

# 論文 水平管内における高流動コンクリートの材料分離抵抗性モデルに関する一検討

井澤 典嗣\*1・水口 裕之\*2・橋本 親典\*2・岡川 佳史\*3

**要旨:**本研究は、高流動コンクリートの品質として重要な「流動性」と「材料分離抵抗性」のうち、定量的評価方法が十分には確立されていない材料分離抵抗性に注目し、ポンプ配管を想定した水平管路における材料分離抵抗性モデルの構築を目的としたものである。本論文では、既報の材料分離抵抗性モデル<sup>1), 2)</sup>を出発点とし、水の分離による影響を考慮して、改良を加えた。また、粗骨材の分離を評価するのに必要な理論圧力降下量の検討を行い、モルタルの水平管路における圧力降下量から理論圧力降下量を求めることができることを示した。

**キーワード:** 高流動コンクリート, 材料分離抵抗性モデル, 水平管路, 理論圧力降下量

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の予想以上の早期劣化が問題となり、一段と経済的でしかも良質な社会資本を整備することが要求されている。一方、建設業に携わる労働者の高齢化問題、若手の熟練労働者の育成問題なども生じている。このような問題点を解決する方法として、施工の省力化、機械化が考えられる。高流動コンクリートは、自己充填性を持ち、締固めを省くことができ、人手による施工作業を大幅に減らすことができる。これにより、施工上の人的影響も小さくでき、安定した品質の構造物を得ることができる。

このような効果を得るためには、所要の性能の高流動コンクリートを製造することが必要で、このために高流動コンクリートの性能評価を適切に行う必要がある。性能としては、主なものとして「流動性」と「材料分離抵抗性」の2つがあり、このうち、「材料分離抵抗性」については、十分な定量的評価方法が確立されているとはいえ、その評価に個人差が生じ、使用する高流動コンクリートの品質評価の適確さに問題を生じることが考えられる。したがって、高流動コンクリートの材料分離抵抗性のより定量的な評価方法を確立する必要

がある。

そこで本研究は、高流動コンクリートの材料分離抵抗性を定量的に評価するために、ポンプ配管の水平管内を流動するコンクリートの比較的簡便な力学的材料分離抵抗性モデルを構築することを目的とし、既報のモデル<sup>1), 2)</sup>について考察し、水の分離による影響を考慮して改良し、より精度の高いモデルを検討し、そのモデルを適用するために必要な理論圧力降下量の測定方法についても検討したものである。

## 2. 材料分離抵抗性モデルの検討

本研究では、コンクリートを連続相であるモルタルと分散相である粗骨材とから成る2相材料とし、粗骨材とモルタルとの間の材料分離抵抗性モデルを対象とした。

### 2.1 既報モデル<sup>1)</sup>

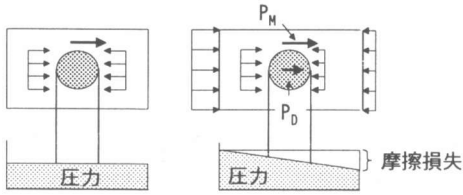
碓ら<sup>1)</sup>は、高流動コンクリートが充填された水平管路でコンクリートに圧力が加わった場合、その圧力は連続相に付加され、これがコンクリートの駆動力となると考えている。しかし、その力がすべて連続相の移動に消費されるのではなく、摩擦による圧力損失が生じるとし、その損失の原因

\*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

\*3 (株)ピー・エス 大阪支店

$P_N$ : 連続相に作用する圧力 (=管内圧)  
 $P_D$ : 分散相に作用する圧力 (=摩擦によって生じた圧力差)



(1) 静止時

(2) 加圧時

図-1 各相に作用する力<sup>1)</sup>

$V_{M1}, V_{M2}$ : 各点における連続相の体積  
 $V_{D1}, V_{D2}$ : 各点における分散相の体積  
 $X_M, X_D$ : 各相の移動距離

