

実存RCアーチ橋に対するねじりと曲げの相関曲線及び ねじり非線形を考慮した地震応答解析

服部匡洋¹・大塚久哲²・脇坂英男³・新田直也⁴・崔準祐⁵

¹学生会員 修(工) 九州大学大学院 工学府（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744）

²フェロー 工博 (株)大塚社会基盤総合研究所（〒814-0012 福岡県福岡市早良区昭代3-6-23-601）

³非会員 修(工) オリエンタル白石(株)（〒810-0001 福岡市中央区天神 4-2-31）

⁴正会員 修(工) 清水建設(株)（東京都中央区京橋2-16-1）

⁵正会員 博(工) 九州大学大学院 工学研究院（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744）

1. はじめに

橋梁の長大化や立地条件の制約に伴い、RCアーチ橋のアーチリブや逆L字型の橋脚等、大きなねじりモーメントが生じる部材が増加しつつある。既往の研究より、RC構造物に軸力、曲げせん断に加えて、ねじりモーメントが作用すると、それぞれが単独に作用した場合と比較して耐力が低下することが知られている¹⁾。しかし、一般的な地震応答解析においては、ねじりひび割れの発生が想定される部材に対し、初期剛性GJの1/10程度の等価剛性を有する線形部材として考慮した等価線形解析を実施するのみで、ねじりの非線形特性やねじりと曲げの相関特性は考慮されていない²⁾。そして、これらが橋梁の地震時応答にどの程度の影響を及ぼすかについてもあまり知られていない。

このため、本研究では既設RCアーチ橋のアーチリブ部材を模擬した3室箱桁断面RC供試体に対するねじりと曲げの正負交番載荷実験を実施し、RC部材のねじりに対する耐荷機構や破壊メカニズムを明らかにしてきた³⁾。また、ねじりと曲げの正負交番載荷実験に対するシミュレーション解析を実施し、有限要素解析の再現性を把握するとともに⁴⁾、軸力や帯鉄筋間隔を変化させたパラメトリック解析を実施し、精度の良いねじりと曲げの相関曲線の提案を行った⁵⁾。

本研究では、実存するRCアーチ橋を参考にして作成した解析モデルに対して、提案したねじりと曲げの相関曲線を考慮した非線形動的解析を実施し、地震時にねじり非線形に入りうる部材について把握

した。また、ねじりと曲げの相関曲線を考慮した非線形動的解析とねじり線形及びねじり等価線形解析結果を比較することにより、ねじりと曲げの相関曲線を考慮することで地震時応答がどのように変化するのかを明らかにした。

2. 解析概要

(1) 橋梁諸元

対象橋梁は、橋長 411.0m、アーチ支間長は 235.0m、有効幅員は 9.0m であり、RC 固定アーチ橋と PC2 径間連続ラーメン橋からなる。補剛桁、アーチリブともに箱桁形式であり、アーチリブは 3 室箱桁断面を有する。

(2) 解析モデル

解析モデルの全体図を図-1に示す。アーチリング、補剛桁、鉛直材、橋脚及びビンドポストには、非線形梁要素を使用した。また、支承部はVP1、VP10のみ補剛桁と剛結されており、その他の鉛直材及び橋脚については、ゴム支承及び変位制限装置をそれぞれ線形バネ要素でモデル化した。

(3) 解析条件

本解析では、ねじり非線形を考慮することができない汎用非線形解析プログラムRESP-T(version5.1.0)を使用した。数値積分法はNewmark β 法 ($\beta=0.25$)を使用した。入力地震動は、道示標準波タイプII-I-1とし⁶⁾、橋軸直角方向に加震した。積分時間間隔は、

