

Hoek-Brown の破壊規準を用いた大土被りトンネルの挙動の評価

鹿島建設(株) 正会員 ○藤原浩一, 畝田篤志, 田部井和人, 宇津野衛, 岡崎勇樹

1. はじめに

大土被りの条件下でトンネルを掘削する場合, その挙動予測や支保設計ではトンネル周辺の岩盤が有する応力条件に応じた力学特性を考慮する必要がある。岩盤の力学特性の内, 拘束圧の影響を強く受けると考えられるものに, 「破壊規準」と「破壊後のひずみ軟化特性」がある。一般に, 岩盤の破壊包絡線はやや上に凸の非線形性を呈するため, 拘束圧に応じて破壊する強度が異なるとともに, 破壊後は拘束圧が小さくなるほど, 急激に強度が低下し, 強いひずみ軟化特性を示すことが知られている¹⁾。

そこで, 本稿では, 非線形の Hoek-Brown (以下, H-B) の破壊規準を用いてトンネルのシミュレーション解析を実施し, 線形の Mohr-Coulomb (以下, M-C) の破壊規準と比較することで, 大土被りの条件下で掘削されるトンネルの挙動について考察を試みたので, その結果を報告する。

2. シミュレーション解析に用いる破壊規準の設定

H-B の破壊規準は式(1)に示す数式によって表現され, 強度特性を規定する定数は, m_b , s , a , および一軸圧縮強さ σ_c である。本稿では, 日本鉱業会によって集積された泥岩の三軸圧縮試験データ²⁾を用い, 図-1 に示す破壊規準を設定した。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \{ m_b \cdot \sigma_3 / \sigma_c + s \}^a \quad (1)$$

また, この H-B の破壊規準に対し, 低拘束圧と高拘束圧のそれぞれの応力域にて線形近似した2つの M-C の破壊基準を設定し, これらを比較解析の対象とした。

3. 破壊規準の違いに着目したトンネル挙動の評価

解析にてモデル化するトンネル形状は図-2 の上半三芯円とし, 初期応力は土被り 1000m 相当の 25MPa とした。解析条件を表-1 に示す。また, 比較を簡単にするため, 解析では支保工を考慮しない素掘り掘削とした。解析結果を表-2 に示す。

低拘束圧の応力域で線形近似したケース 2(M-C)では, ケース 1(H-B)と比較して, スプリングライン (以下, SL) 近傍の破壊領域が 33%, 内空変位量が 19%低下する結果となった。これは, トンネル形状の影響から相対的に応力が集中しやすい SL 近傍にて岩盤の強度を過大に評価したことに起因する。次に, 高拘束圧の応力域で線形近似したケース 3(M-C)では, アーチ部やインバート部の破壊領域がケース 1(H-B)と比較して低下しており, 特にインバート部では 80%低下した。また, 変形量に関しても天端沈下で 13%, 内空変位で 27%低下する結果となった。これは, 低拘束圧の応力域における岩盤の強度を過大に評価したことに起因する現象であり, トンネル掘削時にはその周囲の岩盤は一軸圧縮状態に近づくため, 低拘束圧の応力域における強度の設定がトンネルの変形量や破壊領域に大きな影響を及ぼすことがわかる。トンネル周囲の岩盤はトンネル壁面からの距離に応じて拘束圧が異なる三軸状態となり, また形状の影響によっても拘束圧が変化する。そのため, 大土被りの条件下におけるトンネルの挙動をシミュレーションする場合, 線形の破壊規準ではどこかの領域で必ず岩盤の強度を過大に評価することとなり, またそれがトンネルの変形量や破壊領域に与える影響も大きい。したがって, Hoek-Brown のような非線形の破壊規準を用いることが必須と考える。

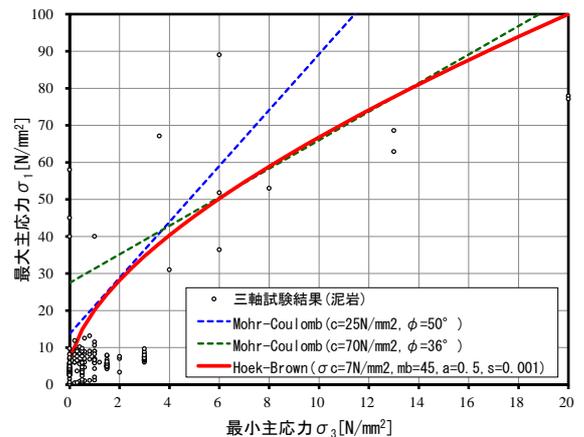


図-1 解析に用いる破壊規準

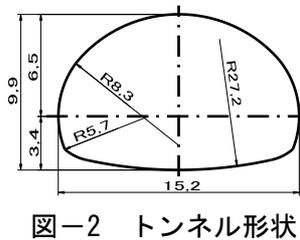


図-2 トンネル形状

表-1 解析条件

項目	物性値
初期応力	25 (MPa)
側圧係数	1.0
変形係数	735 (N/mm²)
ポアソン比	0.30
強度定数	図-1

キーワード 大土被り, Hoek-Brown, 破壊規準, 数値解析, 弾塑性, NATM

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株) 土木設計本部 Tel : 03-6229-6647

