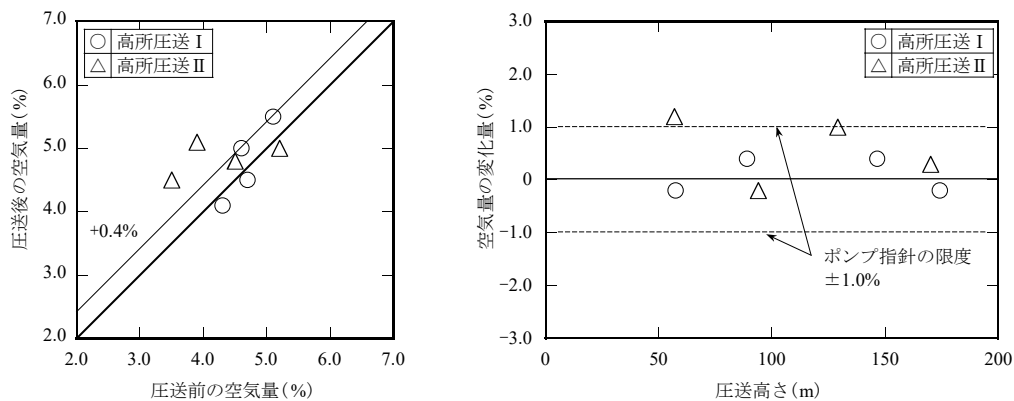


図 5.3.4 圧送前後の空気量の変化

5.3.3 管内圧力および管内圧力損失

水平換算距離と管内圧力の関係の一例（高所圧送Ⅰ）を図5.3.5に示す。管内圧力は筒先に近いほど小さくなり、実吐出量が大きいほど各測定点における管内圧力が大きくなった。また、圧送高さ174.2mにおいて、管内圧力は、P2～P3の圧力損失（勾配）が大きくなる結果であり、これは、P2の直後に立上りのベント管が接続されているため、ベント管による圧力損失とコンクリートの自重による影響していると考えられる。しかし、同様にP2の直後において立上りのベント管を接続している圧送高さ146.6mの管内圧力は、下引き配管（ポンプ根元から立上りまでの配管）が異なるものの、同様の傾向は見られなかった。鉛直管の管内圧力は、多少のばらつきはあるものの、概ね比例関係であることがわかり、他の測定結果も同様の結果であった。そこで、以降の管内圧力損失は、 K_H が水平部分のP1～P2から算定した値とし、 K_V が鉛直部分の最長となる2点（例えば、圧送高さ174.2mのときP3～P8、圧送高さ146.6mのときP3～P7）から算定した値とした。

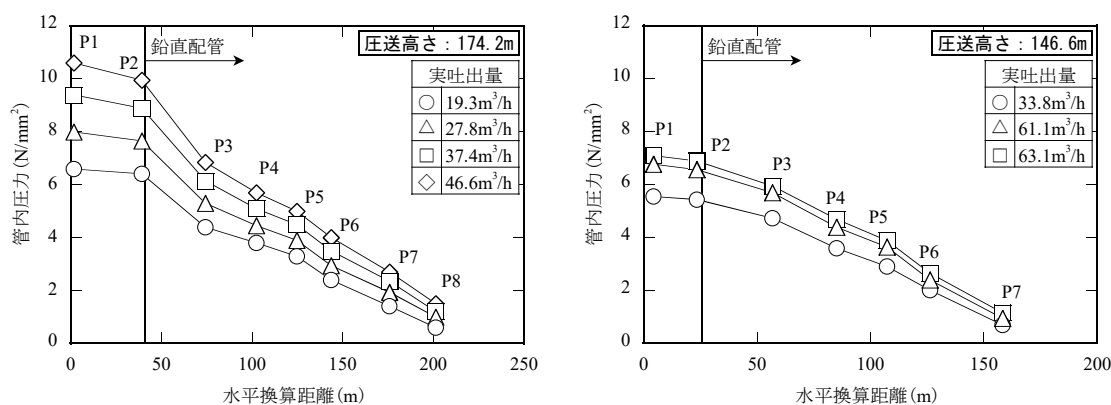


図 5.3.5 水平換算距離と管内圧力の関係の一例（高所圧送Ⅰ）

実吐出量と K_H および K_V の関係を図5.3.6に示す。なお、ここでは、表5.3.1に示すコンクリートの調合をW/C，スランプ，スランプリューおよびセメントの種類ごとに大別して示している。 K_H は、いずれのコンクリートもポンプ指針に示されているスランプ21cmにおける管内圧力損失の標準値（K値）に対して1～4倍（1～4K）程度以内であった。一方、 K_V は、一部を除いて4

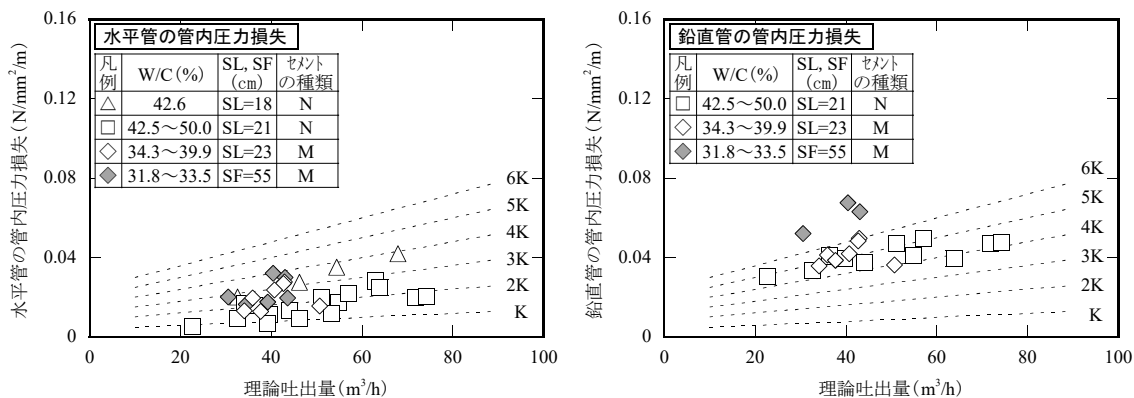


図 5.3.6 実吐出量と K_H および K_V の関係

～6K程度以内であったものの、コンクリートの調合の区分による違いは見られなかった。

実吐出量と K_V/K_L の関係を図 5.3.7 に示し、実吐出量と K_V-K_H の関係を図 5.3.8 に示す。なお、図中には、前項 4.3 において得られた普通骨材の結果も図示している。 K_V/K_L および K_V-K_H は、前項 4.3 の文献調査結果と同様に、実吐出量との関係に明確な傾向は見られず、一部の結果において、建築学会および土木学会から求めた K_V よりも大きくなる傾向を示している。

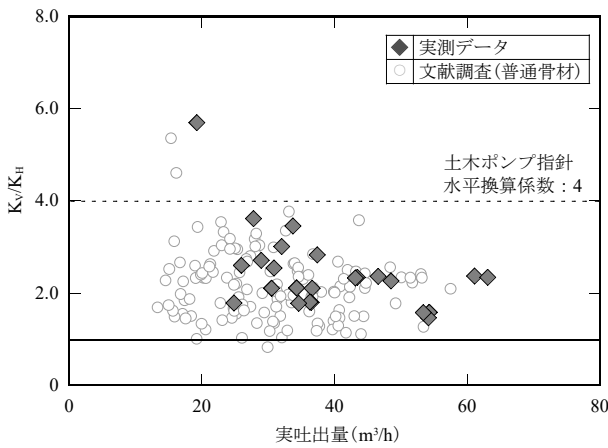


図 5.3.7 実吐出量と K_V/K_L の関係

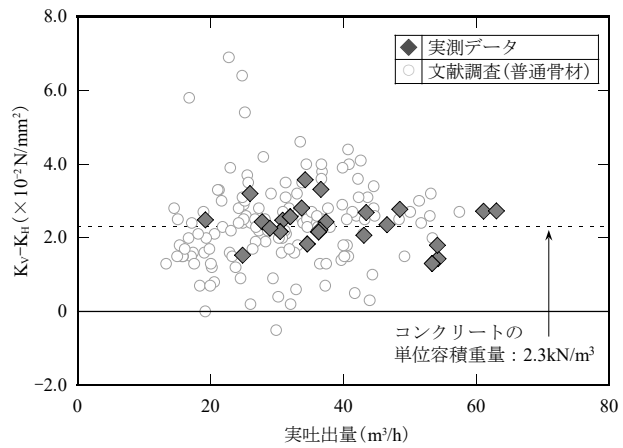


図 5.3.8 実吐出量と K_V-K_H の関係

K_H と K_V-W の関係を図 5.3.9 に示す。なお、図中には、前項 5.3 において得られた関係式および 95% 上限信頼限界を示している。測定で得られた K_V-W は、 K_H が大きくなるほど大きくなる傾向を示し、文献調査による傾向と概ね一致している。また、測定で得られた K_V-W は、95% 上限信頼限界以内であり、95% 上限信頼限界を見込んで K_V を算定すれば安全に評価できるといえる。

95% 上限信頼限界の関係式から K_V (以降、関係式から求めた K_V とする) を算定し、実測された K_V との比較を図 5.3.10 に示す。また、測定結果および文献調査結果の全データを含めて、ポ

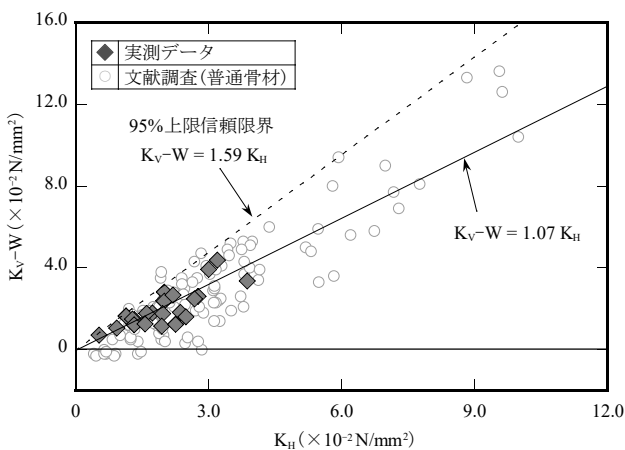


図 5.3.9 K_H と K_V-W の関係

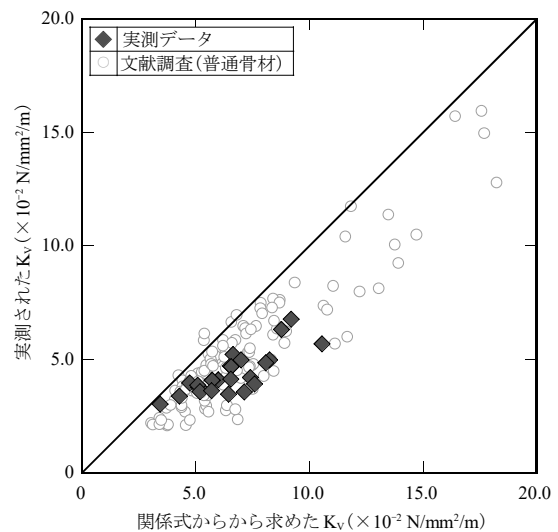


図 5.3.10 関係式から求めた K_V と実測された K_V の関係

ンプ指針から求めた K_V および関係式から求めた K_V のそれぞれについて実測された K_V からの偏差を図 5.3.11 に示す。関係式から求めた K_V は、過大に算定してしまうデータも含まれるものの、概ね安全に評価できているといえる。また、実測された K_V からの偏差は、ポンプ指針から求めた K_V が危険側（マイナス側）に多く算定されてしまうのに対して、関係式から求めた K_V は僅かに危険側に算定されるものはあるものの、十分に安全側に算定できているといえる。

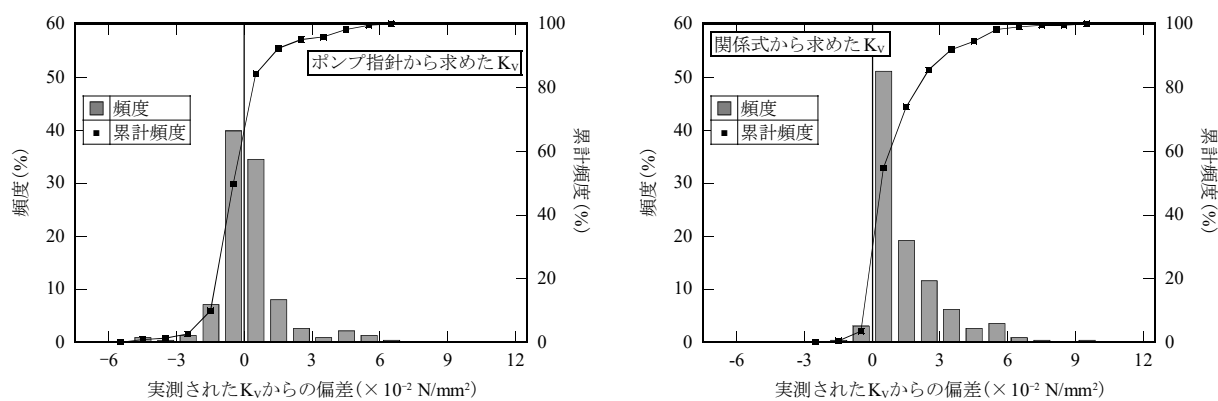


図 5.3.11 実測された K_V からの偏差

5.4 まとめ

コンクリートポンプ工法における鉛直管の管内圧力損失を明らかにするために、鉛直管において管内圧力損失を測定している文献を調査し、水平管と鉛直管の管内圧力損失の関係について検討した。また、文献調査により得られた鉛直管の管内圧力損失の傾向を2現場において実測した結果と比較した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 建築学会のポンプ指針における鉛直管の管内圧力損失の算定方法は、実測値よりも小さく算定されることが多く、危険側に算定される可能性があることが示唆された。一方、土木学会のポンプ指針における鉛直管の算定方法は、安全を見込んで設定されているため、一部のデータにおいて、過大に算定される可能性があることが示唆された。
- (2) 既往の研究において、実吐出量と水平管と鉛直管の管内圧力損失の比や差で検討しているものが多いものの、包括的に見ると、明確な傾向は見られなかった。
- (3) コンクリートの使用材料や調合条件が鉛直管の管内圧力損失に及ぼす明確な傾向は見られず、この理由の一つに配管条件の影響が示唆された。
- (4) 鉛直管の管内圧力損失は、水平管の管内圧力損失が大きくなると大きくなる傾向を示し、普通骨材のとき水平管の管内圧力損失の1.59倍に、軽量骨材のとき水平管の管内圧力損失の1.24倍にコンクリートの単位容積重量を加えて算定すると、安全に算定できることが示唆された。

5.5 圧送計画における鉛直管の管内圧力損失の合理化に関する検討

建築工事において、圧送高さが 100m を超えるような圧送施工は日常的に行われている。ポンプ指針では、圧送負荷の算定式として (5.5.1) 式を示しており、鉛直管の管内圧力損失は、水平管の管内圧力損失にコンクリートの単位容積重量を加えたもので表される。この算定方法は、水平管と鉛直管の管内流動が同一であるとする考えが基となっている。

$$P = K (L+3B+2T+2F) + WH \times 10^{-3} \quad \dots (5.5.1) \text{ 式}$$

ここに、P：コンクリートポンプに加わる圧送負荷 (N/mm²)、K：管内圧力損失 (N/mm²/m)、L：直管の長さ (m)、B：ベント管の長さ (m)、T：テーパ管の長さ (m)、F：フレキシブルホースの長さ (m)、W：コンクリートの単位容積重量 (kN/m³)、H：圧送高さ (m) である。

しかし、本章において水平管と鉛直管の管内圧力損失の関係を検討すると、実測の鉛直管の管内圧力損失がポンプ指針の算定よりも大きくなる傾向を示し、普通骨材のコンクリートのとき水平管の管内圧力損失の約 1.0 ～ 1.59 倍に、軽量骨材のコンクリートのとき水平管の管内圧力損失の約 1.0 ～ 1.24 倍にコンクリートの単位容積重量を加えた値に近似する傾向が明らかとなった。そこで、第2章で抽出した (4) 圧送負荷の算定方法に関する問題点に対して、ここでは、圧送計画における鉛直管の管内圧力損失を合理化するために、鉛直方向の圧送を含む圧送負荷の算定方法として (5.5.2) 式を提案する。

$$P = K (L+3B+2T+2F+\alpha H) + WH \times 10^{-3} \quad \dots (5.5.2) \text{ 式}$$

