

佐藤工業（株）中央技術研究所 正会員 ○篠川俊夫
 佐藤工業（株）中央技術研究所 正会員 今野裕喜

1. はじめに

トンネルなどの地下構造物は、近年、複雑な地質条件下の施工のみならず、複雑な形状で施工される場合が見られるようになってきている。トンネルに関して言えば、併設トンネルや交差トンネルなど、単一トンネルとして考えるには困難な複雑な形状のトンネルを施工しなければならない場合がある。

2つのトンネルがかなり鋭角に交差する場合、トンネル交点部にある程度接近するまでは併設トンネルとして施工し、交点部付近では拡幅断面となり単一断面として施工されることがある。このとき、トンネル交差点付近ではピラー（両トンネル間の残柱）が残ることになる。一般に、ピラーには過大な応力が発生することが予想され、ピラーの幅が狭くなればなるほど平均ピラー応力の値は増加し、ピラーが破壊する可能性が高くなるものと考えられる。したがって、施工の安全性を確保するためには、数値解析手法を用いて事前に地山の挙動を予想し、施工時に必要であると考えられるピラー幅を推定する必要がある。

本報告では、2つのトンネルが約 10° の角度で交差する場合に生じるピラーの安定性を境界要素解析により検討する。

トンネル交差点の問題に対しては本来3次元解析を行ない検討しなければならない^{1),2)}が、3次元解析は、入力データ作成に膨大な時間と労力を必要とし、計算時間と計算コストがかかる。そこで、2次元解析としてトンネル間の離間距離を変化させてピラーに発生する応力を求める。このような類似した解析モデルを数種類設定しケース・スタディーを行なう場合、有限要素解析では入力データ作成に時間を要する。ピラーの幅を変化させながらピラーに発生する応力を求めるには、入力データ作成が容易で任意点での変位・応力を計算できる境界要素解析が適していると考えられる。

2. 検討方法

対象となるトンネルは、図-1に示すように既設トンネルに対して新設トンネルが約 10° の角度で交差する。この際、交点部付近にはかなり鋭角のピラーが現われる。このピラーには新設トンネルの掘削によりかなり大きな応力が発生することが予想される。そこで、ピラー幅を変化させて各断面で2次元境界要素弾性解析を行ない、ピラーに発生する応力を求め、縦断方向（トンネル軸方向）に見直して、施工時に最低限必要であると考えられるピラー幅を推定する。

解析モデルを図-2に、物性値を表-1に示す。

ピラーの安定性は、トンネルのスプリングライン（以下S.L.と略）上の応力に着目して検討する（図-3）。各断面においてMohr-Coulombの破壊基準よりS.L.上での局所安全率を求める。得られた局所安全率の平均値をピラーの安全率とする³⁾。

交差トンネルにおいて、交差角が 15° の場合、影響範囲はトンネル軸に沿って直径の3倍程度であると報告されている¹⁾。今回のケースでは、ピラー幅3mがほぼこれに相当する。そこで、ピラー幅 3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.75, 0.5 mの7ケースの計算を行なう（図-4）。

なお、解析は安全側を考慮して無支保状態とし、2つのトンネルが同時に掘削されたとして行なう。初期応力状態は土被り高さより設定する。

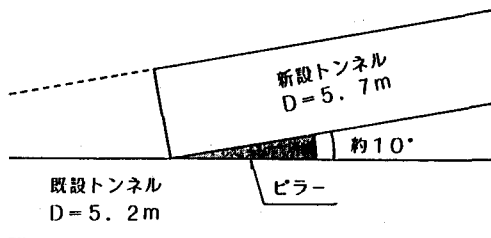


図-1 トンネル交差点平面図

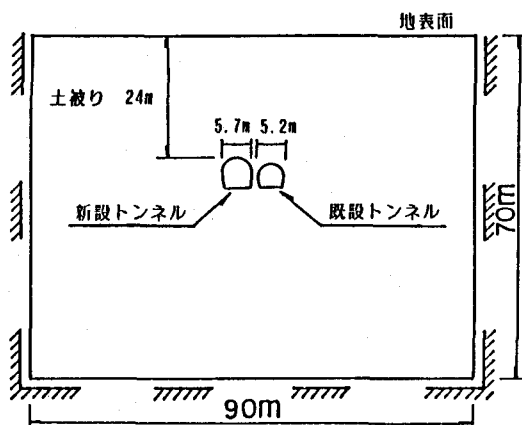


図-2 解析モデル

表-1 物性値

弾性係数 E (kg/cm^2)	10000
ポアソン比 ν	0.3
単位体積重量 γ (t/m^3)	1.8
粘着力 c (kg/cm^2)	20
内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	25

