

論文 高強度コンクリートの圧送負荷の算定方法に関する一考察

宮田敦典^{*1}・中田善久^{*2}・大塚秀三^{*3}・山柿建人^{*4}

要旨：本研究は、圧送時の管内における抵抗力が垂直応力すなわち管内圧力に依存することを明らかにするために、文献調査によって管内圧力と管内圧力損失の関係について検討した。その結果、高強度コンクリートの管内圧力損失は、管内圧力が大きいほど大きくなる傾向を示し、その傾向はW/Cの区分が小さいほど顕著であった。また、管内における抵抗力が管内圧力に比例するモデルによって、従来の管内圧力損失が配管根元から筒先まで一定であるとする考え方よりも精度よく水平直管の圧送圧力を表現できることを明らかにした。

キーワード：コンクリートポンプ工法、圧送計画、圧送負荷、管内圧力、高強度コンクリート

1. はじめに

コンクリートポンプ工法による施工を安全に行うためには、圧送計画において圧送圧力を適確に把握し、その圧力以上の能力を有したコンクリートポンプと輸送管の選定が重要となる。特に、高強度コンクリートや高流動コンクリートは、従来の普通コンクリートに比べて管内圧力損失が著しく大きくなり¹⁾、より高い圧力に耐え得るコンクリートポンプや輸送管を選定する必要がある。

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は、使用材料や調合によって大きく異なる。そのため、ポンプ指針¹⁾では、水セメント比が45%以下の場合、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解説している。筆者らもこれまでに、調合条件ごとに高強度コンクリートの管内圧力損失の傾向を検討してきた²⁾。しかし、高強度コンクリートの管内圧力損失は、普通コンクリートの管内圧力損失に比べてばらつきが大きく、実際の管内圧力損失を十分に表現できているとは言い難い背景がある。これらの理由の一つに、野田らの研究³⁾で検討されているような、コンクリートと管壁との間に生じるすべり抵抗力が垂直応力に依存することが考えられ、この他にも、管内における抵抗力が垂直応力に依存するモデルを用いて、高強度コンクリートや高流動コンクリートの圧送圧力を把握しようとする理論的研究⁴⁾が報告されてきた。しかしながら、これらの検討のように、管内における抵抗力が垂直応力に依存することが実験的に実証されたとは言い難い。

そこで、本研究は、高強度コンクリートの管内における抵抗力が垂直応力すなわち管内圧力に依存することを明らかにするために、文献調査によって管内圧力と管内

圧力損失の関係について検討した。また、管内における抵抗力が管内圧力に依存するモデルを用いてコンクリートの調合条件から圧送圧力を検討し、高強度コンクリートの圧送距離と管内圧力の関係の一例を示している。

2. 圧送負荷の算定方法に関する既往の研究と本研究の関係

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¹⁾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年のポンプ指針の改定時に導入されたものであり、合わせて1970年代当時の研究報告から管内圧力損失の標準値が示された。しかし、コンクリートの使用材料や調合条件は、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年代から大きく変化していると考えられるものの、管内圧力損失の標準値は現在まで特段の変更がなされていない。

このような背景を踏まえて、筆者らはこれまでに1990年以降に掲載されたコンクリートポンプに関する文献から近年の建築工事で用いられているコンクリートを対象として、調合条件ごとに管内圧力損失の傾向を明らかにしてきた²⁾。ここでは、文献ごとに最長の直管部分から算出した管内圧力損失を $45\% < W/C \leq 65\%$ のときスランプの区分ごと、 $W/C \leq 45\%$ のとき単位水量ごとに分類し、表-1に示す管内圧力損失と実吐出量の関係式²⁾を示した。これは、従来の圧送負荷の算定方法¹⁾と同様に、管内圧力損失が配管根元から筒先まで一定であることを前提条件とした検討結果である。

一方、コンクリートの粘性が比較的大きくなる高強度コンクリートの管内圧力損失は、配管根元から筒先まで

*1 日本大学理工学部建築学科 助手 修士(工学) (正会員)