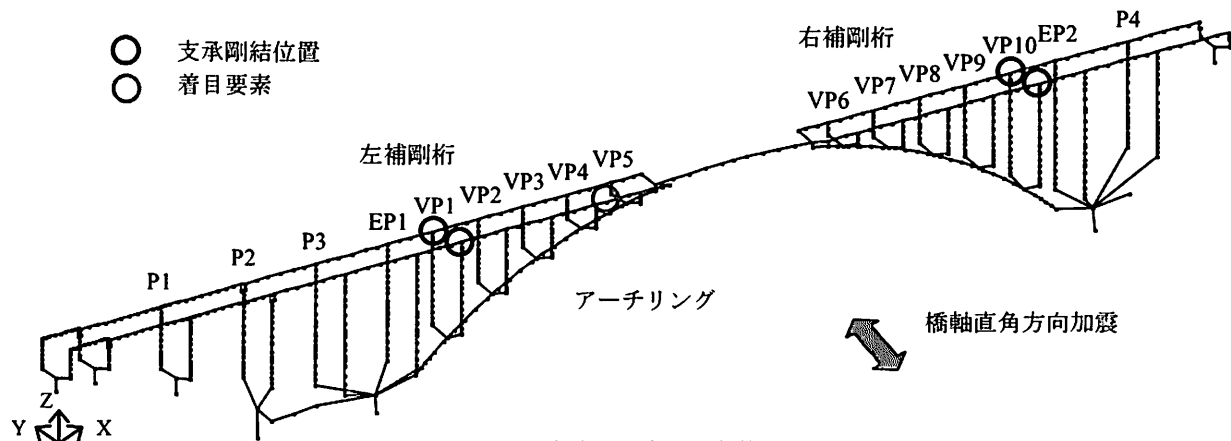
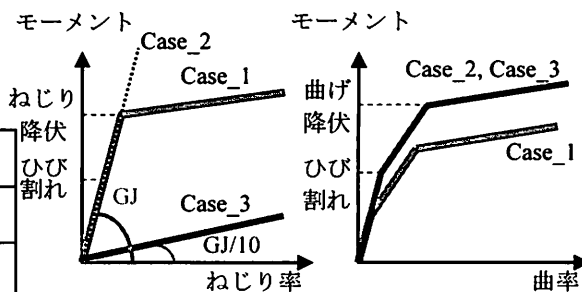


図-1 解析モデルの全体図

表-1 解析ケース

	ねじりと曲げの 相関曲線の考慮	ねじり骨格曲線	曲げ骨格曲線
Case_1	○	相関曲線により変化 (バイリニア)	相関曲線により変化 (トリリニア)
Case_2	×	初期剛性GJ (線形)	純荷重時 (トリリニア)
Case_3	×	等価剛性(1/10)GJ (線形)	



(a) ねじり (b) 曲げ
図-2 各ケースの骨格曲線のイメージ

多くの部材に対して非線形性を考慮していることから、0.0002秒とした。減衰は、部材別Rayleigh減衰を使用した。

(4) 解析ケース

解析ケースを表-1に示す。また、各ケースの骨格曲線のイメージを図-2に示す。Case_1は、ねじりと曲げの相関曲線を考慮した非線形動的解析である。このため、ねじり骨格曲線及び曲げ骨格曲線は純荷重時と比べ変化する。Case_2は、ねじり剛性を初期剛性GJとし、ねじり非線形は考慮していない。曲げについては、一般的に使用される断面計算により得られた純荷重時の骨格曲線を使用した。Case_3は、設計に際して、ねじりひび割れの発生が想定される部材に対して初期剛性GJの1/10程度の等価剛性を有する線形部材として考慮した等価線形解析を実施することから、ねじり剛性を(1/10)GJとした等価線形解析を行った。このとき、曲げ骨格曲線はCase_2と同様に純荷重時の骨格曲線を使用した。なお、Case_2とCase_3では、ねじりと曲げの相関曲線は考慮していない。

等価線形解析において、ねじり剛性を変化させた部材は、固定アーチ橋における補剛桁及びアーチリングである。また、ねじりと曲げの相関曲線を考慮した非線形動的解析において、ねじりと曲げの相関曲線を考慮した部材についても同様である。

(5) ねじりと曲げの相関曲線を考慮した非線形動的解析における留意点

今回、ねじりと曲げの相関曲線を考慮した地震応答解析においては、時々刻々変化する断面力に対応してイベントを判定することができるように、ひび割れ、ねじり降伏、曲げ降伏の3つのイベントに対する相関曲線を準備した。ここで、ねじり降伏とは、部材断面の表面で発生したひび割れが中空内面まで到達することにより、ねじり剛性が急変する点である。一方、曲げ降伏は主鉄筋降伏またはコンクリートの圧壊により曲げ剛性が急変する点を表す。このように、降伏の定義が異なることから、別々の相関曲線として定義している。

