

3.1 補強対策が困難な既設道路橋に対する耐震設計法の開発

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：運上茂樹（上席）、張広鋒

【要旨】

平成 17 年度から平成 19 年度まで緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プログラムが実施されたが、今後の効率的な震災対策事業に資するためには、本 3 箇年プログラムの技術的なフォローアップを行うとともに、現場の個別条件を加味した性能評価の高度化、対策が困難となる橋梁に対する新しい工法の開発等が必要とされている。平成 20 年度では、3 箇年プログラムにより段落し部の耐震補強が実施された RC 橋脚を対象に、現行耐震水準にグレードアップさせる段階的な耐震補強工法を提案し、設計・施工マニュアル（案）を作成した。また、地震時に挙動が複雑かつ補強対策が困難である既設鋼アーチ橋の耐震補強設計を行う際に必要とされる照査方法の提案を目的に、ファイバーモデル解析に基づくひずみ照査法による照査方法や照査の流れを検討し、ファイバーモデル解析による最大応答ひずみの評価事例を作成した。

キーワード：既設鋼アーチ橋、耐震性能照査、ひずみ評価法、ファイバーモデル

1. はじめに

被災時の円滑な救急・救援活動や緊急物資の輸送、復旧活動の支援等において重要な役割を果たす緊急輸送道路のうち落橋等の甚大な被害を受ける可能性のある橋を対象に、橋脚補強と落橋防止対策を優先的かつ限定的に実施する緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プログラムが平成 17 年度～平成 19 年度まで実施された。この 3 箇年プログラムでは、対象路線にある昭和 55 年道路橋示方書よりも古い基準を適用した橋梁において、段落し部のある鉄筋コンクリート（RC）製単柱橋脚、鋼製単柱橋脚および連続橋の段落し部のある RC 製固定橋脚に対しては橋脚の補強、両端が橋台でない単純桁、ゲルバー桁および流動化の影響を受ける可能性のある連続桁に対しては落橋防止システムの設置が行われている。また、対象路線にあるトラス橋、アーチ橋、斜張橋、吊橋等の特殊橋梁および道路橋示方書の適用範囲外となる長大橋梁も 3 箇年プログラムの補強対象とされた。

一方、今後の効率的な震災対策事業に資するためには、同 3 箇年プログラムの技術的なフォローアップを行うとともに、現場の個別条件を加味した耐震性能評価の高度化、対策が困難となる橋梁に対する新しい工法の開発等が必要とされている。以上のことを踏まえ、平成 20 年度は以下の研究を実施した。

1) 3 箇年プログラムにより段落し部の耐震補強が実施

された RC 橋脚を対象として、現行（平成 8 年道路橋示方書以降）耐震水準にグレードアップさせる段階的な耐震補強工法を提案し、設計施工マニュアル（案）を作成した。

2) 地震時に挙動が複雑かつ補強対策が困難である既設鋼アーチ橋の耐震補強設計を行う際に必要とされる照査方法の提案を目的に、ファイバーモデル解析に基づくひずみ照査法による照査方法や照査の流れを検討し、ファイバーモデル解析による最大応答ひずみの評価事例を作成した。

2. RC 橋脚の段階的耐震補強

2.1 補強工法の選定

RC 橋脚の破壊形態は、曲げ破壊型、曲げ損傷からせん断破壊移行型、せん断破壊型に分類される。このうち、曲げ損傷からせん断破壊移行型およびせん断破壊型は、急激な耐力の低下を引き起こす破壊形態であり、このような破壊が先行して発生する場合は、まず、せん断補強を実施し、じん性が期待できる橋脚基部の曲げ破壊型に破壊形態を移行させることが基本となる。

