

技術資料IX 破砕帯と交差するRC製トンネル模型実験の数値シミュレーション

技術資料X 局所変形を受ける円形トンネルの限界状態

小委員会幹事
山野井悠翔（電力中央研究所）
渡辺和明（大成建設）

1

本資料で紹介する検討項目

技術資料IX

- 実験の再現解析による三次元材料非線形FEMの妥当性検証
 - ✓ COM3とDIANAの二つのコードで実験を精度よく再現できることを確認

技術資料X

- 各損傷評価指標およびその限界値の適用性
 - ✓ 限界状態をトンネルの耐力点に設定
 - ✓ 最小主ひずみ1%が耐力点に相当することを示した
- 各種要因がトンネルの破壊挙動に及ぼす影響評価
 - ✓ 分散鉄筋モデル(COM3)を用いて、荷重履歴や寸法などの影響を評価
 - ✓ 離散鉄筋モデル(DIANA)を用いて、鉄筋量や鉄筋間隔の影響を評価
 - ✓ 各種要因を考慮した限界ずれ量評価式を提案

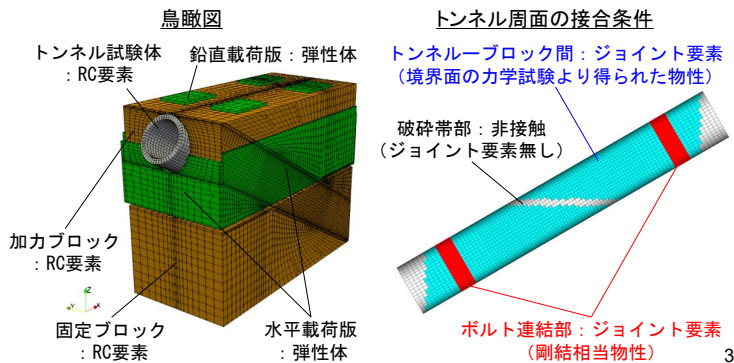
2

三次元FEMの妥当性検証

技術資料IX

◆ 解析モデル(図はCase 1, 2のモデル)

- ✓ トンネルとブロックを三次元(6節点)ソリッド要素でモデル化
- ✓ トンネルとブロック間には剥離と滑りを考慮できるジョイント要素を配置



3

使用した構成モデルの概要

技術資料IX

COM3とDIANAで共通

➤ RC要素

- ✓ コンクリートの構成モデル: 弾塑性破壊モデル(前川モデル)
- ✓ ひび割れのモデル化: 固定・分散ひび割れモデル
→ アクティブクラック法を適用し、6方向までのひび割れを考慮
- ✓ ひび割れ面でのせん断伝達モデル: 李・前川モデル

➤ ジョイント要素

- ✓ 接触・剥離モデル: 接触時は弾性モデル, 引張強度で剥離判定
- ✓ 滑りモデル: Mohr-Coulombの破壊基準に従う弾完全塑性モデル

COM3とDIANAで相違

➤ RC要素

- ✓ 鉄筋のモデル化: COM3→分散モデル, DIANA→離散モデル
※ 離散モデルの場合も、完全付着モデルを適用し、コンクリートと鉄筋の構成モデルで引張軟化・硬化を考慮(分散モデルに近い条件)

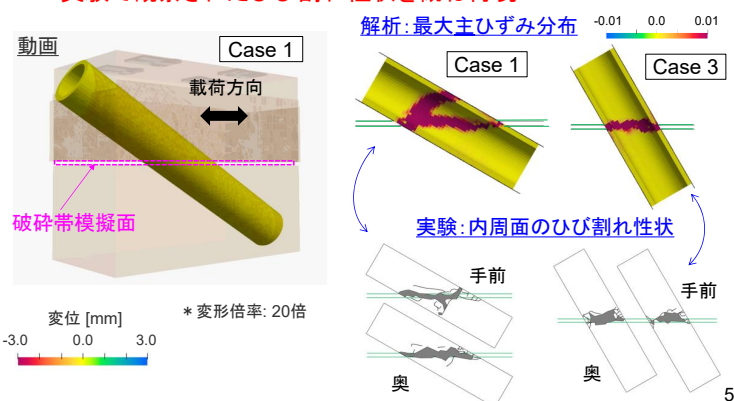
4

三次元FEMの妥当性検証

技術資料IX

◆ 再現解析結果(COM3)