使用したねじりと曲げの相関曲線について、ひび割れ相関曲線は充実断面の実験結果より定式化した実験式が3箱中空断面実験のひび割れ相関曲線を精度よく表していたため、そのまま使用した。ねじり降伏相関曲線、曲げ降伏相関曲線については、3次元有限要素法を使用したパラメトリック解析を実施し、軸応力比、帯鉄筋体積比を考慮可能なねじりと曲げの相関曲線を作成し、動的解析に適用した。

また、ねじり剛性、曲げ剛性については、ねじりと曲げの相関曲線を考慮した場合でも、純荷重時と同じ剛性比(K_2/K_1 , K_3/K_1)とした。さらに、履歴モデルは、曲げ、ねじりともに武田モデルを使用

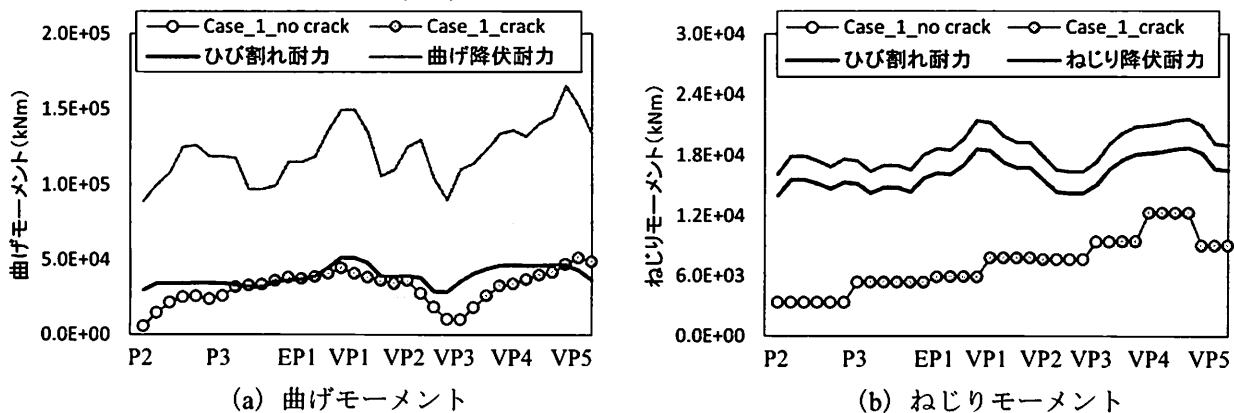
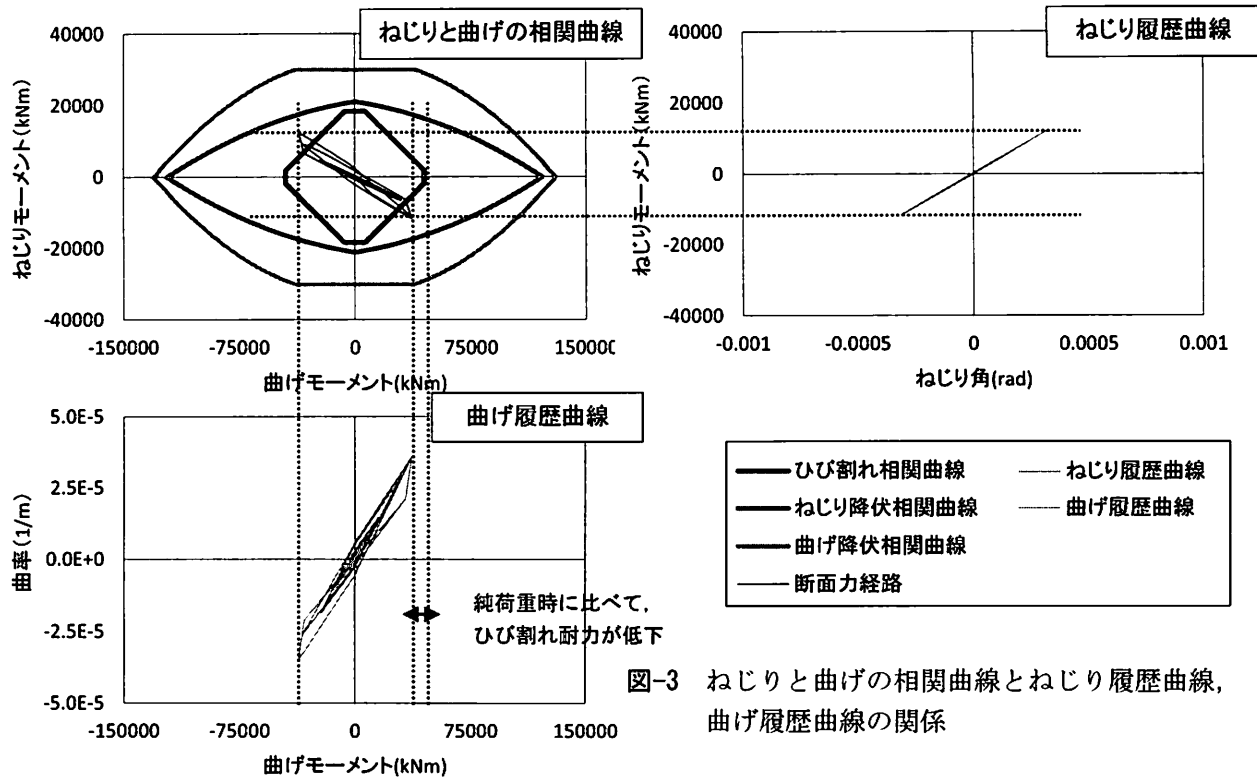