ここに、P：コンクリートポンプに加わる圧送負荷 (N/mm²)、K：管内圧力損失 (N/mm²/m)、L：直管の長さ (m)、B：ベント管の長さ (m)、T：テーパ管の長さ (m)、F：フレキシブルホースの長さ (m)、 α ：鉛直方向の圧送にかかる圧力係数、H：圧送高さ (m)、W：コンクリートの単位容積質量 (t/m³) に重力加速度 (9.8m/s²) を乗じたもの (kN/m³) である。なお、鉛直方向の圧送にかかる圧力係数 α は、圧送実績や信頼できる資料に基づき設定し、これらの資料がない場合は普通骨材のとき 0.6、軽量骨材のとき 0.3 とする。この算定方法は、図 5.5.1 に示すように、ポンプ指針の算定方法において危険側に算定されてしまうデータについても概ね安全側に評価できるものである。

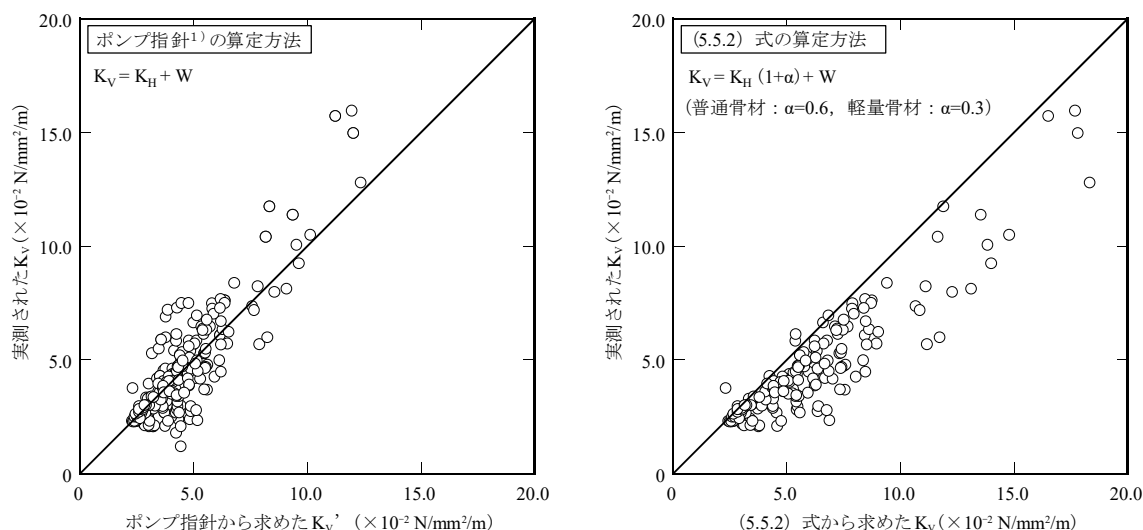


図 5.5.1 鉛直管の管内圧力損失の算定値と実測値の比較

【第5章の参考文献】

- 1) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009.2
- 2) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針[2012年版]，2012.6
- 3) 西田朗，黒田泰弘，木村博，山崎庸行：高強度コンクリートのポンプ圧送性評価，日本建築学会大会学術講演会，pp.523-524，1999.9
- 4) 和美広喜，金子宏，安田稔：スランプロス低減型高性能減水剤を用いた高強度コンクリートのポンプ圧送性，日本建築学会大会学術講演会，pp.759-760，1986.10
- 5) 木村建治，清水昭之，本間敏明，梅津裕二，榊田佳寛，阿部道彦，崎山和隆，島垣利久：高強度コンクリートの品質と施工性に関する実験的研究 その1 ポンプ圧送性，日本建築学会大会学術講演会，pp.545-546，1990.10
- 6) 小高茂央，和美廣喜，桜本文敏，鈴木清孝，柳田克己：高強度コンクリートのポンプ圧送実験 その2 圧力損失および流動特性値との関係，日本建築学会大会学術講演会，pp.261-262，1994.9
- 7) 小谷野秀雄，西村進，中津川康，今川信夫，古賀一八，大倉真人： $F_c600\text{kgf/cm}^2$ 超高強度コンクリートの施工実験 その1 ポンプ圧送実験，日本建築学会大会学術講演会，pp.263-264，1994.9
- 8) 梶田秀幸，岸谷孝一，江口清，中込昭，寺西浩司：粘性の高いコンクリートにおけるポンプ圧送時の管内圧力損失の推定，日本建築学会大会学術講演会，pp.939-940，1995.8
- 9) 平弘毅，芝池達司，梶山毅，住学，前岡俊昭，興梠博巳，岡本親欣：高強度高流動コンクリートのCFT構造柱への適用に関する研究 その4 コンクリートの強度特性およびポンプ圧送実験結果，日本建築学会大会学術講演会，pp.169-170，1996.9
- 10) 唐沢智之，上嶋忠孝，和知俊興，杉本正樹，花田稔夫：高強度コンクリート ($F_c=60\text{N/mm}^2$) を用いたCFT柱の圧入施工実験 その1 ポンプ圧送実験，日本建築学会大会学術講演会，pp.867-868，1998.9
- 11) 柳田淳一，荒川玄，中根博：高層鉄筋コンクリート構工法の実大施工実験（高強度コンクリートのポンプ圧送性および品質変化），日本建築学会大会学術講演会，pp.949-950，2000.9
- 12) 池木誠，坂野宏行，鈴木澄江，三谷高豊，小野嗣修，阿部道彦，馬場武志：低発熱形セメントを用いた高強度コンクリートの実用化に関する実験研究 その5 ポンプ圧送性の検討，日本建築学会大会学術講演会，pp.1083-1084，2002.8
- 13) 全振煥，藤森啓祐，富岡一則，藤木英一：石炭灰をリサイクルした人工軽量骨材コンクリートのポンプ圧送性，日本建築学会大会学術講演会，pp.81-84，2004.8
- 14) 和美廣喜，桜本文敏，柳田克己：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，第466号，pp.11-20，1994.12
- 15) 佐原晴也，竹下治之，庄司芳之，尾上修：高流動コンクリートの高所圧送実験，コンクリート工学年次論文集，No.16，Vol.1，pp.225-230，1994

- 16) 松尾忠, 鬼塚雅嗣, 嶋村喜吉: 軽量コンクリート高所圧送における圧送性と品質変化に関する考察, 第8回コンクリート工学年次論文集, pp.897-900, 1996
- 17) 黒岩秀介, 早川光敬, 渡辺健治, 陣内浩: 鋼管充填用高強度コンクリートのポンプ圧送性および充填性, コンクリート工学年次論文集, No.18, Vol.1, pp.261-266, 1996

第6章 合理的手法に基づくコンクリートポンプ 工法の圧送計画の提案

第6章 合理的手法に基づくコンクリートポンプ工法の圧送計画の提案

6.1 本章の目的

コンクリートポンプによる施工を安全かつ円滑に行うためには、綿密な圧送計画を立案することが必要不可欠である。圧送計画は、予定されたコンクリート数量を計画された時間内で打込みを完了させることが基本となるが、コンクリートポンプに加わる圧送負荷をなるべく小さくすることや圧送によるコンクリートの品質変化をなるべく少なくすることも十分に配慮する必要がある。わが国では、コンクリートポンプが用いられるようになって以降、これまでに多くの圧送実績が蓄積され、当時に比べて、圧送技能者の経験が豊富になり、さらに、コンクリートポンプの性能が向上してきた。このため、綿密な圧送計画を立案せずに圧送施工が行えるようになり、施工会社や圧送業者にとって、圧送計画の重要性が希薄になってきていることは否めない。

一方、建築で用いられているコンクリートは、1990年頃に普及され始めた高性能AE減水剤の使用によって、少ない単位水量で高い流動性を得られるようになり、近年は、高強度コンクリートや高流動コンクリートが主流となってきている。さらに、コンクリート工事は、建築物の高層化により高所圧送などの高度の技術を必要とする工事が多くなりつつある。しかしながら、現在のポンプ指針の圧送計画を構成する基本的な概念は、1970年代の圧送実験や施工報告を基にして作成されたもの¹⁾であり、使用されるコンクリートや施工条件の変化によって圧送工事に求められる技術が1970年代に比べて高度になってきているにもかかわらず、圧送計画は現在まで特段の変更がなされていないのが現状である。さらに、近年、閉塞などのコンクリートポンプに係わるトラブルが頻繁に発生していることを踏まえると、従来の圧送計画の立案方法を見直す必要があるといえる。

本研究では、このような背景から、これまでの圧送実験や施工報告で報告された圧送前後のコンクリートの品質変化や水平管および鉛直管の管内圧力損失について調査・検討してきた。第3章では、圧送前後のコンクリートの品質変化の傾向を化学混和剤の種類および圧送距離の区分ごとに分類し、圧送距離が長いほど品質変化が大きいことやAE減水剤コンクリートに比べて高性能AE減水剤コンクリートの方が圧送による品質変化が大きいことを明らかにした。また、第4章および第5章では、水平管における直管、ベント管および鉛直管の管内圧力損失に及ぼす調合条件や圧送条件の影響を検討し、調合条件ごとの管内圧力損失の標準値や実態に即した圧送負荷の算定方法を明らかにした。本章では、これらの結果を統合し、現在の圧送施工において頻繁に発生している閉塞などのトラブルの低減を目的とした圧送計画の合理的手法について示している。なお、本章では、コンクリートポンプによる施工を安全かつ円滑に行うための計画手法を合理的手法として捉え、ここに示す合理的手法に基づく圧送計画の中核は、従来、発注者の判断に委ねられていたコンクリートの選定を圧送計画に取り入れることや、1970年代以降、特段の変更がなされていなかった管内圧力損失の標準値および圧送負荷の算定方法を適切な標準値や算定方法に改正している点である。

6.2 圧送計画の合理的手法の提案

6.2.1 合理的手法の検討項目

ポンプ指針²⁾におけるポンプ機種・台数の決定フローを図6.2.1に示し、本章において検討した合理的手法に基づく圧送計画のフローを図6.2.2に示す。本章では、第2章で抽出したコンクリートポンプ工法に関する4項目の問題点に対して、それぞれ次のように合理的手法を検討した。

(1) 圧送計画の立案方法

従来 of 圧送計画において、コンクリートポンプの機種の選定を省略することができた一般的なコンクリートかつ一般的な施工の範囲においても、簡易的に理論吐出圧力やコンクリートポンプの機種を選定できる計算図表を、第3章、第4章および第5章の結果に基づいて作成し、圧送計画に取り入れることとした。

(2) 圧送前後の品質変化の標準値

実施工において、一般的には考慮されていない圧送によるコンクリートのスランプおよびスランプフローの低下を、第3章の結果を踏まえて、圧送距離に応じたコンクリートの品質の選定を圧送計画に取り入れることとした。

(3) 管内圧力損失の標準値

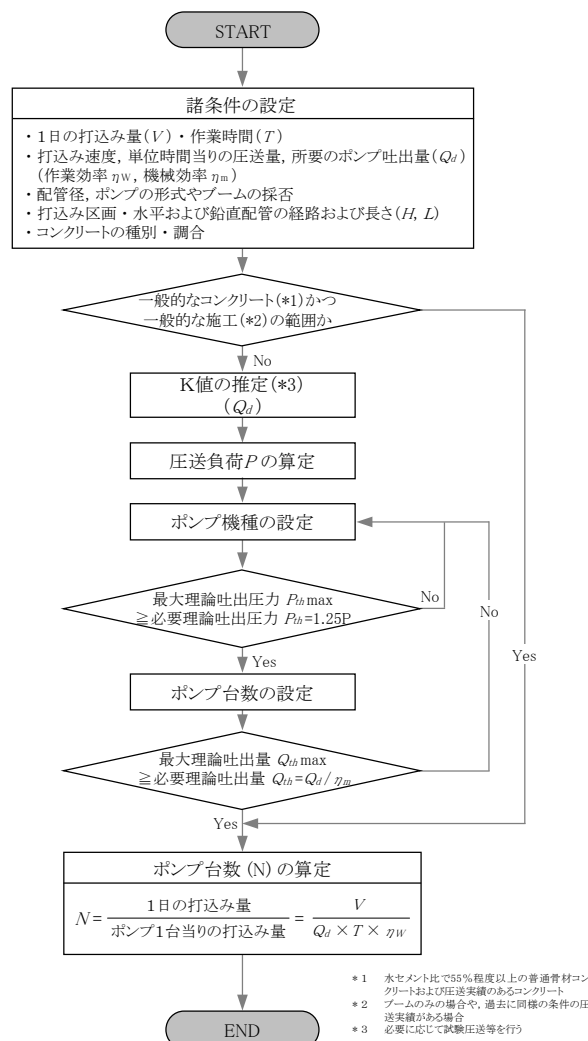


図 6.2.1 ポンプ機種・台数の決定フロー²⁾

ポンプ指針に示されている管内圧力損失の標準値が近年の建築工事で使用されているコンクリートに十分対応しているとは言い難いため、第4章の結果を踏まえて、近年のコンクリートに対応した管内圧力損失の標準値を圧送計画に取り入れることとした。

(4) 圧送負荷の算定方法

ポンプ指針²⁾の圧送負荷の算定方法がコンクリートの種類や圧送条件によっては危険側に算定されてしまう可能性があるため、第4章および第5章の結果を踏まえて、安全を見込んだ圧送負荷の算定方法を圧送計画に取り入れることとした。

次項 6.2.2 において、上記の項目を取り入れた合理的手法に基づく圧送計画を提案している。

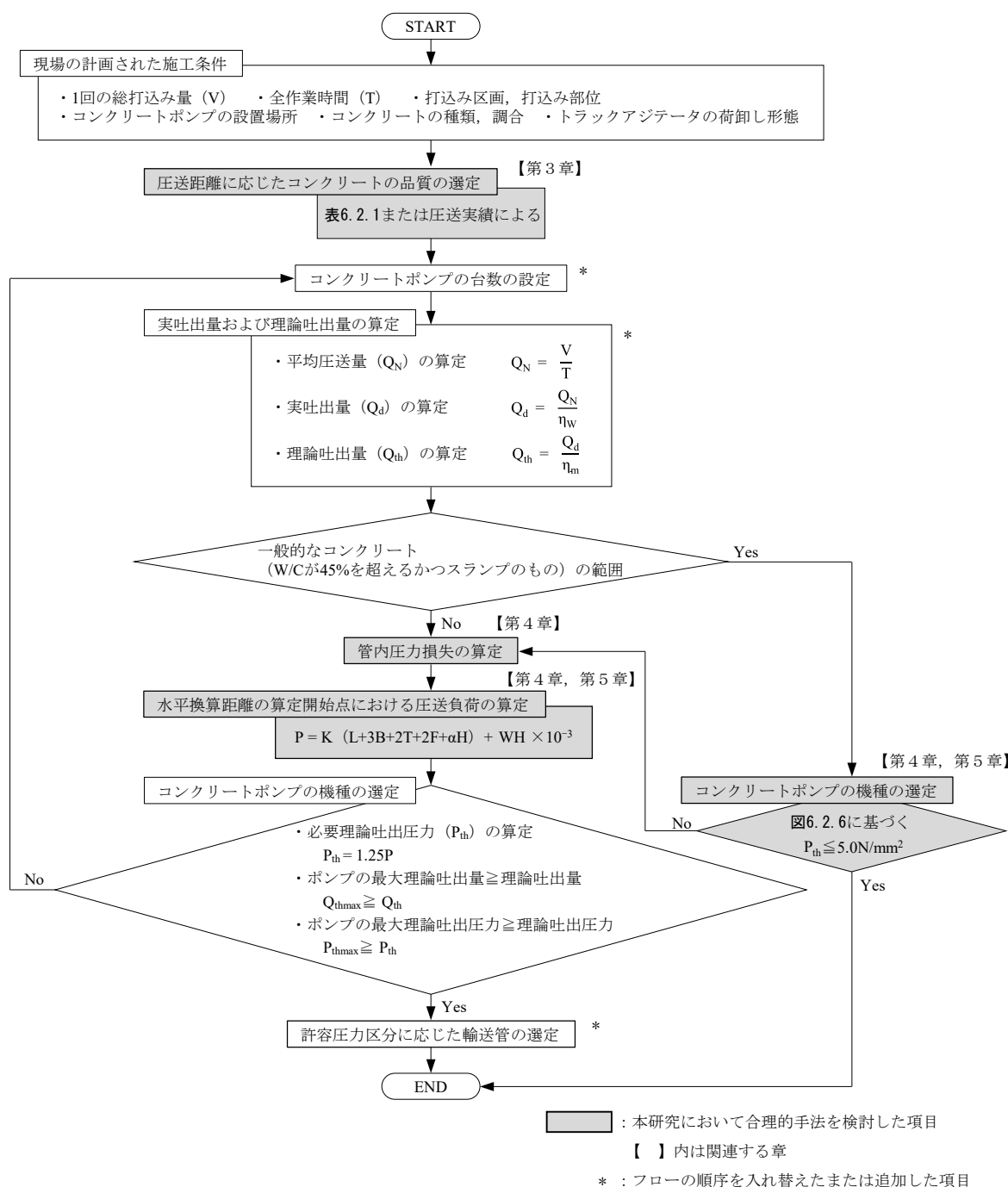


図 6.2.2 合理的手法に基づく圧送計画のフロー

6.2.2 コンクリートポンプ工法における圧送計画の合理的手法の提案

本章で示す圧送計画のフローは、現場で計画された施工条件からコンクリートポンプに加わる圧送負荷を算定し、コンクリートポンプの機種を選定までのフローを示したものである。なお、この圧送計画の基本的な概念は、ポンプ指針²⁾における圧送計画を踏襲したものであり、加えて、本論文の第3章、第4章および第5章において検討した圧送によるコンクリートの品質変化や水平管、鉛直管およびベント管の管内圧力損失の傾向を取り入れ、コンクリートポンプ工法における施工をより円滑かつ安全に遂行できる合理的手法に基づく圧送計画を取りまとめたものである。

