地山特性曲線を定量的に評価するための解析的検討

株式会社大林組　正会員　○中岡　健一
株式会社大林組　正会員　畑　浩二
鳥取大学　正会員　木山　英郎
鳥取大学　正会員　西村　強

１．はじめに

地山特性曲線とは，トンネル内空変位と，その変位において釣り合いを保つために必要な内圧（以後，支保圧）の関係を表した曲線である．トンネル標準示方書[1)]で示されている概念図では，地山特性曲は下に凸で最小値を持ち，最小値となった後の支保圧の増大はゆるみ荷重による，とされている．一方，岩盤がひずみ軟化する場合，周辺岩盤が降伏するとせん断応力が低下するため，円周方向の応力は小さく，半径方向の応力が大きくなろうとし，支保圧が増大すると考えられる．これらの挙動を評価するためには有限要素法や有限差分法（以後，FDM）による解析が必要である．しかしながら，支保圧の，最小値となった後の増大も含めた地山特性曲線がこれらの方法で直接的に計算された例は見あたらない．この曲線を定量化できれば，支保圧が最小になる時期と最小限必要な支保圧が明らかとなり，支保工の設置時期や強度，剛性について定量的な検討が可能となる．本報告では地山特性曲線を支保工の設計に実用することを考え，FDM によって地山特性曲線を計算することを目的とする．

２．地盤条件

表-1 に岩盤の物性を示す．粘着力 c と内部摩擦角ϕはピーク値である．岩盤は Drucker-Prager の降伏条件による弾塑性体とし，ひずみ軟化を考慮した．塑性ひずみに伴う体積変化は 0 とした．この物性は D 級地山相当を基本とし，粘着力については空洞が自立しないように十分小さな値としたものである．ひずみ軟化のケースについて，c とϕともに，最終的に 0 まで低下する Case1 と，比較のために，c のみ低下する Case2 を検討した．図-1 にそれぞれのケースのひずみ軟化を表す応力-ひずみ関係を示す．土被りは 100m とし，初期応力は等方等圧とする．また，トンネルは直径 10m の円形とする．

表-1 岩盤物性

変形係数 MPa	ポアソン比	密度 g/cm³	c* kPa	ϕ* °
500	0.35	2.1	80	26

*: 三軸圧縮試験にモール・クーロンの破壊規準を適用した場合に相当する数値に直した

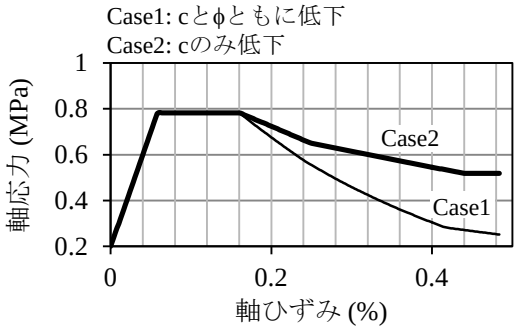

図-1 三軸圧縮試験の解析結果 (拘束圧=0.2MPa)

３．地山特性曲線の計算方法

壁面全周に，トンネル中心に向かう強制変位を 1 ステップ当たり 0.5mm の速度で加える．各ステップ内部では 40 回の繰返し計算を行う．この回数は，これ以上繰返し計算を行っても結果が大きく変化しなくなる回数であり，試計算によって求めた．支保圧はトンネルの天端から真横の位置までをアーチ部と考え，図-2 に示すように，その壁面上の節点力から各節点のトンネル中心に向かう方向の力を計算し，その合計を周長で割った平均圧力とした．

４．解析モデル

要素は同心円状に分割し，トンネル中心から 300m までモデル化する．中心から 100m 上方に仮定した地表よりも標高が高くなる要素についてはモデル化しない．

５．計算ステップ

まず，各要素に標高から計算した応力を初期応力として割り当てる．次に，不釣り合い力が十分小さくなるまで繰返し計算を行い，壁面の変位を固定してからトンネル部を掘削する．最後に，トンネル壁面に強制変位を少しずつ加える．

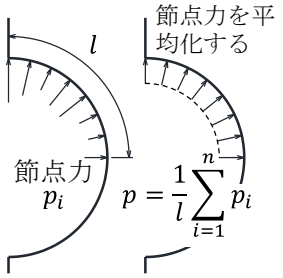

図-2 支保圧の計算方法

キーワード　地山特性曲線，ひずみ軟化解析，NATM 理論，有限差分法
連絡先　〒204-8558　東京都清瀬市下清戸 4-640　大林組技術研究所　ＴＥＬ042-495-9603

