

曲線橋におけるゴム支承の引張特性を考慮した解析による ゴム支承のコンパクト化と曲率半径との関係

岩本周哲¹・植田健介²・崔準祐³

¹学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

²正会員 (株) ビービーエム開発本部
(〒103-0027 東京都中央区日本橋 3 丁目 11 番 1 号 HSBC ビルディング 3 階)

³正会員 九州大学大学院 助教 工学研究院 社会基盤部門
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、多くの橋梁において鋼製支承が被害を受けたことから、それ以降、橋梁に作用する地震力の分散や橋梁の免震化を目的とし、ゴム支承を導入した橋梁構造物が急増した。ゴム支承は、水平力および圧縮力には高い耐荷性能を有しながら、水平方向にはゴムの変形で柔らかに抵抗しており、上部構造の慣性力を低減することができる。道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁾によれば、ゴム支承等の弾性支承を用いた地震時水平力分散構造を有する橋や免震橋では、橋脚に生じる塑性化と支承の動的挙動との総合作用の影響により、1自由度系を対象としたエネルギー一定則において非線形応答の推定精度が低下する場合があります。動的照査法により耐震性能の照査を行うのがよいとされている。このことから、近年では、ゴム支承を採用した橋梁の耐震性評価を行う際は、橋梁全体系の地震応答解析を行うのが一般的になってきている。

ゴム支承の設計においては、支承部にできるだけ引張力が生じないように配慮して行われるのが一般的であるが、橋梁形式（特に床版の張り出しが大きな橋、斜橋、曲線橋）によっては、上部構造に生じる橋軸回りのモーメントや支承高の高い橋梁における上部構造の転倒モーメントにより、地震時支承部に引張力が生じる可能性が考えられる。ゴム支承に引張力が生じた場合は、橋梁の各部に予期しない応力が発生する可能性があり、こうしたゴム支承の引張方向の特性を十分に把握する必要がある。

ゴム支承の力学的特性については、これまでせん断特性や圧縮特性に関する実験は数々行われており、

これらの力学的特性は明らかになりつつあるのに対し、引張特性に関しては実験等による研究事例が少なく、十分な知見が得られていない。このため、現在のゴム支承を用いた橋梁の地震応答解析を行う際は、ゴム支承の引張特性を考慮せず、圧縮剛性と引張剛性が等しい線形モデルを用いるのが一般的である。しかし、曲線橋のような上部構造の地震時挙動が複雑な橋梁にゴム支承を採用した場合、地震時支承部に負反力が生じやすくなり、現行のゴム支承モデルではゴム支承や橋梁各部の地震時挙動を精度よく評価することは困難であると考えられる。

そこで筆者らは、ゴム支承の引張特性が支承部反力や上部構造の地震時挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、過去に実施したゴム支承の引張特性試験²⁾に基づいてゴム支承の引張特性に対する解析モデルを提案した³⁾。その提案モデルを地震時支承部に負反力が生じやすいとされている曲線橋の地震応答解析に適用してみると、地震時引張反力が従来より小さく評価され、ゴム支承のサイズをコンパクト化することが可能であることを確認した³⁾。本検討では、曲率半径の変化によりゴム支承の引張方向反力がどのように変化し、ゴム支承のコンパクト化がどのようになるかについて基礎的に調査することを目的とし、ゴム支承を採用した直線橋と曲率半径の異なる5つの曲線橋を対象に地震応答解析を実施した。

