

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

武野 志之歩¹・監崎 達也²・伊津野 和行³

¹正会員 工修 (株)建設技術研究所 東京本社道路・交通部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町4-9-11)

²学生員 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

³正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

1. はじめに

近年、上部構造に対する地震入力低減を目的として、免震橋梁が普及している。免震橋梁は、構造系全体の固有周期特性や減衰特性を支承部に依存する構造形式であり、構造物の長周期化と減衰の付加が基本理念である。したがって、一般の橋梁と比較して桁の応答変位が増大しやすく、隣接桁間で衝突が発生する可能性がある。

現行の道路橋示方書においては、桁間もしくは桁と橋台間における遊間は、一般的に衝突が発生しないように設計されている¹⁾。このような桁端部においては、地震応答時の大変位に対応可能な伸縮装置が必要となり、経済性、耐久性、走行性あるいは振動の発生等、望ましくないケースも生じる。また、設計地震動以上の過大地震動が作用した場合、隣接桁間で衝突が発生する可能性がある。設計段階においては桁間衝突を回避するだけではなく、衝突を許容できる構造についても検討することが、将来の地震被害を低減するために効果的と考えられる。実際、桁間衝突を利用して構造物が共振状態に入ることや妨げる効果を考慮し、上部構造の応答低減に関する検討²⁾も行われている。

桁間衝突を許容して構造物設計を実施する場合、衝突による負荷(以下、衝突効果と表記)が構造系にどのように生じるか確認する必要がある。衝突力を直接受ける桁端部構造については緩衝材の設置効果について検討した研究^{3),4)}が行われている。本論では、桁間衝突により桁端部に作用する衝突荷重について確認するとともに、支持橋脚に及ぼす影響や桁の応答性状について確認した。また、桁遊間の設定量が構造系の応答特性に与える影響についても検討を行った。以下、本研究における検討結果を示す。

2. 解析モデルの構築

(1) 構造物のモデル化

本研究では、数値シミュレーション解析を用いて橋梁に過大地震動が作用した場合を想定し、橋梁応答性状の確認を行う。現象を簡単に再現するため、2連の規模の異なる橋梁構造物を対象とし、2次元非線形骨組モデルとしてモデル化を行った。全体構造モデルを図-1に示す。規模の大きい m_1 桁は桁長50m(桁質量 $m_1=1,650\text{ton}$)を想定し、 m_2 桁は桁長30m(同 $m_2=990\text{ton}$)を想定している。また、橋脚高はともに25mとし、桁が水平に設置されている状況を仮定した。

免震橋梁の主な非線形特性は支承部に集中すると考えられる。したがって、モデル中の桁は線形はり要素としてモデル化した。一方、橋脚は非線形はり要素としてモデル化し、降伏前後における応答値の傾向により、その影響を確認した。RC橋脚の非線形履歴特性は図-2に示す剛性劣化型の履歴特性によりモデル化した。本検討例では、全ての橋脚が終局状態に至らないだけの十分な変形性能を有しているものと仮定し、終局曲率の設定は仮定していない。

各躯体の減衰定数は桁を2%、橋脚は非線形履歴特性を想定していることから同様に2%、地盤ばね要素には20%を設定した。

(2) 支承部のモデル化

支承部は免震支承を想定した。現在、橋梁の免震化に用いられている支承は、鉛プラグ入積層ゴム支承(LRB)や高減衰積層ゴム支承(HDR)に代表されるゴム支承、あるいは、すべり摩擦型と呼ばれる形式が代表的である。ここではすべり摩擦支承を想定して検討を行った^{5),6)}。