- ✓ 実験で観察されたひび割れ性状を概ね再現



5

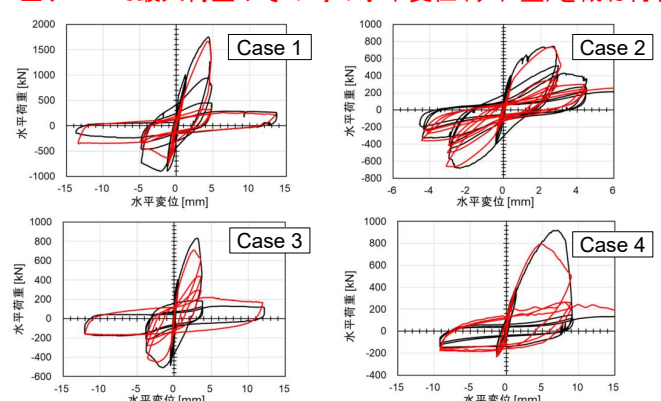
三次元FEMの妥当性検証

技術資料IX

◆ 荷重一変位関係の比較(COM3)

※ 黒: 実験, 赤: 解析

- ✓ 全ケースで最大荷重やその時の水平変位(ずれ量)を概ね再現

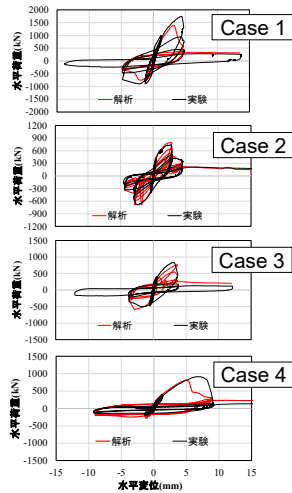
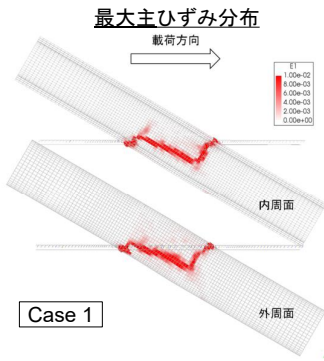


6

三次元FEMの妥当性検証

◆再現解析結果 (DIANA)