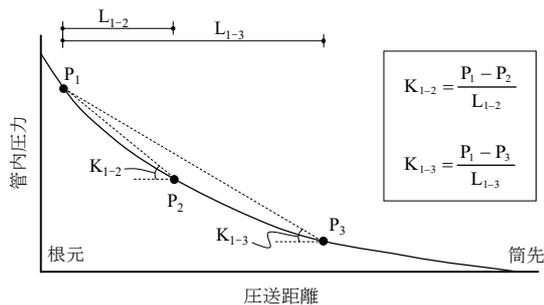
*2 日本大学理工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 ものつくり大学技能工芸学部建設学科 教授 博士(工学) (正会員)

*4 日本大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生

表－1 管内圧力損失と実吐出量の関係式²⁾

W/C (%)	SL, SF	単位水量 (kg/m ³)	管内圧力損失:Kと実吐出量:Q _d の関係式 (×10 ⁻³ N/mm ² /m)
45 < W/C ≤ 65	SL	SL=12cm	$K = (0.096 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
		SL=15cm	$K = (0.085 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
		SL=18cm	$K = (0.079 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
		SL=21cm	$K = (0.067 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
25 ≤ W/C ≤ 45	SL	160 ≤ W < 165	$K = (0.135 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
		170 ≤ W < 175	$K = (0.083 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
		175 ≤ W ≤ 185	$K = (0.079 Q_d + 0.306) \cdot (C/W)^2$
	SF	165 ≤ W < 170	$K = (0.071 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$
		170 ≤ W < 175	$K = (0.066 Q_d + 0.278) \cdot (C/W)^2$



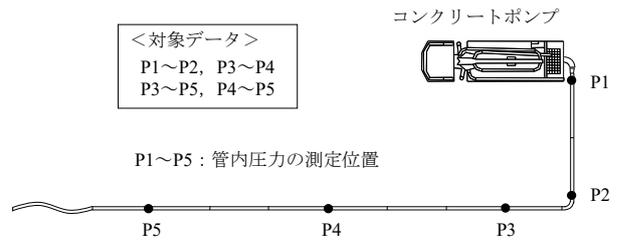
図－1 管内圧力の分布の一例

一定ではなく、配管根元に近いほど大きくなるという実験結果がいくつか報告されている^{5),6)}。すなわち、図－1に示すように、圧送距離と管内圧力の関係が線形ではなく、曲線（下に凸）となる場合、管内圧力損失はその測定位置および測定間の距離によって変化することを意味している。そのため、高強度コンクリートの管内圧力損失やこれを用いた圧送負荷の算定は、コンクリートの調査条件や吐出量の影響のみならず、圧送距離や位置の影響を考慮する必要があるといえる。

本研究は、管内圧力損失が調査条件および吐出量のみならず、管内圧力にも依存することを文献調査により確認し、さらに、従来の管内圧力損失が配管根元から筒先まで一定であるとする考え方と、管内における抵抗力が管内圧力に依存する考え方の圧送圧力の算定結果を比較している。

3. 文献調査の概要

水平管の管内圧力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）および日本コンクリート工学会（コンクリート工学論文集およびコンクリート工学年次論文集）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により圧送実験を行ったものとした。また、既報²⁾と同様に、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



図－2 配管状況の一例

表－2 対象となるデータ数

SL, SF (cm)	W/C (%)		
	45 < W/C ≤ 65	30 < W/C ≤ 45	25 ≤ W/C ≤ 30
12 ≤ SL < 15	12	0	0
15 ≤ SL < 18	0	0	6
18 ≤ SL < 21	918	18	0
21 ≤ SL	0	18	23
45 ≤ SF < 55	0	0	57
55 ≤ SF	0	38	85
合計	930	74	171

用いたものとし、W/Cが65%以下のSL:12～25cmおよびSF: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に大きな影響を及ぼすことが考えられるため、ここでは対象外とした。