すべり摩擦型免震支承は、上部構造と下部構造とを支

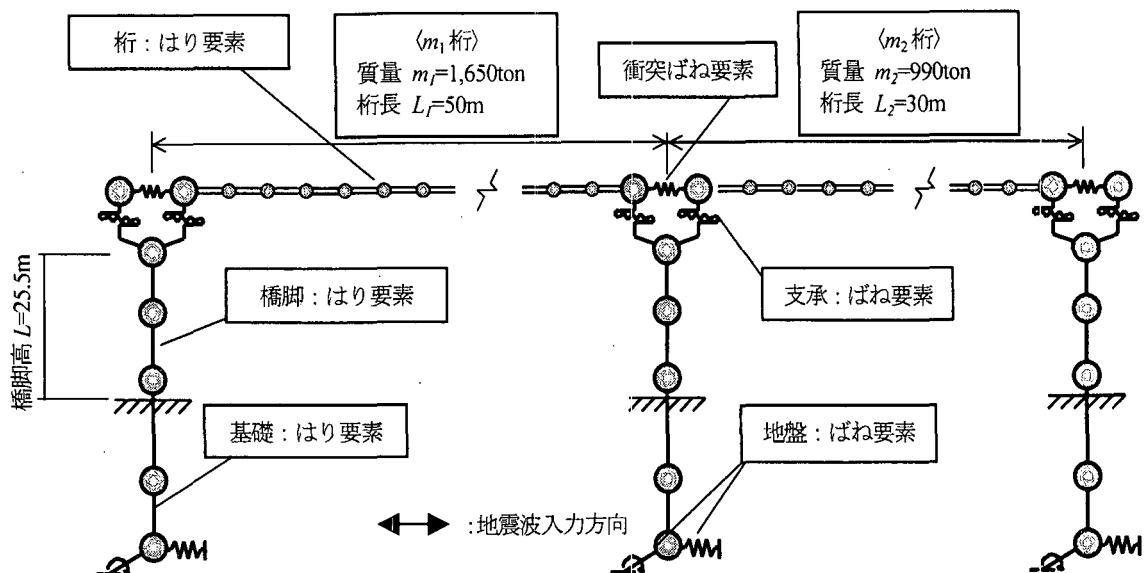


図-1 解析対象モデル

承部で滑らせることによって、下部構造から伝わる地震動から上部構造を絶縁することを目的とした構造である。すべり面の摩擦によって減衰性を与え、ゴムや金属のバネによって復元力を与える。そのため、力学特性は剛塑性に近い骨格曲線をもったバイリニア型履歴復元力特性を示す(図-3 参照)。本研究では、動摩擦係数として0.10を仮定した。また、初期剛性は橋脚剛性の10倍と設定した⁷⁾。

(3) 衝突ばね要素のモデル化

桁間における衝突現象の影響を数値シミュレーションにより再現するため、桁間に衝突ばね要素を設定した。図-4に衝突ばね要素の履歴復元力特性を示す。

衝突ばね要素は桁遊間 S_B を超過する圧縮方向の相対変位が発生すると、高い剛性で抵抗力を生じ衝突現象の再現を行う。示方書によれば、隣接する上部構造間に設ける遊間は、レベル2地震動作用時において上部構造と下部構造に生じる最大相対変位 u_s と遊間の余裕量 L_A 、および遊間量の固有周期差別補正係数 c_B により次式を用いて算定する。

$$S_B = c_B u_s + L_A \quad (1)$$

桁間衝突の反動や入力地震動の強さにより桁間相対変位が増大し、桁かかり長以上の相対変位が発生することも予想される。落橋側については桁端部と橋脚天端の相対変位を確認し、(2)式による算定値と比較して落橋が発生していないか確認する。