図-4 左補剛桁に生じる最大断面力と純荷重時の耐力との比較

した。このとき、曲げの除荷時剛性低下指数 α は道示Vに従い⁶⁾、0.5とするのに対し、ねじりの α は0.75とし、ねじり履歴曲線の形状を表現した⁷⁾。

3. 地震時応答の比較

(1) Case_1の応答

a) イベント発生状況

ねじりと曲げの相関曲線を考慮した地震応答解析であるCase_1では、初めにVP5、VP6上の補剛桁においてひび割れが発生した。その後、それぞれP2橋脚、P4橋脚の方向にひび割れの発生する要素が増加するとともに、アーチスプリングにおいてもひび割れが発生した。最終的に、補剛桁の中央やアーチリブでも、ひび割れに到達する要素が確認された。しかし、ねじり降伏及び曲げ降伏に到達した要素は

確認されなかった。

b) ねじりと曲げの相関曲線と履歴曲線の関係

ひび割れの発生が確認された要素のうち、図-1に示すVP4～VP5間の補剛桁の着目要素におけるねじりと曲げの相関曲線、断面力経路、ねじり履歴曲線、曲げ履歴曲線を図-3に示す。ここで、断面力経路とは、着目要素の各時刻におけるねじりモーメント及び曲げモーメントをプロットし、結んだものを指す。この要素では、断面力経路がひび割れ相関曲線を越えており、ひび割れへの到達が確認される。このため、曲げ履歴曲線では、ねじりと曲げの相関曲線を考慮することによって、純荷重時のひび割れ耐力よりも小さな曲げモーメントでひび割れが発生し、曲げ剛性が早く低下することがわかる。ねじり履歴曲線についても、純荷重時のひび割れ耐力よりも小さなねじりモーメントでひび割れが発生するが、ねじり骨格曲線はひび割れ後も初期剛性を維持すること