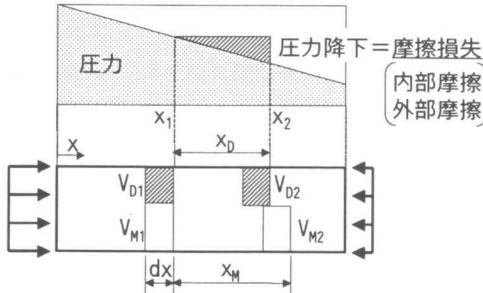


図-2 既報モデル1による材料分離のメカニズム

として1) 内部摩擦, 2) 外部摩擦があるとしている。ここでの内部摩擦とはモルタル内や粗骨材同士およびモルタルと粗骨材との間の摩擦であり, 外部摩擦とはモルタル, 粗骨材と管壁面との摩擦である。そして, 分散相は図-1 に示すような球と近似した粗骨材の上流側と下流側の圧力降下で生じる圧力差が駆動力となると考えている。この駆動力では分散相と連続相との移動に位相差を生じることなく流動させるのに十分ではない場合があり, 連続相と分散相との間に位相差が生じる。そして, この位相差は粗骨材の分離を示すこととなる。このようなメカニズムに基づき, 図-2 に示す微小区間  $dx$  における各相の仕事量および移動距離について注目し, モデルを構築している。材料分離抵抗性としては連続相と分散相の移動距離の差で評価し, 材料分離抵抗性の指標として「移動距離」を用いて定量化を行っている。

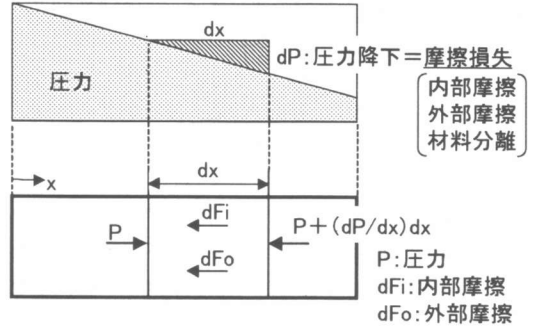


図-3 既報のモデル2による材料分離のメカニズム

## 2.2 既報モデル2<sup>2)</sup>

岡川ら<sup>2)</sup>は従来<sup>1)</sup>の「コンクリートをポンプ圧送した際には圧力降下が認められている」という実験結果をもとに, 図-3 に示すような水平管内を流動するコンクリートの微小区間  $dx$  に作用する圧力および摩擦力の運動量保存則から, モデル式(1)<sup>2)</sup>を構築している。

$$p(x_1) - p(x_2) = \frac{l}{\pi a^2} \left\{ F_{fi}(x_2) - F_{fi}(x_1) + \{ F_{fo}(x_2) - F_{fo}(x_1) \} + \frac{dM_m}{dt} \{ v_m(x_2) - v_m(x_1) \} + \frac{dM_g}{dt} \{ v_g(x_2) - v_g(x_1) \} \right\} \quad (1)$$

ここで,  $p(x)$ : 各点での圧力

$a$ : 管路の管径

$F_{fi}(x)$ : 各点での内部摩擦

$F_{fo}(x)$ : 各点での外部摩擦

$M_m$ : モルタルの質量

$M_g$ : 粗骨材の質量

$v_m$ : モルタルの速度

$v_g$ : 粗骨材の速度

この式(1)から圧力降下の原因としては右辺第1項の内部摩擦, 第2項の外部摩擦および第3, 4項の加速度によるものの3つが挙げられる。そして, このうち加速度による圧力降下が0の場合は, モルタルおよび粗骨材の質量が時間的に変化しない場合とモルタルと粗骨材に加速度が発生しない場合となり, これはモルタルと粗骨材とが分