本調査は、水平管の直管部分における管内圧力を対象とした。そのため、本調査では、途中にベント管やテーパー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を2点以上測定し、かつ配管根元に近い直管部分の入口の管内圧力および2点の測定間の距離が読み取れるデータを対象とした。例えば、図－2のような配管状況の場合、対象となるデータは4件（P1～P2, P3～P4, P3～P5 および P4～P5）となる。なお、以降は、ポンプ根元に近い直管部分の入口の管内圧力をP_iとし、筒先に近い直管部分の出口の管内圧力をP_oとする（例えば、P3～P4のとき、P_iをP3の管内圧力、P_oをP4の管内圧力とする）。また、文献の中で、管内圧力が正確に測定されなかったとする記述がされているデータは排除している。

このように、対象となるデータを抽出した結果、本調査における水セメント比の範囲はW/C=25.0～65.0%となり、このデータをW/Cの区分と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－2に示すようになる。データ数は、45% < W/C ≤ 65%が930件、30% < W/C ≤ 45%が74件および25% ≤ W/C ≤ 30%が171件の合計1,175件である。

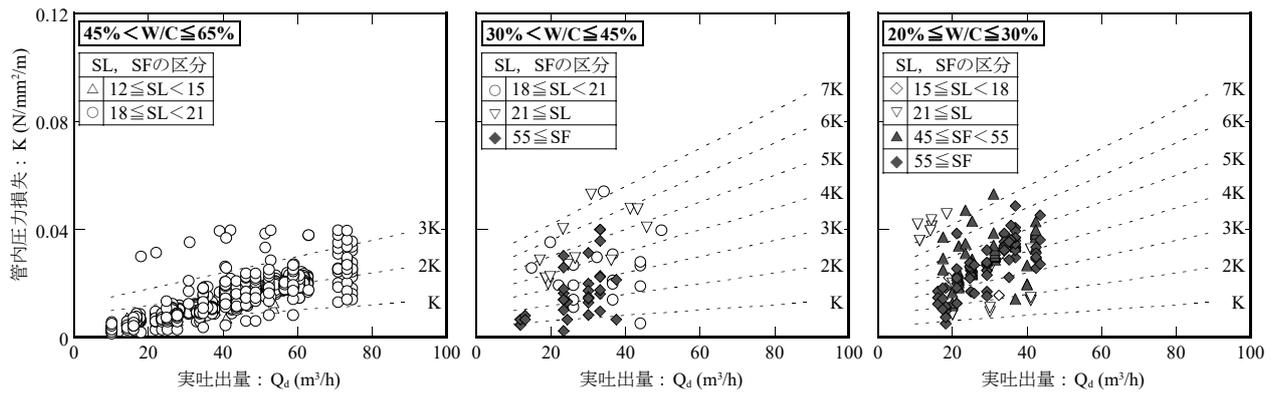


図-3 実吐出量と管内圧力損失の関係

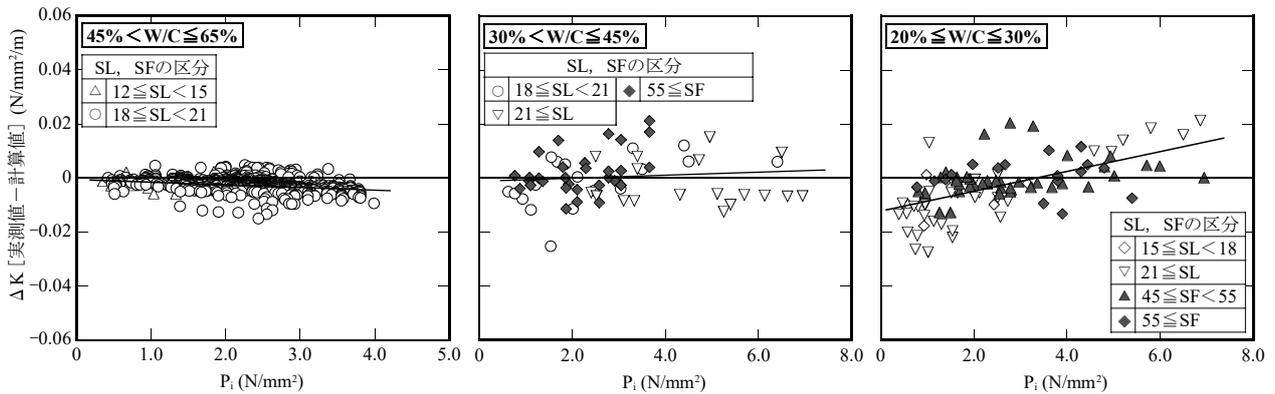


図-4 P_i と ΔK [実測値 - 計算値] の関係

本論文における吐出量は、既報²⁾と同様に、実吐出量を用いることとした。なお、文献から実吐出量を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、コンクリートの流動性とポンプ指針¹⁾および既往の研究結果を考慮して、機械効率を0.85と仮定して実吐出量を算出した。また、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. 文献調査の結果および考察