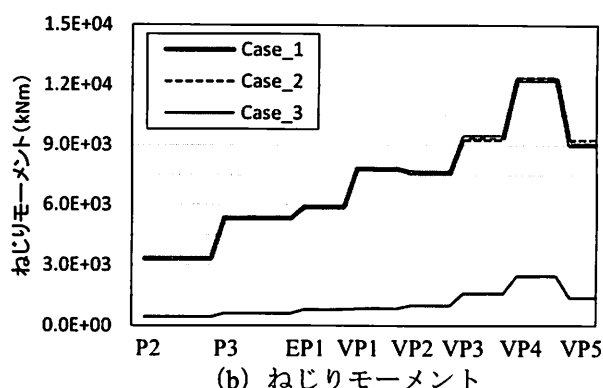
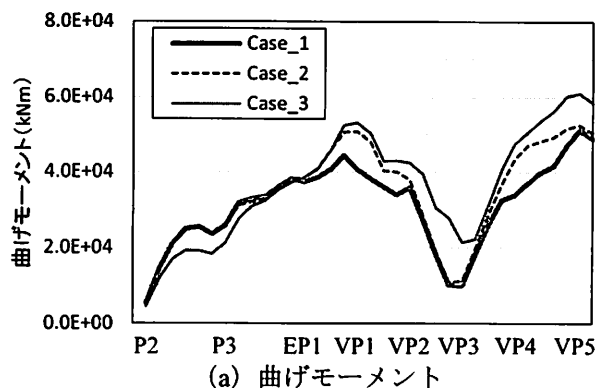


図-5 左補剛桁に生じる最大断面力の比較

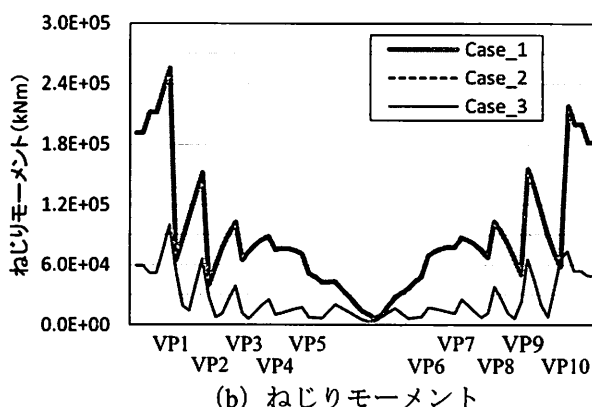
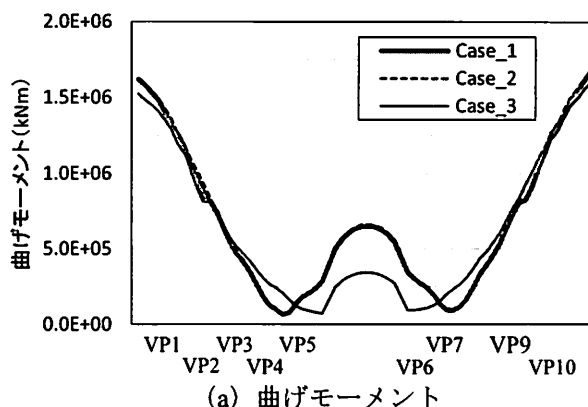


図-6 アーチリングに生じる最大断面力の比較

から、ねじり剛性の低下は見られなかった。

c) 最大断面力と純荷重時の耐力の比較

左補剛桁の最大断面力と純荷重時の耐力との比較を図-4に示す。図-4中には、ひび割れが確認された箇所を併せて示す。着目要素を含むVP4～VP5間の要素では、最大曲げモーメントが純荷重時のひび割れ耐力に比べて小さいにもかかわらず、ひび割れの発生が確認された。これは、VP4～VP5間では他の要素に比べて大きなねじりモーメントが生じており、ひび割れ耐力が低減されたためと考えられる。一方、P3橋脚からVP2の間では、ひび割れが確認された要素の最大曲げモーメントと純荷重時のひび割れ耐力がほぼ等しい。P3からVP2の間では、ねじりモーメントはそれほど生じておらず、ねじりと曲げの相関曲線を考慮しても、曲げのひび割れ耐力が低減されなかったと考えられる。なお、本検討において、ねじり降伏及び曲げ降伏に到達する要素は確認されなかった。右補剛桁では、左補剛桁と同様の傾向が見られ、V6～V8間、V9～P4橋脚間でひび割れの発生が確認された。また、アーチリングについては、スプリングやアーチリブでひび割れが確認されたものの、曲げがねじりに比べて卓越しており、ねじりと曲げの相関曲線を考慮しても、曲げ骨格曲線にはほとんど影響が現れなかった。