$$S_E = 0.7 + 0.005 L_B \quad (2)$$

衝突ばね剛性 k_c については、上部構造の軸方向剛性を基本に波動伝播を考慮した次式³⁾により剛性値を適用した。

$$k_c = \gamma \frac{EA}{L} \quad (3)$$

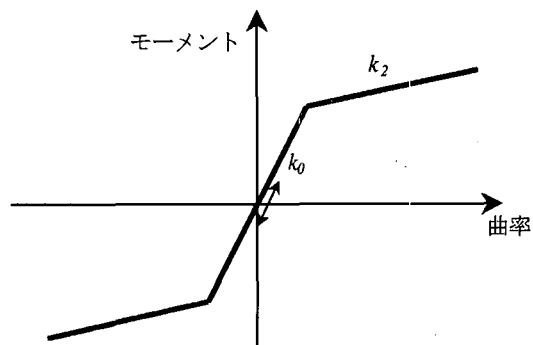


図-2 コンクリート橋脚の履歴復元力特性

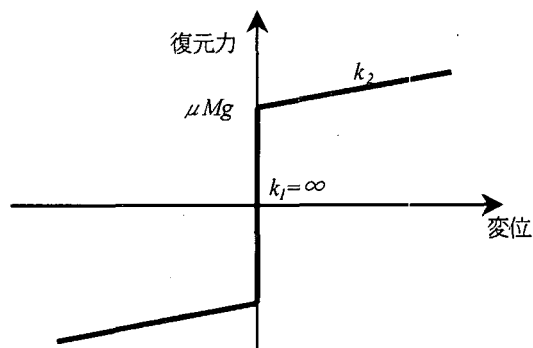


図-3 支承部の履歴復元力特性

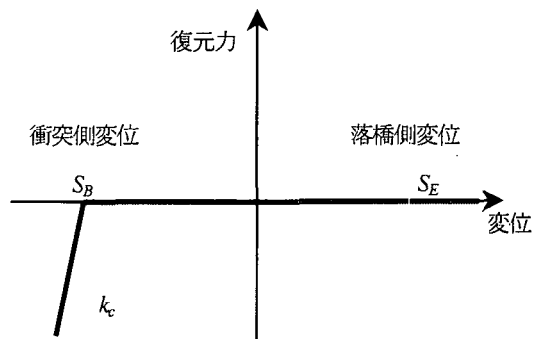


図-4 支承部の履歴復元力特性

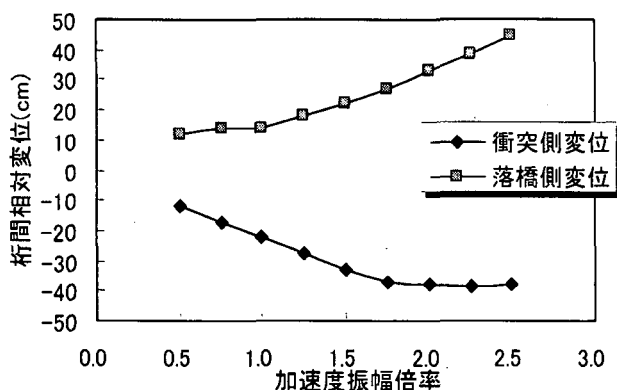


図-5 相対変位に及ぼす加速度振幅倍率

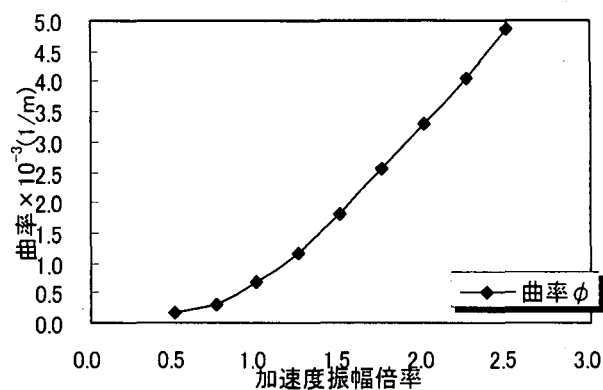


図-7 橋脚基部モーメントに及ぼす加速度振幅倍率

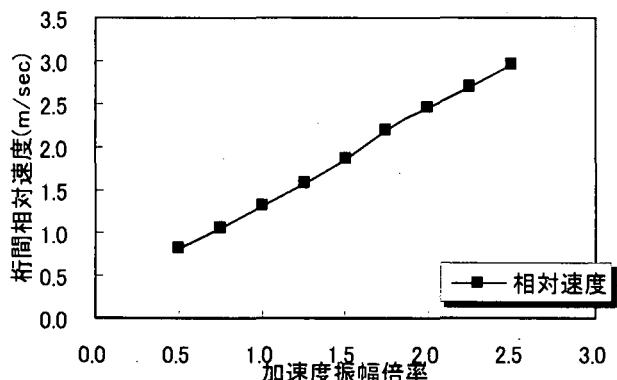


図-6 相対速度に及ぼす加速度振幅倍率の影響

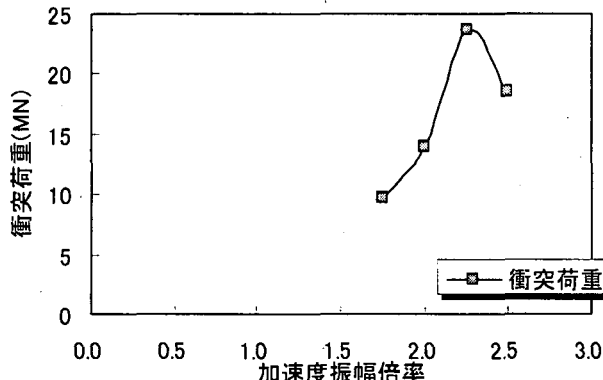


図-8 衝突荷重に及ぼす加速度振幅倍率の影響

ただし、 EA は上部構造の軸方向剛性、 L は上部構造の長さ、 γ は衝突ばねと上部構造の軸剛性比(ここでは 10 と設定)である。

以下、非線形地震応答解析には、市販のソフトウェア TDAPⅢ[®]を利用した。また、入力地震波は道路橋示方書 V. 耐震設計編に適合する標準地震入力例のうち、タイプ 2、Ⅲ種地盤波形の一つを適用した。

3. 過大地震時における免震橋梁の衝突効果

(1) 桁間相互作用に及ぼす加速度振幅倍率の影響

