

III-247

トンネル解析・設計における岩盤の連続体近似に関する考察

清水建設 正会員 ○ 熊坂 博夫

清水建設 正会員 長谷川 誠

1. はじめに

従来より、トンネルの解析・設計において、岩盤を連続体とみなした応力・変形挙動の把握がFEM等の数値解析を中心として行われてきている。最近では、岩盤の不連続性の影響を考慮した解析の必要性も考えられるようになってきており、種々の研究が行われている。岩盤内の不連続面は、規模の小さなクラック、亀裂から規模の大きな断層に至るまで様々である。これらのモデル化は、連続体近似して取り扱う方法と不連続面を直接モデル化する方法とに分類される。よって、トンネルに代表される地下構造物の解析・設計に当たっては、岩盤の不連続性の規模により取り扱い方を考えなければならないが、その取り扱いの境界となるスケールの目安については、未だ十分に明らかになっていない。

ここでは、節理や亀裂が十分に発達した塊状の岩盤の不連続性を対象にして、2次元円形粒子の光弾性実験結果のデータを用い、粒子間伝達力がつくる構造のテンソル量が、領域の大きさによりどのように変化するかを求め、連続体近似するのに必要なスケールの目安について考察を行ったので報告する。

2. 不連続性のテンソル表示について

岩盤内に存在する亀裂やクラックなどの不連続性を計量化する方法として、小田らによるクラックテンソル¹⁾や京谷らによる損傷テンソル²⁾などがある。

一方、節理や亀裂が十分に発達した塊状岩盤は、上記のような岩盤内の欠損分布をテンソル表現したものに代わり、塊状岩がつくる支持構造のテンソル表示が力学的特性をよりよく表現していると考えられる。ここでは、粒状体力学で用いられるコンタクトテンソル C_{ij} や佐武のファブリックテンソル J_{ij} ³⁾を考える。

$$C_{ij} = \frac{1}{V} \int_A \int_{\Omega} a n_i n_j E(n, a) d\Omega dA \quad a; \text{ 接触面積}$$

$$J_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega \quad E; \text{ 接触面の確率密度関数}$$

V; 解析領域の体積

3. 解析結果及び考察

今回は、2次元単純せん断試験のデータを用いた。実験方法、平均応力・平均歪の計算方法については、参考文献(4)を参照されたい。

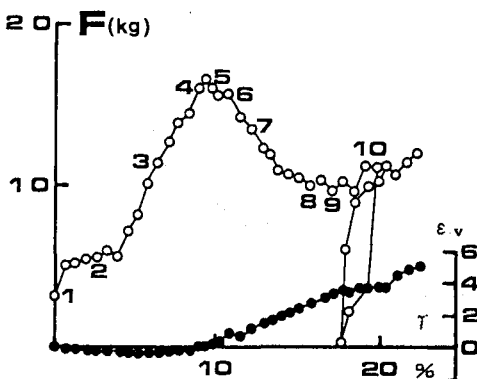


図-1 単純せん断試験のせん断力～せん断歪～体積歪関係

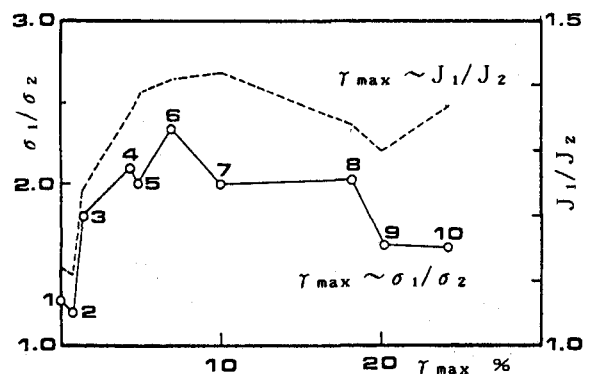


図-2 平均主応力比、異方度～平均最大せん断歪関係

図-1に単純せん断試験のせん断力～せん断歪～体積歪関係を、図-2に円形の解析領域（径 $D=160\text{mm}$ ）の粒子と粒子間伝達力の状況を示す。図-3に解析領域（径 $D=160\text{mm}$ ）における平均主応力比及び異方差（ここでは、佐武の J_{13} の主値による J_1/J_2 を異方差と定義する）と平均最大せん断歪の関係を示す。

