

論文 PC 橋の桁衝突におけるゴム緩衝材の効果

濱本 朋久^{*1}・森山 卓郎^{*2}・西本 安志^{*3}・石川 信隆^{*4}

要旨：実務設計では，レベル 2 地震動に対して桁衝突が生じないように大きな桁遊間を確保しているため，建設コスト増大などの問題が顕在化している。そこで本研究では，桁遊間の縮小化による建設コスト削減を目的として，PC 橋を対象に桁遊間を変化させ，ゴム緩衝材がある場合とない場合について弾塑性地震応答解析を行い，桁遊間を縮小しても桁衝突の影響を緩和できるゴム緩衝材の効果について検討した。その結果，コンクリートブロックの衝撃実験結果などから損傷レベル指標を設定し，桁間にゴム緩衝材を用いた場合における PC 橋の桁衝突における最小の損傷レベルに対応する最適な桁遊間を決定することができた。

キーワード：PC 橋，桁衝突，ゴム緩衝材，桁遊間縮小化，地震応答解析

1. はじめに

現行の道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編¹⁾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指摘されている。建設コスト削減の観点から考えると，落橋させないことを大前提とし，橋の重要度を細分化して交通量の少ない橋梁においては桁遊間を小さくし，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。さらに桁端にゴム緩衝材を設置し，桁遊間を縮小化しても桁衝突時における橋桁や橋脚の損傷を低減させることも必要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，桁端に設置する緩衝材の効果など

を明らかにする必要がある。桁間衝突現象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^{2)~4)}，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の縮小化を目的とした研究はあまり行われていないのが実状である⁵⁾。

そこで本研究では，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対象モデルに選び，遊間の間隔をパラメータとしてゴム緩衝材がない場合とある場合について弾塑性地震応答解析を行った。次に，コンクリートブロックを RC 板に水平に衝突させた実験結果⁶⁾から，衝突応力レベルによる橋桁端部の損傷評価指標を定めた。また，橋脚基部の曲げモーメント一回転角の関係から橋脚基部の損傷評価指標を定めた。最後に，これらの損傷評価指標と弾塑性地震応答解析から得られる橋桁端部の応答応力と橋脚基部の応答回転角とを比較して，桁間にゴム緩衝材を用いた場合において，両者から判定される最小の損傷レベルに対応する最適な桁遊間を損傷評価の観点から決定することを試みた。

*1 パシフィックコンサルタンツ（株）九州本社第二技術部課長代理 工修（正会員）

*2 阿南工業高等専門学校 建設システム工学科講師 博(工)

*3 シバタ工業（株）研究開発部研究開発グループ主任 博(工)