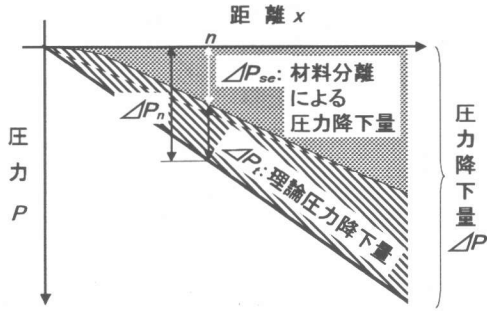


図-4 材料分離量の考え方 (既報モデル2)

離していない状況すなわち、材料分離が生じていないことを示すこととなり、加速度項は「材料分離」に起因するとしている。以上のことから、圧力降下の原因として、1) 内部摩擦、2) 外部摩擦、3) 材料分離の3つの因子を考えている。材料分離抵抗性としては図-4 のように、内部摩擦と外部摩擦の圧力降下量の和すなわち、材料分離に起因しない因子での圧力降下量を「理論圧力降下量  $\Delta P_t$ 」として、この圧力降下量を基準とし、各区間での圧力降下量を比較することで材料分離抵抗性を評価している。すなわち、材料分離抵抗性の指標として「圧力降下量」を用いて定量化を行っている。以上の関係を式(2)に示す。

$$\Delta P_{se} = \Sigma (\Delta P_n - \Delta P_t) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta P_{se}$ : 材料分離による圧力降下量  
(粗骨材の分離に値する)

$\Delta P_n$ : 任意の点 n での圧力降下量

$\Delta P_t (= \Delta P_{fi} + \Delta P_{fo})$ : 理論圧力降下量

$\Delta P_{fi}$ : 内部摩擦による圧力降下量

$\Delta P_{fo}$ : 外部摩擦による圧力降下量

### 2.3 本論文でのモデルの考え

既報モデル1と既報モデル2との違いは、圧力降下に「材料分離」が影響していると考えているか否かである。材料分離のメカニズムから考えると、材料分離が生じる際の各材料間の摩擦により、エネルギー損失が生じることから、材料分離は圧力降

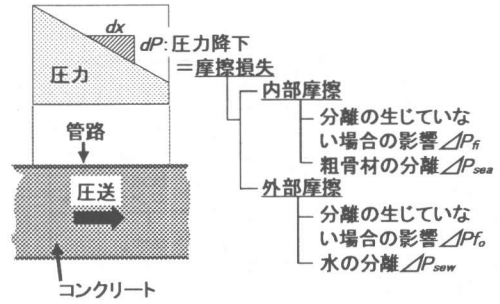


図-5 本論文での圧力降下量の原因

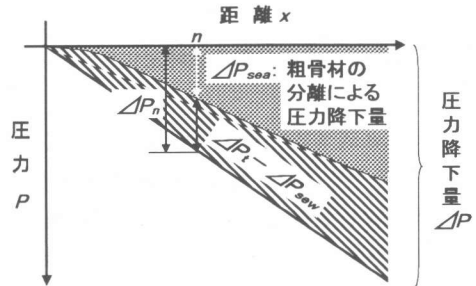


図-6 材料分離量の考え方 (本論文)

下に影響を及ぼす。一方、既報モデル2の材料分離抵抗性モデルにおいても、もう1つの主な材料分離である「水の分離」が考慮されていない。管路内のコンクリートにおいて、適度な水の分離は管壁面とコンクリートとの間に水膜を形成し、コンクリート塊を滑らかに移動させる潤滑剤の役割を果たすため、圧力降下に及ぼす影響が大きい作用となる。以上のことから、本論文では圧力降下の原因として、図-5に示すように、1) 内部摩擦、2) 外部摩擦、3) 粗骨材の分離、4) 水の分離の4つの因子を考えた。

これらをもとに、粗骨材の分離による影響は、図-6 のようになり、式(3)のように圧力降下量  $\Delta P_{sea}$  によって定量的に評価できることとなる。

$$\Delta P_{sea} = \Sigma \{ \Delta P_n - (\Delta P_t - \Delta P_{sew}) \} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta P_{sea}$ : 粗骨材の分離による  
圧力降下量

