

論 文

[1014] 管内を流れるコンクリートの閉塞感知システムの開発に関する研究

正会員 ○辻村直哉 (福井県庁)
 正会員 橋本親典 (長岡技術科学大学工学部)
 正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学工学部)
 清水敬二 (長岡技術科学大学工学部)

1. はじめに

近年、コンクリートポンプ工法が施工現場のルーチンワークとして定着している一方、圧送作業の能率に大きな障害となっている管内閉塞の発生メカニズムや発生条件に関する理論的研究が十分行われているとはいいがたい。したがって、管内閉塞事故を避けるあまり、単位水量、単位セメント量、 s/a 等を増加する傾向にあり、その結果、硬化コンクリートの耐久性も悪化するという問題が生じてきている。管内閉塞機構の解明の一環として、可視化実験手法を用いた研究¹⁾が行われ、管内閉塞が発生する前兆現象として、粗骨材粒子群とモルタル相の間に乱れが発生するということことが明かとなっている。

本研究は、可視化モデルコンクリートの圧送変形管内の流動状態において得られた知見に基づき、実際のポンプ圧送現場において、管内を流れるフレッシュコンクリートの粗骨材粒子群とモルタル相の間に発生する乱れ特性を定量化し、管内閉塞発生の前兆を感知する計測システムを開発するものである。

2. 計測システム

2-1 計測システムの原理

本計測システムの原理を図-1に示す。可視化実験により得られた粗骨材とモルタルの容積比の変化を管内閉塞予知に際し、最も重要な指標であると考え、これをコンクリートの電気特性、つまり絶縁体である粗骨材と導体であるモルタルの容積比に着目して計測^{2), 3)}することにした。電源としては、フレッシュコンクリートに悪影響を与えることなく簡単に低コストで測定することができる直流電源とした。また、圧送管内を流れるコンクリートの電気抵抗の微小時間内での変化は、粗骨材とモルタルの容積比の変化に依存するものであり、モルタルの配合や品質変化によるものではないと考えた。

2-2 計測システムの概要

計測システムは、図-1のようにセンサ一部とデータ計測処理部とで構成されている。測定センサーは、図-2に示す様なカートリッジ式で、既設の圧送管に自由

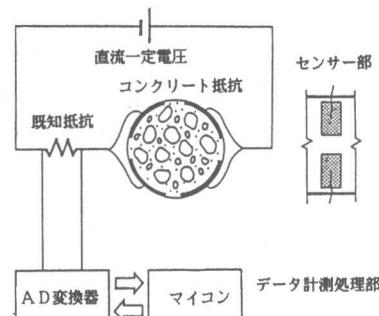


図-1 計測システム

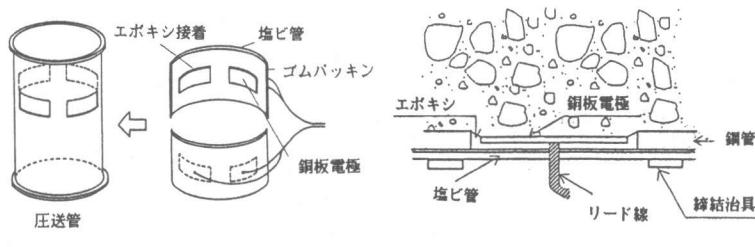


図-2 測定センサー

に取り外しができるものである。極板形状は矩形で、1枚の幅は骨材の最大寸法以上の3.0cm、長さは圧送管の管径の10%で一定とし、管断面方向の電気抵抗を平均的に測定するのに最も適するよう4枚の銅板を配置した。

データ計測処理部には、コンクリートの電気抵抗の時系列データの分析やモニタリングをリアルタイムで実行することを目的として、A/D変換ボード（最大分解能1/1000秒）を内蔵したマイクロコンピュータを用いた。

3. 実験概要

本研究は、以下の2つの実験からなる。

(1) 室内実験（小型ポンプ圧送実験による

本計測システムの検討:RUN1, RUN2)