(2) Case_2の応答との比較

a) 補剛桁

左補剛桁において生じた最大断面力の比較を図-5に示す。全ての解析ケースにおいて、VP1やVP5直上の補剛桁で曲げモーメントが大きく生じていた。Case_1とCase_2を比較すると、左補剛桁の最大曲げモーメントは、EP1～VP2及びVP3～VP5ではCase_1が小さく、その他の要素ではほぼ等しくなった。Case_1が小さくなった箇所と図-4に示したひび割れが確認された箇所が重なることから、ねじりと曲げの相関曲線を考慮することによって、Case_2に比べて小さな曲げモーメントでひび割れが発生し、早く剛性が低下した結果、最大曲げモーメントも低減されたと考えられる。ねじりモーメントについては、Case_1とCase_2でほぼ一致した。ねじりはひび割れが発生しても、骨格曲線ではねじり剛性が低下しないことから、線形剛性で解析したCase_2の応答とほぼ一致したと考えられる。

b) アーチリング

アーチリングにおいて生じた最大断面力の比較を図-6に示す。全てのケースで左右のスプリングにおいて大きな曲げモーメントが生じていた。また、ねじりモーメントは、アーチリブの両端部で大きく生じている。また、鉛直材によって拘束された箇所

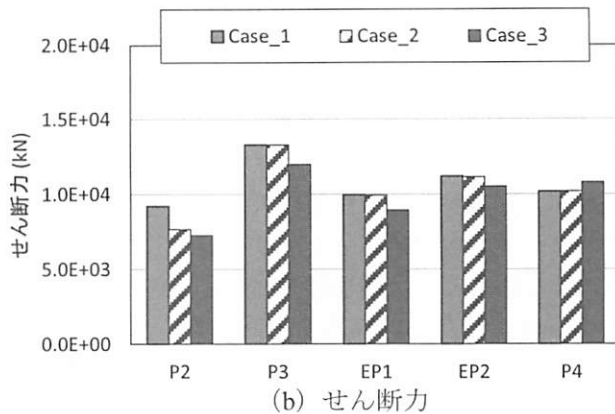
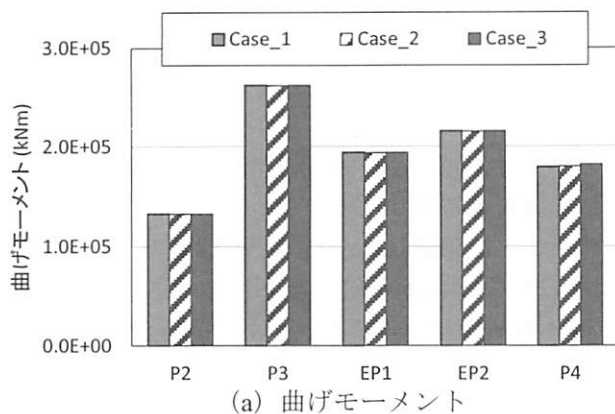


図-7 橋脚・エンドポスト基部に生じる最大断面力の比較

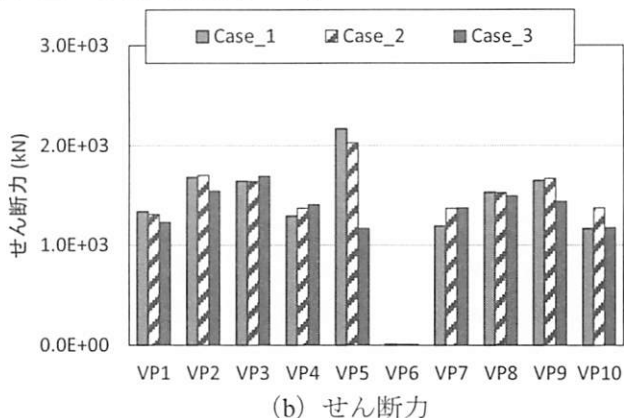
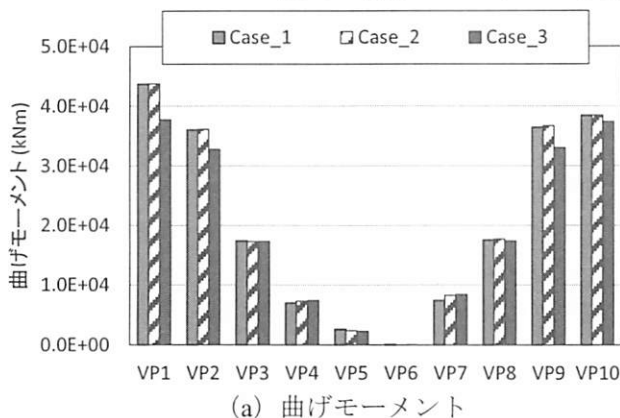


