

論 文

[1031] 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

正会員 谷川恭雄（名古屋大学建築学科）

同 森 博嗣（名古屋大学建築学科）

同 ○野田 豊（三重大学大学院）

1. まえがき

コンクリートのポンプ圧送技術は、その打設効率と経済的効率により昭和40年代に急速に発展し、現在では、ポンプ工法が建築・土木工事に広く普及し、一般的な工法としての地位を確立している。しかし、フレッシュコンクリートのコンシスティンシー、あるいはレオロジー性質とポンプ圧送性状を理論的に関連づけ、実施工における圧送能率を予測する方法はまだ確立されていない[1-3]。

本研究では、フレッシュコンクリートの管内流動の性状を、レオロジー的な立場から検討し、コンクリートの各種物理性質が管内圧送性に与える影響を考察する。本研究の特徴は、フレッシュコンクリートと管内面のすべり（摩擦）抵抗力の表現に、すべり速度および管内圧力の双方に依存するモデルを用いることにある。

2. せん断層流のレオロジー理論

円形断面の細管内における層流理論では、境界条件として、流体と管内面の間にすべりが生じないことを仮定している。一般に、降伏値を有するビンガムモデルを用いた場合の流速は、表-1中の式(1)で表される。但し、式(1)が成立するのは、 $r > r_0 = 2 \tau_y L / P$ （ここに、 r_0 ：栓流半径）の場合であり、この栓流（plug flow）半径 r_0 より内側では、せん断変形が生じない栓流となる（図-1参照）。つまり、 $r_0 > R$ の場合には、流体の相対変形が生じず完全栓流となる。また、ビンガムモデルの流量 Q_v は、式(1)を積分した表-1中の式(2)で表される。

3. 管壁に生じるすべり抵抗力

既往のコンクリートの管内圧送理論[1, 2]では、管壁のすべりによる全体栓流が想定されていることが多い。つまり、前述のコンクリートのせん断変形性質を支配するレオロジー定数ではなく、すべり抵抗性質によって、圧送量と圧力損失の関係が求められている。

すべり抵抗力に影響を及ぼす要因は、すべり速度およびすべり面の垂直応力であり、これらは表-1中の式(3)および式(4)で表現されている。式(3)は、ポンプ圧送性に関する理論的研究においてよく用いられるもので、すべり抵抗力がすべり速度と比例しているため、流量と圧力損失の

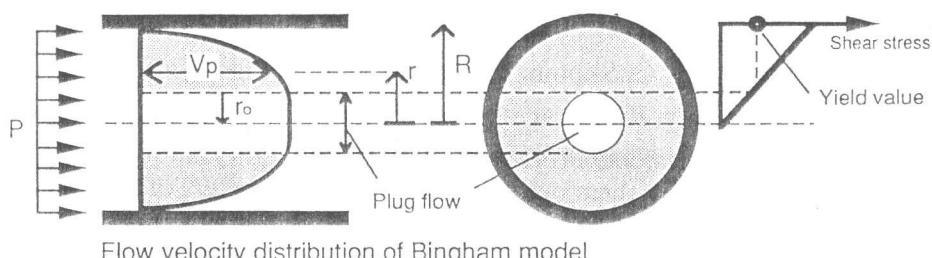


図-1 円形断面の細管内におけるビンガムモデルのせん断層流

線形比例を表現することができる。しかし、一方では、フレッシュコンクリートと他材料の壁面のすべり抵抗力は、式(4)の垂直応力との線形比例式で表現されることも多い。式(4)で表現されるすべり抵抗力を、ポンプ圧送の理論に用いると、すべり抵抗力は、速度に依存せず、圧力損失と流量は比例関係になるとする実験結果が説明できない。ところが、既往の実験的研究[4]によれば、圧送距離が長い場合と短い場合で、圧送管の手元の圧力損失が大きく異なる場合があり、管内圧力が大きい部分で抵抗が増大する現象は、式(3)では表現できないが、式(4)を用いると表現することができる。

地点 x における圧力 P_x と地点 $x + dx$ における圧力 P_{x+dx} の差、すなわち圧力損失 dP は、管内流動が等速度運動であるなら、表-1 中の式(5)のように(試料がせん断変形していても)管壁のすべり抵抗力と釣り合っている(図-2 参照)。式(5)に式(4)を代入して式(6)とし、フレッシュコンクリートが非圧縮性であり、管内圧力が方向に依存しないと考え、 $\sigma_n = P_x$ を式(6)に代入すると式(7)が得られる。式(7)の x に関する微分方程式の解は、式(8)のようになる。

