

早稲田大学理工研 学生員 小泉 淳

日本電信電話公社 正員 小柳隆司

早稲田大学理工学部 正員 村上博智

1. まえがき

セグメントリングで構成されたトンネルは、普通各リングがボルトで接合されて形づくられる。このリング継手を持つトンネルの長手方向の挙動については、現在までほとんど研究がなされていない。この報告は鉄道建設公団によって行なわれたトンネル模型地上載荷試験の結果⁽¹⁾を用いて、筆者らの考えたトンネルモデルの妥当性を検討するとともに、一例としてトンネル中央で地山が急変する場合について、このモデルを用いた計算結果を示したものである。

2. トンネル模型地上載荷試験

試験は、図1に示すように地上でトンネル模型を組み立てリング内に水をはって荷重とし、その応力、変形などを測定したものである。使われたセグメントは鋼製セグメントとコンボジットセグメントの2通りである。

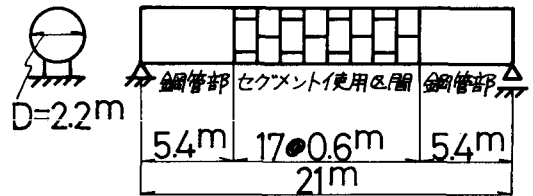


図1 トンネル模型地上載荷試験

3. 解析

まずリング継手一つを取り出し、これを曲げモーメントに対する回転ばねおよび軸方向ばねにモデル化する。次にリング継手全体を一つの回転ばねにモデル化する。最後にトンネル全体を回転ばねをさつ深に評価する。

以下にはこれらの解析モデルを具体的に述べることにする。

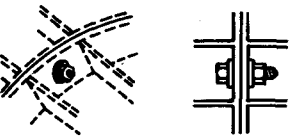


図2 リング継手

(1) リング継手のモデル⁽²⁾

図2に示すようなリング継手の継手板およびボルトを図3のようにモデル化する。図中 a はボルトと継手板のばねを複合したばねのばね定数であり、 T はボルトの軸力である。ボルト位置の水平変位量を δ とすると、

$$\delta = \frac{\beta(1+\alpha k)}{1+(\alpha+\beta)k} T \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\alpha = \frac{a^3 b^3}{3EI_1(a+b)^3}, \quad \beta = \frac{d^3}{3EI_2}$$

次に図4に示した継手部の力の釣り合いから、

$$M = T \cdot d \quad \dots \textcircled{2}$$

となる。一方、継手の回転角 θ は、図3、4を参照して次式で定義する。

$$\theta = 2\delta/d \quad \dots \textcircled{3}$$

式①、②、③より、継手部に作用する曲げモーメント M と継手の回転角 θ は、次式によって結びつけられる。

$$M = \frac{\{1+(\alpha+\beta)k\}d^2}{2\beta(1+\alpha k)} \cdot \theta = k_\theta \cdot \theta \quad \dots \textcircled{4}$$

ここに k_θ が求める回転ばねのばね定数である。一方軸方向ばねのばね定数 k_b は、ボルトの軸剛性 EA とその締付け長さ l を用いて、 $k_b = EA/l$ で評価する。

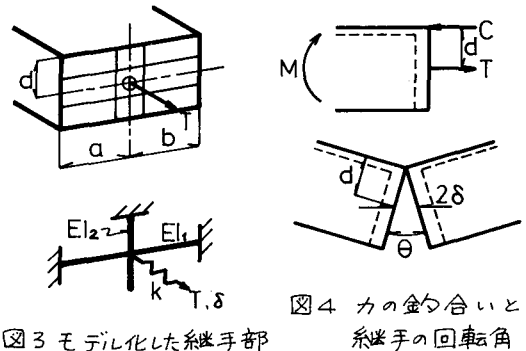


図3 モデル化した継手部

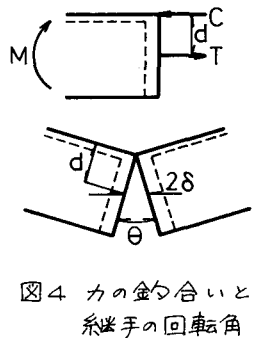


図4 力の釣り合いと継手の回転角

(2) リング継手全体のモデル

リング継手全体を一つの回転ばねにモデル化する。この回転ばね定数 K_θ は、セグメントリング2つ分を、図5に示す円筒シェルに置換し、継手のない場合(Case I)と継手のある場合(回転ばねおよび軸方向ばねをもつ場合; Case II)について有限要素法を用いて解析し、同図中の変位 δ_1 および δ_2 より、次式で求める。