表-2 解析結果一覧

	ケース 1 (Hoek-Brown)	ケース 2 (M-C : c=25, φ=50)	ケース 3 (M-C : c=70, φ=36)																								
破壊領域図																											
および																											
変形量比率	<table border="1"> <tr><th>項目</th><th>比率</th></tr> <tr><td>天端沈下</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>内空変位</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>脚部沈下</td><td>1.00</td></tr> </table>	項目	比率	天端沈下	1.00	内空変位	1.00	脚部沈下	1.00	<table border="1"> <tr><th>項目</th><th>比率</th></tr> <tr><td>天端沈下</td><td>0.92</td></tr> <tr><td>内空変位</td><td>0.81</td></tr> <tr><td>脚部沈下</td><td>1.01</td></tr> </table>	項目	比率	天端沈下	0.92	内空変位	0.81	脚部沈下	1.01	<table border="1"> <tr><th>項目</th><th>比率</th></tr> <tr><td>天端沈下</td><td>0.87</td></tr> <tr><td>内空変位</td><td>0.73</td></tr> <tr><td>脚部沈下</td><td>1.23</td></tr> </table>	項目	比率	天端沈下	0.87	内空変位	0.73	脚部沈下	1.23
項目	比率																										
天端沈下	1.00																										
内空変位	1.00																										
脚部沈下	1.00																										
項目	比率																										
天端沈下	0.92																										
内空変位	0.81																										
脚部沈下	1.01																										
項目	比率																										
天端沈下	0.87																										
内空変位	0.73																										
脚部沈下	1.23																										
トンネル																											
壁面地山の																											
応力経路																											

4. 軟化特性の違いに着目したトンネル挙動の評価

拘束圧が小さくなるにつれて急激な強度低下を示す挙動を再現するためには、拘束圧が小さくなるにつれてピーク強度と残留強度の差が大きくなる破壊規準を設定する必要がある。そこで、前述のケース 1 に相当する強度定数を残留強度とし、図-3 に示す破壊規準を仮定した。また、図-4 は図-3 に示す破壊規準を用いて三軸圧縮試験のシミュレーションを行った結果であり、この図から拘束圧が小さくなるにつれて急激に強度低下を示す岩盤の特徴が表現されていることがわかる。

ひずみ軟化解析の結果を図-5 に示す。破壊領域は前述のケース 1 と比較して、天端部やインバート部では 33~80% 低下するが、SL 付近では同等の結果となった。これは、壁面地山の応力経路をみても明らかのように、相対的に曲率が小さく応力が集中しやすい SL 近傍において地山の応力が残留強度まで低下していることに起因する。ここで設定した破壊規準は仮定の条件であるため、数値の比較は意味をなさないが、破壊後のひずみ軟化特性を考慮することによって、相対的に応力が集中しやすい弱部の挙動を正確に評価できることがわかる。

5. おわりに

本稿では H-B と M-C を用いた比較解析を実施し、破壊規準の設定がトンネルの挙動に及ぼす影響を考察した。その結果、拘束圧によって異なる岩盤の強度特性がトンネルの変形量や破壊領域に大きく影響することが明らかとなり、特に大土被りの条件下では高い拘束圧の応力域までの強度特性を試験により把握し、それを考慮した非線形の破壊規準を適用する必要性が確認された。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：設計用地盤定数の決め方ー岩盤編ー，pp.41-47，2007年。
- 2) 日本鉱業会岩石試験データシート作成・利用研究委員会：岩石試験データシートの作成と利用の現況，日本鉱業会誌，102 1182，pp.507-552，1986年。

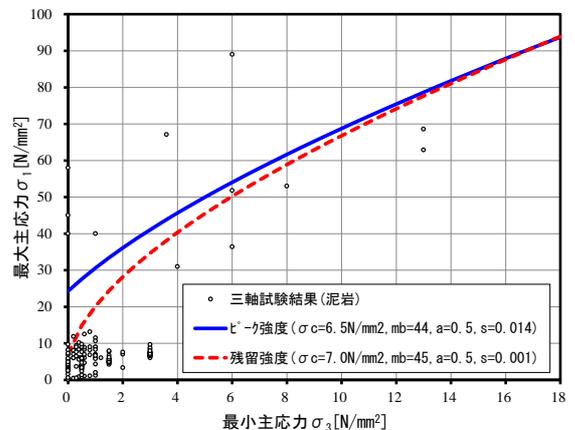


図-3 ピーク強度と残留強度

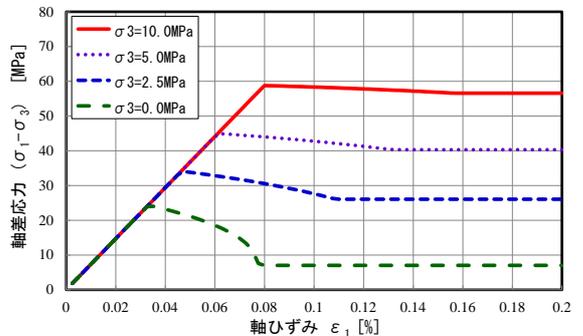


図-4 三軸シミュレーションの解析結果

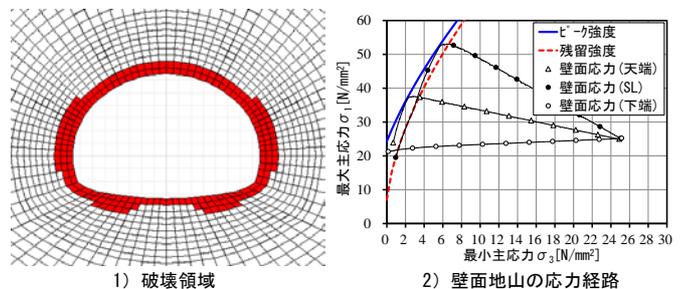


図-5 ひずみ軟化の解析結果