4.1 実吐出量と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-3に示す。管内圧力損失は、実吐出量が大きくなると大きくなる傾向を示し、ポンプ指針¹⁾や既報の結果²⁾と同様の傾向である。しかし、文献ごとに最長の直管部分から算出した管内圧力損失を対象とした既報²⁾の結果に比べて、いずれの水セメント比の区分においてもばらつきが大きくなっている。これは、既報²⁾に比べてデータ数が多くなっていることも要因の一つであるが、同一の調合および配管条件において測定された管内圧力損失においても、その測定位置によって管内圧力損失の値が異なることを示唆していることになる。

筆者らは、既報²⁾において、管内圧力損失と実吐出量

の関係として表-1に示す関係式をコンクリートの水セメント比、スランプ、スランプフローおよび単位水量の区分ごとに示した。ここでは、文献調査から得られた管内圧力損失の実測値と既報の関係式(表-1)²⁾から算定した管内圧力損失の計算値の差(以下、 ΔK [実測値 - 計算値]という)を算出し、 P_i と ΔK [実測値 - 計算値]の関係を図-4に示す。 ΔK [実測値 - 計算値]は、 $45\% < W/C \leq 65\%$ のとき、若干のばらつきがあるものの、 P_i にかかわらず概ね一定の値を示し、既報の関係式²⁾が実測の管内圧力損失を概ね精度良く表現できているといえる。一方、 $30\% < W/C \leq 45\%$ および $25\% \leq W/C \leq 30\%$ のとき、 ΔK [実測値 - 計算値]は、 $45\% < W/C \leq 65\%$ に比べてばらつきが大きくなる傾向を示した。また、 $25\% \leq W/C \leq 30\%$ の ΔK [実測値 - 計算値]は、 P_i が小さいとき計算値の方が大きく、 P_i が大きいとき実測値の方が大きくなる傾向を示した。すなわち、これらの結果は、 P_i が大きいと管内圧力損失も大きくなり、管内圧力損失が P_i の影響を受けることを示唆している。

4.2 管内圧力に依存する管内圧力損失の検討

4.1の結果より、管内圧力損失は、実吐出量や水セメント比、スランプ、スランプフローおよび単位水量のみならず P_i も影響を受けることが示唆され、特に、 $25\% \leq$

W/C ≤ 30% のとき、その傾向が顕著であった。そこで、ここでは、W/C ≤ 45% のデータについて、すべり抵抗力がすべり速度に比例するモデルに加え、垂直応力（管内圧力）にも影響するモデルで検討することとした。

