

## ゴム緩衝材を用いた PC 橋の地震応答解析

### SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF PC BRIDGE WITH RUBBER SHOCK ABSORBER

森山卓郎\*, 濱本朋久\*\*, 西本安志\*\*\*, 石川信隆\*\*\*\*

Takuro MORIYAMA, Tomohisa HAMAMOTO, Yasushi NISHIMOTO and Nobutaka ISHIKAWA

\*博 (工) 阿南工業高等専門学校講師 建設システム工学科 (〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木 265)

\*\*工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 九州本社 (〒819-0007 福岡県福岡市西区愛宕南 1-1-7)

\*\*\*博 (工) シンバタ工業株式会社 研究開発部 (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

\*\*\*\*工博 防衛大学校名誉教授 (〒238-0022 神奈川県横須賀市公郷町 6-20-68)

キーワード: 桁遊間縮小化, 桁端衝突, ゴム緩衝材, 地震応答解析

(gap reduction, pounding of bridge girders, rubber shock absorber, seismic response analysis)

## 1. 緒言

1995 年の兵庫県南部地震では, 橋桁どうしの衝突や橋桁端部と橋台パラペット部の衝突による損傷の例も見られた<sup>1)</sup>. それゆえ, 近年では, 桁間衝突による影響やそれを緩和するための緩衝材の効果, 桁端衝突を考慮した地震時挙動など, 橋桁の衝突に関する数多くの研究が行われている<sup>2)~6)</sup>.

現行の道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編<sup>7)</sup>において, 地震時水平力分散構造の場合では, 隣接する橋桁どうしあるいは橋桁と橋台で衝突が生じないように必要な桁遊間を設けることを標準としている. しかしながら, レベル 2 地震動に対して衝突が生じないように上部構造端部に大きな遊間を確保した場合, 大変位に対応できる伸縮装置が必要となり, 不経済となるとともに, 維持管理, 走行性, 振動の発生などの問題が顕在化している. 建設コスト削減の観点から考えると, 橋の重要度を細分化することで, 落橋させないことを大前提に交通量の少ない橋梁をターゲットに桁遊間を小さくし, その代わりにレベル 2 地震動に対して桁端の衝突を許容することは一つの方策であると考えられる. そのためには, 桁遊間を小さくした際の隣接する橋桁どうしの衝突による橋桁端部や橋脚基部における損傷の大きさと緩衝材の影響などを検討する必要がある. 桁間衝突および緩衝装置に関する研究は, これま

で数多く行われてきたが, 桁間衝突を許容し, その影響を設計に反映させるために桁遊間縮小化を目的として行われた研究はあまりない<sup>8)</sup>.

そこで本研究では, A 種の橋クラスに相当する中小規模の橋梁を対象に, 3 連 2 径間連続 PC 桁橋のうち中央部の 2 径間連続橋梁を解析モデルに選び, 遊間の間隔をパラメータとして弾塑性地震応答解析を行い, 橋桁端部の応答応力-時間関係および橋脚基部の応答回転角-時間関係を算出した. また, ゴム緩衝材を用いた場合についても同様に解析を行い, ゴム緩衝材を用いない場合との比較から, PC 橋の動的応答に及ぼすゴム緩衝材の効果について検討し, 桁遊間縮小化の可能性を模索した.

## 2. 解析モデル

### 2.1 解析対象橋梁

本研究では, 3 連 PC 箱形断面橋梁のうち中央の 2 径間部を解析対象として用いた. 解析対象橋梁を図-1 に示す. 橋桁と橋脚は 2 次元線形はり要素でモデル化し, 橋脚基部に塑性ヒンジを設けた. また, RC 橋脚の塑性ヒンジ部の非線形履歴特性には, 鉄筋コンクリートの劣化を考慮できる武田モデルを用い, 非線形回転バネを設けた.

