

(40) トンネルにおける成付けコンクリートの等価弾性係数

神戸大学 大学院 学生員 ○進士 正人
神戸大学 工学部 正会員 桜井 春輔

1. まえがき

従来、トンネルの解析において、成付けコンクリート覆工（以下覆工と称す）の非弾性的な挙動を考慮する場合は多い。しかし、トンネルの力学的挙動に与える覆工の凹凸の影響は、通常、無視され、凹凸のないゆめらかな形状の断面で解析されている。したがって、本文では、有限要素法によるシミュレーションによってトンネルの解析結果に与える覆工の凹凸の影響を明らかにする。そして、その影響を、成付けコンクリートの等価弾性係数として評価することを提案する。

2. 成付けコンクリート覆工の凹凸の実測例

図. 1は、Aトンネルにおいて、天端から左右に約50cm間隔で、トンネル半径及び、覆工厚さを実測した結果である。図から明らかなように、実際の覆工には、かなりの凹凸が生じていることがわかる。実測の結果、トンネル中心から覆工の外側（地山面）及び覆工の内側（覆工面）までの距離は、以下のものであった。

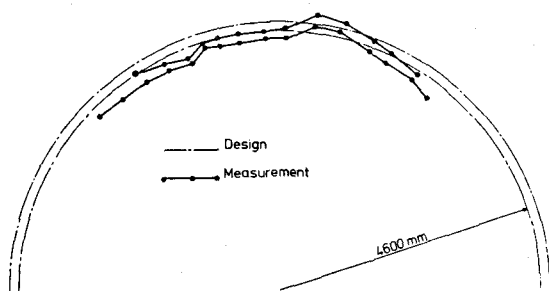


図1

覆工外側（地山面）:

（平均）= 462.58cm , （標準偏差）= 13.92cm

覆工内側（覆工面）:

（平均）= 443.73cm , （標準偏差）= 11.70cm

このトンネルにおける設計ライニング厚は、15cmであるが、実測では、平均18.85cmであった。

ここで、本文では、覆工の凹凸の大きさを、凹凸度と呼び、地山面の凹凸の変動係数で定義する。すなわち、このトンネルの凹凸度は以下になる。

$$(\text{凹凸度}) = (\text{標準偏差}) / (\text{平均}) = 13.92\text{cm} / 462.58\text{cm} \approx 0.03$$

3. 有限要素法シミュレーション

2. で述べたように、成付けコンクリート覆工には、かなりの凹凸が存在する。そこで、トンネルの変形挙動に与える覆工の凹凸の影響を有限要素法によりシミュレーションを行なう。

3. 1 シミュレーションモデル

ここのシミュレーションにおいては、トンネルは円形とし、掘削の過程を簡単化して、全断面掘削とし、さらに、掘削直後に成付けコンクリート覆工を施工するものとする。図2及び、表1に、シミュレーションのモ

デル及び、モデルに使用するインポートデータを示す。
ここで、 E_m 及び、 E_L は、それぞれ地山と覆工の弾性係数、 q_x 及び、 q_y は、それぞれ地山の初期応力の x （水平）及び、 y （鉛直）方向の成分を表わし、 q_x/q_y を側圧係数と呼ぶ。また、 t 及び、 R は、それぞれ覆工厚及びトンネル半径、 ν_m 及び、 ν_L は、それぞれ地山及び覆工のポアソン比、Irregularity は覆工の凹凸度である。

シミュレーションでは、地山の凹凸は、トンネル中心から地山面までの距離を平均値とした標準正規乱数を用い決定し、また覆工内側は、凹凸の実割例を参照し、以下のように定める。

$$(\text{覆工内側半径}) = (\text{設計覆工内側半径}) + 0.6 \times (\text{標準正規乱数})$$

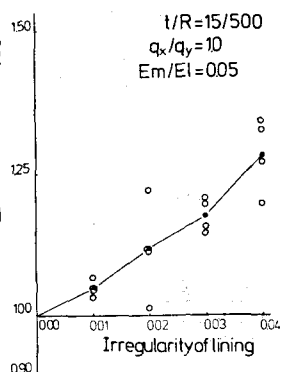
また、地山面には凹凸があるが、覆工面には凹凸がないケース及び、地山面の凹凸と等しい凹凸が覆工表面にも生じているケースも考慮する。