一般的に、すべり抵抗力は、すべり速度に比例する (1) 式で表される。

$$f_R = \eta v + \tau \quad (1)$$

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。しかし、4.1 の結果からも明らかのように、管内圧力損失が P_i （管内圧力）の影響を受けることを考慮し、ここでは、すべり抵抗力を (2) 式によって表現した。

$$f_R = \mu P_x + \eta' v + \tau' \quad (2)$$

ここに、 μ ：動摩擦係数、 P_x ：管内圧力である。

直管における管内圧力損失は、図-5 に示すような釣り合いと考えると、(3) 式のように表すことができ、(3) 式に (2) 式を代入して、微分方程式を解くと (4) 式となる。ここで、図-6 に示すように P_i の測定位置を起点とし、 $x=0$ のとき $P_x=P_i$ 、 $x=\Delta x$ のとき $P_x=P_o$ として (4) 式に代入すると、(5) 式が得られる。

$$dP \cdot R^2 \pi = -f_R \cdot 2\pi R \cdot dx \quad (3)$$

$$P_x = C e^{-\frac{2\mu}{R}x} - \frac{1}{\mu} \left(\frac{Q}{R^2 \pi} \eta' + \tau' \right) \quad (4)$$

$$P_o = P_i \cdot e^{-\frac{2\mu}{R}\Delta x} - \frac{1}{\mu} \left(\frac{Q}{R^2 \pi} \eta' + \tau' \right) \left(e^{-\frac{2\mu}{R}\Delta x} - 1 \right) \quad (5)$$

ここに、 R ：輸送管の半径、 C ：積分定数、 Q ：吐出量、 Δx ：測定間の距離である。

一方、垂直応力（管内圧力）の影響を考慮しない (1) 式で管内における力の釣り合いを考えると、管内圧力損失は (6) 式で表すことができる。

$$K = \frac{dP}{dx} = \frac{2\eta}{R^3 \pi} Q + \frac{2\tau}{R} \quad (6)$$

ここで、 $2\eta/R^3 \pi$ および $2\tau/R$ に既報で得られた管内圧力損失と実吐出量の関係式²⁾の係数を代入し、(1) 式と (2) 式が (7) 式の関係であると考え、(5) 式は (8) 式のようになる。

$$\eta' v + \tau' = n(\eta v + \tau) \quad (7)$$

$$P_o = P_i \cdot e^{-\frac{2\mu}{R}\Delta x} - \frac{nR}{2\mu} \cdot \left(\frac{C}{W} \right)^2 \cdot (aQ + b) \left(e^{-\frac{2\mu}{R}\Delta x} - 1 \right) \quad (8)$$

ここに、 a 、 b ：既報で得られた管内圧力損失と実吐出量の関係式²⁾の係数である。

ここで、4.1 の結果より、管内圧力損失は、W/C の区分が小さいほど管内圧力の影響を受けるため、ここでは、便宜上、動摩擦係数を下式のように設定し、最小二乗法によって係数 n および m を算出した。

$$\mu = m \cdot (C/W)$$

その結果、係数 n および m はそれぞれ $n=0.56$ および $m=0.48 \times 10^{-4}$ となり、 $R=0.0625\text{m}$ として (8) 式に代入すると (9) 式となる。

$$P_o = P_i \cdot e^{-\alpha \Delta x} + (a'Q + b') \cdot \left(\frac{C}{W} \right) \cdot (e^{-\alpha \Delta x} - 1) \quad (9)$$

ここに、 α ： $1.536 \times 10^{-4} \cdot (C/W)$ 、 a' および b' ：スランプ、スランプフローおよび単位水量による係数（表-4）で

表-4 スランプ、スランプフローおよび単位水量による係数

W/C (%)	SL, SF	単位水量 (kg/m ³)	a'	b'
25 ≤ W/C ≤ 45	SL	160 ≤ W < 165	0.0492	0.1116
		170 ≤ W < 175	0.0303	
	SF	175 ≤ W ≤ 185	0.0288	0.1014
SF	165 ≤ W < 170	0.0259	0.1014	
	SF	170 ≤ W < 175		0.0241

