

京都大学大学院工学研究科 正会員 小野紘一
 京都大学大学院工学研究科 正会員 杉浦邦征
 京都大学大学院工学研究科 学生員 大島義信
 京都大学工学部 学生員 ○光森章

1. はじめに

トンネル工法 NATM は施工性、経済性に優れていることから山岳トンネル工法の標準工法となっている。しかし地山の挙動に不確定要因が多く現場条件が多様多様であるため、過去の経験や実施例に依存する部分が極めて大きく安全性の確立に欠ける。そこで本研究では、吹付けコンクリートと岩盤間のせん断付着挙動に着目して簡易でかつ理論的なせん断付着応力算定法の確立を目指し、その手法の妥当性について検討を行う。

2. せん断付着応力算定法

2.1 遷移領域の定義

吹付けコンクリートと岩盤間のせん断付着応力を FEM 解析で適切に評価するために吹付けコンクリートと岩盤から成る二相複合材料の遷移領域を定義する(図1)。本研究では二相が直列に相を成すと仮定し遷移領域の弾性係数 E_l は式(1)によって定義される。

$$\frac{1}{E_l} = \frac{1}{l_c + l_s} \left(\frac{l_c}{E_c} + \frac{l_s}{E_s} \right) \quad (1)$$

ここで簡単化するため遷移領域内の吹付けコンクリート厚さ l_c と岩盤厚さ l_s の比を等しいものと仮定して式(2)を用いた。

$$\frac{1}{E_l} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_c} + \frac{1}{E_s} \right) \quad (2)$$

E_c を吹付けコンクリートの弾性係数(N/mm^2)、 E_s を岩盤の弾性係数 (N/mm^2)とする。

2.2 せん断付着応力の定義

図 2 のように吹付けコンクリート要素内の微小要素を考える。吹付けコンクリート内で発生した軸力は境界面でのせん断付着応力によって岩盤に分散される。従って、a 面での吹付けコンクリート内の軸力を N 、b 面での軸力を $N+dN$ 、微小区間 dx で発生するせん断付着応力を τ とすると式(3)が成り立つ。

$$\tau = \frac{dN}{dx} \quad (3)$$

3. 解析条件、解析ケースおよび解析結果

3.1 解析条件

トンネル径 10m、土被り高さ 100m 及び硬岩地山を想定して自重解析を行なった。また吹付けコンクリート要素、遷移要素、岩盤要素は全てソリッド要素を用いてモデル化し弾塑性解析を行なった。与えた解析条件は表 1 に示す。

3.2 解析ケース

吹付け厚 10cm、吹付けコンクリート弾性係数 $2 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ を基準にして吹付け厚(5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm)、吹付けコンクリート弾性係数($1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, $2 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, $3 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, $5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$)をパラメーターとして解析を行なった。

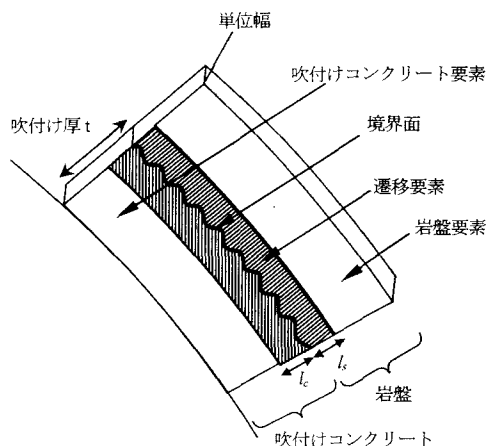


図1 遷移領域概念図

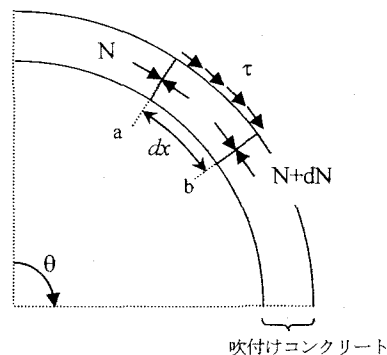


図2 せん断付着応力概念図

表1 解析データ

岩盤の単位体積重量	24kN/m ³
岩盤の弾性係数	$2 \times 10^3 \text{N/mm}^2$
岩盤の粘着力	2 N/mm ²
岩盤の内部摩擦角	50°
岩盤のポアソン比	0.3
遷移領域のポアソン比	0.25
吹付けコンクリートのポアソン比	0.2

