

# 変形管を流れるフレッシュコンクリート の変形性能の評価方法

橋本親典\*・本間宏記\*\*・丸山久一\*\*\*  
・清水敬二\*\*\*\*

本研究の目的は、テーパ管とベント管を流れるフレッシュコンクリートの変形性能および閉塞機構の相違点を検討し、ベント管内を流動するコンクリートに要求される変形性能を明らかにすることである。各変形管での流動実験は、著者らが開発してきたフレッシュコンクリートの可視化モデルを用い、モデルコンクリートの変形量を、トレーサ粒子群の時間的相対距離の変化を用いて定量的に評価した。また、実際の現場ポンプ圧送実験を行い、可視化による流動実験で得られた知見の妥当性を検証した。

**Keywords** : deformability, fresh concrete, bend pipe, tapered pipe, visualization technique, strain rate, field test

## 1. 序 論

フレッシュコンクリートのポンプ圧送性能を適切に評価する方法を確立することは、ポンプ圧送計画の合理化のみならず、硬化コンクリートの耐久性向上の観点からも、社会的要請として強く望まれている<sup>1)</sup>。

これまでの主たるポンプ圧送性能の評価方法としては、実際の圧送条件による現場圧送実験<sup>2)</sup>や加圧ブリージング試験<sup>3)</sup>が挙げられる。しかし、装置が大がかりすぎて、パラメトリックスタディには向きであったり、評価の適用範囲に制限があったりして、必ずしも十分な評価方法となっていない。最近では、実験室規模のポンプ圧送実験によるフレッシュコンクリートの管内流動状態から、コンクリートの圧送性能を定量的に評価しようとする試験方法も検討されている<sup>4)</sup>。

ところで、実際のコンクリートを用いてポンプ圧送性能を評価しようとする、フレッシュコンクリート内部の挙動はみえないため、インプットとしての配合条件・配管条件等とアウトプットとしての閉塞の有無という情報しか得られない。したがって、評価方法の妥当性を検証するためには、試行錯誤的に多くの実験を行い、膨大な実験データを蓄積することが必要となる。これまでの研究成果をみると、限られた範囲内での適用性は認められるが、圧送配管の形状変化に伴う閉塞事故の発生機構や、閉塞を誘発させる各種影響因子について、一般的な説明ができるまでには至っていない状況である<sup>5)</sup>。

著者らは、これまでに、ポンプ圧送時のフレッシュコンクリートの管内流動における変形性能および閉塞機構の本質的理解を目的として、圧送管内を流動するフレ

ッシュコンクリートの内部挙動が目視観察できるフレッシュコンクリートの可視化モデルおよびそれを用いた可視化実験手法を提案してきた<sup>6)</sup>。

さらに、可視化モデルコンクリート内の粗骨材粒子群やモルタル相のトレーサ粒子の挙動を定量的に評価する計測システムを開発し、テーパ管内を流れる可視化モデルコンクリートの乱れ特性の存在を明らかにし、乱れ特性と閉塞現象の因果関係について考察した<sup>7)</sup>。

また、本可視化実験手法は、コンクリートの二次元テーパ管流れにおける数値モデルの開発<sup>8)</sup>を促進させ、あるいは、分岐管を流れるフレッシュコンクリートの変形性能を解明<sup>9),10)</sup>するための基本的な手段となっている。

一方、フレッシュコンクリートのポンプ圧送計画を立案する場合、テーパ管や分岐管のほかにベント管での閉塞に対する検討も重要な項目である。しかし、ベント管内の流動性状は、管軸方向に対して対称な流れとなるテーパ管内の流動性状と比較すると複雑で、閉塞機構も単純ではない。水理学の分野においても、ベント管内を流動する水の流れは、二次元流の発生を伴い、非常に複雑な問題となっている<sup>11)</sup>。したがって、流動性状が複雑なベント管を流れるフレッシュコンクリートの変形性能および閉塞機構を解明することも、ポンプ圧送性能の評価方法を確立するにあたり必要不可欠な問題の1つである。

本研究は、フレッシュコンクリートの可視化モデルを用いて、直管・テーパ管およびベント管での流動実験を行い、テーパ管とベント管の変形性能および閉塞機構の相違点を検討し、ベント管を流れるフレッシュコンクリートに要求される変形性能を明らかにすることを目的とした。また、実際のコンクリートポンプ車による現場ポンプ圧送実験を行い、可視化による流動実験で得られた知見の妥当性も検証した。

\* 正会員 工博 群馬大学講師 工学部建設工学科  
(〒376 桐生市天神町1-5-1)

\*\* 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所

\*\*\* 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学助教授 建設系

\*\*\*\* 正会員 農博 長岡技術科学大学教授 建設系

## 2. 可視化モデルの変形性能の評価方法

### (1) フレッシュコンクリートにおける“固体”的性質と“ひずみ速度”

著者らがこれまで提案してきた可視化モデルを用いた研究では、管内流動状態を把握するために、モデルコンクリート内に配したトレーサ粒子の時間的变化を二次元座標値 ( $X_i(t)$ ,  $Y_i(t)$ ) で計測している。これらのデータを用いてモデルコンクリートの流動性状を定量的に評価するためには、評価すべき特性を定める必要がある。

これまでの研究では、テーバ管内の流れについては、ある骨材粒子あるいはモルタルの“速度ベクトル”および“加速度ベクトル”を評価特性として着目した。各トレーサ粒子群の流跡線から“速度ベクトル”を算出し、テーバ管出口付近で発生する粗骨材粒子群とその周辺モルタル相の相対速度の変動を定量化した。また、トレーサ粒子群の“加速度ベクトル”の平均値から、テーバ管での閉塞直前に発生する粗骨材粒子間の内部応力を算出し、閉塞現象と乱れ特性の関係を検討した<sup>7)</sup>。

ところで、フレッシュコンクリートの可視化モデルを用いてポンプ圧送実験やその他の流動実験を行い、その挙動を観察すると、流れは“液体”的な性質と“固体”的な性質を示していることが理解できる。管内を順調に流動している状態では、粗骨材粒子群の動きやモルタル相のトレーサ粒子の流れは連続的で可視化モデル全体として“流体”に近い性質を示している。一方、管内閉塞する直前における粗骨材粒子群の不規則な動きやモルタル相の流動状態、あるいは、閉塞後の粗骨材粒子のアーチング等は、可視化モデルの“固体”的変形性状とみなすことができる。

