

非線形 FEM 解析を用いた地震時の損傷評価における载荷方法に関する一検討

北武コンサルタント株式会社	正会員	○坂口 淳一
東京地下鉄株式会社	正会員	新井 泰
メトロ開発株式会社	正会員	田中 篤史
	正会員	水上 博之
北武コンサルタント株式会社	正会員	渡辺 忠朋

1. はじめに

非線形 FEM 解析は、曲げやせん断を問わず、コンクリートのひび割れや圧縮損傷、鉄筋の降伏等の材料損傷や、部材の破壊による影響を逐次考慮しながら、構造物の応答を評価することが可能であり、鉄筋コンクリート構造物の性能照査への活用が進められている¹⁾。

従来の骨組解析モデルを用いて、地震時に対する損傷の評価を静的解析により評価を行う場合には、一般に、構造系全体が終局状態に至るまで一方向に地震作用を漸増载荷させるプッシュオーバー解析が行われる。この場合、部材の非線形挙動を表現する骨格モデルに、3 サイクルの静的交番载荷試験結果等に基づいて定式化されたモデル²⁾が用いられることで、地震動の交番作用がもたらす軸方向鉄筋の座屈やひび割れの開口による部材の耐力低下の影響を考慮して、一方向の载荷の解析で、交番载荷による損傷を評価している。

一方、非線形 FEM 解析モデルを用いる場合には、一方向の単調増加による载荷とすると、各構成材料の応力履歴も一方向のみとなり、地震動による交番载荷の影響が考慮されないこととなる。したがって、非線形 FEM 解析モデルによる静的解析により地震時の損傷状況の評価するには、交番载荷による解析を行うことで、地震動により交番の作用を受ける影響を構成材料の履歴により直接的に考慮する必要がある。

そこで本検討では、1 層 2 径間の鉄道開削トンネルを対象に、非線形 FEM 解析モデルを用いて交番载荷により損傷状況の進展を把握するとともに、地盤-構造物の連成モデルによる動的解析から得られる損傷状況と概ね同等となる交番载荷の回数について検討する。

2. 解析モデル

応答変位法による交番载荷に用いる 1 層 2 径間の開削トンネルの解析モデル図（分離型モデルと呼ぶ）を

図-1 に、地盤-構造物の連成モデルによる動的解析に用いる解析モデル（一体型モデルと呼ぶ）を図-2 に示す。図-1 の分離型モデルにおいては、地盤と開削トンネルを分離してモデル化し、図-2 に示す地盤部分を取り出したモデルにより別途算定された L2 地震動スペクトル II（G1 地盤）の地震波に対する地盤の応答値を地震時作用として与える。なお、函体部分は、コンクリート標準示方書〔設計編〕²⁾に準拠した材料構成則による要素を用いてモデル化し、その周面を、線形的地盤パネにより支持する。一方、図-2 の一体型モデルにおいては、函体部分を分離型モデルと同じものとし、周辺地盤を地盤要素によりモデル化する。死荷重や常時土圧等の初期荷重を载荷した後に、先の地震波を基盤面波形として入力する。

なお、開削トンネルの材料や配筋条件、周辺地盤の地盤条件については紙面の都合上、割愛する。

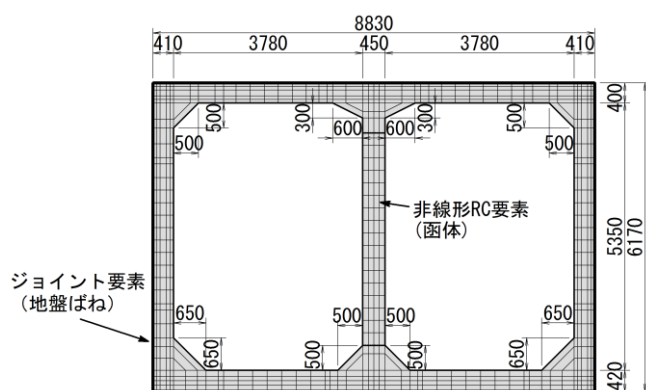


図-1 解析モデル（分離型モデル）

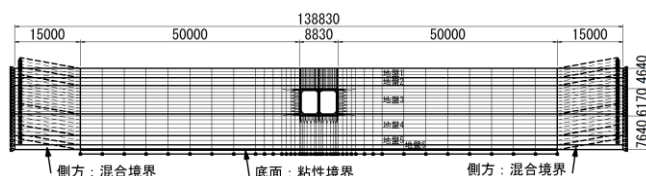


図-2 解析モデル（地盤-構造物の一体型モデル）

キーワード 非線形 FEM 解析, 開削トンネル, 応答変位法, 地震時損傷評価

連絡先 〒062-0020 北海道札幌市豊平区月寒中央通 7 丁目 4-7 北武コンサルタント(株) TEL 011-851-3181

表一 部材の損傷レベルと限界状態の巨視的な関係
(例：曲げによる損傷)

損傷 レベル	限界状態（限界となる損傷状況）	
	骨組解析 モデル	有限要素解析モデル
損傷 レベル 1	部材角 θ_y	引張損傷指標 $\sqrt{J_2}=0.001$ (コンクリートのひび割れ損傷), 軸方向鉄筋の降伏
損傷 レベル 2	部材角 θ_m	圧縮損傷指標 $\overline{W}_n=0.0015$ (かぶりコンクリートの圧縮破壊), 軸方向鉄筋の座屈
損傷 レベル 3	部材角 θ_n	コアコンクリートの圧縮損傷指標 $\overline{W}_{n,core}=0.0015$ (コアコンクリートの圧縮破壊), 軸方向変形の顕著な増大
損傷 レベル 4	部材角 θ_u	—

