

土木構造物における3次元解析、動的解析、非線形解析など 解析技術適用の事例とその効果

上路式鋼アーチ橋の補強検討への適用事例

(株)フォーラムエイト 大阪支社 支社長 青戸 拓起

1. はじめに

アーチ橋は、地震時に大きく軸力が変動する。それと同時に、直角方向に対しては、死荷重による曲げと地震慣性力による曲げが同時に作用することとなり、複雑な非線形挙動を示すこととなる。そのため、鋼製部材の動的照査においては、ファイバー要素を利用した動的解析手法が普及しており、同時に、応答ひずみに基づく地震時安全性の照査が、鉄筋コンクリート部材を持つ橋梁に比べて進んでいる。

今回は、上路式の鋼製アーチ橋を例に、ファイバー要素を利用した動的解析を行うとともに、応答ひずみに基づく照査を補強効果の検討に適用した事例を紹介する。なお、本事例の解析には、UC-win/Frames(3D)を用いる。

2. 解析モデルと解析手法

1) 解析対象概要

図-1に示すような上路式の鋼アーチ橋で、全長206m、ライズ比22/128(≒0.17)の構造を有する2ヒンジ形式である。また、景観性を配慮し、端部支柱や鉛直材には斜材のない構造となっている。桁端部は可動、端部支柱下端はピボット支承による支持、端部支柱と補剛桁はピン結合、他の部材同士は剛結合である。なお、レベル1地震動に対し、いずれの部材も許容応力度に収まるよう設計されている。

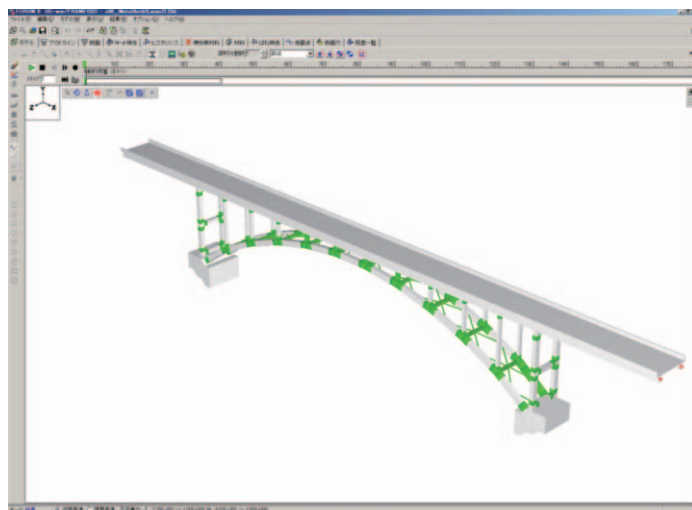


図-1 モデル図 (■ファイバー要素)

2) 解析モデルと解析手法

解析モデルを図-2に示す。また、ファイバー要素を利用した箇所を図-1に示している。横構や部材端部にファイバー要素を配置し、補剛桁は弾性部材とする。

解析に用いる鋼部材の応力ひずみ曲線を図-3に示す。横構は型鋼を利用しており、降伏ひずみの2倍の圧縮ひずみが作用すると局部座屈を生じるものと設定する。その他の鋼部材については、降伏ひずみの10倍の圧縮ひずみが生じると、局部座屈を生じるものと設定する。