式(8)を用いて管全体の圧力分布が推定できる。また、逆に、 $P_x = 0$ を代入して、 x を解けば、

表-1 本理論で用いた関係式

$V_p = \frac{P(R^2 - r^2)}{4L\eta} - \frac{\tau_y(R-r)}{\eta}$ — (1)	$Q_v = \frac{\pi PR^4}{8L\eta} \left(1 - \frac{4r_0}{3R} + \frac{1}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right)$ — (2)
$\sigma_h = \eta_s \beta + \tau_s$ — (3)	$\sigma_h = \mu_s \sigma_n + C_s$ — (4)
$dP \cdot R^2 \pi = -\sigma_h \cdot 2\pi R \cdot dx$ — (5)	$dP = -\frac{(\mu_s \sigma_n + C_s) \cdot 2 \cdot dx}{R}$ — (6)
$\frac{dP}{dx} = -\frac{2}{R} (\mu_s P_x + C_s)$ — (7)	$P_x = \lambda e^{-\frac{2\mu_s x}{R}} - \frac{C_s}{\mu_s}$ — (8)
$\sigma_h = s_1 \sigma_n \beta + s_2 \beta + s_3 \sigma_n + s_4$ — (9)	$\sigma_n = P_x + \frac{dP}{2}$ — (10)
$\frac{dPR}{2dx} = \left\{ s_1 \left(P_x + \frac{dP}{2} \right) + s_2 \right\} \beta + \left\{ s_3 \left(P_x + \frac{dP}{2} \right) + s_4 \right\}$ — (11)	
$\beta = \frac{\frac{dPR}{2dx} - \left\{ s_3 \left(P_x + \frac{dP}{2} \right) + s_4 \right\}}{s_1 \left(P_x + \frac{dP}{2} \right) + s_2}$ — (12)	$Q_s = \beta R^2 \pi$ — (13)
$\sigma_h = \frac{R \cdot dP}{2dx}$ — (14)	$\sigma_h = \frac{K \cdot R}{2}$ — (15)
$\tau_y' = \frac{K \cdot R}{2}$ — (16)	$Q = Q_s + Q_v$ — (17)
$Q_v = f \left(\frac{dP}{dx} \right)$ — (18)	$\beta = f \left(\frac{dP}{dx} \right)$ — (19)

[Notes] β :Slipping velocity, C_s :Slipping cohesive stress, η :Plastic viscosity,
 η_s :Slipping plastic viscosity, K :Average loss of pressure, L :Length of pipe,
 μ_s :Slipping frictional coefficient, P :Pressure, Q :Quantity, Q_s :Quantity by slip deformation, Q_v :Quantity by shear deformation, $s_1 \sim s_4$:Parameters of slipping behavior, σ_h :Slipping resistance stress, σ_n :Normal stress, τ_s :Slipping yield value, τ_y :Yield value, τ_y' :Maximum yield value, V_p :Flow velocity

P_θ と圧送可能距離の関係が求められる。以上が、式(4)を用いた場合の流動理論であり、管内圧力は、 e 関数で表されるので、単位長さ当たりの圧力損失(当然、 e 関数となる)は一定でない。

次に、表-1中の式(3)および式(4)を複合した式(9)を用いて、管内圧力に加えてすべり速度にも依存したすべり挙動を導入する。式(9)は筆者らの提案式[5]であり、既に、各種コンクリートについて、式中の4つの材料定数の測定結果を報告している[6,7]。地点 x における圧力 P_x と地点 $x+dx$ における圧力 P_{x+dx} の差、すなわち圧力損失 dP を用いて、この区間の管壁に働く平均的な垂直応力を考える。せん断層流が生じず、流量がすべりのみで決定される場合は、すべり速度 β が一定であるので、前述のように、微分方程式を解くことができ、 $\sigma_n = P_x$ としてもよい。しかし、せん断層流を考える場合には、すべり量は x の関数となるので単純に方程式を解くことができない。ここでは、数値積分を想定し、その精度上、表-1中の式(10)のように仮定した。

表-1中の式(9)で示される σ_h と、式(10)で表される σ_n を、式(5)の釣合式に代入すると式(11)が得られ、式(11)を β について解くと式(12)となる。結局、すべりによる流量 Q_s は、式(12)の β を用いて、式(13)のようになる。式(12)において $\beta < 0$ となる場合は、すべりが発生しない場合であり、 $\beta = 0$ となる。

