

論文

[1013] コンクリートポンプの滑り弁内を流れるコンクリートの可視化

正会員 橋本 親典 (群馬大学建設工学科)  
 正会員○平井 秀幸 (群馬大学大学院)  
 正会員 丸山 久一 (長岡技術科学大学建設系)  
 正会員 辻 幸和 (群馬大学建設工学科)

1. はじめに

今日、コンクリートポンプ工法は建築・土木の施工現場を問わず広く普及している。しかしながら、最近では、水中不分離性コンクリートなどの新しい混和剤を使用したコンクリートが出現し、従来のコンクリートポンプでは十分な時間吐出量を確保できなくなっている。特に、大深度地下構造物や都市再開発による超高層ビルなどの施工の大型化に伴い、コンクリートの高強度化やポンプ圧送の高所・長距離化がさらに進むことが予想される。そのため、従来のコンクリートポンプでは圧送困難であった打設条件に対応すべきコンクリートポンプの開発・設計が必要になってくると考えられる[1]。

これまでのコンクリートポンプの開発・設計は、圧送技術の経験をベースに修正・改良してきたものが多い。実際のフレッシュコンクリートがどのようにコンクリートポンプ内部を流動するかということは、ブラックボックスであり推測の域を出なかった。従って、コンクリートポンプ内部を流動するフレッシュコンクリートの力学的挙動を明らかにすることができれば、コンクリートの流動性状を考慮に入れたコンクリートポンプの最適化設計が可能となる。

著者らは、ポンプ圧送時の管内流動に関する実験手法として、“フレッシュコンクリートの可視化モデル”を使ったシミュレーション実験を開発してきた[2]。この可視化実験手法は、実際のフレッシュコンクリートを全く別の可視化材料に置換し、従来明らかにされていなかった流動状態におけるコンクリート内部のモルタル相と粗骨材粒子群相互の力学的挙動を、画像データとして取り扱う方法である[3]。これまでの実験的研究から、この可視化実験手法が滑り弁型コンクリートポンプ内の流動性状を解明する有力な武器になり得ることが明らかになった[4, 5]。

本研究は、コンクリートポンプの滑り弁内を流れる可視化モデルコンクリートに関する画像データを基に、吐出過程および吸入過程におけるコンクリートポンプ内のフレッシュコンクリートの流動性状について検討する。

2. 滑り弁型コンクリートポンプの圧送メカニズムと基本性能

図-1 に滑り弁型コンクリートポンプの圧送メカニズムを示す。現在、建設現場で用いられているコンクリートポンプは、大きく分けてピストン式ポンプとスクイズ式ポンプの2つがある。ピストン式ポンプのバルブ機構としては、滑り弁と揺

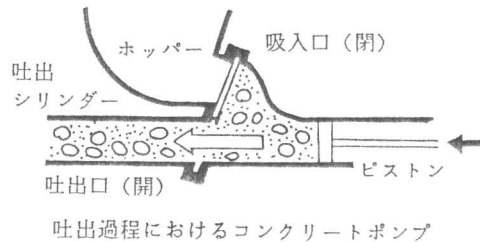
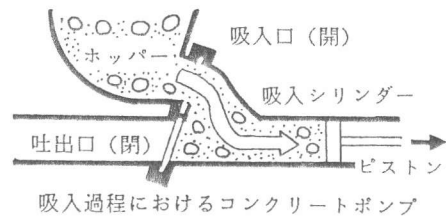


図-1 滑り弁型コンクリートポンプの圧送メカニズム

動弁が主流である[6]。滑り弁型のコンクリートポンプは、低スランプコンクリートの圧送や高所圧送・長距離圧送等の大吐出圧力が必要となる施工現場で広く採用されている。

一般に、滑り弁型コンクリートポンプが要求される基本性能としては、吸入過程における吸入容積の効率化、排出過程における圧力損失の低減化、コンクリートの流動に伴う滑り弁壁面の耐摩耗性の向上などが挙げられる。コンクリートとポンプ内壁面との摩擦が大きくなったり、コンクリート自体の流動性が低下すると、ホッパーからの吸入効率が低下し、吐出時の圧力損失が増大し、壁面の摩耗が激しくなって部品交換の頻度が上昇する。さらに、滑り弁内で材料分離による閉塞現象が発生すると、ポンプ圧送運転の停止に至る。従って、これらの基本性能は、滑り弁内部のコンクリートの流動性状に大きく依存していると考えられる。