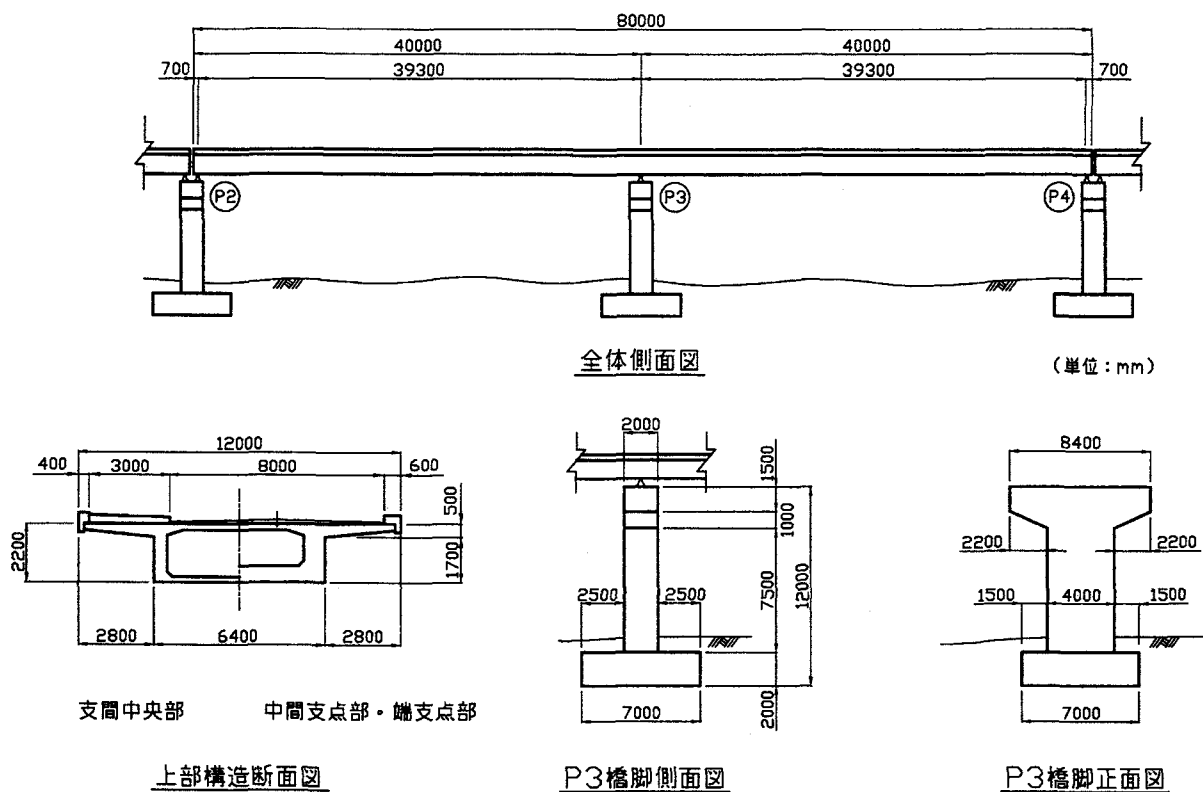


図-1 解析対象橋梁

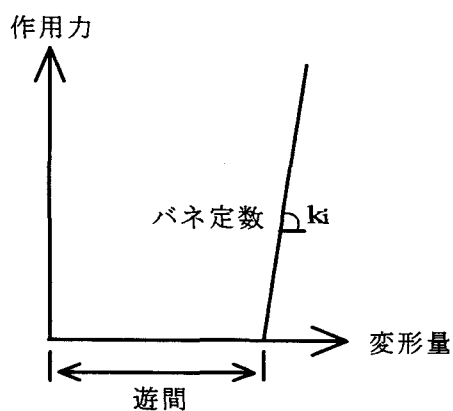


図-2 衝突バネモデル

## 2.2 桁間衝突のモデル化

桁間衝突のモデル化には、図-2 に示すような線形の衝突バネモデルを用いた。なお本来の衝突現象は 3 連の橋桁が衝突する際の位相差などによる影響が考えられるが、本研究では、P2 橋脚と P4 橋脚で桁間衝突が生じると想定した。このとき、衝突後のバネ定数  $k_i$  は、以下のように表される<sup>4,9)</sup>。

$$k_i = \frac{EA}{\ell/n}$$

ここに、 $E$  は上部構造のヤング率、 $A$  は断面積、 $\ell$  は部材長さ、 $n$  は要素分割数である。

本研究で用いた解析対象橋梁では、上部構造のヤング率は、 $2.89 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 、断面積  $12.41 \text{ m}^2$ 、部材長さ  $40.00 \text{ m}$  であり、要素分割数を 2 としたことから、 $k_i = 1.79 \times 10^7 \text{ kN/m}$  とすることとした。