式(5)より、式(14)が得られ、単位長さ当たりの圧力損失 $K = dP / dx$ を用いれば、式(15)のような表現になる。また、せん断層流が発生する限界降伏値 τ_y' も、同様に、式(16)のようになる。実際には、 K の値は、 $0.05 \sim 0.30 \text{ kgf/cm}^2/\text{m}$ とされている。つまり $0.5 \sim 3 \text{ gf/cm}^2/\text{cm}$ となり、 $R = 5 \text{ cm}$ で管壁に働くせん断力は、 $1.25 \sim 7.50 \text{ gf/cm}^2$ の範囲になる。通常、ポンプ圧送に用いられるような軟練りコンクリートの降伏値 τ_y は、 $1.0 \sim 4.0 \text{ gf/cm}^2$ 程度の範囲であり、上記の値より小さい場合が多い。つまり、コンクリートがせん断変形せずに、完全栓流で送られているとは考えにくい。コンクリートがせん断変形で流れているならば、すべり速度だけで流量を求めることができない。

4. せん断層流もすべりも同時に起こる流動

圧力損失は、管壁のすべり抵抗力による反力で支えられている。この反力を生じさせるのに必要なすべり速度がこれより求められる(すべり速度が0となることもある)。すべり速度よりすべりによる流量 Q_s が求められる。また、圧力損失は、すべりとは無関係にコンクリートをせん断変形させようとするので、降伏値を超える部分が流動し、せん断層流による流量 Q_v が決定される。つまり、全体の総流量 Q は表-1中の式(17)のように、これらの合計となる。

ビンガムモデルで表現される Q_v は、圧力損失に単純に比例するが、 Q_s は、圧力そのものの影響

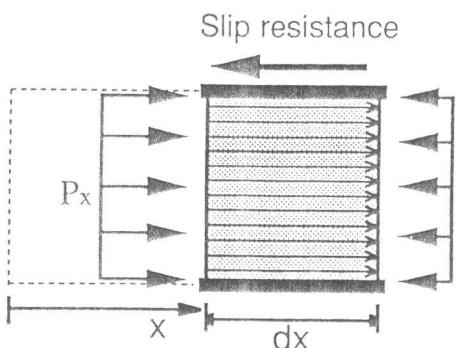


図-2 管内における圧力損失とすべり抵抗力の釣り合い

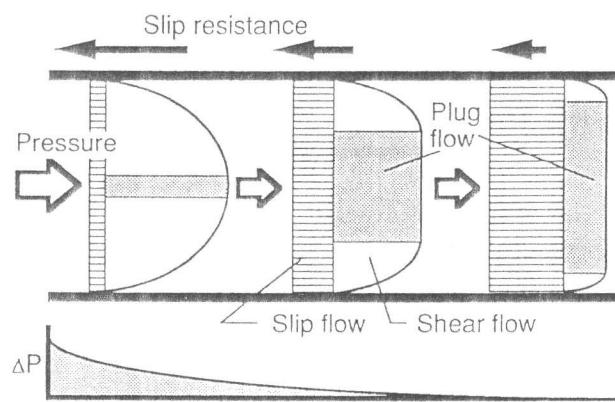


図-3 管内における流動モードの変化

を受けるので、圧送管の筒元と筒先では、 Q_s が異なる場合が生じ、 Q を一定に保つために、 Q_v が変化する。以上の現象は、図-3に示すように、流動のモードが圧送管の中で、順次変化することを意味する。すなわち、管の筒元では、比較的せん断層流による流動が生じ易く、筒先に行くほど、すべりによる移動が大きくなる。

5. 圧力損失の解析手順

表-1中の式(2)は、 $d x$ 区間では、 $P/L = dP/dx$ が成立するので、式(18)のような関数として表現できる。また、総流量 Q が決まっているれば、式(17)より Q_s を、 dP/dx の関数として表現でき、式(13)に代入してすべり速度 β を同様に式(19)のように表現できる。得られた式(19)を式(11)に代入すれば、 β が消去され、 P の x に関する3次微分方程式が成立する。