### 3. 実験概要

表-1に、実験に用いた可視化モデルコンクリートの配合を示す。図-2には、実験装置の概要を示す。図-3は、吐出過程および吸入過程における流動実験に用いた可視化用透明滑り弁モデルの寸法を示す。

可視化モデルコンクリートは、実際のフレッシュコンクリートをモルタル相と粗骨材粒子群から成る固液2相系流体と仮定する。モルタル相は、透明で容易に粘性を調節できる吸水性高分子樹脂溶液でモデル化する。粗骨材粒子群は、人工軽量粗骨材(5~15mm)とアスファルト被膜したコークス粒子(15~25mm)を組み合わせることで粒度分布の調節を行うことによりモデル化する。なお、フレッシュコンクリートの可視化モデルの詳細については、参考文献[2][3]に記述しているので、本論文では省略する。

可視化モデルコンクリートの挙動を2次元運動に単純化するために、滑り弁や吐出・吸入シリンダーの断面を矩形とし、滑り弁角度は現行の60°(I社製)とした。滑り弁内の可視化モデルコンクリートの流動・変形状況を調べるために、着目トレーサ粒子として発泡スチロール粒子(粒径2.0mm程度)を可視化モデルコンクリ

ートに混入した。トレーサ粒子は比重が0.98前後で、モルタル相のモデル材料の比重1.00と同程度であり、モルタル相の流動に追従できるものと考えた。着目トレーサ粒子の流動状況をビデオに収録し、流動実験終了後、収録データを画像処理し、着目トレーサ粒子の流跡線および速度ベクトル分布を求めた[2]。同一実験条件における流動実験は5回行い、そのうち3回のビデオ画像

表1 実験に用いた可視化モデルコンクリートの配合

想定スランプ (cm)	吸水性高分子樹脂添加量 (g/ℓ)	$V_g/V_m$ (%)	$V_{g1}/V_{gc}$ (%)	単位数 ( $kg/m^3$ )			
				W	P	G1	Gc
—	3.0	0	—	1000	3.00	—	—
1.6程度	3.0	6.0	1.00	625	1.88	257	211
1.2程度	3.0	8.0	1.00	556	1.67	304	250

$V_g/V_m$ : 粗骨材とモルタルの容積比 ( $V_g = V_{g1} + V_{gc}$ ,  $V_m = V_W + V_P$ )  
 $V_{g1}/V_{gc}$ : 人工軽量粗骨材とアスファルト被膜コークス粒子の容積比  
 W: 水道水, P: 吸水性高分子樹脂, G1: 人工軽量粗骨材 (比重1.368)  
 Gc: アスファルト被膜コークス粒子 (比重1.123)

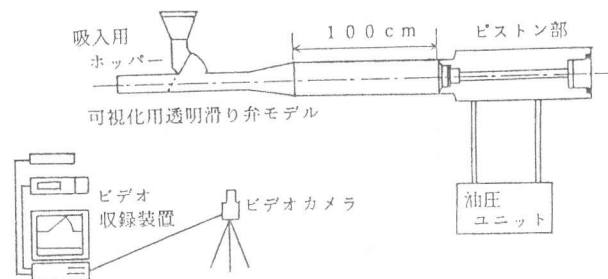


図-2 可視化実験装置概要

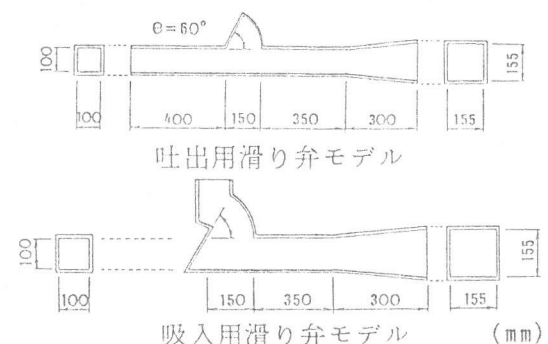


図-3 可視化用透明滑り弁モデルの寸法

データに関してトレーサ粒子群の画像処理を行った。従って、各実験条件の速度ベクトル分布は、3回の流動実験で得られた流跡線を同一画面上で重ね合わせるによりデータ数を増やし、画像処理データの精度を高めた。

実験パラメータは、滑り弁角度と可視化モデルコンクリート中の粗骨材とモルタルの容積比（以後、 $V_g/V_m$ と称する）とし、吐出速度は滑り弁流入位置で3.2cm/secとし、吸入速度は滑り弁流出位置で18.0cm/secとし一定とした。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 流跡線群分布状況

