

論文

[1071] テーパー管を通過するフレッシュコンクリートの挙動に関する研究

正会員 谷川 恭雄 (名古屋大学建築学科)
 正会員○森 博嗣 (名古屋大学建築学科)
 正会員 黒川 善幸 (名古屋大学建築学科)
 正会員 野田 豊 (三重大学大学院)

1. まえがき

コンクリートのポンプ圧送工法において、フレッシュコンクリートの閉塞は施工上最も致命的なトラブルの一つである。特に、テーパー部における閉塞機構の解明は重要な課題であり、いくつかの実験的な検討結果[1,2]が報告されているが、フレッシュコンクリートの物性値から閉塞の発生状況を説明するような理論的な検討は少ない[3,4]。

RC構造物のコンクリート工事は、近年の超高層化・大スパン化やロボット化の影響を受けて、また、ポンプ圧送も高所・長距離・分岐など複雑で厳しい条件の下で行われるようになってきた[5]。テーパー管の圧力損失は、現状のコンクリートの圧送計画においては、単純に直管の定数倍として見積もられているが[6]、各種の混和材料の使用によってフレッシュコンクリートの流動・変形状が多様化しつつある現状から考えれば、この方法は合理的ではない。

筆者らは既に、レオロジーに基づいたフレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する理論的な検討を行っている[7]。本報告では、フレッシュコンクリートのテーパー管内における圧力損失および閉塞に関する理論的な検討を行う。

2. テーパー管内流動のメカニズム

2.1 すべり抵抗を考慮しない場合

図-1に示すように、テーパー管の一部として軸方向に微小な長さ dz を取り出す。この微小区間におけるテーパー管の平均半径を R 、テーパー角を ϕ とすると、中央部の断面積 A 、テーパー管内の側面積 A_t 、およびその半径 R における投影面積 A_z は以下のようなになる。

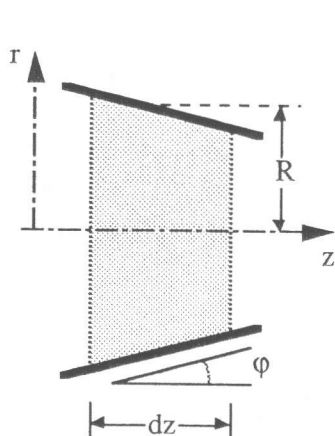


図-1 テーパー管の解析モデル

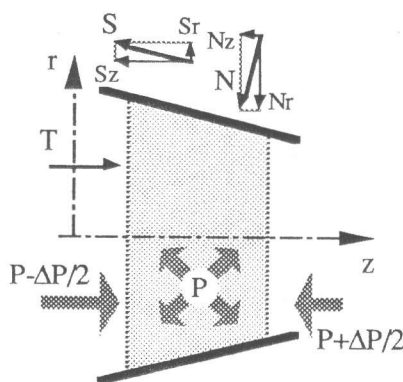


図-2 テーパー部の力の釣り合い

$$A = \pi R^2 \quad (1)$$

$$A_t = \frac{A_z}{\cos \varphi} = \frac{2\pi R dz}{\cos \varphi} \quad (2)$$

この微小区間に働く力を考える。図-2に示すように、試料内部は圧力によって、また、テーパー管には反力が働いて釣合いを保っている。この微小区間の試料に働く平均圧力をPとすると、試料を前進させようとする力Tは、微小区間の入口と出口の圧力の差 ΔP によって生じている。

$$T = -\Delta P \cdot A = -\frac{\Delta P}{dz} \frac{R}{2} A_z \quad (3)$$

これに対して反力は、圧力Pによる力と推進力Tによって生じる力Nに分解される。このNの軸方向成分 N_z は、抵抗力となって推進力Tと釣り合っている。

$$N_z = N \sin \varphi = T \quad (4)$$

したがって、半径方向の応力 σ_r および偏差応力 σ'_r は、以下のようになる。

$$\sigma'_r = \sigma_r + P = \frac{N_r}{A_z} = \frac{T}{A_z \tan \varphi} = -\frac{\Delta P}{dz} \frac{R}{2 \tan \varphi} \quad (5)$$

式(5)より、試料の変形による圧力損失 $-\Delta P/dz$ が次の式で求められる。

$$\frac{\Delta P}{dz} = -\frac{2}{R} \sigma'_r \tan \varphi \quad (6)$$

2. 2 すべり抵抗を考慮した場合

実際の管の内壁とフレッシュコンクリートとの間には、すべりまさつによる抵抗が働いていることは明らかである。まさつによる抵抗力Sは、すべり面に働く垂直応力 σ_n とまさつ係数 μ および粘着力Cにより以下のように与えられる。

$$S = \mu \sigma_n A_t + CA_t = \mu N + \mu P A_t + CA_t = \mu N + \tau_h A_t \quad (7)$$