ここでは、簡単のため、数値計算を行った。計算では、管の筒先を起点 ($x = 0$, $P_0 = 0$) として、微小な $d x$ で筒元方向に前進し、 dP に関する収束計算によって管軸方向の圧力分布を求めている。解析の入力データとして、既報[7]を参考にコンクリートの平均的なレオロジー定数（表-2参照）を用いた。但し、すべり抵抗力を表現するレオロジー定数に関しては、管内流動を想定した高液圧下の実験データは報告されていないので、ここでは仮の値を用いる。

6. 解析結果とその考察

図-4～図-6に計算で得られた管内圧力分布曲線およびすべり率曲線を示す。すべり率 (Q_s/Q) とは、全体流量 Q に対するすべりによる流量 Q_s の比である。圧力分布の曲線は、下に凸の形状となり、管の筒元で大きな圧力損失が生じることを示している。

図-4は、流量を変化させたときの影響を示している。同じ長さを圧送する場合、流量を増加させるためには、必要なポンプ

表-2 解析に用いたレオロジー定数の入力値

Yield value τ_y (gf/cm ²)	Plastic viscosity η (kPa·s)	Slip resistance parameters			
		S1	S2	S3	S4
1.0-10.0	0.04-0.30	0.0	0.005	0.0	0.0

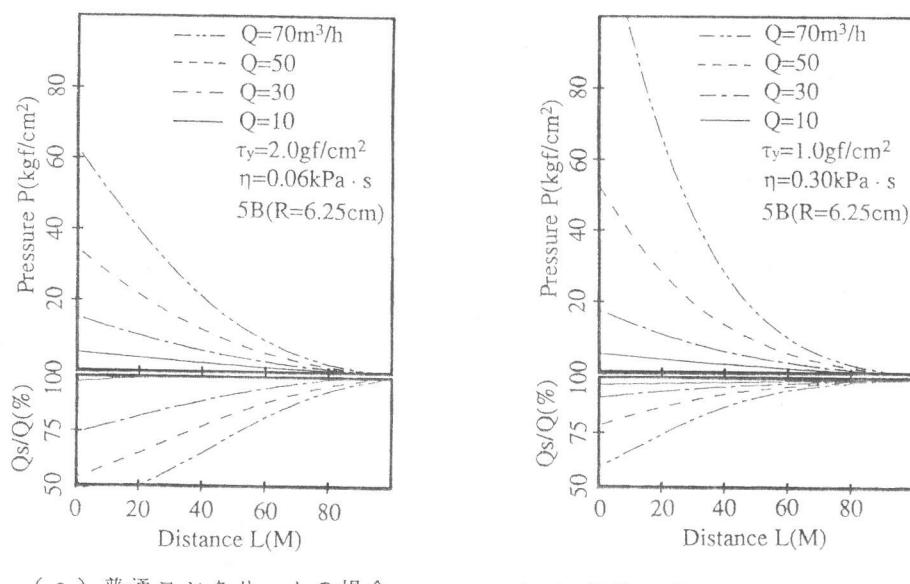


図-4 流量による圧力分布への影響

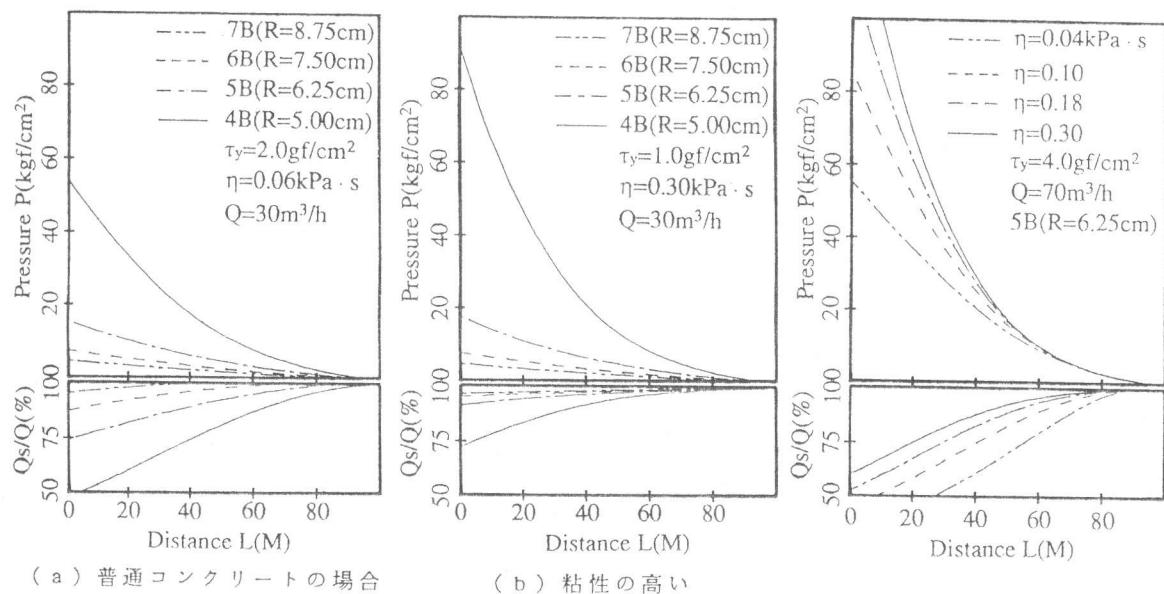
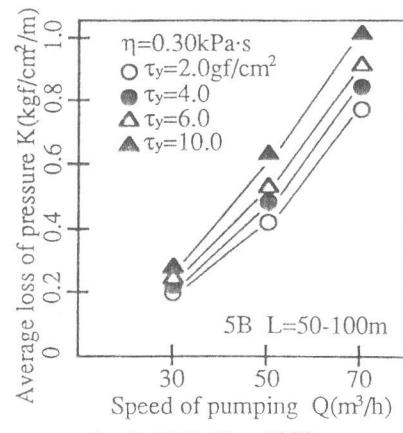