2. 解析対象橋梁

本研究では、図-1に示すような橋長200mの4径間

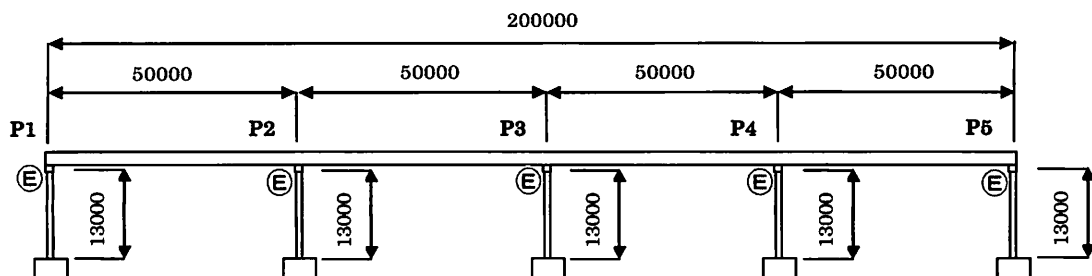


図-1 解析対象橋梁の概略図(単位: mm)

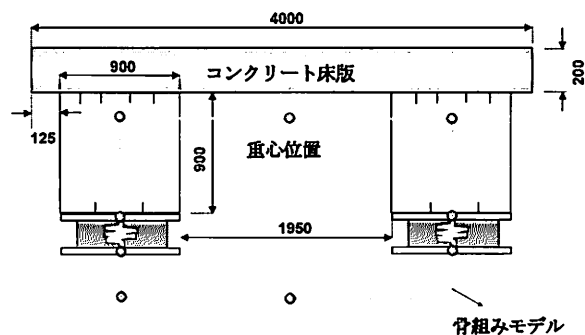


図-2 上部構造のイメージ図(単位: mm)

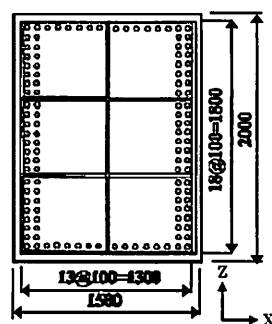


図-3 橋脚柱の断面図(単位: mm)

表-1 モデルと曲率半径

モデル名	曲率半径R
モデルA	∞
モデルB	290m
モデルC	250m
モデルD	200m
モデルE	150m
モデルF	106m

連続鋼箱桁橋を対象とし、表-1に示すように直線橋モデル（以後、モデルA）と曲率半径Rをパラメータとした5つの曲線橋(モデルB: R=290m, モデルC: R=250m, モデルD: R=200m, モデルE: R=150m, モデルF: R=106m)を作成して比較検討を行った。支承はすべて積層ゴム支承を採用し、1支承線上に2基の支承を配置する構造とした。上部構造は鋼箱桁とコンクリート床版で構成されており、そのイメージ図を図-2に示す。橋脚は、図-3に示す断面を有するRC単柱T型橋脚とし、橋脚高はすべて13mとした。

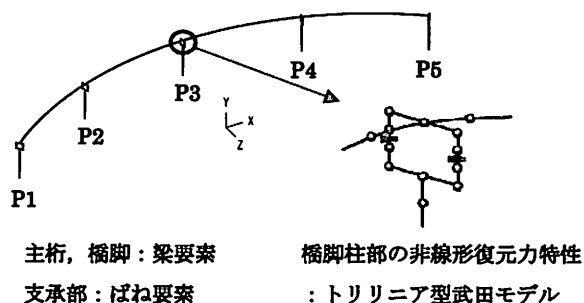


図-4 解析モデル

3. 解析モデルと解析条件

図-4 に対象橋梁の解析モデルを示す。桁及び橋脚は梁要素で、支承部は6方向成分を有するばね要素でモデル化した。支承部については、主桁の接線方向から法線方向に張り出した剛梁と橋脚の張り出し部の剛梁を連結する構造とし、支承部の高さを考慮している。また、本モデルでは橋脚の柱部のみ材料非線形性を考慮しており、非線形復元力特性はトリリニア型武田モデルを使用した。なお、本研究では支承部の引張特性を考慮した解析モデルを採用することによる橋梁構造物の応答変化に着目しており、地盤ばねは設けないこととした。入力地震動は道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁾に記載されている