(1) 圧送距離に応じたコンクリートの品質の選定

コンクリートの品質は、圧送による品質変化を見込んで選定することとし、圧送によるスランプおよびスランプフローの変化は、圧送実績や信頼できる資料または表 6.2.1 に示す低下量から定める。

圧送距離 150m 以上となる場合は、原則として、スランプおよびスランプフローの選定を 1 ランク上に変更するなどの対策を講じる。

表 6.2.1 圧送距離に応じたスランプおよびスランプフローの低下量

圧送距離	スランプの低下量 (cm)		スランプフローの低下量 (cm)
	AE減水剤	高性能AE減水剤	
50m未満	0	0	0
50m以上 150m未満	1.0	1.5	5.0
150m以上 300m未満	2.0	2.5	10.0
その他	圧送実績または信頼できる資料による		

注1) 日平均気温が25℃を超える場合、上記の値にスランプは1.0cmを加え、スランプフローは2.5cmを加える

注2) 圧送距離が150m以上の場合、原則として、スランプ、スランプフローの選定を1ランク上に変更するなどの対策を講じる

コンクリートのスランプおよびスランプフローは、打込み箇所において、コンクリート構造物の品質と締固め方法などの施工条件に応じて選定する必要がある。コンクリートポンプを用いてコンクリートを圧送すると、スランプおよびスランプフローは低下する傾向にあるものの、実施工において、スランプおよびスランプフローの圧送による変化は一般的に考慮されていないのが現状である。圧送によってコンクリートの品質変化、特にスランプおよびスランプフローの低下量が大きくなると、施工性が低下するだけでなく、閉塞を起こす危険性やコンクリート構造物の不具合に繋がる可能性がある。このような背景を鑑みて、本章の合理的手法に基づく圧送計画では、圧送によるスランプおよびスランプフローの低下を考慮するものとした。

圧送によるコンクリートの品質変化は、圧送距離、外気温およびコンクリートの調合などの圧送条件に大きく左右される。そのため、これらの条件を見込んで荷卸し地点の品質を設定することが必要となる。ここでは、第3章の研究結果およびガイドライン³⁾の圧送条件に応じたスラン

プ低下の標準値を踏まえて、圧送距離に応じたスランプおよびスランプフローの低下量を表 6.2.1 のように設定した。また、標準期および暑中期に圧送実験を実施した福島らの報告⁴⁾によると、圧送によるスランプの低下量は、圧送前のコンクリート温度が高いと大きくなる傾向を示している。この傾向は、コンクリートの調合条件などによって異なるものの、暑中期における圧送後のスランプの低下量は、標準期に比べて概ね 1～3cm 程度大きい結果であった。そこで、ここでは、ガイドライン³⁾の圧送条件に応じたスランプ低下の標準値および福島らの報告⁴⁾を踏まえて、スランプおよびスランプフローの低下量に日平均気温による割り増しを行うこととし、日平均気温が 25℃を超える場合、表 6.2.1 に示す値にスランプは 1.0cm を加え、スランプフローは 2.5cm を加えることとした。さらに、圧送実績や信頼できる資料がある場合はこの限りではないが、圧送距離が 150m 以上となる場合は、原則としてスランプおよびスランプフローの選定を 1 ランク上に変更するなどの対策を講ずることとした。

圧送前後のスランプおよびスランプフローの変化は、この他にも様々な影響を受け、圧送前のスランプおよびスランプフローが小さいほど圧送後の低下量が大きくなる傾向を示すことが第 3 章の調査結果から明らかとなった。また、スランプおよびスランプフローが時間の経過に伴い低下することは周知の事実であり、このように圧送後のスランプおよびスランプフローの低下量が大きくなる場合が考えられる場合には、圧送条件や使用するコンクリートの品質によって適切なスランプおよびスランプフローを選定することが望ましい。

(2) コンクリートポンプの台数の設定

コンクリートポンプの台数は、1 日の打込み量と作業時間に基づきを設定する。ただし、コンクリートポンプ 1 台あたりの 1 日の打込み量の上限は、250m³ を目安とする。

コンクリートポンプの台数は、施工する建物の規模・形状、コンクリートの供給能力、作業時間などから 1 日の打込み量や工区分けを決定する段階で考慮されていることが一般的である。ここでは、現場の計画された施工条件と想定される圧送負荷や作業時間を照らし合わせて、計画通りの施工が困難な場合にコンクリートポンプの台数を見直す必要がある。コンクリートポンプ 1 台あたりの 1 日の打込み量の上限は、これまでの施工実績や建築工事における締固め作業を踏まえると 250m³ を目安とするとよい。さらに、コンクリートを打ち込む部材ごとの一般的な圧送速度は、概ね表 6.2.2 の範囲であり、コンクリートポンプの台数を見直す際の参考にとよいと考えられる。また、高強度コンクリートや高流動コンクリートなどは、普通コンクリートに比べてコンクリートの練り混ぜに多くの時間を要する場合がある。中田らの調査⁵⁾によると、高強度コンクリートの練混ぜ時間は、使用材料によって多少の違いがあるものの、おおよそ 3～4 分であり、コンクリートを 2 回練り混ぜて 1 台のトラックアジテータに積載し出荷するレディーミクストコンクリート工場の場合は、最大でも 20～30m³/h 程度の出荷が限度となる。このような場合の圧送速度は、打ち込む部材や作業時間などの影響よりもコンクリートの製造能力に大きく左

右されるため、予め製造能力を踏まえた圧送速度の設定が重要となるといえる。

表 6.2.2 1時間あたりの圧送速度の目安

部 位	1時間あたりの圧送速度
スラブのみ	25~50m ³ /h
一般躯体	20~45m ³ /h
基 礎	20~40m ³ /h

(3) 実吐出量および理論吐出量の算定

コンクリートポンプ1台あたりの1日の打込み量，作業時間，作業効率および機械効率から下記の(6.2.1)式～(6.2.3)式により平均圧送量，実吐出量および理論吐出量を算定する。なお，作業効率および機械効率は，圧送実績や信頼できる資料に基づいて設定し，これらの資料がない場合，表6.2.3および表6.2.4から定める。

$$Q_N = \frac{V}{T} \quad \dots (6.2.1) \text{ 式}$$

$$Q_d = \frac{Q_N}{\eta_w} \quad \dots (6.2.2) \text{ 式}$$

$$Q_{th} = \frac{Q_d}{\eta_m} \quad \dots (6.2.3) \text{ 式}$$

ここに、 Q_N ：平均圧送量 (m³/h)， V ：コンクリートポンプ1台あたりの1日の打込み量 (m³)， T ：作業時間 (h)， Q_d ：実吐出量 (m³/h)， η_w ：作業効率， Q_{th} ：理論吐出量 (m³/h)， η_m ：機械効率

表 6.2.3 作業効率 (η_w)

対象	部 位	トラックアジテータ 1台付	トラックアジテータ 2台付
建 築 構 造 物	土間	0.55	0.85
	一般躯体	0.50	0.75
	基礎および梁	0.45	0.65
	逆打	0.40	0.40

表 6.2.4 機械効率 (η_m)

コンクリートの種類	スランブ	スランブフロー	ピストン式 ポンプ	スクイズ式 ポンプ
普通コンクリート	8 cm	/	0.65	—
	12 cm		0.70	0.75
	15 cm		0.75	0.80
	18 cm		0.85	0.85
	21 cm		0.90	0.90
軽量コンクリート	12 cm	/	0.50	0.70
	15 cm		0.70	0.80
	18 cm		0.80	0.85
	21 cm		0.85	0.90
高流動・高強度 コンクリート	/	55 cm	0.85	/
		60 cm	0.90	
		65 cm	0.90	

圧送負荷を算定する上で重要となる平均圧送量，実吐出量および理論吐出量は、(6.2.2) 式～(6.2.3) 式より算定することができ、平均圧送量，実吐出量および理論吐出量は、**図 6.2.3** に示すような関係にある。ポンプ指針²⁾では、機械効率を**表 6.2.5** のように示しているものの、スランブの区分ごとに機械効率の数値にある程度の範囲で示されているために、圧送計画を立案する上でどの数値を用いれば良いか不明瞭であった。機械効率について、これまでに統一的に取りまとめた報告はないものの、一般的にスランブやスランブフローが大きくなるほど機械効率が大きくなることは経験的にわかっている。そこで、ここでは、圧送計画に用い易いように、機械効率をポンプ指針²⁾ やこれまでの研究報告⁶⁾ から**表 6.2.3** のように設定した。ただし、機械効率は、スランブおよびスランブフローのみならず圧送速度（吐出量）やコンクリートの粘性にも大きく影響を受け、吐出量が小さいときやコンクリートの粘性が過大となる時は機械効率が著しく低下することが懸念されるため、機械効率は、可能な限り圧送実績や信頼できる資料に基づいて設定する。

表 6.2.5 コンクリートポンプの機械効率²⁾

骨材の種類	スランブ (cm)	ピストン式	スクイーズ式
普通骨材	12～17	0.70～0.90	0.75～0.90
	18～21	0.85～0.90	0.85～0.90
軽量骨材	18～20	0.50～0.75	0.70～0.80
	21～23	0.80～0.85	0.85～0.90

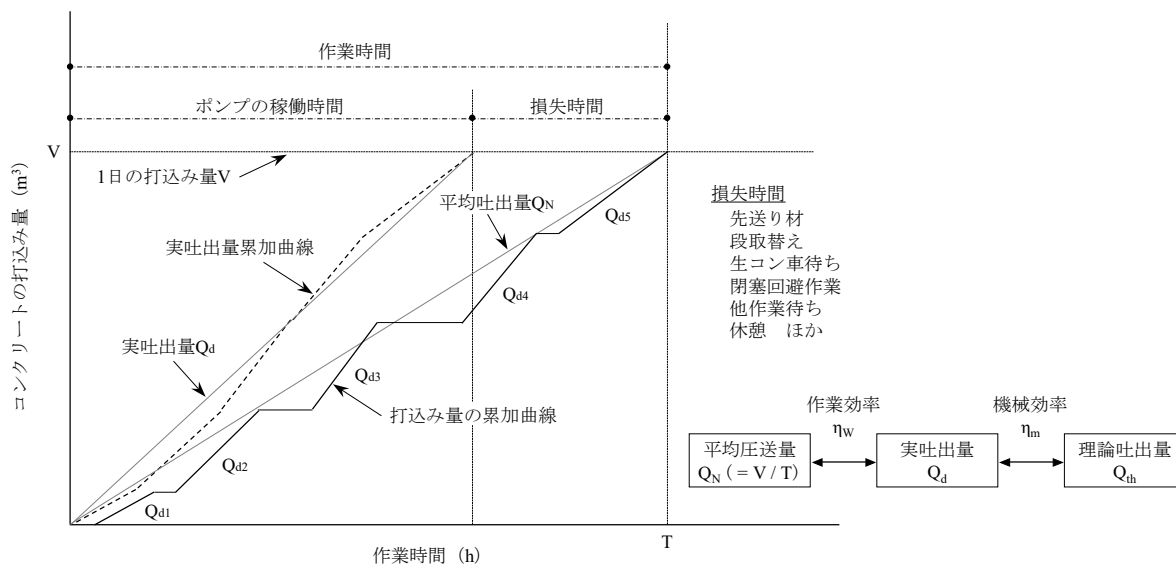


図 6.2.3 平均圧送量，実吐出量および理論吐出量の関係²⁾に加筆修正

(4) 圧送条件による分類

圧送するコンクリートが水セメント比 45% を超えかつスランブの一般的なコンクリートである場合は、**図 6.2.6** の計算図表からコンクリートポンプの機種を選定することができる。

コンクリートポンプ工法は、現在のコンクリート工事においてなくてはならないものであり、そ

れに伴い、圧送実績も十分蓄積されてきたといえる。そのため、ここでは、一般的なコンクリートの範囲であれば、次項に示す計算図表からコンクリートポンプの機種を選定できることとした。

ポンプ指針²⁾では、一般的なコンクリートを「水セメント比で55%程度以上の普通骨材コンクリートおよび圧送実績のあるコンクリート」とし、一般的な施工を「ブームのみの場合や、過去に同様の条件の圧送実績がある場合」としている。本章の圧送計画の合理的手法では、水セメント比45%を超えるコンクリートの管内圧力損失が概ね推定できることを踏まえて、一般的なコンクリートを「水セメント比45%を超えかつスランプの一般的なコンクリート」とし、その範囲を拡げることとした。

また、ポンプ指針では、一般的なコンクリートかつ一般的な施工の範囲であれば、管内圧力損失および圧送負荷の算定に加えて、コンクリートポンプの機種を選定の過程も省略できるとしている。しかし、第1章に示したアンケート結果によると、圧送計画を立案せずに生じたトラブルの中に、「ポンプの能力不足」や「吐出量の不足」のような、圧送負荷の算定やコンクリートポンプの機種を選定などを的確に行っていれば防ぐことができたと思われるトラブルが少なからず発生していることがわかる。このような背景を踏まえると、コンクリートポンプの機種を選定は、一般的なコンクリートおよび一般的な施工においても円滑な圧送施工を行うために必要不可欠であると考えられ、本章で示す合理的手法に基づく圧送計画のフローでは、一般的なコンクリートかつ一般的な施工の範囲であってもコンクリートポンプの機種を選定を行うこととした。この圧送計画のフローでは、簡易にコンクリートポンプの機種を選定できる計算図表を取り入れており、詳細については(7)コンクリートポンプの機種を選定にて後述する。

(5) 管内圧力損失の算定

水平管 1m 当りの管内圧力損失は、コンクリートの種類、実吐出量および輸送管径に応じて算定する。水セメント比が 45% を超える普通コンクリートの管内圧力損失は、表 6.2.6 に示す関係式から算定することができ、その他のコンクリートは圧送実績や信頼できる資料に基づいて算定する。

