

## Pushover 解析に基づく高精度な地震後の耐荷性能評価

(株)地震工学研究開発センター 正会員○馬越一也, 吉野廣一  
九州産業大学 正会員 奥村徹, 名古屋工業大学 正会員 野中哲也

### 1. はじめに

既設の上路式鋼アーチ橋の耐震補強設計においては現行の設計地震動<sup>1)</sup>に対して構造系を無損傷に留めることが困難な場合が多く, 主構造の損傷を極力抑えるように地震時エネルギー吸収を期待して座屈拘束ブレース(BRB)のような2次部材を制震構造として利用する対策が取られている. そのような中, 上路式アーチ橋などの構造全体系の幾何学的非線形性による座屈の影響が大きいと考えられる構造物では, 各部材の安全性が確保されても構造全体の座屈安定性の喪失で安全限界を超える場合があるため, 2018年に制定された鋼・合成構造標準示方書耐震設計編<sup>2)</sup>では構造安全性の照査として部材の安全性に加え, 構造全体の安全性の照査を明確化し, シェル要素を用いた橋梁全体系モデルの解析により照査する方法が提示された. 著者らは, 橋梁全体系モデルを用いて構造全体の安全性照査手法の具体的手順を示す<sup>3)</sup>とともに, 実用上の課題と考えられるモデル構築に要する労力や計算時間を軽減するためのプログラム開発<sup>4)</sup>も進めてきた.

他方で, 地震による損傷で残留変形した橋脚の地震後の使用性については, 一般的には地震応答解析によって得られた最大塑性率から算出される残留変位<sup>1)</sup>によって照査されている. しかしながら, 現行の方法だと鋼アーチ橋のような高次の不静定構造に対して構造全体としての地震後の使用性は評価できず, 直接的に残留変位を算定しようとしても非線形要素や履歴則の依存度が高く, 定量的に判断するのは困難であると考えられる. そこで本稿ではこれまでの構造全体の安全性の照査を参考に, 詳細なシェル要素を用いた大規模モデルを用いて, 地震後に残存する耐荷性能を定量的に評価する手法の検討を行った.

### 2. 対象橋梁と解析モデル

本研究で用いた対象橋梁<sup>5)</sup>は上路式鋼アーチ橋(橋長: 191.8 m, アーチ支間  $L$ : 134 m, ライズ  $f$ : 26.0 m)である. 兵庫県南部地震以前の昭和55年度版の道路橋

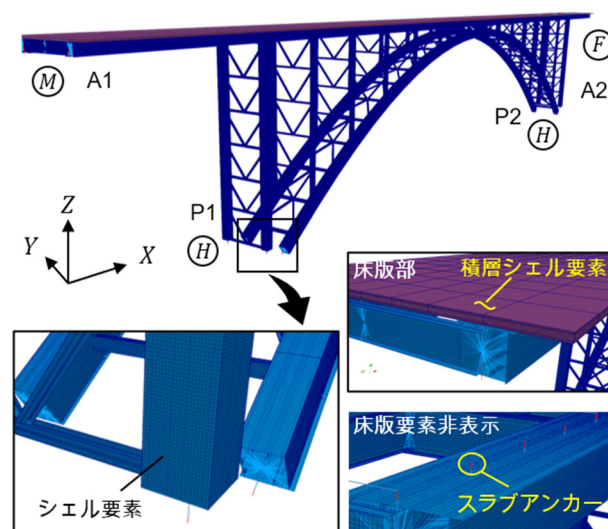


図-1 解析モデル

示方書に基づき震度法による設計が行われている.

この橋梁の鋼部材に対して前述の自動構築プログラム<sup>4)</sup>を用いて図-1に示すように鋼部材すべてを弾塑性シェル要素でモデル化したアーチ橋全体系モデル(以下, フルシェルモデル)を構築した. 初期不整については残留応力が自動で導入される. 鋼材の材料非線形性は二次勾配が  $E/100$  のバイリニアモデルを用いた. 支点条件は支承位置の線形ばね要素で与える.