実際のフレッシュコンクリートにおいても、高スランブコンクリートでは、流体的性質が大きく、低スランブコンクリートでは、固体的性質が支配的であることが経験的に感じられる。これは、フレッシュコンクリートが、比重が異なり、粒度分布も大きな幅を有する粒子から成る多相系の粉粒体であること、またコンクリート自体は製造されてから打設されるまで、物理的、化学的に経時変化を絶えず生じているためと考えられる。

したがって、上述のトレーサ粒子群の流跡線から求める“速度ベクトル”や“加速度ベクトル”を流動性状の特性とした場合、フレッシュコンクリートの“流体”的性質を表現しているだけであって、“固体”的性質は十分に表現できていないと考えられる。

そこで本研究では、ベント管とテーバ管を流れるフレッシュコンクリートの“固体”的性質を評価する指標として、“ひずみ速度”という特性を用いることとした<sup>12)</sup>。

図-1に、可視化モデルコンクリートが、直管・テーバ管およびベント管を流れるときの、着目トレーサ粒子

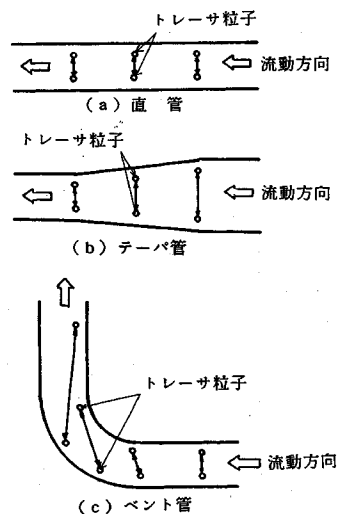


図-1 流動経過時間に伴うトレーサ粒子2点間距離の変化

間の距離の経時変化を示す。直管の場合、モデルコンクリートは固体粒として流動しているため、トレーサ粒子間の相対距離は変化していない。これに対して、テーバ管やベント管の場合、管軸方向の絞りや曲がりにより、トレーサ粒子間の距離が大きく変化する。そこで、本研究では、着目トレーサ粒子2点間の距離の時間変化(ひずみ)を“ひずみ速度”という物理量で定量化することとした。

### (2) ひずみ速度の定義

実際のフレッシュコンクリートの流れは三次元の流れであるが、本研究では二次元平面問題として扱う。図-2は、管内を流動している可視化モデルコンクリート中に存在する4個のトレーサ粒子群(A, B, C, D)を示す。この4個のトレーサ粒子で囲まれる四角形領域が流動経過時間とともに、変形していく状況を“ひずみ速度”なる物理量で表現することとした。したがって、従来の材料力学で用いられているある場所における微小な変形量とした“ひずみ”とは異なる。着目しているトレーサ粒子群の相対位置が流動経過時間に伴い大きく変化すると“ひずみ速度”の絶対値が数パーセントから数十パーセントまで増大することも考えられる。

ひずみ速度の測定手法の原理は、材料力学の実験的研究分野で広く用いられている“ひずみロゼッタ法”を応用するものである<sup>13)</sup>。トレーサ粒子群で囲まれる四角形領域のひずみ速度は、四角形の各頂点(トレーサA, トレーサB, トレーサC, トレーサD)ごとにひずみロゼッタ法を適用しひずみ速度成分を求める。たとえば、トレーサAに着目すると、トレーサAを原点Oと想定し、トレーサAとトレーサB, トレーサAとトレーサCおよびトレーサAとトレーサDを結んだ直線をひず

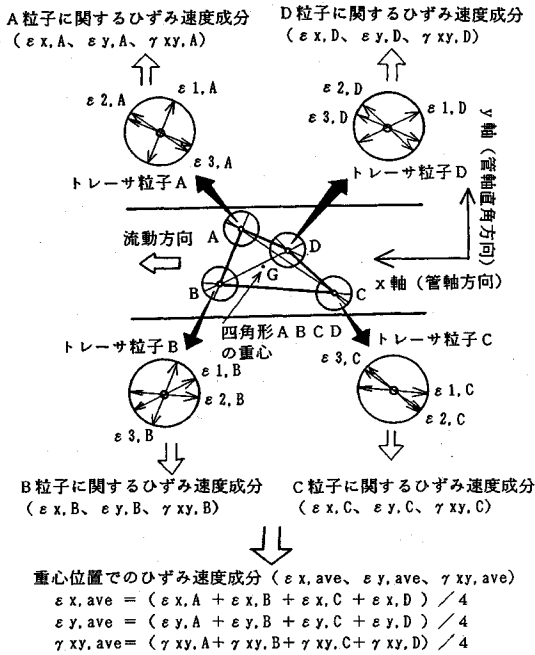


図-2 トレーサ粒子とロゼッタ法による各ひずみ速度成分の関係

みロゼッタ法の 3 方向の軸と考え、3 方向の軸に関して、縦ひずみ速度 ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ) を求める。縦ひずみ速度は、各流動経過時刻における 2 点のトレーサ間距離 (直線 AB, 直線 AC, 直線 AD) の時間的変化を意味する。なお、縦ひずみ速度を求める際の流動経過時間間隔は、相前後する四角形の相対位置を大きく変化しない程度の微小時間間隔と仮定する。よって、各頂点における 3 方向の軸に関する角度の変化は 0 とみなし、3 直線の長さが変化すると考える。

次に、この縦ひずみ速度成分を全体座標系に関するひずみ速度成分 ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ ) に変換する。他のトレーサ B, C, D においても同様な方法によって全体座標系に関するひずみ速度成分を求める。

トレーサ A, B, C, D 4 頂点から得られた各ひずみ速度成分の平均値 ( $\varepsilon_{x,ave}, \varepsilon_{y,ave}, \gamma_{xy,ave}$ ) を、四角形領域全体の平均的な変形状を定量化する物理量とみなす。したがって、各ひずみ速度成分の平均値は、四角形の重心位置でのひずみ速度成分を表すものとした。重心位置での 3 つのひずみ速度成分から、最大主ひずみ速度  $\varepsilon_1$  と最小主ひずみ速度  $\varepsilon_2$  の大きさと角度および最大せん断ひずみ速度  $\gamma_{max}$  を算定する。

