

(77) 高内圧を受ける地下空洞のロックボルトによる補強

愛知工業大学工学部

正 川本 昶万

東海大学海洋学部

正 アイダン・オメル

(株)奥村組筑波研究所

○ 正 蛭子清二

REINFORCEMENT OF INTERNALLY PRESSURISED CIRCULAR CAVITIES BY ROCKBOLTS

T. KAWAMOTO

Aichi Institute of Technology

Ö. AYDAN

Tokai University

S. EBISU

Okumura Corporation

ABSTRACT: There is an increasing demand for underground openings for energy storage projects (i.e. CAES and SMES) and it is an active field of research in recent years.

In this article, analytical and numerical solutions are presented how to evaluate the stress state about the internally pressurised circular cavities reinforced by rockbolts in a pattern which is different from the conventional radial pattern. Solutions are used for studying the effect of rockbolting and implications of the parametric studies are discussed.

1. 序論

圧縮空気貯蔵あるいは超電導電磁エネルギー貯蔵に代表される新しい用途での地下空洞利用が注目されている。このようなエネルギー貯蔵を横断面が円形の空洞で行なう場合、圧縮空気による高い内圧や超電導コイルから誘起される電磁力が空洞周辺岩盤の半径方向に作用する。空洞の壁面に内圧が作用すると周辺岩盤の横断面円周方向に引張応力が誘起され、引張強度の小さな岩盤にとって不利な応力場が形成される。したがって、内圧を受ける円形空洞をロックボルトで補強する場合、このような円周方向の引張応力に対する配慮が必要と考えられる。ここでは、高い内圧を受ける地下空洞の新しいロックボルト補強として、従来の空洞半径方向に打設されるパターンボルトとは異なり、ロックボルトを引張応力が発生する円周方向に傾斜させてメッシュ状に打設するメッシュボルティングを提案する。このようなメッシュボルティングについて、マイクロ構造の考え方に基づいてその効果を理論的に予測し数値解析から提案方法の妥当性を評価する。

2. メッシュボルティングの効果の予想

2.1 空洞周辺岩盤の応力場

内圧を受ける円形空洞周辺岩盤の応力分布から

ロックボルトで岩盤を補強する際の留意点を考え

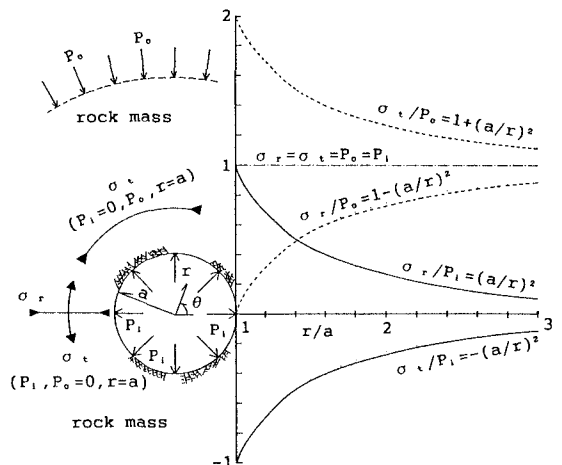


Fig.1 Theoretical solution for a circular cavity.

る。岩盤を弾性と仮定し半径 a の空洞に内圧 P_i が作用する場合、周辺岩盤の応力分布はFig. 1の実線のようになり、空洞の壁面では円周方向に引張り応力 $\sigma_t = -P_i$ 、半径方向に圧縮応力 $\sigma_r = P_i$ が発生する。一方、空洞が開削されときの応力分布は内圧が $P_i = 0$ で静水圧的な土被り圧を P_0 としてFig. 1の破線で示さる。したがって、 $P_0 \geq 0.5 P_i$ ならば空洞掘削後に内圧が作用しても岩盤に引張応力が発生しないことが分かる。しかし、内圧に比較して十分な土被りを確保できない場面を想定すると、空洞周辺岩盤に円周方向に一樣な引張応力が発生することになる。このような引張応力をロックボルトによる補強で低減させるために、岩盤の補強効果が空洞の円周方向に一樣に発揮されて岩盤に局所的な弱点が残らないように配慮すべきである。また、空洞掘削時の部分的な地圧開放を分担する支保とは異なり全内圧がボルトに作用することに注意を要する。