表 6.2.6 水セメント 45% を超える普通コンクリートの管内圧力損失の標準値

輸送管径	スランプ	管内圧力損失の関係式
100A (4B)	12cm	$K = (0.187 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
	15cm	$K = (0.166 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
	18cm	$K = (0.154 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
	21cm	$K = (0.131 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
125A (5B)	12cm	$K = (0.096 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	15cm	$K = (0.085 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	18cm	$K = (0.079 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	21cm	$K = (0.067 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$

管内圧力損失は、コンクリートの種類や実吐出量，輸送管径に加えて、スランプ，配管条件，外気温などの様々な要因に影響を受けることがわかっている。ここでは、第4章の研究結果を基に、

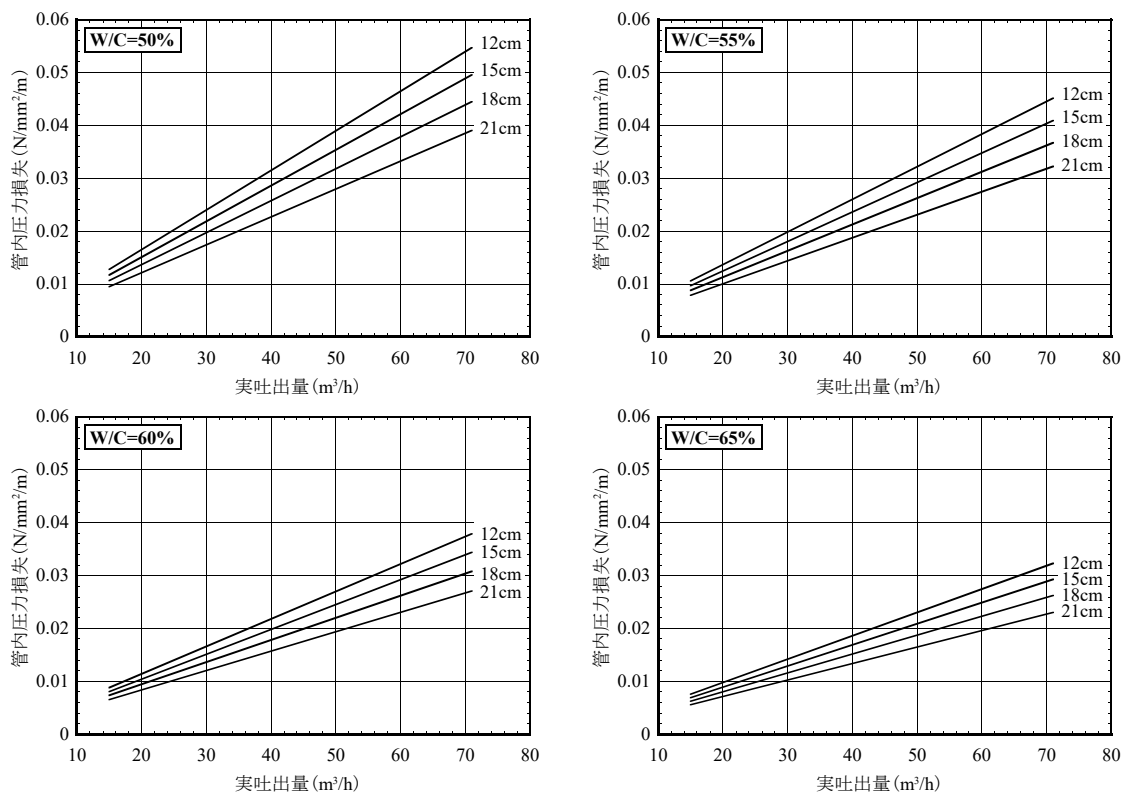


図 6.2.4 実吐出量と管内圧力損失の関係 (100A)

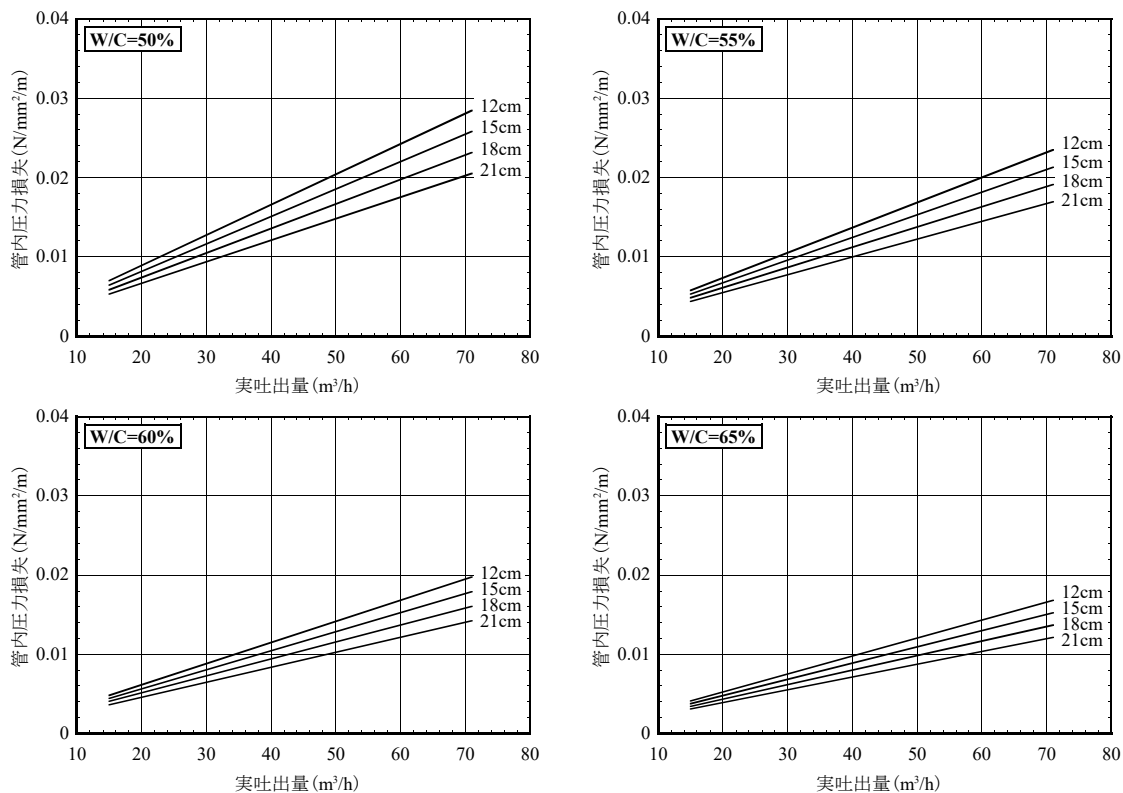


図 6.2.5 実吐出量と管内圧力損失の関係 (125A)

水セメント比 45% を超えるコンクリートの管内圧力損失の標準値を表 6.2.6 のように示した。なお、第4章の検討では輸送管径 125A (5B) の管内圧力損失を対象としたものの、ここでは、管内を流動するコンクリートの力の釣り合いから 100A (4B) の管内圧力損失の標準値についても示している。また、表 6.2.6 に示す管内圧力損失の標準値を図示すると図 6.2.4 および図 6.2.5 のようになる。

一方、近年多用されるようになった高強度コンクリートや高流動コンクリートは、調合条件や使用材料などの僅かな変化により管内圧力損失が大きく異なり、管内圧力損失を標準化することは困難である。そのため、高強度コンクリートや高流動コンクリートを圧送する場合には、これまでに同様の施工を行った実績がある場合を除き、試験圧送により実施工に応じた管内圧力損失を把握するか信頼できる資料に基づいて算定することが望ましいといえる。なお、これまでに行われた輸送管径 125A (5B) で普通骨材および普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの圧送実験結果を包括的に取りまとめた結果、管内圧力損失について表 6.2.7 に示す関係式が得られている。高強度コンクリートで用いられることの多い低熱ポルトランドセメントやシリカフェームを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたものに比べて管内圧力損失が小さくなる傾向を示す^(例えば7), 8)。そのため、表 6.2.7 に示す関係式は、高強度コンクリートを用いる試験圧送のときのおおよその参考値として利用できると考えられる。

表 6.2.7 水セメント比 45% 以下の管内圧力損失の参考値

スランブ スランブフロー	単位水量 (kg/m ³)	管内圧力損失の関係式
スランブ	160 ≤ W < 165	$K = (0.135 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	165 ≤ W < 170	$K = (0.102 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$ *
	170 ≤ W < 175	$K = (0.083 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	175 ≤ W ≤ 185	$K = (0.079 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
スランブフロー	165 ≤ W < 170	$K = (0.071 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$
	170 ≤ W < 175	$K = (0.066 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$
	175 ≤ W ≤ 185	$K = (0.064 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$ *

* : その他のデータから補間して求めた数値

(6) 水平換算距離の算定開始点における圧送負荷の算定

コンクリートポンプに加わる圧送負荷は(6.2.3)式を用いて算定する。

$$P = K (L+3B+2T+2F+\alpha H) + WH \times 10^{-3} \quad \dots (6.2.3) \text{ 式}$$

ここに、P：コンクリートポンプに加わる圧送負荷 (N/mm²)，K：管内圧力損失 (N/mm²/m)，L：直管の長さ (m)，B：ベント管の長さ (m)，T：テーパ管の長さ (m)，F：フレキシブルホースの長さ (m)， α ：鉛直方向の圧送にかかる圧力係数，H：圧送高さ (m)，W：コンクリートの単位容積質量 (t/m³) に重力加速度 (9.8m/s²) を乗じたもの (kN/m³) である。なお、鉛直方向の圧送にかかる圧力係数 α は、圧送実績や信頼できる資料に基づき設定し、これらの資料がない場合は普通骨材のとき 0.6、軽量骨材のとき 0.3 とする。

コンクリートポンプに加わる圧送負荷は、従来から使用されてきた(6.2.3)式で概ね算定できることが経験的にわかっている。しかし、近年、建築工事において一般的に施工されるようになった高所への圧送の場合、管内圧力損失と水平換算距離の積にコンクリートのヘッド(自重)を加えた値よりも著しく大きくなることが多く報告^{例えば⁹⁾}されている。実際の圧送負荷が想定よりも大きくなる場合は、計画していた打込み速度(吐出量)が確保できなくなることや、最悪の場合、コンクリートポンプの能力不足により圧送不可に陥る可能性があり、特に圧送負荷が大きくなる高所圧送の場合に注意が必要である。そこで、ここでは、第5章における鉛直管の管内圧力損失の傾向を踏まえて、安全率を見込んだ(6.2.3)式により算定することを推奨する。また、鉛直方向の圧送にかかる圧力係数 α は、圧送実績や信頼できる資料に基づき設定し、これらの資料がない場合は普通骨材のとき 0.6、軽量骨材のとき 0.3 とした。

ベント管の管内圧力損失は、第4章に示したように、水平管の管内圧力損失に水平換算係数(3)を乗じた値を超える可能性が約半数あるものの、ベント管の水平換算係数を小さく見込んだ場合においても、圧送負荷が著しく大きくなる訳ではない。しかし、ベント管の設置数が多くなる場合は、水平換算係数を大きく見込んで設定するなどの対策が必要となり、必要に応じてベント管の水平換算係数を6として、圧送負荷を算定するとよいと考えられる。

(7) コンクリートポンプの機種を選定

コンクリートポンプの機種は、圧送条件の検討によって求められた圧送負荷と実吐出量に基づいて、(6.2.5) 式および (6.2.6) 式を満足するものを選定する。

- ・必要理論吐出圧力 (P_{th}) の算定

$$P_{th} = 1.25 P \quad \dots (6.2.4) \text{ 式}$$

- ・ポンプの最大理論吐出量 \geq 理論吐出量

$$Q_{thmax} \geq Q_{th} \quad \dots (6.2.5) \text{ 式}$$

- ・ポンプの最大理論吐出圧力 \geq 理論吐出圧力

$$P_{thmax} \geq P_{th} \quad \dots (6.2.6) \text{ 式}$$

ここに、 P_{th} ：必要理論吐出圧力 (N/mm^2)， P ：圧送負荷 (N/mm^2)， Q_{thmax} ：ポンプの最大理論吐出量 (m^3/h)， Q_{th} ：必要理論吐出量 (m^3/h)， P_{thmax} ：ポンプの最大理論吐出圧力 (N/mm^2) である。

一般的なコンクリートの場合は、図 6.2.6 から算定できる。ただし、図 6.2.6 を用いて算定された理論吐出圧力が $5.0N/mm^2$ を超える場合には、(5) 管内圧力損失の算定および (6) 圧送負荷の算定を行う。

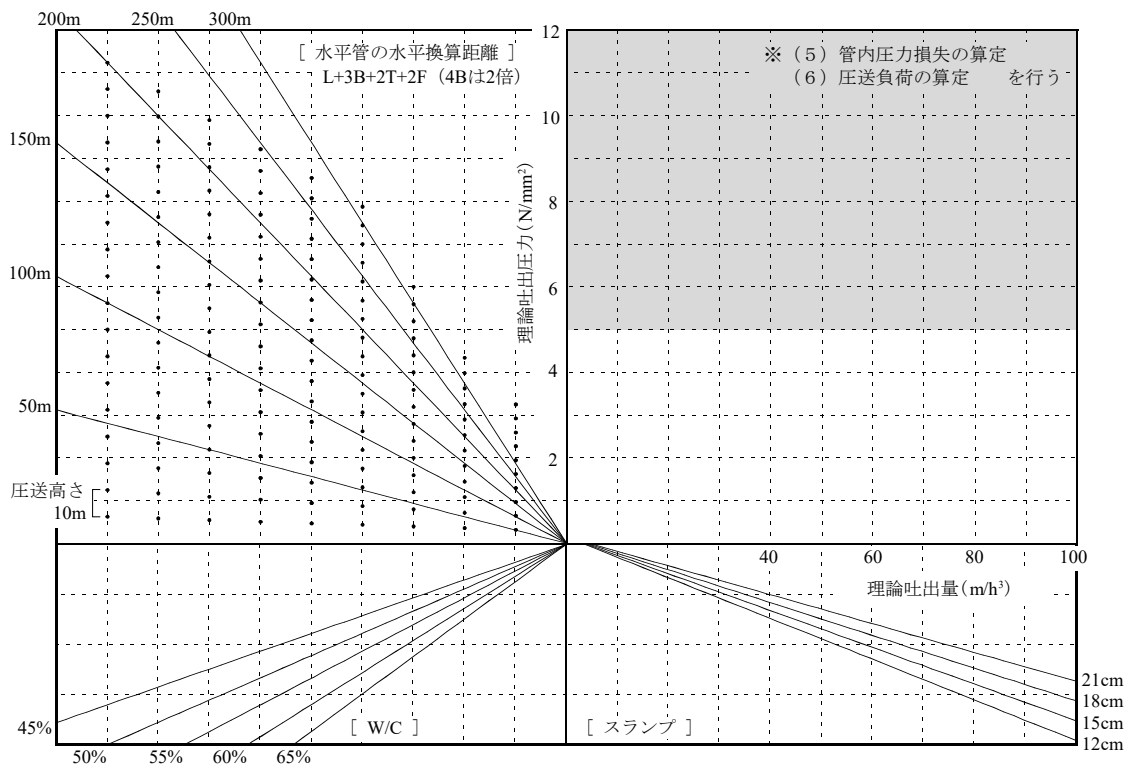


図 6.2.6 コンクリートポンプの機種を選定図

コンクリートポンプの機種を選定は、コンクリートポンプの性能線図 (P-Q 線図) と (6.2.5) 式および (6.2.6) 式で得られた理論吐出量および理論吐出圧力を照らし合わせて、十分な性能を有することを確認する。

ガイドライン³⁾には、簡易的な圧送負荷の算定方法として、図 6.2.7 に示すような粗骨材の最大寸法と水セメント比に応じた圧送負荷算定図が示されている。ここでは、ガイドライン³⁾の圧送負荷算定図を参考に、第4章の水平管の管内圧力損失および第5章の鉛直管の管内圧力損失の傾向を考慮したコンクリートポンプの機種を選定の計算図表を図 6.2.6 に示した。これは、理論吐出量、調合条件および配管条件から理論吐出圧力を算定し、コンクリートポンプの性能線図（P-Q 線図）を記入することでコンクリートポンプの機種を選定できるものである。なお、計算図表の作成にあたり、各種条件を下記の通りとした。