図-4は、吐出過程および吸入過程におけるトレーサ粒子の流跡線群分布の一例を示す。

吐出過程では、 $V_g/V_m=0\%$ であるモルタル相のみの流動の場合は、拡幅部上流、直下および下流領域を通して常に流動方向に平行な流跡線群が描かれている。これに対して、可視化モデルコンクリートの流動の場合は、拡幅部直下において流動方向に平行でない流跡線群が存在し、個々の流跡線が交差する箇所が存在する。この流跡線群の乱れ現象の発生頻度は、 $V_g/V_m$ が60%より80%の可視化モデルコンクリートの流動の方が多い。

吸入過程においても同様で、モルタル相のみの流動の場合は、ホッパーから滑り弁内に流入し、滑り弁からシリンダーへ流出していく間、個々の流跡線は交差せず一定の幅を有している。これに対し、 $V_g/V_m=80\%$ の可視化モデルコンクリートの場合、滑り弁板先端付近で流動方向が水平に変化する領域およびそれ以後の下流領域において、個々の流跡線が交差する。吐出過程ほど顕著な乱れではないが、吸入過程においても流跡線群の乱れが確認できる。

吐出過程における拡幅部上部の円弧部分と、吸入過程における滑り弁板先端と吸入シリンダー底部で囲まれる三角形部分では流跡線が存在していない。これは、この領域に存在するトレーサ粒子が移動せず停止しているためである。吐出過程での拡幅部上部の円弧領域と吸入過程での滑り弁板先端の三角形領域の可視化モデルコンクリートは停滞し、流動する可視化モデルコンクリートとの境界にせん断面が形成されている。

##### 4.2 吐出過程における流動管軸方向速度分布状況

流動管軸方向に沿ったトレーサ粒子群の速度ベクトルから算出した平均速度と平均速度の標準偏差の分布状況を、図-5に示す。 $V_g/V_m$ の大きさに関係なく、滑り弁拡幅部の上流部では吐出速度が3.2cm/secと、トレーサ粒子群の速度の平均はほぼ一致している。また、平均速度の標準偏差が拡幅部領域のそれより小さい。可視化モデルコンクリートが1相系材料として流動すると考えると、吐出速度は断面平均速度と一致する。よって、滑り弁拡幅部上流域では、モルタル相と粗骨材粒子群が一体となって流動していると考えられる。

一方滑り弁拡幅部では、平均速度が流動方向に変動し、かつ平均速度の標準偏差が大きい。拡

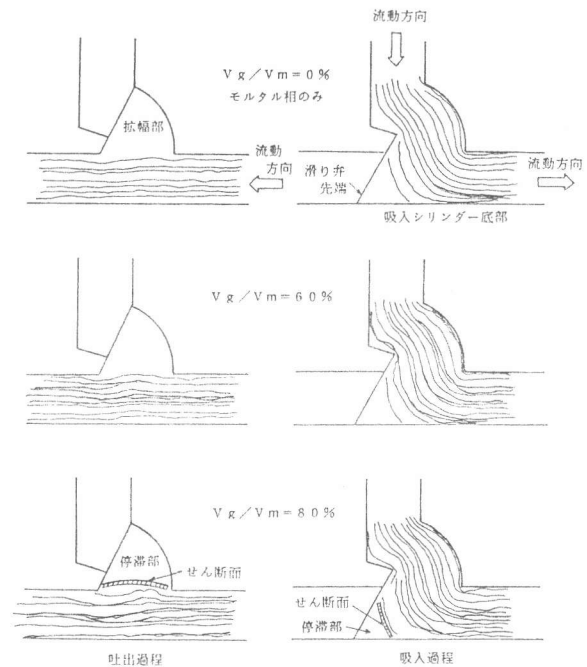


図-4 滑り弁内を流動するトレーサ粒子の流跡線群分布状況

幅部領域においてトレーサ粒子が平均速度を中心に大きく変動しながら流動している。 $V_g/V_m$ の値が増加するに従って、この乱れの程度は増加する。拡幅部上部の停滞している可視化モデルコンクリートと流動している可視化モデルコンクリート間で形成されるせん断面内において、粗骨材粒子群の衝突・回転や滑動が発生し、せん断面直下の可視化モデルコンクリートの粗骨材粒子群の速度の乱れを誘発すると考えられる。