2.2 マイクロ構造モデルによる効果の予測

円形空洞で打設されるロックボルトは掘削時にはFig. 2(a)のようなパターンで施工されるのが一般的であり、空洞壁面を平面に展開すると同図(b)の周期的な構造として捕らえることができる。これから代表的な要素を取り出すとFig. 2(c)のようであり、 L_1, L_3 はボルトの打設ピッチ、 $L_2 = \ell_2$ はボルトの長さ、 $\ell_1 = \ell_3$ はボルトの断面積に等しい正方形の1辺である。また、 $\alpha_i (i=1\sim3)$ は代表要素とボルトを x_i 面に射影したときの面積比、 $\lambda_i (i=1\sim3)$ は代表要素とボルトの x_i 軸への射影長さの比である。ここで、代表要素の中で応力場とひずみ場を線形的に重ね合わせることが出来ると仮定し、代表要素をそれぞれの軸方向に1軸的に載荷する。 x_1 あるいは x_3 方向すなわちボルト軸に直角な方向の場合、代表要素をFig. 2(d)のように2つのパートA、B（ボルトを含む方をパートAとする）に分離するとその分け方によって並列モデルと直列モデルの2種類を考えることができる。一方、 x_2 方向すなわちボルト軸に並行な方向では並列モデルのみとなる。2種類のモデルの各パートに発生する応力やひずみと代表要素の等価弾性係数は次のようになる。

1) 並列モデル

$$E_{ii} = \alpha_i \cdot E^A + (1 - \alpha_i) \cdot E^B$$

$$\sigma^A = \sigma_{ii} \cdot E^A / E_{ii}, \quad \sigma^B = \sigma_{ii} \cdot E^B / E_{ii}$$

$$\varepsilon^A = \varepsilon^B = \varepsilon_{ii}$$

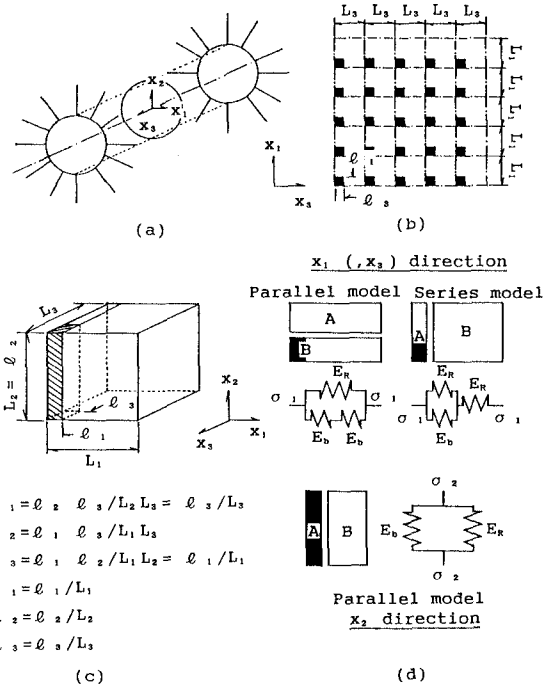


Fig. 2 Micro structure model.

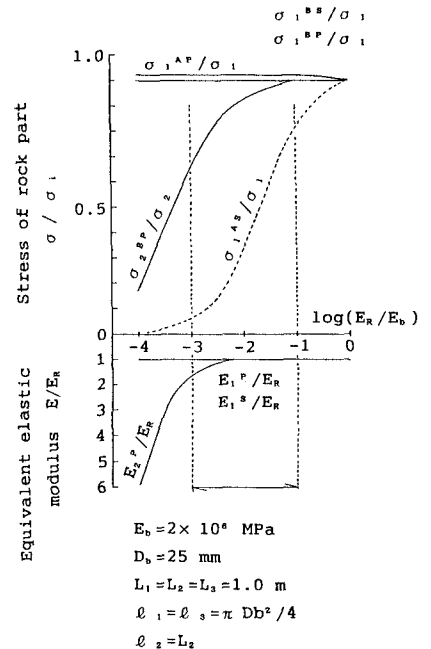


Fig. 3 Stress concentration and equivalent elastic modulus.