- ① スランプにかかわらず機械効率を 0.85 とした。
- ② 安全率として、第4章において得られたスランプごとの管内圧力損失の関係式から 95% 信頼上限を上乗せした値を用いた。
- ③ コンクリートの単位容積質量を $2.3t/m^3$ とした。

一般的な建築工事における配管計画は、輸送管径 125A (5B) を基本として用いることが多く、筒先付近でテーパ管を介して 100A (4B) に接続することが多い。ここに示した計算図表の簡便性および汎用性を考慮すると、100A (4B) の配管部分は、125A (5B) の水平換算距離で表すことが最適であると考えられるため、ここでは、100A (4B) の水平換算係数を 2 として水平換算距離を算定することとする。

また、図 6.2.6 を用いて算定された理論吐出圧力が $5.0N/mm^2$ を超える場合には、(5) 管内圧力損失の算定および(6) 圧送負荷の算定のステップより、管内圧力損失および圧送負荷を的確には把握することとした。理論吐出圧力は、圧送負荷（圧送負荷の算定開始点における圧力）の約 1.25 倍であり、理論吐出圧力が $5.0N/mm^2$ 以下の場合、圧送負荷は $4.0N/mm^2$ 以下となる。すなわち、理論吐出圧力が $5.0N/mm^2$ 以下の場合には、標準圧の輸送管を有することが多いブームによる圧送においても、その許容圧力を超えないものと考えられる。一方、理論吐出圧力が $5.0N/mm^2$ を超える場合は、圧送負荷が $4.0N/mm^2$ を超え、ブームによる圧送が不可となることや、配管による圧送においても許容圧力区分に応じた輸送管の選定などの配管計画を綿密に行う必要がある。これらのことから、ここでは、管内圧力損失および圧送負荷の算定の要否について、理論吐出圧力 $5.0N/mm^2$ を基準とした。

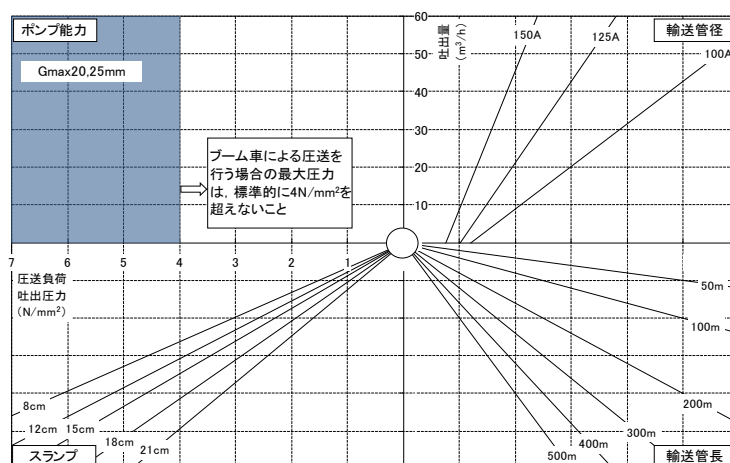


図 6.2.7 コンクリートの圧送負荷算定図³⁾

(8) 許容圧力区分に応じた輸送管の選定

輸送管および継手は、圧送負荷の算定結果に基づいて、輸送管および継手に作用する圧力に十分耐えうる強度を有したものを選定する。なお、圧送負荷が 4.0N/mm^2 以下の場合、原則として輸送管の選定を省くことができる。

輸送管と継手の選定は、配管条件と管内圧力損失から各地点の管内圧力を求め、その圧力以上の許容圧力区分のものを選定することが基本である。ただし、圧送によって、輸送管の内壁が摩耗するため、必要に応じて安全を見込んだ許容圧力区分の輸送管および継手の選定が重要となる。特に、高層建築物などの高所圧送の場合は、打込み日ごとに鉛直管を解体せずに施工階の上昇に伴い鉛直方向の輸送管を継ぎ足しながら配管し、圧送施工することが一般的である。この場合には、予め十分な安全を見込んだ輸送管および継手の選定が必要であり、さらに、輸送管の肉厚（摩耗量）を定期的に確認し、圧力に耐えうるものであるかを確認する。また、輸送管の摩耗具合に応じて、輸送管の交換をすることを予め計画しておく必要がある。

6.3 本研究で提案した圧送計画の合理的手法

ここでは、6.2.2において検討した圧送計画の合理的手法を集約し、「合理的手法に基づくコンクリートポンプ工法の圧送計画」として、以下に示す。

合理的手法に基づくコンクリートポンプ工法の圧送計画

圧送計画のフローを図1に示し、合理的手法に基づく圧送計画の概要を以下に示す。

配管経路は、圧送負荷がなるべく小さくなるような経路とすることを基本とする。また、配管経路を確認する際は、ベント管の本数なるべく少なくすることや、ベント管をなるべく筒先側に設置することが望ましい。

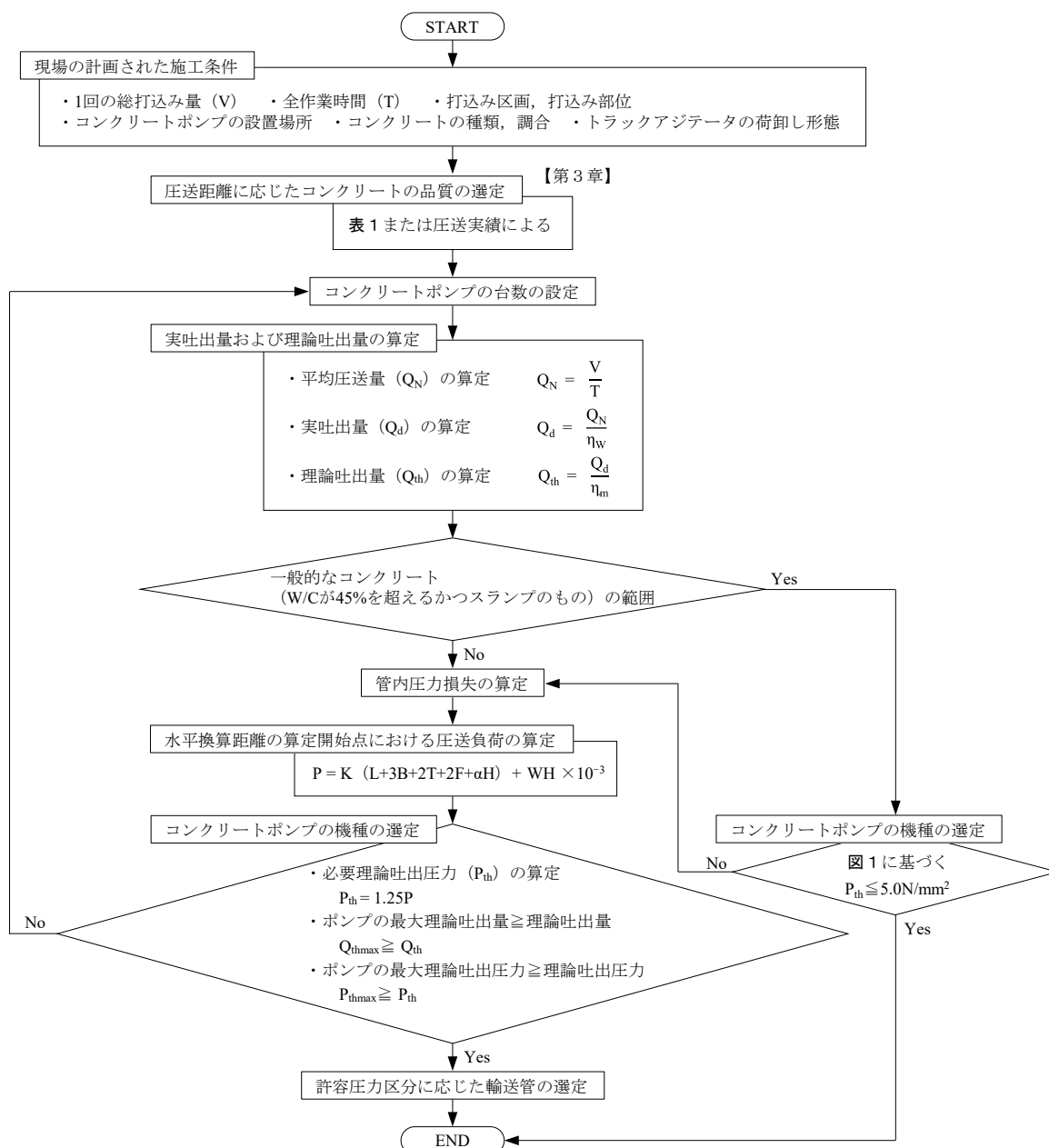


図1 圧送計画のフロー

(1) 圧送距離に応じたコンクリートの品質の選定

コンクリートの品質は、圧送による品質変化を見込んで選定することとし、圧送によるスランプおよびスランプフローの変化は、圧送実績や信頼できる資料または表1に示す低下量から定める。

圧送距離 150m 以上となる場合は、原則として、スランプおよびスランプフローの選定を1ランク上に変更するなどの対策を講じる。

表1 圧送距離に応じたスランプおよびスランプフローの低下量

圧送距離	スランプの低下量 (cm)		スランプフローの低下量 (cm)
	AE減水剤	高性能AE減水剤	
50m未満	0	0	0
50m以上 150m未満	1.0	1.5	5.0
150m以上 300m未満	2.0	2.5	10.0
その他	圧送実績または信頼できる資料による		

注1) 日平均気温が25℃を超える場合、上記の値にスランプは1.0cmを加え、スランプフローは2.5cmを加える

注2) 圧送距離が150m以上の場合、原則として、スランプ、スランプフローの選定を1ランク上に変更するなどの対策を講じる

(2) コンクリートポンプの台数の設定

コンクリートポンプの台数は、1日の打込み量と作業時間に基づきを設定する。ただし、コンクリートポンプ1台あたりの1日の打込み量の上限は、250m³を目安とする。

(3) 実吐出量および理論吐出量の算定

コンクリートポンプ1台あたりの1日の打込み量、作業時間、作業効率および機械効率から下記の(1)式～(3)式により平均圧送量、実吐出量および理論吐出量を算定する。なお、作業効率および機械効率は、圧送実績や信頼できる資料に基づいて設定し、これらの資料がない場合、表2および表3から定める。

$$Q_N = \frac{V}{T} \quad \dots (1) \text{ 式}$$

$$Q_d = \frac{Q_N}{\eta_w} \quad \dots (2) \text{ 式}$$

$$Q_{th} = \frac{Q_d}{\eta_m} \quad \dots (3) \text{ 式}$$

ここに、 Q_N :平均圧送量 (m³/h)、 V :コンクリートポンプ1台あたりの1日の打込み量 (m³)、 T :作業時間 (h)、 Q_d :実吐出量 (m³/h)、 η_w :作業効率、 Q_{th} :理論吐出量 (m³/h)、 η_m :機械効率

表2 作業効率 (η_w)

対象	部位	トラックアジテータ 1台付	トラックアジテータ 2台付
建築 構造 物	土間	0.55	0.85
	一般躯体	0.50	0.75
	基礎および梁	0.45	0.65
	逆打	0.40	0.40

表3 機械効率 (η_m)

コンクリートの種類	スランブ	スランブフロー	ピストン式 ポンプ	スクイズ式 ポンプ
普通コンクリート	8 cm	/	0.65	—
	12 cm		0.70	0.75
	15 cm		0.75	0.80
	18 cm		0.85	0.85
	21 cm		0.90	0.90
軽量コンクリート	12 cm	/	0.50	0.70
	15 cm		0.70	0.80
	18 cm		0.80	0.85
	21 cm		0.85	0.90
高流動・高強度 コンクリート	/	55 cm	0.85	/
		60 cm	0.90	
		65 cm	0.90	

(4) 圧送条件による分類

圧送するコンクリートが水セメント比 45% を超えかつスランブの一般的なコンクリートである場合は、管内圧力損失および圧送負荷の算定を割愛し、図 2 の計算図表からコンクリートポンプの機種を選定することができる。

(5) 管内圧力損失の算定

水平管 1m 当りの管内圧力損失は、コンクリートの種類、実吐出量および輸送管径に応じて算定する。水セメント比が 45% を超える普通コンクリートの管内圧力損失は、表 4 に示すの関係式から算定することができ、その他のコンクリートは圧送実績や信頼できる資料に基づいて算定する。

表4 水セメント 45% を超える普通コンクリートの管内圧力損失の標準値

輸送管径	スランブ	管内圧力損失の関係式
100A (4B)	12cm	$K = (0.187 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
	15cm	$K = (0.166 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
	18cm	$K = (0.154 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
	21cm	$K = (0.131 Q_d + 0.383) \cdot (C/W)^2$
125A (5B)	12cm	$K = (0.096 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	15cm	$K = (0.085 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	18cm	$K = (0.079 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	21cm	$K = (0.067 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$

(6) 水平換算距離の算定開始点における圧送負荷の算定

コンクリートポンプに加わる圧送負荷は (4) 式を用いて算定する。

$$P = K (L+3B+2T+2F+\alpha H) + WH \times 10^{-3} \quad \dots (4) \text{ 式}$$

P : コンクリートポンプに加わる圧送負荷 (N/mm^2), K : 管内圧力損失 ($\text{N}/\text{mm}^2/\text{m}$), L : 直管の長さ (m), B : ベント管の長さ (m), T : テーパー管の長さ (m), F : フレキシブルホースの長さ (m), α : 鉛直方向の圧送にかかる圧力係数, H : 圧送高さ (m), W : コンクリートの単位容積質量 (t/m^3) に重力加速度 ($9.8\text{m}/\text{s}^2$) を乗じたもの (kN/m^3) である。なお、鉛直方向の圧送にかかる圧力係数 α は、圧送実績や信頼できる資料に基づき設定し、これらの資料がない場合は普通骨材のとき 0.6、軽量骨材のとき 0.3 とする。

(7) コンクリートポンプの機種を選定

コンクリートポンプの機種は、圧送条件の検討によって求められた圧送負荷と実吐出量に基づいて、(7) 式および (8) 式を満足するものを選定する。

- ・ 必要理論吐出圧力 (P_{th}) の算定

$$P_{th} = 1.25 P \quad \dots (5) \text{ 式}$$

- ・ ポンプの最大理論吐出量 \geq 理論吐出量

$$Q_{thmax} \geq Q_{th} \quad \dots (6) \text{ 式}$$

- ・ ポンプの最大理論吐出圧力 \geq 理論吐出圧力

$$P_{thmax} \geq P_{th} \quad \dots (7) \text{ 式}$$

ここに、 P_{th} : 必要理論吐出圧力 (N/mm^2), P : 圧送負荷 (N/mm^2), Q_{thmax} : ポンプの最大理論吐出量 (m^3/h), Q_{th} : 必要理論吐出量 (m^3/h), P_{thmax} : ポンプの最大理論吐出圧力 (N/mm^2) である。

一般的なコンクリートの場合は、**図 2** から算定できる。ただし、**図 2** を用いて算定された理論吐出圧力が $5.0\text{N}/\text{mm}^2$ を超える場合には、(5) 管内圧力損失の算定および (6) 圧送負荷の算定を行う。