図-8 鉛直材基部に生じる最大断面力の比較

では、ねじりモーメントが小さくなることからわかる。最大曲げモーメント、最大ねじりモーメントはほぼ一致し、ねじりと曲げの相関曲線を考慮した影響は小さかった。

c) 橋脚及びエンドポスト基部

橋脚・エンドポスト基部に生じた最大断面力を図-7に示す。橋脚及びエンドポストの最大曲げモーメントは、全ての解析ケースでほぼ一致した。これは、降伏モーメントを超える大きな曲げモーメントが生じ、最大曲げモーメントが頭打ちとなったためである。最大せん断力について、Case_1とCase_2を比較すると、どの橋脚・エンドポストでも同程度のせん断力が生じていたが、P2橋脚では、Case_1の方がわずかに大きくなった。Case_1において大きなせん断力が生じたP2橋脚が支持する補剛桁では、ねじりと曲げの相関曲線を考慮したことにより、Case_2に比べて小さな曲げモーメントでひび割れが生じ、曲げ剛性の低下が早く生じた。このため、Case_1とCase_2の振動モードがわずかに異なり、P2橋脚に大きなせん断力が生じたと推定される。

d) 鉛直材基部

鉛直材基部に生じた最大断面力を図-8に示す。最大曲げモーメントはわずかに異なる箇所も見られるが、全ての鉛直材においてほぼ同程度であった。最

大せん断力についても、曲げモーメントと同傾向を示すが、振動モードの変化により、各橋脚において生じるせん断力がわずかに異なった。また、Case_1、Case_2では、高さが低いVP5において最大せん断力が生じていた。

(3) Case_3の応答との比較

a) 補剛桁

図-5より、最大曲げモーメントを比較すると、EP1を境とし、P2橋脚側ではCase_1が大きく、VP5側ではCase_1が小さかった。Case_3の場合、ねじり剛性を初期剛性GJの1/10として解析を行うため、Case_1と比べ同一次数の固有周期が長くなる。また、橋軸直角方向について卓越する振動モードには、補剛桁がねじられるモードが存在し、これらの振動モードはねじり剛性の影響を受けやすいため、最大曲げモーメントの分布も変化したと考えられる。また、ねじりモーメントについては、Case_1の方がCase_3に比べて非常に大きく評価した。したがって、ねじり剛性を初期剛性の1/10とした場合、補剛桁に生じるねじりモーメントを危険側で評価するといえる。

b) アーチリング

また、図-6より、補剛桁と同様に最大曲げモーメントの分布も異なることがわかる。ねじりモーメン

トについては、全ての要素において、Case_1がCase_3に比べて大きく、アーチリングの応答についても、Case_3では危険側に評価することがわかる。

c) 橋脚及びエンドポスト基部

図-7より、曲げモーメントについては、全ての橋脚基部の要素が非線形領域に入ったことから、最大曲げモーメントが頭打ちとなり、一致した。しかし、最大せん断力では、P4橋脚を除き、その他全ての橋脚でCase_1の方がCase_3を上回った。このため、Case_3では、橋脚のせん断力についても危険側に評価する可能性がある。