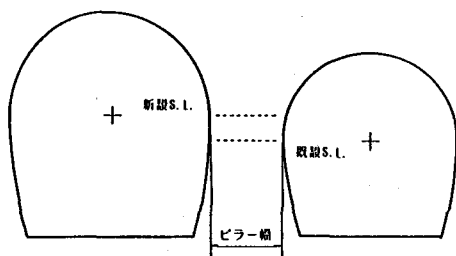


図-3 トンネル断面図

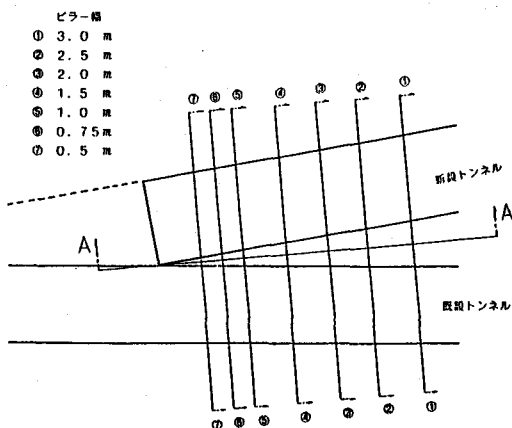


図-4 解析位置図

3. ピラー部の検討

3-1 横断方向の検討

図-5, 6は, ピラー幅が 1.0m の場合のピラー内の主応力と局所安全率の分布図である。既設トンネルと新設トンネルのS.L.上の安全率を比較すると, それぞれ 2.58, 2.79 であり, 既設トンネルのS.L.上の安全率の方が低いことがわかる。したがって, 以後, 既設トンネルのS.L.上における応力に着目してピラー部の検討を行なっていく。

図-7, 8は, ピラー幅が 1.0m の場合のトンネル周辺の最大主応力分布図および最大せん断ひずみ分布図である。ピラー部にかなり高い応力集中が発生していることがわかる。

3-2 縦断方向の検討

ピラー幅を変化させて各断面で行なった2次元解析の結果を縦断方向に重ねることにより, ピラーの安定性を検討する。

図-9は, 各計算ケースにおけるピラー中央部(図-4, A-A)の最大主応力の値をプロットしたものであり, 既設トンネルのみの場合の同じ位置での最大主応力の値と土被り荷重も併せて示す。この結果を見るとピラー幅が 1.0m 以内で高い最大主応力を示しており, 応力集中度がかなり高くなっていることがわかる。

図-10は, 各ピラー幅に対応したピラーの安全率をプロットしたものである。今回の解析ケースでは,

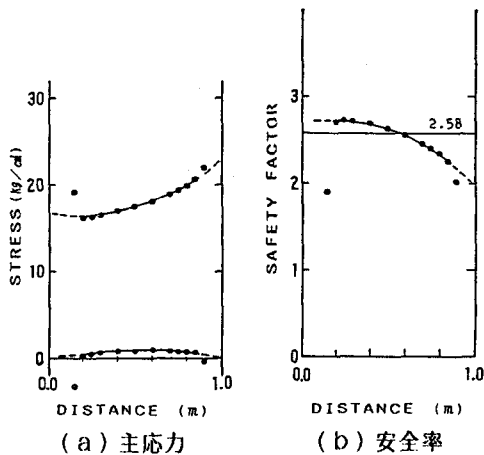


図-5 ピラー内の主応力と局所安全率の分布
(ピラー幅 1.0m, 既設S.L.)

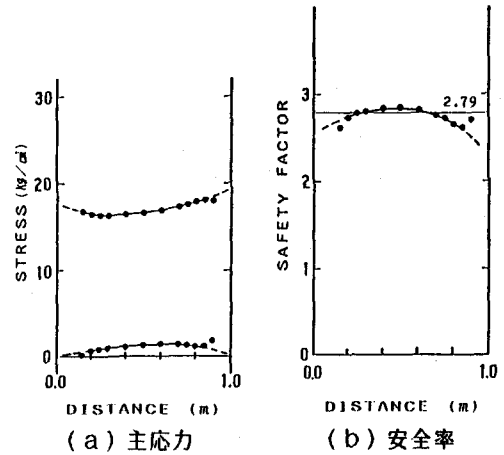


図-6 ピラー内の主応力と局所安全率の分布
(ピラー幅 1.0m, 新設S.L.)

