

コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究

森 永 繁
成 田 一 徳
高 木 隼 二
高 田 博 尾
鳥 田 専 右

§ 1. まえがき

コンクリートポンプはこの数年のうちに急速に普及したが、ポンプによる圧送技術はまだ経験的な域を出ず、管内でのコンクリートの流動状態、管内圧、圧送限界およびこれらと調合との関連等についてはまだ不明な点が多く、明確な技術的資料に基づいた工事計画をたてるまでには到っていない。

これらの問題を基礎的に解明するために本稿では、まずまだ固まっていないモルタル、コンクリートのレオロジー的性質を調査し、その結果に基づいて管内の流動状態および圧送圧を表わす基本式を導くとともに、実際のポンプを使用した実験結果との関連を検討した。

§ 2. まだ固まっていないモルタル、コンクリート等のレオロジー的性質

2.1 実験装置

高分子材料の粘度測定に使用されている回転粘度計を参考に、図-1に示すような粘度計を試作して使用した。すなわち試料を入れた容器の中心部に十字形のベーンをとりつけ、ひもで吊るした重錘により、滑車、巻取りドラム、2個のギアを経てベーンの軸にモーメントを

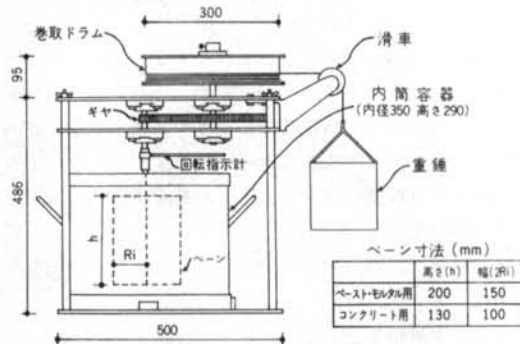


図-1 回転粘度計

加えた。ベーンはペースト、モルタル用とコンクリート用で大きさを変え、それぞれ図-1に示す寸法のものを使用した。

2.2 試料

使用した試料の調合はできるだけ広範囲にわたるよう選んだ。特にコンクリートの場合はポンプで使用されると思われる範囲の調合はすべてカバーできるように留意した。

- ペーストの場合は水セメント比、混和剤(材)の種類、および混和率を変えたもの約40種類
- モルタルの場合は混和剤、砂の粒度および調合比を変えたもの約20種類
- コンクリートの場合は粗骨材の種類、混和剤(材)、スランプおよび細骨材率を変えたもの約60種類

2.3 実験結果

重錘の重さを数段階に変化させることによりベーンにかかるモーメント M を変化させて、その時のベーン回転角速度 $\dot{\Omega}$ を測定した。その結果図-2に示すような流動曲線が得られ、まだ固まっていないモルタル、コンクリート等は降伏値 ψ 、可塑性粘性 η_{pl} を有するビンガム

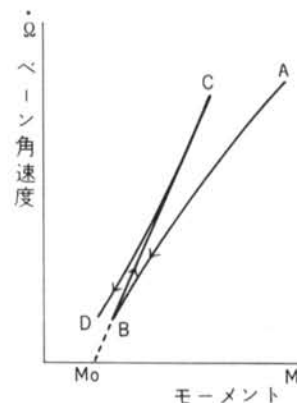


図-2 流動曲線

ポデーとして扱えることが分った。これらの流動曲線はモーメント M の増大、減少をくり返すと図-2に示すようなヒステリシスを画く。しかし2回目以後のサイクルでは流動曲線は比較的安定し、しかもほぼ直線を示すのでBCを M 軸まで延長し M_0 を求め、次式に従って ϕ 、 η_{pl} を算出した。次式を導くにあたり試料はベーンの回転によって円筒状にせん断されると仮定した。

$$\phi = \frac{M_0}{\log R_e/R_t} \cdot \frac{1/R_t^2 - 1/R_e^2}{4\pi h} \quad \dots(1)$$

$$\eta_{pl} = \frac{M - M_0}{\dot{\Omega}} \cdot \frac{1/R_t^2 - 1/R_e^2}{4\pi h} \quad \dots(2)$$

ここに R_t =ベーン半径、 R_e =円筒容器半径、 h =ベーンの高さである。

実験によると ϕ と η_{pl} の関係は図-3、図-4に示すようになる。ペースト、モルタルの場合は ϕ の増大にともない η_{pl} も一般に増大する傾向にあるが、コンクリートの場合は ϕ の増大にかかわらず η_{pl} はある一定した範囲内にある。 ϕ 、 η_{pl} が調合によりどのように変化するかは以下の論に直接の関係はないのでここでは触れないことにする。

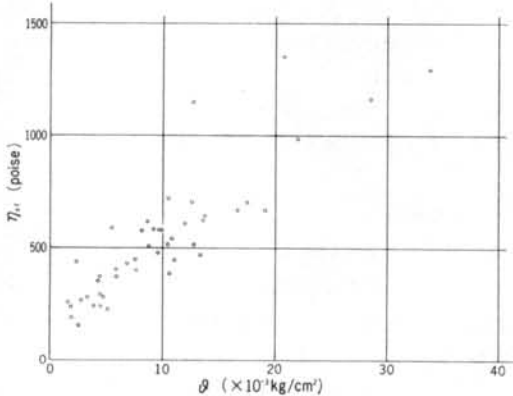


図-3 ペースト、モルタルの ϕ と η_{pl} の関係

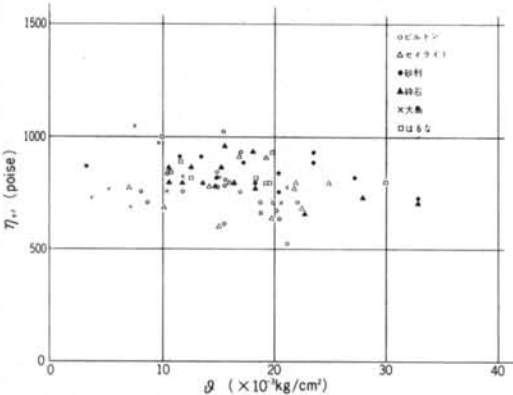


図-4 コンクリート ϕ の η_{pl} の関係

§ 3. 管内の流動状態および管内まさつ力

3.1 管内の流動状態

ビンガムポデーの流動方程式は

$$p_t = \phi + \eta_{pl} \cdot \dot{e}_t \quad \dots(3)$$

で表わされる。ここに \dot{e}_t はずりせん断速度、 p_t はその面に生じているせん断応力度である。このような性質を持った材料の管内における流動は管の中央部に固体栓を形成した栓流となり、この固体栓の半径 r_p は、管内の単位長さあたりの圧力損失を ΔP とすると

$$r_p = 2\phi/\Delta P \quad \dots(4)$$

で表わされる。図-4に示したように、一般に使用されるコンクリートの ϕ は小さいものでも 0.005kg/cm^2 以上で大部分は 0.010kg/cm^2 以上である。一方 ΔP は§7で示すように、使用するポンプの機種、配管径にもよるが高々 $0.10\sim 0.20\text{kg/cm}^2/\text{m}$ である。これらの数値を(2)式に代入して固体栓半径を求めると、現在使用されている最大の管と考えられる6"管を使用した時も、実用的な範囲では管の全断面が固体栓となっていることを証明することができる。

したがってコンクリートが管内を流動する時は、コンクリートが管壁と接する面で滑りを生じながら固体栓が移動して行くものと考えられる。このことは圧送されてくるコンクリートを管出口で観察した時の視覚的事実と一致する。