ここに、 $\tau_h = \mu P + C$

半径方向の偏差応力 σ'_r は、反力Nおよびすべり抵抗力Sの合力の半径方向成分により以下のように与えられる。

$$\sigma'_r A_z = N_r - S_r = N \cos \varphi - S \sin \varphi = N (\cos \varphi - \mu \sin \varphi) - \tau_h A_t \sin \varphi \quad (8)$$

式(8)より反力Nは、次のようになる。

$$N = \frac{\sigma'_r A_z + \tau_h A_t \sin \varphi}{\cos \varphi - \mu \sin \varphi} \quad (9)$$

一方、推進力 T は、反力 N およびすべり抵抗 S の合力の軸方向成分と釣り合っているので、以下のようなになる。

$$T = N_z + S_z = N \sin \varphi + S \cos \varphi = N (\sin \varphi + \mu \cos \varphi) + \tau_h A_t \cos \varphi \quad (10)$$

式(10)に、式(3)および式(9)を代入すると、

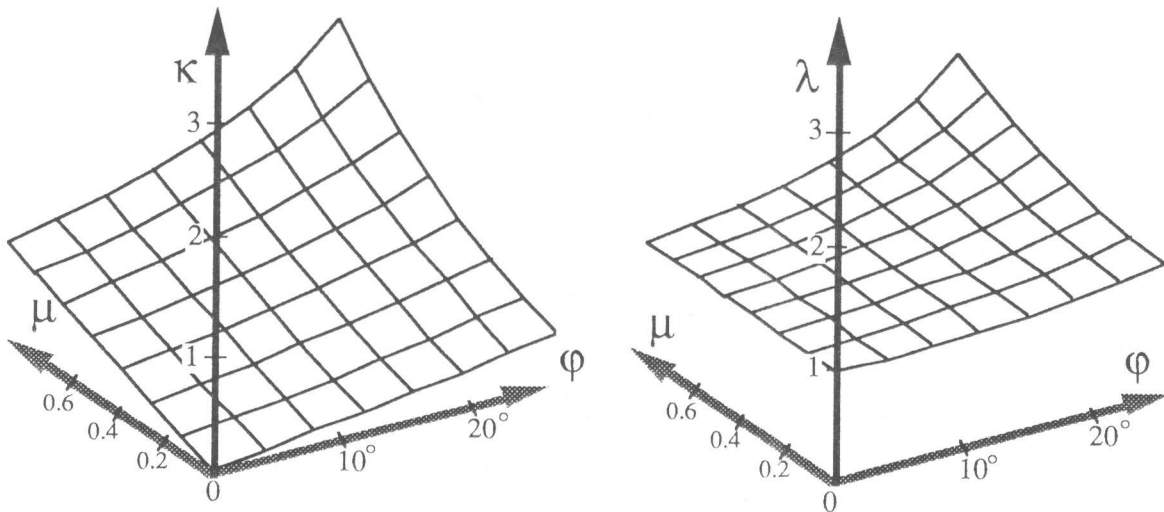
$$\begin{aligned} -\frac{\Delta P}{dz} \frac{R}{2} A_z &= \frac{(\sigma_r' A_z + \tau_h A_t \sin \varphi) (\sin \varphi + \mu \cos \varphi) + \tau_h A_t (\cos \varphi - \mu \sin \varphi) \cos \varphi}{\cos \varphi - \mu \sin \varphi} \\ &= \frac{\sigma_r' A_z (\sin \varphi + \mu \cos \varphi) + \tau_h A_t}{\cos \varphi - \mu \sin \varphi} = \frac{\sigma_r' (\sin \varphi + \mu \cos \varphi) \cos \varphi + \tau_h}{(\cos \varphi - \mu \sin \varphi) \cos \varphi} A_z \end{aligned} \quad (11)$$

となり、これを整理すると、圧力損失 $-\Delta P/dz$ は以下のような表現となる。

$$-\frac{\Delta P}{dz} = \frac{2}{R} (\kappa \sigma_r' + \lambda \tau_h) \quad (12)$$

ただし、 $\kappa = \frac{\sin \varphi + \mu \cos \varphi}{\cos \varphi - \mu \sin \varphi}$, $\lambda = \frac{1}{(\cos \varphi - \mu \sin \varphi) \cos \varphi}$