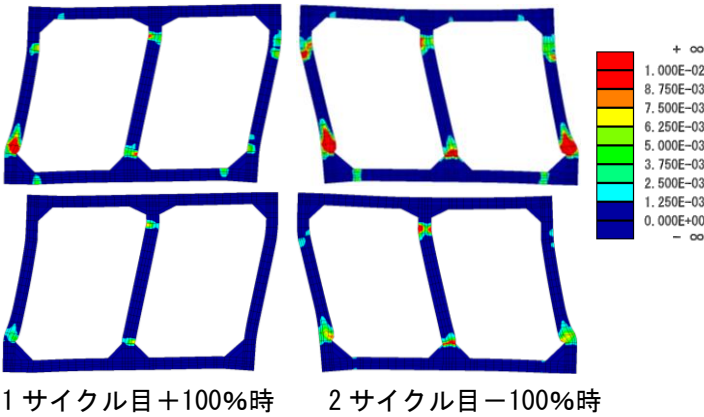


図-3 交番载荷による変形状況 (倍率 10 倍) と損傷指標
(上段：引張損傷指標 $\sqrt{J_2}$, 下段：圧縮損傷指標 $\overline{W}_n$)

3. 損傷レベルの判定方法

以下のとおりに定義される部材の損傷レベル 1~4 に対して、非線形 FEM 解析による応答に基づき、表一のように判定するものとして解析結果を評価する。

- 損傷レベル 1：無損傷
- 損傷レベル 2：場合によっては補修が必要な損傷
- 損傷レベル 3：補修が必要な損傷
- 損傷レベル 4：補修が必要な損傷で、場合によっては部材の取替えが必要な損傷

判定に用いる材料指標は、コンクリート標準示方書 [設計編] 2) に照査指標として記載されている、偏差ひずみ第 2 不変量 $\sqrt{J_2}$ (以下、引張損傷指標) と正規化累加ひずみエネルギー $\overline{W}_n$ (以下、圧縮損傷指標) である。

4. 解析結果と部材の損傷レベルの判定結果

解析から得られた応答値の例として、図-3 に、分離モデルによる交番载荷の 1 サイクル目+100%時と 2 サイクル目-100%時の変形状況と損傷指標のコンター図を示す。解析から得られた応答と、3. に示した部材の損傷レベルの判定方法に従い判定した

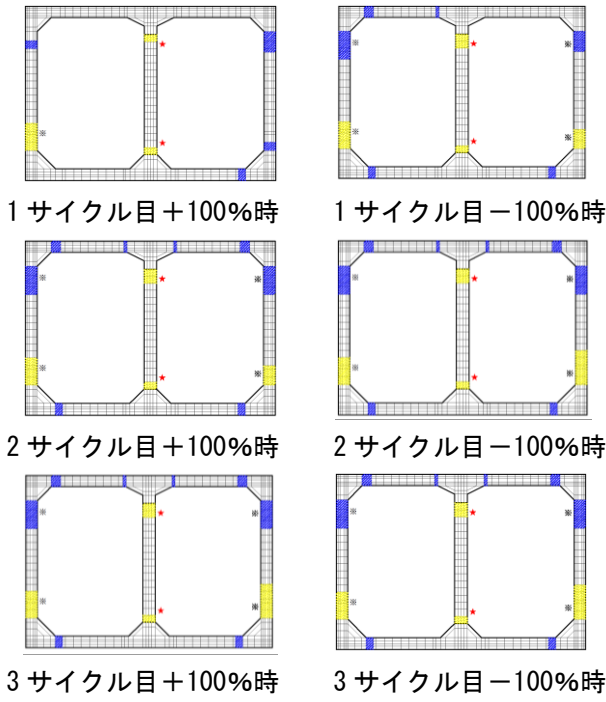


図-4 損傷レベル (分離モデルによる交番载荷)

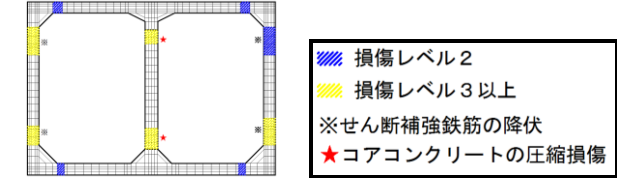


図-5 損傷レベル (連成モデルによる動的解析)

損傷レベルの判定結果を、交番载荷の各ピーク時について図-4 に、動的解析終了時について図-5 に示す。

5. 検討結果

本検討では、L2 スペクトル II 地震動を対象に、地盤一構造物の連成モデルによる動的解析から得られる損傷状況と概ね同等となる分離モデルによる交番载荷の回数について、1 層 2 径間の構造物を対象に比較した。

その結果、プッシュオーバー解析による単調増加に相当する 1 サイクル目の+100%時は、損傷状態を過少に評価することとなった。本検討の比較の範囲内においては、動的解析による各部材部位の損傷と概ね同様の損傷状態に至るには、2 サイクル以上の交番载荷が必要と考えられる。

参考文献

1) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準], 10 編 非線形有限要素解析による性能照査, pp. 467-525, 2017. 3.
2) 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.31-45, 2001.