ここでは、過大地震動として標準地震入力例に適合する地震波の加速度振幅を変化させ、加速度振幅が変化することによる構造物応答への影響について確認する。加速度振幅倍率(以下、振幅倍率と表記)は標準波形を基準として、0.5~2.5 の範囲について 0.25 間隔で設定した。

図-5 に想定する振幅倍率における桁間相対変位を示す。相対変位は衝突側(桁端部が接近する方向)と落橋側(桁端部が離れる方向)について、それぞれの最大値を示した。振幅倍率 1.75 以降では桁間において衝突現象が発生するため、衝突側の相対変位は設定した桁遊間量 $S_B=36.8\text{cm}$ で抑制されている。一方、落橋側の変位は振幅倍率の増大にともない増加する傾向にある。しかし、桁間衝突が発生する振幅倍率 1.75 以降も増加傾向に大きな変化が見られない。桁間衝突による影響が、ほとんど

生じていないと考えられる。また、本検討モデルに対する各振幅倍率の応答値では、桁かかり長 $S_E=95\text{cm}$ に至るケースは生じていない。

図-6 に振幅倍率を大きくした場合の桁間相対速度を示す。桁間相対速度の値は、各振幅倍率における衝突側の最大応答値を抽出した。標準波形(振幅倍率 1.0)では、桁間相対速度が 1.30m/sec を示している。また、桁間の相対速度は振幅倍率の増加にともない線形的に大きくなる傾向にある。

以上より、桁間に生じる相対変位と相対速度は振幅倍率と相関的な応答値を示す傾向にあることが確認できる。

(2) 構造躯体の衝突効果に及ぼす加速度振幅倍率の影響

次に、構造躯体の衝突効果について検討する。まず、橋脚に及ぼす影響を確認するため、橋脚基部の曲率に着目した。図-7 に各振幅倍率に対する橋脚基部の曲率を示す。橋脚基部の曲率は振幅倍率の影響を受けていることが確認できる。橋脚が降伏する振幅倍率 0.75 より大きい範囲では、曲率の応答値が大きく変化する傾向にある。一方、桁間衝突を生じる振幅倍率 1.75 前後では、応答傾向に変化が見られない。したがって、桁間衝突による影響は小さいものと考えられる。