## 2.3 ゴム緩衝材のモデル化

本解析では、図-3 に示すような対象橋梁の橋桁端部 2 カ所 (P2, P4 上) の遊間に 5cm のゴム緩衝材を設置する場合を想定した。本解析では、緩衝材として、硬度 60 のゴムを用いた。図-4 に、その応力-ひずみ

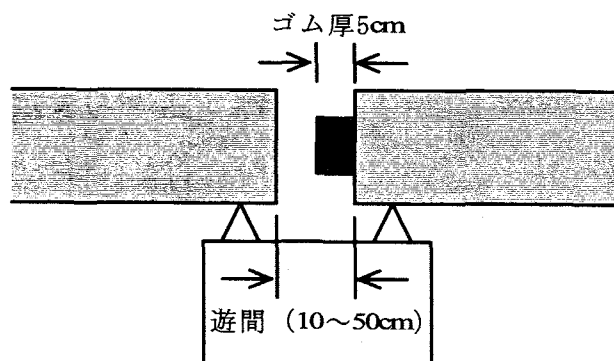


図-3 桁遊間に設置したゴム緩衝材

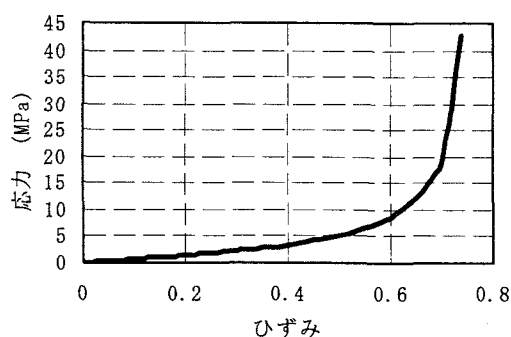


図-4 緩衝材に用いたゴムの応力-ひずみ関係

関係を示す。この関係から、ゴム緩衝材の復元力特性を図-5に示すように、1cm ずつ4つの線形区間に分割してモデル化を行った。表-1に、変形量  $\delta$  の各区間におけるバネ定数を示す。なお、変形量  $\delta > 4\text{cm}$  では、ゴムがハードニング領域に入っていると考えられるため、バネ定数はコンクリートの衝突バネと等しくしている<sup>10)</sup>。

## 2.4 全体系の解析モデル

本解析で用いた全体系の解析モデルは、図-6のように表される。

## 3. 解析方法

### 3.1 入力条件

入力地震波は、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編<sup>7)</sup>に示される I 種地盤用標準加速度波形を用いた。この地震波を解析モデルの橋軸方向に入力し、橋桁や橋脚などの動的応答を計算した。応答解析の数値積分には、Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta=0.25$ ) を用いた。積分時間間隔は 0.001 秒とし、解析時間は 10 秒とした。本解析には、汎用解析プログラム TDAP III を用いた。

### 3.2 解析ケース

本研究では、2 径間連続 PC 橋における両側の橋

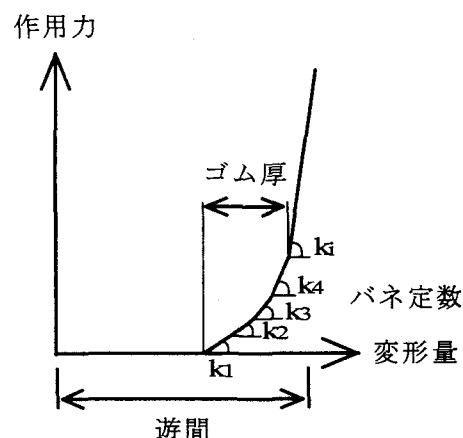


図-5 ゴム緩衝材のモデル化

表-1 ゴム緩衝材の復元力特性

| 変形量 $\delta$ (cm)   | 記号    | バネ定数(kN/m)         |
|---------------------|-------|--------------------|
| $0 < \delta \leq 1$ | $k_1$ | $7.80 \times 10^4$ |
| $1 < \delta \leq 2$ | $k_2$ | $1.08 \times 10^5$ |
| $2 < \delta \leq 3$ | $k_3$ | $2.95 \times 10^5$ |
| $3 < \delta \leq 4$ | $k_4$ | $2.72 \times 10^6$ |
| $\delta > 4$        | $k_i$ | $1.79 \times 10^7$ |