床版についてはコンクリート層と鉄筋層からなる積層タイプの弾塑性シェル要素とした. 各層にコンクリートと鉄筋の材料構成則を設定することで床版のひび割れや鉄筋降伏特性を評価している. コンクリートは設計基準強度  $\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$  (床版厚 230 mm), 鉄筋はSD295A (直径  $\phi = 19 \text{ mm}$ ) で構成されており, 材料構成則にはそれぞれ拡張 Drucker Prager<sup>6)</sup>と完全弾塑性バイリニアモデルを用いた. 床版と補剛桁を結合するスラブアンカーは, 実験から推定された抵抗( $K = 622 \text{ kN/mm/本}$ )を有する線形ばねモデル<sup>7)</sup>とした.

### 3. 地震後の耐荷性能評価手法

図-2に時刻歴応答解析から得られたある点の時刻歴変位と着目時刻, 図-3に耐荷性能評価の概念図を示す. まず, フルシェルモデルを用いた地震応答解析を実施し, 入力地震動により構造全体系が安全限界に近付い

キーワード 上路式鋼アーチ橋, 地震応答解析, Pushover 解析, 地震後の耐荷性能

連絡先 〒810-0003 福岡県福岡市中央区春吉 3-21-19 株式会社 地震工学研究開発センター TEL 092-791-2739

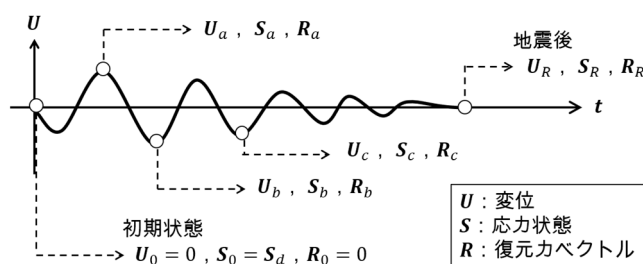


図-2 地震応答解析における着目時刻の一例

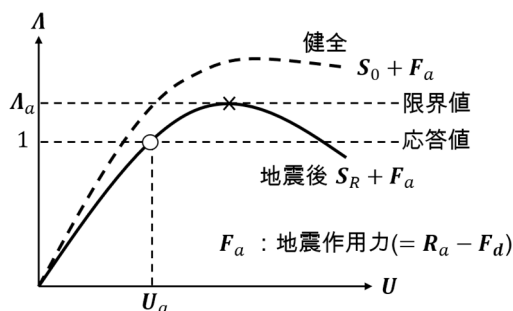
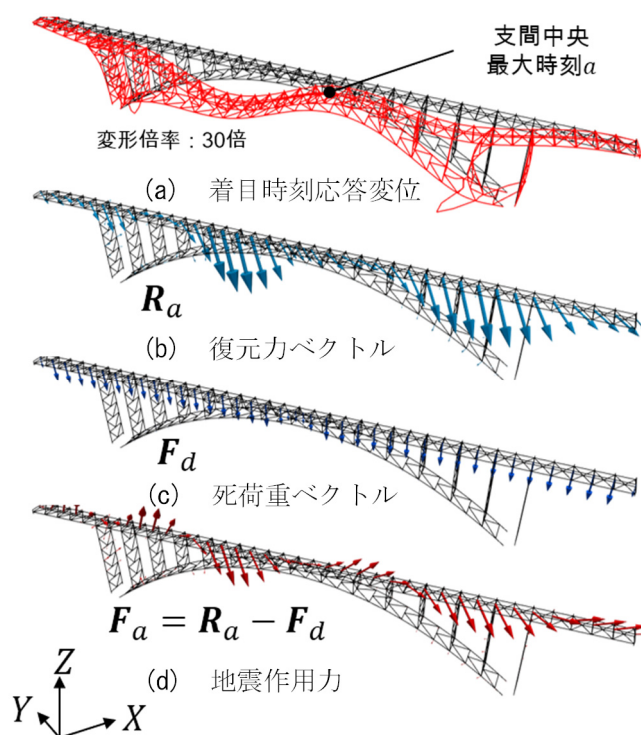