式(12)の κ および λ は、テーパ角 φ およびまさつ係数 μ の関数である。 $\cos \varphi = \mu \sin \varphi$ のとき、 $\kappa = \infty$, $\lambda = \infty$ となり管は閉塞する。また、図-3より明らかなように $\varphi=0$, $\mu=0$ のとき、 $\kappa=0$, $\lambda=1$ である。なお、まさつ係数 μ および粘着力 C は、壁面におけるすべり速度 β の関数である。式(12)は、まさつによる抵抗がない($\mu=0$, $C=0$)とき、 $\tau_h=0$, $\kappa=\tan \varphi$, $\lambda=1/\cos^2 \varphi$ であり、式(6)となる。



(a) κ の値

(b) λ の値

図-3 テーパー角(φ)とまさつ係数(μ)が κ および λ に与える影響

2.3 すべりと変形の関係

ここで、円柱座標系 (r, θ, z) における応力 σ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を考える。非圧縮かつ軸対称の場合、ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}$ の成分は以下のような関係にある。

$$\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta + \dot{\epsilon}_z = 0 \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_\theta = -\frac{1}{2}\dot{\epsilon}_z \quad (14)$$

ビンガムモデルを任意応力状態に拡張した Hohenemser・Prager の構成則より、偏差応力テンソル σ'_{ij} と変形速度テンソル V_{ij} との関係は、次のとおりである。

$$2\eta V_{ij} = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ F\sigma'_{ij} & (F \geq 0) \end{cases}, \quad F = 1 - \frac{\tau_y}{\sqrt{J_2}} \quad (15)$$

ここに、 F : 降伏関数、 τ_y : 降伏値
 J_2 : 偏差応力の 2 次不変量 η : 塑性粘度

微小変形においては、変形速度テンソル V_{ij} は、ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}$ に一致する。せん断変形がないと仮定すると、式(14)から、

$$\sigma'_r = \sigma'_\theta = -\frac{1}{2}\sigma'_z \quad (16)$$

$$J_2 = \frac{1}{2}(\sigma'^2_r + \sigma'^2_\theta + \sigma'^2_z) = 3\sigma'^2_r \quad (17)$$

となる。したがって、半径方向の偏差応力 σ'_r は圧縮応力が負値をとることを考慮して、次のように表される。

$$\sigma'_r = 2\eta \dot{\epsilon}_r - \frac{1}{\sqrt{3}}\tau_y = -\eta \dot{\epsilon}_z - \frac{1}{\sqrt{3}}\tau_y \quad (18)$$

ここで、せん断変形がないという仮定から、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、テーバー管の内壁面におけるすべり速度 β の関数である。

$$\dot{\epsilon}_z = -2\dot{\epsilon}_r = \frac{2\beta \tan \varphi}{R} \quad (19)$$

したがって、式(18)は次式で表される。

$$\sigma'_r = -\eta \frac{2\beta \tan \varphi}{R} - \frac{1}{\sqrt{3}}\tau_y \quad (20)$$

3. 結果の考察

3. 1 ビンガムモデルで表現できる場合

ビンガムモデルのレオロジー定数 τ_y , η は、圧力Pには無関係である。また、コンクリートの管内圧送では、圧力に依存するすべり抵抗（すなわち、まさつ係数 μ ）を考慮しない理論が一般的であり、圧力損失は管の全域で等しいものと認識されている。仮に、 $\mu=0$ とおくと、

$$\tau_h = C, \quad \kappa = \tan \varphi, \quad \lambda = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \quad (21)$$

$$\frac{\Delta P}{dz} = \frac{2}{R} \sigma_r' \tan \varphi + \frac{2C}{R \cos^2 \varphi} \quad (22)$$

となる。このとき、 $2C/R$ は直管の圧力損失であり、すべり速度 β の線形関数である。

例えば、長さ1mで5B→4B（半径65.4mm→52.6mm）に変化するテーパー管の場合、 $\tan \varphi = 0.013$, $\cos^2 \varphi = 1$ 程度であり、中央部（ $R=59.0\text{mm}$ ）における平均的な値として、

$$\frac{\Delta P}{dz} - \frac{2C}{R} = \frac{2 \tan \varphi}{R} \sigma_r' = \frac{2 \times 0.013}{0.059} \sigma_r' = 0.441 \sigma_r' \text{ (Pa/m)} \quad (23)$$

が得られる。また、式(20)にすべり速度 $\beta=1\text{m/s}$ 、塑性粘度 $\eta=300\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、降伏値 $\tau_y=600\text{Pa}$ を代入すると、以下のようになる。

$$\sigma_r' = -\eta \frac{2\beta \tan \varphi}{R} - \frac{1}{\sqrt{3}} \tau_y = -300 \times \frac{2 \times 0.013}{0.059} - \frac{600}{\sqrt{3}} = -478.6 \text{ (Pa)} \quad (24)$$

$$\frac{\Delta P}{dz} - \frac{2C}{R} = 0.441 \sigma_r' = -0.441 \times 478.6 = -211.1 \text{ (Pa/m)} \quad (25)$$