3.2 管内まさつ力

圧送圧を解析する際、上記の固体栓と管壁とのまさつ力が問題となる。まさつ力は、次のような方法で測定した。

3.2.1 実験装置と方法

図-5に示す気密な容器に入れた試料を圧縮空気によりパイプを通して押し出した。この時パイプは上記のまさつ力により試料が圧送される方向へひきずられようとする。パイプは軸方向へ自由に滑動できるようにローラー支持しておき、ひきずられようとする力をバネばかりで測定し、この力をまさつ力とした。一方パイプ出口から吐出される試料の単位時間あたりの流量を測定し管内流速を求めた。また圧縮空気の圧力を変えることにより管内流速を3段階に切り換え、その都度まさつ力および流量の測定を行なった。

試料は種々の調合の豆砂利コンクリートおよびモルタルを用いた。

3.2.2 実験結果

管内流速 v と管壁の単位面積あたりのまさつ応力度 f

との関係を 図-6 に示す。管内の試料は圧縮空気の圧力がある値にまで高まった後に初めて流動し始める。流動し始めるまでのまさつ応力は試料と管壁との粘着力に相当し、流動し始めた後ではまさつ応力は流速に比例して増大する。したがって、まさつ応力 f は一般に、

$$f = k_1 + k_2 v \quad \dots (5)$$

と表わされる。 k_1 、 k_2 は、調査や管壁の状態によって定まる定数でここではその意味から次のように呼ぶことにする。

k_1 : 粘着係数

k_2 : 速度係数

k_1 、 k_2 が調査等によってどう変化するかはここでは詳細に触れず、まだ固まっていないモルタル、コンクリート等の固体栓と管壁とのまさつ応力が(5)式で表わされることを示すのみに留める。

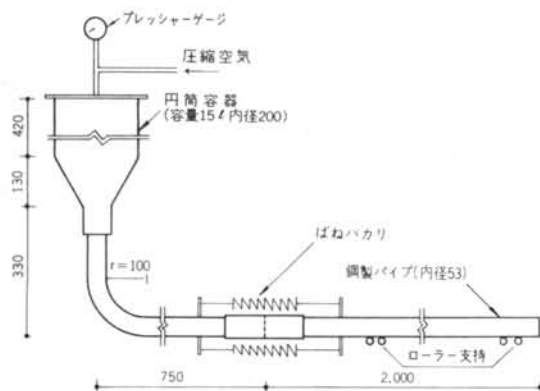


図-5 管内まさつ力測定装置

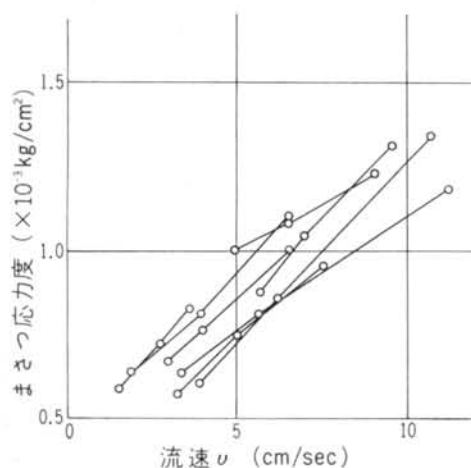


図-6 流速とまさつ応力の関係

§ 4. 直管の圧力損失

4.1 基本式の誘導

以上示したようにコンクリートが管内ではその全断面に固体栓を形成して流動すること、管壁とのまさつ応力が(5)式で表わされることを仮定すると、管内圧や圧力損失等を表わす基本式を導くことができる。

図-7 で管の半径を r とし、管の出口から x の点と、 $(x+dx)$ の点の間の部分の力のつり合いを考える。 x 点での圧力を p 、 $(x+dx)$ での点の圧力を $(p+dp)$ とすると dx 部分に働く x 方向の圧力は

$$p\pi r^2 - (p+dp)\pi r^2 = -dp\pi r^2$$

これとつり合う力は管壁のまさつ力、コンクリートが脈流するための慣性力および重力である。

管壁のまさつ力は流速を v とすれば、

$$2\pi r dx f = 2\pi r dx (k_1 + k_2 v)$$

慣性力はコンクリートの比質量を ρ とすれば、

$$\pi r^2 dx \rho \cdot dv/dt$$

重力は管の軸と水平面との傾きを ϕ 、コンクリートの比重を γ とすれば、

$$\pi r^2 dx \gamma \sin \phi$$

である。したがって、

$$2\pi r dx (k_1 + k_2 v) + \pi r^2 dx \rho \cdot dv/dt + \pi r^2 dx \gamma \sin \phi - dp\pi r^2 = 0 \quad \dots (6)$$

でありこれを整理すると、

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2}{r} (k_1 + k_2 v) + \rho \frac{dv}{dt} + \gamma \sin \phi \quad \dots (7)$$

となる。 v はコンクリートを非圧縮性のものと仮定すれば時間 t のみの関数であるから(6)式を x について積分し、 $x=0$ で $p=0$ とすれば、管の出口から x の点での圧力 p は、

$$p = \left\{ \frac{2}{r} (k_1 + k_2 v) + \rho \frac{dv}{dt} + \gamma \sin \phi \right\} x \quad \dots (8)$$

となる。

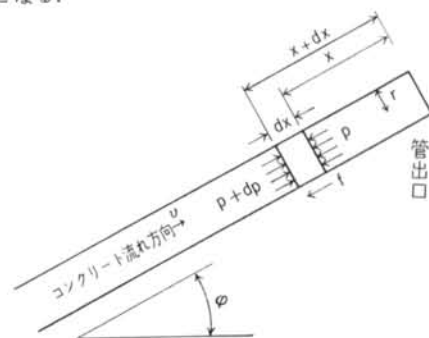


図-7 直管内の力のつり合い

4.2 流速の時間的变化

以上の式から p を求めるためには管内の流速 v を時間 t の関数で表わさなければならない。 v は使用するポンプの機種によって異なる。

a. スクイズ式ポンプの場合

§7に示す実験でコンクリートの流量 Q は、ローターの実用的な回転速度範囲内ではその回転数に正確に比例することを確かめた。したがって管内の流速 v もローターの回転に応じて変化すると考えられる。このように仮定すれば管内の流速の時間的变化はローターの回転角速度の時間的变化を知ることにより求めることができる。

ローターの回転角速度 ω を実測すると*、図-8に示すようにローターが π だけ回転するごとに ω が最小になる点と最大になる点が現われ、また ω の最小値 ω_{\min} および ω の最大値と最小値の差 $\omega_{\max} - \omega_{\min}$ はいずれもローターのその時の平均回転数 \bar{n} に比例し

$$\omega_{\min} = A \cdot \bar{n}$$

$$\omega_{\max} - \omega_{\min} = B \cdot \bar{n} \quad (A \cdot B \text{ は定数})$$

で表わされ、 B と A の比 m は実験的にほぼ0.6となる。

$$m = B/A = 0.6$$

一方 ω の時間的变化は近似的にサインカーブで表わされ上記の条件を入れると、

$$\begin{aligned} \omega &= (A \cdot \bar{n} + B/2 \cdot \bar{n}) + B \cdot \bar{n}/2 \cdot \sin 4\bar{n}\pi t \\ &= A\bar{n}(1+m/2) + A\bar{n}m/2 \cdot \sin 4\bar{n}\pi t \end{aligned}$$