桁端部の遊間を 10cm から 50cm まで 10cm ごとに变化させた場合について、ゴム緩衝材がない場合とある場合でそれぞれ解析を行った。

## 4. 解析結果および考察

### 4.1 橋桁端部の応答応力

図-7(a)~(c)は、ゴム緩衝材がない場合、遊間が 10cm, 30cm, 50cm のときの橋桁端部の応答応力の時刻歴を示したものである。ここで応答応力は、応答軸力を桁端の面積で割って算出した。これより、遊間が小さいときは、衝突して応力が発生しているが、遊間が大きくなると衝突しないため、応力が発生していないことがわかる。

図-8(a)~(c)は、ゴム緩衝材がある場合、遊間が 10cm, 30cm, 50cm のときの橋桁端部の応答応力の

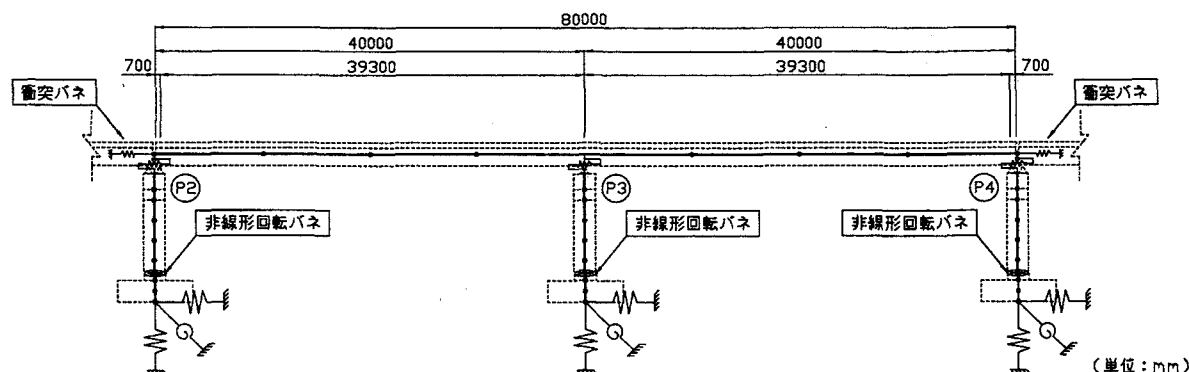
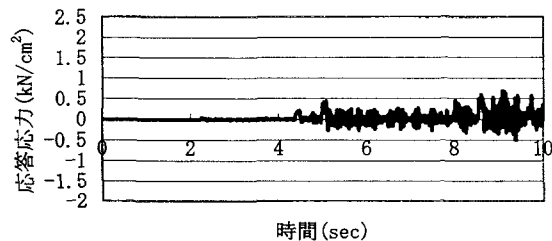
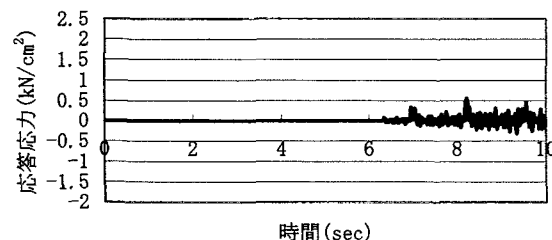