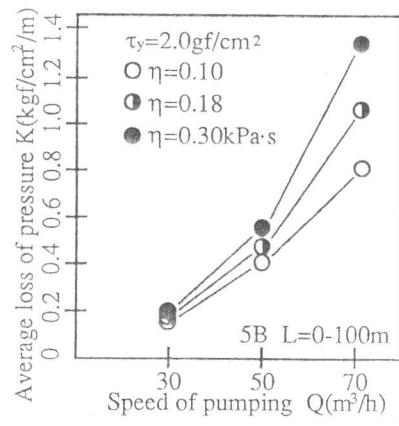
図-5 管径による圧力分布への影響

コンクリートの場合

図-6 塑性粘度が
圧力分布に及ぼす影響



(a) 降伏値の影響



(b) 塑性粘度の影響

図-7 単位長さあたりの圧力分布 K と流量 Q の関係

圧力が大きくなるが、圧送距離が長くなるほど、また、コンクリートの粘性が高くなるほど急激な増加傾向を示している。また、流量が増加するにしたがって、筒元のすべり率が低下しており、コンクリートのコンシスティンシーに支配されるせん断層流の割合が増加している。図-5は、管径を変えた場合の流动状況である。管径が、ある程度より小さくなると圧力損失が急速に大きくなる。図-6は、コンクリートの塑性粘度 η の影響を示したものである。レオロジー定数の増加にともなって、筒元での圧力損失が増大する。なお、解析結果では、コンクリートの粘性が高くなるほど、すべり率は増加するが、一般に、高粘性のコンクリートでは、すべり抵抗性も高粘性を呈するので、実際の現象は、レオロジー定数のバランスに依存するものと思われる。

図-7は、単位長さ当たりの平均圧力損失と流量の関係に与えるレオロジー定数の影響を示したものである。図-8は、すべり抵抗係数 $s_1 \sim s_3$ の影響を示したものである。 s_1 は、すべり速度およびすべり垂直応力の双方にかかる係数であり、 s_2 、 s_3 の影響より、 s_1 の影響の方が大きい。図-9は、単位長さ当たりの平均圧力損失と平均した区間をすべり抵抗係数(s_1)別に示したものである。この計算例では、 s_1 の増加にともなって、圧送距離の増加による圧力損失の増加傾向が大きくなり、高粘性のコンクリートとの差が顕著となる。