動的解析はNewmark β 法 ($\beta = 1/4$) による。減衰マトリクスは要素別剛性比例型(初期剛性比

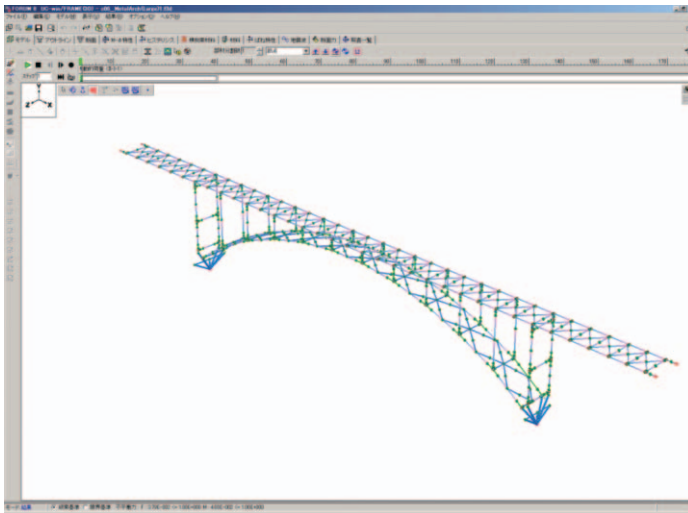
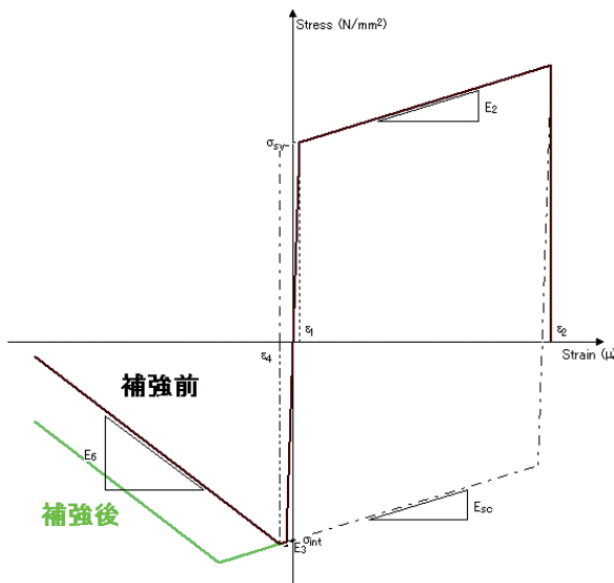
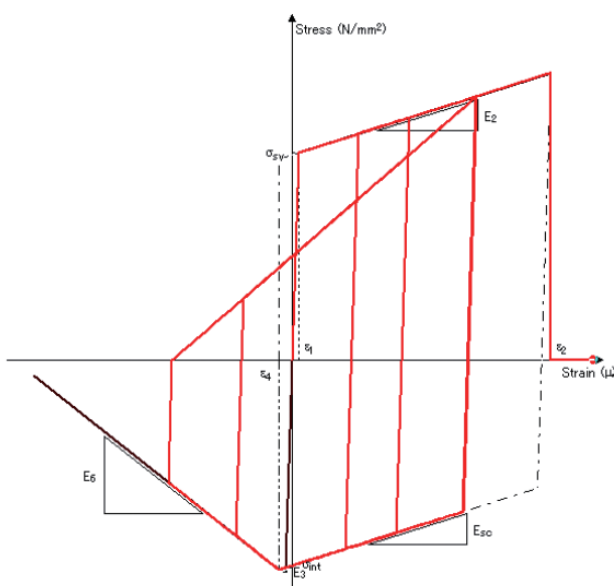


図-2 骨組み図



(a) 骨格



(b) 履歴則

図-3 応力ひずみ曲線

例) とし、一律、2%の粘性減衰を与える。また、幾何学的非線形を考慮する。基礎は剛体とし地盤に固定とする。

地震動について、1995年の兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された波形を、3方向同時に作用させて、レベル2地震に対する検討を実施する。なお、地震動の作用方向は、橋軸方向に観測波形のEW成分、橋軸直角方向に同NS成分を入力する。

3. 耐震性能の評価

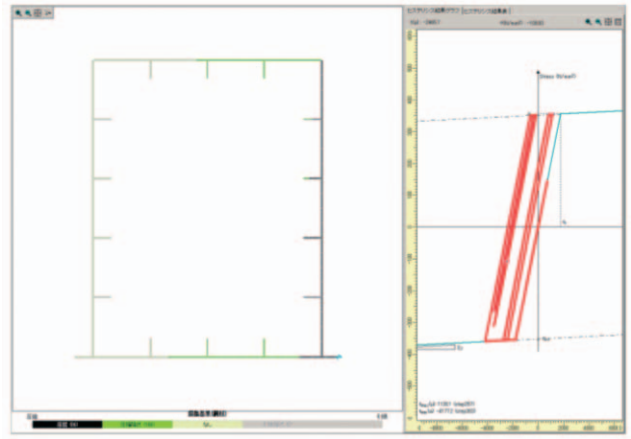
1) 現況の耐震性能照査

レベル2地震に対する鋼製部材の安全性は、断面内に生ずる圧縮ひずみが、降伏ひずみの2倍を超えないことを確認するものとする。このような長大アーチ橋の場合、特にアーチリブ、補剛桁、鉛直材などは、復旧作業の難易度が非常に高いと予想されると同時に、構造上非常に重要な部材である。そのため、著しい塑性化を許さないよう、降伏ひずみの2倍を限界とすることとする。