橋脚基部の補強としては、橋脚がねばり強い構造となるようにじん性補強を優先し、じん性補強のみでは橋脚に大きな残留変位が発生する場合は、フーチングに軸方

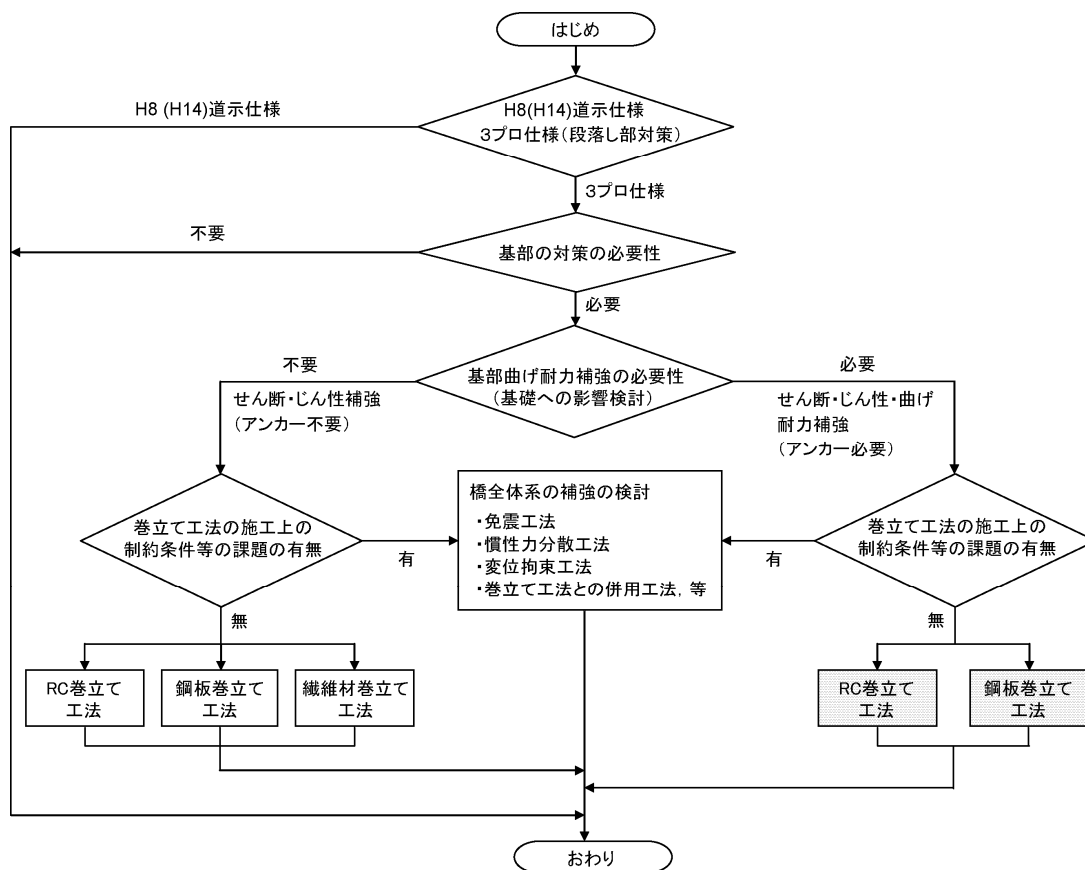


図-1 RC橋脚のアップグレード補強工法の一般的な選定フロー

向鉄筋を定着させて曲げ耐力の向上を図る。この場合、橋脚躯体の曲げ耐力を過度に向上させると、基礎構造を含めた補強が必要となることがあるため、基礎が支持できる範囲内でじん性と曲げ耐力の向上をバランスさせることが補強設計を行う上で重要となる。なお、本検討では、3箇年プログラムにより段落し部に対して実施された繊維材巻立て補強を有効に活かし、その上から追加的に補強して耐震性能のアップグレードを図る場合の工法を検討した。図-1に、RC橋脚のアップグレード補強工法の一般的な選定フローを示す。

2.2 補強工法の概要

RC橋脚の耐震補強の段階的な補強工法としては、現行(平成8年道路橋示方書以降)基準レベルまでグレードアップさせ、橋としての機能回復を速やかに行い得る信頼性の高い耐震性能を確保することが考えられる。本検討では、選定案の中にせん断・じん性・曲げ耐力補強が必要となる場合の対策として、3箇年プログラムで、例えば、炭素繊維シートによって段落し部の耐震補強が既に実施されたRC橋脚を対象にこのグレードアップのための耐震補強工法を検討した。これに対する工法とし

て、(1) RC巻立て工法、(2) 鋼板巻立て工法、の2工法を検討した。各工法の概要は以下の通りである。

(1) RC巻立て工法

本工法は、RC橋脚躯体の周囲を鉄筋コンクリートで巻立て、新旧コンクリートの付着を確保するとともに、軸方向鉄筋をフーチングに定着することによって耐力を増加させる工法である。

(2) 鋼板巻立て工法

本工法は、RC橋脚躯体を鋼板で巻き立て、その間隙を充填材により密実させるとともに、アンカー筋を通じて鋼板をフーチングに定着させる工法である。

また、これらの工法の設計・施工方法をまとめ、「3箇年プログラムで段落し部の対策を実施した鉄筋コンクリート橋脚のアップグレード補強マニュアル(案)」を作成した。図-2に作成したマニュアル(案)の目次を示す。