トレーサ粒子はモルタル相の流動を追跡していることと、可視化モデルコンクリートがモルタル相と粗骨材粒子群からなる2相系材料であることから、トレーサ粒子群の速度分布の乱れは、流動中のモルタル相と粗骨材粒子群の材料分離の程度を意味する[3]。速度分布の乱れが、 $V_g/V_m$ の大きさに比例することから、骨材濃度が高くなるに従って、流動中の材料分離の程度が増加すると考えられる。

滑り弁拡幅部下流での速度分布は、拡幅部上流での速度の変動幅と同程度であり、拡幅部で発生した速度の乱れが減衰している。拡幅部に形成されたせん断面によって発生した粗骨材粒子群の衝突・回転や滑動等の運動も、徐々に減少するものと予想される。

一般に、フレッシュコンクリートの管内流動は“固体栓流れ”と考えられ、管軸直角方向に対して一定の断面速度を有する。吐出過程における可視化モデルコンクリートの流動に対しても、拡幅部上流や下流における速度分布から判断すると、“固体栓流れ”に属する。また、滑り弁拡幅部でのせん断面による流れの乱れが、吐出過程における圧力損失を増大させる原因と思われる。

#### 4. 3 吸入過程における断面直角方向速度分布状況

図-6に、着目検査断面(4箇所)を設け、トレーサ粒子群の速度ベクトル分布から算出した断面直角方向の速度分布図を示す。滑り弁から吸入シリンダーに流出する位置(A D断面)とその下流位置(E F断面)における断面速度分布は、“固体栓流れ”に近似した速度分布である。この傾向は、 $V_g/V_m$ の大きさに関係なく同様である。一方、ホッパーから滑り弁内に流入する位置A B断面)と滑り弁曲がり部(A C断面)の流動方向が大きく変化する断面では、曲がり部中心側の速度が上昇し、滑り弁板先端方向に行くに従って速度が小さくなる。この断面分布形状は、“固体栓流れ”の矩形断面速度分布とは大きく異なる。矩形速度分布形状の変化は、 $V_g/V_m$ の大きさに関係なく、粗骨材粒子群が混入していないモルタル相のみの流動においても同様な傾向を示す。

この滑り弁曲がり部の可視化モデルコンクリートの流れは、滑り弁板先端とシリンダー底部で形成される三角形領域の可視化モデルコンクリートが停滞することからも推測されるように、隅角部まわりのポテンシャル流れと考えることができる[7]。滑り弁板先端と吸入シリンダーの底部で形成される隅角部では同一ポテンシャル線上で相隣り合う流線間隔は広く、滑り弁曲がり部中心では流線間隔が狭くなる。従って、滑り弁板先端と曲がり部中心(A点)を結ぶ断面での速度分布は、曲がり部中心の方に最大速度点が移動する形状となる。