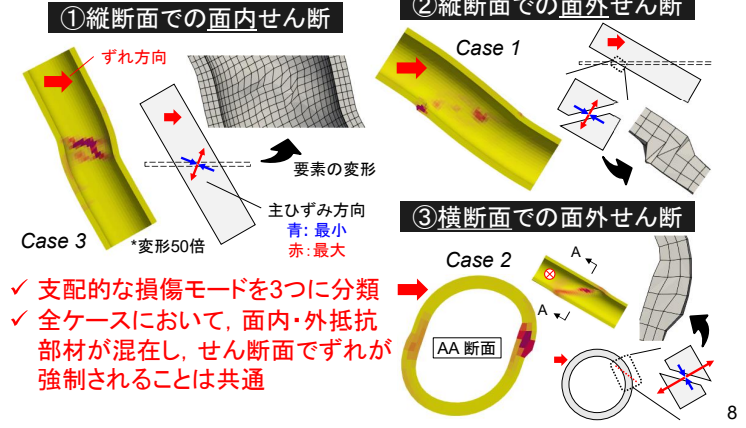
- ✓ 損傷経路や荷重-変位関係を概ね
妥当に再現できることを確認



7

トンネルの損傷モードの整理

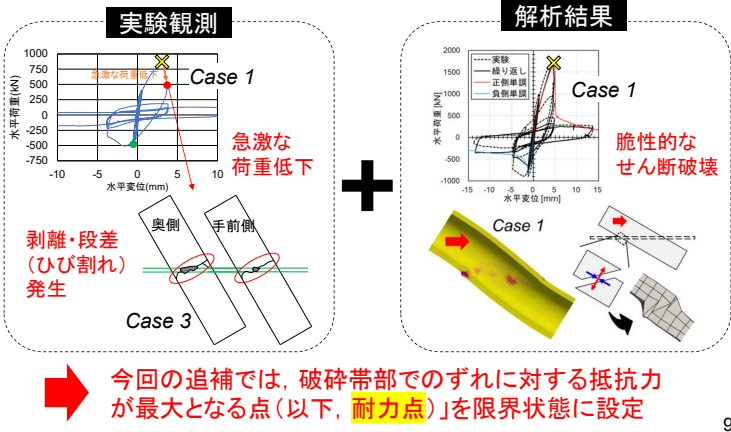
◆変形図による損傷モードの分析



8

局所変形を受けるトンネルの限界状態

◆限界状態の設定

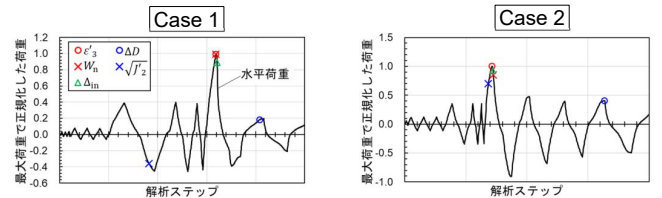


9

損傷評価指標の適用性

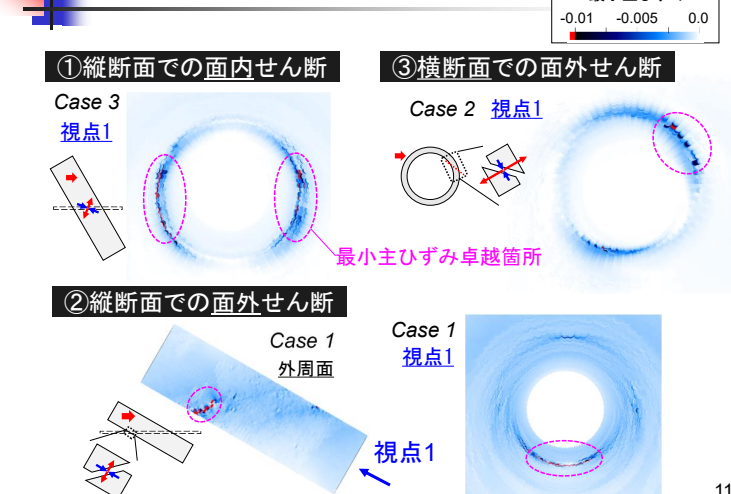
◆各指標の限界値到達点

- ✓ マニュアルで提示されている指標:
最小主ひずみ ($\varepsilon'_{3,lim} = -0.01$), 部材厚増分 ($\Delta D_{lim} = 5.0 \text{ mm}$)
- ✓ その他の指標:
正規化累加ひずみエネルギー ($W_{n,lim} = 0.0015$), ⇒コンシ参照
偏差ひずみ第二不変量 ($\sqrt{J'_2}_{lim} = 0.001$), ※半径150 mmの球の
領域内で平均化処理
内面段差 ($\Delta_{in,lim} = 0.5 \text{ mm}$) ⇒実験で計測された指標
- ➡最小主ひずみ-0.01 (-1%)で耐力点を評価可能
※その他では W_n や内面段差も耐力点に相当した



10

最大荷重時の最小主ひずみ分布

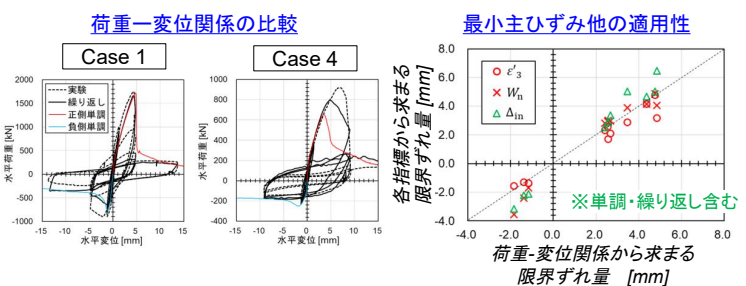


11

各種要因の影響評価(載荷履歴)