となる。 A の値はローターが一周期 ($t=0 \sim 1/\bar{n}$) で 2π だけ回転することから、

$$A = 4.83$$

となる。以上から管内の流速 v はローターの有効回転半径を R_a^{**} 、ポンピングチューブの半径を a 、管の半径を r とすれば、

$$\begin{aligned} v &= R_a \omega a^2/r^2 = \{A \cdot \bar{n}(1+m/2) \\ &+ A\bar{n}m/2 \cdot \sin 4\bar{n}\pi t\} R_a C_0 \quad \dots\dots(10) \\ C_0 &= a^2/r^2 \end{aligned}$$

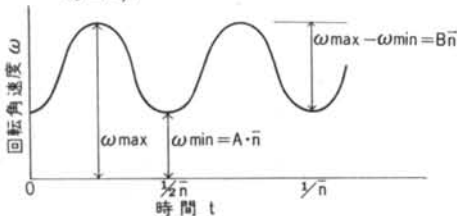


図-8 ロータの回転角速度の時間的变化

* ロータの回転腕にブラシを、ブラシの回転軌跡上に位置測定用ピックアップを等間隔に固定し、ブラシがあるピックアップから次のピックアップまで移動する時間を電氣的に測定する方法により求めた。

** $2\pi^2 a^2 R_a \bar{n} = Q$ とおき Q を実測して R_a を定めた

b. ピストン式ポンプの場合

ピストン式ポンプを使用した場合の管内流速はピストンの往復運動速度に応じて変化すると考えられるが、ピストンの速度は実測しなかった。しかし次のようなやり方で管内流速を推定することができる。

現在使用されているピストン式のポンプは通常ダブルピストン式であり、一方のピストンの行程が終了するとコンクリートの流動はいったん停止し、バルブの切り換えが終了すると続いて他方のピストンが行程を始める。図-9に示すようにピストン式ポンプの場合はバルブの切り換えが行なわれている間は不規則なサージ圧を生ずるが、ピストンがコンクリートを押ししている間、すなわち流動が生じている間は圧力は時間的な変動がなく、圧力は時間軸に平行で $\partial p/\partial t = 0$ となっている。以下この部分を平行部と呼ぶ。

一方管内圧力の一般式は(8)式で表わされるから(8)式を時間 t で偏微分すれば、

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{2}{r} (k_1 + k_2 v) + \rho \frac{dv}{dt} + \gamma \sin \phi \right\} x \quad \dots\dots(11)$$

となり $\partial p/\partial t = 0$ が成立するためには、

$$\frac{2}{r} k_2 \frac{dv}{dt} + \rho \frac{d^2 v}{dt^2} = 0 \quad \dots\dots(12)$$

でなければならない。 $dv/dt = a$ とおくと(12)式は、

$$\frac{2}{r} k_2 a + \rho \frac{da}{dt} = 0 \quad \dots\dots(12)$$

となり、 a の値によって次のふたつの解が得られる。

i) $a \neq 0$ の時は、

$$\frac{da}{a} = - \frac{2k_2}{rp} dt$$

となり、上式を積分することにより dv/dt 、 v は次式で表わされる (c_1 、 c_2 は積分定数)。

$$\frac{dv}{dt} = a = (\exp c_1) \cdot (\exp - \frac{2k_2}{rp} t) \quad \dots\dots(13)$$

$$v = c_2 - (\exp c_1) \cdot \frac{rp}{2k_2} \cdot \exp - \frac{2k_2}{rp} t \quad \dots\dots(14)$$

ii) $a = 0$ の時は、

$$a = \frac{dv}{dt} = 0$$

となり流速 v は一定になる。したがって平行部の流速を \hat{v} とすれば、

$$v = \hat{v} \quad \dots\dots(15)$$

となる。

これらの v 、 dv/dt を(8)式に代入すれば

$a \neq 0$ の時は、

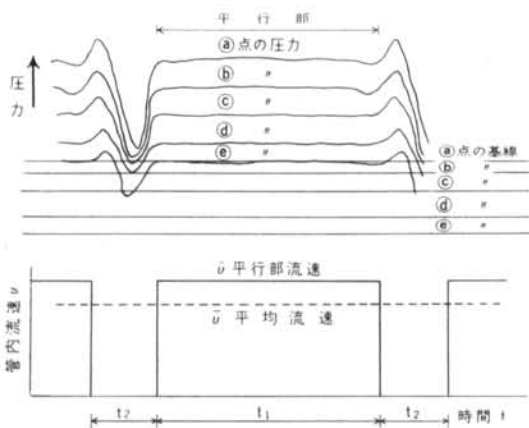


図-9 ピストン式ポンプの圧力波形と速度波形

$$p = \left\{ \frac{2}{r} (k_1 + k_2 c_2) + \gamma \sin \phi \right\} x \quad \dots \cdot (6)$$

$a = 0$ の時は、

$$p = \left\{ \frac{2}{r} (k_1 + k_2 \hat{v}) + \gamma \sin \phi \right\} x \quad \dots \cdot (7)$$

となる。 $a \neq 0$ と仮定して誘導した(6)式は任意の点の圧力がその時の流速には無関係であることを示している。しかし実際には § 7 で示すように圧力は流速の関数となるため実際と矛盾する。したがって $a = 0$ でなければならず流速 v は(5)式となる。

また 図-9 に示すようにピストンがコンクリートを押す半行程に要する時間を t_1 、バルブの切り換えに要する時間を t_2 、全期間にわたる平均流速を \bar{v} とすれば、

$$v = \hat{v} = \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \bar{v} \quad \dots \cdot (8)$$

となる。

4.3 管内圧力および圧力損失

以上で管内流速が明らかになったので(7)、(8)式を解くことができる。

a. スクイズ式ポンプの場合

(4)式で示される v および \hat{v} を微分として得られる dv/dt をそれぞれ (7)、(8) 式に代入すれば、直管の単位長さあたりの圧力損失 $\partial p/\partial x$ および任意点の圧力 p が得られる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2}{r} \left\{ k_1 + k_2 \left[A\bar{n} \left(1 + \frac{m}{2} \right) + \frac{A\bar{n}m}{2} \sin 4\bar{n}\pi t \right] \right. \\ \left. \times R_a C_0 \right\} + \rho \frac{A\bar{n}m}{2} 4\bar{n}\pi R_a C_0 \cos 4\bar{n}\pi t + \gamma \sin \phi \quad \dots \cdot (9)$$

$$p = \left[\frac{2}{r} \left\{ k_1 + k_2 \left[A\bar{n} \left(1 + \frac{m}{2} \right) + \frac{A\bar{n}m}{2} \sin 4\bar{n}\pi t \right] \right. \right.$$

$$\left. \left. \times R_a C_0 \right\} + \rho \frac{A\bar{n}m}{2} 4\bar{n}\pi R_a C_0 \cos 4\bar{n}\pi t + \gamma \sin \phi \right] x \quad \dots \cdot (10)$$

最大圧力損失 $(\partial p/\partial x)_{\max}$ および任意点の最大圧力 P_{\max} は (9)、(10) 式を時間 t で微分すれば求まり、さらに平均回転数を平均流速 \bar{v}

$$\bar{v} = 2\pi\bar{n} R_a C_0$$

で置きかえれば次式となる。

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{\max} = \frac{2}{r} k_1 + \left(1 + \frac{m}{2} \right) \frac{A}{\pi} \frac{1}{r} k_2 \bar{v} \\ + \frac{Amp}{2\pi} \frac{1}{R_a C_0} \bar{v}^2 \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\rho} \frac{R_a C_0}{r} \frac{k_2}{\bar{v}} \right)^2} + \gamma \sin \phi \quad \dots \cdot (11)$$

$$P_{\max} = \left[\frac{2}{r} k_1 + \left(1 + \frac{m}{2} \right) \frac{A}{\pi} \frac{1}{r} k_2 \bar{v} \right.$$

$$\left. + \frac{Amp}{2\pi} \frac{1}{R_a C_0} \bar{v}^2 \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\rho} \frac{R_a C_0}{r} \frac{k_2}{\bar{v}} \right)^2} + \gamma \sin \phi \right] x \quad \dots \cdot (12)$$

