

破砕帯を有する岩盤内の RC 構造物の耐震性能評価に関する数値解析的検討

大成建設（株） 正会員 〇園部 秀明 正会員 村田 裕志 正会員 渡辺 和明
（一財）電力中央研究所 正会員 山野井 悠翔
東北電力（株） 熊田 広幸

1. はじめに

破砕帯（弱層）による局所的な変形の影響を受ける RC 構造物の耐震性能評価手法の構築に向けて、三次元非線形有限要素解析の適用性を検討している．本稿では、破砕帯に埋設されたトンネル模型の構造実験^{1),2)}を対象に、圧縮構成則の要素寸法依存性による影響を検討した．

2. 解析条件

対象実験は、岩盤に相当する RC ブロックの内部に直径 600mm、長さ 4000mm のトンネル模型を埋設し、交差角度や載荷方向、破砕帯幅をパラメータとして 4 ケース実施している^{1),2)}．本稿ではこれらを対象に非線形有限要素解析を実施した．図-1 に解析モデルの概観図を示す．載荷用鋼板等の実験装置を含めて試験体をモデル化している．トンネル模型、RC ブロックをそれぞれソリッド要素でモデル化し、トンネルーブロック間の界面と破砕帯をインターフェース要素で連結した．図-2 に破砕帯周辺の解析モデルを示す．鉄筋は離散鉄筋モデルとし、コンクリートと鉄筋の間には付着すべり関係を設定した．表-1 に入力物性値を示す．材料物性値には要素試験結果から得られた強度定数等を反映した．トンネルーブロック間の接触条件は、慣用的に圧縮力は伝達し、引張力をほぼ伝達しない（テンションカット）設定とした．

使用したコンクリートの非線形モデルを表-2 に示す．ひび割れモデルと応力-ひずみ関係は前川モデルを用いた．また、RC ブロックは弾性体とした．トンネルの要素長は 20mm～150mm とばら

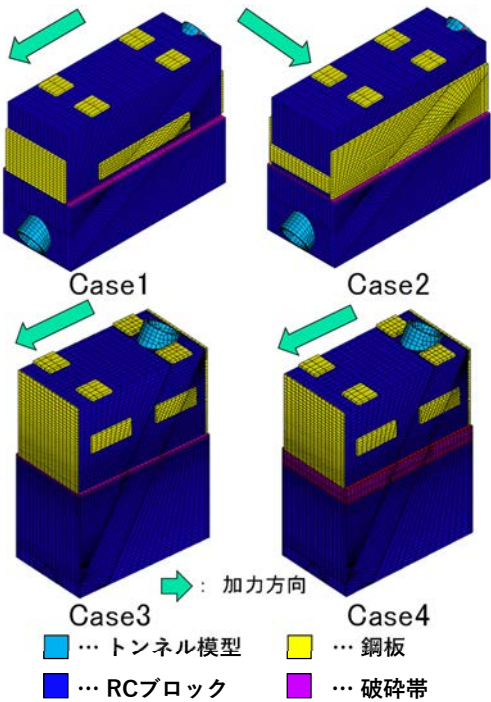


図-1 解析モデル（概観）

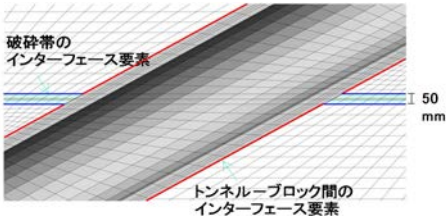


図-2 解析モデル（破砕帯周辺）

表-2 コンクリート非線形モデル

ひび割れモデル	圧縮、引張、せん断伝達	付着すべり
非直交6方向分散ひび割れ	前川モデル	Fib Model Code 2010

表-1 材料物性値

コンクリート，モルタル

	ヤング係数E (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量 (t/mm ³)	圧縮強度f _c (N/mm ²)	引張強度f _t (N/mm ²)	破壊エネルギーG _f (N/mm)
トンネル	1.59×10 ⁴	0.19	2.5×10 ⁻⁹	25.3	1.02	0.033
ブロック	2.05×10 ⁴	0.22	1.9×10 ⁻⁹	-	-	-

インターフェース(クーロン摩擦モデル)

	法線方向 剛性(N/mm ³)	せん断方向 剛性(N/mm ³)	粘着力c (N/mm ²)	引張強度f _t (N/mm ²)	摩擦係数
トンネルーブロック	2.00×10 ³	2.00×10 ²	1.42	0.1	0.84(40°)
破砕帯	2.00×10 ³	1.00×10 ³	0.1	0.1	0.3(17°)

鉄筋

	種別	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D6(主筋)	SD295	1.80×10 ⁵	323	506
D4(配力筋)	SD295	1.78×10 ⁵	369	520

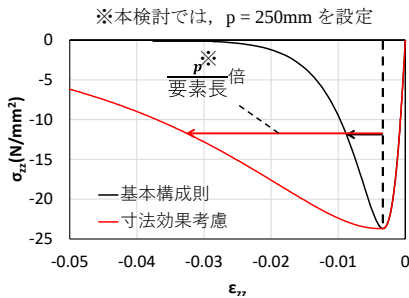


図-3 要素寸法依存性の影響を考慮した
圧縮軟化曲線モデル

キーワード 破砕帯，トンネル，コンクリート構成則，再現解析，耐震性能評価
連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設原子力本部 TEL 03-5381-5196