図-3 耐荷性能評価の概念図

たとえられる時刻（ここでは一例として、直下型地震を入力した際の桁中央部の橋軸直角方向の変位が最大となった時刻  $a$  に着目）における地震作用力  $F_a (= R_a - F_d)$  を保存する。  $R_a$  は着目時刻  $a$  での構造全体系の復元力ベクトル、  $F_d$  は死荷重ベクトルであり、具体を図示すると図-4 のようになる。詳細については奥村ら<sup>4)</sup>を参照されたい。この復元力ベクトル  $R_a$  は工学的な判断に基づき、必要に応じて複数の着目時刻（例えば、図-2 内  $b, c$  のように）について検討することが望ましい。

地震作用力  $F_a$  を基準化したモードベクトルを荷重ベクトルとし、荷重倍率  $\lambda$  を漸増する Pushover 解析を行う。ここで、Pushover 解析の初期応力状態に、地震応答解析の最終時刻の応力状態  $S_R$ ，すなわち地震により損傷した構造系の死荷重作用下での静的つり合い状態を用いることで、地震による損傷を受けた後の構造を対象に耐荷力を算定することになる。Pushover 解析で得られた荷重倍率  $\lambda$  - 変位  $U$  曲線は図-3 のようになり、限界値（最大荷重）と応答値（地震時）から、残存する耐荷力を確認し、地震後の耐荷性能を評価することができる。さらに、Pushover 解析の初期応力状態を地震応答解析の初期応力状態  $S_0$  に置き換えることで、同一地震作用力  $F_a$  下での健全状態における耐荷力を算出し、応力状態  $S_R$  の結果と比較することで地震によって低下した耐荷性能を評価することもできる。なお、本解析には、DDM (Domain Decomposition Method)<sup>8)</sup> 計算アルゴリズムを組み込み、MPI/OpenMP のハイブリッド並列で計算処

図-4 着目時刻  $a$  の応答変位、荷重ベクトルと地震作用力

理向上を図るように改良した ScanFEM<sup>9)</sup>を用いることで大規模構造計算を実現している。

#### 4. おわりに

本稿では損傷を受けた上路式鋼アーチ橋の地震後の耐荷性能を、フルシェルモデルを用いて確認する手法の具体について述べた。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017.
- 2) 土木学会：2018 年制定鋼・合成構造標準示方書耐震設計編，丸善，2018.
- 3) 馬越一也，奥村徹，吉野廣一，野中哲也：Pushover 解析に基づく高精度な構造全体の安全性照査，土木学会第 74 回年次学術講演会概要集，I-71，2019.
- 4) 奥村徹，馬越一也，野中哲也，吉野廣一：非エネルギー吸収部材の損傷を伴う上路式鋼アーチ橋の構造全体系の地震時終局挙動，構造工学論文集，土木学会，Vol. 66A，2020.
- 5) 後藤芳顕，奥村徹：ロッキング挙動を利用した免震・制震機構の上路式鋼アーチ橋への適用，土木学会論文集 A，Vol. 62，No. 4，pp. 835-853，2006.
- 6) 野中哲也，宇佐美勉，岩村真樹，廣住敦士，吉野廣一：連鎖的な部材破壊を考慮した鋼橋のリダンダンシー解析法の提案，構造工学論文集，Vol. 56A，pp. 779-791，2010.
- 7) 枘田智子，平城弘一，渡辺滉，高田嘉秀，宮地真一，牛島祥貴：スラブアンカーの静的ずれ耐力特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 47A，pp. 1373-1380，2001.
- 8) 吉野廣一，野中哲也，本橋英樹，金治英貞，鈴木威，ハツ元仁，中村良平：京コンピュータによる高架橋の広域 3 次元地震応答シミュレーション，第 17 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 43-50，2014.
- 9) 株式会社耐震解析研究所（現：地震工学研究開発センター）：ScanFEM ver.1.22，理論マニュアルと検証，2007.