*4 防衛大学校名誉教授 工博

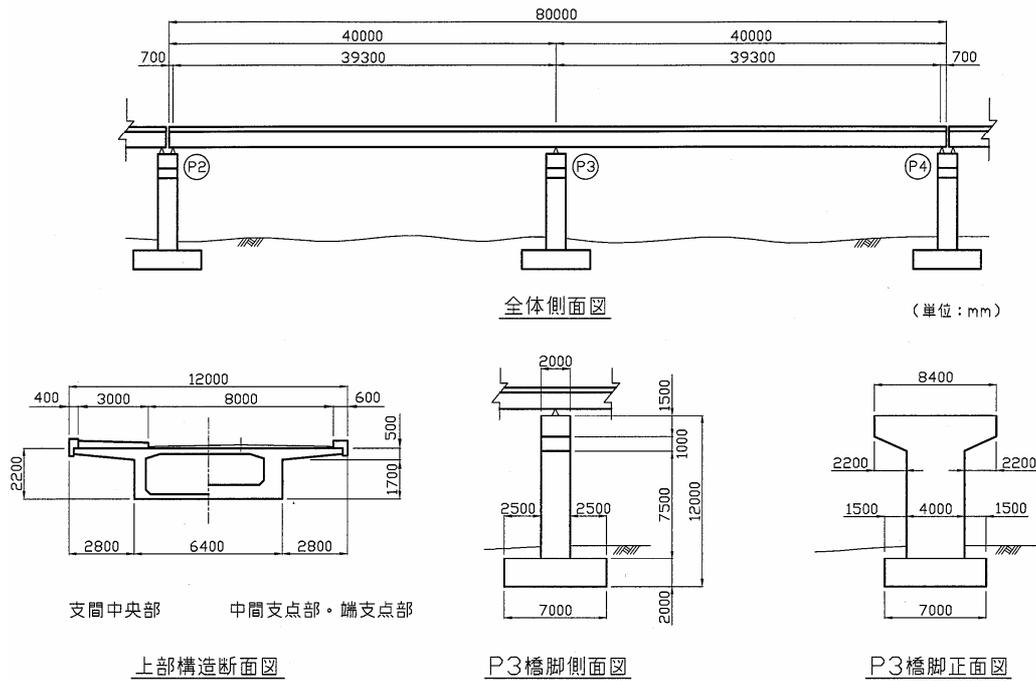


図-1 解析対象橋梁

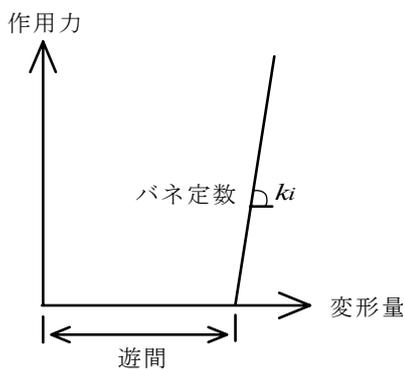


図-2 衝突バネモデル

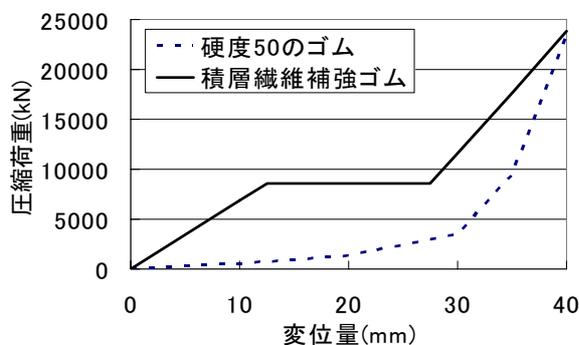


図-3 緩衝材に用いたゴムの荷重-変位関係

2. 解析モデル

2.1 解析対象橋梁

本研究では、図-1に示す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。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、除荷時の剛性低下が考慮できるTakedaモデル⁷⁾を用い、非線形回転バネを設けた。支承は弾性固定方式のゴム支承とし、桁衝突時においても健全であるものとした。

2.2 桁間衝突のモデル化

桁間衝突のモデル化には、図-2に示す非線形の復元力特性を有する衝突バネモデルを用いた。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³⁾。

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

ここに、 E は上部構造のヤング率、 A は断面積、 ℓ は部材長さ、 n は桁のはり要素の分割数である。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 m^2 、部材長さ 40.00 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。なお、本来の衝突現象は、3連の橋桁が衝突す

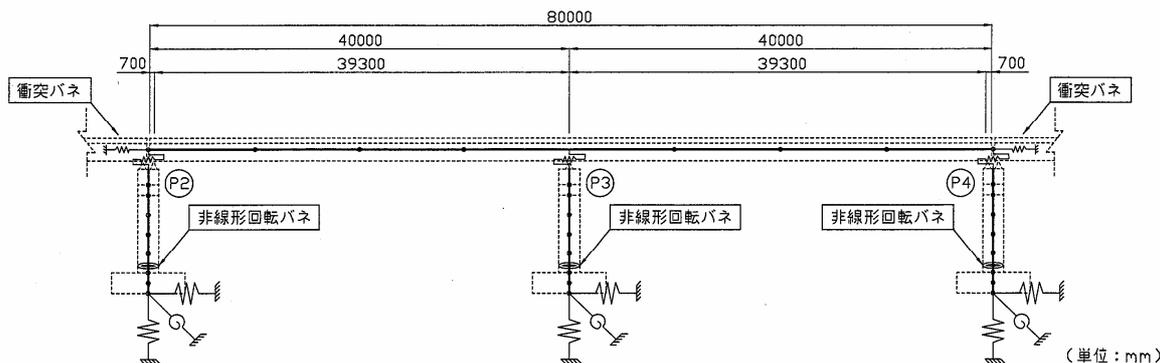


図-4 全体系の解析モデル図

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、このとき P2 橋脚の左側および P4 橋脚の右側は固定し、移動しないものとした。