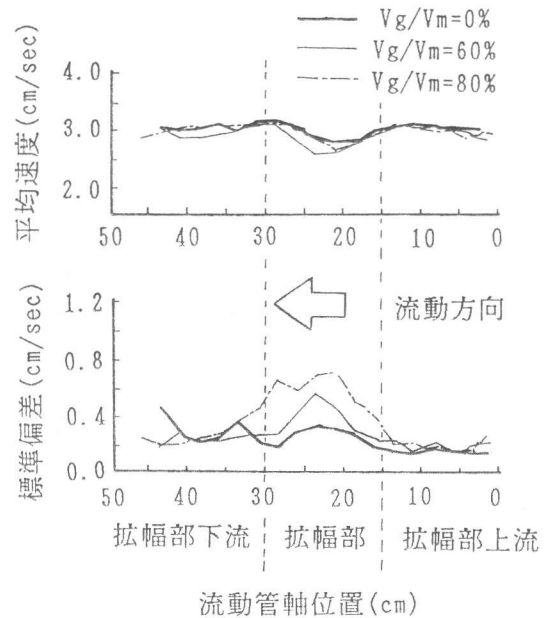


図-5 吐出過程における流動管軸方向速度分布状況

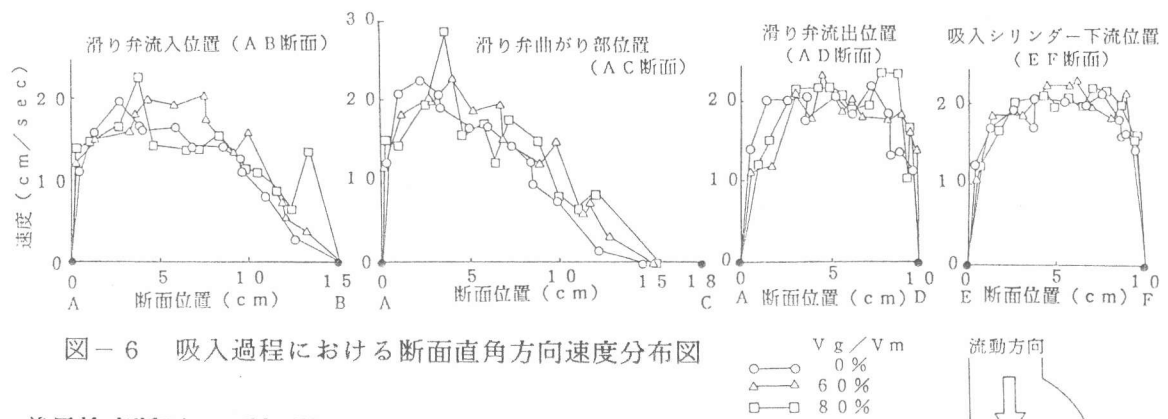


図-6 吸入過程における断面直角方向速度分布図

着目検査断面での断面流量の分布状況を、図-7に示す。滑り弁流出断面と吸入シリンダー下流断面では、 $V_g/V_m$ の大きさに関係なく $1800\text{cm}^3/\text{sec}$ 前後となり、吸入断面流量(吸入速度×吸入シリンダー断面積= $1800\text{cm}^3/\text{sec}$ )とほぼ一致している。これに対し、滑り弁の流入断面と曲がり部断面では、 $V_g/V_m=0\%$ のモルタル相のみの断面流量と比較して、 $V_g/V_m$ が60と80%の断面流量が増加する。

これは、可視化モデルコンクリートの流動において、モルタル相の速度が粗骨材粒子群の速度より大きいことを意味し、モルタル相と粗骨材粒子群の間で材料分離が発生していると考えられる。滑り弁曲がり部断面は、滑り弁板先端付近に停滞する可視化モデルコンクリートと流動する可視化

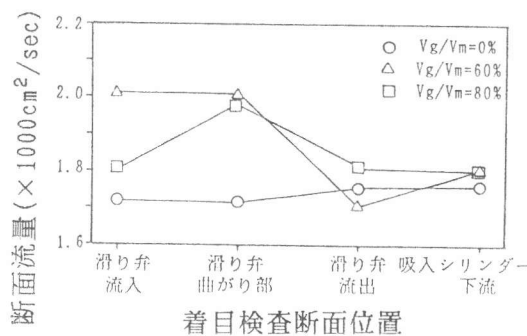
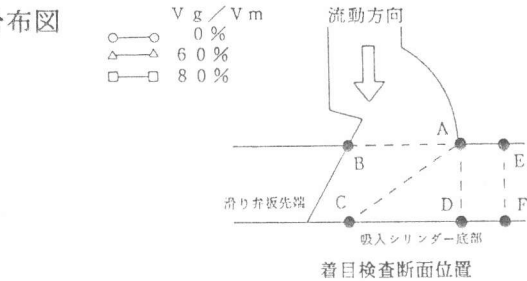


図-7 吸入過程における断面流量分布状況

モデルコンクリートの境界にせん断面が形成しており、材料分離はこのせん断面の影響を受けるものと考えられる。せん断面での粗骨材粒子群の衝突・回転や滑動が、せん断面上部のコンクリートの流動に対して抵抗となり、流動状態にある粗骨材粒子群の速度を低下させる。周囲のモルタル相は速度の大きい曲がり部中心に移動し、さらに速度を上昇させる。

従って、吸入容積の効率化に悪影響を及ぼす材料分離は、滑り弁曲がり部に存在するせん断面の影響が大きいと推測され、吸入効率の向上を図るには、このせん断面の発生領域を減少させることが重要であると思われる。

#### 4.4 滑り弁型コンクリートポンプの流動性状

図-8に、本研究で得られた滑り弁型コンクリートポンプの吐出過程と吸入過程における可視化モデルコンクリートの流動性状の模式図を示す。

吐出過程および吸入過程においても、可視化モデルコンクリートの流動は基本的に“固体栓”流れであり、矩形断面速度分布を有する。ただし、吸入過程における滑り弁曲がり部では、隅角部まわりのポテンシャル流れと考えられ、断面速度分布は曲がり部中心に最大速度点が移動する。