一方、桁間衝突の影響を直接的に受けると考えられる桁端部の衝突効果について、桁間の作用荷重により確認を行う(図-8)。桁端部における作用荷重は桁間衝突の発

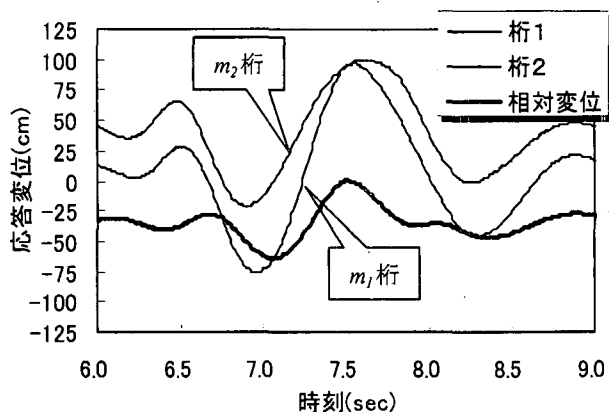


図-9 応答変位波形(加速度振幅倍率 1.75)

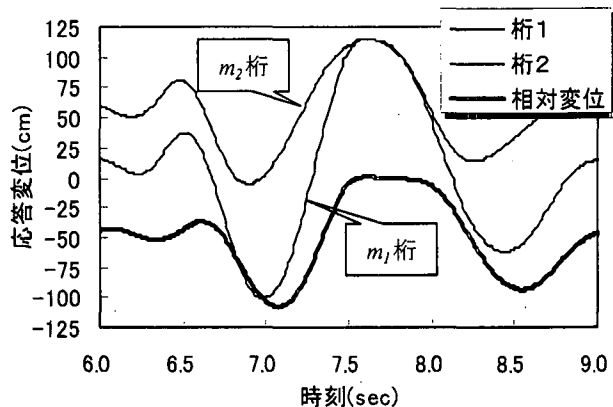


図-10 応答変位波形(加速度振幅倍率 2.25)

生時に生じるため、桁間衝突を生じる振幅倍率 1.75 以上の範囲で発生する。作用荷重は概ね 10~25MN の値を示しているが、振幅倍率 2.25 における応答荷重が突出している。原因を確認するため、桁間衝突を生じ始める振幅倍率 1.75(図-9)と作用荷重が突出する振幅倍率 2.25(図-10)のケースについて、応答変位波形を比較した。

振幅倍率 1.75, 2.25 いずれのケースにおいても、 m_1 桁が m_2 桁に追突して桁間衝突が発生している様子が確認できる。図中の相対変位が負の範囲は桁間に離隔が確保できている状態であり、相対変位が 0 となった時点で衝突が発生していることを示す。応答荷重が大きい振幅倍率 2.25 の場合、桁間衝突の継続時間が長い。衝突の継続時間が応答荷重に影響を及ぼしていると考えられる。

以上、数値シミュレーション解析により、現行設計法に準じた桁遊間を解析モデルに設定し、振幅倍率を変化させた場合の応答性状を確認した。結果、振幅倍率 1.00 では桁間衝突が発生しなかったが、振幅倍率 1.75 以上の範囲で桁間衝突が発生した。桁間衝突による衝突効果は、桁の応答変位や橋脚基部の曲率に与える影響は軽微であるが桁端に作用する応答荷重は変動する傾向が確認できた。現行設計法では桁間衝突が発生しない状態を要求しているが、将来発生する地震動が設計地震動より大きい場合、桁間衝突が発生する可能性がある。

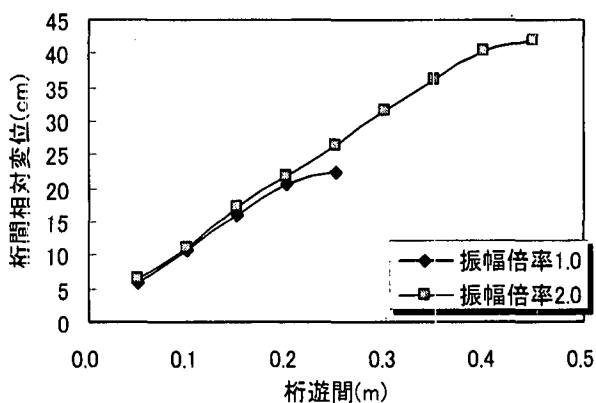


図-11 桁間相対変位(衝突側)

