「鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査技術」に関する講習会
ー屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針への追補ー
2025年6月24日

照査例Ⅳ 破砕帯と交差するRC製トンネルの耐震性能照査例（技術資料XI 破砕帯と交差するRC製トンネルの実用的な非線形解析手法の検討）

小委員会幹事
三橋祐太（構造計画研究所）
永田聖二（電力中央研究所）

概要：破砕帯に埋設されたRC構造物の耐震性能評価

目的：破砕帯を考慮した場合のトンネルを照査を実施

破砕帯と交差するトンネル構造物を対象として，
地震動に起因する破砕帯の変位を受ける
トンネルの挙動を検討し照査例Ⅳとして整理（A，Bルート）
（作成過程の諸検討を技術資料XIとして整理）

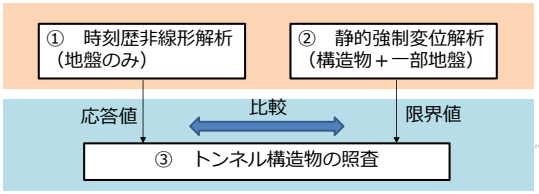


図 検討のおおまかな流れ

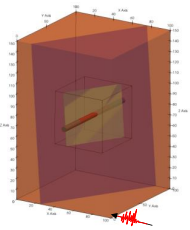


図 検討対象のイメージ

- ✓ 実務で使いやすいように，応答値と限界値を別個に評価
- ✓ 3次元的な幾何条件を考慮したモデルを設定
- ✓ 荷重-変位関係に加え，限界ずれ量評価式・損傷指標に基づく照査も実施

照査例Ⅳ

照査例目次（主要項目）

1．はじめに
2．性能設定
3．照査条件
4．解析方法
4.1 応答値の算出時
4.2 限界値の算出時
5．解析結果
5.1 応答値の評価
5.2 限界値の評価
6．照査
6.1 損傷状況の確認
6.2 破砕帯の相対変位（ずれ量）に基づく照査
（1）限界ずれ量評価式による照査
（2）プッシュオーバー解析による照査
6.3 構造物の損傷に基づく照査

前提条件:

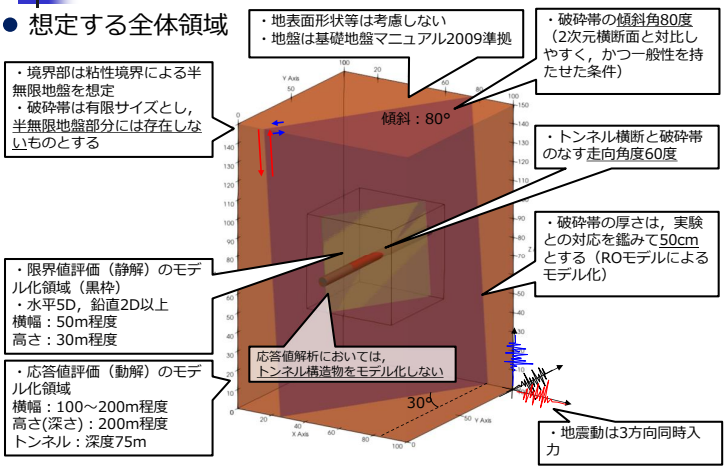
- **耐震性能のみに着目して照査を行う**
- **構造物が崩壊しないことを目標性能とする**
- **最大荷重点に至らないことをもって耐震性能を評価するただし，最大荷重点を超えたとしてもその後速やかに構造物が崩壊することは考えづらい**
- **破砕帯と交差しない地点における耐震性能は別途確認されていることとする**
- **特に，地盤のせん断変形による影響は十分小さいとし，破砕帯のずれのみをトンネルに作用させて検討する**

照査例Ⅳ

3． 照査条件

照査例Ⅳ

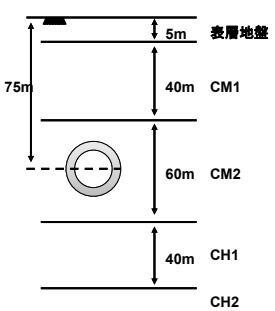
- 想定する全体領域



4.1 解析方法（応答値の算出時）

照査例Ⅳ

- **解析モデル**
  - 透過振動数：20Hz程度
  - 要素数：約37000／節点数：約40000
  - 側面・底面：粘性境界／地盤：ソリッド要素／ 破砕帯：ばね要素
  - R-Oモデルを用いた逐次非線形解析で破砕帯のずれ量を評価



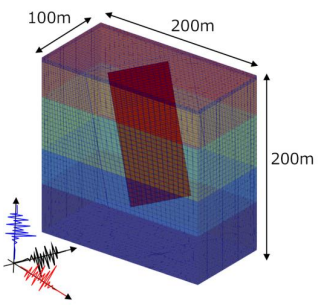
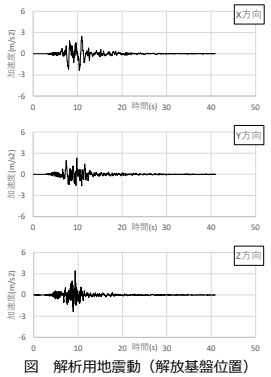