(2) 現場実験（循環式現場圧送実験による

本計測システムの検討:RUN3）

3-1 使用材料及び示方配合

各実験に用いたコンクリートの使用材料を表-1に、コンクリートの示方配合を表-2に示す。

3-2 実験目的及び実験方法

(1) 室内実験

コンクリートの電気抵抗の経時変化が、コンクリートの乱れ特性を定量的に評価する指標となるかどうか小型ポンプ圧送実験により検討した。実験はテーパ管内のコンクリートの乱れの成長を調べるRUN1と、直管を流動することによってその乱れの大きさがどのように変化するかということに着目したRUN2となる。圧送管形状及び測定センサー取り付け位置を図-3に示す。コンクリートは手練りで作成し、試験装置にコンクリートを詰め込みピストンの圧送速度11.0cm/秒で3回の圧送を行った。

(2) 現場実験

本測定システムの実際のポンプ圧送現場に対する適応性を検討するために、一定容量のコンクリートを圧送管内を循環させる循環式圧送実験を行った。この実験では、コンクリートの粗骨材とモルタルの容積比を全圧送実験内で一定にすることができ、スランプロスによる管内閉塞を誘発することができる。図-4にポンプ車圧送配管の配置および測定センサーの取り付け位置を示す。配管の実長は19.5mで水平換算距離は70.5mである。圧送は、最大吐出量が110m³/hであるピストン式コンクリートポンプ車により行った。コンクリートは、レ

表-1 使用材料

材 料	種 類	室 内 実 験	現 場 実 験
セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.12	比重 3.16
細 骨 材	信濃川産川砂	比重 2.60,粗粒率 2.66	
粗 骨 材	信濃川産川砂利	比重 2.71,粗粒率 6.95	
混 和 剤	A/E減水剤 (++)	-	使用

(備) *リグニンスルホン酸塩化物

250mℓ/C=100kg(原液換算)を4倍に希釈して使用

表-2 示方配合

実験名	配 合 条 件			粗骨材 の 最 大 寸 法 (mm)	s/a (%)	单 位 量 (kg/m ³)				
	W/C (%)	S/C	Vg /Vm (%)			W	C	S	G	AD
RUN1	50	2.1	0	25	100.0	302	605	1270	0	-
	50	2.1	30	25	62.3	233	465	977	616	-
	50	2.1	60	25	45.3	189	378	794	1001	-
	50	2.1	75	25	39.8	173	346	726	1144	-
	50	2.1	85	25	36.9	164	327	687	1226	-
RUN2	50	2.1	0	25	100.0	302	605	1270	0	-
	50	2.1	80	25	38.3	168	336	706	1186	-
RUN3	53	2.8	81	25	39.0	142	267	744	1214	2.7

