

III-361

ひずみ依存型の構成式を用いた緩み領域の推定

埼玉大学大学院（現 前田建設工業（株）） 正員○近藤和正

埼玉大学工学部 正員 小田匡寛

清水建設（株） 正員 多田浩幸

1. まえがき

トンネルや地下空洞を掘削した場合、その周辺に緩み領域を伴うことが知られている。この緩み領域を推定することは、ロックボルトの長さの設計や、合理的な掘削工法の検討を行なう上で、重要である。

緩み領域の形成は、掘削による引張ひずみと関係が深いとされている³⁾が、本研究は、ひずみ依存型の構成式である“進展性割れ目理論(Progressively Fracturing Theory)”を用いて、このような緩みの解析への適用性を検討したものである。

この“進展性割れ目理論”は、Dougill¹⁾により提案されたもので、塑性論に類似した構成式であるが、その降伏関数は、応力ではなく、ひずみで定義されるものであり（表-1）、緩み領域の解析などに有効であることが期待される。

2. 解析手法

進展性割れ目理論の特徴は、材料の剛性が減少することにより非線形挙動を記述するところにある。したがって、除荷や再荷荷を受けた場合には、その時点の剛性で、線形弾性挙動をする（図-1）ので、フック則が成立する。

$$\sigma_{ij} = S_{ijk} \epsilon_{km}$$

これを、任意の時間で微分すると、次式を得る。

$$\dot{\sigma}_{ij} = S_{ijk} \dot{\epsilon}_{km} + \dot{S}_{ijk} \epsilon_{km}$$

ここで、右辺第一項を、線形弾性挙動時の応力増分 $\dot{\sigma}'_{ij}$ とし、第二項を、剛性が減少することにより引き起こされる応力増分 $\dot{\sigma}''_{ij}$ とし、これらの足し合わせにより、応力ひずみ関係を得る。

ここでは、Dougill の提案したモデルである、ファイバーバンドルモデルでモデル化し、二次元について解析を行なった。ファイバーバンドルモデルは、ファイバーの集合体として材料をモデル化している（図-2 a）。降伏関数 F は、次式で定義される。

$$F = (\lambda_{ij} \epsilon_{ij} - h_1)(\lambda_{km} \epsilon_{km} + h_2)$$

上式 λ_{ij} を、ファイバーの方向余弦で定義することで、各々のファイバーの伸びひずみや圧縮ひずみが一定の値になったときファイバーは降伏し、剛性減少が起きる（図-2 b）。また、負荷条件は、

$$\lambda_{ij} \epsilon_{ij} = h_1 \quad \text{かつ} \quad \lambda_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} > 0 \quad (\text{引張})$$

$$\lambda_{ij} \epsilon_{ij} = -h_2 \quad \text{かつ} \quad \lambda_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} < 0 \quad (\text{圧縮})$$

となる。

	塑性論	進展性割れ目理論
降伏曲面	$F(\sigma) = 0$	$F(\epsilon) = 0$
弾性成分	$\dot{\epsilon}_{ij}^e$	$\dot{\sigma}'_{ij}$
非弾性成分	$\dot{\epsilon}_{ij}^p$	$\dot{\sigma}''_{ij}$
流れ則	Drucker の仮定 $\dot{\sigma}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p \geq 0$ $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \hat{G} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{pq}} \dot{\sigma}_{pq}$	Il'iusin の仮定 ²⁾ $-\dot{\sigma}''_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \geq 0$ $\dot{\sigma}''_{ij} = -K \frac{\partial F}{\partial \epsilon_{ij}} \frac{\partial F}{\partial \epsilon_{km}} \dot{\epsilon}_{km}$

表-1 塑性論との比較

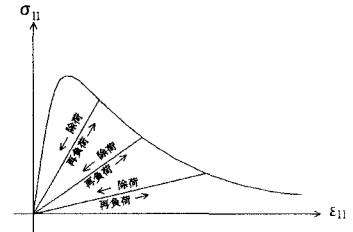


図-1 応力ひずみ関係

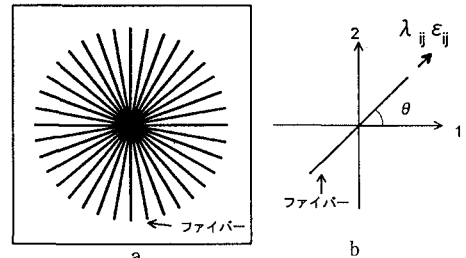


図-2 モデルの模式図

3. 解析結果

図-3は、一軸圧縮試験時の応力および体積ひずみと、軸ひずみとの関係を示したものである。軸ひずみが約0.7%の時に、応力がピークを迎え、その後軟化挙動が示されている。また、体積ひずみについては、一度体積が減少した後、膨張へと転じている。岩盤材料が圧縮を受けると最初に体積は減少するが、その後、微小クラックが縦方向に進展し、結果として体積が膨張することが知られている。図-3の結果は、定性的に岩盤材料の挙動を説明している。