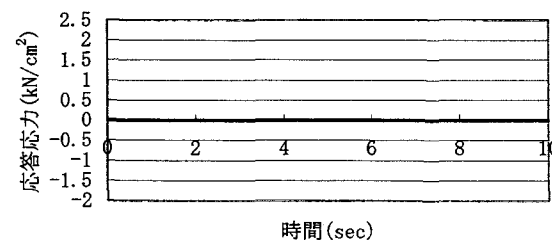
図-6 全体系の解析モデル図



(a) 遊間 10cm の場合

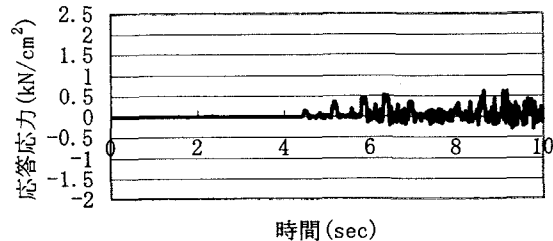


(b) 遊間 30cm の場合

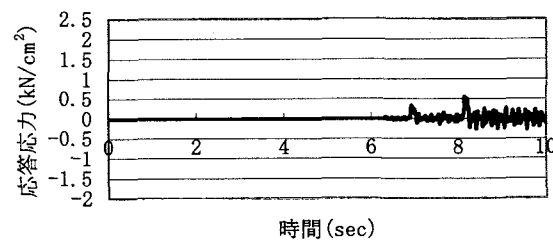


(c) 遊間 50cm の場合

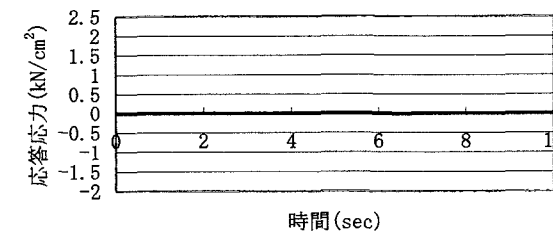
図-7 橋桁端部における応答応力の時刻歴  
(ゴム緩衝材がない場合)



(a) 遊間 10cm の場合



(b) 遊間 30cm の場合



(c) 遊間 50cm の場合

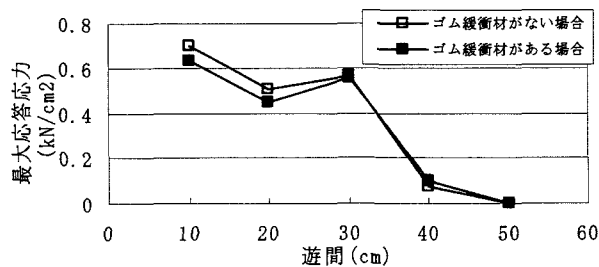
図-8 橋桁端部における応答応力の時刻歴  
(ゴム緩衝材がある場合)

時刻歴を示したものである。これらの図より、ゴム緩衝材がない場合の応答応力の時刻歴と比較すると、ゴム緩衝材を用いることによって、応答応力が時刻歴全体において若干小さくなっていることがわかる。このあまり変化しなかった理由としては、図-2 と図-5 の差にあり、ゴム緩衝材をやや高硬度側の硬度 60 のゴムを用いたためと考えられる。よって、もう少し柔らかいゴム製緩衝材かエネルギー吸収性能の大きい積層繊維補強ゴムを採用すれば、さらに応答応力が小さくなるものと思われる。

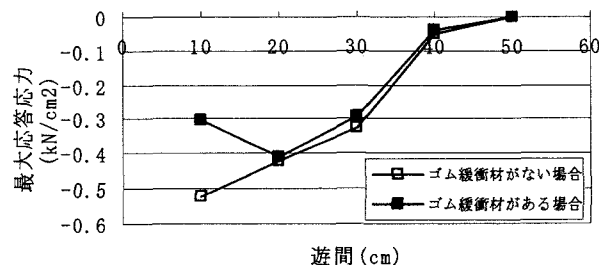
図-9 に、ゴム緩衝材の有無による、各遊間の大きさと最大応答応力の関係を示す。この図から、遊間が 10cm と 20cm の場合では、最大応答応力が低下していることがわかる。

#### 4.2 橋脚基部の応答回転角

図-10(a)~(c)は、ゴム緩衝材がない場合、遊間が 10cm, 30cm, 50cm のときの橋脚 P3 基部の応答回転角の時刻歴を示したものである。これらの図より、

