

偏圧が作用する円筒形地下構造物の簡易応力解析手法

(株)大林組 正会員 ○秋好 賢治
 首都大学東京 正会員 長嶋 文雄
 清水建設(株) 下徳 直毅

1. はじめに

覆工コンクリートを用いた在来工法による山岳立坑の試設計では、覆工に作用する土圧を等圧と仮定した理論解析手法が依然として主流である。比較的浅い深度では水平二方向の地圧は偏圧であることが多く、より合理的な試設計を行うためには、この偏圧を考慮した理論解析手法が必要とされる。また、施工中の観察・計測結果を分析して設計・施工に反映させる情報化施工にも必要とされる。本研究は、こうした背景に基づき、偏圧が作用する円筒形地下構造物の試設計や情報化施工に役立つ簡易応力に関する検討を行ったものである。

2. 既往の立坑覆工コンクリートの計算式に関する考察

円形山岳立坑の覆工肉厚を算定するための計算式として、ドウノエル、プロトジャコノフ、ラーメ、ハイゼといったものが存在するが、これらは何れも覆工に作用する土圧を等圧(偏圧比 1:1)と仮定したものである。一方、土圧を偏圧と仮定したフェルベルの式があるが、荷重を法線方向の正弦関数分布と仮定しているため、単純な水平二方向の偏圧が作用するものとは異なる。以上より、円筒形覆工に水平二方向の偏圧が作用する時の内部応力を求める理論式は存在しておらず、上記のように等圧や正弦関数分布といった簡略化をしているのが現状である。

3. 偏圧が作用する円筒の応力を求める近似式

3.1 薄肉円筒

文献1)を参考に誘導した水平二方向の偏圧が作用する薄肉円筒(図-1)の理論式を下式に示す。この式では、円筒をシェル構造と近似しているため半径方向応力 $\sigma_r = 0$ であり、さらに応力に誤差が生じるという問題がある。従って、同式ではある程度の厚さを持つ円筒に偏圧が作用する時の応力は精度良く得られない。

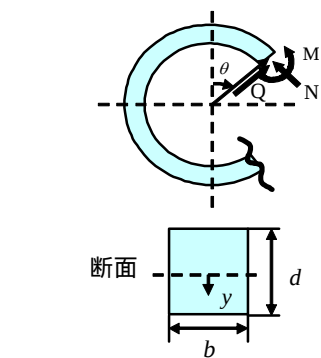


図-1 薄肉円筒

$$\begin{cases} \sigma_r = 0 \\ \sigma_\theta = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I_x} y \\ \tau_{r\theta} = \frac{6Q}{bd^3} \left(\frac{d^2}{4} - y^2 \right) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{4} (p_i - q_i) \cdot a^2 \cdot \cos 2\theta & A : \text{断面積} \\ N &= p_i \cdot a \cdot \sin^2 \theta + q_i \cdot a \cdot \cos^2 \theta & I_x : \text{断面二次モーメント} \\ Q &= -\frac{1}{2} (p_i - q_i) \cdot a \cdot \sin 2\theta \end{aligned}$$

3.2 厚肉円筒

1つの円孔を持つ無限板が無限遠方において面内二方向に一樣な圧縮力を受ける時の応力式²⁾を有限幅の板に適用して、偏圧が作用する厚肉円筒(図-2)の応力近似式を作成した。この近似式は、無限板の式を有限幅の板に適用していることから、円孔の直径 $2a$ に比べて十分大きな肉厚 $(b - a)$ をもつ円筒の場合は高い精度で応力解が得られるが、肉厚が十分でないと円孔周りの応力集中の影響により解に誤差が生じる。

なお、上記の薄肉・厚肉円筒の式は、ともに偏圧が作用する円筒に発生する応力の厳密解を与えるものではなく、円筒形状により精度が異なる近似式である。

キーワード 山岳立坑, 偏圧, 厚肉円筒, 理論解析手法, 応力近似式

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組土木技術本部技術第二部 03-5769-1320

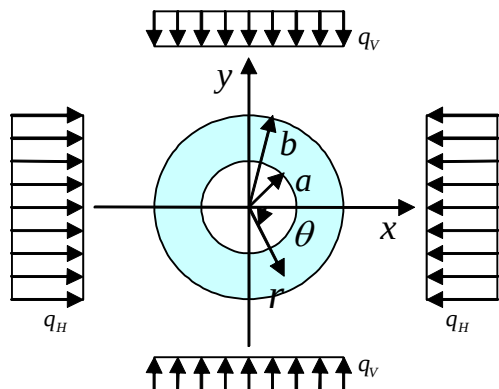


図 - 2 厚肉円筒

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{A}{r^2} + 2B - \left(2C + \frac{6E}{r^4} + \frac{4F}{r^2} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta = -\frac{A}{r^2} + 2B + \left(2C + 12Dr^2 + \frac{6E}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} = \left(2C + 6Dr^2 - \frac{6E}{r^4} - \frac{2F}{r^2} \right) \sin 2\theta \end{cases}$$

$$A = \frac{-(q_h + q_v)a^2b^2}{2(a^2 - b^2)} \quad D = \frac{-3a^2 + b^2}{2a^6b^2}E + \frac{(q_h - q_v)b^2}{8a^2(a^2 - b^2)}$$

$$B = \frac{(q_h + q_v)b^2}{4(a^2 - b^2)} \quad E = \frac{(-q_h + q_v)a^4b^4(a^2 + b^2)}{4(a^2 - b^2)^3}$$

$$C = \frac{3}{a^2b^2}E + \frac{(-q_h + q_v)b^2}{4(a^2 - b^2)} \quad F = \frac{-3(a^2 + b^2)}{2a^2b^2}E + \frac{(q_h - q_v)a^2b^2}{8(a^2 - b^2)}$$