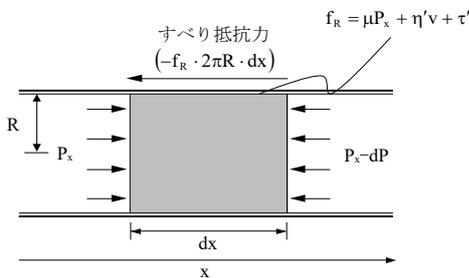


図-5 管内における力の釣り合い

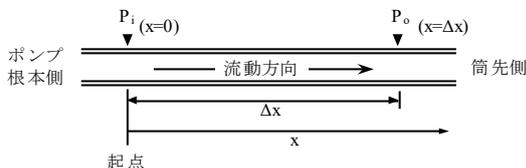


図-6 P_i の測定位置を起点とした位置関係

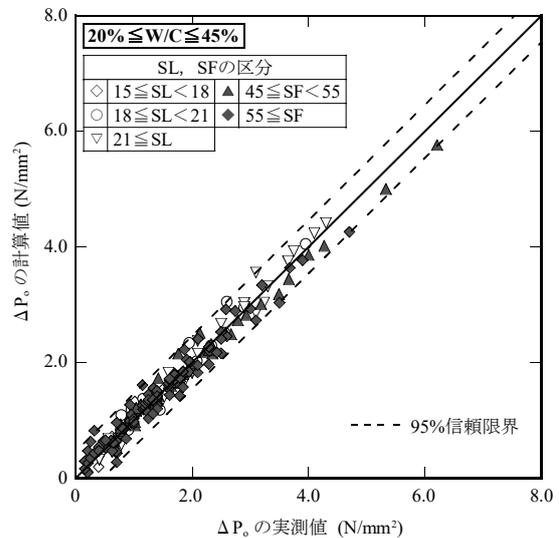


図-7 P_o の実測値と計算値の比較

ある。

なお、これまでの検討では、表現を簡単にするためビンガム流動による流量は考慮していない。しかし、ビンガム流動による流量が支配的であると考えられる高流動コンクリートなどの流動性が高い場合においても実吐出量と同一調査および同一位置において測定された管内圧力損失の関係には比例関係が成立⁷⁾するため、表現に多少の違いはあるもの、管内における抵抗力が流量（吐出量）に比例する考え方でビンガム流動による流量も包括

できていると考えられる。

4.3 管内圧力の計算値と実測値の比較

ここでは、文献調査から得られた P_i を (9) 式に代入して求めた P_o の計算値（以下、 P_o の計算値とする）と文献調査から得られた P_o （以下、 P_o の実測値とする）を比較した。 P_o の計算値と P_o の実測値の関係を 図-7 に示す。 P_o の計算値は、概ね精度良く管内圧力を推定できていると考えられ、 P_o の計算値と実測値の差は、概ね $\pm 0.4\text{N/mm}^2$ の範囲に収まっている。