通常、上記の条件での水平直管の圧力損失は8000Pa/m程度であり、式(25)による値は、そのわずか2.6%にすぎない。ところが、建築学会指針[6]では5B→4Bのテーパー管の換算長さは、水平直管の16倍であり、この差は大きい。しかし、実際にも、テーパー部の圧力損失が、直管部と大きく変らないという実験結果も報告されており[8]、上記の計算結果は、均質なビンガムモデルを仮定した場合には妥当な値と思われる。以上のことから、フレッシュコンクリートへの適用を考えた場合には、粗骨材同士のインターロッキング現象、すなわち圧力に依存したレオロジーモデルを用いた解析が不可欠であると考えられる。

3. 2 閉塞のメカニズム

前節までの計算で、すべり抵抗力と変形抵抗が共に圧力に無関係、すなわちまさつ係数 μ を0とし、 τ_y および η を一定値とした場合、管の閉塞を引き起こすような大きな圧力損失は生じないことが明らかになった。この中で、 μ が圧力によって顕著に増加する傾向があると仮定すると、テーパー部に限らず直管でも高圧力の区間の圧力損失が激増するはずであり、数多く報告されている実験結果と一致しない。ただし、粗骨材が壁面へ押し付けられるなど、テーパー管と直管におけるすべり挙動が本質的に異なる可能性はある。一方、レオロジー定数、特に降伏値 τ_y が圧

力の増加によって増加すると仮定すると、栓流を呈している直管部の圧力損失は降伏値の影響をほとんど受けないはずであり、テーパ部に固有の圧力損失のメカニズムを説明することができる。圧力に依存するレオロジー性状に関する実験によれば、極低応力状態でも、フレッシュコンクリートの降伏値は、圧力の増加に伴って増加する傾向があることが明らかとなっている[9]。ポンプ圧送時のような高圧力環境下でもこれらの実験結果の値が有効であるとは考えにくい、仮にこれらの値を用いると、式(12)を用いて直管の50倍以上の圧力損失が算出されることになる。この現象の発生は、瞬間的で偶発的なものであると思われるが、応力依存のレオロジー試験より得られる情報を用いて、テーパ管の閉塞を予測することの可能性を示唆するものである。

4. まとめ

本研究ではフレッシュコンクリートのポンプ圧送時のテーパ管における圧力損失について、レオロジーの立場から理論展開を行なった。得られた知見を以下に示す。

- 1)テーパ管の圧力損失は、式(12)によって与えられる。入力値はフレッシュコンクリートの変形性状およびすべり抵抗性状に関するものである。
- 2)レオロジー定数が圧力に依存しないと仮定した場合、直管の数倍の圧力損失がテーパ部に生じる現象を説明することはできない。
- 3)テーパ部の圧力損失は、応力依存のレオロジー性状によって求めることができる。そのため、高圧力下におけるレオロジー定数の測定が必要である。

なお、本報では、国際単位系(SI)を用いた($1\text{Pa}=0.0102\text{gf/cm}^2$, $1\text{Pa}\cdot\text{s}=10\text{poises}$)。

【謝辞】

本研究費の一部は、平成3年度文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)、同一般研究(B)、およびセメント協会研究奨励金によった。付記して謝意を表す。

【引用文献】

- 1)一色真人・山崎実・榎本松司：ポンプ圧送時によるフレッシュコンクリートの変形性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.8、pp.29-32、1984.6
- 2)橋本親典・本間宏記・丸山久一・清水敬二：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、土木学会論文集、No.433/V-15、pp.91-100、1991.8
- 3)烏田専右・高木準二・森永繁・高田博尾・成田一徳：コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究—その1。圧送圧を表す基本式の誘導—、日本建築学会論文報告集、No.177、pp.1-5、1970.11
- 4)村田二郎・鈴木一雄：管壁にすべりを伴うグラウトモルタルの管内流動に関する研究、土木学会論文集、No.384/V-7、pp.129-136、1987.8
- 5)石橋忠良・吉田彦三郎・大庭光商・竹内研一：ポンプ圧送による高強度コンクリート ($\sigma_{ck}=600\text{kgf/cm}^2$) の施工、コンクリート工学、Vol.28、No.5、pp.59-70、1990.5
- 6)日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説、1979.11
- 7)谷川恭雄・森博嗣・野田豊：フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する理論的考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、pp.203-208、1991.6
- 8)山根昭・嵩英雄・佐久田昌治・佐藤忠博：コンクリートポンプの圧送負荷の算定、竹中技術研究報告、No.19、pp.36-45、1978.4
- 9)森博嗣・田中政史・谷川恭雄：フレッシュコンクリートのせん断変形性質に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.421、pp.1-10、1991.3