3. 鋼アーチ橋の耐震性能照査

3.1 鋼アーチ橋の地震被害の特徴

鋼アーチ橋は、一般に個々の現場条件を反映させて個別に設計され、様々な構造形式が採用されるとともに、

3箇年プログラムで段落し部の対策を実施した鉄筋コンクリート橋脚のアップグレード補強マニュアル(案)

1. 一般
 - 1.1 基本的な考え方
 - 1.2 設計一般
 - (1) 適用基準
 - (2) 既設橋脚の調査
 - (3) 耐震補強設計の流れ
 - (4) 断面変化部の設計計算
 - (5) 主鉄筋段落し部における既設の巻立て補強部の表面処理方法
 - (6) 補強設計における留意事項
 - 1.3 耐震補強工法の選定
2. 鉄筋コンクリート巻立て工法
 - 2.1 工法の概要
 - 2.2 設計
 - 2.3 構造細目
 - (1) 巻立てコンクリート厚
 - (2) 表面処理
 - (3) 巻立て部に配置する鉄筋
 - (4) 軸方向鉄筋のフーチングへの定着
 - (5) 鉄筋のかぶり
 - (6) 帯鉄筋の継手
 - (7) 中間貫通鋼材の配置
 - (8) 組立て用アンカーの施工
 - 2.4 使用材料
 - (1) コンクリート
 - (2) 鉄筋
3. 鋼板巻立て工法
 - 3.1 工法の概要
 - 3.2 設計
 - (1) 一般
 - (2) 曲げ耐力制御式鋼板巻き立て工法の設計
 - (3) 鉄筋コンクリートと円形鋼板を併用した下端拘束工法の設計
 - 3.3 構造細目
 - (1) 鋼板の板厚
 - (2) 鋼板の分割数
 - (3) 補強鋼板の現場継手
 - (4) 鋼板固定用アンカーボルト
 - (5) 充填材の注入口
 - (6) 補強鋼板の防食対策
 - (7) 表面処理
 - 3.4 使用材料
 - (1) 鋼材
 - (2) 既設橋脚と鋼板の接着
 - (3) アンカー用の鉄筋

図-2 3箇年プログラムで段落し部の対策を実施した鉄筋コンクリート橋脚のアップグレード補強マニュアル(案)の目次

多くの特性の異なる部材から構成される構造となる場合が多い。このため、地震時の動的挙動が複雑であり、耐震性能の検証方法や耐震補強方法等は、一般に従来の桁橋形式の橋梁とは異なる。

図-3に、鋼アーチ橋の耐震構造上の重要部位を示す。既設鋼アーチ橋の耐震性能評価を行う際、耐震構造上重要な部位の耐震性能を考慮するとともに、橋全体としての耐震性を考慮することも重要である。性能評価の基本