図-1と図-2より領域内の平均応力、平均歪は、単純せん断試験の力や変形とはほぼ対応している。また、図-3に示されるように、 $D=160\text{mm}$ の解析領域内には粒子数は約300個、伝達力の生じている有効接触点は約250～300点あり、平均化可能なサンプル数である。よって、領域内の平均応力、平均歪は連続体近似したときの応力、歪と定義しても良いと考えられる。

図-4には、解析領域 D を変えたときの r/D （ r は領域内の粒子の平均粒径）と異方差の関係を示す。図より r/D の値が、0.2～0.3以上になると異方差（ J_1/J_2 ）が急激に変化しているのがわかる。この急激な変化を生じる理由は、粒子間接触力がつくる支持構造のテンソル量が、領域のスケール（ D ）を小さくしていくとある値の r/D を境として平均化できなくなるためと考えられる。すなわち、平均粒径の約3～5倍以上の領域を取れば平均化操作（連続体的な取り扱い）が可能と考えられる。小田ら⁵⁾は、同様の結果を数値実験から2次元のクラック分布に対して、クラック長の2～3倍取ればよいことを明らかにしている。

上記の結果をもとに、トンネルの解析において、塊状岩盤を等価な連続体として取り扱える最大の間隔（ l ）を考える。トンネルの代表寸法（ d ）としては、トンネル径、支保工間隔、吹付け厚、ロックボルト長、ロックボルト打設間隔、ゆるみ領域の幅あるいは、FEM解析も含めると要素の代表寸法などがある。

トンネル半径 $d=5\text{m}$ を代表寸法とすれば、最大の間隔は $l=1.0\sim 1.7\text{m}$ となる。また、ロックボルト長3mの場合、 $d=1.5\text{m}$ と考えると、 $l=0.3\sim 0.5\text{m}$ となる。よって、トンネル解析・設計を行う場合、そのモデル化により、連続体近似できるスケール（ l ）が異なることがわかる。また、断層のように明らかに不連続面を直接モデル化する場合と連続体近似して取り扱う場合以外にそれらの中間的な不連続性のスケールを持つ岩盤を考えることができる。このような岩盤のモデル化に関しては、準巨視的な取り扱い（例えば、一般連続体力学の適用）が考えられる。

4. むすび

トンネル解析・設計にあたり、岩盤の不連続性を等価な連続体に置換可能なスケールの目安について、光弾性試験の結果をもとに考察を行った。今後さらに岩盤の不連続性の評価方法とモデル化について検討を加えていきたい。尚、今回用いた実験データは、著者の一人が、東北大学在学中に行ったものである。

参考文献 1) Oda; Solid and Foundation, Vol. 22 No. 4 pp. 96～108, 1982 2) 京谷, 市川, 川本; 土木学会論文集, 第358/Ⅲ-3, pp. 27～35, 1985 3) 佐武; 土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp. 3～4, 1982 4) 石塚, 佐武, 新関; 土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp. 33～34, 1980 5) 小田, 羽山, 高野; 第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 126～130

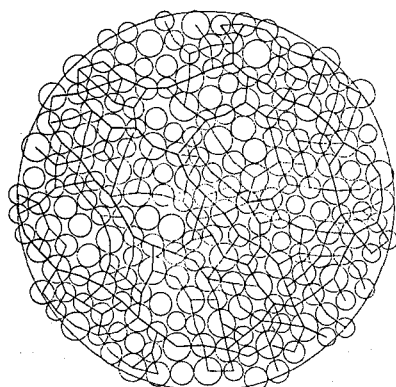


図-3 $D=160\text{mm}$ 内の粒子とSTRESS PASS

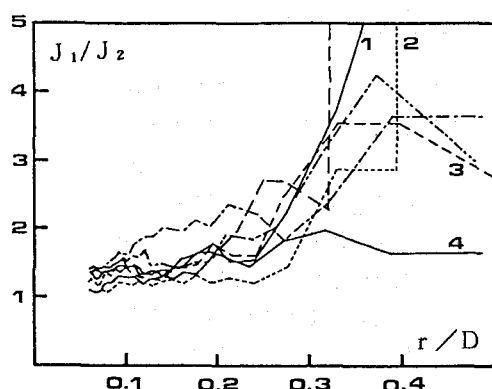


図-4 異方差と r/D の関係