(備) * Vg/Vmは、水、セメント、細骨材の容積に対する粗骨材の容積を表す

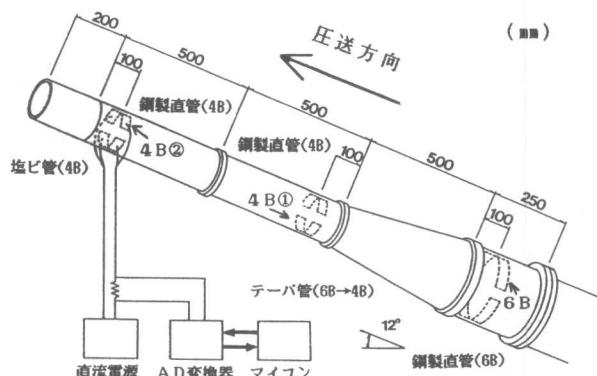


図-3 室内実験装置

ディミクストコンクリートでトラックアジテータでポンプ圧送現場まで運搬した。

実験は、ピストンポン

プ車の吐出量を10, 30, 50

m^3/h の3段階を1シリ

ーズとして圧送管内で閉塞

が発生するまで5シリーズ

を行った。各シリーズ

毎に、スランプ試験、空

気量試験、温度計測を圧

送中と静置状態のコンク

リートの2種類について行った。

4. 実験結果及び考察

4-1 室内実験

各測定位置における電気抵抗の時系列データを定量的に評価する指標として圧送時間中における平均値及び変動係数を採用した。

図-5にRUN1におけるコンクリートの電気抵抗と容積比の関係を示す。

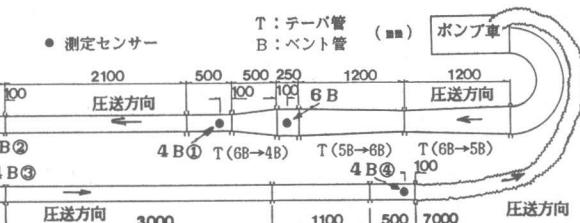


図-4 配管状況及び測定センサー位置

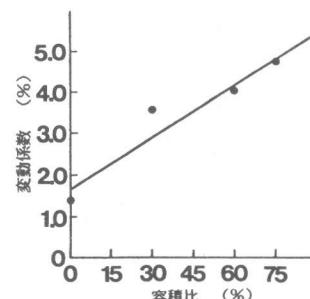
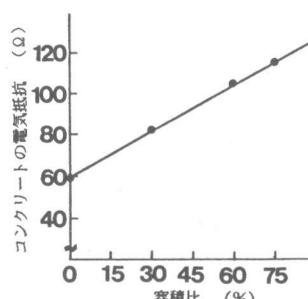


図-5にRUN1におけるコンクリートの電気抵抗と容積比の関係を示す。

図-5 電気抵抗と容積比の関係 (RUN1)

これより、粗骨材が増加するに従い電気抵抗が増大していることから、流動中のコンクリートの電気抵抗により容積比を推定することが可能であると思われる。また、図-6に変動係数と容積比の関係を示す。変動係数も容積比が増加するに従って大きくなっていることから、圧送中のコンクリートが変形管を通してることによって、粗骨材粒子群とモルタル相の間に乱れが発生し容積比が微妙に変化していると考えられる。

また、RUN2で得られた変動係数と測定位置の関係を図-7に示す。容積比が0%（モルタル）の圧送では、3箇所における変動係数がほぼ同じでありテーパ管内を流れるモルタルには極わずかの乱れしか発生していないことがわかる。これに対し、容積比が80%の時は3箇所のうち4B①の変動係数が最も大きく4B②、6Bの順で小さくなっている。6B管と4B管とでは、粗骨材粒子1個と管径の比が異なるために変動係数のみでは評価するのは難しいが、乱れが、テーパ管内で発生し、その後直管内の流動によって減衰する過程を示しているとも考えられる。

4-2 現場実験

圧送実験におけるコンクリートの物性の変化

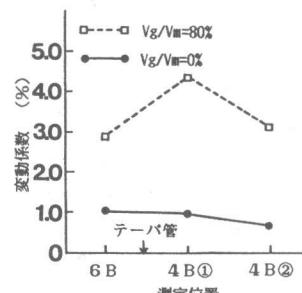


表-3 コンクリートの物性

実験名	スランプ (cm)		空気量 (%)		温度 (°)		圧送状態
	静置	圧送	静置	圧送	静置	圧送	
RUN3-1	20.5	19.0	4.0	4.2	9.5	8.5	5.0
RUN3-2	20.6	16.5	3.7	3.2	8.5	9.8	4.5
RUN3-3	21.5	12.5	2.7	2.9	8.5	12.0	5.0
RUN3-4	18.0	8.0	3.1	1.9	8.3	13.7	5.0
RUN3-5	19.0	4.5	1.9	1.5	7.5	15.5	5.0

(備) *各実験は、圧送開始直後に実験を行った。

*RUN3-5の実験後、ペント管で閉塞が発生した。

を表-3に、実験で得られた電気抵抗の時系列データの一例を図-8に示す。矩形波になっているのは、2連のピストンの往復運動による脈流のためである。つまり、ピストンが運動し管内のコンクリートが流动中は谷の部分に、ピストンが停止し管内のコンクリートが静止中は山の部分に対応している。この矩形波の特徴を定量化するために高速フーリエ（FFT）解析⁴⁾を行った。FFTの解析条件は、データ数N=2048、読み取り時間間隔△t=0.05sec、Nyquist周波数f_n=10Hz、基本周波数幅△f=0.00977Hzである。図-9はシリーズ1の各測定センサーによって得られた電気抵抗の時系列データを周波数分析したものである。測定位置に関係なくどの吐出量においてもピストンの往復運動から求められる固有周波数（吐出量10m³/h：0.052Hz、30m³/h：0.157Hz、50m³/h：0.261Hz）と