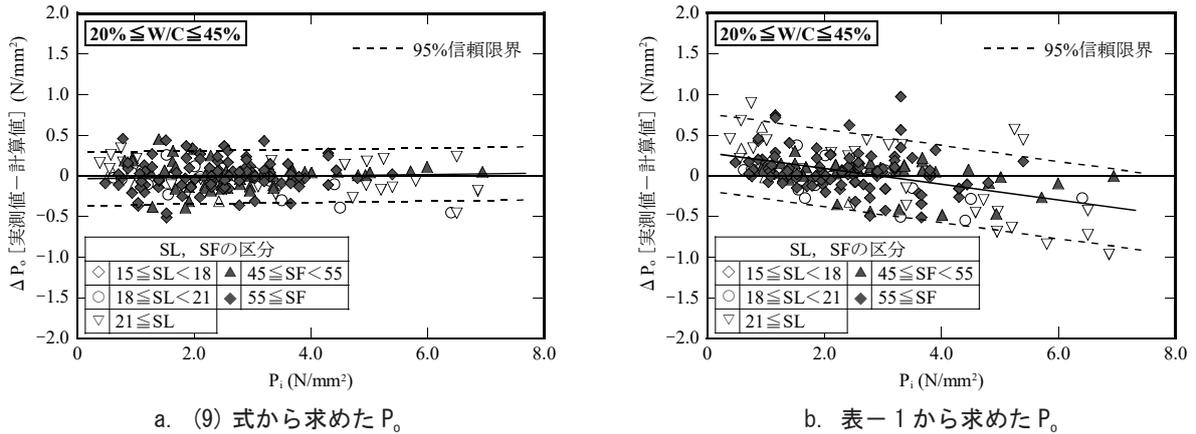


図-8 P_i と ΔP_o [実測値 - 計算値] の関係

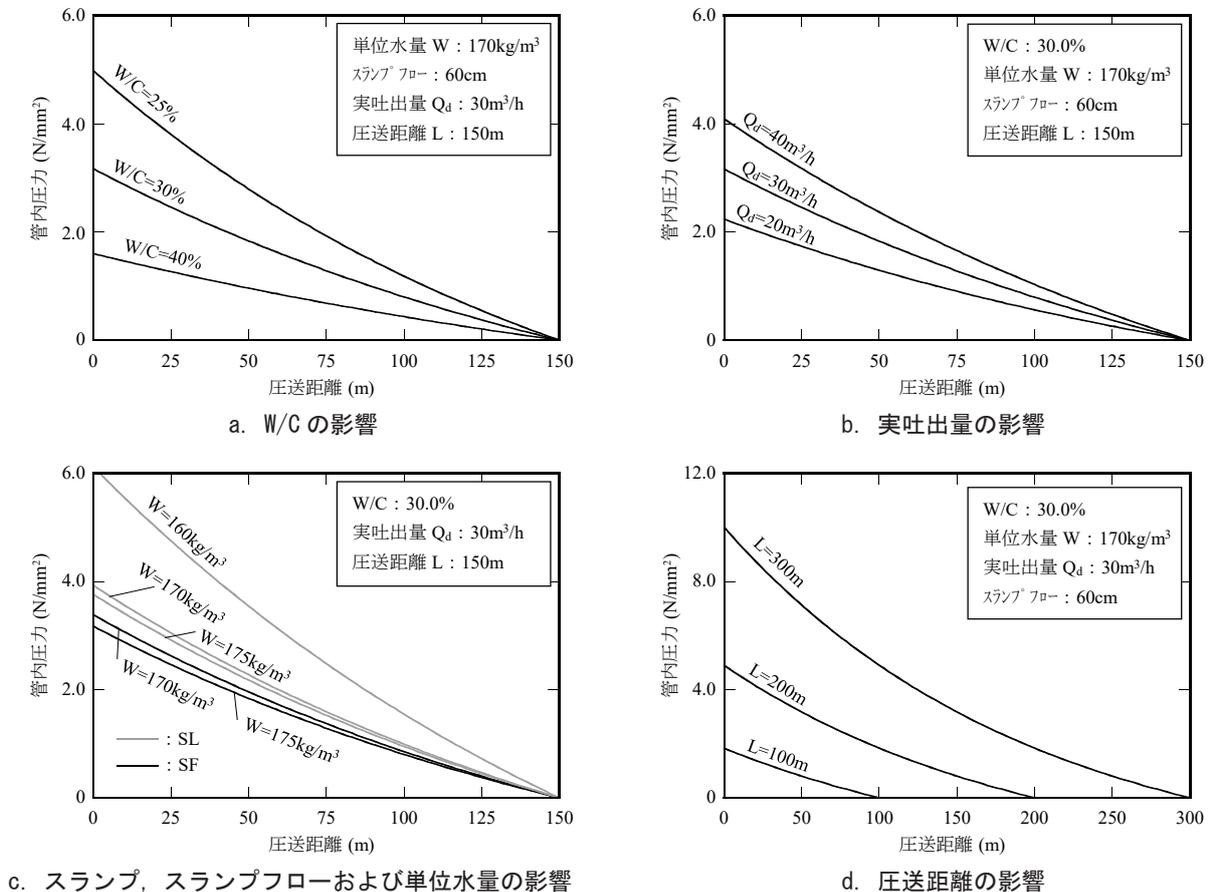


図-9 圧送距離と管内圧力の一例

P_i と P_o の実測値と計算値の差（以下、 ΔP_o [実測値 - 計算値] という）を図-8に示す。ここでは、(9)式から求めた ΔP_o [実測値 - 計算値] に加え、比較用として既報の調査結果（表-1）²⁾ から算出した ΔP_o [実測値 - 計算値] についても示している。 ΔP_o [実測値 - 計算値] は、垂直応力（管内圧力）の影響を考慮しない従来の算定方法であると P_i が大きくなるに伴い小さくなる傾向を示している。これは、 P_o の実測値より計算値の方が大きくなる、すなわち管内圧力損失を実際よりも小さく算定されていることになる。一方、垂直応力（管内圧力）を考慮した(9)式から求めた ΔP_o [実測値 - 計算値] は、 P_i にかかわらずほぼ同等の値を示している。これより、管内圧力損失が調合条件および吐出量のみならず、垂直応力すなわち管内圧力にも依存することを文献調査により確認し、管内圧力や圧送距離の影響を考慮した圧送圧力の算定ができたといえる。

(9)式を P_i について解き、筒先を $P_o = 0\text{N/mm}^2$ とすると(10)式になる。また、(10)式を用いて圧送距離と管内圧力の関係を図示すると図-9のようになる。

$$P_i = (a'Q + b') \cdot \left(\frac{C}{W} \right) \cdot (e^{ax} - 1) \quad (10)$$

ここでは、一例として、高強度コンクリート（W/C：30.0%、単位水量：170kg/m³、SF：60cm）で実吐出量：30m³/hを基準として、W/C、実吐出量、調合条件および圧送距離の影響について示している。本研究から得られた圧送距離と管内圧力の関係は e 関数の曲線となり、高強度コンクリートなどの粘性が高いコンクリートのとき、圧送距離が長くなる場合や W/C が小さくなる場合には、従来の管内圧力損失が配管根元から筒先まで一定であるとする圧送負荷の算定方法に限界があると考えられる。特に、管内圧力は、圧送距離に比例しないため、圧送距離を考慮した圧送負荷の算定が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究は、高強度コンクリートを対象とし、管内における抵抗力が垂直応力すなわち管内圧力にも依存することを文献調査により確認し、管内における抵抗力が管内圧力に依存するモデルを用いてコンクリートの調合条件から圧送圧力を検討したものである。その結果、得られ