2) 直列モデル

$$1/E_{ii} = \lambda_i/E^A + (1-\lambda_i)/E^B, \quad \sigma^A = \sigma^B = \sigma_{ii}, \quad \varepsilon^A = \sigma_{ii}/E^A, \quad \varepsilon^B = \sigma_{ii}/E^B$$

パート A はさらにボルトと岩盤の 2 つのサブパートから構成される。これらは並列モデルの場合に直列のサブモデルを直列モデルの場合に並列のサブモデルを内部で構成し、ボルトの影響はサブモデルの等価弾性係数 E^A を介して発現する。

ボルトの直径を 25 mm、長さとしピッチを 1 m、ヤング率を $E_b = 2 \times 10^5$ MPa とし岩盤のヤング率を E_r をパラメータとして、代表要素を 1 軸載荷したときの岩盤の応力集中と代表要素の等価弾性係数は Fig. 3 のようになる。同図から、ボルト軸に並行に載荷した場合に応力集中に対するボルトの効果が顕著に現われ岩盤に発生する応力が低減すること、代表要素の等価弾性係数については、 $E_r/E_b < 10^{-3}$ になって初めてボルトの効果が現われ等価弾性係数が改善されることが分かる。これを内圧を受ける円形空洞に当てはめて考えると次のことが示唆される。

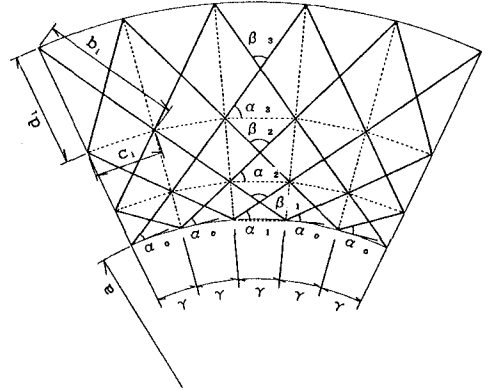
- 1) 空洞周辺岩盤の円周方向に集中する引張り応力に対して、ボルトを出来るだけ円周方向に傾斜させて打設することにより岩盤の応力集中の低減を期待できる
- 2) 岩盤のヤング率が小さな場合、半径方向にボルトを打設することで変位の低減を期待できる

3. 数値解析

3.1 弾性解析

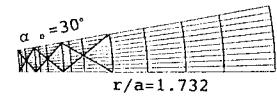
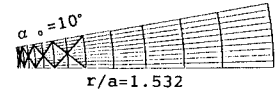
Fig. 4 に示すようなメッシュボルティングの効果を見るために、円形空洞の軸方向に平面ひずみ場を仮定した有限要素解析を実施した。ここで、中心角 γ ($\gamma = 10^\circ$) は円周方向のボルト打設ピッチ、 α_0 は円周方向からのボルト打設角とし 1 本あたりのボルト長は空洞の半径 a に等しいとした。また、岩盤とボルトのヤング率は $E_r/E_b = 10^{-3}$ 、岩盤のポアソン比は 0.25 とした。Fig. 5 に示すように、解析モデルは円周方向に $\gamma = 10^\circ$ の対称部分のみを取り出し、初期地圧が無い状態で空洞壁面に内圧 P_i を作用させた。ボルトは軸力のみ伝達する 1 次元要素で表現し、打設角度 α_0 をパラメトリックに変化させた。なお、圧縮応力と内空方向への変位を正とした。

解析結果から、空洞壁面の岩盤に発生した主応力 ($\sigma_1, -\sigma_3, \tau_{\max}$) および壁面の半径方向変位 u_r について、その最大および最小値とボルト打設角 α_0 との関係は Fig. 6 のようになる。これによると引張りの主応力 σ_1 はボルトの打設角が小さくて $\alpha_0 \leq 30^\circ$ の場合に内圧 P_i よりも低減されるが、ボルトを半径方向に打設した $\alpha_0 = 90^\circ$ の場合には逆にその



$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_0 + (2i-1)\gamma/2 \\ \beta_1 &= 180 - 2\alpha_0 - (2i-1)\gamma \\ b_i &= a \sin(\gamma/2) / \cos(\alpha_0 + \gamma) \\ c_i &= 2a \sin(\gamma/2) \\ d_i &= 2a \sin(\gamma/2) \sin(\alpha_0 + \gamma/2) / \cos(\alpha_0 + \gamma) \\ b_i &= c_i \cos(\gamma/2) / \cos(\alpha_0 + \gamma/2) \\ c_i &= 2(a + \sum d_i) \sin(\gamma/2) \\ d_i &= c_i \sin(\gamma/2) / \cos(\alpha_0 + \gamma/2) \quad (i \geq 2) \end{aligned}$$

Fig. 4 Mesh bolting pattern.