$\Delta P_{sew}$ : 水の分離による圧力降下量

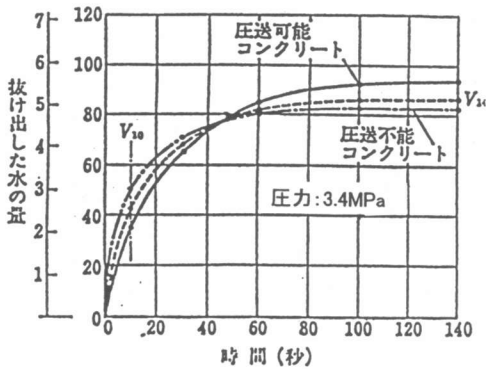


図-7 水の分離の経時変化<sup>3)</sup>

式(3)と式(2)とを比較すると、式(2)の既報モデル2では、水の分離における影響  $\Delta P_{sew}$  を考慮していない分、粗骨材の分離量が小さく評価されることになり、その分の誤差が生じていることがわかる。また、粗骨材の分離を評価するための基準となる量を式(2)では理論圧力降下量  $\Delta P_t$  としているのに対し、式(3)では理論圧力降下量に水の分離における影響を含めた  $\Delta P_t - \Delta P_{sew}$  としている。これは理論圧力降下量  $\Delta P_t$  が材料分離の生じていない場合での圧力降下量であり、図-4のように管路上常に一定量で表すことができる。また、高流動コンクリートでは、そのブリーディング量は少なく、また図-7にみられるように管路内においては数十秒でその量は一定量に収束することから、水の分離による圧力降下量も理論圧力降下量と同様、管路上常に一定量で表すことができると考えられ、理論圧力降下量と水の分離による圧力降下量との和を図-6のように一定量で表すことができると考えた。これは、この方がメカニズムを考える上においても、また理論圧力降下量の値を実際に測定する際においても簡便に解析、測定ができるためである。この他、本研究ではコンクリートをモルタルと粗骨材とから成る2相材料としてモデルを考えているため、水の分離における影響は他の要素に置き換える必要があり、水の分離における影響を理論圧力降下量の中にも含めることで、モデルのメカニズ

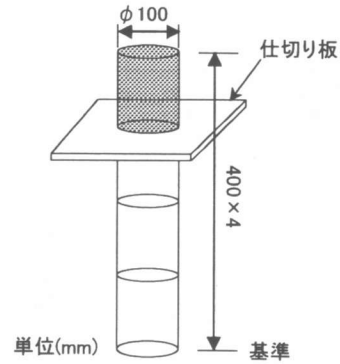


図-8 S漏斗試験装置

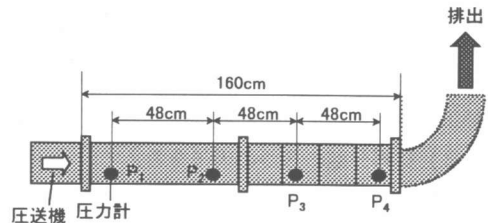


図-9 管内圧力試験装置

ムとも整合性が保たれる。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 理論圧力降下量

2.3で示したように、材料分離量を粗骨材の分離による圧力降下量  $\Delta P_{ses}$  により定量的に評価するには、評価の基準値となる材料分離が生じていない場合の圧力降下量である理論圧力降下量が必要となる。そこで、理論圧力降下量を測定する方法として、次の2つの方法について検討した。

(1) S漏斗<sup>2)</sup>による理論圧力降下量を求める方法(図-8参照)

(2) モルタルの管内圧力試験結果による理論圧力降下量を求める方法(図-9参照)

(1)は図-8に示すS漏斗試験装置を用い、「S漏斗試験においては、漏斗内をコンクリートが流動する際には局部においても粗骨材の流入、流出はない。すなわち、粗骨材の分離は生じないと考え、内部摩擦および外部摩擦によるエネルギー損失のみが得られる」という考えに基づいた方法である。測定方法は、S漏斗を流下する試料のエネ