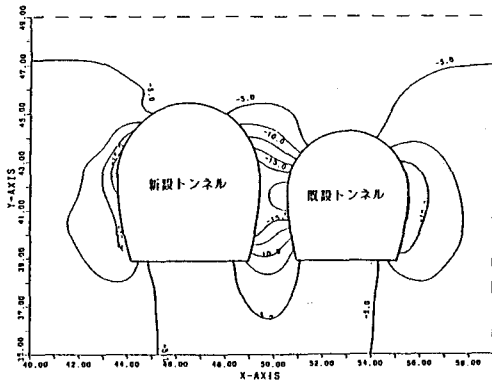


図-7 最大主応力分布 (ピラー幅 1.0m)

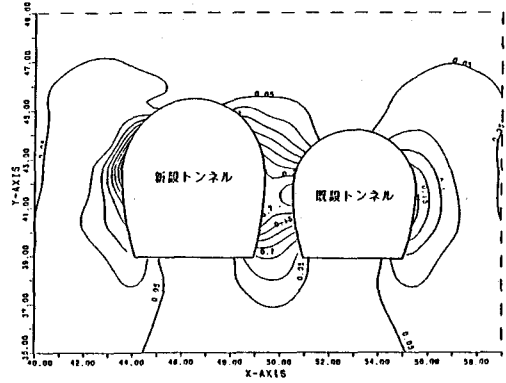


図-8 最大せん断ひずみ分布 (ピラー幅 1.0m)

全般に安全率が高いようである。

図-11は、既設トンネルS.L.および新設トンネルS.L.上の内空変位をプロットしたものであり、既設のみおよび新設のみの場合の結果も併せて示す。単一トンネルの結果と比較すると、ピラー幅が狭いときはかなり異なる挙動をすることがわかる。既設トンネルでは、内空変位がピラー幅 1.0m以内でダイバージェンスを示している。これは、解析上かなり新設トンネルの影響を受けていることによると考えられる。また、新設トンネルもピラー幅 1.0m以内で単一トンネルの場合よりも大きな内空変位を示している。

3-3 ピラー幅の推定

以上の結果をもとにして、施工時に必要であると考えられるピラー幅を推定する。

今回の検討は、3次元状態での挙動を把握すべきところを2次元解析の重ね合せで行なっていること、既設トンネルの施工による周辺岩盤のゆるみを考慮していないことなど、かなり簡略化したモデルで行なっている。そこで、安全側を考慮して許容安全率 F_s を $F_s = 2.0$ 程度と見なすこととする。

ピラーの安全率(図-10)および図-9, 11の結果を合わせて検討すると、ピラー幅としては 0.5~1.0m程度が必要であると推定される。

なお、実際の施工は、交差部付近の計測結果などを踏まえて、最小ピラー幅を約 0.7mとして行なわれた。その際のピラー幅 2.5mの地点における既設トンネルS.L.上の内空変位の計測結果を図-12に示す。最