$\gamma = 10^\circ$, Total bolt length: $2a$

Fig. 5 Mesh shape and bolting pattern.

絶対値が内圧 p_i よりも大きくなる事が分かる。一方、 σ_1 と τ_{max} は $\alpha_0 \leq 50^\circ$ で内圧 P_i よりも大きくなっている。壁面変位 u_r をボルトを打設しない場合の理論変位 u_0 と比較すると、 u_r は $\alpha_0 = 90^\circ$ 、 10° の場合に10%程度低減されることが分かる。

空洞壁面の σ_3 の分布はFig. 7 のようになる。 $\alpha_0 = 10, 30, 50, 70^\circ$ の場合、 σ_3 は半径方向の打設パターンである $\alpha_0 = 90^\circ$ に比較して円周方向に様に分布することが分かる。また、 $\alpha_0 = 90^\circ$ の場合には空洞壁面のボルト打設位置で引張り応力が最大の集中を示している。このことは、従来の半径方向のパターンボルトが内圧を受ける空洞に対しては壁面で引張り応力の集中を助長する逆効果を及ぼす可能性を示唆している。

Fig. 8 に最大主応力 σ_1 のコンターを示す。同図から円周方向の応力分布とボルト打設角 α_0 との関係を見ると、 α_0 が小さな場合ほど空洞壁面により近い位置で応力が一様に分布することが分かる。

空洞壁面の半径方向変位 u_r の分布をFig. 9 に示す。ボルトの打設角 α_0 との関係を見ると、 $\alpha_0 = 50^\circ$ を境に変位分布のモードが逆転している。 α_0 が 90° 、 70° では壁面のボルト打設位置で変位が小さくボルト間の中央部で大きい。これに対して α_0 が 10° 、 30° では、逆にボルト間中央部の変位が大きくボルト打設位置で変位が小さい。また、 u_r は $\alpha_0 \leq 50^\circ$ で $\alpha_0 = 90^\circ$ 、 70° の場合に比較してより一様な分布形状を示す。

3.2 弾塑性解析

岩盤を引張強度 $S_t = 0.1$ MPaの弾完全塑性体とし引張り破壊

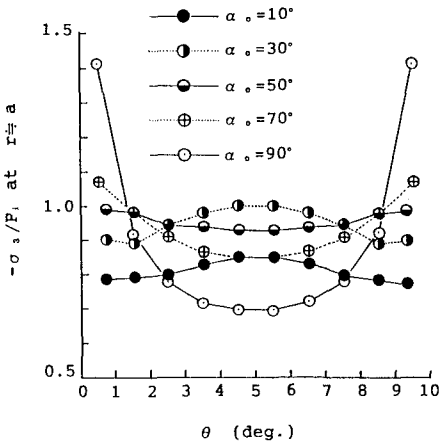


Fig. 7 Distributions of σ_3 at cavity wall.

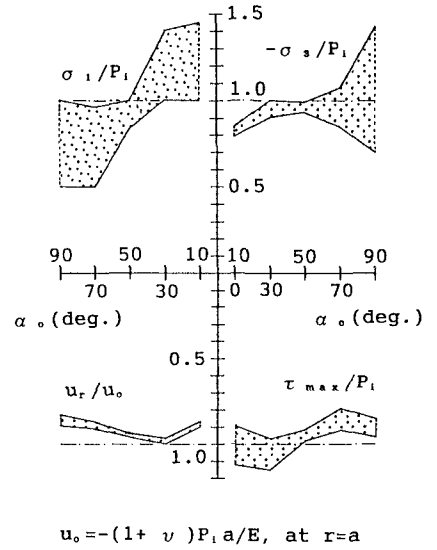


Fig. 6 Principal stresses and radial displacements at cavity wall.

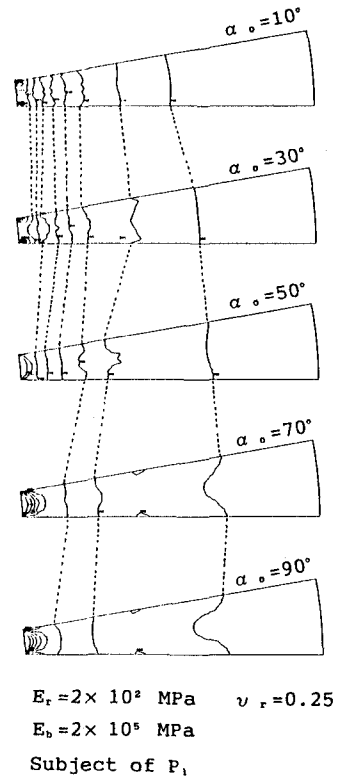


Fig. 8 Contour diagram of σ_1 .