ルギ損失量とモルタルの管内圧力試験結果とに高い相関関係があるという実験結果に基づき、S漏斗試験での流下速度からエネルギー損失量を求め、エネルギー損失量と管内圧力試験結果との関係からエネルギー損失量を圧力降下量に換算し、それをもとに理論圧力降下量を求めるものである。

(2)は「理論圧力降下量が粗骨材の分離を生じていない場合の圧力降下量」ということから、この場合のコンクリートの流動状況としては、モルタルと粗骨材との間に相対速度は発生しないということから、理論圧力降下量に影響してくる因子としては、モルタル内部の内部摩擦と外部摩擦と考えることができる。そして、図-9のような管内圧力試験装置を用いて行ったモルタルでの管内圧力試験の測定結果は、粗骨材を含まず、粗骨材の影響がないため、圧力降下量に影響してくるものとしてはモルタルの内部摩擦と外部摩擦と考えられる。以上のことから、双方の圧力降下の原因が等しく、モルタルでの管内圧力試験結果を理論圧力降下量として用いることができるとしたものである。

本論文では、式(3)に示したように、粗骨材の分離を評価する基準値には理論圧力降下量以外に、水の分離による圧力降下量が含まれている。これについては、次のように考え、理論圧力降下量の測定時にその影響は含まれていると解釈している。それは、理論的に水の分離を生じないコンクリートやモルタルを作製することは不可能であり、また、粗骨材の分離による圧力降下の影響を求めるのに、水の分離による影響と理論圧力降下量とを区別しなくても、実用上利用可能であると考えられるためである。すなわち、2.3で述べたように、両者の影響を1つの値で表すことで、モデルのメカニズムを考える上においても、また測定の際においても、簡便に考察、測定ができることとなる。

### 3.2 理論圧力降下量の測定及び考察

3.1で述べた2つの方法によって求めた理論圧力降下量について、比較、検討し、各方法の理論圧力降下量への適用性について考察する。

表-1 使用材料

種類	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント、 比重3.16、比表面積3290cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	比重2.20、比表面積3500cm <sup>2</sup> /g
細骨材	徳島県吉野川旧河川敷産川砂、 表乾比重2.63、粗粒率3.04
粗骨材	徳島県那賀川旧河川敷産玉砕石、 表乾比重2.64、粗粒率6.65
混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系) 増粘剤(天然高分子(β-1,3グルカン)を主成分とする)

表-2 配合

増粘剤の 添加割合	水結合比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	増粘剤	SP <sup>*1</sup>
0.0%	36.0	180	370	158	778	766	0.0	10.56
0.3%							0.54	
0.6%							1.08	

\*1 SPIは粉体量に対して2.0%

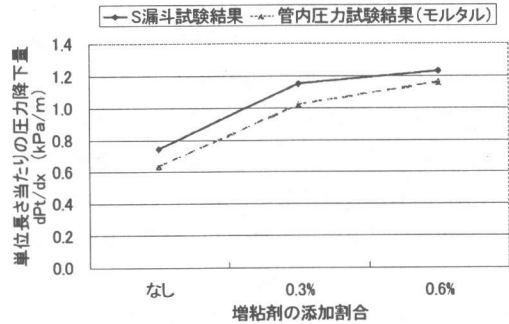


図-10 試験別圧力降下量の検討

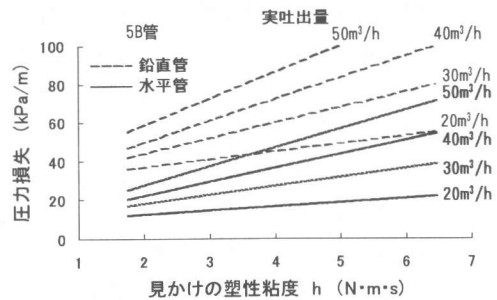


図-11 流下方向と圧力損失との関係<sup>4)</sup>

実験に用いた使用材料および配合を表-1 および表-2 に、S漏斗試験結果とモルタルでの管内圧力試験結果とを図-10に示す。図-10に示されているように、両者ともに同様の圧力降下の傾向を示し、また、増粘剤の添加割合が増すにつれ、圧力降下量も増加傾向にある。これは、今回使用した増粘剤は吸水し、膨潤ゲルを形成することで、