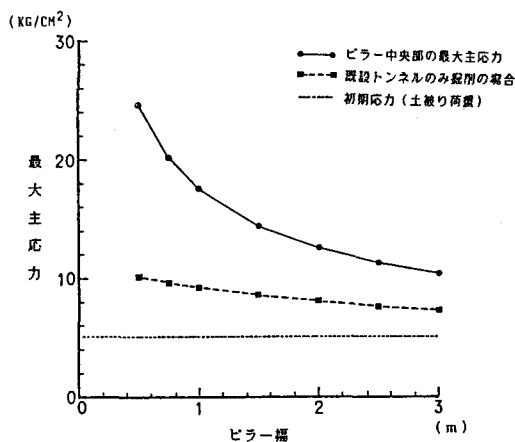


図-9 ピラーの最大主応力（ピラー中央部）

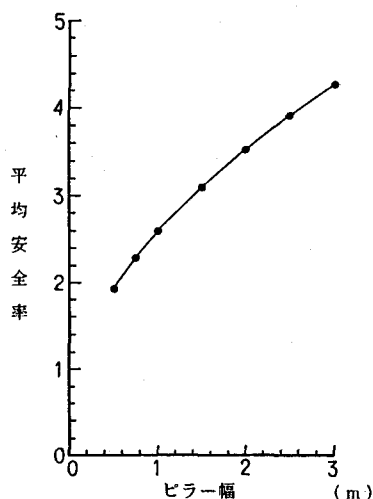


図-10 ピラーの安全率

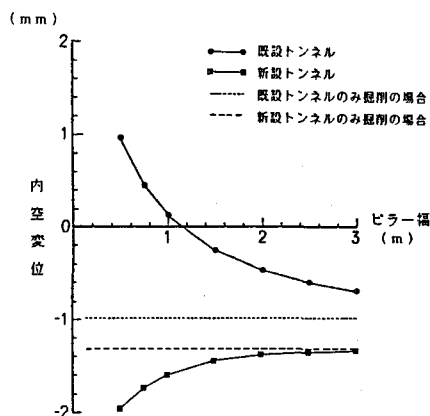


図-11 S.L.上の内空変位

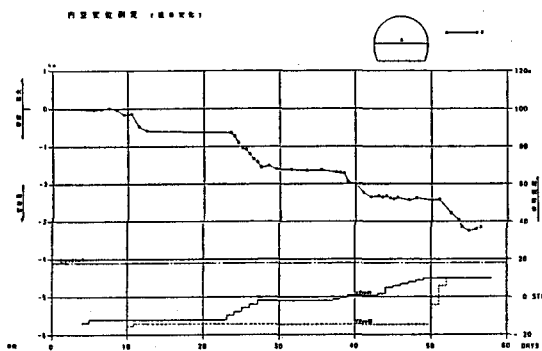


図-12 既設トンネルの内空変位
(計測結果、ピラー幅 2.5m)

大変位量は 3.2mm で、図-11 に示されている解析結果とは異なっている。これは、やはり簡略化したモデルによる解析と実際のとのギャップを示すものと考えられる。

4. おわりに

2つのトンネルが交差する際に交差部付近に生じるピラーの安定性を境界要素解析により検討し、施工時に必要であると考えられるピラー幅を推定した。

2次元解析という制約条件のもとでピラー幅を変化させて縦断方向の検討を行なうという簡略化したケースではあるが、事前検討ということではある程度十分な結果が得られたと考えている。また、このようなピラー幅を変化させた解析では、境界要素解析を用いるとピラー内の応力状態を容易かつ適確に把握できると考えられる。

今後は、3次元解析を行なってさらにトンネル交差部の影響を把握して行きたいと考えている。

<参考文献>

- 1) Hocking, G. ; Stresses around Tunnel Intersections, Computer Methods in Tunnel Design (Ed. A. Burt), The Institution of Civil Engineers, PP.41-60, 1978
- 2) 伊藤文雄, 竹田直樹, 亀村勝美; 斜交トンネルが本線トンネルに与える影響, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.261-265, 1985
- 3) Hock, E. and B. T. Brown (小野寺透, 古中龍之進, 斎藤正忠, 北川隆共訳); 岩盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, pp.148-155, 1985

(57) Stability of Pillar around Tunnel Intersection

Toshio Shinokawa, Hiroki Konno
Engineering Research Institute, Sato Kogyo Co., Ltd.

Recently, underground structures such as tunnels must sometimes be constructed not only under complicated geological conditions but also under complicated configuration; two tunnels are constructed adjacently or they cross to each other.

When two tunnels cross to a very acute angle, a pillar is remained around the tunnel intersection. High stress is usually expected to occur in the pillar; as the width of the pillar becomes narrower, the average pillar stress increases and the possibility of the failure becomes high. Accordingly, for the security of the construction safety, the behavior of the ground must be known before the construction.

In this paper, the stability of the pillar is examined using the boundary element analysis when two tunnels cross to about 10 degrees. The width of the pillar for the security of the construction safety is estimated.

The pillar stresses are calculated using the 2-dimensional boundary element elastic analysis by changing the distance between the tunnels so as to recognize the 3-dimensional behavior of the tunnels and the pillar. When some problems are solved by the finite element analysis, too much input data preparation time are required because the mesh division of each analysis must be different to each other because of the difference of the distance between the tunnels. The boundary element analysis is better than the finite element analysis because the same mesh division can be used by moving the position of one tunnel.

Conclusions are summarized as follows;

- (1) The examination is simple case that is restricted to 2-dimensional analysis by changing the width of the pillar. But, sufficient result is found on the advance examination.
- (2) The numerical model itself is a parameter in the stability analysis of the pillar. The stress state can be grasped easily and accurately using the boundary element analysis.
- (3) In future, we are going to examine the influence of the tunnel intersection using 3-dimensional analysis.