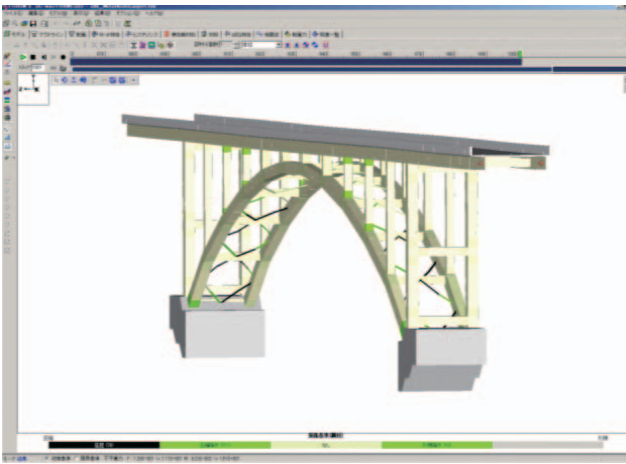
現況の状態に対して実施した動的解析の結果に基づき、得られた最大ひずみの状態を図-4(a)に示す。支点直上のアーチリブ、鉛直材など主要部材の多数の箇所(■色の部材)において、降伏ひずみの2倍を超える圧縮ひずみが生じる結果となっている。さらに、地震終了後の圧縮ひずみの状況を同図(b)に示す。アーチリブ支点付近、鉛直材など主要部材の多数の箇所(■色の部材)において、降伏ひずみより大きなひずみが残留する結果となっている。また、同図(c)に、地震終了時の変形状態を示す。多数の横構がくの字に座屈している様子が確認できる。同図(d)に、アーチリブ支点部断面における最大ひずみの状態を示す。片方のウェブ部分全般(■色の箇所)に、降伏ひずみの2倍を超える圧縮ひずみが生じており、半分以上の領域が降伏してしまっている。同図(e)に、支点直上のアーチリブ断面における、軸力と軸方向ひずみ応答の履歴図を示す。死荷重による作用圧縮軸力は約5450kNであるが、地震中の最大圧縮軸力は約19900kN、最大引張軸力は5200kNである。死荷重時軸力のおよそ5倍近い変動が生じており、軸力変動が非常に大きいことがわかる。



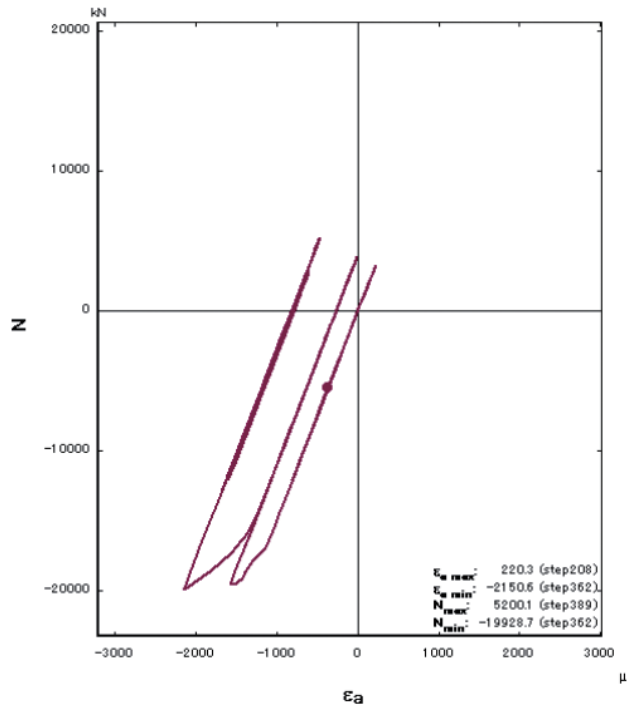
(a) 最大圧縮ひずみによる損傷状態
(■ $\epsilon'_s \geq 2\epsilon'_y$ 、■ $\epsilon_s \geq \epsilon_y$)



(d) アーチリブ断面（支点付近）の損傷状態
(■ $\epsilon'_s \geq 2\epsilon'_y$ 、■ $\epsilon_s \geq \epsilon_y$)