標準波のレベル2地震動タイプⅡ-Ⅱの3波を用い、橋軸直角方向加震による検討を行うこととした。解析手法は Newmark- β 法 ($\beta=0.25$) による直接積分法を用い、積分時間間隔は 0.01 秒、減衰は Rayleigh 減衰により評価した。また、支承の水平剛性および鉛直剛性に関しては、道路橋支承便覧⁴⁾を参考にして算定した。また、積層ゴム支承の回転条件は、道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁾を参考にし、橋軸回りに対しては固定、橋軸直角回りと鉛直軸回りに対してはフリーとした。

4. ゴム支承の検討モデル

本章では、現行の設計手法に基づいたゴム支承のモデル（以後、従来モデル）を作成し、本研究で提案するモデル（以後、提案モデル）と比較検討を行

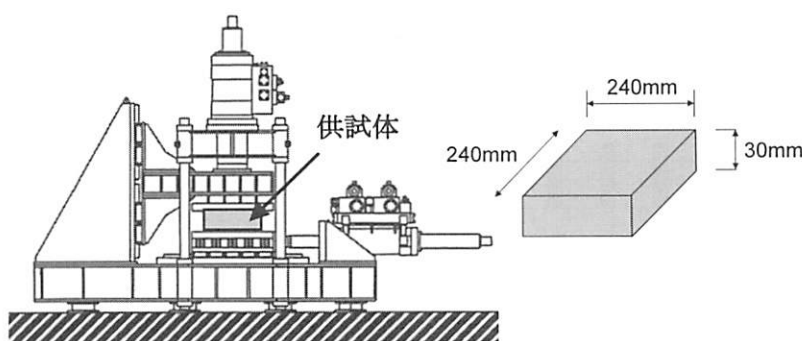
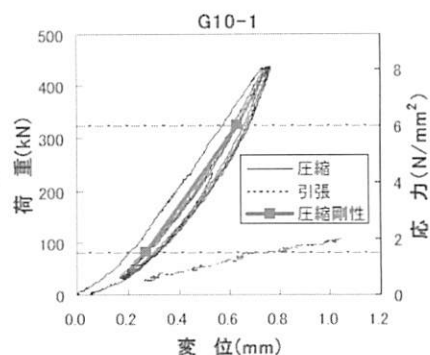
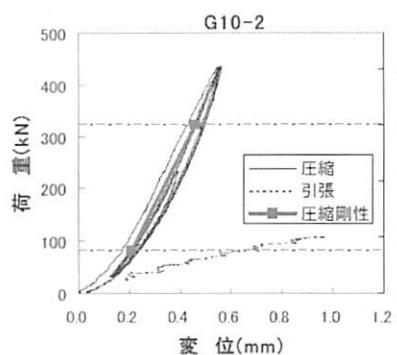


図-5 2軸試験機と供試体の概要²⁾



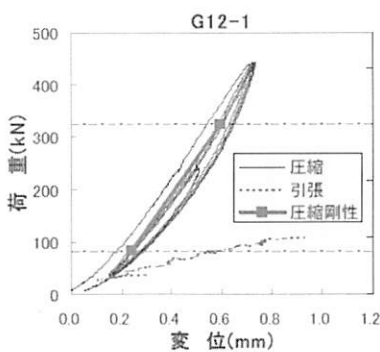
(a) G10-1

(せん断弾性係数: 1.0N/mm^2)



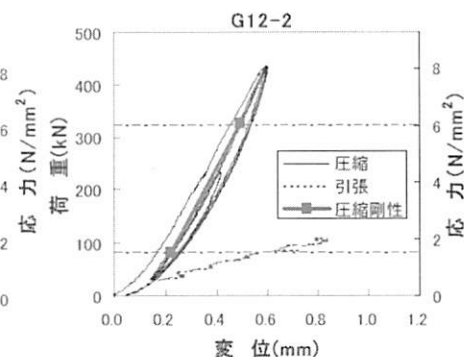
(b) G10-2

(せん断弾性係数: 1.0N/mm^2)



(c) G12-1

(せん断弾性係数: 1.2N/mm^2)