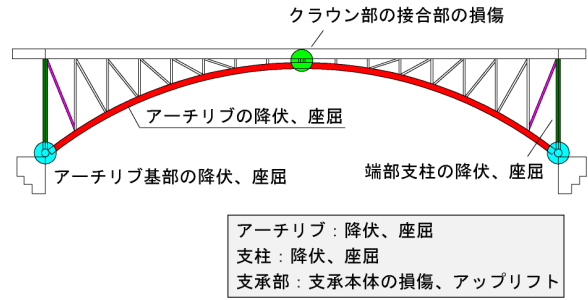


図-3 鋼アーチ橋の耐震構造上の重要部位

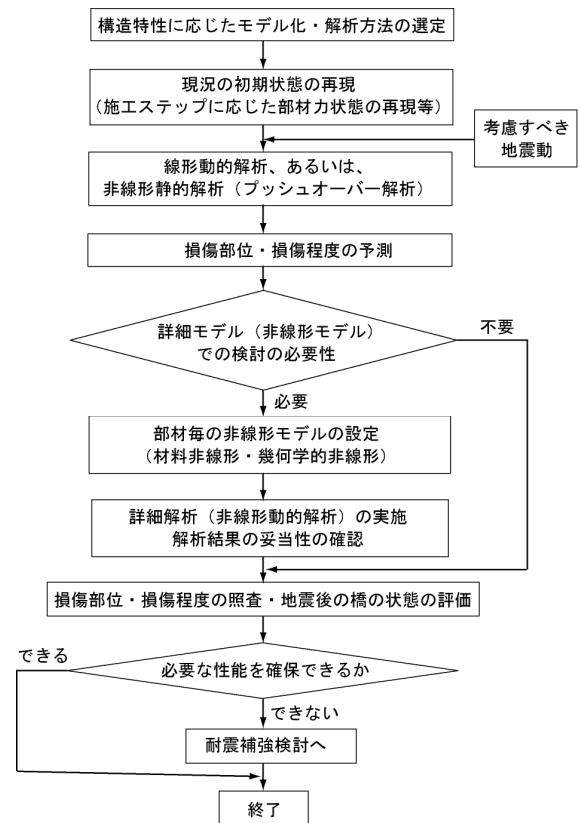


図-4 鋼アーチ橋の耐震性能評価の流れ

事項としては、耐震性能と限界状態の設定、耐震性能の評価において考慮する地震動、橋の構造特性を考慮に入れた性能評価、地震後の橋の状態の評価等を考慮する必要はある。

3.2 耐震性能照査の方法

鋼アーチ橋の耐震性能の照査方法として、一般に変位照査法とひずみ照査法が挙げられる。変位照査法とは、橋の要求性能に応じて設定された許容限界変位に対して、非線形動的解析により求められた最大応答変位を照査する方法である。許容限界変位は、繰り返し荷重を受ける

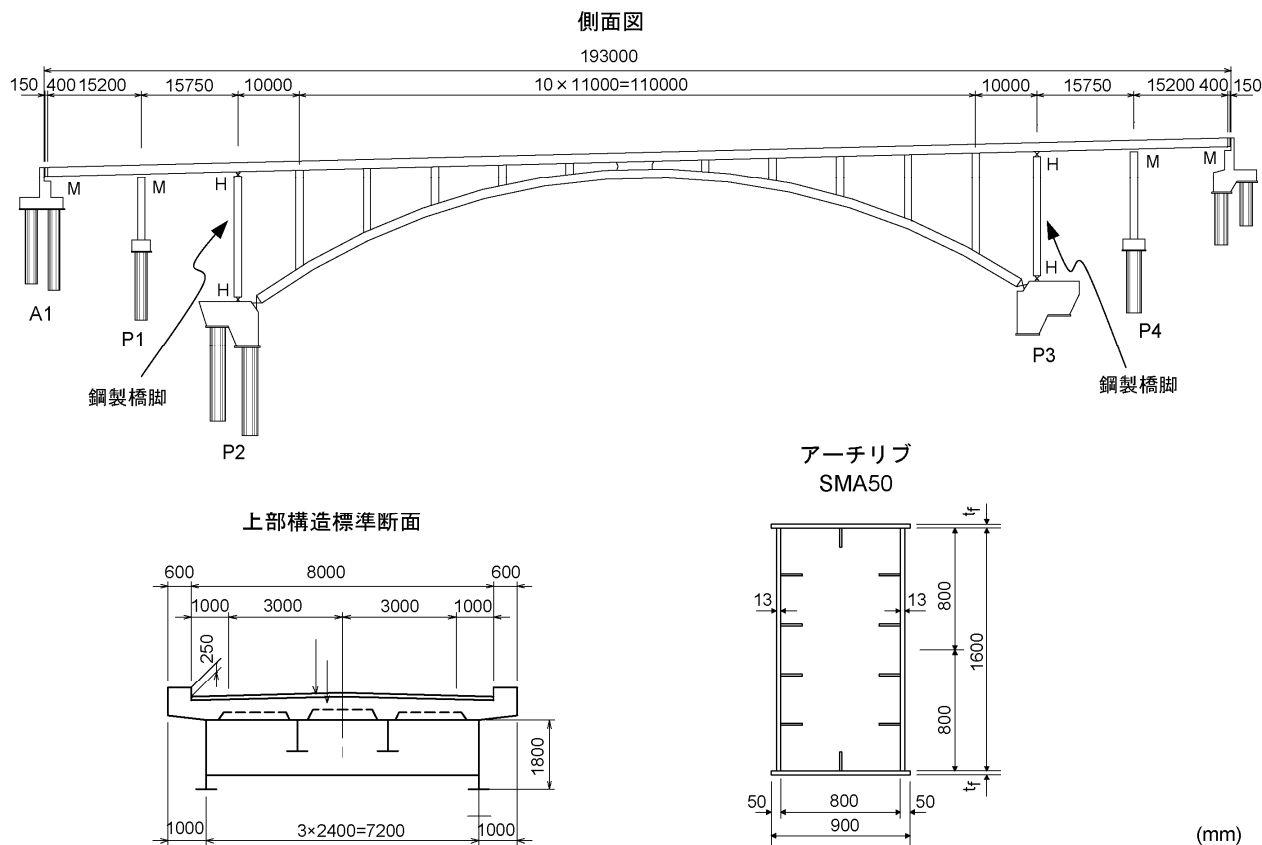


図-5 解析対象の鋼アーチ橋

部材の実験結果もしくは解析結果によって設定されるものである。変位照査法は、基本モードが卓越する構造物に適用可能であり、実務でよく用いられる方法である。一方、ひずみ照査法とは、橋の要求性能に応じて設定された部材の許容限界ひずみに対して、ファイバーモデル等の解析方法を用いる非線形動的解析により求められた最大応答ひずみを照査する方法である。ひずみ照査法は基本モードが卓越しない構造物においても適用可能である。本検討では、鋼アーチ橋の耐震性能の照査方法として、ファイバーモデル解析に基づくひずみ照査法を用いることとした。