吐出過程においては、拡幅部直下に形成される可視化モデルコンクリート停滞部と流動部の境界にせん断面が形成される。また、吸入過程においては、滑り弁板先端と吸入シリンダー底部で囲まれる三角形領域に可視化モデルコンクリートの停滞部が形成され、この停滞部と吸入シリンダーに流動する可視化モデルコンクリートの境界にせん断面が形成される。

吐出過程のせん断面は、“固体栓流れ”である拡幅部直下の断面一定速度の乱れを誘発させ、吸入過程のせん断面は、滑り弁先端方向へ粗骨材粒子群の堆積と曲がり部中心へのモルタル相の移動によって材料分離を発生させる。

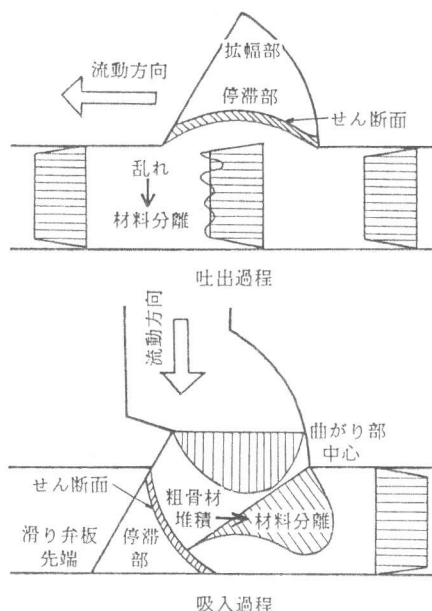


図-8 滑り弁内の可視化モデルコンクリートの流動性状

## 5. 結論

コンクリートポンプの滑り弁内を流れる可視化モデルコンクリートに関する画像データを取録し、これに基づいて、吐出過程および吸入過程におけるコンクリートポンプ内のフレッシュコンクリートの流動性状について検討した。本実験内において、次のことがいえる。

- 1) 滑り弁型コンクリートポンプ内を流動する可視化モデルコンクリートの流動性状は、基本的に“固体栓”流れである。
- 2) 吸入過程における滑り弁曲がり部での可視化モデルコンクリートの流れは、隅角部まわりのポテンシャル流れとして取り扱うことができる。
- 3) 吐出過程においては、拡幅部上部の停滞する可視化モデルコンクリートと拡幅部直下の管内を流動する可視化モデルコンクリートの境界面にせん断面が形成される。一方、吸入過程においては、滑り弁先端と吸入シリンダー底部が接する隅角部領域で停滞する可視化モデルコンクリートと流動する可視化モデルコンクリートの境界面にせん断面が形成される。
- 4) これらのせん断面は、流動中の可視化モデルコンクリートの材料分離を誘発させる原因と考えられ、コンクリートポンプの圧送機構に対して悪影響を及ぼす。

<謝辞>本研究を実施するにあたり、ご協力を頂いた石川島建機(株)コンクリートポンプ事業部設計グループの関係各位に、心から御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 大村高慶：コンクリートポンプ、産業機械、No. 467、pp. 44-45、1989. 8
- 2) 橋本親典・丸山久一・清水敬二：フレッシュコンクリートの管内流動における閉塞過程の可視化に関する実験手法、コンクリート工学、Vol. 26、No. 2、pp. 119-127、1988. 2
- 3) 橋本親典・堀口和弘・丸山久一・清水敬二：テーパ管を流動する可視化モデルコンクリートの乱れ計測システム、土木学会論文集、No. 402/V-10、pp. 61-70、1989. 2
- 4) 本間宏記・橋本親典・丸山久一・清水正樹：可視化実験手法を用いたコンクリートポンプのバルブ形状に関する研究、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部、pp. 714-715、1990. 9
- 5) 安積淳一・橋本親典・辻幸和・丸山久一：可視化実験手法によるコンクリートポンプバルブ内の吸入過程における流動性状、土木学会第18回関東支部技術研究発表会講演概要集、pp. 278-279、1991. 3
- 6) 日本建設機械化協会編：コンクリートポンプハンドブック、pp. 14-26、森北出版、1979
- 7) 日野幹夫：明解 水理学、pp. 70-71、丸善、1983. 7