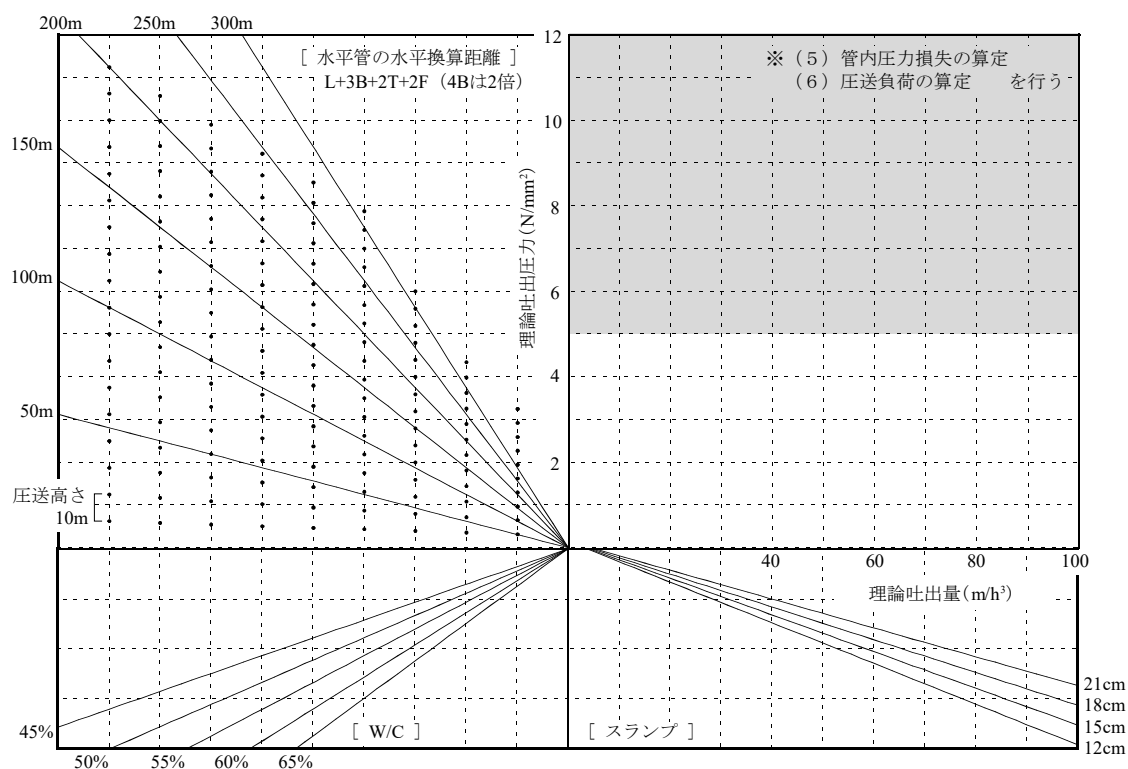


図2 コンクリートポンプの機種を選定図

(8) 許容圧力区分に応じた輸送管の選定

輸送管および継手は、圧送負荷の算定結果に基づいて、輸送管および継手に作用する圧力に十分耐えうる強度を有したものを選定する。なお、圧送負荷が $4.0N/mm^2$ 以下の場合には、原則として輸送管の選定を省くことができる。

6.4 合理的手法に基づくコンクリートポンプの機種を選定例

6.3 において、圧送計画の合理的手法について検討した。ここでは、コンクリートポンプの機種を選定方法の一例について、計算例と共に示す。

6.4.1 圧送負荷の算定によるコンクリートポンプの機種を選定

(1) コンクリートの施工条件

図 6.4.1 に示す構造物を施工するときのコンクリートポンプの機種を選定を行う。圧送条件は、次に示すとおりである。

- ・ 圧送量：150m³/h
- ・ コンクリートの種類：普通 33-18-20N（W/C=47.5%，高性能 AE 減水剤を使用）
- ・ 圧送時間：6 時間

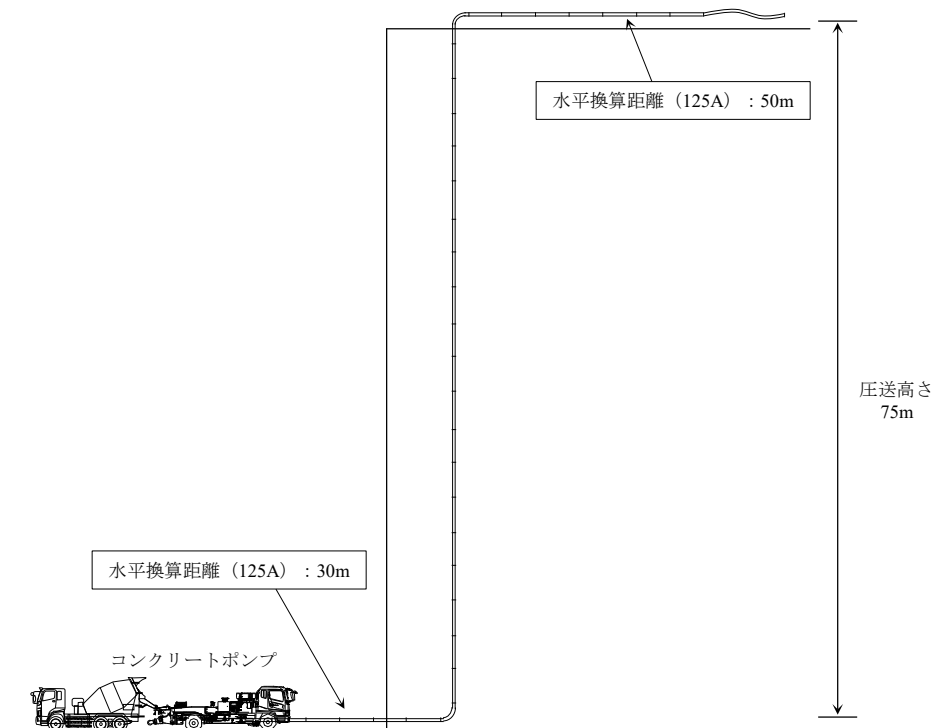


図 6.4.1 対象構造物と配管条件

(2) コンクリートポンプの機種を選定

① 圧送距離に応じたコンクリートの品質の選定

水平換算距離が 150m を超えるため、ここでは、スランプ 18cm の 1 ランク上であるスランプ 21cm を選定する。

② 平均圧送量 (Q_N)，理論吐出量 (Q_{th})，実吐出量 (Q_d) の算定

- ・ 平均圧送量 (Q_N)

$$Q_N \text{ (m}^3\text{/h)} = Q \text{ (m}^3\text{)} \div t \text{ (h)} = 150 \text{ (m}^3\text{)} \div 6 \text{ (h)} = 25.0 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

- ・ 実吐出量 (Q_d)

$$Q_d \text{ (m}^3\text{/h)} = Q_N \text{ (m}^3\text{/h)} \div \eta_w = 25.0 \text{ (m}^3\text{/h)} \div 0.75 = 33.3 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

・理論吐出量 (Q_{th})

$$Q_{th} \text{ (m}^3\text{/h)} = Q_d \text{ (m}^3\text{/h)} \div \eta_m = 33.3 \text{ (m}^3\text{/h)} \div 0.90 = 37.0 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

③ 管内圧力損失の算定

・スランプ 21cm の場合

$$\begin{aligned} K &= (0.067 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2 \\ &= (0.067 \times 33.3 + 0.306) \cdot 2.11^2 \\ &= 11.30 \text{ (} \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2\text{/m)} \end{aligned}$$

④ 圧送負荷および理論吐出圧力の算定

$$\begin{aligned} P &= K (L_H + 3B + 2T + 2F + 0.6H) + WH \times 10^{-3} \\ &= 0.01130 \times (175 + 0.6 \times 75) + 23 \times 75 \times 10^{-3} \\ &= 4.211 \text{ (N/mm}^2\text{)} \\ P_{th} &= 1.25 \times P = 1.25 \times 4.211 = 5.264 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

⑤ コンクリートポンプの機種を選定

①～④において算定した理論吐出量および理論吐出圧力とコンクリートポンプの性能線図 (P-Q 線図) を図 6.4.2 のように照らし合わせて、十分な能力を有するコンクリートポンプを選定する。

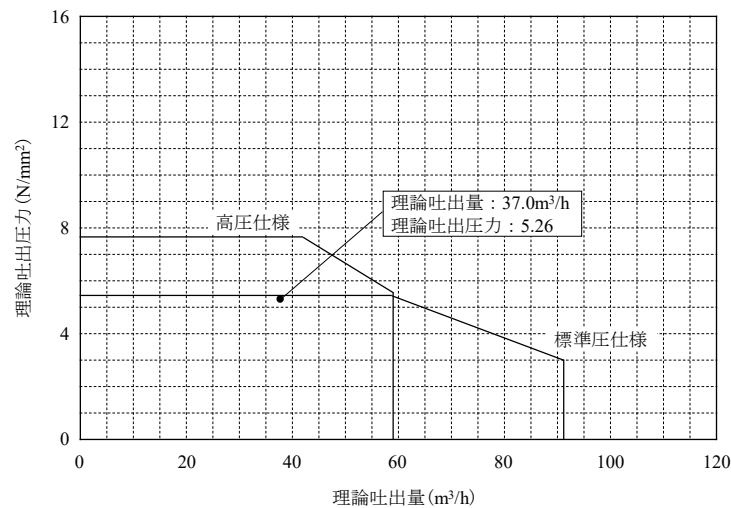


図 6.4.2 コンクリートポンプの性能線図 (P-Q 線図)

6.4.2 計算図表に基づくコンクリートポンプの機種を選定

(1) コンクリートの施工条件

図 6.4.3 に示す構造物を施工するときのコンクリートポンプの機種を選定を行う。圧送条件は、下記のとおりである。

- ・ 圧送量：200m³/h
- ・ コンクリートの種類：普通 27-18-20N (W/C=55%)
- ・ 圧送時間：5 時間

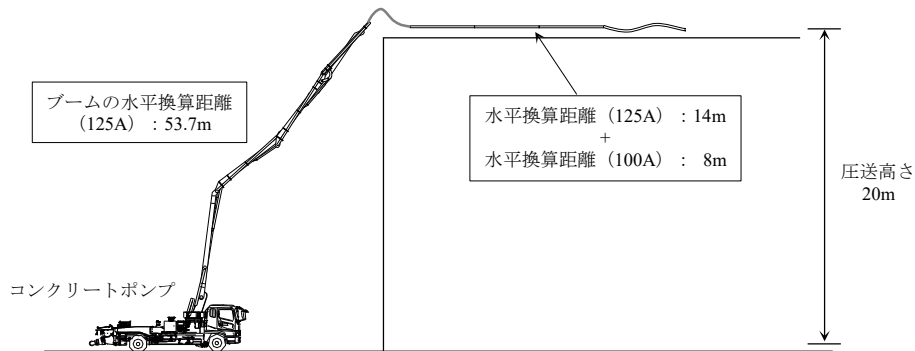


図 6.4.3 対象構造物と配管条件

(2) コンクリートポンプの機種を選定

① 圧送距離に応じたコンクリートの品質の選定

水平換算距離が 150m 未満であり、圧送による品質変化が小さいと想定されるため、ここでは、スランプ 18cm を選定する。

② 平均圧送量 (Q_N)、理論吐出量 (Q_{th})、実吐出量 (Q_d) の算定

- ・ 平均圧送量 (Q_N)

$$Q_N \text{ (m}^3\text{/h)} = Q \text{ (m}^3\text{)} \div t \text{ (h)} = 200 \text{ (m}^3\text{)} \div 5 \text{ (h)} = 40.0 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

- ・ 実吐出量 (Q_d)

$$Q_d \text{ (m}^3\text{/h)} = Q_N \text{ (m}^3\text{/h)} \div \eta_w = 40.0 \text{ (m}^3\text{/h)} \div 0.75 = 53.3 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

- ・ 理論吐出量 (Q_{th})

$$Q_{th} \text{ (m}^3\text{/h)} = Q_d \text{ (m}^3\text{/h)} \div \eta_m = 53.3 \text{ (m}^3\text{/h)} \div 0.85 = 62.7 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

③ 理論吐出圧力の算定

図 6.4.4 に基づき理論吐出量から理論吐出圧力を算定する。

④ コンクリートポンプの機種を選定

コンクリートポンプの性能線図 (P-Q 線図) を記入し、所要の理論吐出量および理論吐出圧力に対して、十分な能力を有するコンクリートポンプを選定する。

また、例えば、図 6.4.4 のように理論吐出量と理論吐出圧力をグリッド分割し、予めコンクリートポンプの機種ごとに性能を表 6.4.1 のように分類し、簡易的にコンクリートポンプを選定することも可能である。

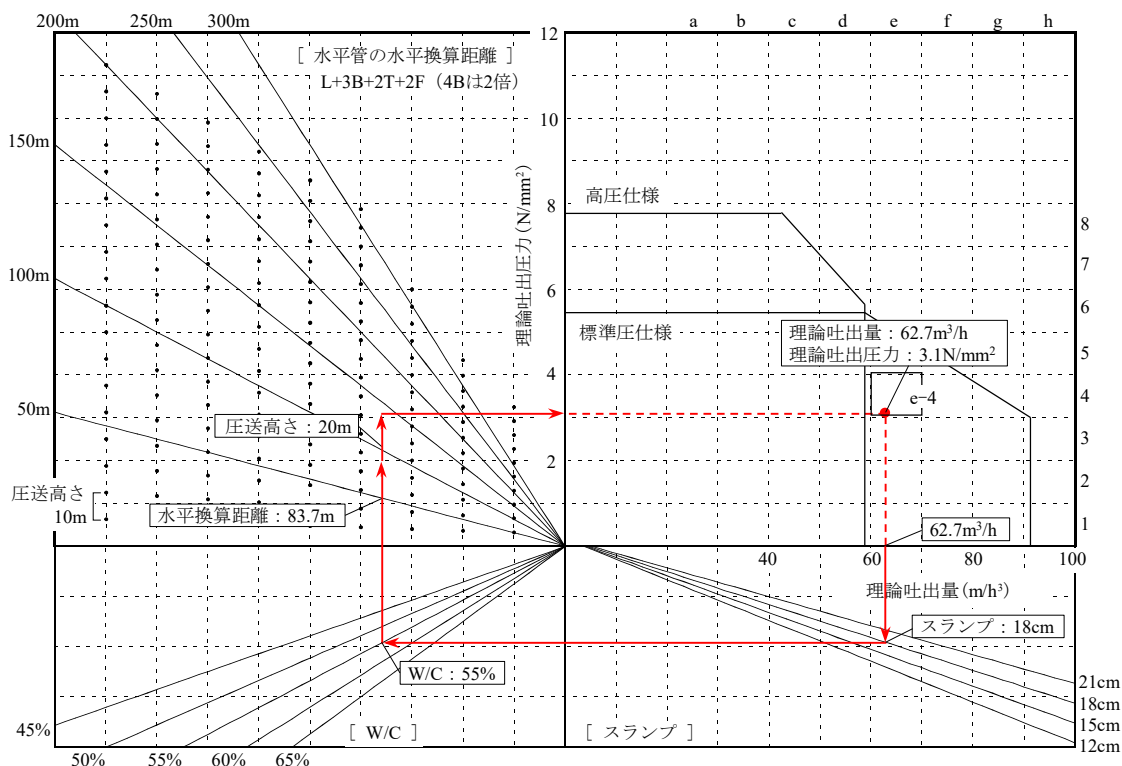


図 6.4.4 コンクリートポンプの機種を選定の一例

表 6.4.1 コンクリートポンプの機種ごとの性能一覧

機種	標準 高圧	a								b								c								d								e								f								g								h																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8																
PY120(A)-36	標準	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-								
	高圧	○	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-							
PY125-36A	標準	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-
	高圧	○	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-							
PY100-36A-S	標準	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-
	高圧	○	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-							
PY120(A)-33(A,B)	標準	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-
	高圧	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-								
PY115-31(A)	標準	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-
	高圧	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-	○	○	○	○	○	△	-	-								
⋮	標準																																																																																
	高圧																																																																																
⋮	標準																																																																																
	高圧																																																																																

○：圧送可， △：要検討， -：圧送不可

6.5 合理的手法に基づく圧送計画の有用性の検証

前項 6.3 では、第 3 章、第 4 章および第 5 章において検討した圧送によるコンクリートの品質変化と直管、ベント管および鉛直管の管内圧力損失の傾向を考慮して、新たな圧送計画のフローを提案した。ここでは、建築高さ 78.5m の高層建築物の圧送施工において、提案した圧送計画の合理的手法のうち、圧送距離に応じたコンクリートの品質変化の選定、管内圧力損失の算定および水平換算距離の算定開始点における圧送負荷の算定を適用し、その有用性を検証することとした。