2.3 ゴム緩衝材のモデル化

本解析では、対象橋梁の橋桁端部 2 カ所 (P2, P4 橋脚上) の遊間に厚さ 50mm のゴム緩衝材を設置する場合を想定した。緩衝材としては、硬度 50 のゴムと積層繊維補強ゴムを用いた。図-3 に、それらの荷重-変位関係を示す。これらを 10mm ずつの線形区間に分割することによってモデル化を行った。なお、変位量 $\delta > 40\text{mm}$ 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⁸⁾。また、簡単化するため、ゴム緩衝材の履歴特性は、除荷後も同じとした。

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-4 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¹⁾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解析を実施した。応答解析の数値積分には、Newmark の β 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 TDAPIII を用いた。

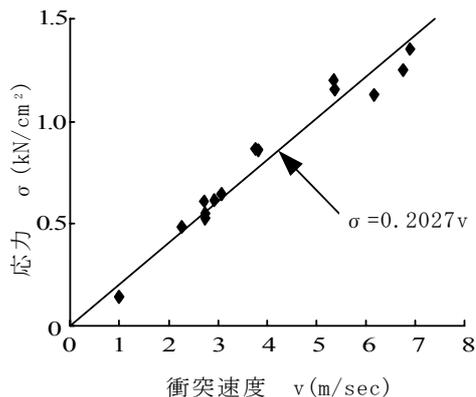
3.2 解析ケース

本研究では、2 径間連続 PC 橋における両側の橋桁端部の遊間を 10cm から 50cm まで 10cm ごとに変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。