スクイズ式ポンプの圧力波形の記録例を図-10に示す

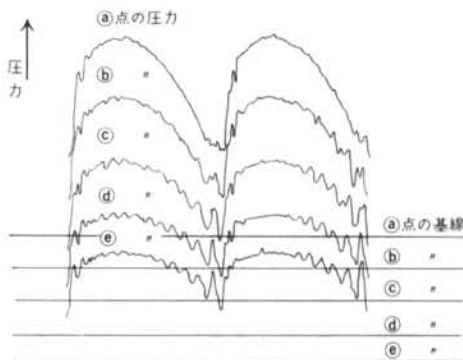


図-10 スクイズ式ポンプの圧力波形

b. ピストン式ポンプの場合

平行部の流速は(8)式で表わされるので、平行部圧力の単位長さあたりの圧力損失 $(\partial p/\partial x)_{\text{para}}$ および任意点の圧力 P_{para} はスクイズ式ポンプの場合と同様にして次式となる。

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{\text{para}} = \frac{2}{r} \left\{ k_1 + k_2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \bar{v} \right\} + \gamma \sin \phi \quad \dots \cdot (13)$$

$$P_{\text{para}} = \left[\frac{2}{r} \left\{ k_1 + k_2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \bar{v} \right\} + \gamma \sin \phi \right] x \quad \dots \cdot (14)$$

§ 5. テーパー管の圧力損失

5.1 基本式の誘導

図-11のようなテーパー管中を流体が流れている場合運動量の法則から、

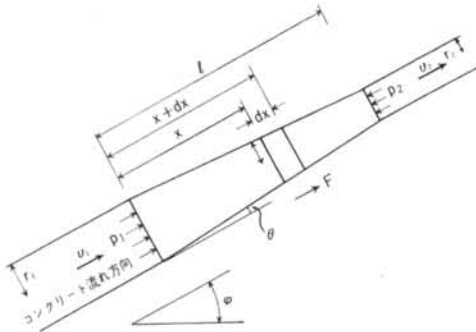


図-11 テーパー管内の力のつり合い

$$F = \rho Q(v_1 - v_2) + (p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2) \pi \quad \dots \text{②5}$$

が成り立つ。

ここに Q は単位時間あたりの流量、 F は流体の流れを妨げようとする力の総和である。この場合 F は管壁とコンクリートのまさつ力 F_1 、および重力 F_2 によって生ずるものと仮定する。

dx 部分の管軸方向のまさつ力 dF_1 、および重力成分 dF_2 はテーパー管右端から x の点の半径を r 、管軸と水平面のなす角を ϕ とし、直管の場合と同様な考え方をすれば、

$$dF_1 = 2 \pi r dx (k_1 + k_2 v) \cos \theta$$

$$dF_2 = \pi r^2 dx \gamma \sin \phi \quad \text{となる。}$$

$v = Q / \pi r^2$ 、 $dx = l dx / (r_2 - r_1)$ であるから上式を r について r_1 から r_2 まで積分すれば F は、

$$F = F_1 + F_2 = \int_{r_1}^{r_2} dF_1 + \int_{r_1}^{r_2} dF_2$$

$$= \left\{ l \pi k_1 (r_2 + r_1) + \frac{2l}{r_2 - r_1} k_2 Q \log \frac{r_2}{r_1} \right\} \cos \theta$$

$$+ \frac{\pi \gamma}{3} l \left\{ (r_2)^2 + r_2 r_1 + (r_1)^2 \right\} \sin \phi \quad \dots \text{②6}$$

②6式を②5式に代入し $Q = \pi r_1^2 v_1 = \pi r_2^2 v_2$ として変形すれば、テーパー管一本あたりの圧力損失 $p_1 - p_2$ は、

$$p_1 - p_2 = \left\{ \frac{r_2 + r_1}{(r_2)^2} k_1 l + \frac{2}{r_2 - r_1} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 v_1 k_2 l \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right\} \cos \theta$$

$$+ \rho \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \left\{ \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right\} (v_1)^2 + \frac{\gamma}{3} l \left\{ 1 + \frac{r_1}{r_2} \right.$$

$$\left. + \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right\} \sin \phi - \left\{ \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right\} p_1 \quad \dots \text{②7}$$

となる。 $\cos \theta$ の値は実際に使用されているテーパー管の範囲では 1.00 とみなすことができ、また最後の項は無視できる大きさである。したがって②7式は、

$$p_1 - p_2 = \frac{r_2 + r_1}{(r_2)^2} k_1 l + \frac{2}{r_2 - r_1} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 v_1 k_2 l \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$+ \rho \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \left\{ \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right\} (v_1)^2 + \frac{\gamma}{3} l \left\{ 1 + \frac{r_1}{r_2} + \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right\} \sin \phi \quad \dots \text{②8}$$

となる。上式に②0式②8式で示される速度を代入し直管の

場合と同様な計算を行なえば、スクイズ式ポンプを用いた場合の最大圧力損失 $(p_1 - p_2)_{\max}$ およびピストン式ポンプを用いた場合の平行部の圧力損失 $(p_1 - p_2)_{\text{para}}$ は

$$(p_1 - p_2)_{\max} = \frac{r_2 + r_1}{(r_2)^2} k_1 l$$

$$+ \frac{2}{r_2 - r_1} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 k_2 l A \frac{1 + m}{2 \pi} \bar{v}_1 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \rho \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \left\{ \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right\}$$

$$\times \left(A \frac{1 + m}{2 \pi} \bar{v}_1 \right)^2 + \frac{\gamma}{3} l \left\{ 1 + \frac{r_1}{r_2} + \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right\} \sin \phi \quad \dots \text{②9}$$

$$(p_1 - p_2)_{\text{para}} = \frac{r_2 + r_1}{(r_2)^2} k_1 l$$

$$+ \frac{2}{r_2 - r_1} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 k_2 l \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \bar{v}_1 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right) + \rho \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \left\{ \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right\}$$

$$\times \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right)^2 (\bar{v})^2 + \frac{\gamma}{3} l \left\{ 1 + \frac{r_1}{r_2} + \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right\} \sin \phi \quad \dots \text{③0}$$

§ 6. ベンド管の圧力損失

6.1 基本式の誘導

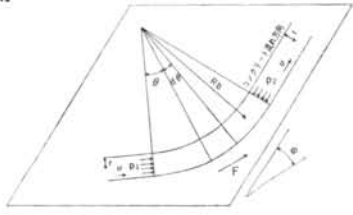


図-12 ベンド管内の力のつり合い

図-12に示すベンド管中を流体が流れている場合、運動量の法則から、

$$F_x = \rho Q (1 - \cos \theta) v + \pi r^2 (p_1 - p_2 \cos \theta) \quad \dots \text{③1}$$

$$F_y = -\rho Q \sin \theta v - p_2 \pi r^2 \sin \theta \quad \dots \text{③2}$$

が成りたち以上2式からベンド管一本当たりの圧力損失は

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{\pi r^2} \left[F_x + F_y \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \right] \quad \dots \text{③3}$$

となる。ここに F_x 、 F_y は流体の流れを妨げようとする力の総和のそれぞれ x 、 y 方向成分である。この場合 F_x 、 F_y はテーパー管の場合と同様に管壁とコンクリートのまさつ力および重力によって生ずるものと仮定する。