(1) 高層建築物の工事概要および測定概要

配管条件を図 6.5.1 に示す。圧送計画の合理的手法を適用した圧送施工は、建築高さ 78.5m の高層建築物である。配管条件は、輸送管径 125A (5B) を基本とし、施工階においてテーパ管を介して 100A (4B) に接続している。測定は、圧送高さ 21.1m, 32.3m, 44.5m および 78.5m のときに行い、管内圧力およびフレッシュコンクリート試験を行った。

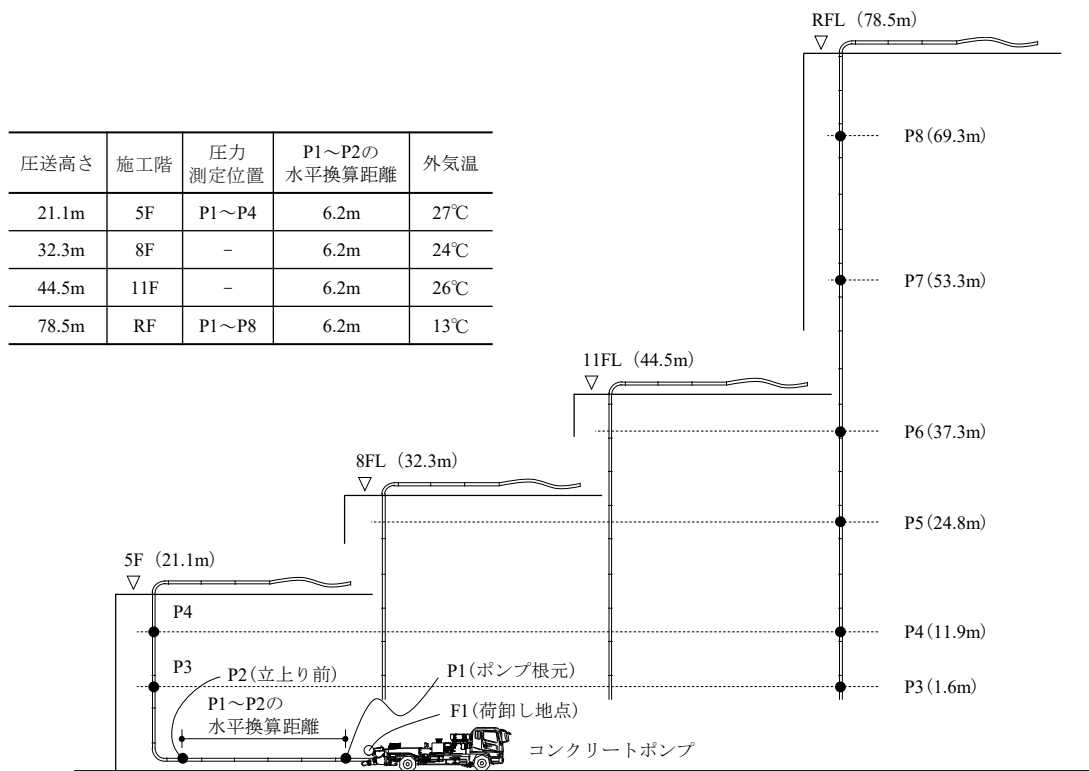


図 6.5.1 配管条件

(2) 圧送距離に応じたコンクリートの品質の選定

圧送前後のスランプの変化を図 6.5.2 に示す。圧送後のスランプは、いずれも低下する傾向を示し、平均で -2.0cm であった。また、スランプの変化量は、一部のデータを除き、前項 6.3 で提案した圧送距離に応じたスランプの低下量に納まっている。これは、計画段階でスランプの低下を見込んでコンクリートを選定すると、筒先において所要のスランプを確保できることを表している。しかし、一部のデータにおいて、前項 6.3 で提案した圧送距離に応じたスランプの低下量を大きく下回る結果であった。この結果は、3.2 圧送前後のコンクリートの品質変化に関する文献

的検討の結果を踏まえても特異なデータであった。

圧送前後の空気量の変化を図 6.5.3 に示す。圧送による空気量は、増加する傾向を示し、平均で +0.6% であった。空気量の変化量は、一部ポンプ指針の限度を上回るデータはあったものの、この空気量の増加がコンクリートの品質に及ぼす影響は小さいと考えられる。

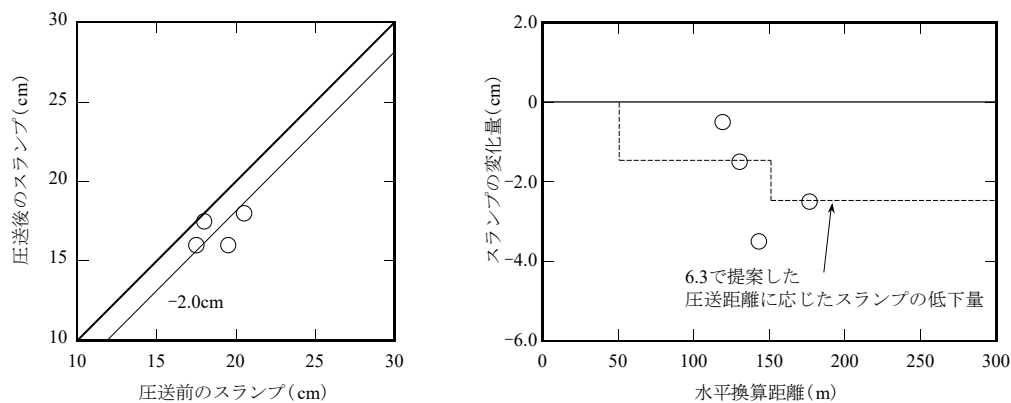


図 6.5.2 圧送前後のスランプの変化

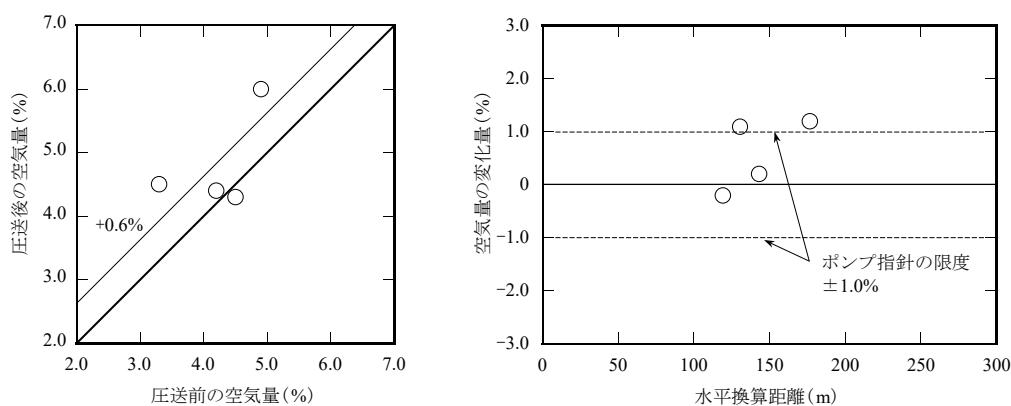


図 6.5.3 圧送前後の空気量の変化

(3) 管内圧力損失の算定および水平換算距離の算定開始点における圧送負荷の算定

管内圧力損失および圧送負荷の算定は、使用したコンクリートがいずれも $W/C > 45\%$ でスランプ 18cm であったため、下式により算出した。

$$\text{管内圧力損失 } K \text{ (} \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2\text{/m)} : K = (0.079Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$$

$$\text{圧送負荷 } P \text{ (N/mm}^2\text{)} : P = K (L + 3B + 2T + 2F + \alpha H) + WH \times 10^{-3}$$

ここに、 K : 管内圧力損失 ($\text{N/mm}^2\text{/m}$)、 Q_d : 実吐出量 ($\text{m}^3\text{/h}$)、 C/W : セメント水比、 P : コンクリートポンプに加わる圧送負荷 (N/mm^2)、 L : 直管の長さ (m)、 B : ベント管の長さ (m)、 T : テーパー管の長さ (m)、 F : フレキシブルホースの長さ (m)、 α : 鉛直方向の圧送にかかる圧力係数、 H : 圧送高さ (m)、 W : コンクリートの単位容積質量 (t/m^3) に重力加速度 (9.8m/s^2) を乗じたもの (kN/m^3) である。

圧送負荷の算定値と実測値の関係を図 6.5.4 に示す。なお、図中には、ポンプ指針の管内圧力

損失および圧送負荷の算定方法により求めた算定値を比較として示している。圧送負荷は、一部算定値よりも実測値が上回るデータがあったものの、6.3で提案した管内圧力損失の算定および圧送負荷の算定方法は概ね安全側に算定できているといえる。圧送負荷の算定値よりも実測値の方が大きいデータについては、管内圧力損失が算定値よりも実測値の方が大きかったためであった。また、圧送負荷は、ポンプ指針から求めた算定値よりも実測値の方が大きくなるデータが多く、この圧送負荷の誤差が閉塞などのトラブルに起因している可能性がある。

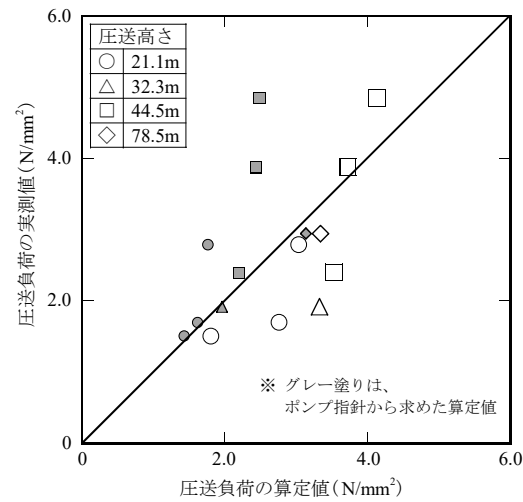


図 6.5.4 圧送負荷の算定値と実測値の関係

6.6 まとめ

近年、一般的に使用されているコンクリートや圧送条件に適応した圧送計画の合理的手法について検討した。ここでは、第3章、第4章および第5章において、文献調査および圧送実験により明らかにした圧送によるコンクリートの品質変化と直管、ベント管および鉛直管の管内圧力損失の傾向を考慮して、新たな圧送計画のフローを示した。以下に、本章における合理的手法に基づく圧送計画の要点を示す。

- (1) 実施工において、スランプおよびスランプフローの圧送による変化は、一般的に考慮されていないため、圧送距離に応じたスランプおよびスランプフローの低下量を示し、原則として、圧送距離が150m以上の場合は、1ランク上のスランプおよびスランプフローを選定するなどの対策を講じることとした。
- (2) ポンプ指針において、圧送負荷の算定およびコンクリートポンプの機種を選定の過程を省略できる一般的なコンクリートかつ一般的な施工の範囲についても、圧送負荷およびコンクリートポンプの機種を選定を確認することとし、簡易的にコンクリートポンプの機種を選定できる計算図表を示した。
- (3) 水セメント比が45%以下のコンクリートについて、ポンプ指針の管内圧力損失の標準値に代わる新たな管内圧力損失の標準値を示した。また、水セメント比が45%以下のコンクリートについても、試験圧送に用いることができる管内圧力損失の参考値を示した。
- (4) 圧送負荷の算定方法として、従来の圧送負荷の算定方法に加えて、安全を見込んだ高所圧送時の新たな圧送負荷の算定方法を示した。

【第6章の参考文献】

- 1) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説，1979.11
- 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，2009.2
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート圧送工法ガイドライン2009 および解説，2009.6
- 4) 中田善久，大塚秀三，女屋英明，高野肇，毛見虎雄：実機ミキサにより練り混ぜた高強度・高流動コンクリート中のモルタルの単位容積質量及び単位粗骨材量の差に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，第603号，pp.17-24，2006.5
- 5) 福島和将，山崎順二，岩清水隆，杉本勝幸，山田藍，岸繁樹：暑中期におけるコンクリートの圧送性に関する研究 その12 コンクリート温度がフレッシュ性状および管内圧力に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演会，pp.449-450，2017.7
- 6) 高尾武志，和美廣喜：基礎およびスラブを対象としたコンクリートの圧送作業における作業効率と機械効率に関する一考察，日本建築学会技術報告集，第16巻，第32号，pp.17-20，2010.2
- 7) 永井康淑，久保田昌吾，名和豊春，中根淳，田中光男：低熱セメントを用いた高強度コンクリート実大施工実験 その3 ポンプ圧送性，日本建築学会大会学術講演会，pp.677-678，1993.9
- 8) 神代泰道，一瀬賢一，都築正則：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1217-1222，2006
- 9) 和美広喜，金子宏，安田稔：スランプロス低減型高性能減水剤を用いた高強度コンクリートのポンプ圧送性，日本建築学会大会学術講演会，pp.759-760，1986.10

第7章 総括

第7章 総括

コンクリートポンプ工法は1960年代後半に急激に普及し始めた工法であり、これまでに圧送技術が確立されてきた。しかし、近年においてもコンクリートポンプに係わるトラブルや事故は少なからず発生しており、特に圧送中の閉塞は圧送時に発生する最も多いトラブルの一つとなっている。そこで、本研究では、閉塞などのトラブルを低減することを目的とした圧送計画の合理的な手法を提案することとし、圧送前後のコンクリートの品質変化や圧送条件に応じた圧送負荷について、文献調査ならびに圧送実験により調査・検討した。本章では、各章で得られた成果を総括して示すとともに、今度の課題と展望について述べる。

7.1 各章の要約

第1章「序論」では、研究の背景として、コンクリートポンプ工法の沿革とコンクリート工事におけるコンクリートポンプの役割と現状について述べるとともに、本研究の目的および圧送計画の合理的な手法の位置付けについて示した。また、本論文で用いる用語の定義、本研究の構成および概要を示した。

第2章「ポンプ指針における圧送計画の現状と問題点」では、ポンプ指針における圧送計画について取りまとめ、さらに、ポンプ指針とその他のコンクリートポンプ工法に関連する指針・技術書との関係および相違点について整理した。また、現在の圧送計画に至った経緯や建築で用いられるコンクリートの仕様の変化について取りまとめた。その結果、現在の圧送計画の基本的な概念が1970年頃に行われた圧送実験を基に構築されたものであること、コンクリートの調査条件や使用材料は1970年以降著しい変化が見られていることおよび圧送計画は現在まで特段の変更がなされていないことを示した。これらの調査を踏まえて、現在の圧送計画の問題点を抽出し、本研究の位置付けを示した。

第3章「圧送前後のコンクリートの品質変化に及ぼす圧送距離の影響」では、文献調査によってコンクリートの品質と圧送距離の区分ごとの圧送前後の品質変化について系統的に検討した。その結果、スランプおよびスランプフローが圧送後に低下する傾向を示し、圧送距離が長くなるとその低下量が大きくなる傾向を示した。また、空気量が圧送距離にかかわらず圧送後に僅かに増加する傾向を示すことを明らかにした。さらに、水平換算距離が300mを超える圧送実験により圧送に伴うコンクリートの品質変化を確認し、文献調査によって得られた圧送距離の区分ごとに検討した圧送前後のコンクリートの品質変化の傾向の妥当性を確認した。

これらの調査・検討結果から、圧送距離が150mを超えるような配管条件の場合は、荷卸し地点におけるスランプまたはスランプフローの目標値を1ランク大きくするなどの対策を施す必要があることを示した。

第4章「水平管の管内圧力損失に及ぼす各種要因の影響」では、水平管における直管およびベ

ント管の管内圧力損失に及ぼすコンクリートの調合条件や圧送条件の影響を文献調査ならびに圧送実験により明らかにした。文献調査では、直管の管内圧力損失について、水セメント比の区分ごとに検討し、水セメント比が45%を超える場合にスランプの区分が小さくなると管内圧力損失が大きくなる傾向を示すこと、水セメント比が45%以下の場合に単位水量の区分が小さくなると管内圧力損失が大きくなる傾向を示すことを明らかにした。これらの結果から、実吐出量と管内圧力損失の関係式を求め、普通ポルトランドセメントを用いた輸送管径125A(5B)の管内圧力損失の標準値を提案した。また、ベント管の管内圧力損失について、直管とベント管の管内圧力損失の比(ベント管の水平換算係数)が、ベント管の根元圧力の増大に伴い大きくなる傾向を明らかにした。