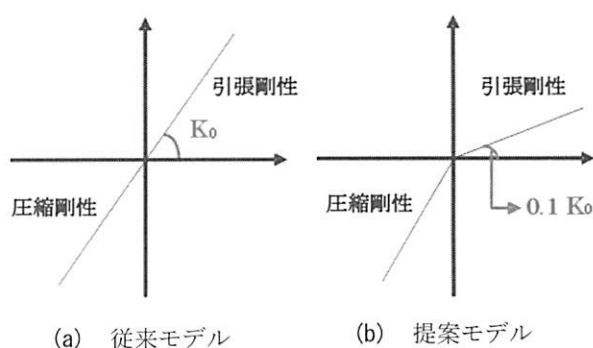
(d) G12-2

(せん断弾性係数: 1.2N/mm^2)

図-6 LRBの荷重・変位関係²⁾

うこととした。従来モデルは、道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁾を参考に、ゴム系支承の引張剛性を圧縮剛性と等しく設定したものである。一方、提案モデルは植田らが過去に実施したゴム系支承の引張試験²⁾に基づいて引張剛性を設定したモデルである。このゴム支承の引張試験は、図-5に示す2軸試験機と鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)を用いて行ったものであり、せん断弾性係数が 1.0N/mm^2 および 1.2N/mm^2 の供試体を各2体ずつ、計4体について圧縮剛性確認試験、引張破壊試験を行っている。ゴムの引張方向特性を圧縮方向特性と比較できるように、まず各供試体とも最初に圧縮剛性確認試験を行った後に引張破壊試験が行われている。供試体の寸法は $240\text{mm} \times 240\text{mm} \times 30\text{mm}$ で1層のゴム厚は 5mm 、ゴム層数は6層である。

この引張試験によって得られた4つの供試体の荷重変位関係を図-6に示す。これらの結果から、すべての供試体で圧縮剛性に比べ引張剛性が小さいことがわかる。4つの供試体の圧縮剛性に対する引張剛性の比率は10%~15%であり、この試験結果を参考とし、ここではゴム支承の引張剛性に対して圧縮剛性の10%を持たせた新しいモデルを作成した。本研究で用いた従来モデルと提案モデルを図-7に示



(a) 従来モデル

(b) 提案モデル

図-7 ゴム支承の鉛直方向に対する解析モデル

す。この提案モデルを用いてゴム支承の地震時挙動特性について従来モデルと比較した。

5. 地震応答解析の結果

(1) 従来モデルを用いたゴム支承の試設計

従来モデルと提案モデルを用いたゴム支承の地震時応答を比較する前に、まず従来モデルに基づいてゴム支承の試設計を行った。試設計は、道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁾に記載されている支承部の反力照査法に基づいて行った。まず、検討対象橋