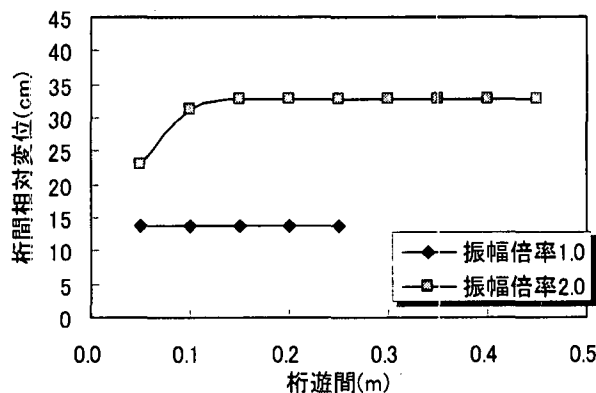


図-12 桁間相対変位(落橋側)

4. 衝突効果に配慮した桁遊間の設定

(1) 桁応答に及ぼす桁遊間量の影響

桁遊間の設定値が桁応答に与える影響について確認する。解析モデルでは、桁間が接近する側(衝突側)の変位は桁遊間の設定値により制約されるが、桁間が離れる側(落橋側)の変位はモデル中に変位を抑制する設定が無く自由な挙動が可能になっている。落橋側の変位を確認することで、桁間の連結デバイスに与える影響を評価する。また、桁端部と橋脚天端の相対変位を確認し、落橋の可能性についても評価する。

桁遊間を変化させた場合の桁応答について検討する。桁遊間は 5cm ごとに变化させて検討を行い、桁応答は衝突側(図-11)と落橋側(図-12)について示した。衝突側の変位は、桁間衝突が発生する範囲と桁間衝突が発生しない最小の遊間について示した。したがって、衝突側の相対変位は桁遊間の設定値近傍の値を示している。

一方、落橋側の相対変位は振幅倍率により桁遊間が小さい範囲で異なる傾向を示している。振幅倍率 1.0 では遊間の設定量に関わらず約 14cm 程度の一定値を示している。桁間衝突時の反撥にともなう応答変位量が、桁間の落橋側相対変位に達していないと考えられる。振幅倍率 2.0 のケースでは、遊間が比較的小さい範囲は相対変位が小さくなる傾向にあるが、遊間が 15cm 以上の範囲