$d\theta$ 部分の dF_x 、 dF_y はベンド管の曲げ半径を R_b 、管軸面と水平面のなす角を ϕ とすれば

$$dF_x = 2 \pi r R_b d\theta (k_1 + k_2 v) \cos \theta$$

$$dF_y = 2 \pi r R_b d\theta (k_1 + k_2 v) \sin \theta + \pi r^2 R_b d\theta \gamma \sin \phi$$

であり上式をそれぞれ θ について 0 から θ まで積分して③3式に代入すれば圧力損失が求められる。さらに③0、③8式で示される速度を代入し直管の場合と同様な計算を行なえば、スクイズ式ポンプを用いた場合の最大圧力損失 $(p_1 - p_2)_{\max}$ およびピストン式ポンプを用いた場合の平行部の圧力損失 $(p_1 - p_2)_{\text{para}}$ はそれぞれ次式で表わされ

る。

$$(p_1 - p_2)_{\max} = \left[\frac{2}{r} R_b (k_1 + k_2 A \frac{1+m}{2\pi}) + R_b \theta \gamma \sin \varphi \right] \frac{2(1-\cos \theta)}{\sin \theta} \dots (34)$$

$$(p_1 - p_2)_{\text{para}} = \left[\frac{2}{r} R_b \left\{ k_1 + k_2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \bar{v} \right\} + R_b \theta \gamma \sin \varphi \right] \frac{2(1-\cos \theta)}{\sin \theta} \dots (35)$$

以上でまだ固まっていないモルタル、コンクリートのレオロジー的性質を調査し、その結果に基づいて直管テーパー管、ベンド管の圧力損失を求めるための基本式を誘導した。次にこれらの基本式の妥当性を確認し式に含まれる諸定数を定めるために実際のポンプを用いて行った圧送実験の結果について報告する。

§ 7. 直管に関する圧送実験

実験は次のふたつのシリーズに分けて行なった。

- シリーズ I : 調合を一定とし、管径およびポンプの機種を変化させたもの。
- シリーズ II : 管径および機種を一定とし調合を変化させたもの。

7.1 シリーズ I の実験計画

7.1.1 配管計画

図-13に示す配管とし鉛直管は高さ30mまでとした。鉛直管の地上10, 20, 30mのレベル(以下 F_1, F_2, F_3 と呼ぶ)には容量200ℓの受けホッパーを設け、圧送されるコンクリートが満杯になるまでの時間を測定し単位時間あたりの流量、平均流速を求めた。配管は2'', 3'', 4'', 5'' および6''管を使用した。

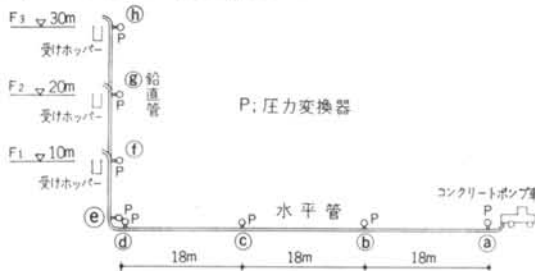


図-13 配管状態、圧力変換器のとりつけ箇所

7.1.2 圧力の測定方法

圧力測定箇所には、配管のジョイント部に図-14に示すダミーパイプをとりつけた。管内の圧力は厚さ2mmのゴム板を介してオイルチェンバー内の油に伝達する。この油圧の変動を圧力変換器(新興通信工業株式会社製)

ッシャーヘッド PR 30, PR 10) で電氣的に検出し、アンプ(新興通信工業株式会社製 DS 6-MTY 8 素子型)を介して直視式電磁オシログラフ(三栄測器株式会社製 12点記録型ビジグラフ)に記録させた。

圧力変換器は図-13に示す8箇所にとりつけた。

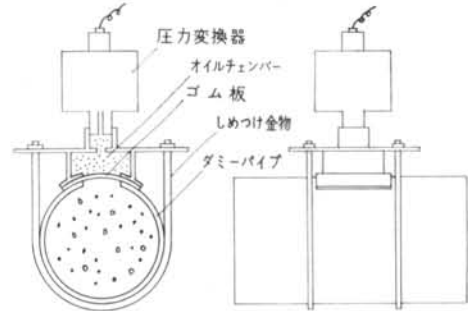


図-14 ダミーパイプ、圧力変換器

7.1.3 ポンプ機種

ポンプはスクイズ式のもの3種、ピストン式のもの1種を使用した。各ポンプの諸元を表-1に示す。

ポンプ機種	型式	ポンピングチューブ半径 a (mm)	ローター有効回転半径 R_a (cm)	ポンプメーカー
PC 50	スクイズ式	25	15.1	極東開発機械工業
PC 100	〃	50	41.0	〃
PC 125	〃	62.5	53.8	〃
PTC30	ピストン式	—	—	石川島播磨重工業

表-1 コンクリートポンプの諸元

7.1.4 実験方法

ポンプ機種と配管の組合せは表-1のようにした。流量は F_1, F_2, F_3 で測定し、それぞれの場合ポンプの回転数を変えることにより管内流速を5段階に切り変えた。管内圧力は流量を測定している時に、ポンプが3~5回転する期間にわたって記録した。

配管	配管半径 r (mm)	ポンプ機種			
		PC50	PC100	PC125	PTC30
2'' 管	25	○	—	—	—
3'' 〃	37.5	○	○	○	—
4'' 〃	50	○	○	○	○
5'' 〃	62.5	—	○	○	—
6'' 〃	75	—	○	○	—

表-2 ポンプ機種と配管の組合せ

7.1.5 調合

コンクリートはW/C=60%, S/A=50%の普通コン

クリートとし目標スランプは21cmとした。

ただしポンプ機種がPC50の場合はW/C=60%，目標スランプ21cmのモルタルとした。

使用した骨材の諸性質を表-3に示す。

コンクリート種	骨材種類	骨材種類	粒大(mm)	表乾毛重	吸水率(%)	粗粒率
普通コンクリート	細骨材	吉野川砂	5	2.61	1.5	2.84
	粗骨材	吉野川砂利	25	2.63	1.2	6.94
ライオナイトコンクリート	細骨材	吉野川砂	5	2.61	1.5	2.78
	粗骨材	ライオナイト	15	1.39	2.9	6.50
アサノライトコンクリート	細骨材	吉野川砂	2.5	2.60	1.6	2.68
	粗骨材	アサノライト	15	1.37	9.1	6.40

表-3 骨材の諸性質

7.2 シリーズIIの実験計画

管径は4"とし、ポンプはPC100を使用した。実験方法その他はシリーズIと同じにした。ただし流量の測定は F_3 のみで行なった。

7.2.1 調査

粗骨材種類、細骨材率、スランプ、W/Cを要因に選び普通コンクリート12種類、人工軽量コンクリート12種類(造粒型6種、非造粒型6種)について実験を行なった。使用した骨材の諸性質を表-3に示す。

7.3 実験結果

7.3.1 各測定点の圧力

スクイズ式ポンプ、ピストン式ポンプの場合の圧力波形の記録例は図-9, 10に示した。図-15にはスクイズ式ポンプを用いた場合の各測定点の最大圧力の一例を示すが、圧力と距離との関係は他の実験でもいずれもリニアであり(8)式で示される関係と一致している。