のみを考慮した塑性解析を行なった。施工過程を配慮し、初期地圧が $P_0=1\text{ MPa}$ の状態 で空洞を掘削しその後 にロックボルトを打設して内圧 $P_i=2.5\text{ MPa}$ を載荷した。解析結果から、最小主応力が引張りとなる領域とボルト打設角 α_0 との関係をFig. 10に示す。同図から、引張領域は $\alpha_0=10^\circ$ の場合に極端に小さくなることが分かる。

4. 結論

高い内圧を受ける地下空洞のロックボルト補強について、円形空洞の円周方向に傾斜させてロックボルトをメッシュ状に打設する方法（メッシュボルティング）を提案した。このような方法の効果を理論的に予測し数値解析からその妥当性を検討した。その結果を要約し以下に示す。

- 1)メッシュボルティングによって空洞壁面に発生する引張応力を大幅に低減させることはできないが、応力や変位を周辺岩盤の円周方向に一様に分布させ、同時に応力の集中範囲を空洞壁面に近い位置に留める効果が認められた。
- 2)従来の半径方向のパターンボルトの場合、内圧が作用するとボルト打設位置の岩盤に大きな引張応力が発生しボルトの打設が逆に周辺岩盤の弱点となる可能性が考えられる。
- 3)施工過程を考慮した解析結果から、今回のボルト打設ピッチでは周辺岩盤の引張応力発生領域はボルトの打設角 $\alpha_0=10^\circ$ の場合に極端に小さくなる。

メッシュボルティングの打設角度 α_0 を 45° よりも小さくすれば空洞壁面の近い位置にボルトが密に配置されるとともに内圧に対してボルトに引張りの軸応力が発生し周辺岩盤の安定性に有利に作用することが見込まれる。現在、2.に述べたマイクロ構造の考え方に基づいてメッシュボルティングの効果に関するより詳細な要因分析を行なっている。

参考文献

- 1)アイダン、渡嘉敷、赤木、伊藤、空隙を含む岩石材料の力学的挙動のモデル化について、土木学会第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1992. 2, pp. 271～275

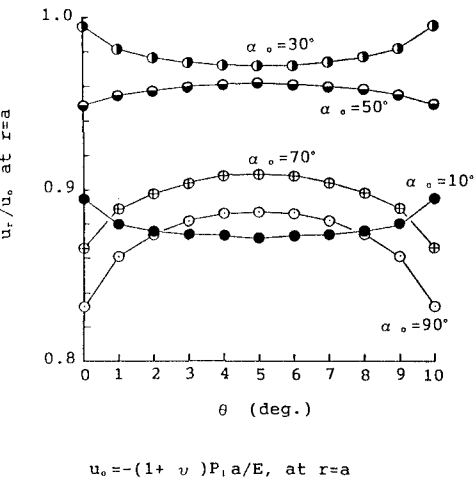


Fig.9 Distributions of radial displacements at cavity wall.

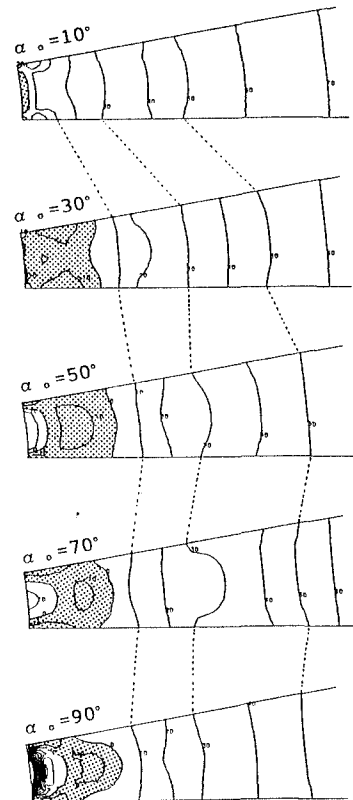


Fig.10 Tensile stress region.