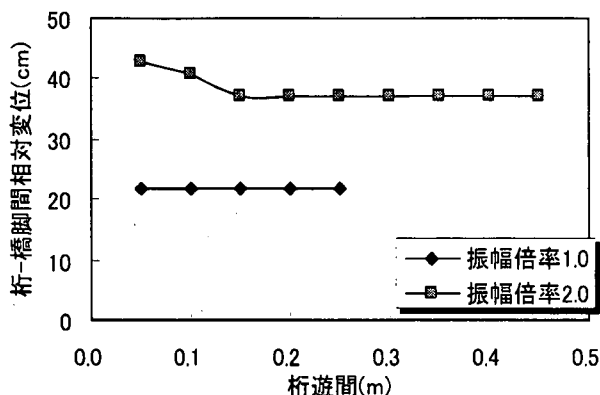


図-13 桁遊間が m_1 桁の落橋に与える影響

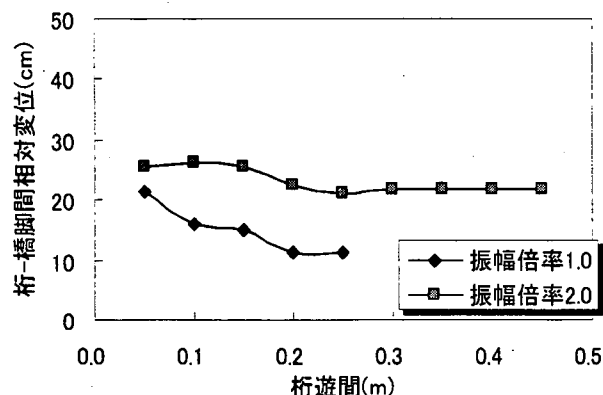


図-14 桁遊間が m_2 桁の落橋に与える影響

では約 33cm 程度の値となっている。よって、桁遊間の設定量が桁間の相対変位に与える影響は、衝突時に桁が大きな反撥力を受けない限り、振幅倍率に関わらず軽微と考えられる。十分な緩衝効果を有するデバイスが桁間に必要である。

次に桁と橋脚天端の相対変位について確認する。図-13、図-14に m_1 桁端、 m_2 桁端それぞれと橋脚天端の相対変位を示す。いずれの図においても、相対変位の値が大きいくほど桁かかり長が大きくなる必要となることを示す。図より、 m_1 桁、 m_2 桁とも小さい桁遊間を設定した場合に必要となる桁かかり長が大きくなる傾向にある。また、その傾向は m_2 桁の方が顕著である。これは、質量が相対的に軽い m_2 桁が m_1 桁に追突されるため、落橋側への相対変位が増加したものと考えられる。

以上より、桁遊間の設定量が桁間の相対変位に与える影響は軽微であるが、桁端と橋脚天端の相対変位については影響を与える傾向が確認された。桁端と橋脚天端の相対変位についても、現行設計法による桁かかり長以下であれば、影響は小さいと考えられる。

(2) 作用荷重に及ぼす桁遊間量の影響

桁間の作用荷重について確認する。連結部において衝突が発生する時刻は、応答開始後 5 秒から 15 秒の範囲である(図-15)。そのときの応答値を表-1 に示す。最大値はいずれのケースも表中①7.5sec に発生している。最大値

表-1 衝突荷重(MN)

桁遊間 S_B (m)	① 7.5sec	② 8.5sec	③ 10.1sec	④ 12.2sec
$S_B=0.05$	144	78	63.2	83
$S_B=0.10$	111	—	110	—
$S_B=0.15$	154	—	13	—
$S_B=0.20$	118	—	—	—