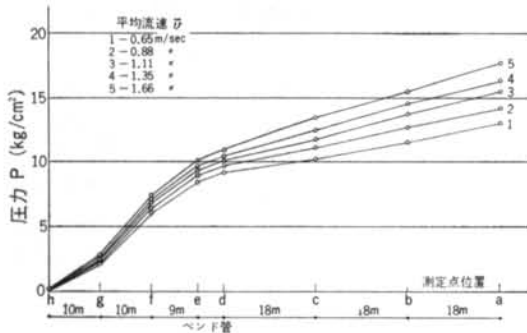


図-15 各測定点の最大圧力

7.3.2 圧力損失

スクイズ式ポンプの場合には最大圧力、ピストン式ポンプの場合には、平行部圧力の各測定間差を測定点間距離で

除し、水平管、鉛直管の単位長さ当たりの圧力損失 ΔP_H 、 ΔP_V を求めた。横軸に実測した流量から求めた平均流速をとり、縦軸に ΔP_H 、 ΔP_V をプロットした。以下この図を $(\Delta P-\bar{v})$ 図と呼ぶ。 $(\Delta P-\bar{v})$ 図の一例を図-16に示す。

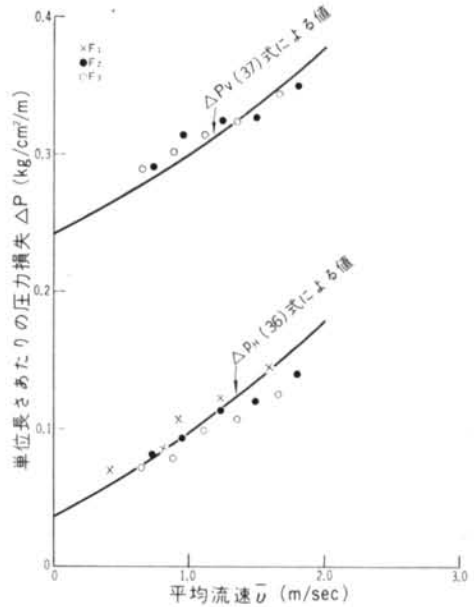


図-16 $(\Delta P-\bar{v})$ 図—スクイズ式ポンプの場合

7.3.3 管の軸方向圧力と半径方向圧力との関係

$(\Delta P-\bar{v})$ 図にスクイズ式ポンプの場合は(2)式、ピストン式ポンプの場合には(3)式を適用して k_1 、 k_2 を定める訳であるが、この際管の軸方向圧力と半径方向圧力との関係が問題となる。すなわち基本式を導く過程では、管の軸方向圧力を考えたが実験で測定したのは管の半径方向圧力である。ここで管の半径方向には軸方向圧力の α 倍が現われると仮定すれば ΔP_H 、 ΔP_V は(2)、(3)式を変形して次のように表わされる。水平管の場合は $\sin \phi = 0$ 、鉛直管の場合は $\sin \phi = 1$ であるから、

スクイズ式ポンプの場合

$$\Delta P_H = \left[\frac{2}{r} k_1 + \left(1 + \frac{m}{2}\right) \frac{A}{\pi} \frac{1}{r} k_2 \bar{v} \right. \\ \left. + \frac{A m \rho}{2 \pi} \frac{1}{R_a C_0} \bar{v}^2 \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\rho} \frac{R_a C_0}{r} \frac{k_2}{\bar{v}}\right)^2} \right] \alpha \dots (36)$$

$$\Delta P_V = \left[\frac{2}{r} k_1 + \left(1 + \frac{m}{2}\right) \frac{A}{\pi} \frac{1}{r} k_2 \bar{v} \right. \\ \left. + \frac{A m \rho}{2 \pi} \frac{1}{R_a C_0} \bar{v}^2 \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\rho} \frac{R_a C_0}{r} \frac{k_1}{\bar{v}}\right)^2} + \gamma \right] \alpha \dots (37)$$

ピストン式ポンプの場合

$$\Delta P_H = \left[\frac{2}{r} \left\{ k_1 + k_2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1}\right) \bar{v} \right\} \right] \alpha \dots (38)$$

$$\Delta P_V = \left[\frac{2}{r} \left\{ k_1 + k_2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1}\right) \bar{v} \right\} + \gamma \right] \alpha \dots (39)$$

66, 67式, 68, 69式の差をとればスクイズ式, ピストン式いずれの場合も,

$$\Delta P_V - \Delta P_H = \alpha \gamma$$

$$\therefore \alpha = \frac{\Delta P_V - \Delta P_H}{\gamma} \quad \dots\dots(40)$$

となり α の値は, 鉛直管と水平管の単位長さあたりの圧力損失の差をコンクリートの比重で除してやれば求められる。

全実験における α の値を図-17に示す。 α の値については A. N. Ede⁴⁾ の研究があり, 骨材同志が互いに接しているようなペースト分の少ないコンクリートではほぼ $\alpha = 0.25$ であり, 骨材空隙がペースト分で満たされるに従い内部まさつ角が小さくなり α は増大するとしている。内部まさつ角のない水などでは $\alpha = 1.00$ となる。

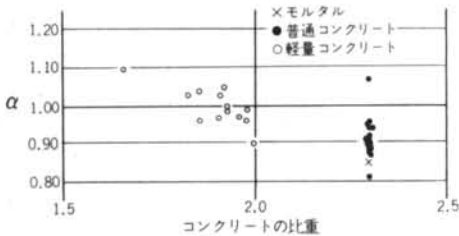


図-17 α の値

本実験で使用したコンクリートでは α の値は一般に, 0.85以上の範囲にばらついている。しかし α の値は使用する粗骨材の性質によっても影響を受けるようであり, 普通コンクリート, 軽量コンクリート別に見るとかなりまとまりを示しているのそれぞれに対して次の値をとった。

普通コンクリートでは $\alpha = 0.90$

軽量コンクリートでは $\alpha = 1.00$

7.3.4 粘着係数 k_1 , 速度係数 k_2

α の値を上のように仮定し66~69式を ($\Delta P - v$) 図にあてはめれば k_1, k_2 を定めることができる。全実験における k_1, k_2 の値を, スランプ, セメント量, 細骨材率別に整理して図-18に示す。

7.4 実験結果の検討

実験的に求められた圧送距離と圧力との関係および流速と圧力損失との関係はいずれも基本式の傾向と良く一致しており以上のような考え方が妥当であったことがうかがわれる。したがって k_1, k_2 等の値が既知であれば以上の式を用いて任意の条件の下における管内圧力, 圧力損失等を求めることができる。

7.4.1 k_1, k_2 の値に関係する要因

コンクリートが動き始めるまでに要する圧力は k_1 の

大きさに左右され, 動き始めてからの圧力は k_2 の大きさに左右される。 k_1, k_2 の値は一般に,

スランプが小なるほど,

セメント量が大なるほど,

細骨材率が大なるほど,

大になる傾向にある。

モルタルの場合は普通コンクリートに比べ k_1 は小, k_2 は大である。このことは管内で動き始めるまでの圧力は少なくすむが, 流速を増そうとすると所要圧力が大になることを示している。

人工軽量コンクリートの場合は同一スランプの普通コンクリートと比較した時, k_1, k_2 とも大であり圧送がより困難であることがうかがわれる。

k_1, k_2 の値は管とコンクリート間のまさつ力によって定まるものであるから, コンクリートの調合, 使用した材料のみならず, 使用した管の内面の状態 (管材質, 摩耗度, 残コンクリートの付着, 錆) によっても変化するはずである。