図-8 コンクリートの電気抵抗の経時変化 (RUN3-1 吐出量10m³/h)
FFTによる卓越周波数がほぼ一致している。

圧送中に変形管内で発生するコンクリートの乱れを電気抵抗の平均値及び変動係数で論議する際には、この脈流の影響を考慮する必要がある。図-10は、各測定位置で得られた電気抵抗の時系列データのうちコンクリートが圧送されている部分（吐出量10m³/hで11.0秒間、吐出量30m³/hで3.5秒間、吐出量50m³/hで2.1秒間）における変動係数と測定位置の関係

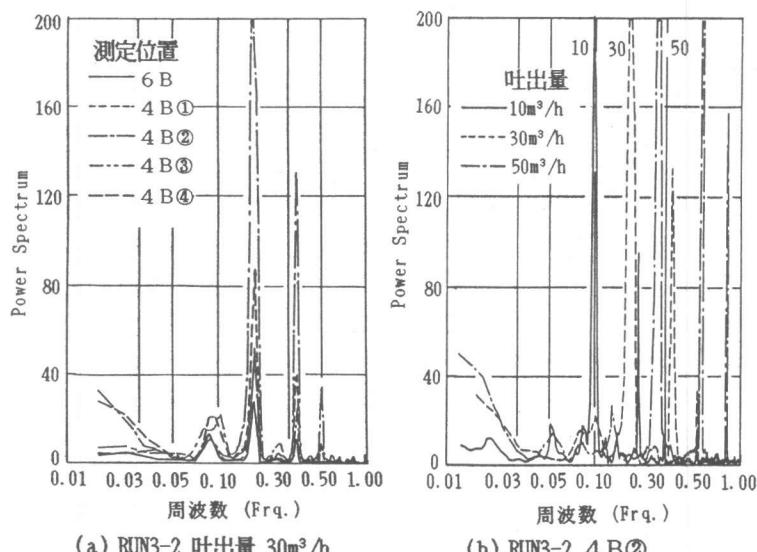
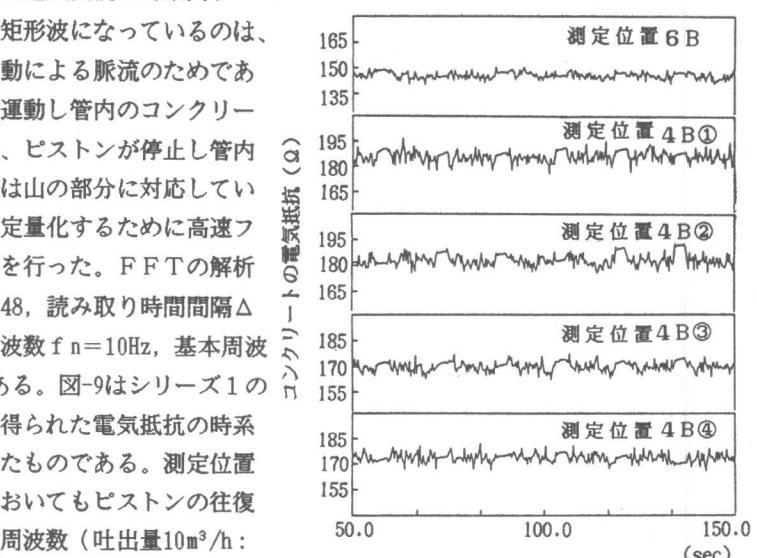


図-9 周波数分析結果

を示したものである。シリーズ1～3までは、テーパ管出口の4 B ①の変動係数が最も大きい。また4 B ①と下流側のベント管入口の4 B ②を比較すると変動係数が小さくなっている。したがって、室内実験で確認されたテーパ管内で発生するコンクリートの乱れの成長と減衰現象を現場実験においても本計測システムで定量化が可能であることが明かとなった。しかしベント管に関する4 B ②、4 B ③および4 B ④の変動係数の大小関係を検討すると4 B ③が最も小さく、先のテーパ管での乱れを見いだすことはできない。これは、ベント管内で発生するコンクリートの乱れがテーパ管内の乱れと異なることと、フレキシブルホースの影響と考えられる。