◆単調載荷と繰り返し載荷の比較

- ✓ 単調載荷時の最大荷重やその時のずれ量(限界ずれ量)は、繰り返し載荷時
と同等か、場合によっては小さくなる
- ➡プッシュオーバー解析で安全側に評価可能
最小主ひずみの適用性は繰り返しと同様に◎



12

各種要因の影響評価(寸法)

◆寸法効果

- ✓ 実験モデルを10倍(外径6 m)とした場合でも、最小主ひずみと耐力点との相関性は高い

➡ 要素寸法300 mm程度までは-0.01の限界値でOK
より大きい要素寸法に対し、寸法依存の限界値を提案

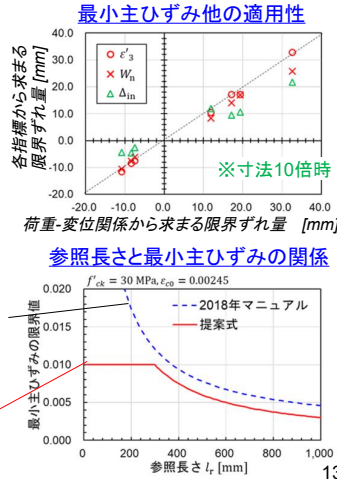
[2018マニュアル]

最小主ひずみの限界値評価式

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} + \frac{2G_{fc}}{l_r f'_{ck}} \frac{f'_{ck}}{E_{co}}, \quad G_{fc} = 8.8 \sqrt{f'_{ck}}$$

本技術資料での提案式

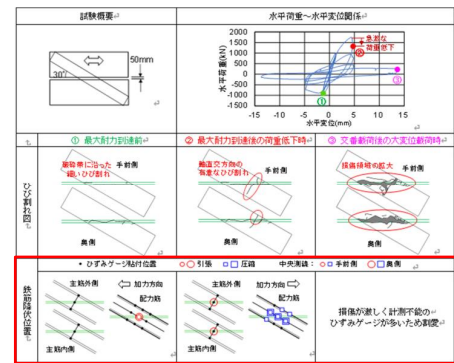
$$\varepsilon'_{3,lim} = \begin{cases} 0.01, & l_r < 300 \\ \frac{3.0}{l_r}, & l_r \geq 300 \end{cases}$$



各種要因の影響評価(鉄筋量・鉄筋配置)

実験より鉄筋に有意なひずみが発生、最大荷重等への鉄筋の寄与を確認

➡ 鉄筋量や鉄筋配置の破壊挙動等に及ぼす影響評価が必要



実験結果の例(荷重～変位関係の推移、ひび割れや鉄筋降伏状況; Case1)

14

各種要因の影響評価(鉄筋量・鉄筋配置)

実規模のトンネルに対して、鉄筋量・鉄筋配置をパラメータとした比較解析を実施(解析コード: DIANA)

解析ケース	主鉄筋	配力鉄筋	備考
Case A	D29@200 鉄筋比:1.1%	D16 (周85本) 鉄筋比:0.33%	基準ケース
Case A'	D35@300 鉄筋比:1.1%	D19 (周60本) 鉄筋比:0.33%	許容鉄筋間隔: 300mm
Case B-1	D29@1000 鉄筋比:0.20%	D16 (周17本) 鉄筋比:0.066%	鉄筋間隔: 大
Case B-2	D64@1000 鉄筋比:1.1%	D35 (周17本) 鉄筋比:0.33%	鉄筋間隔、鉄筋径: 大
Case C-1	D29@200 鉄筋比:1.1%	D16 (周17本) 鉄筋比:0.066%	鉄筋間隔: 配力鉄筋のみ大
Case C-2	D29@200 鉄筋比:1.1%	D35 (周17本) 鉄筋比:0.33%	鉄筋間隔、鉄筋径: 配力鉄筋のみ大
Case D-1	D29@1000 鉄筋比:0.20%	D16 (周85本) 鉄筋比:0.33%	鉄筋間隔: 主鉄筋のみ大
Case D-2	D64@1000 鉄筋比:1.1%	D16 (周85本) 鉄筋比:0.33%	鉄筋間隔、鉄筋径: 主鉄筋のみ大