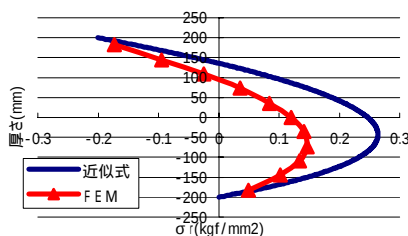
4. 応力近似式と数値解析結果の比較

上記の厚肉円筒の応力近似式を、そのまま肉厚の薄い円筒に適用すると誤差が出る。そこで、円筒の肉厚と x 軸・y 軸方向の偏圧比を変化させ、近似解と有限要素法による数値解析結果とで応力 (σ_r , σ_θ) を比較し、その誤差より近似式の適用範囲を検討する。比較条件は次のとおりである。

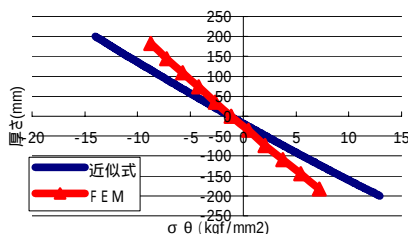
形状・・・a : b = (2000, 2400, 2800, 3200, 3600) mm : 4000 mm の 5 パターン

荷重・・・ $q_v : q_h = 0.1 \text{ kgf/mm}^2 : (0.12, 0.15, 0.20) \text{ kgf/mm}^2$ の 3 パターン

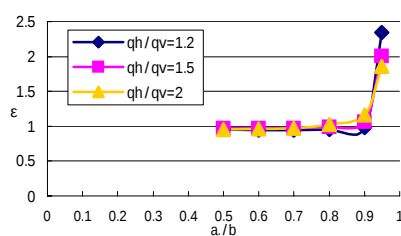
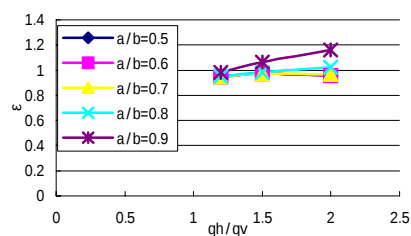
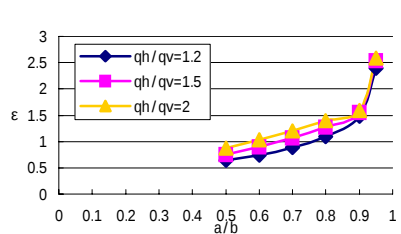
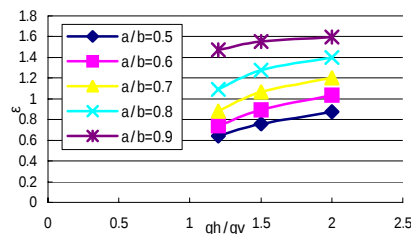
組合せ合計 15 パターンで比較した結果の一例を図 - 3 に示す。また近似式による最大応力を数値解析結果の最大応力で割ったものを ε (誤差) として、肉厚、偏圧比との関係を図 - 4, 5 に示す。図 - 4.1 より肉厚による σ_r の誤差は、 $a/b = 0.5 \sim 0.8$ では 5% 程度に収まっているが、 $a/b > 0.8$ から徐々に大きくなり $a/b = 0.9$ 以降急激に大きくなる。図 - 4.2 より σ_θ の誤差は、 $a/b = 0.5 \sim 0.8$ では 0 ~ 30% 程度、 $a/b = 0.9$ では 50%、 $a/b > 0.9$ から急激に大きくなる。図 - 5 より偏圧比 q_h/q_v が大きくなると誤差 (ε) も若干大きくなる。以上より、肉厚が $a/b = 0.9$ と薄い地下構造物では、厚肉円筒の応力近似式を使うことは適当でない。

図 - 3.1 近似式とFEMの比較 σ_r

a/b=0.9 $q_h/q_v=2$ $\theta=0^\circ$

図 - 3.2 近似式とFEMの比較 σ_θ

a/b=0.9 $q_h/q_v=2$ $\theta=0^\circ$

図 - 4.1 a/b と ε の関係 σ_r 図 - 5.1 q_h/q_v と ε の関係 σ_r 図 - 4.2 a/b と ε の関係 σ_θ 図 - 5.2 q_h/q_v と ε の関係 σ_θ

5. おわりに

円筒形地下構造物の設計において、有限要素法による数値解析の代替となるような偏圧を考慮した理論式を導くことは今回できなかったが、厚肉円筒の場合には、実用レベルとして本近似式により簡便な応力計算が可能である。今後は、情報化施工に役立つ厚肉円筒のひずみや円孔変位の理論式を誘導する予定である。

参考文献 1) 福島啓一：わかりやすいトンネルの力学，土木工学社，1994 年。2) ティモシェンコ，S. P. グーディア，J. N. (金多潔監訳)：弾性論，コロナ社，1983 年。