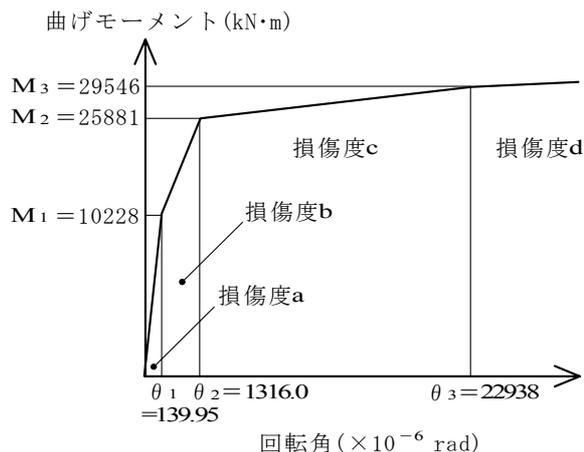
3.3 損傷評価レベルの導入

(1) 橋桁端部の損傷レベル

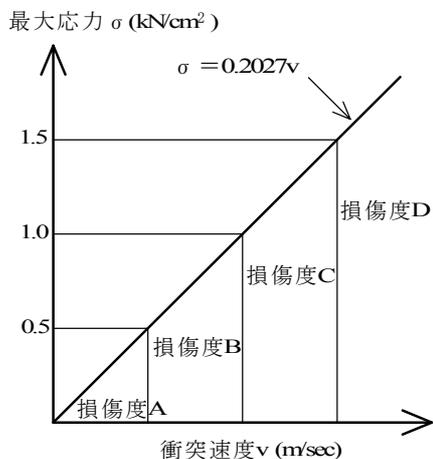
本研究で用いた対象橋梁では、コンクリートの橋桁どうしの衝突を想定しているが、従来コンクリート桁どうしの衝突現象を取り扱った研究はほとんど見受けられない。よって、ここでは、山口ら⁶⁾の水平衝突実験によるコンクリートどうしの衝突応力レベルを橋桁端部の損傷評価レベルとして用いることとした。すなわち、実験条件としては、コンクリート強度 60.5 N/mm^2 であり、衝突体は載荷面直径 130mm、載荷面積 133cm^2 、重量 1.74kN (178kg) のコンクリート塊を用い、被衝突体は幅×高さが $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 、厚さが 70mm の RC 板を使用している。衝突体の衝突速度を 1m/sec から 7m/sec まで変化させて、水平衝撃荷重装置により、RC 板に繰り返し衝突させている。このとき、1 回目の衝突時における最大応力と衝突速度の関係は、図-5 のように表される⁶⁾。本研究では、これらの結果を用いて、発生応力レベルのみに着目し、橋桁端部の損傷評価レベルを設定した。図-6 にその模式図を示す。橋桁端部の最大応答応力の値に応じて、軽微な損傷 (A)、中程度の損傷 (B)、大規模な損傷 (C)、破壊 (D) と定義した。このとき、軽微な損傷 (A) とは、載荷面に



図－5 衝突時の最大応力と衝突速度の関係⁶⁾



図－7 橋脚基部の損傷評価レベル



図－6 橋桁端部の損傷評価レベル

衝突痕が付く程度の損傷であり、中程度の損傷 (B) は局部的な破壊、大規模な損傷 (C) は局部的な貫入による押し抜きせん断破壊、破壊 (D) は1回の衝突で破壊するような損傷である⁶⁾。

(2) 橋脚基部の損傷評価

橋脚基部の損傷評価レベルを決定するに当たっては、図－7のP3橋脚基部の曲げモーメント－回転角の関係から求めた。鉄筋コンクリート橋脚の断面が保有する骨格曲線から、道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁾に示されるひび割れ状態 (M1)、降伏状態 (M2)、終局状態 (M3) を考慮した結果、その最大応答回転角の値に応じて損傷評価レベルを決定すると図－7の模式図のように表される。各応答回転角の値に応じて、軽微な損傷 (a)、中程度の損傷 (b)、大規模な損傷 (c)、破壊 (d) と定義した。

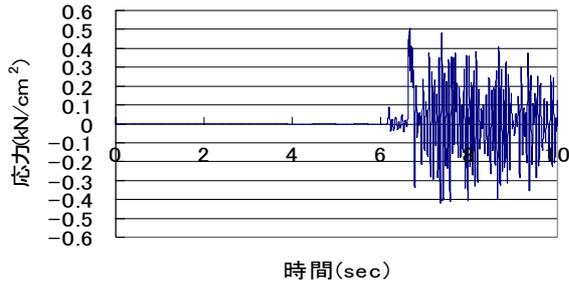
4. 解析結果および考察

4.1 橋桁端部の損傷評価

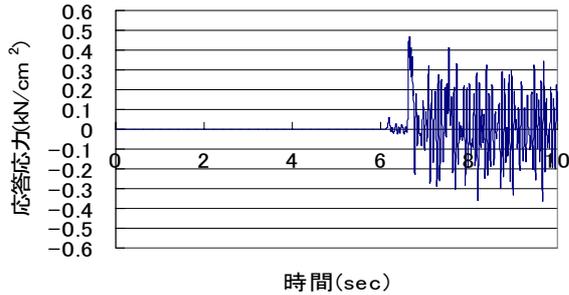
弾塑性地震応答解析から得られた橋桁端部の応答応力時刻歴の遊間 20cm の場合を図－8に示す。これらの結果から得られた橋桁端部の最大応答応力と損傷レベルは、図－9のように表すことができる。ここで、地震作用時間 10 秒間の間に、1回でも応力損傷レベルを超えた場合は、超えた側の損傷レベルと判定した。このとき、遊間が 50cm の場合では、桁衝突が認められていないが、それ以外の遊間の場合ではいずれも桁衝突が認められた。図－9より、緩衝材がない場合では、桁端部の損傷は、遊間が 30cm 以下の場合では、損傷度が B となっている。一方、緩衝材として、硬度 50 のゴムおよび積層繊維補強ゴムを用いた場合では、遊間が 20cm のときに損傷度が A となり、橋桁端部における損傷の低減においてゴム緩衝材の効果が見られたことがわかる。また、遊間が 20cm の場合よりも遊間が 30cm の場合で橋桁端部の最大応答応力が大きくなっている。この理由としては、隣接橋脚による振動モードの影響などが考えられる。