以上の計算操作を、各計測時間ごとに 4 つのトレーサ粒子で構成される四角形領域ごとに行い、最大主ひずみ速度  $\varepsilon_1$  と最小主ひずみ速度  $\varepsilon_2$  の大きさと角度を用いて変形管を流れる可視化モデルコンクリートのひずみ速度分布を求める。

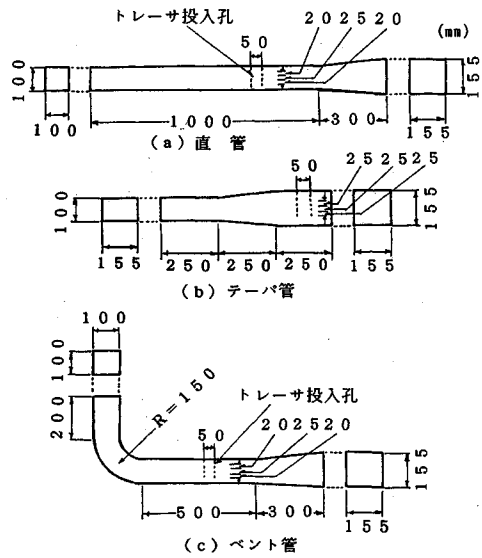


図-3 実験に用いた変形管形状

### 3. 可視化モデルコンクリートによる変形管内の流れ

#### (1) 実験の目的

本研究で新しく導入した“ひずみ速度”を用いて、直管・テーパ管およびベント管を流れる可視化モデルコンクリートの変形性能を定量的に評価するために、実験室規模の小型ポンプ圧送試験装置を用いた管内流動実験を行う。次に、管内流動実験の結果をもとに、ベント管とテーパ管を流れるフレッシュコンクリートの変形性能の違いを検討し、ベント管を流れるフレッシュコンクリートが要求される変形性能およびベント管内での閉塞のメカニズムに関して考察する。

#### (2) 実験方法および可視化モデルの配合

本実験に用いた管形状を、図-3 に示す。管形状は、直管・テーパ管およびベント管の 3 種類である。管断面はすべて矩形断面とし、透明なアクリル板で製作した。実際の現場で用いられている管は円形断面であるが、本実験では管壁奥行き方向の影響を取り除き、変形状態を二次元平面座標系の変形として単純化する必要から矩形断面とした。矩形断面では、着目トレーサ粒子が流動中に管壁奥行き方向に埋没することがないため、トレーサ粒子の二次元座標値 ( $X_i(t), Y_i(t)$ ) を正確に計測することができる。

図-4 に可視化モデルコンクリートの変形管内の小型ポンプ圧送試験装置の概要を示す。ひずみ速度を求めるために必要なトレーサ粒子群は、図-5 に示すトレーサ注入装置を用いて可視化モデルコンクリート内に注入する。8 個のトレーサ粒子群は、変形管の内壁面と可視化

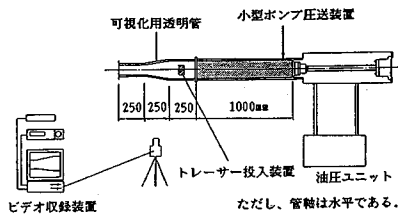


図-4 小型ポンプ圧送試験装置概要

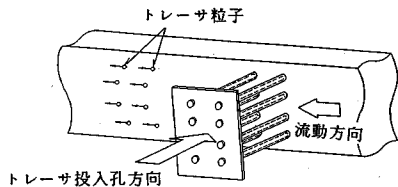


図-5 トレーサ注入装置

モデルコンクリートが接触する境界面に直接挿入する。固体的変形を観測するために、上、中、下の3個の四角形領域が形成される。ここで、四角形領域の初期の大きさは、直管とベント管では上方から5.0×2.0, 5.0×2.5, 5.0×2.0 cm (管軸方向距離×管軸直角方向距離)であり、テーパ管の場合は、3個の四角形領域とも5.0×2.5 cmである。粗骨材粒子群とモルタル相の容積比によって四角形ユニット領域内に入る骨材数は異なるが、本実験では、平均粒径12.5 mmの粗骨材粒子が最大8個程度入る大きさを、1ユニットとした。この四角形領域の時間的変形量を可視化モデルのひずみ速度として定量化する。本研究では、トレーサ粒子の動きを測定することにより得られるひずみ速度を、この四角形領域内の可視化モデルコンクリート全体の変形を表していると考えられる。なお、この四角形領域の初期寸法については、粗骨材粒子の寸法、圧送速度、管寸法などの影響を考慮する必要がある、今後の課題と思われる。

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。モルタルモデルは、水に高吸水性高分子樹脂を添加して得られる無色透明な粘性材料である<sup>6),7)</sup>。粗骨材モデルは、最大寸法を25 mmとし粒径5~15 mmの人工軽量粗骨材 (比重1.527) と、粒径15~25 mmのコークス粒子をアスファルト被膜した大砂利モデル (比重1.239) を混合したものである。粗骨材モデルの粒度分布は、人工軽量粗骨材粒子と大砂利モデルの容積比を1:1とし、土木学会のRC示方書に規定されている範囲内に入るようにした。

主たる実験パラメーターは、粗骨材とモルタルの容積比 (以後、 $V_g/V_m$  と称する) と高吸水性高分子樹脂の添加量である。

$V_g/V_m=0\%$  の可視化モデルは、粗骨材がないモルタルだけの流動状況を再現したものである。 $V_g/V_m=60$

表-1 実験に用いた可視化モデルコンクリートの配合

配合番号	想定スランプ (cm)	吸水性高分子樹脂添加量 (g/l)	$V_g/V_m$ (%)	$V_{g1}/V_{gc}$ (%)	単位置			
					W	P	G1	Gc
配合1	—	1.8	0	—	1000	1.80	—	—
配合2	2.1以上	1.8	6.0	10.0	625	1.13	257	211
配合3	2.1	1.8	8.0	10.0	556	1.00	304	250
配合4	1.9	1.8	9.0	10.0	526	0.95	324	266
配合5	—	3.0	0	—	1000	3.00	—	—
配合6	1.2以上	3.0	6.0	10.0	625	1.88	257	211
配合7	1.2	3.0	8.0	10.0	556	1.67	304	250
配合8	1.0	3.0	9.0	10.0	526	1.58	324	266

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 (比重1.123)

