

大阪大学工学部 正員 久武 勝保  
滋 賀 県 野 崎 信 宏

1. はじめに

有限要素法 (FEM) は材料の非線形性, 不均一性, 及び掘削と覆工の建設といった施工手順を容易に取り扱えるという長所があり, 一方, 境界要素法 (BEM) は無限遠方での境界条件を満足し, また境界のみの離散化でよいので精度が高く, 入力データ数, 計算の容量・コストが FEM に比べて大幅に減少する。そこで, 本研究は, 両者の長所を生かすために, 塑性を呈すると思われるトンネル周辺領域を FEM, その外部領域を BEM で取り扱う融合解析法<sup>1)</sup>(CPM)により, トンネルの三次元弾塑性解析を行ったものである。

2. 三次元弾塑性解析手法の検証

本 CPM での剛性方程式は FEM と同形式であるので, FEM での弾塑性解析手法がそのまま CPM に適用できる。そこで, 本 CPM で採用した弾塑性解析手法を検証するために, 図-1 に示す素掘トンネルの三次元弾塑性解析を FEM で行って平面歪成位置での塑性領域を求め, しかして, 図-2 に示す要素を用いた Zienkiewicz<sup>2)</sup> の二次元弾塑性 FE 解析による塑性領域とを比較したのが図-3 である。ここに, 図-3 中の  $m$  は, 載荷した解放節点力を全解放節点力で無次元化したものである。また, Drucker-Prager の降伏条件式; 及び関連流山則が適用されており, 地山の内部摩擦角  $\phi = 30^\circ$ , 粘着力  $c = 2P \text{ lb/in}^2$ , 弾性係数  $E = 500,000 \text{ lb/in}^2$ , ポアソン比  $\nu = 0.2$ , 鉛直と水平の初期応力は, それぞれ  $\sigma_v = 1,000 \text{ lb/in}^2$ ,  $\sigma_h = 250 \text{ lb/in}^2$  である。図-3 から, 両解析による塑性領域は多少の違いが見られるが, 三次元解析での要素分割が二次元解析のそれと比べて荒い点を考慮すれば, 両者はかなり良く対応しており, したがって, 本弾塑性解析手法は妥当であると思われる。

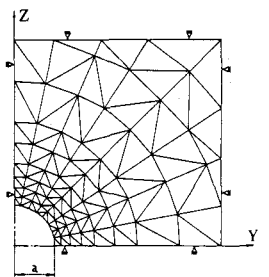


図-2 Zienkiewicz の二次元 FE 分割図

3. CPM と FEM による三次元弾塑性解析結果の比較

上記弾塑性解析手法を用い, 図-4 のトンネルに対する三次元弾塑性 CP 解析と, 図-4 の有限要素外部の BE 領域を取り除いた三次元弾塑性 FE 解析による塑性領域を比較したのが図-5 である。両解析の手順は同一であるが, FE 解析では FE 領域外部の地山の存在を考慮できないため, これによる塑性領域は, CP 解析での塑性領域に比べ

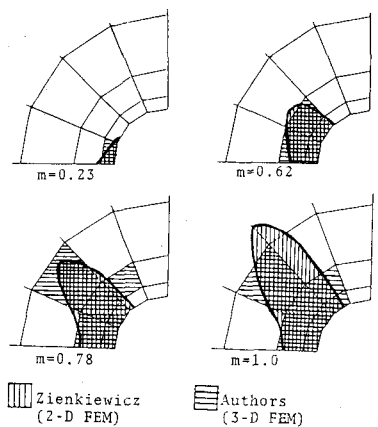


図-3 二次元と三次元の FE 解析による塑性領域の比較

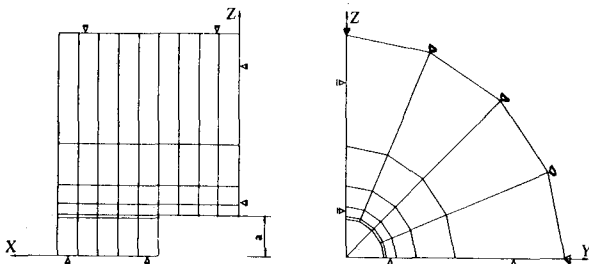


図-1 素掘トンネルの三次元 FE 分割図

て広い。したがって、FEMで三次元弾塑性解析を行う場合には、塑性の広がりに対応して、解析領域を十分取り必要があり、一方、CP解析では、塑性領域を含まざるだけ狭い領域をFE領域とすれば有利となる。CP解析では、BEMから作られる剛性マトリックスを記憶させておけば、以後のくり返し解析でこれかそのまま利用できるのを、非線形解析や弾塑性解析での計算時間を大幅に短縮できることが本解析で確認できた。