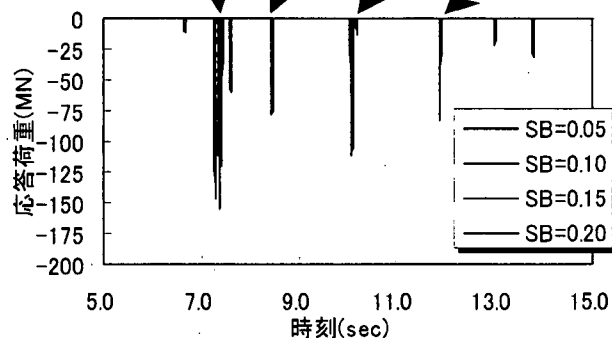


図-15 応答荷重に及ぼす桁遊間の影響

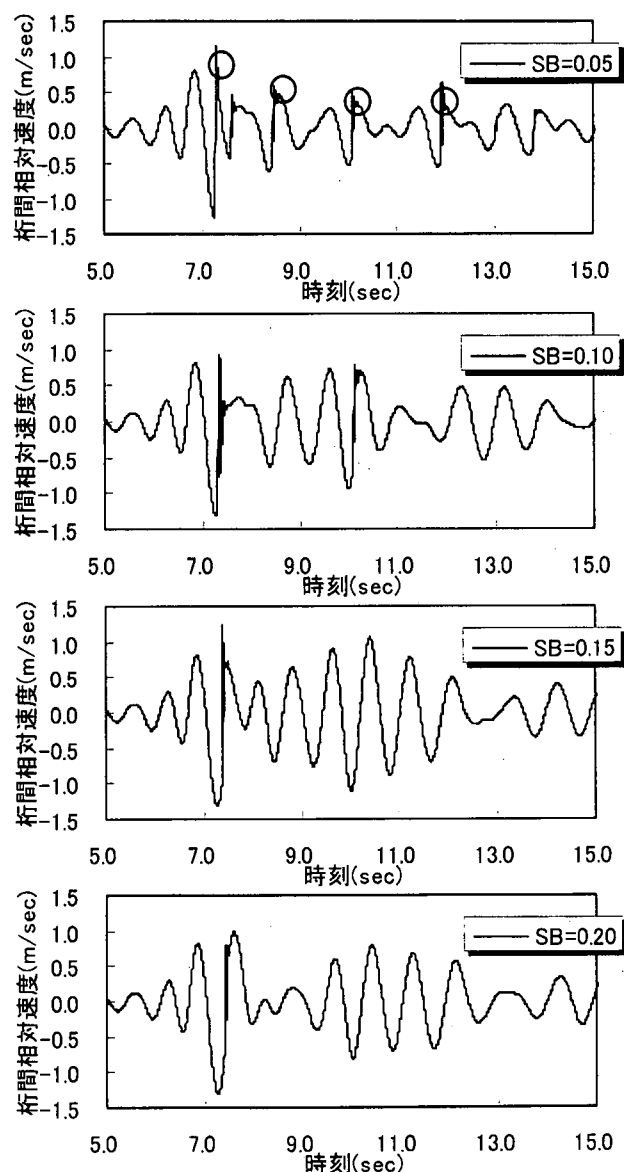


図-16 相対速度に及ぼす桁遊間の影響

は桁遊間により変動が大きい、遊間量が小さいほど複数回の衝突を示している。桁遊間の縮小を実施した場合、複数回発生する応答荷重に対して許容可能な構造が必要である。

一方、このときの桁間相対速度波形を図-16 に示す。衝突による影響が速度応答波形により確認できる。衝突回数が多いケースでは、速度応答値が比較的小さい傾向にある。各ケースの最初の衝突時刻は7.5sec であるため、衝突直前の桁間相対速度(衝突速度)はいずれのケースでも一定である。しかし、衝突が発生しない時刻における速度応答値が異なる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、すべり支承を設置した免震橋梁を想定し、地震時の桁間衝突が構造系に及ぼす影響を確認した。また、構造系への衝突効果を考慮し、桁遊間の設定量について検討した。以下、本研究における主な検討結果を示す。

- (1) 現行設計法に基づき桁遊間を確保した構造系においても、入力する地震動が設計時より過大であれば桁間衝突が発生する可能性がある。
- (2) 検討対象としたすべり支承を有する解析モデルでは、桁間衝突による影響が支承で吸収され、下部構造が受ける影響は小さい。
- (3) 桁間相対変位と桁間相対速度は入力される地震波の

加速度振幅倍率と相関性を有する。一方、桁間に発生する衝突荷重は振幅倍率と関連性が小さい。

- (4) 桁遊間の設定量が桁間の相対変位に与える影響は、衝突時の反撥力が小さい限り振幅倍率に関わらず軽微であるが、桁と橋脚天端の変位は変化を生じる。桁かかり長に対する確認が必要である。
- (5) 桁遊間を縮小した場合、桁間に作用する応答荷重が変動し、また、衝突回数も増加する可能性がある。

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，2002。
- 2) 佐藤雅士，運上茂樹，星隈順一：桁と橋台の衝突を考慮した橋梁の地震時挙動に関する解析的検討，第26回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1161-1164，2001。
- 3) 川島一彦，庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.129-142，1999。
- 4) 梶田幸秀，西本安志，石川信隆，香月智，渡邊英一：ゴム製緩衝材による桁間衝突時における緩衝効果とその評価モデルに関する基礎的研究，構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集 Vol.5，pp.101-106，2000。
- 5) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997。
- 6) 日本ゴム協会：免震用積層ゴムハンドブック，2000。
- 7) 監崎達也，伊津野和行：すべり摩擦型免震支承のモデル化における初期剛性と減衰の与え方に関する検討，第26回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，pp.1073-1076，2001。
- 8) アーク情報システム：TDAPⅢ，Ver2.00，理論説明書，1998。