および80%は、順調圧送状態にあるコンクリートの流動状況を想定したものである。また、 $V_g/V_m=90\%$ は、テーパ管においては粗骨材粒子群のアーチングによって管内閉塞現象が発生する直前の不安定圧送状態にあるコンクリートの流動状況を想定したものである。

吸水性高分子樹脂の添加量が1.8 g/lである低粘性モデルモルタルは、建築用のスランプ20 cm前後のフレッシュコンクリートのモルタルを想定している。また、吸水性高分子樹脂の添加量が3.0 g/lの高粘性モデルモルタルは、土木用のスランプ12 cm前後のフレッシュコンクリートのモルタルを想定している。

ピストンの圧送速度はすべてのポンプ圧送実験で一定とし、トレーサ粒子投入位置で3 cm/sとした。ポンプ圧送実験は同一流動条件において最低5回行い、著しく流動状況が異なるときは再実験を行った。

管内を流動するトレーサ粒子の挙動はビデオカメラを用いて撮影し、ビデオデッキに録画した。トレーサ粒子の二次元座標値の読み取りは、マイクロコンピュータ、デジタイザおよびビデオデッキを組み合わせた画像処理システムを用いて行い、同時にひずみ速度分布を算出した。各ひずみ速度成分を算出する際の時間ステップは、0.5 sとしすべての管形状で一定とした。

### (3) 実験結果および考察

図-6に、直管、テーパ管およびベント管を流動するフレッシュコンクリートの可視化モデルの最大および最小主ひずみ速度分布の一例を示す。

おのおののポンプ圧送実験で得られる4個のトレーサ粒子で構成される四角形の重心位置の軌跡は、5回の圧送実験で必ずしも一致しない。このため、個々の圧送実験で得られる最大および最小主ひずみ速度の分布を平均化し変形性能の指標とすることが難しい。

そこで、3つのひずみ速度成分のうち最大せん断ひずみ速度  $\gamma_{max}$  に着目し、5回のポンプ圧送実験のひずみ速度成分を二次元平面内で平均化することとした。

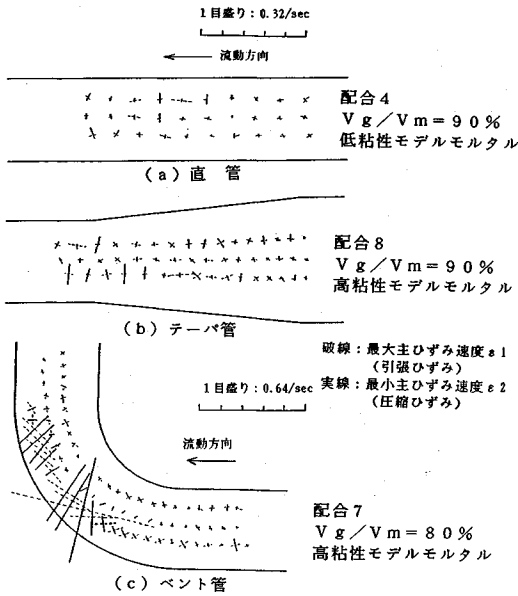


図-6. 最大・最小主ひずみ速度分布の一例

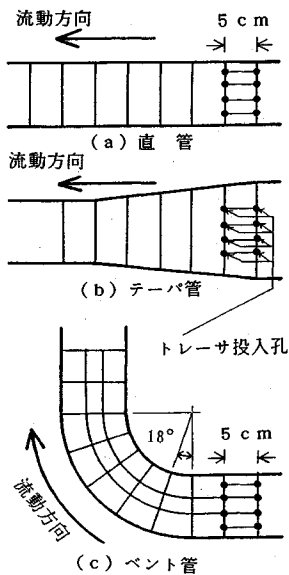


図-7 各変形管の要素分割図

図-7は、各変形管の要素分割図である。4個のトレーサ粒子群で構成される四角形ユニットの重心が要素内に存在するものの最大せん断ひずみ速度成分を集計し、その平均値をもって要素内に発生する“ひずみ速度”の代表値とした。個々の最大せん断ひずみ速度成分が有する角度に関しては特別に考慮せず、ひずみ速度成分の絶対値のみに着目した。なお、要素分割は後注入される着目トレーサ粒子の管軸方向距離5cmごとに管軸直角方向に分割した。ただし、ベント管曲がり部では、中心角で18度間隔(管中心軸円弧長さで4.71cm間隔)の扇形