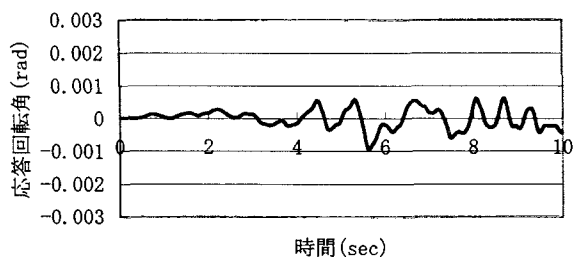


(a) 正の最大応答応力

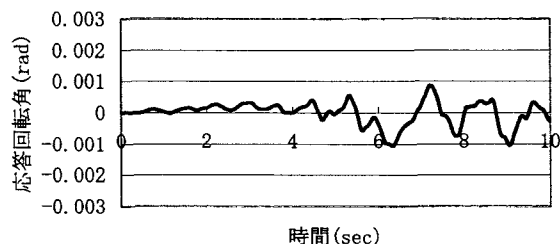


(b) 負の最大応答応力

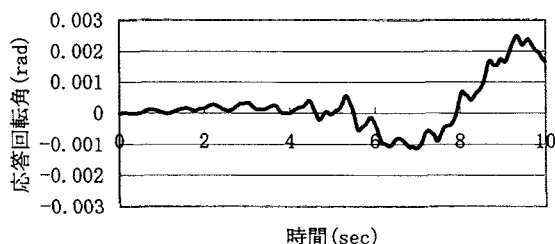
図-9 遊間の大きさと最大応答応力の関係



(a) 遊間 10cm の場合

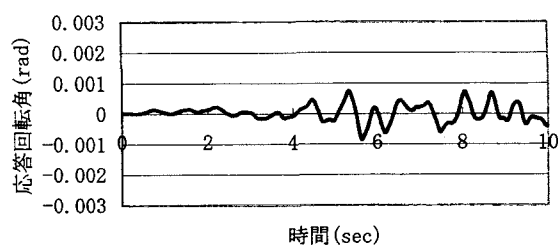


(b) 遊間 30cm の場合

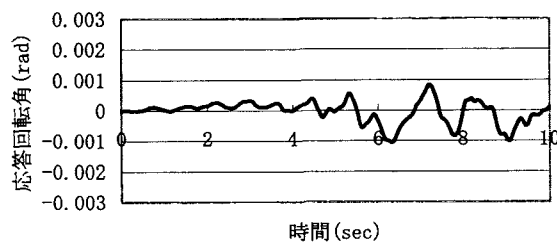


(c) 遊間 50cm の場合

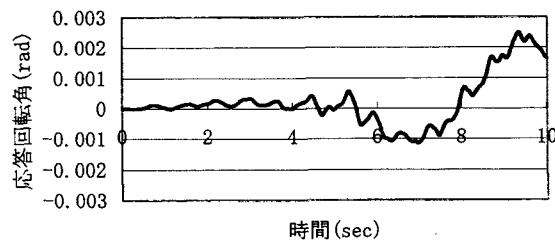
図-10 橋脚基部における応答回転角の時刻歴  
(ゴム緩衝材がない場合)



(a) 遊間 10cm の場合



(b) 遊間 30cm の場合



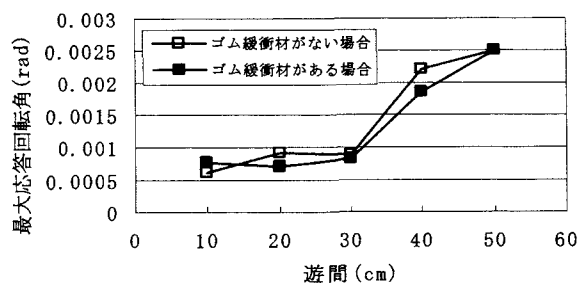
(c) 遊間 50cm の場合

図-11 橋脚基部における応答回転角の時刻歴  
(ゴム緩衝材がある場合)

