

寸法効果を考慮した吹付けコンクリートの押し抜き強度式に関する考察

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 正会員 ○吉川 直孝, 平岡 伸隆
 デンカ株式会社 非会員 伊藤 慎也, 保利 彰宏
 株式会社エムシーエム 非会員 酒井喜久雄

1. はじめに

既往研究^{1,2)}において, 著者らは吹付けコンクリートの押し抜き実験及び解析を実施し, 押し抜き強度式を提案した. 本概要では, 押し抜き強度のサイズ依存性を考察する²⁾.

2. 考察

既往研究^{1,2)}から, コンクリートの押し抜き強度は, 以下の式(1)により表現され, 一般的なコンクリートの引張強度と圧縮強度の関係式(2)から簡便に推定できる.

$$f_p = \frac{F_p}{\pi D t} \quad \left(t \leq \frac{D}{2}\right) \quad (1)$$

$$f_p = 0.23 f_c'^{2/3} \quad (2)$$

ここで, f_p : 押し抜き強度 (N/mm²) である.

次に, ある岩石を肌落ちさせないために必要な吹付け材料の圧縮強度の算出を試みる. そのためには, 岩石の大きさの増加に伴い, その重量を受け持つ吹付けコンクリートの面積も増加するため, コンクリートの寸法効果を考慮する必要がある. Bažant & Cao (1987)³⁾は, 引張側鉄筋を有する厚さ $t = 25.4 \sim 101.6$ mm の円盤状のコンクリートスラブを直径 $D = 25.4 \sim 101.6$ mm の押し抜きプラグにより押し抜き, コンクリートの押し抜き強度の寸法効果を以下のように定式化している.

$$f_{p,SE} = C \left(1 + \frac{t}{\lambda_0 d_0}\right)^{-1/2} \quad (3)$$

$$C = k_1 f_c' \left(1 + k_2 \frac{t}{D}\right) \quad (4)$$

ここで, $f_{p,SE}$: 寸法効果を考慮したコンクリートの押し抜き強度 (N/mm²), C : 寸法効果を考慮していない押し抜き強度の推定式 [Bažant & Cao (1987)³⁾は, 式(4)に示す修正されたクーロンの破壊基準に基づいた極限釣り合い解析による理論的な押し抜き強度推定式を与えている.], λ_0 : 対象物の形状を特徴づける経験的なパラメータ, d_0 : コンクリートの最大骨材寸法 (mm), k_1, k_2 : 経験的なパラメータである.

Bažant & Cao (1987)³⁾は, コンクリートスラブの押し抜きにおける寸法効果を調べた実験結果から, $\lambda_0 = 28.5$, $k_1 = 0.155$, $k_2 = 0.35$ を求めている. k_1 および k_2 の値, 既往の研究^{1,2)}から押し抜き実験時の $t = 50$ mm, $D = 100$ mm を式(4)に代入し圧縮強度との関係を図-1 に示す. 同図から圧縮強度 2 N/mm² 付近までは, 式(4)が式(2)よりも低い押し抜き強度を与えるが, それ以降は, その関係が逆転し直線的に押し抜き強度が増加している. また, 式(4)は, 圧縮強度 2 N/mm² 以下の時, 既往研究の実験結果^{1,2)}を適切に評価するが, 2 N/mm² 以上の場合には式(2)が適当である.

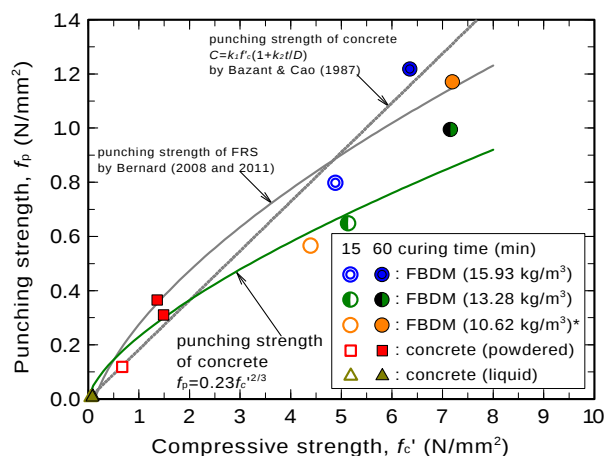


図-1 押し抜き強度と圧縮強度の関係²⁾

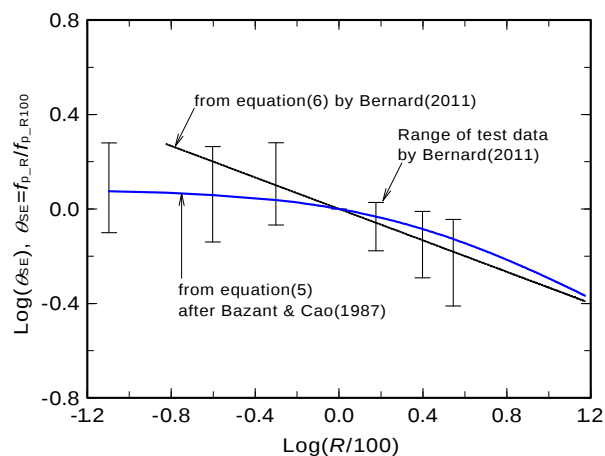


図-2 押し抜き強度比とサイズ比の関係²⁾

キーワード 吹付けコンクリート, 押し抜き強度, 寸法効果

連絡先 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6 労働安全衛生総合研究所 TEL 042-491-4512