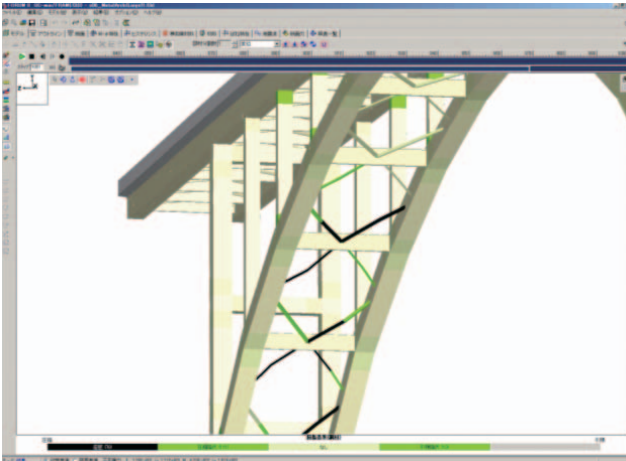


(b) 地震終了時の損傷状態
(■ $\epsilon'_s \geq 2\epsilon'_y$ 、■ $\epsilon_s \geq \epsilon_y$)



(e) アーチリブ断面（支点付近）の軸方向応答

図-4 現況モデルの照査

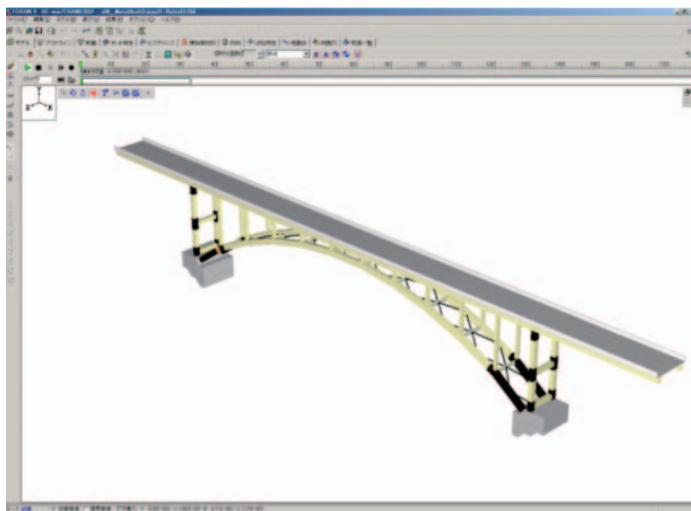


(c) 地震終了時の横構の座屈状況

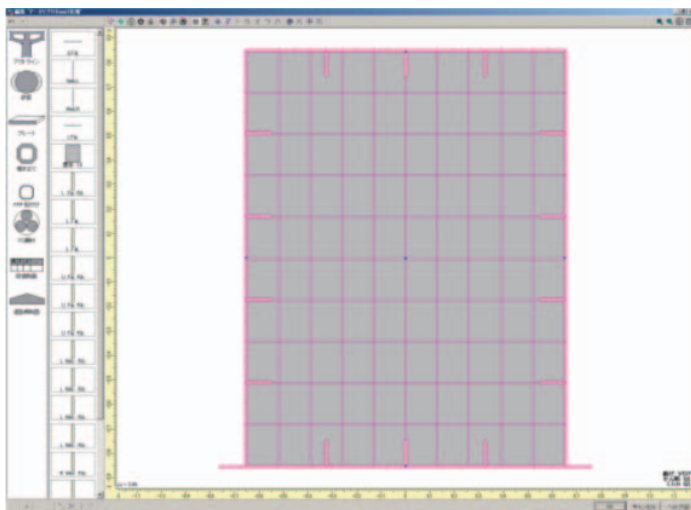
なお、道路橋示方書耐震設計編に例示されるタイプ2地震動の時刻歴標準波形(II-I-1)を、橋軸直角方向に入力した解析も事前に行っている。その結果、アーチリブや鉛直材など重要な部材には、降伏

ひずみの2倍を超える圧縮ひずみの発生は確認できなかった。また、横構には降伏ひずみの2倍を超える圧縮ひずみが生じていたが、地震後、目立った座屈は確認できなかった。すなわち、前述の観測波形による解析結果の方が、損傷レベルを大きく評価している。