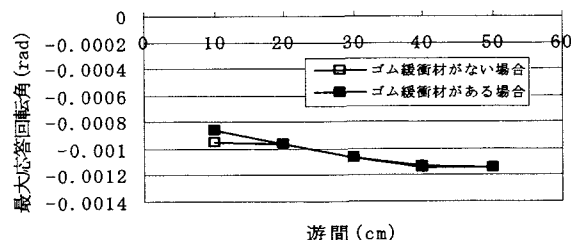
遊間が 10cm と小さいときは応答回転角も小さいが、50cm と大きくなると応答回転角は大きく変動していることがわかる。

図-11(a)~(c)は、ゴム緩衝材がある場合、同様に遊間が 10cm, 30cm, 50cm のときの橋脚 P3 基部の応答回転角の時刻歴を示したものである。これらの図より、応答回転角の時刻歴はゴム緩衝材がない場合と同様な傾向を示しており、ゴム緩衝材がない場合と比較して時刻歴全体での応答の違いはあまり認められない。この理由は、4.1 で述べた理由と同様であり、ゴム緩衝材にやや高硬度なゴムを用いたためと考えられる。

図-12 に、ゴム緩衝材の有無による、各遊間の大きさと最大応答回転角の関係を示す。この図から、遊間が小さくなるにしたがって、最大応答回転角は小さくなる傾向が確認できる。また、ゴム緩衝材を用いることによって、若干ではあるが、最大応答回転角を低減できることがわかる。



(a) 正の最大応答回転角



(b) 負の最大応答回転角

図-12 遊間の大きさと最大応答回転角の関係

## 5. 結論

本研究は、中小規模の PC 橋を対象に、橋桁の衝突をある程度許容した上で、ゴム緩衝材の効果について検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 橋桁端部における応答応力-時間関係および応答回転角-時間関係から、遊間が小さいと衝突現象が起こって応答応力は大きくなり、遊間が大きいと逆に応答応力は小さく、橋脚基部の回転角が大きくなることが確認できた。
- (2) ゴム緩衝材を用いることによって、橋桁端部の応答応力が時刻歴全体において若干小さくなり、遊間が小さい場合にそれは顕著になった。
- (3) ゴム緩衝材を用いることによって、遊間が小さい場合は、橋脚基部における最大応答回転角が若干小さくなっていることがわかった。

以上の検討から、遊間を小さくして、桁間にゴム緩衝材を用いることにより、橋桁端部の応答応力や橋脚基部の応答回転角が小さくなり、桁遊間縮小化の有効性が明らかになった。今後は、ゴム緩衝材の種類や厚さの違いによる影響や免震支承を用いた場合などを考慮して、さらに検討を進めていく予定である。

### 参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 第1章橋梁，土木学会，1996。
- 2) 森山卓郎，依田照彦：桁間衝突が落橋におよぼす影響に関する実験的検討，土木学会論文集 No.654/I-52，pp.223-232，2000。
- 3) 庄司学，川島一彦，Anat Ruangrassamee，運上茂樹，足立幸郎，長屋和宏：桁間衝突の影響に対するゴム製緩衝装置の有効性に関する実験的検討，構造工学論文集 Vol.45A，pp.891-902，1999。
- 4) 川島一彦，植原健治，庄司学，星恵津子：桁衝突および落橋防止装置の効果に関する模型振動実験および解析，土木学会論文集 No.703/I-59，pp.221-236，2002。
- 5) 梶田幸秀，西本安志，石川信隆，香月智，渡邊英一：桁間衝突現象のモデル化に関する一考察，土木学会論文集 No.661/I-53，pp.251-264，2000。
- 6) 武野志之歩，監崎達也，伊津野和行：過大地震動を受ける免震橋梁の桁間衝突が及ぼす影響に関する検討，第6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.123-128，2003。
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2002。
- 8) 濱本朋久，佐藤壮，西本安志，梶田幸秀，園田佳巨，石川信隆：積層繊維補強ゴム材を用いた桁遊間縮小化に関する一考察，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，pp.879-880，2002。
- 9) 渡邊学歩，川島一彦：衝突ばねを用いた棒の衝突の数値解析，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.125-139，2001。
- 10) 西本安志，梶田幸秀，彦坂熙，石川信隆，西川信二郎：繰り返し衝撃荷重を受ける積層繊維補強ゴムの衝撃緩衝効果に関する研究，構造工学論文集 Vol.49A，pp.1333-1342，2003。