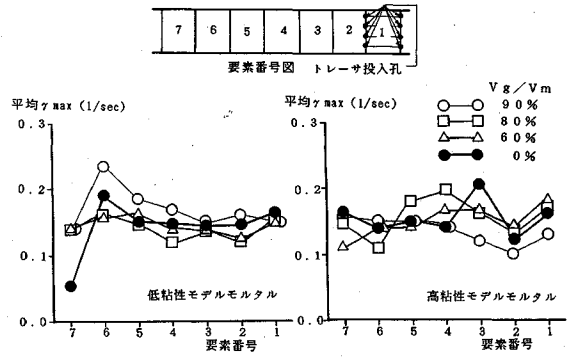


図-8 直管における管軸方向平均  $\gamma_{max}$  分布状況

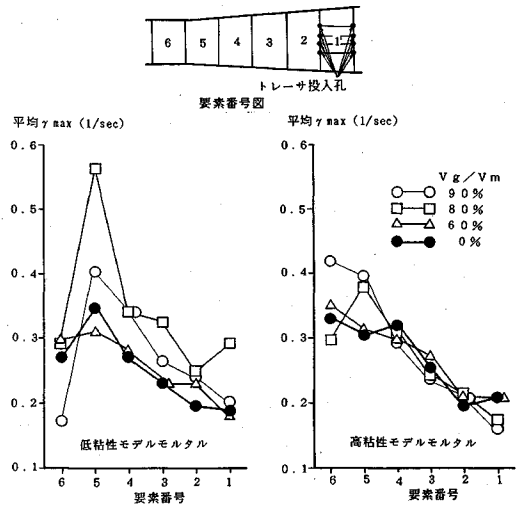


図-9 テーバ管における管軸方向平均  $\gamma_{max}$  分布状況

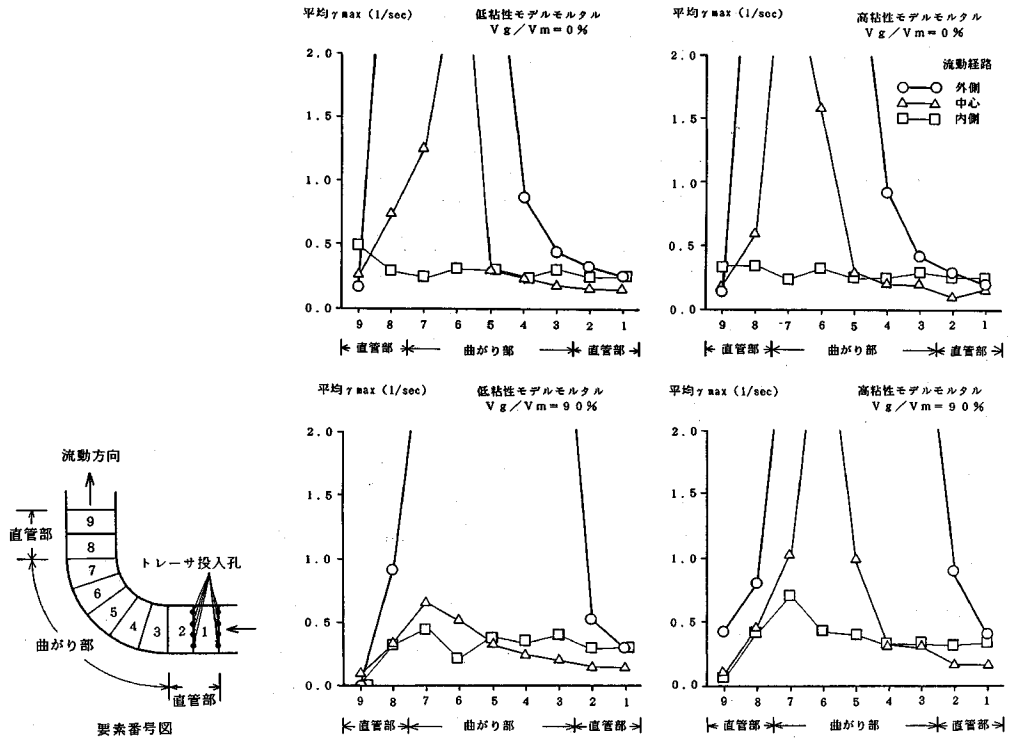
要素として分割した。また、ベント管に関しては、四角形ユニットの流動経路(曲がり部外側、中心および内側)によって発生するひずみ速度成分が大きく異なるため、管軸直角方向に対しても3分割した。

したがって、直管、テーバ管およびベント管を流動するフレッシュコンクリートの可視化モデルの変形性状は、各要素内に存在する最大せん断ひずみ速度成分を平均化した“ひずみ速度”を用いて評価することができる。以後、この最大せん断ひずみ速度成分の平均値を“平均  $\gamma_{max}$ ”と称する。

図-8、図-9は、直管およびテーバ管における管軸方向の平均  $\gamma_{max}$  の分布状況を示す。また、図-10は、ベント管の流動経路(外側、中心および内側)別の管軸断面位置における平均  $\gamma_{max}$  の分布状況の一例を示す。

a) 直管内を流動する可視化モデルコンクリートの最大せん断ひずみ速度成分の平均値の分布状況

直管を流れる可視化モデルコンクリートの場合、モデルモルタルの粘性や  $V_g/V_m$  の大小に関係なく、ほぼ同



図一10 ベント管における管軸方向平均  $\gamma_{max}$  分布状況

程度の平均  $\gamma_{max}$  が直管全領域にわたって平均的に発生しており、テーパ管やベント管の場合と比較して平均  $\gamma_{max}$  が小さい。

これは、直管を流れる可視化モデルコンクリートの相対変形量が非常に小さく、可視化モデルコンクリート全体が1つの塊として管内を流動していることを意味する。したがって、従来のフレッシュコンクリートの管内流動において説明されている『フレッシュコンクリートの固体柱流れ』と一致している。

b) テーパ管内の最大せん断ひずみ速度成分の平均値の分布状況

テーパ管内を流動する可視化モデルコンクリートの場合、テーパ管出口付近では、管軸と直角方向に圧縮ひずみ速度が発生しており、可視化モデルコンクリートが管壁から管軸中心方向に向かって圧縮変形を生じていることを示している。

$V_g/V_m$  が増加するに従って、テーパ管出口付近で平均  $\gamma_{max}$  が増大する。低粘性モデルモルタルの場合、テーパ管出口付近で平均  $\gamma_{max}$  が最大となる配合は、順調圧送条件下では  $V_g/V_m=80\%$  である。一方、閉塞が発生する直前である  $V_g/V_m=90\%$  では、逆にテーパ管内に発生する平均  $\gamma_{max}$  が減少している。これは、次のように説明することができる。

『 $V_g/V_m$  が小さい場合にはコンクリート中の粗骨材粒

子間距離が十分あるため、粒子間の衝突が頻繁でなくスムーズに変形・流動する。一方、 $V_g/V_m$  が増加するに従って、テーパ管出口付近で粗骨材粒子間や管壁との衝突・回転・滑動により粗骨材粒子どうしの相対変形量が増大し平均  $\gamma_{max}$  も大きくなる。しかし、ある一定の  $V_g/V_m$  以上の配合になると、テーパ管出口付近で粗骨材集積状態がモデル骨材の実積率に相当する最密充填状態に近くなり、粗骨材粒子どうしの相対変形量が減少し平均  $\gamma_{max}$  も小さくなる。その後、さらに  $V_g/V_m$  を増加させた配合のとき、テーパ管出口付近で粗骨材粒子群のアーチングが形成され閉塞状態に至る。』

高粘性モデルモルタルの場合は、 $V_g/V_m=80\%$  と  $V_g/V_m=90\%$  の配合における平均  $\gamma_{max}$  の分布状況に有意な差はみられない。モデルモルタルの粘性が大きい場合、粗骨材粒子間に形成される空隙内に存在するモルタルが粗骨材粒子相互の運動を拘束するためと考えられる。

一方、モデルモルタルの粘性が低い場合には、テーパ管全領域に発生する平均  $\gamma_{max}$  が大きい。これは、モデルモルタルの粘性が小さいと、粗骨材粒子とモデルモルタルの付着強度が小さくなるため、粗骨材粒子間に存在するモデルモルタルは容易に粗骨材と分離し、大きな平均  $\gamma_{max}$  が発生するものと考えられる。