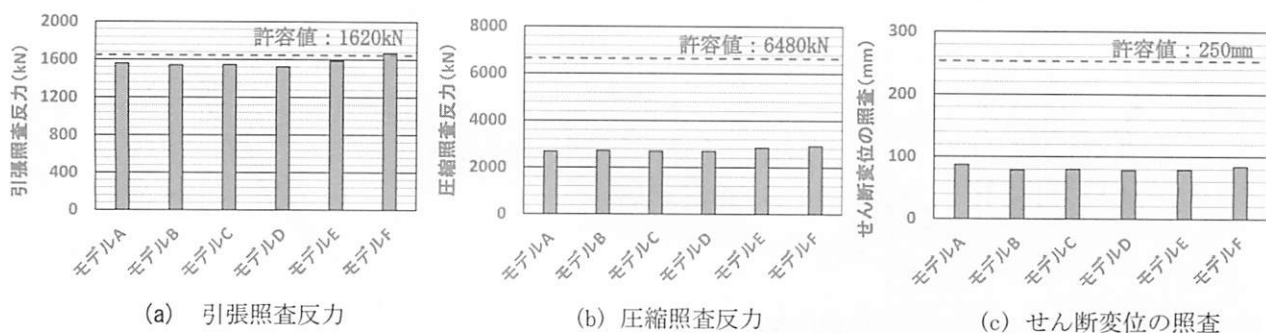


図-8 900mm×900mm×100mm のゴム支承の照査

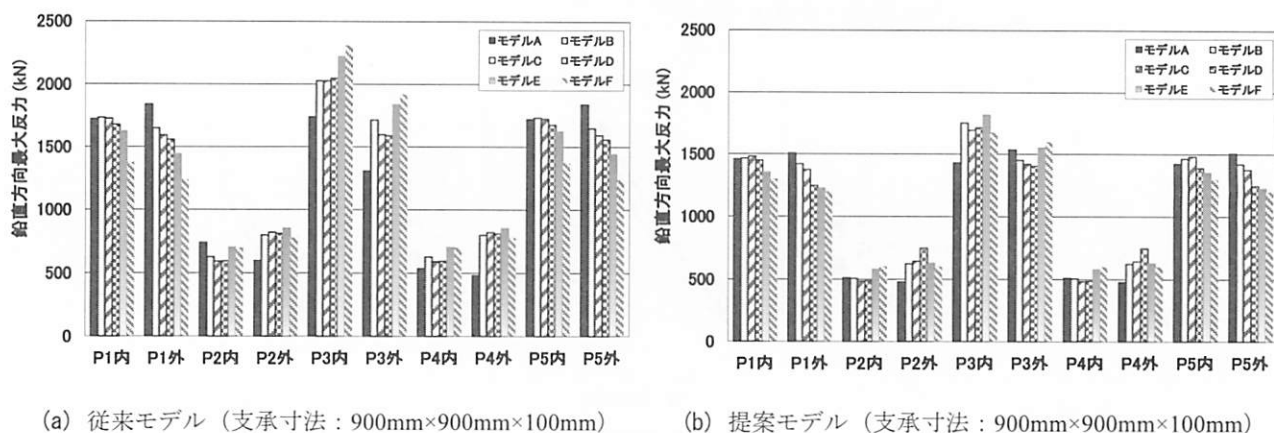


図-9 各支承部の最大引張力

梁の全体系地震応答解析を行い、ゴム支承に生じる最大圧縮反力、最大引張反力、最大せん断変位をそれぞれ求めた。そして、道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁾に記載されているゴム支承の照査に用いる式に代入し、各照査項目を対象橋梁に設置されているすべてのゴム支承に対して算出した。式(1)と式(2)は、引張照査に用いる式を示したものである。

$$R_U = R_D - \sqrt{R_{HEQ}^2 + R_{VEQ}^2} \quad (1)$$

$$R_{VEQ} = \pm k_v R_D \quad (2)$$

R_U 引張照査反力

R_D ：上部構造の死荷重により支承に生じる反力

R_{HEQ} ：設計鉛直震度によって生じる鉛直方向の地震力

k_v ：設計水平震度に乗じる係数

(レベル2地震動タイプⅡの場合 0.67)

これらの値を道路橋支承便覧⁴⁾に記載されている許容値と対照し、各支承部において支承寸法が設計基準を満たす最小のサイズとなるように寸法を決めるのが望ましいと考えられるが、本検討では、許容

値に対して最もクリティカルになった箇所で支承寸法を決定し、この寸法を全ての支承部に適用する方法により試設計を行うこととした。図-8に照査内容の一例として900mm×900mm×100mmのゴム支承を用いた場合の照査結果を示す。本検討では、全ての橋梁モデルにおいて引張照査反力がゴム支承寸法の決め手となった。

(2) 従来モデルと提案モデルにおける支承部の引張方向反力および上部構造の挙動の比較

本節では、前節で決定した各モデルのゴム支承に対し、従来モデルと提案モデルを用いて地震応答解析を行い、橋梁の曲率半径と支承部に生じる引張方向反力の関係性に注目することとした。本検討で用いた地震動は、3.に示したようにレベル2地震動タイプⅡ-Ⅱの3波であり、入力方向は図-4に示すZ軸方向とした。