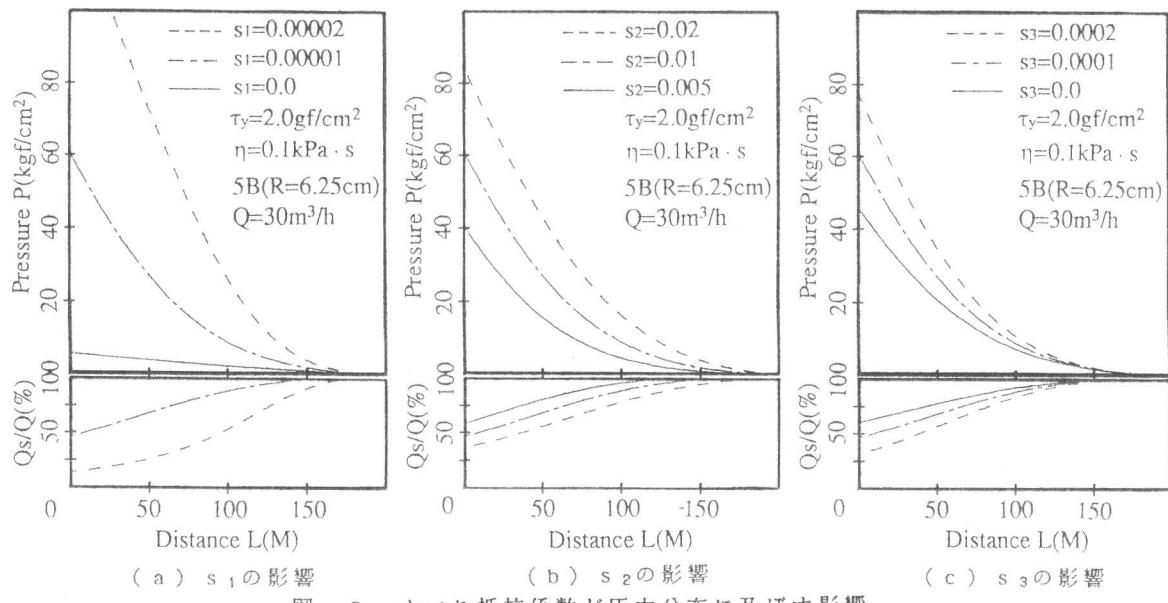


図-8 すべり抵抗係数が圧力分布に及ぼす影響

7.まとめ

本研究では、すべり速度および管内圧力に依存するすべり抵抗モデルを用いて、フレッシュコンクリートの管内流動性状の解析を行った。本研究で得られた知見は、次の3項目にまとめられる。①管内圧力に依存するすべり抵抗モデルを導入することによって、管の筒元の圧力損失が大きくなる現象を説明することができる。②圧送管の筒元から筒先にいたる間で、コンクリートの流動モードは一定ではない。これらは、コンクリートのレオロジー定数とすべり抵抗挙動のレオロジー定数のバランスによるが、一般に、すべり量は筒先に行くほど大きくなる。③圧送距離が長く、圧送量が大きくなるほど、コンクリートのコンシスティンシーの影響が大きく現れる。

[謝辞]

本研究費の一部は、平成2年度科研費・奨励研究(A)、同一般研究(B)、ならびに1990年度セメント協会研究奨励金によった。付記して謝意を表する。

[引用文献]

- 1) 村田二郎・鈴木一雄: セメント系混合物の管内流動のレオロジー解析とその応用、セメント技術年報、Vol.38、pp.210-213、1984.
- 2) 烏田専右ほか: コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究、日本建築学会論文報告集、No.177、pp.1-5、1970.
- 3) 山根昭ほか: コンクリートポンプの圧送負荷の算定、竹中技研報告、No.19、pp.36-45、1978.
- 4) 竹内研一ほか: 高強度コンクリートの高所圧送性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.281-284、1990.
- 5) 森博嗣・谷川恭雄: フレッシュコンクリートの構成則に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.396、pp.9-16、1989.
- 6) 谷川恭雄ほか: フレッシュコンクリートの構成則に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.2、pp.331-336、1988.
- 7) 谷川恭雄ほか: 低水セメント比のフレッシュコンクリートのすべり抵抗挙動に関する実験的研究、日本建築学会学術講演梗概集、A、pp.853-854、1990.

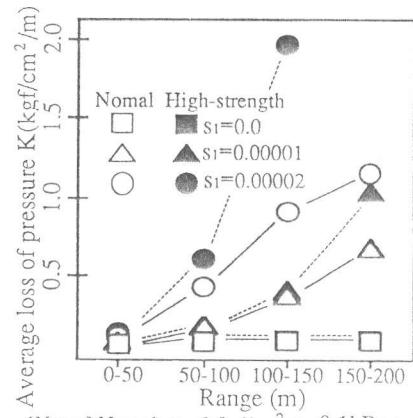


図-9 s_1 の値が各区間の平均圧力損失に及ぼす影響