た知見を以下に示す。

- (1) 管内圧力損失は、調合条件および吐出量のみならず、垂直応力（管内圧力）の影響を受け、この傾向は W/C の区分が小さいほど顕著であった。
- (2) 管内における抵抗力が管内圧力に依存するモデルによって、従来の管内圧力損失が配管根元から筒先まで一定であるとする考え方よりも精度よく水平直管の圧送圧力を表現できることが明らかとなった。

謝辞

本文献調査は、多数の文献を引用させていただいた。執筆者の方々に敬意を表すとともに、多数の貴重な研究が公表されていることに感謝いたします。

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，2009.2
- 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，Vol.83，No.751，pp.1217-1227，2018.9
- 3) 野田豊，谷川恭雄，森博嗣：フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する理論的考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.13，No.1，pp.203-208，1991
- 4) 例えば，谷口秀明，増田和機，牛島栄：高流動コンクリート管内圧力抵抗に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.10，No.1，pp.25-39，1999.1
- 5) 例えば，鈴木忠彦：セメント量が多いコンクリートの150m直線水平圧送検討報告（単位水量が増加する海砂使用の場合），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.193-194，1993.9
- 6) 例えば，黒岩秀介，早川光敬，渡辺健治，陳内浩：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，Vol.18，No.1，pp.261-266，1996
- 7) 例えば，寺内利恵子，早川光敬，陳内浩，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