4.2 橋脚基部の損傷評価

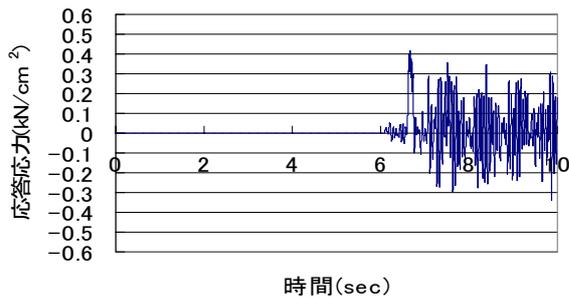
弾塑性地震応答解析から得られた橋脚基部の応答回転角時刻歴において、遊間 20cm の場合を図－10に示す。この図から、緩衝材にゴムを用いることにより、橋脚基部の最大応答回転角が若干小さくなっていることがわかる。これらの



(a)緩衝材なしの場合

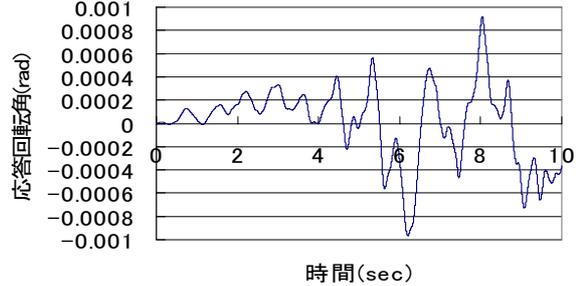


(b)硬度 50 のゴムの場合

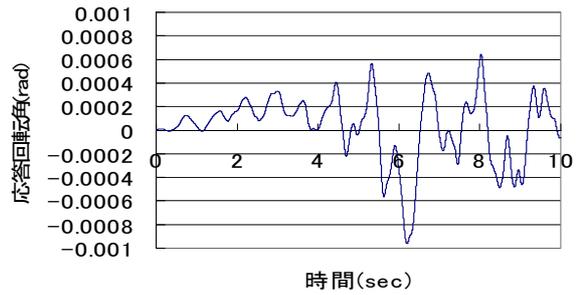


(c)積層繊維補強ゴムの場合

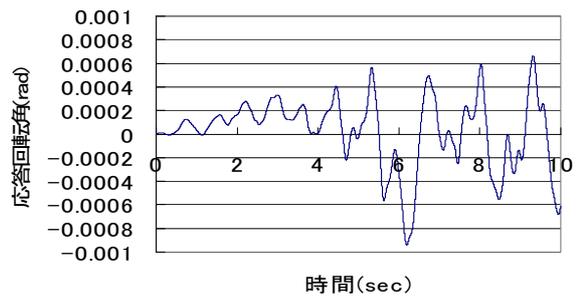
図-8 橋桁端部の応答応力時刻歴



(a)緩衝材なしの場合



(b)硬度 50 のゴムの場合



(c)積層繊維補強ゴムの場合

図-10 橋脚基部の応答回転角時刻歴

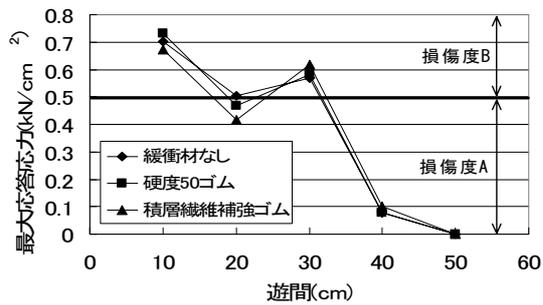


図-9 橋桁端部の最大応答応力と損傷度

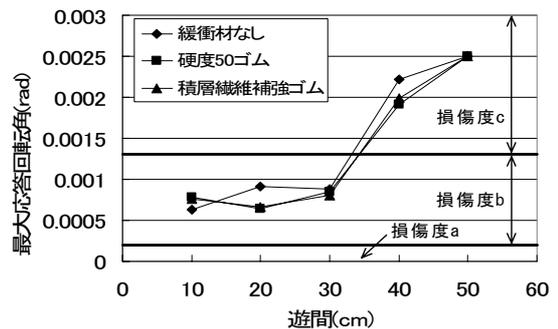


図-11 橋脚基部の最大応答回転角と損傷度

結果から得られた橋脚基部の最大応答回転角と損傷レベルは、図-11のように表すことができる。ここでも地震作用時間の10秒間に図-7の損傷レベルを1回でも超えた場合は、超えた側の損傷評価とみなした。図-11より、遊間が

40cm および 50cm の場合では、緩衝材の有無にかかわらず、いずれの場合でも損傷度cとなり、遊間が30cm以下の場合では損傷度がbとなっていることがわかる。本解析モデルでの検討結果では、橋脚基部の損傷レベルの低減においては、

表—1 全体系損傷の総合評価

遊間 (cm)	緩衝材 なし	硬度 50 ゴム	積層繊維 補強ゴム
10	B+b	B+b	B+b
20	B+b	A+b	A+b
30	B+b	B+b	B+b
40	A+c	A+c	A+c
50	A+c	A+c	A+c

ゴム緩衝材の効果はあまり見られなかった。

4.3 総合評価

以上の図—9 および図—11 をまとめて、今回の解析範囲内で橋桁端部と橋脚基部の損傷レベルから構造系全体の損傷を総合評価すると表—1 のようになる。表—1 より、損傷程度を総合的に判定すると、硬度 50 のゴムおよび積層繊維補強ゴムを用いた場合の遊間が 20cm のケースにおいて、損傷レベルが A+b で最も小さいことがわかる。