圧送実験では、水平換算距離100m程度の配管条件において、水平管における直管およびベント管の管内圧力損失を実測し、水平管における直管の管内圧力損失およびベント管の水平換算係数について、文献調査によって得られた傾向の妥当性を確認した。さらに、本章で示した直管の管内圧力損失の標準値の有用性についても検証した。

第5章「鉛直管の管内圧力損失に及ぼす各種要因の影響」では、コンクリートの種別を普通骨材コンクリートと軽量骨材コンクリートに分類し、文献調査により水平管と鉛直管の管内圧力損失の関係の傾向を明らかにした。その結果、ポンプ指針の計算方法で圧送負荷を算定すると、実際の圧送負荷よりも小さく算定される、すなわち圧送負荷が危険側に算定される可能性が多いことを明らかにした。また、普通骨材を用いたコンクリートのとき、鉛直管の管内圧力損失が、水平管の管内圧力損失の1.07倍にコンクリートの単位容積重量を加えた値に概ね近似する傾向を明らかにし、この結果を踏まえて、圧送負荷を安全に算定するための計算式を提案した。さらに、建築高さ150mを超える高層鉄筋コンクリート造の施工において高所圧送時の管内圧力を測定し、文献調査から得られた傾向の確認と、本章で提案した圧送負荷の計算式の有用性についても確認した。

第6章「合理的手法に基づくコンクリートポンプ工法の圧送計画の提案」では、圧送によるコンクリートの品質変化や管内圧力損失に及ぼす各種要因を考慮した合理的手法に基づくコンクリートポンプ工法の圧送計画を提案した。ここでは、第3章の検討を踏まえ圧送距離に応じたスランプおよびスランプフローの低下量の標準値を示し、圧送によるコンクリートの品質変化を考慮するものとした。また、管内圧力損失および圧送負荷の算定方法として、第4章および第5章で明らかにした直管、ベント管および鉛直管の管内圧力損失の傾向を踏まえた安全な算定方法を示した。

図7.1.1は、本論文の第3章、第4章および第5章の結果を基に、第6章において検討した新たな圧送計画のフローを示したものであり、コンクリートポンプによる施工を安全かつ円滑に行うことを主眼に置いたものである。さらに、現状のポンプ指針において、圧送負荷の算定およびコンクリートポンプの機種を選定の過程を省略できる一般的なコンクリートおよび施工の範囲に

においても、圧送負荷およびコンクリートポンプの機種を選定することとし、これらを簡易に確認できる計算図表を提案した。また、建築高さ約70mの施工において、本章で提案した圧送計画の合理的手法を適用し、その有用性についても検証した。

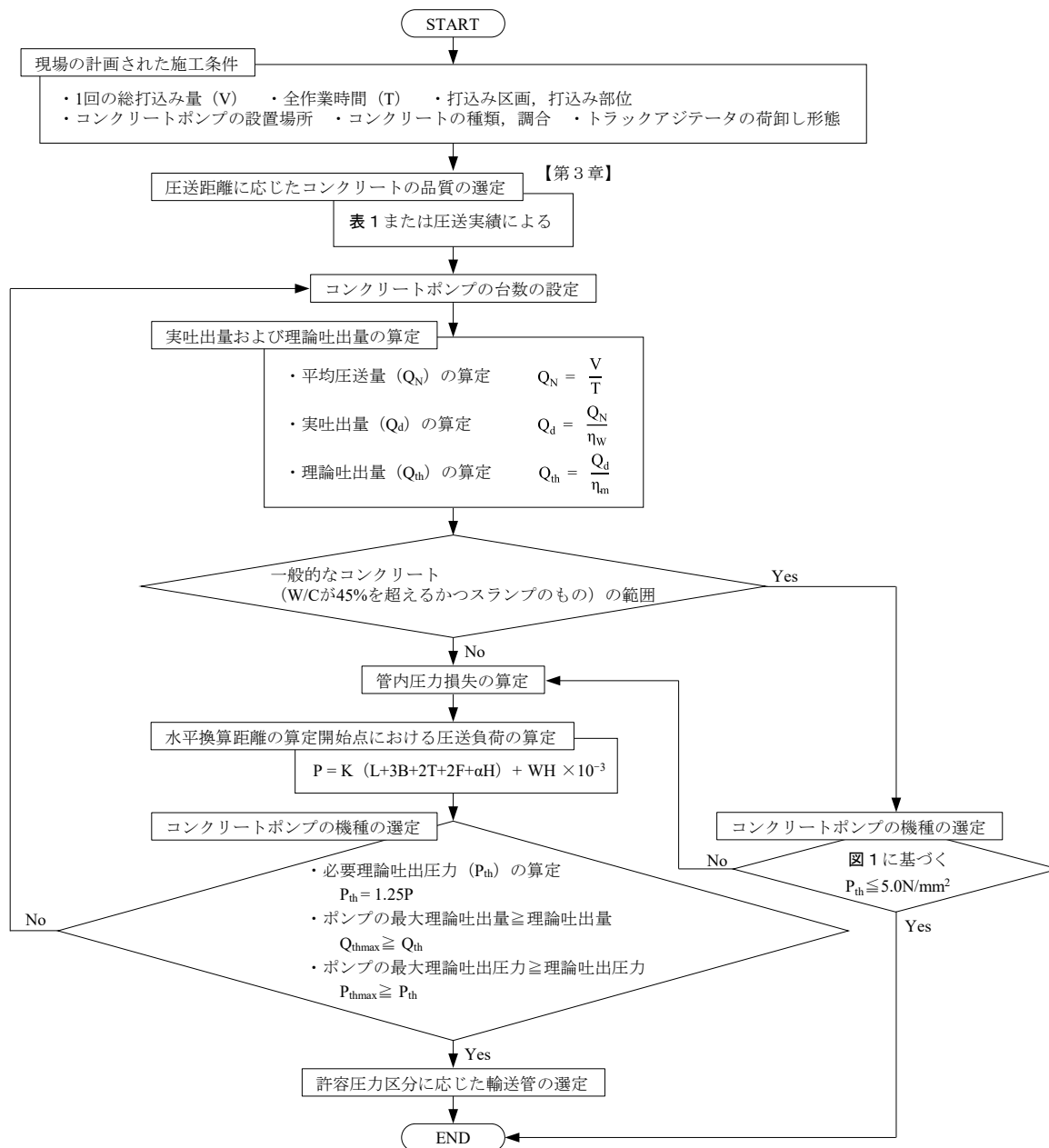


図 7. 1. 1 圧送計画のフロー

7.2 今後の展望

本研究は、コンクリートポンプ工法における圧送計画の合理的手法を検討するために、文献調査および圧送実験により、圧送前後のコンクリートの品質変化や圧送条件に応じた圧送負荷について検討したものである。本研究で対象としたコンクリートの種類や品質は、各章ごとに多少の違いがあるものの、例えば、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートや普通骨材を用いたコンクリートなどの一般的に広く使われているコンクリートの範囲に留まっている。建築工事で使用されるコンクリートは、この他にも、水結合材比が20%以下のような超高強度コンクリートや流動性が高い高流動コンクリートがあり、特に近年は、コンクリート工事の効率化を目指した取組みとして、比較的単位セメント量の少ない普通強度レベルで材料分離抵抗性と流動性が得られる増粘剤含有高性能AE減水剤が普及しつつあり、コンクリートが更に多様化しているといえる。圧送前後のコンクリートの品質変化や圧送性は、コンクリートの使用材料や調合条件に大きく左右されるため、圧送実績や信頼性の高い資料がない場合は、コンクリートの使用材料や調合条件が変化する都度、圧送実験によりこれらを確認する必要がある。このようなコンクリートの使用材料や調合条件の変化に対応するためには、コンクリートの品質と圧送性の定量的な評価方法の確立が望まれる。その一環として、コンクリートの降伏値や塑性粘度などのレオロジー定数と圧送性に関する検討が現在までにいくつか報告されているものの、現状、これらの研究を実施工に適用させるには至っていない。コンクリートポンプに関する更なる研究の発展と実施工に適応した圧送性の定量評価が今後の課題である。

一方、近年の建設業界、特に圧送工事業を含めた専門工事業において慢性的な人手不足が深刻化している。その人手不足を補填するように、建設業界には、外国人技能実習制度を活用した多くの外国人実習生が受け入れられている現状がある。このような背景の中で、圧送工事業界は、これまでに確立されてきた圧送技術を後世に伝承していくとともに、今後ますます急増してくると考えられる外国人技能実習生などの経験の浅い圧送技能者においても、安全かつ円滑に圧送施工ができるようなシステムやアプリケーションソフトウェアなどの開発を進めていくべきであると考えている。さらに、従来の筒先作業における先端ホースの引き廻しや段取替えなどの圧送技能者の労力を考慮すると、今日適用事例が増えてきたディストリビュータが積極的に採用されることを期待する。

付 録

本研究に関連する発表論文

I. 審査付論文

- 1) 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
- 2) 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

II. 口頭発表

- 1) 串田真基, 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典: コンクリートポンプ工法における水平換算距離と管内圧力に関する文献の検討, 日本大学理工学部学術講演会予稿集, pp.201-202, 2012.11
- 2) 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典: コンクリートポンプ工法における圧送前後の品質変化に関する一考察, コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会シンポジウム, pp.77-82, 2015.6
- 3) 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典: 日本におけるコンクリート圧送工法の問題点, 第12回日本・韓国建築材料施工 Joint Symposium 論文集, pp.65-71, 2015.7
- 4) Atsunori MIYATA, Yoshihisa NAKATA and Shuzo OTSUKA: Effects of Pumping Distance on the Change in Concrete Quality Before and After Pumping by Pumping Methods, Proceedings of the 12th Japan・Korea Joint Symposium on Building Materials & Construction, pp.201-206, 2015.7
- 5) 吉田兼治, 宮田敦典, 中田善久, 大塚秀三, 岡田太輔: ディストリビュータ工法を適用した高所圧送におけるコンクリートの圧送性に関する研究 その1. 実験概要および圧送前後の品質変化について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.827-828, 2016.8
- 6) 宮田敦典, 中田善久, 大塚秀三, 吉田兼治, 岡田太輔: ディストリビュータ工法を適用した高所圧送におけるコンクリートの圧送性に関する研究 その2. 管内圧力および管内圧力損失について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.829-830, 2016.8
- 7) 河崎慎吾, 中田善久, 住井次郎, 大塚秀三, 宮田敦典, 荒巻卓見: 東海地区の圧送業者を対象とした圧送計画に関するアンケートの調査報告 その1. アンケート調査の概要および回答社の概要について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.835-836, 2016.8
- 8) 住井次郎, 中田善久, 河崎慎吾, 大塚秀三, 宮田敦典, 荒巻卓見: 東海地区の圧送業者を対象

象とした圧送計画に関するアンケートの調査報告 その2. 圧送計画の立案方法およびトラブルについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.837-838, 2016.8

- 9) 宮田敦典, 中田善久, 大塚秀三: ディストリビュータ工法を適用した高所圧送におけるコンクリートの圧送性に関する研究, 第43回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.103-106, 2016.10
- 10) 宮田敦典, 中田善久, 大塚秀三: 高層RC造の圧送施工における管内圧力の測定結果報告, 日本大学理工学部学術講演会予稿集, pp.94-95, 2016.12
- 11) 鷹巣飛鳥, 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典, 岡本圭市: 水セメント比の違いがベント管の圧力損失に及ぼす影響, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.161-164, 2017.2
- 12) 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鉛直管の管内圧力損失に関する一考察, 日本大学理工学部学術講演会予稿集, 2017.12
- 14) 河崎慎吾, 中田善久, 住井次郎, 大塚秀三, 宮田敦典: 東海地区の圧送業者を対象とした圧送計画の立案方法に関するアンケート調査, 第1回全国圧送技術大会論文報告集, pp.29-30, 2018.2
- 15) 宮田敦典, 中田善久, 大塚秀三, 岡本圭市: 圧送に伴うコンクリートの品質変化に関する実験的検討, 第1回全国圧送技術大会論文報告集, pp.57-60, 2018.2
- 16) 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前後の品質変化に関する文献的検討, 第1回全国圧送技術大会論文報告集, pp.61-64, 2018.2
- 17) 山川空悟, 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典, 吉田兼治: コンクリートポンプ工法における高所圧送時の管内圧力の一測定事例, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.177-180, 2018.3
- 18) 中村大翔, 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典: コンクリートポンプに関わる事故事例の分析, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.181-184, 2018.3
- 19) 黒川海人, 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典, 山柿建人: コンクリートポンプにおける事故の発生状況に関する実態調査 その1 調査概要および発生状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.925-926, 2018.9
- 20) 山柿建人, 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典, 黒川海人: コンクリートポンプにおける事故の発生状況に関する実態調査 その2 事故の形態別概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.927-928, 2018.9

謝 辞

本論文は、日本大学理工学部建築学科材料施工研究室がこれまでに取り組んできた研究を基に、筆者が2012年から2018年の7年間で発展させた研究成果をまとめたものです。

本論文をまとめるにあたり、主査としてご指導いただいた日本大学理工学部建築学科教授・中田善久博士に心より感謝申し上げます。中田善久先生には、研究活動の基礎から公私にわたり親身なるご指導いただきました。また、コンクリートポンプ工法という研究テーマに取り組むきっかけを与えていただいたことに大変感謝しております。本論文は、先生のご指導無くしては存在し得ないものであります。

本論文の審査の副査として、貴重なお時間を割いてご精読いただいた日本大学理工学部建築学科教授・理工学部長・岡田章博士，日本大学理工学部建築学科客員教授・榊田佳寛博士，東京工芸大学工学部建築学科教授・陣内浩博士ならびに大林組技術本部技術研究所・一瀬賢一博士には、浅学菲才な筆者に対し、貴重なご指導と適切なお助言をいただき、論文の内容をより充実させることができたと自負しております。深く感謝いたします。

ものづくり大学技能工芸学部建設学科教授・大塚秀三博士には、研究室に所属して以来、実に多くのご指導とお助言を賜りました。本論文は、これまでに中田善久先生ならびに大塚秀三先生が取り組まれてきた研究成果によるところが多くあります。本研究の基礎ならびに可能性を与えていただいたことに深く感謝しております。また、日本大学理子学部建築学科元教授・清水五郎博士，島根大学名誉教授・和美廣喜博士，飛坂技術士事務所・飛坂基夫博士，鉄建建設・唐沢智之博士，日本大学生産工学部建設学科元教授・松井勇博士，同教授・湯浅昇博士，同准教授・永井香織博士，日本大学工学部建築学科教授・工学部部長・出村克宣博士，同教授・サンジェイ パリーク博士，同准教授・齋藤俊克博士，日本大学生物資源科学部生物資源工学科准教授・斉藤丈士博士，ものづくり大学名誉教授・飛内圭之博士をはじめとした日本大学および日本大学桜門建築会材料施工研究会の皆様には、日頃よりご指導いただくとともに、常に気にかけていただきました。特に、日本大学理工学部まちづくり工学科助手・荒巻卓見博士は、研究室に所属してから多く経験を共有し、同じ目標に向けて切磋琢磨する仲間として大変励みになりました。

本論文は、膨大な量の調査と大変大がかりな圧送実験および施工現場の測定から得られた結果で構成されています。調査と実験の実施にあたり、日本大学理工学部建築学科中田研究室およびものづくり大学技能工芸学部建設学科大塚研究室に所属した多数の卒業研究生から多大なる協力を得ました。また、ものづくり大学技能工芸学部建設学科教務職員・石井哲也氏には、快適な実験環境の整備とともに、実験のご指導をいただきました。施工現場の測定に関しては、施工会社

の現場所長をはじめとする社員の皆様に多大なるご協力をいただきました。本研究にご協力いただいた多くの皆様に深くお礼申し上げます。

本論文は、数多くの文献の研究成果を引用させていただきました。執筆者の方々に敬意を表すとともに、多数の貴重な研究論文が公表されていることに感謝いたします。

最後に、これまで長きにわたりご支援をいただき、応援してくれた両親をはじめとする家族に感謝いたします。

2018年9月

宮田 敦典