ただし、管内閉塞に至る粗骨材粒子のアーチング現象

に関しては、モデルモルタルの粘性による差異は特にみられず、いずれの粘性においても  $V_0/V_m$  が 90% を越えると閉塞に至った。よって、テーパ管を流動するフレッシュコンクリートの変形性能は、閉塞以前の流動状態での変形性能と閉塞時の粗骨材粒子群のアーチング現象とに分けて取り扱う必要がある。前者の流動状態での変形性能にはモルタルの粘性が重要な配合要因であると考えられる。

c) ベント管内の最大せん断ひずみ速度成分の平均値の分布状況

ベント管部では、モデルモルタルの粘性の高低、 $V_0/V_m$  の大小に関係なく、曲がり部外側の平均  $\dot{\gamma}_{max}$  が大きい。なお、図-10のグラフ中で、平均  $\dot{\gamma}_{max}$  が 2.0/s を越えている点では、数 10/s にまで達するデータもある。これは、四角形ユニットを形成する4個のトレーサ粒子群の相対位置が、縦ひずみを算出する流動経過時間間隔内で大きく変化したためと考えられる。よって、平均  $\dot{\gamma}_{max}$  が非常に大きい値になるデータについては、微小変形という仮定が成立しておらず、データの信頼性がきわめて乏しいと判断し削除した。本実験データでは、ひずみ速度の信頼性の限界を 2.0/s としたが、この境界値については今後検討が必要である。

ベント管を流動するときに実際のフレッシュコンクリートが必要な変形量は、粗骨材粒子群とモルタル相間の材料分離の影響をあまり受けないと考えられる。よって、ベント管を流動する場合、フレッシュコンクリートは1相系材料として変形すると考えられ、変形性状が  $V_0/V_m$  に依存するテーパ管内の場合と大きく異なると予想される。

また、ベント管の外側に発生する平均  $\dot{\gamma}_{max}$  は、テーパ管の出口付近に発生する平均  $\dot{\gamma}_{max}$  の2倍以上である。 $V_0/V_m$  が小さい可視化モデルコンクリートにおいては、両者の差がさらに大きくなる。コンクリートのせん断剛性を一定と考えると、テーパ管と比べてベント管内で発生する平均  $\dot{\gamma}_{max}$  が大きいということは、テーパ管よりもベント管内をコンクリートが流動する方が大きな力(圧力)が必要であることを意味する。

テーパ管内で発生する変形は、管軸方向に引き延ばされる変形であるのに対し、ベント管の場合は、曲がり部の外側と内側との流動経路長さの違いから生ずるせん断変形である。テーパ管の場合、管軸に対称な圧縮ひずみが発生し、この値がフレッシュコンクリートの変形能力以上になると粗骨材粒子群がアーチングを形成し閉塞に至る。

一方、ベント管内での変形はずれ変形が主で、曲がり部の内側では小さなずれ変形しか生じていないが、外側は大きなずれ変形を生じている。テーパ管のように軸対象の変形となっていないため、管壁面を反力とする粗骨

材粒子のアーチングは形成されにくい。ベント管の場合、なんらかの原因により流動中のフレッシュコンクリートのせん断剛性が増大し曲がり部を通過する際に必要となるせん断変形がポンプの圧送能力では与えられなくなったときに、管内閉塞が起こると考えられる。

言い換えれば、ベント管内での閉塞を誘発させるためには、コンクリートの粗骨材濃度を上昇させることにより粗骨材粒子群のアーチングを発生させるのではなく、コンクリートのせん断剛性を増大させ圧送能力以上の圧送負荷を発生させることが必要であると推測される。

したがって、本流動実験においてベント管内での閉塞状況を再現させるためには、モデルモルタルの高粘性化によってせん断剛性の高い可視化モデルコンクリートを用いた流動実験を行えばよい。しかし、本可視化モデルコンクリートは、スランプ 12 cm 以下のフレッシュコンクリートのコンシステンシーに対応させることができない<sup>6)</sup>。

そのため、本可視化モデルコンクリートを使った流動実験では、ベント管内を流動するフレッシュコンクリートの閉塞状況を再現することはできず、上記の推論を証明するには至っていない。

低スランプコンクリートに対応する可視化モデルコンクリートの開発は、今後検討を要すると考えられる。

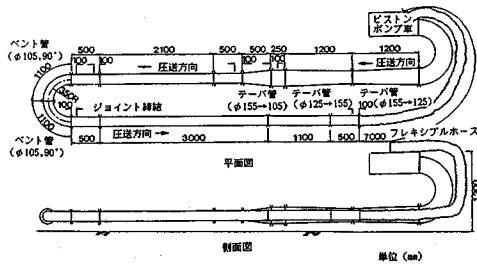
d) フレッシュコンクリートの変形性能に影響を及ぼす配合要因

以上の可視化モデルコンクリートを用いた流動実験による検討から、テーパ管とベント管では、スムーズに流動するために必要となるフレッシュコンクリートの変形性能は異なることが予測される。

テーパ管を流れるフレッシュコンクリートが必要とする変形性能は、断面縮小に伴う粗骨材粒子群の衝突・回転・滑動をできるだけ滑らかにし、内部抵抗力を抑制させ、粗骨材粒子群によるアーチングを発生させないことである。この変形性能に影響を及ぼす配合要因は、テーパ管内流動状態においてはモルタルの粘性であり、閉塞時には粗骨材とモルタルの容積比である。

一方、ベント管を流れるフレッシュコンクリートが必要とする変形性能は、曲がり部外側で発生するせん断変形量を粗骨材とモルタルを分離させることなく、できるだけ小さな抵抗力で達成させることである。ベント管の場合は、管径が一樣なため、粗骨材粒子群の衝突・回転・滑動の頻度はテーパ管の場合と比べて小さく、粗骨材とモルタルの容積比が変形性能に及ぼす影響は小さい。むしろ、フレッシュコンクリートのせん断剛性が閉塞発生の有無と密接に関係すると考えられる。この変形性能に影響を及ぼす配合要因としては、モルタルの品質変化が挙げられる。