これは、緩衝材がなく遊間が 30cm 以上の場合の損傷レベル B+b よりも小さく、桁間にゴム緩衝材を用いて桁遊間が縮小化できる可能性を示唆している。本解析対象の PC 橋の場合、安全性を見込めば、遊間を 20cm とし、桁間にゴム緩衝材を用いると、レベル 2 地震動が作用しても損傷程度を最小限に抑えられることを解析上検証することができた。ただし、緩衝材の厚さを増せば硬度 50 のゴムと積層繊維補強ゴムとの有意差がさらに顕著になるものと考えられ、緩衝材の厚さをパラメータとした場合の数値解析も今後の重要な検討課題である。

5. 結論

- (1) コンクリートどうしの衝突実験データから損傷レベルを設定することにより、PC 桁どうしの衝突による損傷評価ができた。
- (2) 得られた応答応力と応答回転角を提案した損傷レベルと比較することにより、橋桁端部および橋脚基部の損傷評価を行い、これら 2 つの損傷評価パラメータから総合的に最適

な桁端部の遊間が決定できた。

- (3) 桁間にゴム緩衝材を用いることによって、橋桁端部の損傷を低減することができ、桁遊間縮小化の可能性が示された。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2002.3
- 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.223-232，2000.7
- 3) 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.221-236，2002.4
- 4) 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.123-128，2003.1
- 5) 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
- 6) 山口貴之，別府万寿博，大野友則：消波ブロックの繰返し衝突により防波堤ケーソン壁に生じる局部破壊と防護対策に関する実験的研究，土木学会論文集 No.759/I-67，pp.381-396，2004.4
- 7) T.Takeda, M.A. Sozen, N.M.Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, 1970.12
- 8) 西本安志，梶田幸秀，彦坂熙，石川信隆，石川信二郎：繰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, 2003.3