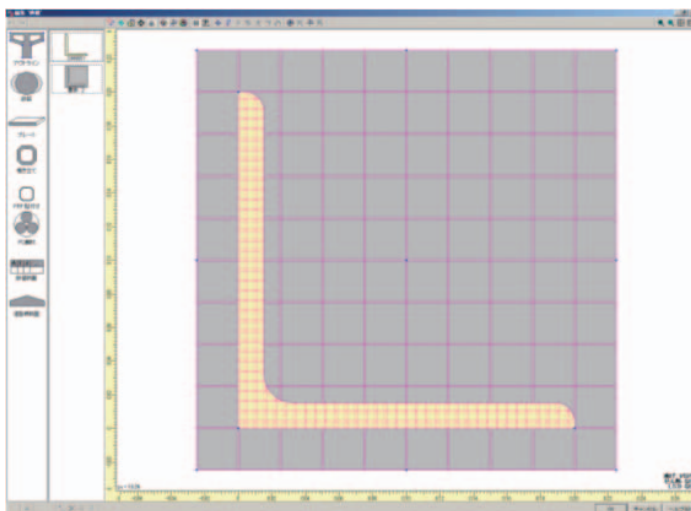
従って、現況の状態は、レベル2地震の作用が構造系全体を不安定にさせるほどの損傷を生じさせるものではないものの、許容限界を超える最大圧縮ひずみが生じ、また、地震終了後も大きなひずみや座屈変形が残留する可能性を示す結果である。よって、速やかな機能回復が困難な状態となる(=耐震



(a) 補強箇所



(b) 補強部材の断面<アーチリブ断面>



(c) 補強部材の断面<横構断面>

図-5 補強工法

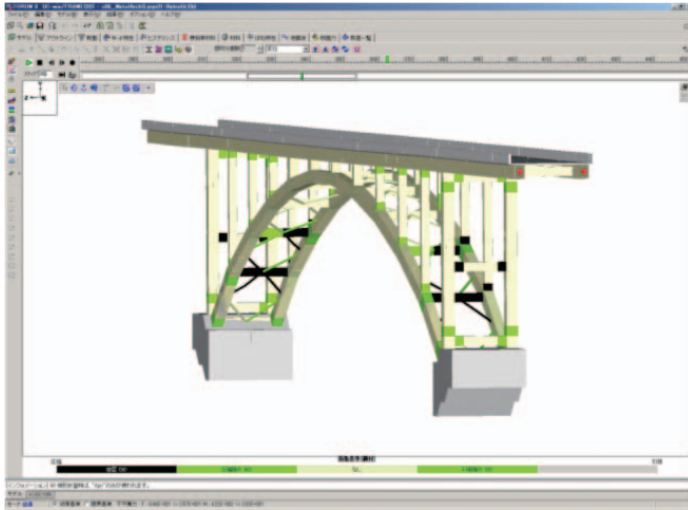
性能2が確保できない)可能性がある。

2) 補強後の耐震性能照査

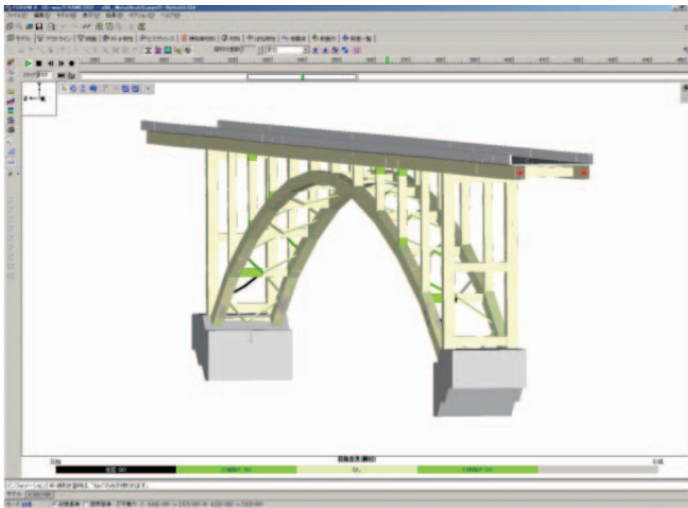
図-5に、補強箇所と補強断面を示す。アーチリブ支点付近は、同図(b)に示すようにコンクリートを充填することにより補強する。端部支柱の柱部の一部も同様とする。横構については、同図(c)に示すようにコンクリートを巻立てることにより、座屈の抑制を図る工法とする。横構は、ファイバー要素でモデル化しているが、その鋼材の局部座屈が生じる圧縮ひずみを、補強前は降伏ひずみの2倍としていたものを、本工法による補強後は10倍程度とすることとし(図-3再度参照)、座屈抑制効果をモデル化する。補剛桁両端には、橋軸方向への移動を制限させる5000kNダンパーを2基ずつ取付けることにより、鉛直材や端部支柱の橋軸方向への移動を拘束する。なお、桁端ダンパーは、バイリニア型の特徴を持つばね要素によりモデル化する。