ただし、実際の低スランプコンクリートに対する可視



図—11 循環式ポンプ圧送実験のポンプ車および圧送配管の配置

表—2 現場ポンプ圧送実験に用いたコンクリートポンプ車の性能

輸送シリンダ径 (mm)	吐出量 (m³/h)	コンクリートピストン前面圧 (kg/cm²)	輸送距離：直径×水平 (m)			ストローク長さ (mm)	ホッパー容量 (m³)	
			φ155mm	φ125mm	φ105mm			
φ220	大容量	10~110	4 6. 0	125×740	105×520	73×310	1400	0. 4 5
	高圧時	10~78	7 1. 8	205×1150	180×800	140×480		

化モデルコンクリートの適用性の限界から、このモルタルの品質変化に関する配合要因は、今回の流動実験では検証するまでに至っていない。

#### 4. 循環式現場ポンプ圧送実験による検証

##### (1) 実験の目的

フレッシュコンクリートの変形性能に影響を及ぼす配合要因に関する知見は、可視化モデルコンクリートを用いたポンプ圧送実験によって得られた。したがって、実際のフレッシュコンクリートの管内流動において、これら知見が成り立つかどうかを検証する必要がある。

検証方法として、テーパー管とベント管を含む圧送配管内をある一定容量のフレッシュコンクリートが循環する現場ポンプ圧送実験を行った。循環圧送方式では、コンクリートの粗骨材とモルタルの容積比は全圧送時間内で一定と考えられ、圧送経過時間に伴うモルタルの品質変化のみがパラメータとなる。もし、変形性能に関する知見が正しければ、粗骨材とモルタルの容積比に依存するテーパー管での閉塞は発生せず、圧送経過時間に伴うモルタルの品質変化により、フレッシュコンクリートのせん断剛性が増大し最終的にベント管内で閉塞が発生すると予想される。

##### (2) 実験概要

図—11は、循環式ポンプ圧送実験のポンプ車および圧送配管の配置を示す。配管の実長は19.5mで、水平換算距離は70.5mである。ポンプ車はピストン式コンクリートポンプ車であり、その性能を表—2に示す。

実験に用いたコンクリートは通常用いられているAEコンクリートで、その使用材料を表—3に、また、示方配合を表—4に示す。

コンクリートはレデーミクストコンクリートで、ト

表—3 現場ポンプ圧送実験に用いたコンクリートの使用材料

材 料	種 類	比重	粗粒率
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	—
細骨材	信濃川産川砂	2.60	2.66
粗骨材	信濃川産川砂利*	2.71	6.95

\*粗骨材の最大寸法は25mmである。

表—4 実験に用いたコンクリートの示方配合

スランブの範囲 (cm)	空気量 (%)	配合条件			s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)				
		W/C (%)	S/C	Vg/Vm (%)		W	C	S	G	AD*
8.0±1.0	4.5±1	50	2.1	81	39.0	142	267	744	1241	2.7

AD\*: リグニンスルホン酸塩化物

表—5 コンクリートの各種試験結果および圧送状態一覧

シリーズ番号	スランブ (cm)		空気量 (%)		コンクリート温度 (°C)		室温 (°C)	圧 送 状 態
	静置	圧送	静置	圧送	静置	圧送		
第1回	20.5	19.0	4.0	4.2	9.5	8.5	5.0	順 調
第2回	20.6	16.5	3.7	3.2	8.5	9.8	4.5	順 調
第3回	21.5	12.5	2.7	2.9	8.5	12.0	5.0	順 調
第4回	18.0	8.0	3.1	1.9	8.3	13.7	5.0	不安定
第5回	19.0	4.5	1.9	1.5	7.5	15.5	5.0	不安定

\*各測定は、各シリーズの圧送開始直後に行った。第5回圧送実験終了後、第6回の圧送実験開始直後にベント管内で閉塞が発生した。

ラックアジテータにより実験現場のポンプ車まで運搬した。

##### (3) 実験方法

同一コンクリートを閉じた圧送管路内で循環させるわけであるが、実験パラメータとしてポンプ車の吐出量を選定し、10、30、50 m³/h の3段階に変えた。各吐出量に対する圧送継続時間は、シリンダー内を往復運動するピストンのストローク回数が50回に達するまでの時間とした。すなわち、各吐出量段階で、圧送配管内を流れるコンクリートの延べ流量を一定にすることとした。これは、コンクリートの圧送延べ流量が一定であると、各吐出量段階でコンクリートと管壁の摩擦熱によるコンクリートの温度上昇量も一定になると考えたためである。

圧送実験は、吐出量を10→30→50→10→30→50→… (m³/h) 順次変え、閉塞に至るまで繰り返し行った。ここでは、吐出量を10→30→50 m³/hとした1サイクルを1シリーズとし、各シリーズの最初に循環させたコンクリートのスランブ、空気量および温度を測定した。なお、比較のために現場内で別に静置しておいた同一のコンクリートについても同様な測定を行った。

##### (4) 実験結果および考察

表—5に、循環圧送経過時間に伴うコンクリートの各



種試験結果および圧送状態を示す。

目標スランブが8 cmであったにもかかわらず、第1シリーズの実測スランブが20 cm前後であった。この理由は、実験を行った季節・地域環境が1月下旬厳冬期の新潟県長岡市であったことと、市内の生コン工場から大学屋内の実験場まで1時間以上経過していたことにより、実験現場到着時のコンクリートの外気温が屋内実験場の気温5.0°Cより相当に低かったためと考えられる。

圧送中のコンクリートにおいて、スランブロスを経時変化の程度とコンクリートの温度上昇の程度が同様な傾向であること、静置コンクリートのスランブ、コンクリート温度が全シリーズ期間を通じて一定であることから、スランブロスの主たる原因は、コンクリートと圧送管壁面との摩擦によるモルタルの品質変化と考えられる。また、圧送前後の空気量減少は、既往の現場実験の研究でも報告されており<sup>14)</sup>、本実験においても同様な傾向が見られた。

各シリーズにおける圧送状況を、コンクリートポンプ車のポンプ油圧の変動およびコンクリートシリンダーのピストン運動の状況から判断すると、第1シリーズから第3シリーズまでは順調圧送であり、第4、第5シリーズは不安定圧送であった。第6シリーズの圧送開始直後に、ベント管前後で閉塞が発生し、コンクリートを循環圧送できなくなった。閉塞状況としては、テーパ管での閉塞と異なり粗骨材粒子群のアーチングによる急激な閉塞面は存在せず、ベント管内のコンクリート全体がこわばっている状況が観察された。