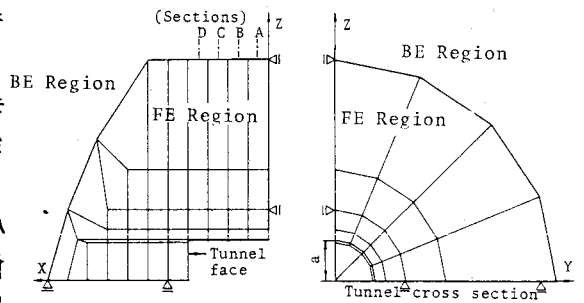


図-4 融合解析で用いた要素分割図

4. ロックボルトの作用効果

図-6は、三次元弾塑性CP解析により、ロックボルト長(L)の違いによる塑性領域の変化を示したものである。ただし、地山の要素分割は図-4と同一であり、1掘削長はトンネル直径( $\alpha = 8m$ )の1/4とし、切端掘削により新しく現れたトンネル内面にロックボルトを打設する、といった施工手順がくり返し5回考慮されている。また、図中のxは、切端から坑口に向けた座標、 $\sigma_x/\sigma_y = 0.25$ ,  $c/\sigma_y = 0.3$ ,  $\phi = 30^\circ$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $E/\sigma_y = 75$ , (ロックボルトのE)/(地山のE) = 1400, ロックボルトの断面積, トンネル軸方向ピッチ, 及び1掘削面当りの本数は、それぞれ  $0.00066m^2$ ,  $1m$ ,  $32$ 本である。

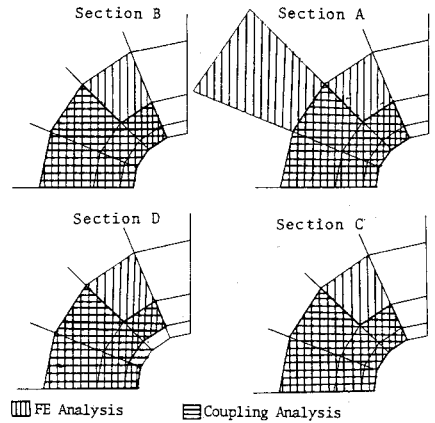


図-5 FE解析と融合解析による各トンネル掘削面の塑性領域の比較

図-6(A)から、Lが1mと短い場合には、素掘の場合と比較して、塑性領域は一部狭くなつてはいるが、しかし、切端に近い所では、逆にロックボルトの施工により塑性領域が広がっているのがわかる。また、図-6(B)でのL=3mの場合には、素掘の場合と比較して、塑性領域は全般に狭くなつてあり、トンネル内面から3m以内においてのみ地山が塑性化し、ロックボルトの効果が発揮されたものと思われた。また、L=3mと7mの場合において、塑性領域の広さはほぼ同一であり、むしろロックボルトを長くする事は不経済であることがわかる。

参考文献 (1) Hisatake, Ito and Ueda: Proc. 5th Int. Conf. BEM, 1983.

(2) Zienkiewicz, Valliappan and King: Int. J. Num. Meth. Engg., Vol. 1, 1969.

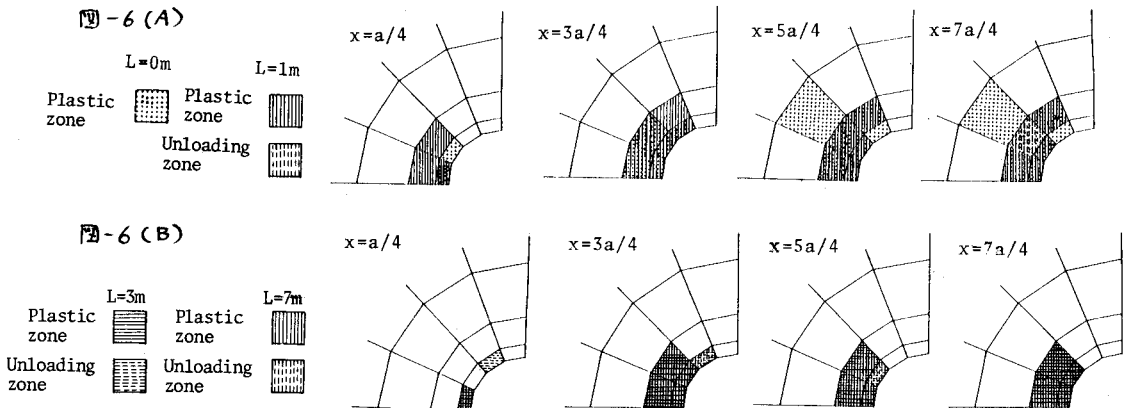


図-6 ロックボルト長の違いによる塑性領域の変化