図-9は、モデルA～モデルFにおいて、各支承部の引張方向反力の最大値を示したものである。ここでは、曲率半径の変化による支承部の引張方向反力の変化をみることを目的としているため、ゴム支承のサイズは全モデルで900mm×900mm×100mmとした。まず、従来モデルと提案モデルの引張方向反力を比較すると、従来モデルよりも提案モデルの方

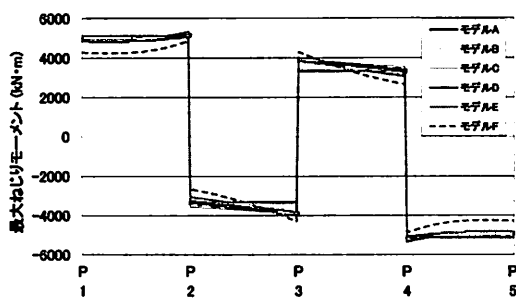


図-10 上部構造の最大ねじりモーメント

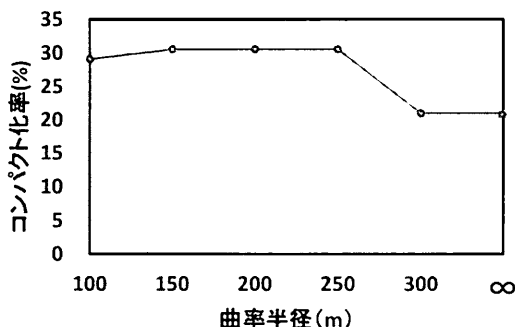


図-11 曲率半径とコンパクト化率の関係

で引張方向反力が小さくなる傾向がみられた。これは、提案モデルでは従来モデルよりも引張剛性を小さく設定しているため、支承部に生じる引張方向反力が小さくなったと考えられる。また、曲率半径の変化に伴う支承部の引張方向反力の変化をみると、従来モデル、提案モデルともに橋梁の曲率半径が小さくなるにつれて、P1, P5 橋脚支承においては引張方向反力が小さくなる傾向が見られるが、P2, P3, P4 橋脚支承においては橋梁の曲率半径が小さくなるにつれて引張方向反力が大きくなる傾向が確認された。これは、橋梁の曲率半径の変化に伴い、上部構造の地震時挙動特性が変化したことが原因と考えられる。図-10 に従来モデルを用いた場合のモデル A～モデル F の上部構造の最大ねじりモーメントを示す。この結果から、曲率半径が小さくなるにつれて P2, P3, P4 橋脚を基点とした上部構造のねじりモーメントが大きく発生しているのに対し、P1, P5 橋脚の上部構造付近においてはその応答が小さくなることがわかる。このため、中央径間においては上部構造のねじりの影響を受け、曲率半径の変化に伴い支承部の引張方向反力が大きく、側径間においてはそれが小さくなったと考えられる。このように、橋梁の曲率半径の変化に伴って上部構造の応答が異なり、ゴム支承の引張方向反力の応答にも影響を与えていることがわかった。本研究で対象とした橋梁では引張照査が照査項目の中で最もクリティカルになったため、橋梁の曲率半径はゴム支承寸法決定に影響してくると思われる。

表-2 従来モデルと提案モデルで決定した
ゴム支承サイズと各モデルのコンパクト化率

	曲率半径 (m)	従来モデルで 決定した寸法	提案モデルで 決定した寸法	コンパクト化率 (%)
モデルA	∞	900×900×100	800×800×100	21.0
モデルB	290m	900×900×100	800×800×100	21.0
モデルC	250m	900×900×100	750×750×100	30.6
モデルD	200m	900×900×100	750×750×100	30.6
モデルE	150m	900×900×100	750×750×100	30.6
モデルF	106m	950×950×100	800×800×100	29.1