3. 2シミュレーション結果及び考察

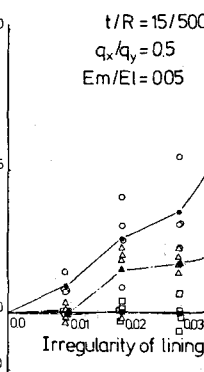
図3に、凹凸度を変化させた時の、覆工面に生ずる変位及びスプリングライン上の半径方向変位を示す。図中、(Irregularity of lining)は覆工の凹凸度である。また、凹凸度ゼロは、覆工に凹凸がないなめらかなケースである。

図から明らかなように、天端及びスプリングライン上の半径方向変位は、凹凸度の変化に伴い、全体的に増加する傾向がある。しかし、覆工に凹凸がある場合の変位（図中○印）は、なめらかな覆

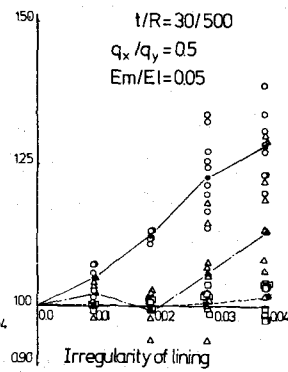
工の変位（図中●印）と比較して、ケース毎のばらつきが大きいので、覆工の凹凸が、シミュレーションに与える効果をより明確にするため次式に示す。半径及び円周方向理論解を目的関数とした最小二乗法を適用して、変位パラメータを求める



(a)



(b)



(c)

図4

半径方向変位: $U_r = \alpha + \beta \cos 2\theta$, 円周方向変位: $U_\theta = \gamma \sin 2\theta$

ここで、 α 、 β 、 γ は変位パラメータ、 θ はx軸からの角度を示す。

図4(a)~(c)は、凹凸のある覆工における覆工厚及び、側圧係数の異なるインプットデータに対する凹凸度の変化と、変位パラメータ α 、 β 、 γ との関係を示したものである。なお、ここで、 α 、 β 、 γ は、なめらかな覆工に対する値で無次元化してある。

これらの図から明らかなように、凹凸度の変化に伴う変位パラメータ α 、 β 、 γ の増加率は、覆工厚及び、側圧係数が変化しても相違は認められない。よって、凹凸度の変位形状に与える影響は、覆工厚及び側圧係数に影響されないことがわかる。また、変位パラメータ α 、 γ は凹凸度が大きくなるにつれ、一様に増加する傾向にある。しかし、それらの増加率は異なっている。一方、 β は、凹凸度に関係なく一定値を示している。すなわち、凹凸度の α 、 β 、 γ に与える影響は等しくないことが分る。

3. 3次元コンクリートの等価弾性係数

前節にも述べたように、覆工の凹凸度が大きくなるにつれて、覆工面に生じる変位は増加する。つまり、覆工に凹凸が生じて、覆工に作用する土圧が変わらなると仮定すれば、覆工の凹凸の変位に与える影響は、覆工の剛性を低下させる事と等価であると言える。そこで本文では、覆工に凹凸のある場合の変位が、見掛け上なめらかな覆工とした場合の変位と等しくなるように、なめらかな覆工の弾性係数(E_e)を求め、これを、“等価弾性係数”と定義する。

次に、等価弾性係数の求め方について説明する。シミュレーションで用いたインプットデータによって、なめらかな覆工における変位を求め、シミュレーションと同様に、変位パラメータ α 、 β 、 γ を算定する。もちろん、この場合の凹凸度は、ゼロである。図5に、覆工の弾性係数を変化させた時の変位パラメータにおける解析結果の一例を示す。ここで、変位パラメータ(縦軸)及び、弾性係数(横軸)は、ともに用いた最大の弾性係数に対する値によって無次元化してある。なおこの図は、側圧係数及び、覆工厚が変化した場合にも適用できるものである。ただし、側圧係数が $\gamma_x/\gamma_y = 1$ (静水圧状態)の時には、 α のみ存在することは言うまでもない。

