

Pushover 解析に基づく高精度な構造全体の安全性照査

(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, 現行の設計地震動¹⁾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, 仮に損傷を許容した場合に構造安全性をどのように評価するかが課題となっている. 一般的に, 連続高架橋のように幾何学的非線形性の影響が小さく, さらに不静定次数が高い構造では, 橋梁を構成するすべての部材の安全性を確保することにより構造安全性が満足されるものとして照査が行われる. 他方, 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. そのため, 構造全体を対象として安全性が確保されているか照査する必要がある. このような観点から, 2018年に制定された鋼・合成構造標準示方書耐震設計編²⁾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, シェル要素を用いた解析において実務上の課題になる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を行った. 本報では, 開発したプログラムで構築したシェル要素による橋梁全体系モデルを用いて, 多方向地震動下における上路式鋼アーチ橋の構造全体の安全性照査の実施方法と, その適用性について検討を行った.

2. 対象橋梁

本研究で用いた対象橋梁のモデルは図-1に示す上路式鋼アーチ橋(橋長:174 m, アーチ支間 L :114 m, ライズ f :18.87 m)である. 鋼アーチ橋は文献3)に示される解析モデルを元に, 2次部材の下横構と対傾構は局部座屈が先行しない断面(材質はいずれもSS400)として再設計したものである. 具体的には自由突出板の幅厚比パラメータ R^1 が0.7よりも小さくなるよ

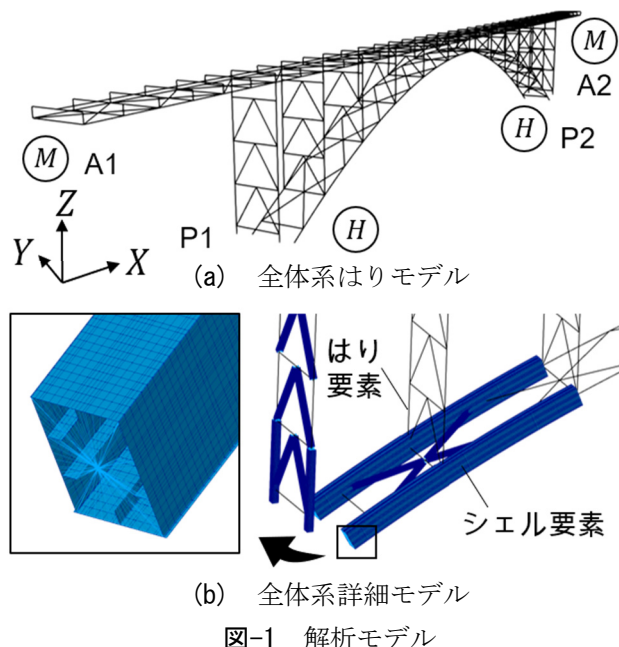


図-1 解析モデル

うな断面にして, 部材の全体座屈強度よりも局部座屈強度が大きくなるようにした.

3. 構造全体の安全性照査手法

文献2)を参考に, 構造全体の安全性照査フローと概念図を図-2と図-3に, 概要を以下に示す. はじめに, はり要素を用いた構造全体系モデル(図-1(a), 全体系はりモデル)の時刻歴応答解析を実施し, 入力地震動により構造全体系が安全限界に近付いたと考えられる時刻(着目時刻 t)における構造全体系への地震作用力 $\mathbf{F}_m (= \mathbf{R}_m - \mathbf{F}_d)$ を設定する. $\mathbf{R}_m$ は以下の運動方程式(1)における着目時刻 t での構造全体系の復元力ベクトル, $\mathbf{F}_d$ は死荷重ベクトルである.

$$M\ddot{\mathbf{u}}_t + C\dot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{R}_m = -M\ddot{\mathbf{u}}_g + \mathbf{F}_d \quad (1)$$

この復元力ベクトル $\mathbf{R}_m$ は工学的な判断に基づき, 安全限界へ近づく可能性のある状態を吟味し, 必要に応じて複数の着目時刻について検討することが望ましい. ここでは, 一例として桁中央部の橋軸直角方向の変位が最大となった状態(図-4(a))に着目した例を示す. なお, 下横構や対傾構などの2次部材に座屈が生じることで動的挙動が変化する場合には, 時