また、
シリーズ
5には、
コンクリー
トの乱
れが増大
すると予
想される
出口の4

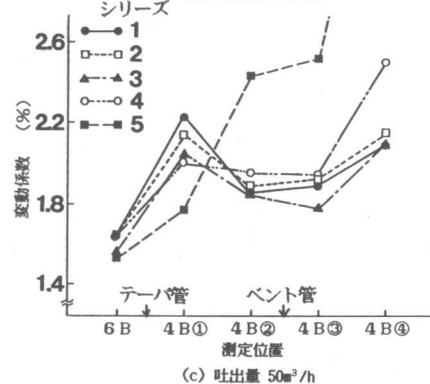
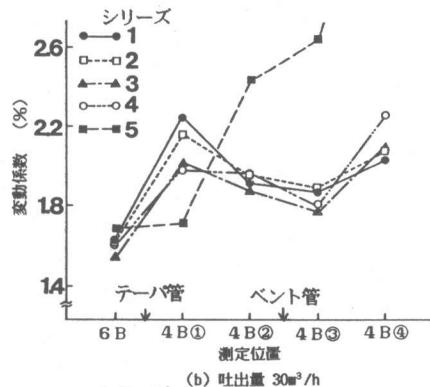
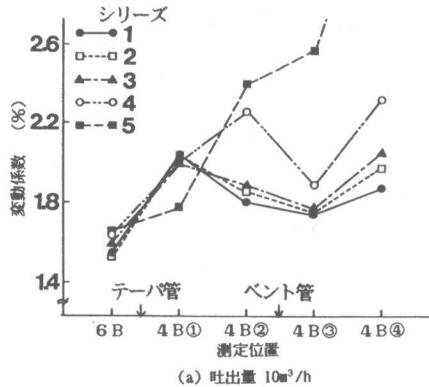


図-10 変動係数と測定位置の
関係 (RUN3 圧送中)

B①の測定センサーの変動係数が減少している。これは、モルタルの品質が低下することにより、圧送变形管内をコンクリートが流れるとき、粗骨材粒子群の変形をモルタルが拘束し、容積比の変化が生じにくいためと考えられる。従って、管内閉塞をコンクリートの乱れの大きさを電気抵抗の時系列データの変動係数のみで推定することは困難と考えられる。

今回の閉塞事故はペント管で発生したことから、ペント管内の乱れ特性における圧送管軸方向の粗骨材とモルタルの容積比の変化に着目し、電気抵抗の時系列データの脈流の変化を検討した。図-11は、スランプロスが著しく、不安定圧送状態であるシリーズ5における電気抵抗の一例である。テープ管前後の6B, 4B①は安定圧送時と同じ規則正しい矩形波であるのに対し、ペント管出口とその下流側の4B③, 4B④では、ピストンの往復運動の周波数よりも周波数の小さい（周期が大きい）波の存在が観測される。そこで脈流を含めた全データについて変動係数を求めた。図-12に変動係数と測定位置との関係を示す。安定圧送である第1から3シリーズまでは、同一測定位置におけるシリーズ間の変動係数はほぼ一定の値（2.0～3.5%程度）を示す。これに対し、不安定圧送になるにしたがって、変動係数は急激に増加し、特にペント管前後の下流側の測定位置ほど顕著である。また周波数の小さい波の存在を明確にするためにFFT解析による

周波数分析を行った。解析条件は、前出と同様である。図-13にシリーズ5の電気抵抗の時系列データの周波数分析の結果を示す。テープ管前後とペント管前後での周波数特性を比較すると、低周波成分に大きな差がみられる。つまり不安定圧送状態のペント管においては、圧送管軸方向に

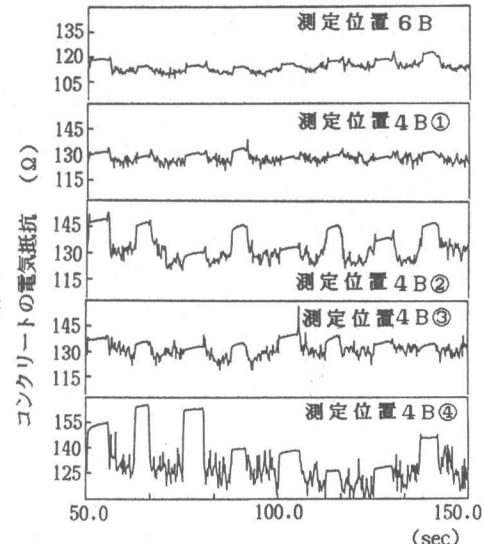


図-11 コンクリートの電気抵抗の
経時変化 (RUN3-5 吐出量 $10\text{m}^3/\text{h}$)