$$K_\theta = \frac{PL^2}{4(\delta_2 - \delta_1)} \quad \dots \textcircled{5}$$

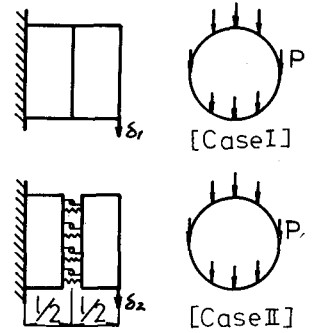


図5 モデル化したセグメントリング

(3) トンネル全体のモデル

セグメントリングを梁部材に、リング継手全体を回転ばねに評価し、トンネルを図6のようにモデル化する。

4. 言式・実験結果と解析結果

図7, 8はそれぞれ鋼製セグメントを用いた場合とコンポジットセグメントを用いた場合について、トンネル模型のたわみ曲線を示したものである。図中点線は各荷重段階の実測値を、実線はリング継手を考慮した本解析値を、また破線はトンネルを剛性一様な梁とした場合の解析値を示す。両者を比較した結果は必ずしも満足できるものではないが、巨視的に見てトンネルの変形挙動をオーダー的に推定できるこのモデルは、現状では一応の妥当性を持っているものと考えられる。

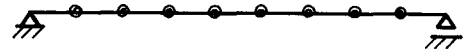


図6 モデル化したトンネル模型

5. トンネル中央で地盤が急変する場合の解析例

解析に当たって想定した条件は、セグメント：試験に用いられたコンポジットセグメント、立坑間隔：8.4m、土かぶり：6.6mである。また周辺地盤はWinkler仮定に従って弾性ばねに評価し、そのばね定数とした地盤反力係数は、トンネル中央で $k=0.25 \text{ kg/cm}^2$ から $k=2.0 \text{ kg/cm}^2$ に急変するものと仮定した。図7はその結果のうちトンネルのたわみ曲線を示したもので、リング継手をもつトンネルはたわみ性に富み、変形は地盤によく追従すること、最大のたわみ

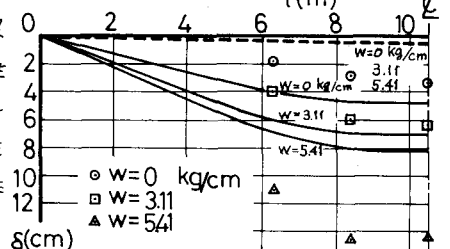


図7 トンネル模型たわみ曲線

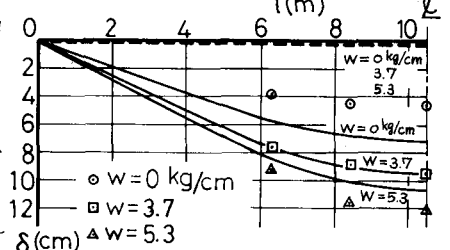


図8 トンネル模型たわみ曲線

量はトンネルを剛性一様な梁とした場合とほぼ同じであることなどがわかる。一方ここには示さなかったが、断面力はトンネルを一様な梁とした場合に比べてはるかに小さくなった。トンネルと立坑との取付け部や地盤の急変する部分では、たわみ量は急激に変化し、リング継手部の大きな目開きが予想されるため、充分な漏水対策が要求される。また同時に、このような箇所では大きな断面力を生じるため、ヒンジを設けるなどしてその影響を断ち切る構造とすることも望ましい。

6. あとがき

以上により、トンネルの長手方向の変形挙動を評価する一応のモデルが得られた。本報告をまとめるに当たって、貴重な資料ならびに御助言を戴いた、日本鉄道建設公団、鳥取孝雄氏に深く感謝する次第です。なお、以上の計算は東大大型計算機センター HITAC-8800によった。

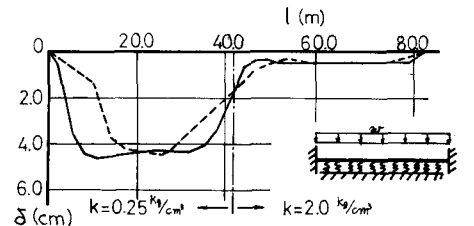


図9 地盤が急変する場合のトンネルたわみ

〔参考文献〕(1) 日本鉄道建設公団：トンネル模型試験報告書

(2) 村上、小泉、大塚：セグメント継手の挙動について、第32回土木学会講演集Ⅲ-230, 1977, 14