d) 鉛直材基部

図-8より、最大曲げモーメントは、VP1やVP10等、両端の鉛直材でCase_3の方が小さく、中央に位置する鉛直材ではCase_1とCase_3で同程度であった。Case_3においては、アーチリングはねじり変形しやすく、鉛直材に生じる慣性力によって、鉛直材が曲げ変形が生じることに加え、アーチリングには、鉛直材の曲げ変形に伴うねじり変形が生じる。このとき、両端の鉛直材は中央の鉛直材に比べ背が高く、大きな慣性力が作用することから、ねじり剛性の変化の影響が明確に表れたと考えられる。また、最大せん断力については、Case_1ではVP5で最大であったのに対し、Case_3ではVP3において最大であった。特に、VP5ではCase_1に比べ、1/2程度のせん断力しか生じていないことがわかる。この理由として、鉛直材は、補剛桁、アーチリングともに連結する部材であるため、ねじり剛性の違いによる振動モードの変化の影響が現れたことが考えられる。

(4) ねじりを厳密に考慮した影響

今回の検討では、ねじりを厳密に考慮したCase_1とねじり線形解析のCase_2で、補剛桁、アーチリングの断面力はほぼ同程度であった。しかし、橋脚のせん断力や鉛直材の曲げモーメント、せん断力については、Case_2の方がCase_1に比べて小さい箇所も見られ、橋脚や鉛直材の断面力を危険側で評価する可能性があることがわかった。

また、ねじり剛性を初期剛性の1/10としたCase_3では、補剛桁及びアーチリングに生じる最大曲げモーメントの分布がCase_1の分布とは異なり、また、補剛桁、アーチリングに作用するねじりモーメントを過小評価した。さらに、橋脚、鉛直材の最大せん断力についても、比較的小さく評価する傾向にあった。このように、ねじり剛性を小さく設定する場合は、振動モードの変化の影響が現れ、最大断面力を適切に評価できない可能性がある。

6. おわりに

本検討により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) ひび割れが発生した補剛桁端部やアーチリブにおいては、ねじりと曲げの相関曲線を考慮することによって純荷重時よりも小さな断面力でひび割れに到達することを確認した。なお、本解析では、ねじり降伏、曲げ降伏に到達する要素は確認されなかった。
- 2) 本解析では、ねじり降伏、曲げ降伏に到達する要素が確認されなかったことから、ねじりと曲げの相関曲線を考慮した解析とねじり剛性を初期剛性GJとした解析より得られた最大断面力が概ね一致することを示した。ただし、ねじり剛性を初期剛性GJとした場合、橋脚や鉛直材基部のせん断力については、危険側で評価する箇所も見られ、留意が必要である。
- 3) ねじり剛性を初期剛性の1/10とした解析では、補剛桁及びアーチリングのねじりモーメントを危険側に評価した。また、ねじり剛性を小さく設定することにより固有周期や振動モードが変化するため、各部材のねじりモーメント以外の断面力にも影響が現れ、最大断面力を適切に評価することができない可能性があることがわかった。

参考文献

- 1) 大塚久哲，竹下永造，浦川洋介：軸力，曲げ／せん断，及びねじりの複合荷重を同時に受けるRC部材の耐震性能と相関特性，土木学会論文集，No.801／I-73，pp.123-139，2005。
- 2) 土木学会西部支部：中径間橋梁の動的耐震設計，pp.37-79，2002。
- 3) 箴島隆司，大塚久哲，福永靖雄，山崎智彦：曲げとねじりを受ける3室中空断面RC部材の力学特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.691-696，2010。
- 4) 新田直也，大塚久哲，崔準祐，服部匡洋：ねじりと曲げの交番载荷を受ける三室箱桁の有限要素解析，第1回九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム，2013。
- 5) 服部匡洋，大塚久哲，新田直也，崔準祐：三室箱桁断面を有するRC部材に対する有限要素解析に基づくねじりと曲げの相関曲線の定式化，第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，2014。（投稿中）
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2012。
- 7) 大塚久哲，服部匡洋：ねじりと曲げの相関曲線及びねじり非線形を考慮した動的解析手法の提案，土木学会論文集A1（構造・地震工学）Vol.67（2011），No.4，[特]地震工学論文集，Vol.32，2012。