コンクリートの乱れが存在し、その乱れの大きさが増大していくことがわかった。この乱れがある限界を越えたために、不安定圧送状態から管内閉塞に至ったと考えられる。

従って、本計測システムを用いて管内閉塞の前兆を捉えるためには、電気抵抗の時系列データの、脈流の谷部（流动状態）と山部（静止状態）の変動に着目する必要がある。また定量的評価方法としては、谷部の変動係数と脈流を含めた変動係数およびFFTによる時系列データの周波数特性の時間的、位置的变化を観測することが挙げられる。

5. 結論

(1) 管内を流れるコンクリートの電気抵抗の時系列データを観測することで、コンクリートの乱れの大きさを推定することが可能である。

(2) テーパ管前後のコンクリートの乱れ特性を定量的に評価するためには、圧送状態に置ける電気抵抗の谷部の時系列データの変動係数が有効である。

(3) ベント管前後のコンクリートの乱れ特性

を定量的に評価するためには、圧送管軸方向の電気抵抗の脈流の時系列データの変動係数およびFFT解析することによって求められる周波数特性が有効である。

本研究では、管内閉塞の前兆を定性的にしか評価していない、その可能性を示したに過ぎない。今後、さらに実験を重ねることにより、信頼性の高い閉塞予知の判断基準を確立する必要がある。

〔謝辞〕本研究は、昭和61年度、昭和62年度文部省科学研究費補助金、試験研究1（No. 61850090）によったものである。付記して謝意を表す。

参考文献：1) 橋本親典・井上建・丸山久一・清水敬二：「可視化実験手法によるポンプ圧送時のコンクリートの変形性に関する研究」，第10回コンクリート工学年次講演会，1988

2) 岡田清・六車熙：「コンクリート工学ハンドブック」，朝倉書店，1981, pp. 279～280

3) 辻村直哉・橋本親典・清水敬二：「フレッシュコンクリートの管内流動に関する新しい計測システムの提案」，土木学会第42回年次学術講演概要集第V部，1987, pp. 564～565

4) 日野幹雄：「スペクトル解析」，朝倉書店，1981, pp. 193～210

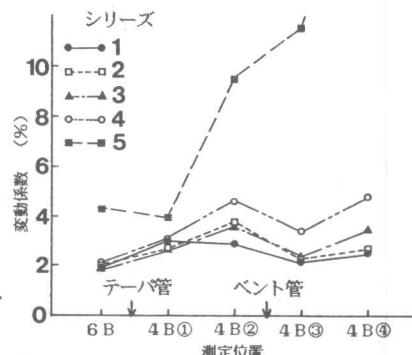


図-12 変動係数と測定位置の関係
(RUN3 吐出量 30m³/h 全データ)

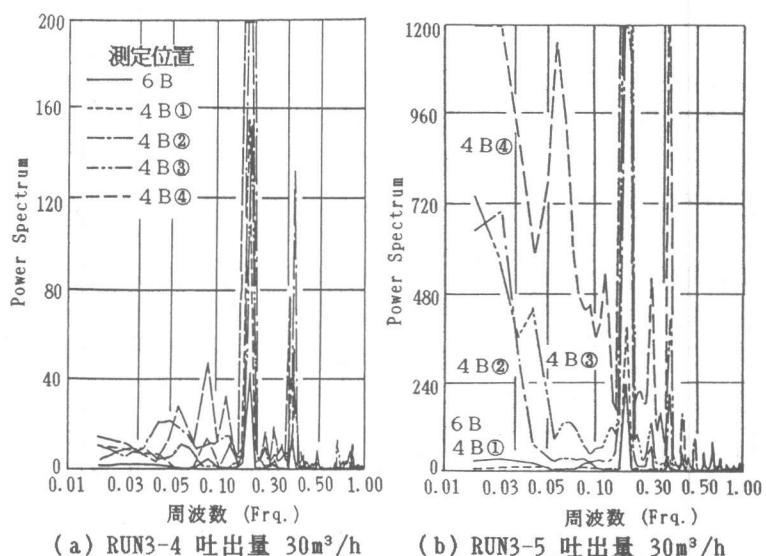


図-13 周波数分析結果