次に緩み領域の解析を行うために、図-4に示す要素分割を用い、土かぶりを変化させた二次元の掘削解析を行った。その結果から、トンネル周囲に起こる剛性の変化に注目し、剛性の対角項の総和の減少率 R を次式で定義し、それを緩み量の指標とした。

$$R = \frac{S_T^{ini} - S_T}{S_T^{ini}} \times 100 \quad [\%]$$

ただし、 S_T^{ini} ：初期剛性の対角項の総和($S_{1111}^{ini} + S_{2222}^{ini} + S_{1122}^{ini}$)

S_T ：掘削後の剛性の対角項の総和($S_{1111} + S_{2222} + S_{1122}$)

R の値が大ききことは、剛性変化の大きいことを意味しており、定性的にひずみの程度を表すと考えられる。この緩み領域は、土かぶりを大きくするほど、空洞周辺に広がってゆくことがわかった。図-5は、それらのうち、土かぶり 2100m の場合の緩み領域を示したものである。また、ロックボルトをイメージし、空洞周辺の要素に対して、空洞壁面と垂直方向のファイバーの強度を強化して、同じ土かぶり 2100m の場合の緩み領域を示したものが、図-6である。この結果から、特定の方向のファイバーを強化することで、伸びひずみを押さえるという意味でのロックボルトの作用効果を定性的に示すことが可能であると考えられる。

4. まとめ

“進展性割れ目理論”を用いて、材料の軟化挙動を安定的に解析することができた。またその適用例として掘削解析を行い、地下空洞掘削に伴う緩み領域をひとつの解析例として示した。しかし物性値の選択など、まだ実岩盤との明確な対応付けが成されておらず、今後に多くの課題を残している。

掘削解析での緩み領域の推定や、伸びひずみを押さえる効果としてロックボルトの作用効果評価に利用できると考えられ、今後更に検討を深める所存である。

参考文献

- 1) J. W. Dougill and M. A. M. Rida : Further Consideration of Progressively Fracturing Solids, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, vol.106, No.EM5, pp.1021-1038, October, 1980.
- 2) A. A. Il'yushin : On the Postulate of Plasticity, *Applied Mathematics and Mechanics*, vol.25, pp. 746-752, 1961.
- 3) 桜井 春輔：トンネル掘削に伴う緩み領域の研究, *トンネルと地下*, vol.14, No.1, pp. 35-41, 1983.

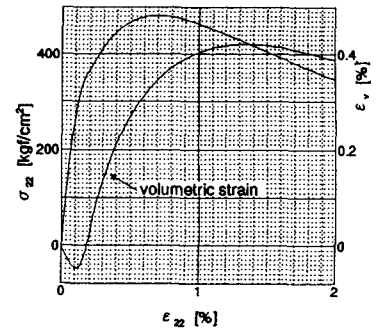


図-3 一軸圧縮試験結果

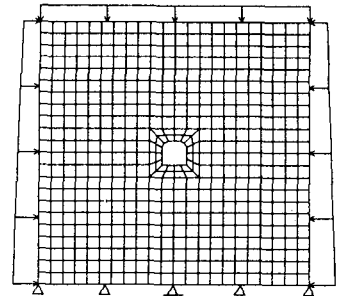


図-4 要素分割モデル

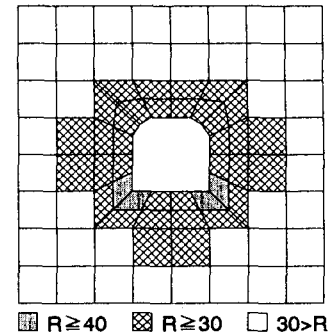


図-5 緩み領域

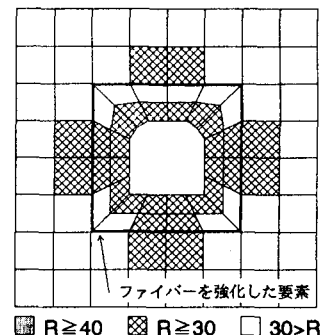


図-6 緩み領域