キーワード 上路式鋼アーチ橋, Pushover 解析, 構造全体の安全性照査

連絡先 〒880-0902 宮崎県宮崎市大淀3-5-13 株式会社 地震工学研究開発センター TEL 0985-55-0125

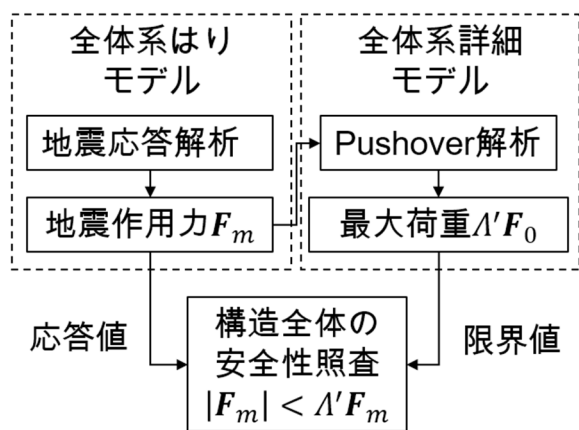


図-2 構造全体の安全性照査フロー

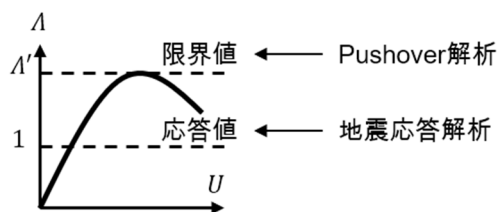


図-3 構造全体の安全性照査概念

刻歴応答解析において2次部材の座屈挙動を精度良く表現できるようなモデル（例えば修正柴田・若林モデル⁴⁾）を採用するような対処が必要と考えられる。

次に、先述の入力地震動による地震作用力 F_m に対する構造全体の耐力の評価を行う。構造全体の耐力（最大荷重）は全体系モデルのPushover解析により評価する。このとき、構造全体の耐力を正確に評価するために損傷が生ずる部位をシェル要素でモデル化を行う（図-1(b)，全体系詳細モデル）。ここで、残留応力や初期たわみなどの初期不整が耐力に与える影響を無視できない場合には、部材としての初期不整に加え、構造全体系としての初期不整の影響を考慮する必要がある。全体系詳細モデルのPushover解析に用いる荷重ベクトルは地震作用力 F_m を基準化したモードベクトル $F_0 = F_m / |F_m|$ に対して荷重倍率 Λ を乗じ、 Λ を漸増することで静的載荷を行う。このように載荷することで、このPushover解析には地震時のモード性状が考慮されることになる。Pushover解析の結果、最大荷重時の倍率 Λ' （限界値）が地震作用力 F_m の大きさ $|F_m|$ （応答値）よりも大きければ、構造全体の耐力が地震作用力を上回っているため構造全体の安全性が確保されたことになる。

4. 構造全体の安全性照査の適用性

本照査手法では、一般的に実施されているはり要素を用いた橋梁全体系の地震応答解析の結果に対し

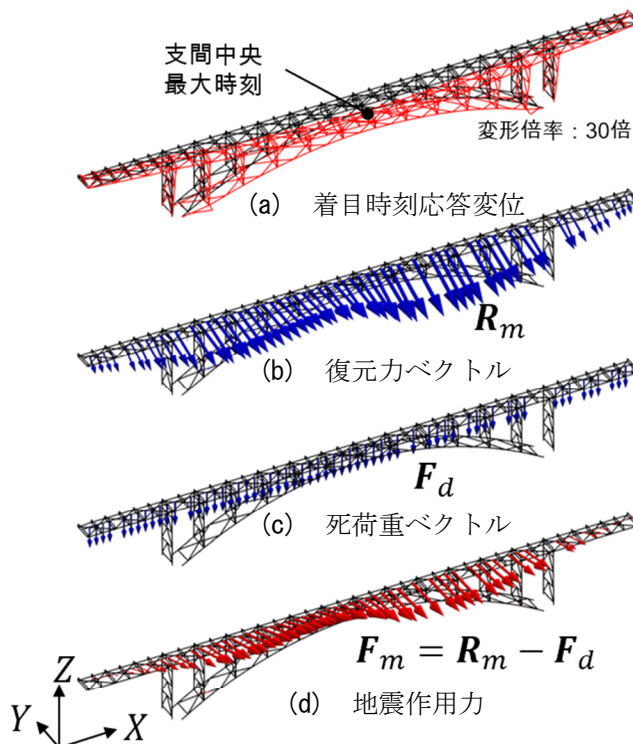


図-4 着目時刻の応答変位，荷重ベクトルと地震作用力

て、部材の損傷を評価できるシェル要素を用いたPushover解析で算出した構造全体の耐力で評価するため、現行照査への組み込みは可能であると考えられる。更に、全体系はりモデルから損傷部位をシェル要素に置き換え全体系詳細モデルを作成するプログラムの開発により、本照査手法の適用を容易にしている。なお、地震作用力 F_m を算出するための復元力ベクトル R_m と死荷重ベクトル F_d は、用いた解析プログラム SeanFEM⁵⁾における動的解析のアウトプットであるが、着目時刻変位を目標とする強制変位解析における載荷点の節点反力⁶⁾を用いることでも算出は可能である。

5. おわりに

本稿では損傷を許容する場合の上路式鋼アーチ橋の耐震補強設計において、Pushover解析を用いた構造全体の安全性照査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) (社)日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震解析の現状と信頼性の向上，2011. 4) 竹内徹，近藤佑樹，松井良太，今村晃：局部座屈を伴う組立材ブレースの座屈後履歴性状および累積変形性能，日本建築学会構造系論文集，77巻，681号，pp.1781-1790，2012. 5) 株式会社耐震解析研究所：SeanFEM ver.1.22，理論マニュアルと検証，2007. 6) 崎元達郎，奈良敬，小松定夫，北沢正彦：曲げが支配的な主塔を有する長径間斜張橋の耐荷力に関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol. 36A，pp.111-119，1990.