式 (1) は、ひずみ照査法の基本照査式である。

$$\varepsilon_r \leq \varepsilon_u \quad (1)$$

ここに、

ε_r : 最大応答ひずみ

ε_u : 許容限界ひずみ

許容限界ひずみ ε_u は、要求する耐震性能レベルに応じて定められるものである。現在のところ、 ε_u の評価法はいくつかが提案されている(例えば、1)~3)、文献1)では、

部材の座屈パラメータを考慮に入れ、部材健全度(耐震性能)に応じた評価式を提案されている。文献2)と3)では、軸力比と座屈パラメータを考慮した評価式を提案されている。これらの評価法は、それぞれの適用範囲があり、大体現行道路橋示方書V耐震編に定めた条件を満足するものを適用対象としている。現行基準に定めた条件は式(2)に示す通りである。

$$\left. \begin{aligned} 0.2 \leq R_F \leq 0.5 \\ 0.3 \leq R_R \leq 0.5 \\ 0 \leq N/N_y \leq 0.2 \\ 0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 0.4 \\ \gamma_1/\gamma_1^* \geq 1.0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

なお、上述の評価式の適用範囲外にある既設鋼アーチ橋の場合は、選択肢として、まず各座屈パラメータを適用可能なものまでに補強し、その後上述の評価式を用いて照査を行うことが考えられる。

図-4に、本検討で整理した鋼アーチ橋の耐震性能照査の流れを示す。

なお、以下に最大応答ひずみ ε_r の算定事例を示す。

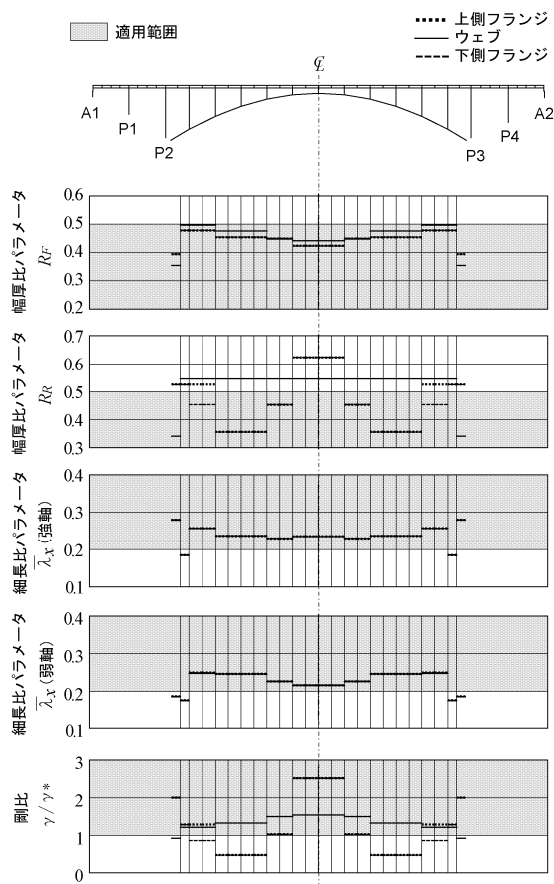


図-6 対象の鋼アーチ橋の各座屈パラメータ

4. ひずみ照査法の最大応答ひずみの算定

本検討では、ファイバーモデル解析を用い、耐震性能照査に用いる最大応答ひずみを求めることとした。ここで、解析手順を簡略化するため、架設ステップを考慮せず、完成系の解析モデルに死荷重を載荷した状態を初期状態とすることとした。また、耐震照査上最も厳しい橋軸直角方向のみを示すこととした。

4.1 解析対象の鋼アーチ橋

図-5は、解析対象とした2ヒンジ鋼アーチ橋を示したものである。本鋼アーチ橋は、昭和55年道路橋示方書によって設計された橋長193mの上路式ローゼ形式の鋼アーチ橋である。床版は非合成のRC床版である。架橋地点の耐震設計上の地盤種別はI種地盤である。鋼アーチ橋を構成する主要な鋼部材の材質はSMA41とSMA50である。アーチリブは、ローゼ形式のため軸力と曲げモーメントを受ける部材として設計されている。