したがって、式(3)の寸法効果を考慮した式が、押し抜き岩石の直径 D とコンクリートの最大骨材寸法 d_0 の間でも成り立つと仮定し、かつ、同式の C に式(2)を代入すると、吹付けコンクリートの寸法効果を考慮した押し抜き強度は次式で与えられる。

$$f_{p_SE} = 0.23f_c'^{2/3} \left(1 + \frac{D}{\lambda_0 d_0}\right)^{-1/2} \quad (5)$$

ここで、 $\lambda_0 = 28.5$ とする³⁾。

一方、Bernard (2011)⁴⁾は、繊維補強吹付けコンクリートの押し抜き強度の寸法効果を以下のように実験的に示した。

$$\theta_{SE} = \frac{f_{p_R}}{f_{p_R100}} = \left(\frac{R}{100}\right)^{-\frac{1}{3}} \quad (6)$$

ここで、 θ_{SE} : 寸法効果を表す比、 f_{p_R} : 半径 R の載荷治具による押し抜き強度、 R : 載荷治具の半径(mm)である。

寸法効果を表す式(6)と同様に、半径 $R = 100$ mm の載荷治具に対する押し抜き強度比と半径比の関係を式(5)により求めると、図-2 のように示され、式(5)は Bernard (2011)⁴⁾の実験結果をより適切に表現できる。したがって、載荷岩石の直径 D の増減による寸法効果も式(5)により適切に表現されうると考えられる。

したがって、式(5)を式(1)に代入すると、ある吹付け材料が有する押し抜き抵抗力は次式により表現される。

$$F_{p_SE} = 0.23\pi D t f_c'^{2/3} \left(1 + \frac{D}{\lambda_0 d_0}\right)^{-1/2} \quad (7)$$

一方、切羽面から肌落ちする岩石として、直径 D および高さ $D/2$ ($= R$) を有する円柱形状の岩石を想定すると、その重量は以下の式により示される。

$$W_{rock} = \frac{\pi}{8} \gamma D^3 \quad (8)$$

ここで、 γ : 岩石の単位体積重量($= 2800$ kg/m³)とする⁴⁾。

したがって、式(7)に示す肌落ちに対して抵抗しようとする力と式(8)に示す肌落ちしようとする力の関係からその安全率 F_s は以下のように示される。

$$F_s = \frac{F_{p_SE}}{W_{rock}} = \frac{1.84 t f_c'^{2/3}}{\gamma D^2 \left(1 + \frac{D}{\lambda_0 d_0}\right)^{1/2}} \quad (9)$$

同式から、吹付け厚さ t および圧縮強度 f_c' を一定とすれば、安全率 F_s と岩石の直径 D の関係が得られ、その時の D を式(8)に代入すると、安全率 F_s と岩石の重量 W_{rock} の関係を求めることができる。このように、例えば、吹付け厚さ 50 mm として、圧縮強度 f_c' を変化させると、安全率 F_s と岩石の重量 W_{rock} の関係は図-3 のように

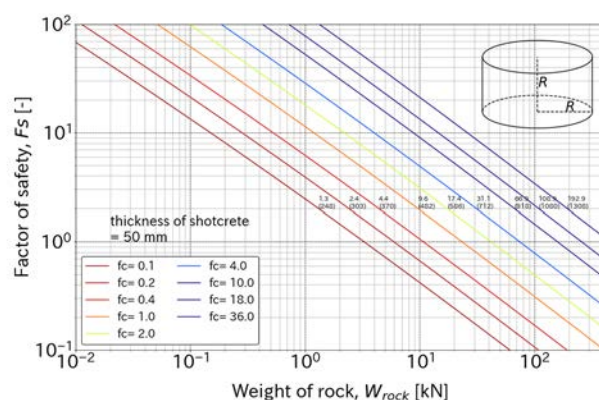


図-3 安全率 F_s と岩石の重量 W_{rock} の関係

描くことができる。例えば、圧縮強度 $f_c' = 0.2$ N/mm² (J2クラスの吹付け材料で養生6分) の時、約 2.4 kN (244 kgf) 未満の岩石の重量であれば、吹付け材料により安全率 2.0 で支持できうことがわかる。同図中の括弧内の数値は岩石の半径 R である。なお、ここでは、前述したように肌落ち岩石を円柱としてモデル化した。一方、円柱の岩石と同等の半径 R を有する半球として肌落ち岩石をモデル化すると、式(8)の W_{rock} は小さくなり、式(9)で示されるように、吹付け厚さはより薄く、圧縮強度はより低い材料でよくなる。したがって、円柱として岩石形状をモデル化した方が、より安全側の評価となる。

3. まとめ

本概要では、既往研究から、サイズ依存性を考慮した押し抜き強度式を提案した²⁾。なお、岩石形状の適切なモデル化に注意する必要がある。

参考文献

- 1) 吉川直孝, 伊藤慎也, 保利彰宏, 酒井喜久雄, 平岡伸隆, 2020. 落盤・崩壊災害の防止に関する研究. 労働安全衛生総合研究所特別研究報告. SRR-No.50-2-1. 43-55.
- 2) Kikkawa, N., Ito, S., Hori, A., Sakai, K. and Hiraoka, N., 2021. Punching fracture mechanism and strength formula of early-age shotcrete. Tunnelling and Underground Space Technology 110. April 2021. 103765.
- 3) Bažant, Z.P., Cao, Z., 1987. Size effect in punching shear failure of slabs. ACI Struct. J. 44-53.
- 4) Bernard, E.S., 2011. Influence of geometric factors on the punching load resistance of early-age fibre reinforced shotcrete linings. Tunnelling and Underground Space Technology 26. 541-547.