テーパ管での閉塞が発生していないことは、ポンプ車ホッパー内の残コンクリートを排出する際、確認している。

したがって、本検証実験では、コンクリートのスランブロスによるモルタルの品質低下が、ベント管を流れるコンクリートの変形性能を著しく悪化させ、閉塞に至ったと考えられる。一方、テーパ管での閉塞が発生しなかった原因は、循環式圧送により圧送配管内のコンクリートの粗骨材とモルタルの容積比が一定であったためと考えられる。

## 5. 結 論

本研究は、これまで明らかにされていなかった変形管を流れるフレッシュコンクリートに必要な変形性能および閉塞機構を解明することを目的として、直管・テーパ管およびベント管を流動するフレッシュコンクリートのシミュレーション実験を行った。

フレッシュコンクリートの流動実験には、著者らが開発したフレッシュコンクリートの可視化モデルを用い、流動実験による可視化モデルコンクリートの変形性能を定量的に評価する指標として、フレッシュコンクリート

の固体的性質に着目した“ひずみ速度”を導入した。

次に、流動実験により得られた知見の妥当性を検証するために、実際のフレッシュコンクリートを用いた循環式現場ポンプ圧送実験を行った。

以下、本研究において明らかになったことを述べる。

(1) テーパ管部では、テーパ管出口付近で管壁から中心部に向けて大きな圧縮ひずみが発生し、管軸方向に引張りひずみが生じている。この傾向は、粗骨材とモルタルの容積比が増加するに従って顕著である。

(2) ベント管部では、外側よりも内側の流れが速く、大きなせん断ひずみが発生している。せん断ひずみ速度は外側で特に大きい。この傾向は、モデルモルタルの粘性や、粗骨材とモルタルの容積比はほとんど影響していない。

(3) テーパ管部では、断面縮小に伴う粗骨材間距離の減少により、粗骨材粒子群の衝突・回転・滑動が卓越するので、その活動を緩和し、フレッシュコンクリートの内部応力をできるだけ抑制することが必要である。そのための主たる配合要因は、粗骨材とモルタルの容積比である。

(4) ベント管部では、外側で大きなせん断変形量が生ずるので、通過するコンクリート全体がこの変形に追従し流動するために発生する抵抗力が、ポンプから供給される圧送力より小さくなるが必要である。この変形性能に影響を及ぼす主たる配合要因は、モルタルの品質変化である。

(5) 変形管内を流動するフレッシュコンクリートの変形性能に関する知見の妥当性を検証するために、テーパ管とベント管を含む圧送配管内をある一定容量のコンクリートが循環する現場ポンプ圧送実験を行った。閉塞発生箇所がベント管内であったことから、循環圧送によるコンクリートのスランブロスがベント管内での閉塞事故を誘発させかつ、コンクリートの粗骨材とモルタルの容積比が一定であるためにテーパ管内での閉塞が発生しなかったと考えられ、本可視化実験から得られた変形性能に関する知見の妥当性が証明された。

謝 辞：本研究をまとめるにあたり、東京大学工学部 岡村 甫教授には、有益なご援助、ご指導を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 田沢栄一：ポンプ圧送技術の現状と問題点，コンクリート工学，Vol. 21, No. 11, pp. 13~22, Nov. 1983.
- 2) 島山 昭・堤 知明・坂本全布：石粉またはフライアッシュの添加による貧配合コンクリートのポンプ圧送性の改善，土木学会論文報告集，No. 396/V-9, pp. 143~150, Aug. 1988.
- 3) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針（案），pp.

124～126, 昭和60年11月.

- 4) 大西精治・橋本親典・原田健二：ポンプ圧送時のコンクリートの変形性に関する基礎的研究, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 325～328, 1985. 6.
- 5) 服部勇司・内藤龍夫：コンクリートポンプ工法の計画と管理 5. 閉塞の機構と予防, 鹿島出版会, pp. 61～85, 1987. 6.
- 6) 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, Feb.1988.
- 7) 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, 土木学会論文報告集, No.402/V-10, pp. 61～70, Feb.1989.
- 8) Nanayakkara, A., Ozawa, K. and Mackawa, K.: Flow and segregation of fresh concrete in tapered pipe Two-phase computational model, Third International Symposium on Liquid-Solid Flows, pp.47～52, 1988. 12.
- 9) Ozawa, K., Nanayakkara, A. and Maekawa, K.: Evaluation of aggregation particle motion in liquid-solid flows of model concrete, Proc. of JSCE, No.408/V-11, pp.187～193, Aug. 1989.
- 10) Ozawa, K., Nanayakkara, A. and Mackawa, K.: Flow and segregation behavior of a two-phase model concrete around bifurcating pipe lines, Proc. of JSCE, No.408/V-11, pp.195～203, Aug. 1989.
- 11) 日野幹雄：明解水理学 第9章 管路の定常流, 丸善, pp.190, 1983. 7.
- 12) 本間宏記・橋本親典・丸山久一・清水敬二：管内を流れるフレッシュコンクリートの可視化モデルの変形性状に関する一考察, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.190～191, 平成1年10月.
- 13) 川本眺万：応用弾性学, 共立出版, pp.23～43, 1975.12.
- 14) たとえば, 坂本全布・鈴木明人・黒羽健嗣・丸嶋紀夫：貧配合コンクリートのポンプ圧送性に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.33～36, 1984. 6.

(1990. 9. 3 受付)

## EVALUATION OF DEFORMABILITY OF FRESH CONCRETE FLOWING IN BEND PIPES OR TAPERED PIPES

Chikanori HASHIMOTO, Hiroki HONMA,  
Kyūichi MARUYAMA and Keiji SHIMIZU

The objective of this research is to make it clear the required characteristics for fresh concrete flowing in a bent pipe smoothly by investigation of how fresh concrete can deform itself while flowing in pipes, such as straight pipe, tapered pipe and bent pipe, and how the blocking process takes place in such pipes. The experimental study was conducted by using the visualization technique which was previously developed by the authors. The deformation of model concrete in a certain region was evaluated by measuring the relative distances of 8 tracer particles. In order to examine the applicability of the findings in the test to the actual concrete, the field test was conducted by circulating a given amount of concrete through the pipes connected in a closed loop.