表-3 従来モデルと提案モデルでゴム
支承寸法を決定した支承箇所

寸法を決めた支承箇所	従来モデル	提案モデル
モデルA(直線橋)	P1, P5	P1, P5
モデルB(R=290)	P3	P1, P5
モデルC(R=250)	P3	P1, P5
モデルD(R=200)	P3	P1, P5
モデルE(R=150)	P3	P1, P5
モデルF(R=106)	P3	P3

(3) 曲率半径とゴム支承のコンパクト化の関係

本節では、前節の内容を踏まえ、ゴム支承のコンパクト化を各モデルに対して行った場合、橋梁の曲率半径の違いがゴム支承のコンパクト化率に影響を与えるのではないかと考え、曲率半径とゴム支承のコンパクト化率の関係を調査した。検討の流れは、5. (1)にて述べたゴム支承の試設計方法と同様に、提案モデルを用いてゴム支承の許容値を満たすゴム支承サイズを決定し、従来モデルを用いて試設計したゴム支承と比較してコンパクト化率を算出した。

従来モデルと提案モデルで決定したゴム支承のサイズと、それを基に算定したゴム支承のコンパクト化率を表-2に、曲率半径とゴム支承のコンパクト化率の関係を図-11に示す。これらの結果をみると、曲線橋では曲率半径が変化してもコンパクト化率に変化はなく、直線橋になるとゴム支承のコンパクト化率が10%程度小さくなっており、曲率半径とゴム支承のコンパクト化の相関性はみられなかった。

一方、直線橋と曲線橋でゴム支承のコンパクト化率が異なるのは、ゴム支承のサイズを決定した支承箇所が両モデルで異なっていたことが原因と考えられる。表-3は、全ての橋梁モデルにおいて、ゴム支承の許容値に対して最もクリティカルになる支承箇所を従来モデルと提案モデルで示したものであるが、直線橋と曲線橋とで支承寸法を決定した支承箇所が異なることがわかる。

6. まとめ

本研究では、曲率半径の異なる6つの曲線橋に対して地震応答解析を行い、曲率半径の変化に伴うゴム支承の引張方向反力の変化やゴム支承の引張特性を考慮した解析モデルによるゴム支承のコンパクト化について、パラメトリック検討を行った。本検討より得られた知見を以下に示す。

(1) 曲率半径の変化に伴うゴム支承の引張方向反力の応答特性について

従来モデルと提案モデルを用いた橋梁全体系地震応答解析により、曲率半径をパラメータとしてゴム支承の引張方向反力を比較したところ、曲率半径が小さくなるにつれ、支承部の引張方向反力が中央径間部の支承では大きく、側径間部の支承では小さくなることがわかった。これは、曲率半径の変化により上部構造のねじり応答の変化が異なるためと考えられる。

(2) ゴム支承のコンパクト化と曲率半径との関係性

曲線橋では曲率半径が変わってもコンパクト化率に変化はなく、直線橋ではゴム支承のコンパクト化

率が曲線橋に比べ10%程度小さくなる結果となり、曲率半径の変化とゴム支承のコンパクト化率の相関性はみられなかった。これは、支承部の引張反力照査において、許容値に対して最もクリティカルになった支承箇所が直線橋と曲線橋で異なっていたことが原因と考えられるが、今後ゴム支承のコンパクト化方法についてさらに検討を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012.
- 2) 植田健介，星隈順一，岡田太賀雄，堺淳一：鉛プラグ入り積層ゴムの引張特性に関する研究，土木学会第65回年次学術講演会，pp.65-66，2010.
- 3) 崔準祐，岩本周哲，植田健介：ゴム支承の引張特性試験に基づく解析モデルを用いた橋梁全体系解析によるゴム支承の地震時挙動特性とコンパクト化について，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，2015.（掲載予定）
- 4) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.
- 5) 大塚久哲，栗木茂幸，池永雅良：引張力を受ける鉛プラグ入り積層ゴムの引張特性に関する実験，構造工学論文集，vol.48A，pp.843-850，2002.