これらの補強を施したモデルに対し実施した動的解析の結果に基づき、得られた最大ひずみの状態を図-6(a)に示す。支点直上のアーチリブ、鉛直材など、重要な部材について降伏はするが、最大圧縮ひずみを降伏ひずみの2倍以内に抑えられたことが確認できる。また、地震終了後の圧縮ひずみの状態を同図(b)に示す。支点直上のアーチリブ、鉛直材などの一部に、降伏ひずみより大きなひずみが残留する結果となっている。横構については、降伏ひずみの2倍を超える圧縮ひずみが発生する部材数が、補強前に比べ大きく減少している。また、同図(c)より、補強後も座屈している横構は見られるものの、補強前に比べるとその程度と部材数はやはり低減できている。

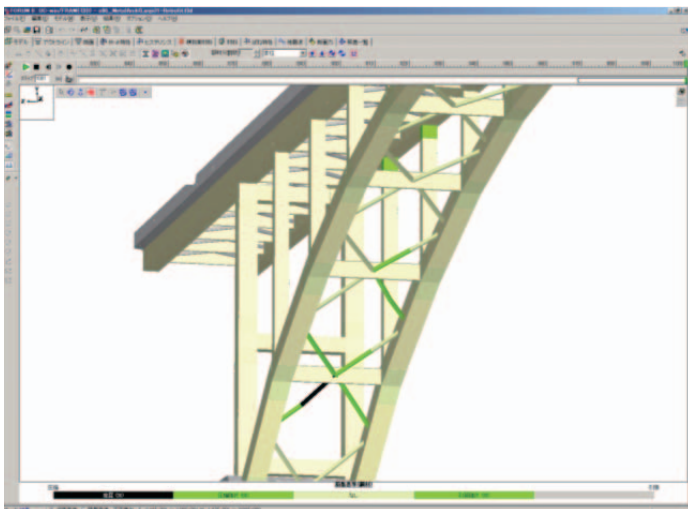
よって、本補強工法を施すことによって、重要な部材であるアーチリブや鉛直材に対し、レベル2地震動の作用によって生じる最大圧縮ひずみを許容限界内に抑えることができる。また、横構の座屈は生じるものの、補強前に比べると相当抑制されることも確認できる。よって、本補強工法を施せば、地震後に補修せずに利用を継続しても、緊急車両の通行確保には差し支えない損傷状態ではないかと推察できる。



(a) 最大圧縮ひずみによる損傷状態
 (■ $\epsilon's \geq 2\epsilon'y$, ■ $\epsilon s \geq \epsilon y$)



(b) 地震終了時の損傷状態
 (■ $\epsilon's \geq 2\epsilon'y$, ■ $\epsilon s \geq \epsilon y$)



(c) 地震終了時の横構の座屈状況

図-6 補強モデルの照査

4. まとめ

上路式鋼製アーチ橋を対象に、現況モデルのレベル2地震動に対する耐震性能と、補強後の耐震性能を検証した。また、重要な部材に許容できる最大圧縮ひずみを、降伏ひずみの2倍として評価した。

その結果、現況では、アーチリブや鉛直材等、重要な部材に、許容圧縮ひずみを超える圧縮ひずみが生じてしまう結果となった。また、地震後に、アーチリブには大きな圧縮ひずみが残留し、多数の横構に大きな座屈変形が生じる結果となった。よって、速やかな機能回復が困難な状態となる(=耐震性能2が確保できない)可能性が確認された。

これに対し、アーチリブ(支点付近)には内部へのコンクリート充填、横構にはコンクリート巻立てによる座屈抑制、そして、補剛桁端には橋軸方向への桁の移動を制限するダンパーを取付けることにより、重要部材の圧縮ひずみを許容限界以内に抑えることができ、また、横構の座屈をかなり抑制することができた。

よって、本補強工法を施すことで、地震後に速やかに機能回復が行える損傷状態に抑えることができ、補修を行わずとも緊急車両などの利用が可能な性能を確保できるまで、耐震性能を向上させることができたのではないかと考える。

従来の耐震性能の評価は、地震時の構造安全性評価、すなわち最大応答値の評価に主眼が置かれてきたが、地震後に利用継続が可能な損傷レベルなのか、補修や機能回復に相当の期間を要する損傷レベルであるのかが、本来、道路管理上の非常に大きな課題である。また、3次元解析を利用することにより、地震時の安全性だけでなく、地震後の損傷状態を適切に把握することができるため、地震後の利用継続や機能回復に関する評価を含めた耐震性能評価が可能になるのではないかと考えている。

橋梁&都市
PROJECT
FORUM 8