コンクリート中の自由水量が減少し、モルタルの粘性を増加させるとともに、水の粘性を増加させ、水の分離量を低下させたためと考えられる。本研究ではコンクリートを管路内で圧送させるため、水の分離量が減少すると、外部摩擦の低減効果が得られず、その結果圧力降下量の増大へとつながると考えられる。このように考えると、図-10の試験結果の傾向は理論的考察結果と一致しており、各試験結果は理論圧力降下量として考えられると思われる。

一方、2つの試験結果を比較すると、圧力降下量に若干の差がみられる。この原因としては、S漏斗試験結果は、鉛直下方方向の流れであるのに対し、管内圧力試験結果は水平方向の流れであり、このような流れの方向の違いによる圧力損失への影響は、一般に図-11でみられるように、同じ流量では水平方向の圧力損失より、鉛直方向の圧力損失の方が大きくなるため、このような流れの方向の違いに対する影響が差になり、S漏斗試験結果の方が大きな圧力降下量となったと考えられる。すなわち、流れの方向による影響を考慮すると、S漏斗試験結果と管内圧力試験結果は同様の増粘剤に対する影響を表わしているといえる。

以上のことから、S漏斗試験およびモルタルでの管内圧力試験の結果とも、理論圧力降下量の傾向を表していると思われる。しかし、本研究では、重力の影響を最小限にする目的から水平管内における材料分離抵抗性を対象としており、S漏斗試験では重力による影響が含まれるため、モルタルでの管内圧力試験結果の方がより適切と考えられる。また、これによりS漏斗試験で理論圧力降下量を求めなくても、管内圧力試験のみで、材料分離抵抗性の評価が可能となる。

### 3.3 材料分離抵抗性の評価

3.2で述べたようにして求めた理論圧力降下量(式(1)の右辺第1, 2項)の値と図-9の試験装置を用いて測定した高流動コンクリートの圧力降下量(式(1)の左辺)の値との差が式(1)の右辺第3, 4項の値で示されるような粗骨材の分離による圧力降下量となり、粗骨材の分離抵抗

性を表わすことができる。

## 4. まとめ

本研究で得られたことをまとめると以下のようになる。

(1) 圧力降下の原因の一つとした水の分離の影響は、理論圧力降下量内に含ませることで、モルタルと粗骨材から成る2相材料としたモデル構築時の仮定を適用できるだけでなく、材料分離のメカニズムを簡便に構築できることとなる。

(2) (1)のように処理することにより、粗骨材の分離抵抗性モデルとしては、式(1)で表わせる。

(3) 材料分離が生じていないとしたときの理論圧力降下量は、本研究のモデルの条件を考慮すると、モルタルでの管内圧力試験結果の方がより適合性が高いと考えられる。

(4) 以上の結果より、式(1)と理論圧力降下量を測定することで、粗骨材の分離抵抗性を定量的に表わすことができる。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金の基盤研究(c)(2)(課題番号:11650467, 研究代表者:橋本親典)によって実施されたものであることを付記する。

## 参考文献

- 1) 碓貴士, 水口裕之, 橋本親典, 上田隆雄: 水平管内における高流動コンクリート材料分離抵抗性モデル, セメントコンクリート論文集, pp.552-557, 1998
- 2) 岡川佳史, 水口裕之, 橋本親典, 上田隆雄: 水平管内における高流動コンクリートの材料分離抵抗性モデル, 第53回セメント技術大会講演要旨, pp.292-293, 1999
- 3) 尾坂芳夫: コンクリートの品質管理入門, 彰国堂, p.204, 1981
- 4) 社団法人日本コンクリート工学協会編: コンクリート便覧, 第2版, 技報堂出版, p.368, 1996