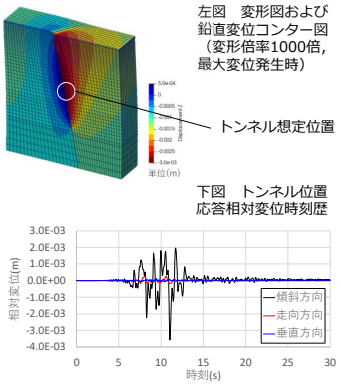
図 解析モデル(メッシュ表示)

5．1 解析結果（応答値の評価）

照査例Ⅳ

- 地震動3方向入力時の破砕帯トンネル位置の応答ずれ変位を算定
- トンネル位置における破砕帯の最大ずれ量は正方向（上盤側上昇）2.0mm，負方向（上盤側下降）約3.6mmとなった





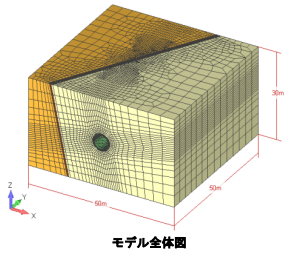
左図 変形図および鉛直変位コンター図（変形倍率1000倍，最大変位発生時）

下図 トンネル位置応答相対変位時刻歴

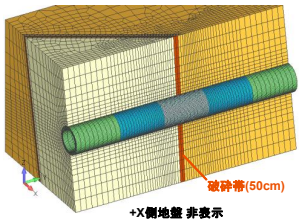
図 解析用地震動（解放基盤位置）

4．2　解析方法（限界値の算出時）

- 3次元静的材料非線形
- トンネルは1ブロックを長さ10mとし，5ブロックをモデル化．ブロック間は目地を配置
- トンネルの外径D＝6mに対して，水平方向に5D，鉛直方向に2D以上として，水平50m，鉛直30mをモデル化
- トンネルはひび割れの影響を考慮した非線形構成則に従うソリッド要素によりモデル化



モデル全体図



+X側地盤 非表示

部材厚 D（cm）	主筋配筋（周方向）	主筋鉄筋比（%）	配力筋配筋（軸方向）	配力筋鉄筋比（%）
60	D29@200	1.07	D16（円周方向 90 本）	0.35

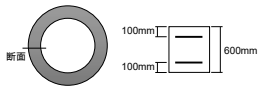
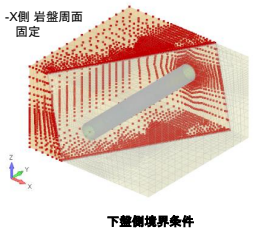


図　部材断面および断面諸元

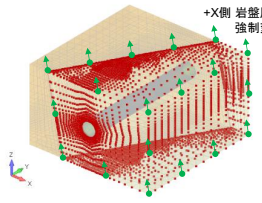
4．2　解析方法（限界値の算出時）

- 地盤・破砕帯・トンネル構造物をソリッド要素，構造物－地盤間・構造物－構造物間の接触面をジョイント要素によりモデル化



下盤側境界条件

- 下盤側の境界部の節点を固定し，上盤側の節点に強制変位を与える
- 強制変位の方向は，応答値の解析で変位が大きかった傾斜方向に設定
- 強制変位は正方向（上盤側上昇）と負方向（上盤側下降）の2パターンを設定
- 正方向載荷時はトンネルに圧縮の軸力がかかる
- 強制変位を漸増載荷することで，トンネルの最大荷重点を求める
- 入力した変位がトンネルに作用していることを，地盤の変位分布等で別途確認



上盤側境界条件

5．2　解析結果（限界値の評価）

- 正方向載荷時の解析結果
- 破砕帯に沿って損傷が発生
- ブロック間ですべり／剥離が発生
- 荷重－変位関係
  - 最大荷重時の強制変位量：10.1mm
- 荷重はジョイント要素に発生した応力を積分して算出

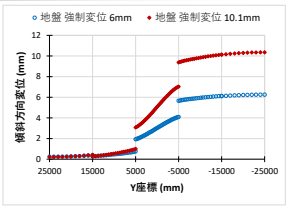


図　トンネル変位分布図

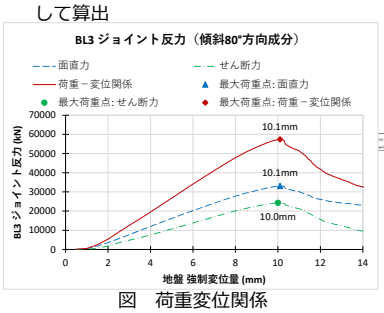
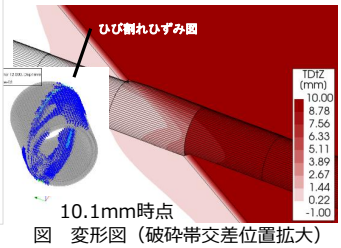