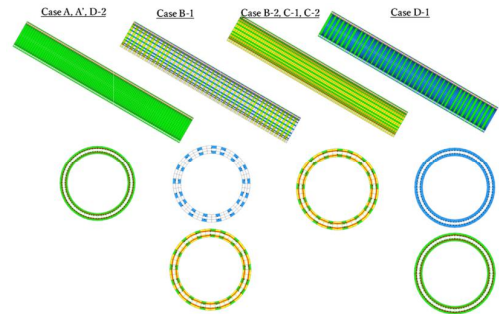
赤字ケース: コンクリート標準示方書に基づいた配筋ケース

青字ケース: 極端な配筋ケース

15

各種要因の影響評価(鉄筋量・鉄筋配置)

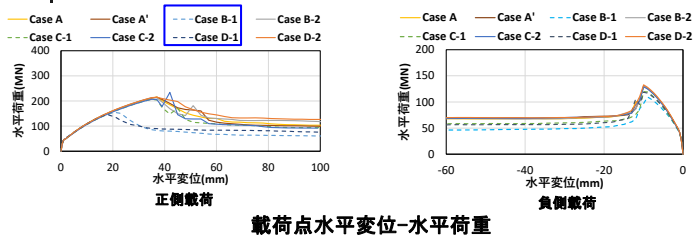
鉄筋量、鉄筋間隔に応じたコンクリートの付着領域を設定(RC非線形構成則のパラメータを付着領域に応じて変更)



要素	引張硬化パラメータ	せん断硬化パラメータ	せん断硬化開始ひずみ	備考
緑	0.4(軸方向), 0.4(円周方向)	0.4	4000μ	主筋、配力筋含む
黄	G算定(軸方向), 0.4(円周方向)	0.4	4000μ	主筋のみ
青	0.4(軸方向), G算定(円周方向)	2.0	400μ	配力筋のみ
白	G算定(軸方向), G算定(円周方向)	2.0	400μ	PLゾーン

16

各種要因の影響評価(鉄筋量・鉄筋配置)



- ✓ コンクリート標準示方書に準拠した配筋配置間隔300mm以下の場合、解析結果に大きな影響なし

- ✓ 正側の載荷では、主筋間隔が1,000mmと大きく、なおかつ鉄筋径も小さいケース(青囲み線)で、最大荷重が約7割低下、その時のずれ変位が約6割減少

17

各種要因の影響評価(鉄筋量・鉄筋配置)

【正側載荷】

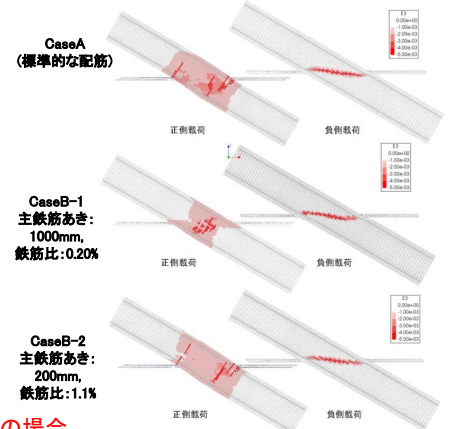
- ✓ Case B-1; 破砕帯部の鉄筋間で帯状に壊れ、無筋領域に主ひずみが集中

- ✓ Case AとCase B-2; 実験と同様で、破砕帯とトンネルの交差する部分から損傷が派生

【負側載荷】

- ✓ 損傷個所に差異は見られない

➡ 極端な鉄筋量、鉄筋配置の場合
最大荷重や破壊状況に影響有



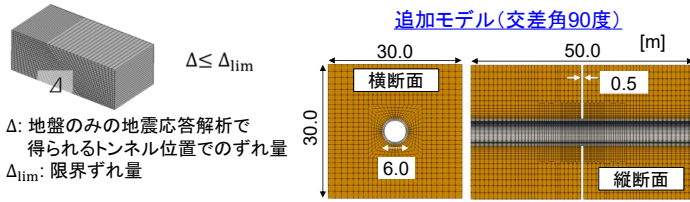
最大荷重低下後の最小主ひずみ分布

18

限界ずれ量評価式の提案

◆ 検討概要

- 簡易評価手法としての限界ずれ量評価式を提案
- 材料物性や境界条件を統一させた条件下で体系的なパラスタを実施
- 実験の解析モデルに加え、交差角90度のモデルも追加