調合を一定として行なったシリーズ I の実験では, k_1, k_2 の値は $k_1 = 0.40 \sim 0.90, k_2 = 1.20 \sim 1.80$ の範囲にばらついていた。これは計画調合を同一にしても, バッチ間誤差や実験がかなり長期にわたったための使用材料の品質の変動あるいはその時の気象状態などの影響も加わったためだと思われる。したがって調合比, 管径, ポンプ機種が同一であっても, 実際の現場ではこの程度のばらつきが生じるものと予想される。

実験的に求められた k_1, k_2 の値には以上のような諸要因による変動があるが, シリーズ I で用いたようなスランプ 21~22cm, S/A=50%, W/C=60% 程度の通常の建築工事に使用されている砂利, 砂を用いたコンクリートに対しては実用的に次の値を採用して良いであろう。

$$k_1 = 0.7 \times 10^{-3} \text{kg/cm}^2$$

$$k_2 = 1.7 \times 10^{-3} \text{kg/cm}^2/\text{m/sec}$$

§ 8. テーパー管, ベンド管に関する圧送実験

実験は次のふたつ (シリーズ III および IV) に分けて行なった。圧力の測定方法その他は § 7 の実験に準じた。

8.1 シリーズ III の実験

図-19に示すような水平配管を行ない, 圧力変換器はテーパー管, ベンド管の入口, 出口にとりつけ, おおのこの管の 1 本あたりの圧力損失を求めようとした。しか

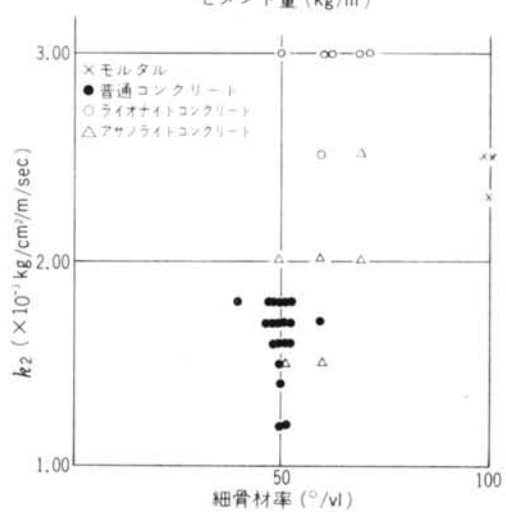
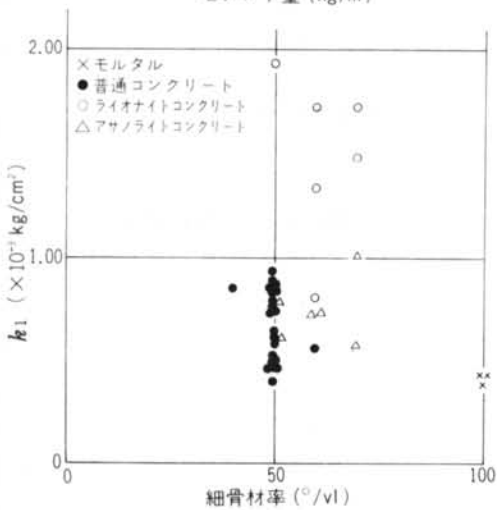
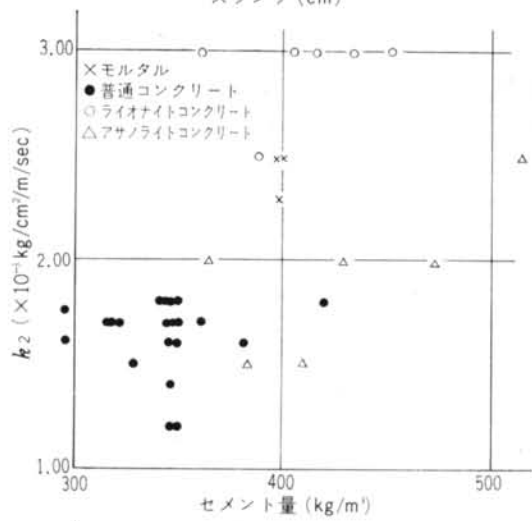
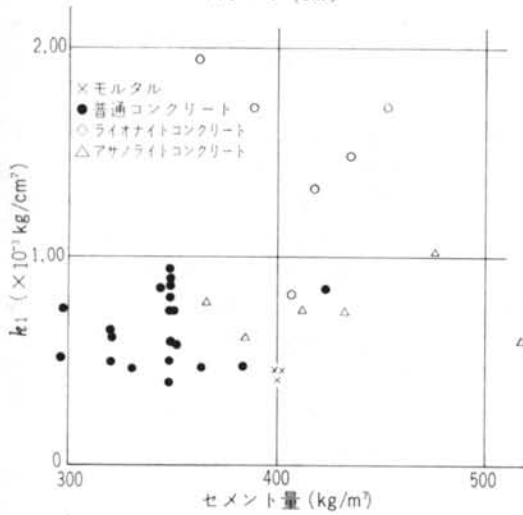
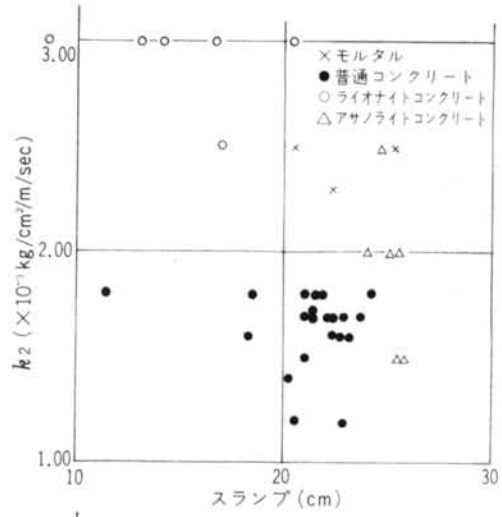
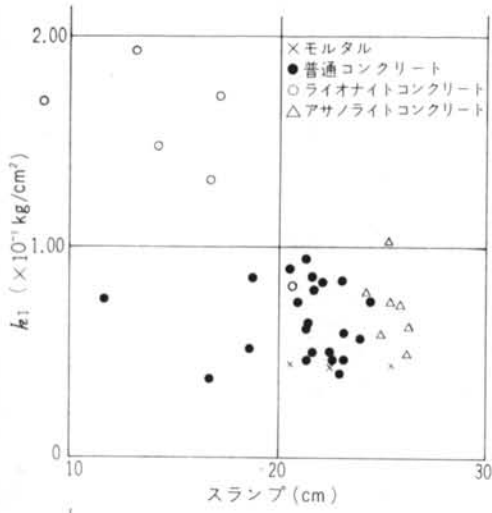


図-18 k_1 , k_2 の値

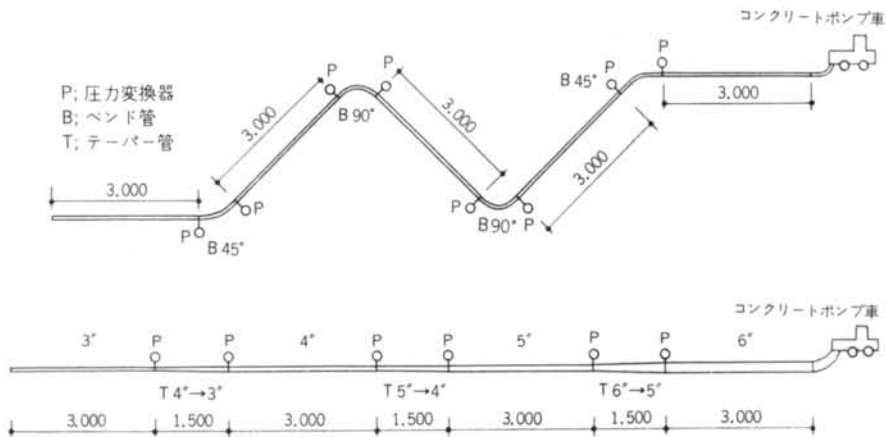


図-19 ベンド管、テーパー管の配管計画 (シリーズⅢ)