図-6に、対象とした鋼アーチ橋の各座屈パラメータ

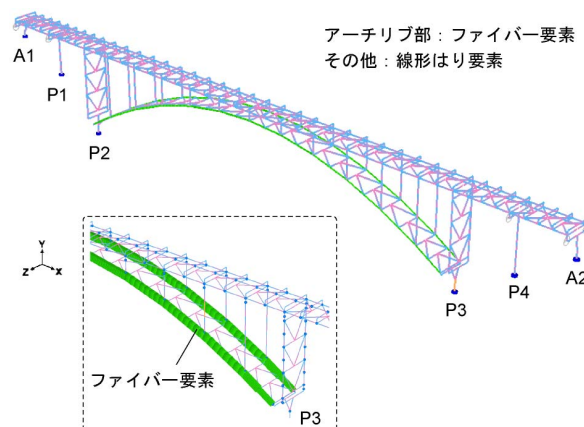


図-7 解析モデル

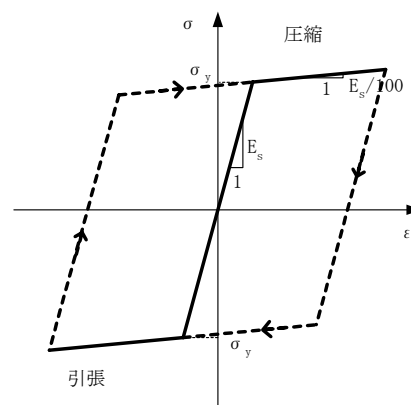


図-8 鋼材の応力度-ひずみ関係

を示す。幅厚比パラメータ R_F は現行基準の条件を満足しているが、その他のパラメータは、現行基準を満足しない箇所がある。

4.2 解析モデルおよび解析方法

解析では、以下のように鋼アーチ橋をモデル化することとした。

RC床版と鋼桁をそれぞれ梁要素でモデル化し、RC床版と鋼桁の間は剛部材を用いて結合する。アーチクラウン部は、他の部材に比較して十分剛となっていることから、剛部材としてモデル化する。アーチスプリング部は、ピン構造としてモデル化する。アーチリブは、ファイバー要素でモデル化する。アーチリブの分割は、損傷が大きいアーチクラウン部近傍およびアーチスプリング部近傍をダイアフラム間隔(1.5m~1.4m)を5分割とし、その他の部位はダイアフラム間隔とする。ここで、断面および軸方向の要素分割方法は、単柱鋼製