６．計算結果

図-3 に，特性曲線の解析結果を示す．Case1 は，内空変位 10cm 程度で支保圧が最小となり，その後，増減を繰り返しながら少しずつ増加している．Case2 は，単調減少で滑らかな曲線である．いずれも支保圧が 0 にはならず，トンネルは自立しない．グラフ中，階段状のプロット（緑，水色，赤破線）はそれぞれ，Case1 の天端，45°，真横の壁面に作用するゆるみ荷重を推定したもので，降伏領域の幅 w に，岩盤の密度を乗じて計算した．この線が階段状になるのは，降伏領域の拡がりは要素の厚さを単位とするためである．図から Case1 の特性曲線は，赤破線から推定される真横の降伏領域の幅に大きく影響を受けており，この幅の増加と，支保圧の一時的な上昇がよく対応している．内空変位が 0.17m の時点で 45° の降伏領域が 2 要素分拡がるとともに，横側が 3 要素分拡がったため，支保圧が大きくなっている．支保圧が真横の降伏領域の影響を受けるのは，トンネル側壁の円周方向応力がアーチを支える効果があるためと考える．支保圧が急激に増加した後は，壁面が岩盤から遠ざかることにより，減少する傾向である．内空変位 0.6m 以降は，Case1 の特性曲線は推定したゆるみ荷重のプロットに重なるようになり，支保圧が推定したゆるみ荷重に近づく傾向が見られる．

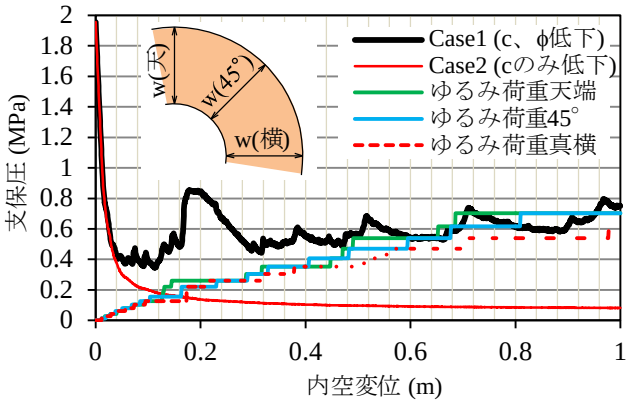

図-3 地山特性曲線の計算結果と推定したゆるみ荷重

図-4 に内空変位とトンネル周辺要素の円周方向応力の関係を，内空変位 0.12m までの範囲を拡大して示した．実線は天端，破線は 45°，一点鎖線は真横の要素で，トンネル壁面から 6 要素分，それぞれ色を変えて表示した．黒太線は地山特性曲線で，図-3 の黒太線と同じである．内空変位が増えるとともに，天端～真横の要素とも，内側から順番に応力が急激に低下しており，内側から外側に向かって要素が順番に降伏していることが分かる．真横の要素の応力（一点鎖線）の低下に対応する支保圧のピークが高くなっている．

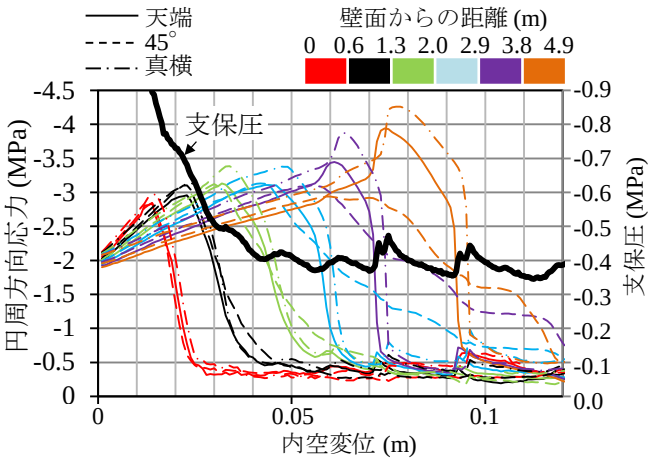

図-4 トンネル周辺要素の円周方向応力

図-5 に，岩盤のひずみの状況を確認するため，Case1 の支保圧がほぼ最小となる内空変位が 0.1m の時点と，急激に支保圧が大きくなった直後の 0.17m の時点における最大せん断ひずみの分布を示した．内空変位が 0.1m の時点ではせん断帯は発生しておらず，ひずみの大きな領域はトンネル近傍に限定されている．その後，支保圧が増加した時点では，せん断帯が側壁から上方に伸長している．

７．まとめ

本報告では，FDM により，応力再配分による一時的な支保圧の増加，その後の壁面変位による支保圧の低下，ゆるみ域の拡大に伴う緩やかな支保圧の増加を表すと推定できる結果が得られた．

このことから，地山特性曲線を FDM で計算できる可能性があると判断できる．今後の課題として，解析結果は要素の細かさによって影響を受けることが判明しているため，今後，要素分割数，ステップ数について，さらに詳細な検討を続ける予定である．

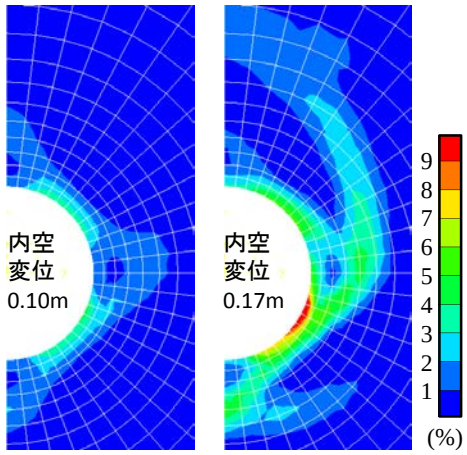

図-5 最大せん断ひずみの分布 (Case1)

参考文献

1) 土木学会トンネル工学委員会: トンネル標準示方書［山岳工法］・同解説，p.62. 2006.