◆ 着目要因

- ✓ トンネルの外径・部材厚、破砕帯の交差角度・ずれ方向・幅
- ✓ 岩盤の剛性・ポアソン比、トンネル-岩盤間の境界面強度
- ✓ 鉄筋量・鉄筋間隔

19

限界ずれ量評価式の提案

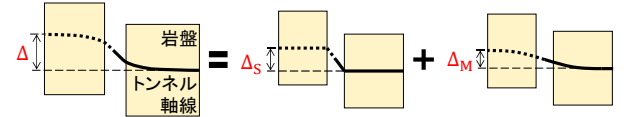
◆ 限界ずれ量評価式

$$\Delta_{lim} = \Delta_{lim,S} + \Delta_{lim,M} = (1 + a_M \zeta) \Delta_{lim,S} \text{ [mm]}$$

$$\Delta_{lim,S} = a_S \cdot \beta_\alpha \cdot \beta_W \cdot \beta_S \cdot \beta_P \times D \text{ [mm]}$$

- a_S, a_M : 定数, D : トンネル外径 [m]
- β_α : 方向の係数(ずれ方向の係数 β_ϕ と交差角度の係数 β_γ の乗)
- β_W : 破砕帯幅の係数, β_S : トンネルと岩盤間の境界面に関する係数
- β_P : 鉄筋に関する係数, ζ : 限界ずれ量の曲げ成分に関する指標

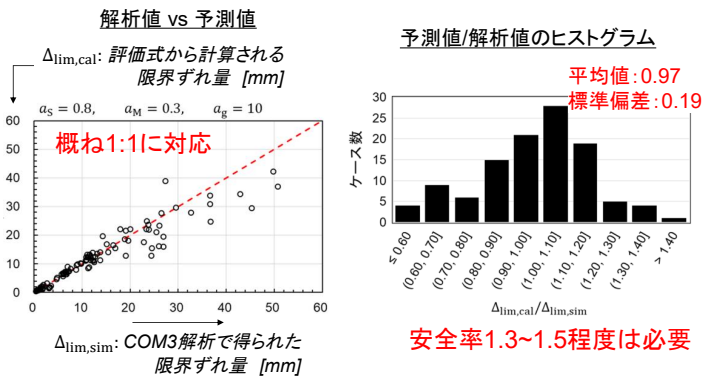
- ✓ 岩盤に生じるずれ量が、トンネルの破砕帯間でのせん断変形量と岩盤内での曲げ変形量に分配されると仮定
 → 杭頭変位の算出式を参考に定式化



20

限界ずれ量評価式の提案

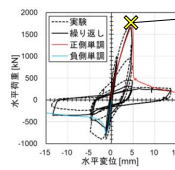
◆ 限界ずれ量の解析値と予測値の比較



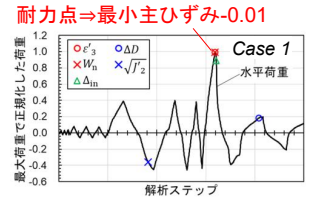
21

まとめ

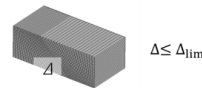
損傷評価と限界状態の設定



評価指標と限界値の設定



限界ずれ量評価式の提案



限界ずれ量評価式

$$\Delta_{lim} = \Delta_{lim,S} + \Delta_{lim,M} = (1 + a_M \zeta) \Delta_{lim,S} \text{ [mm]}$$

$$\Delta_{lim,S} = a_S \cdot \beta_\alpha \cdot \beta_W \cdot \beta_S \cdot \beta_P \times D \text{ [mm]}$$

局所変形を受ける円形トンネルの限界状態評価手法として、材料非線形FEMまたは評価式による手法を示した

22

ご清聴ありがとうございました