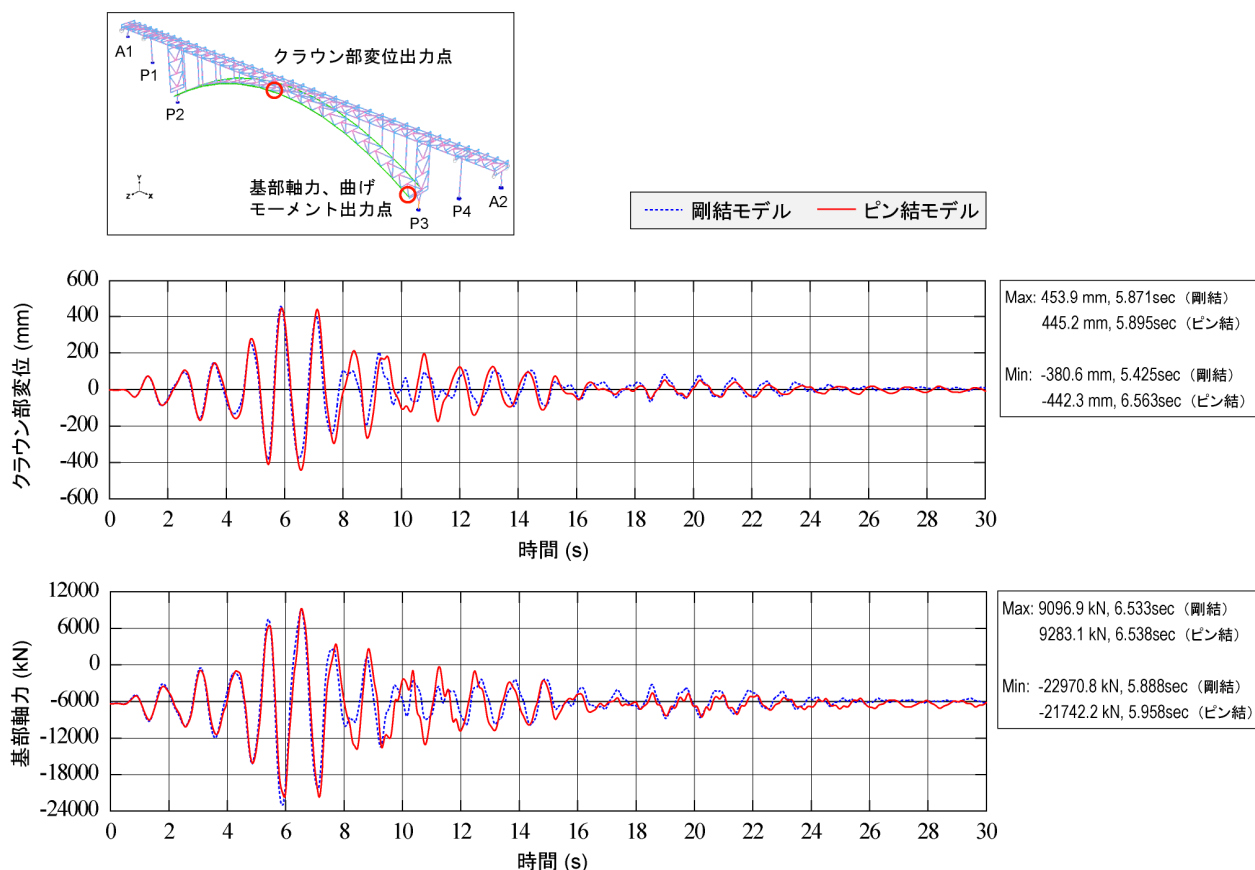


図-9 アーチリブの応答波形

橋脚に対して要素分割の影響に関する検討結果を参考に決定したものである。P1～P4 橋脚は、線形はり要素でモデル化する。アーチ支柱の分割数は、長さに応じて6～2分割とする。端柱（鋼製橋脚）と補剛桁の結合は、支承条件を踏まえてピン結合（回転：自由）とする。図-7に解析モデルを示す。

一方、アーチ支柱とアーチリブ、アーチ支柱と補剛桁の結合条件については、実構造では剛結と近い状態であるが、設計上では一般的にピン結と仮定する。本検討では、これらの結合部の結合条件による影響を検討するため、支柱の両端を剛結と仮定する場合（以降、剛結モデル）とピン結と仮定する場合（以降、ピン結モデル）の2ケースに対して解析を行った。

部材に与える減衰定数は、RC 床版、補剛桁、アーチリブおよび支柱は2%、RC 橋脚は5%、基礎構造～地盤系は10%とした。減衰特性のモデル化は、Rayleigh型粘性減衰マトリックスを用いた。入力地震動としては、現行道路橋示方書の標準加速度波形II-I-1の1波形を用いた。

解析では、アーチリブの材料非線形性および幾何学非線形性（有限変位）を考慮した。図-8に、解析に用い

たバイリニア型の応力-ひずみ関係に移動硬化則を適用したモデルを示す。解析では、Newmark β 法を用いた。また、繰り返し計算と収束の判定は、それぞれNewton-Raphson法および残差力ノルムによって行った。

4.3 解析結果と最大応答ひずみの評価

図-9に、アーチリブにおけるクラウン部変位、基部の軸力を例として、解析結果の応答波形を示す。これらの結果は、いずれもアーチリブの全域において応答が最大となった箇所のものである。

クラウン部の応答変位は、5.9秒付近でピークに達し、剛結モデルの場合は最大453.9mm、ピン結モデルの場合は最大445.2mmである。基部の圧縮軸力は、5.9秒付近でピークに達し、剛結モデルの場合は最大22,970.8kN、ピン結モデルの場合は最大21,742.2kNである。軸力比に換算すると、それぞれ、81.9%と77.6%となる（降伏耐力 $N_y = 28,031$ kN）。