図　荷重変位関係



10.1mm時点
図　変形図（破砕帯交差位置拡大）

5．2　解析結果（限界値の評価）

- 損傷指標との比較
  - 最小主ひずみ：1%
    - 9.1mm（最大荷重の94%の時点）で限界値超過
  - 内面段差：0.5mm
    - 10.4mmで限界値超過
- 両者とも，荷重変位関係と良好に対応
- 負方向載荷時も同様の傾向（最大荷重点9.5mm）

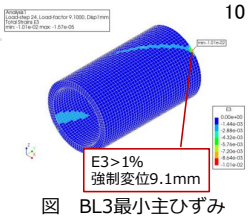


図　BL3最小主ひずみ（変位9.1mm）

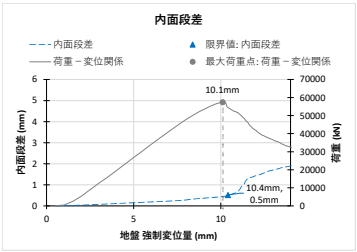


図　部材厚増分・内面段差－強制変位

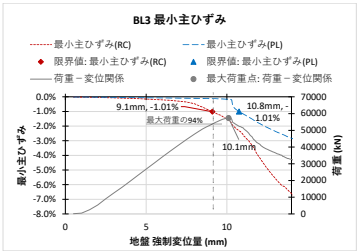


図　最小主ひずみ－強制変位

6．照査

- 破砕帯の応答・トンネル損傷状況の確認
  - 破砕帯の応答ずれ量は正方向2mm，負方向3.6mmと評価された
  - 破砕帯に沿ったずれ損傷であることを確認
- 限界ずれ量評価式による照査
  - 技術資料X　3章の限界ずれ量評価式より正方向10.0mm，負方向9.2mmの限界値を得た
  - 基本事項に記載の安全係数を考慮した上で目標性能を満足することを確認した
- プッシュオーバー解析による照査
  - 荷重変位関係より正方向10.1mm，負方向9.5mmの限界値を得た
  - 基本事項に記載の安全係数を考慮した上で目標性能を満足することを確認した
- 構造物の損傷に基づく照査
  - 最小主ひずみより正方向9.1mm，負方向9.7mmの限界値を得た
  - 基本事項に記載の安全係数を考慮した上で目標性能を満足することを確認した

表　限界ずれ量評価式による照査

		正方向 載荷	負方向 載荷
照査用応答値	最大ずれ量(mm)	2.0	3.6
	応答値係数	1.2	1.2
	照査用の最大ずれ量(mm)	2.4	4.4
照査用限界値	限界ずれ量(mm)	10.0	9.2
	限界値係数	2.0	2.0
	照査用の限界ずれ量	5.0	4.6
照査	構造物係数	1.0	1.0
	照査値	0.48	0.96
	安全性の判定	OK	OK

表　プッシュオーバー解析による照査

		正方向 載荷	負方向 載荷
照査用応答値	最大ずれ量(mm)	2.0	3.6
	応答値係数	1.2	1.2
	照査用の最大ずれ量(mm)	2.4	4.4
照査用限界値	限界ずれ量(mm)	10.1	9.5
	限界値係数	1.3	1.3
	照査用の限界ずれ量	7.7	7.3
照査	構造物係数	1.0	1.0
	照査値	0.32	0.61
	安全性の判定	OK	OK

表　構造物の損傷に基づく照査

		正方向 載荷	負方向 載荷
照査用応答値	最大ずれ量(mm)	2.0	3.6
	応答値係数	1.2	1.2
	照査用の最大ずれ量(mm)	2.4	4.4
照査用限界値	限界ずれ量最小値(mm)	9.1	9.7
	限界値係数	1.3	1.3
	照査用の限界ずれ量	7.0	7.4
照査	構造物係数	1.0	1.0
	照査値	0.35	0.60
	安全性の判定	OK	OK

まとめ

- 破砕帯を考慮した場合のトンネルの照査例を示した
  - ✓ 地震動に起因する破砕帯の変位を受けるトンネルを対象
  - ✓ 実務で使いやすいように，破砕帯の応答値とトンネルの限界値を別個に評価・比較することで照査を行う手法
- 破砕帯の応答値算出には3次元動的非線形解析を採用
  - ✓ トンネルをモデル化せず評価
- トンネルの限界値算出には3次元材料非線形解析を採用
  - ✓ トンネルおよび周辺地盤を比較的詳細にモデル化
  - ✓ プッシュオーバー解析により限界ずれ量を算出
  - ✓ 荷重-変位関係と各種損傷指標で概ね同等な結果
- 算出した破砕帯の応答ずれ量とトンネルの限界ずれ量を安全係数を考慮して比較することで照査を実施
  - ✓ 荷重-変位関係や限界ずれ量評価式，各種損傷指標で照査結果を整理