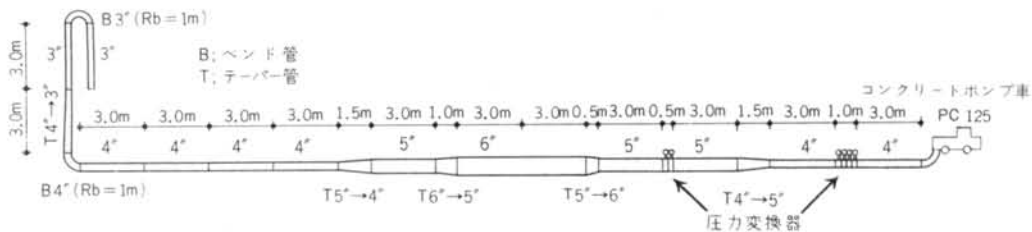


図-20 ベンド管、テーパー管の配管計画 (シリーズⅣ)

しテーパー管、ベンド管の入口、出口の近傍では流れが攪乱されているようであり、圧力を満足に測定することはできなかった。

8.2 シリーズⅣの実験

8.2.1 実験計画

8.1に述べたような理由からテーパー管、ベンド管の圧力損失を直接測定することは避け、圧力損失を間接的に推定する方法をとった。すなわち図-20のような水平配管とし圧力変換器は配管の根元にとりつけた。根元の圧力は使用した直管、テーパー管、ベンド管の圧力損失の和となるから k_1 、 k_2 が既知であれば以上に述べた知識を用いて根元の圧力を算出することができる。

実験は図-20の配管状態から出発し、順次先端の管をとりはずし、テーパー管、ベンド管のとりつけ交換をくり返すことにより表-4に示す種類のテーパー管、ベンド管を用いた場合について圧力の測定を行なった。

ポンプはスクイズ式のPC125を用い各配管状態につきローターの回転数を三段階に切り換えた。

コンクリートの調査は、シリーズⅠで用いた調査とした。

8.2.2

シリーズⅠの実験結果を参照し k_1 、 k_2 の値を

ベンド管		テーパー管	
管径	曲げ半径 R_b (m)	管径	しぼり長さ (m)
6"	1.000	6"→5"	1.0
5"	1.000	5"→4"	1.5
4"	1.000	4"→3"	3.0 1.5 1.0 0.5
3"	0.760		

表-4 ベンド管、テーパー管諸元

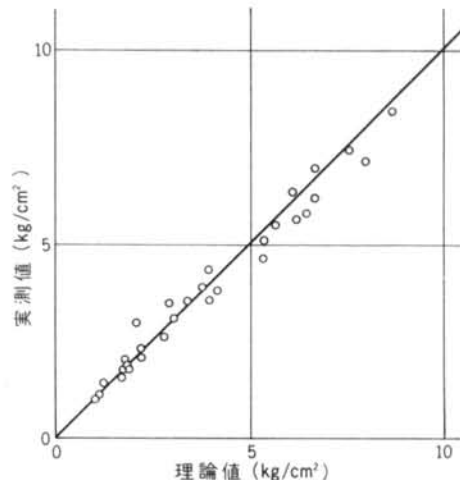


図-21 ベンド管、テーパー管内の圧力

$$k_1 = 0.7 \times 10^{-3} \text{kg/cm}^2$$

$$k_2 = 1.7 \times 10^{-3} \text{kg/cm}^2/\text{m/sec}$$

と仮定し、それぞれの場合の根元の圧力を計算しこれを実測値と比較した。図-21に示すように両者は良く一致しており、§5, §6で述べたような考え方に従ってテーパー管、ベンド管の圧力損失を求めても大過ないことがわられる。

§ 9. 考 察

9.1 換算係数

以上で直管、テーパー管、ベンド管の圧力損失がすべて明らかになったので、水平管の単位長さの圧力損失に対するそれぞれの管の圧力損失の比（換算係数）を求めることができる。これらの換算係数は管の幾何学的形状だけでなく、使用するポンプの機種、流速、コンクリートの性質によっても影響を受ける。

9.2 圧送限界

配管の根元の圧力は、使用されている直管、テーパー管、ベンド管等の圧力損失の和となる。圧送限界は使用しているポンプが配管根元の圧力にどこまで耐えうるかによって定まり油圧駆動方式をとるポンプの場合は油圧シリンダーのリリースバルブセット圧力によって定まる。

配管の根元の圧力と油圧シリンダー内の圧力との関係を実測した例を図-22に示すが、両者は調合のいかんにかかわらず直線的な関係にある。したがって使用するポンプの油圧シリンダーリリースバルブが開く時の配管根元の圧力を求めておけば、以上の知識から圧送限界を知ることができる。

圧送限界は使用するポンプの機種、管径、調合の他に管内流速の影響も受ける。

<参考文献>

- 1) 森永, 成田, 鳥田: “コンクリートのポンパビリティーに関する研究その1 (測定装置の試作と調合への関連)” 日本建築学会大会学術講演梗概集昭和44年8月
- 2) 小野木重治: “レオロジー要論” 横書店
- 3) T. C. Powers: “The properties of fresh concrete” John Wiley 1968
- 4) A. N. Ede: “The resistance of concrete pumped through pipelines” Magazine of Concrete Research, Nov. 1957
- 5) Albert Joisel: “Recherches sur les pompes à béton” Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics, No. 204 1951. 9
- 6) K. Komlos and M. Oprsal: “Two devices for measuring concrete viscosity” Matériaux et Constructions Vol. 1 No. 2, 1968
- 7) Alistair G. B. Ritchie: “The rheology of fresh concrete” Journal of the Construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Jan. 1968
- 8) R. Weber: “Rohrförderung von Beton” Beton-Verlag, Aug. 1963
- 9) 原田幸夫: “流体工学” 横書店 昭和43年

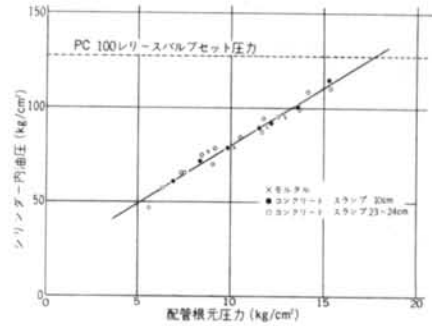


図-22 シリンダー内油圧と配管根元圧力の関係

§ 10. むすび

コンクリートポンプを使用した場合の管内の流動状態、管内の圧力、各種の管の圧力損失、圧送限界等について論じた。またコンクリートのポンパビリティーはコンクリートと管壁との粘着係数 k_1 、速度係数 k_2 等で定まることを示し、コンクリートのポンパビリティーの測定方法、測定装置を定める上での方針を明らかにすることができた。

しかしここではコンクリートが管内で閉塞しないことを条件にして論を進めた。閉塞した場合は流動が生じている場合に比べ、管内圧力分布および圧力が生じるメカニズムが著しく異なるはずである。閉塞については、さらに今後の研究が必要である。

謝辞: § 7および§ 8に示した圧送実験を行なうにあたって、スクイズ式ポンプ車のメーカーである極東開発機械工業株式会社の米田稲次郎技術部長初め、同社技術部の徳永芳弘係長、川本節男氏その他多くの方々の指導、協力を得た。ここに心から謝意を表す。