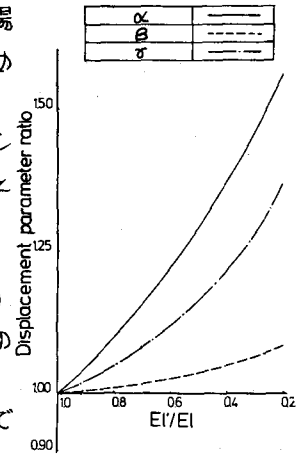


図5

次に、与えられた凹凸度に対して、図4と図5の変位パラメータが等しくなるように覆工の弾性係数を求める。(図6参照)これが、凹凸のある覆工を見掛け上、なめらかな覆工であると仮定した場合の等価弾性係数となる。なお、この場合、図4の α 、 β 、 γ のすべての変位パラメータを等しくすることはできない。したがって、

ここでは変位パラメータ α によって等価弾性係数を求めることを提案する。この妥当性は、次節で検討する。結局、等価弾性係数は、次式によって求められる。

$$E_e = D \times E_s$$

ここで、 D は、図6で求められた弾性係数の低下率である。なお、覆工

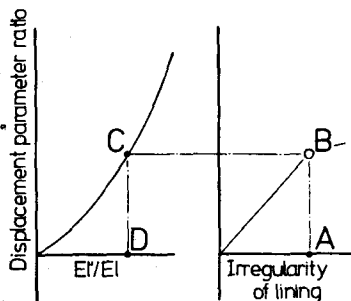


図6

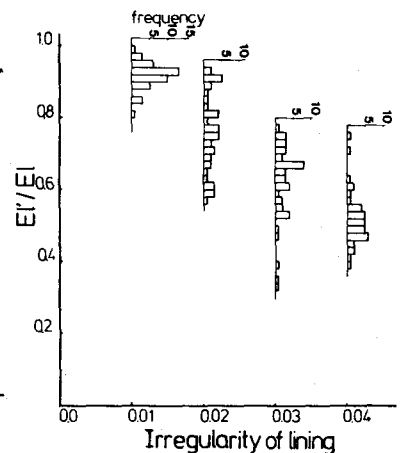


図7

の凹凸の程度を表す変位係数が同じ場合でも、得られる等価弾性係数が異なることは、容易に想像がつく。図7にその結果の一例を示す。この図から、覆工の凹凸度が変化するに従って、等価弾性係数のばらつきが大きくなる傾向にあることは明らかである。また、形状が変化する境界値問題は、高次の非線型問題であり、したがって、形状を標準正規分布で決定しても、結果として得られる等価弾性係数は、正規分布するとは限らない。しかし、ここでは、問題を単純化し、算術平均をもとめ、それぞれの場合に対する等価弾性係数とする。

上で述べたようにして定められる等価弾性係数を、インプットデータを種々変化させて求め、整理すると、図8を得る。この図は、覆工と地山の弾性係数の比、覆工の凹凸度、等価弾性係数の間の関係を示す。この図から明らかなように、覆工の凹凸度が大きくなるにつれ、さらに、覆工と地山の弾性係数の比が小さくなるにつれて等価弾性係数は、小さくなることとがわかる。

3. 4 等価弾性係数の妥当性の検討

すでに述べたように、等価弾性係数は、変位パラメータ α , β , γ のいずれを用いても求めることができる。しかし、本研究では、 α を用いることを提案した。そこで、この節では、この妥当性を調べるために、等価弾性係数を用いて、有限要素法による応力解析を試みた。

その結果の一例を図9(a), (b) に示す。図9(a)は地山内応力を、図9(b)は覆工の軸力を示す。これらの図には、覆工に凹凸がある場合の解析結果と、等価弾性係数を用いたなめらかな覆工による解析結果と比較してある。なお、地山内応力は、覆工に最も近い、ガウスポイント上の主応力を示す。