つきがあるが、圧縮・引張の各構成モデルでは要素寸法依存性を考慮した軟化特性を設定した。圧縮の骨格曲線は、図-3 に示すように、要素長に応じてポストピークカーブをスケーリングした圧縮軟化曲線モデルを用いた。使用した解析プログラムは汎用解析コード DIANA である。

これらのモデルでプッシュオーバーの三次元非線形解析を実施し、荷重－変位関係、破壊性状や損傷・破壊領域等の実験結果の再現性を確認した。

3. 解析結果

図-4 に載荷点荷重-変位関係、図-5 に荷重低下後のトンネル模型部の最小主ひずみ分布を示す。載荷点荷重-変位関係について、要素寸法依存性を考慮しない場合（黒線）は、最大荷重後の脆性的な荷重低下がみられ、最大荷重値や骨格曲線が実験と異なっている。一方で、非線形構成則の要素寸法依存性を考慮した場合（赤線）では、全体的に最大荷重値が向上し、実験の耐力に近いものとなった。

実験との差異について、以下考察する。最小主ひずみ分布から、各ケースとも破壊領域は破碎帯部に集中しており、実験の Case1 や Case3 で見られたような軸直交方向の損傷²⁾は再現できていない。Case1 と Case3 を比べると、トンネル－破碎帯の交差角度 30° の Case1 の方が扁平な要素となっており、Case1 の方がメッシュ分割の影響により実験の再現性が低いと考えられる。また、交差角度が小さいとトンネル－ブロック間でせん断力が支配的になると考えられるが、テンションカットとしているため、せん断力が伝達せず、Case1 では初期剛性が合わないと考えられる。Case2 は Case1 と同じ交差角度 30° だが、横ずれ方向の加力のため、メッシュ分割の影響を受けづらかったものと考えられる。Case4 については、実験と破壊モードが異なっており、破碎帯領域の下部が圧壊して滑るような挙動となっている。今後、界面モデルとメッシュ分割の改良をする必要があると考えられる。

4. まとめ

本稿では、トンネル模型の構造実験の再現解析を実施し、圧縮構成則の要素寸法依存性を考慮することにより、耐力の再現性が高まることを確認した。今後モデルの改良をし、より再現性を高める予定である。

謝辞

本研究は、電力 8 社と日本原子力発電（株）、電源開発（株）、日本原燃（株）が実施する研究の一環として実施した。関係各位に謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 坂下克之, 他: 破碎帯変位を受ける RC トンネル模型の構造実験－最大耐力について－, 土木学会第 78 回年次学術講演概要集, 2023. (投稿中)
- 2) 村田裕志, 他: 破碎帯変位を受ける RC トンネル模型の構造実験－破壊性状について－, 土木学会第 78 回年次学術講演概要集, 2023. (投稿中)

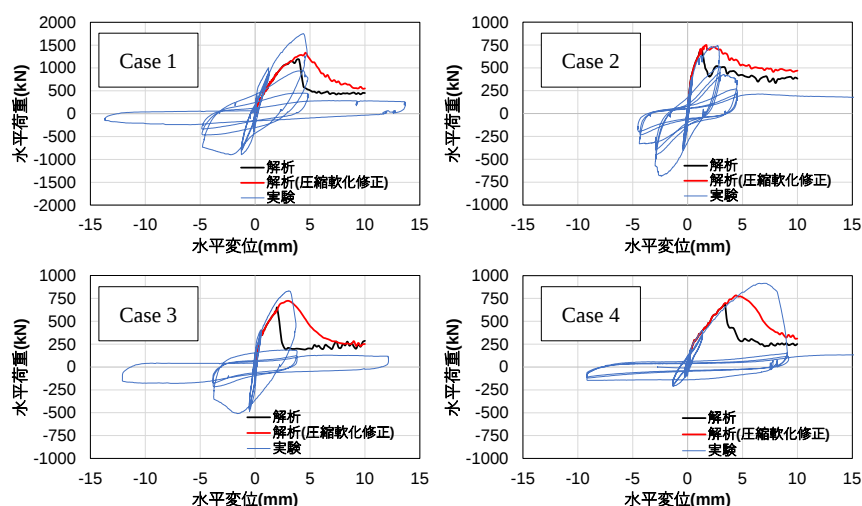


図-4 載荷点荷重-変位関係

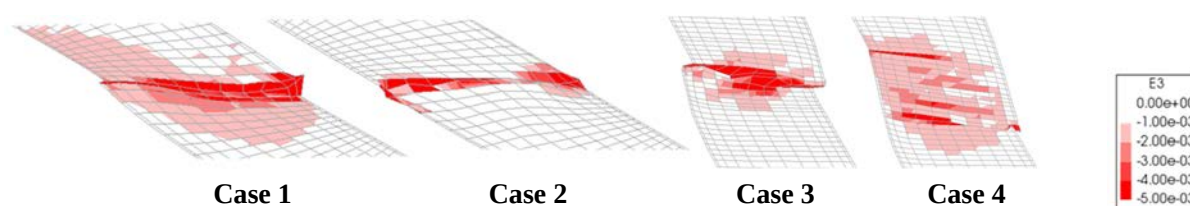


図-5 荷重低下後の最小主ひずみ分布（寸法効果考慮）