3.3 解析結果及び考察

式(3)で得られたせん断付着応力とFEM解析によって算出された遷移要素内のせん断応力を比較した結果を図3-1に示す。これより非常に似た挙動を示していることが分かる。従って式(3)はせん断付着応力算定法として正しいと思われる。ただしトンネルは1/4断面を考慮しており θ は天端からとっている。次に、吹付け厚 t 、吹付けコンクリート弾性係数 E_c を変化させた場合の式(3)で得られたせん断付着応力の結果をそれぞれ図3-2、図3-3に示す。これより、吹付け厚、吹付けコンクリート弾性係数が増加するにつれて、境界面でのせん断付着応力が増加していくことが分かった。せん断付着応力が増加すれば吹付けコンクリートと岩盤間の付着が切れる可能性があり危険である。従って境界面でのせん断付着応力に着目すれば吹付け厚、吹付けコンクリート弾性係数は小さくするべきであると言える。

4. 結論および今後の課題

以下に本研究によって得られた知見をまとめる。

- ・ 遷移領域を導入した FEM 解析の結果とせん断付着応力算定法により得られた結果を比較することにより、吹付けコンクリート内の軸力から吹付けコンクリートと岩盤間のせん断付着応力を算定できることが検証された。
- ・ せん断付着応力に着目すれば、トンネル構造物における危険性解消のため、吹付け厚及び吹付けコンクリート弾性係数を小さくするべきであることが分かった。しかし一般的に、吹付け厚及び吹付けコンクリート弾性係数を大きくして剛性を大きくする方がトンネル安全性の確立につながるとされている。従ってせん断付着応力を設計基準の一つの指標として現場条件に合わせて最適な設計をすることが重要である。

また今後の課題として以下が挙げられる。

- ・ 本研究では遷移領域の評価を単純化して行なったが実際の境界面はさらに複雑であるため仮定の修正、詳細化を加えればさらに精度のたかい結果が得られると予想される。
- ・ 本研究では自重解析のみを行っており本来硬岩地山で考慮されるべき緩み土圧を考慮していない。従ってトンネル掘削工事においてトンネルにかかる荷重を適切に評価できる解析プログラムを今後検討する必要がある。

[参考文献]

- [1] 小野紘一, “The Use of Mathematical Models in Fracture Mechanics with Special Reference to Cement Paste and Concrete”, 1972.
- [2] 社団法人 日本コンクリート工学協会編, “コンクリート便覧第二版”, 技報堂出版, 1996.

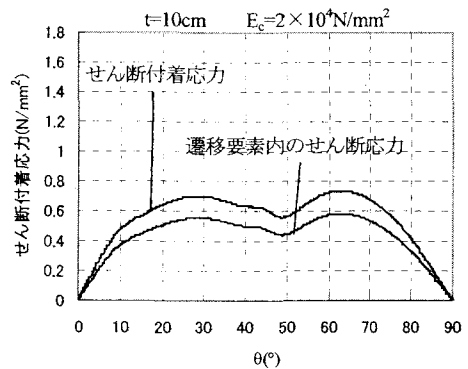


図3-1 せん断付着応力の比較

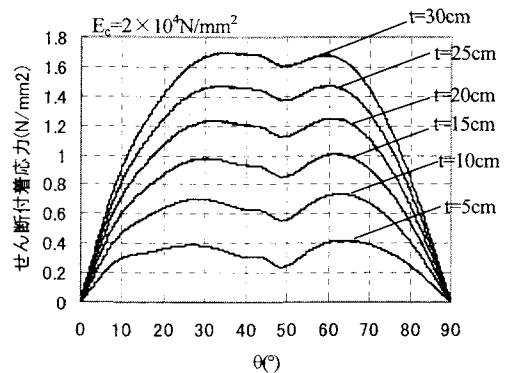


図3-2 吹付け厚を変化させた場合

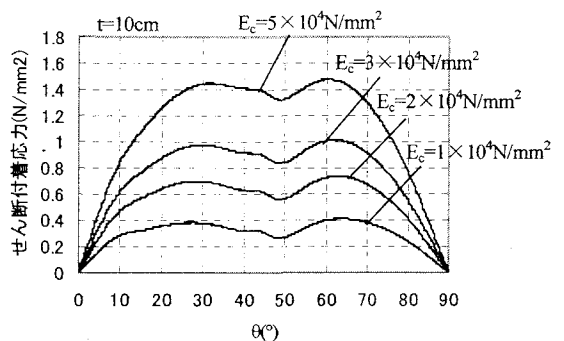


図3-3 吹付けコンクリート弾性係数を変化させた場合