図9から明らかなように、等価弾性係数を用いたなめらかな覆工に対する地山内応力及び、軸力分布は、覆工に凹凸がある場合の局所的な変化を正確に表現することはできないが、近似的に一致していると見ることできよう。

4. 結論

本研究により、トンネル変形挙動に与える覆工の凹凸の影響は無視できないことが明らかとなった。また、トンネル解析において、覆工を凹凸のない、なめらかな覆工モデルで置き換えて解析する場合は、ここで提案した等価弾性係数を用いる必要がある。

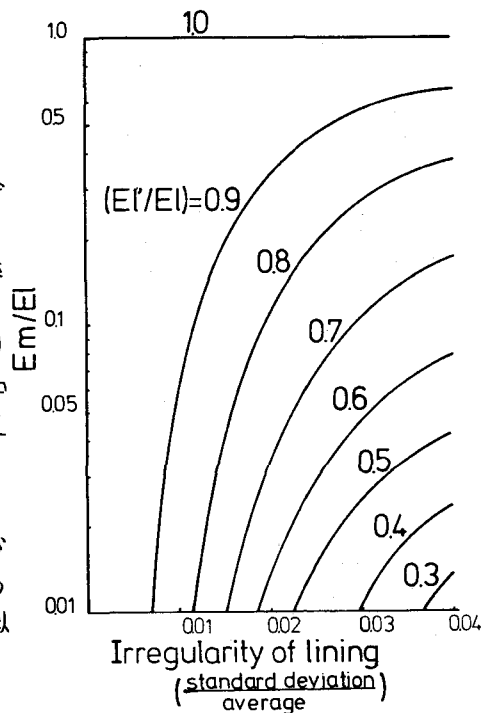
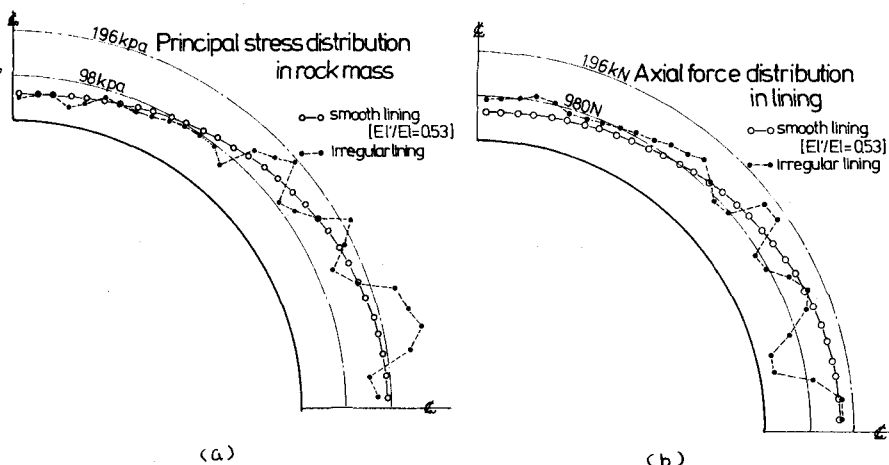


図8



(a)

(b)

図9

(40) Equivalent Modulus of Elasticity of Shotcrete Tunnel Lining

By M. Shinji*
S. Sakurai**

Summary

Many previous works of tunnel analysis are based of the assumption that the irregularity of shotcrete linings is ignored. In fact, we aware of the fact that the analysis based on this hypothesis did not result in any agreement with field measurement and the effect of irregularity of shotcrete tunnel lining on the results of analyses was not investigated.

Considering these circumstances, in the present works, an equivalent modulus of elasticity is proposed by means of computer (F.E.M) simulation in order to evaluate the effect of irregularity of shotcrete lining.

It is concluded in this study that the irregularity cannot be ignored, so that the tunnel analysis must be done by introducing the equivalent modulus of elasticity proposed here, in order to take into account the effects of the irregularity.

* Graduate Student

**Professor

Department of Civil Engineering
Kobe University
KOBE 657, Japan