また、応答ひずみの評価においては、一般に、個別の要素に対して評価を行うのではなく、部材の一定の長

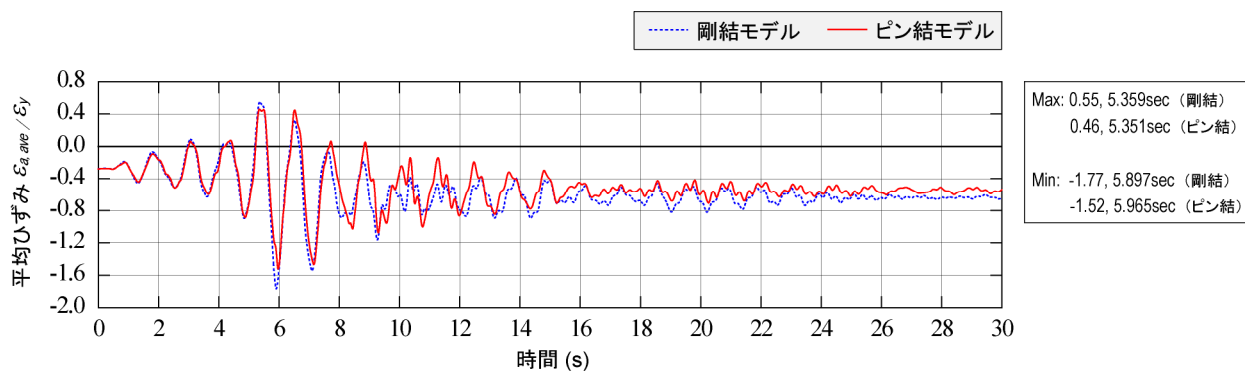


図-10 アーチリブ基部の平均ひずみ $\varepsilon_{a,ave} / \varepsilon_y$

さ(ひずみ評価領域)におけるひずみの平均値を用いる。本検討では、アーチリブ断面幅の900mm(図-6を参考)をひずみ評価領域の長さとした。平均ひずみ $\varepsilon_{a,ave}$ は、圧縮ひずみが最大となるウェブを対象に、ひずみ評価領域内の全要素の応答値を平均することによって求めた。照査対象の構造部位は、応答ひずみが最も大きく生じたアーチリブの基部とした。

図-10に、 $\varepsilon_{a,ave} / \varepsilon_y$ に関する応答波形を示す。

$\varepsilon_{a,ave} / \varepsilon_y$ は、5.9秒付近でピークに達し、最大値は、剛結モデルの場合は1.77、ピン結モデルの場合は1.52である。

一方、平均ひずみ $\varepsilon_{a,ave}$ を用いて耐震性能を照査する際、 $\varepsilon_{a,ave}$ を最大応答ひずみ ε_r とし、要求の耐震性能に応じた許容限界ひずみ ε_u と比較することにより、照査対象の耐震性能を照査することとする。

5. まとめ

本研究は、平成17年度から平成19年度まで緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラムの技術的なフォローアップを行うとともに、現場の個別条件を加味した耐震性能評価の高度化、対策が困難となる橋梁に対する新しい工法の開発等を行うものである。平成20年度では、3箇年プログラムにより段落し部の耐震補強が実施されたRC橋脚を対象に、現行耐震水準にグレードアップさせる段階的な耐震補強工法、地震時に挙動が複雑かつ補強対策が困難である既設鋼アーチ橋の耐震補強設計に用いられる照査法等を検討した。本年度の成果は、以下の通りである。

- 1) 3箇年プログラムにより段落し部の耐震補強が実施されたRC橋脚を対象に、現行(平成8年道路橋示方書以降)耐震水準にグレードアップさせる段階的な耐震補強工法を提案し、設計・施工マニュアル(案)を作成した。
- 2) 地震時に挙動が複雑かつ補強対策が困難である既設鋼アーチ橋の耐震補強設計を行う際に利用可能な照査方法として、ファイバーモデル解析に基づくひずみ照査法による照査方法や照査の流れを検討した。
- 3) また、実規模鋼アーチ橋に対してファイバーモデル解析を行い、最大応答ひずみの評価事例を作成した。

参考文献

- 1) 宇佐美 勉著/社団法人 日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン、技報堂出版、2006
- 2) 小野 潔、橋本 亮、西村宣男、山口栄輝：ファイバーモデルを用いた補剛矩形断面鋼部材の耐震性能照査法に関する一提案、橋梁と基礎、Vol. 41、No. 6、pp.26-33、2007
- 3) 徳永宗正、藪本 篤、小野 潔、三好崇夫：ファイバーモデルを用いた鋼部材の耐震性能照査指標・照査法に関する一検討、第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.295-302、2009.1
- 4) 建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公団、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(総括編)、平成11年3月

SEISMIC RETROFIT STRATEGY FOR EXISTING HIGHWAY BRIDGES

Abstract : The objective of this project is to develop an effective seismic retrofit strategy for existing highway bridges. In FY2008, the follows were conducted:

- 1) Seismic upgrading methods for RC columns with cut-off of longitudinal reinforcement at mid-height were studied and a design manual was proposed.
- 2) Applicability of analysis methods using a fiber model to evaluate seismic performance of steel arch bridges was studied.
- 3) An analysis sample for evaluating the seismic performance of steel arch bridges using fiber model was compiled.

Key words : existing steel arch bridge, seismic verification, strain-based verification method, fiber model