

論文 隣接構造との衝突によって生じる RC 床版内の伝播応力度に及ぼす上部構造の応答速度の影響

有本 和央*1・渡邊 学歩*2・有井 賢次*3

要旨：過去の大きな地震では、地震時に上部構造が隣接する橋台等に衝突して、上部構造に被害が生じているが、このような被害が今後も繰り返されることが懸念される。弾性棒部材が衝突する際に生じる衝突応力は、衝突直前速度に強く依存することが知られているが、コンクリート床版と鋼主桁からなる上部構造が、隣接する構造に衝突する場合でも、床版内を伝播する応力と衝突直前速度の関係にも比例関係がみとめられることを非線形地震応答解析により示した。また、衝突直前速度が 3.5m/s を超えると、床版内を伝播する応力度がコンクリートの圧縮強度を超えることを明らかにした。

キーワード：衝突現象, RC 床版, 衝突直前速度, 衝突力, 応力

1. はじめに

2016 年 4 月 14 日及び 16 日に熊本県内の日奈久断層や布田川断層を起源とする地震が発生した。この地震では、地動の変位を伴い、一方向に卓越した速度を有するフリングステップと呼ばれる強震動が観測された。また、これによって、断層と並走する県道 28 号線沿いに架橋された橋梁構造物の被害が多く報告されており、俵山大橋では、主桁の局部座屈や背面土の破壊等が報告されている^{1)~3)}。

過去の大きな地震において、上部構造物と隣接構造物の衝突が原因とみられる各種被害が報告されている^{4)~6)}。上部構造の地震時挙動は、衝突現象の考慮有無で大きく異なることから、衝突現象を考慮した橋梁構造物の地震時挙動に関する研究が盛んに行われてきた^{例えば 7), 8)}。また、衝突現象を考慮した再現解析では、上部構造と隣接構造物間に衝突ばねと呼ばれる非線形ばね要素を組み込んだ骨組み構造解析が行われている^{例えば 9)~13)}。これらの研究によって、現在では衝突現象が発生しないように、十分な桁遊間が設けられ、衝突現象は発生しないことが前提となっている¹⁴⁾。しかし、過去の大きな地震では、衝突現象による被害が繰り返し報告

されていることから、今後も地震時に隣接構造間の衝突による上部構造の被害は繰り返されるものと懸念される。本研究では橋梁構造物の耐震性向上を目的として、床版の損傷が発生しうる速度の解明を目指した。上部構造と橋台の衝突現象を考慮し、衝突直前速度と衝突力の関係についての研究を行ったので報告をする。

2. 研究目的と流れ

2.1 本研究の概要と対象橋梁構造物

部材の衝突で発生する衝突応力は、衝突直前速度に依存することがよく解説されている^{例えば 15)}。橋梁上部構造の地震時衝突速度と床版や主桁に作用する応力度の関係を非線形動的解析により定量的に評価した研究事例は少ない^{例えば 16)}。本研究では上部構造と隣接構造物の衝突際の衝突直前速度と、床版内の衝突応力度関係について、床版の損傷が危惧される衝突直前速度について分析を行う。また、著者らは、非線形有限要素解析に基づいて、床版と主桁を独立にモデル化した詳細モデルによる衝突現象の解析精度の検証結果について、これまでに報告を行ってきた¹⁷⁾。しかし、耐震設計時に非線形動的解析で用いられる簡易モデル (1 本梁モデ

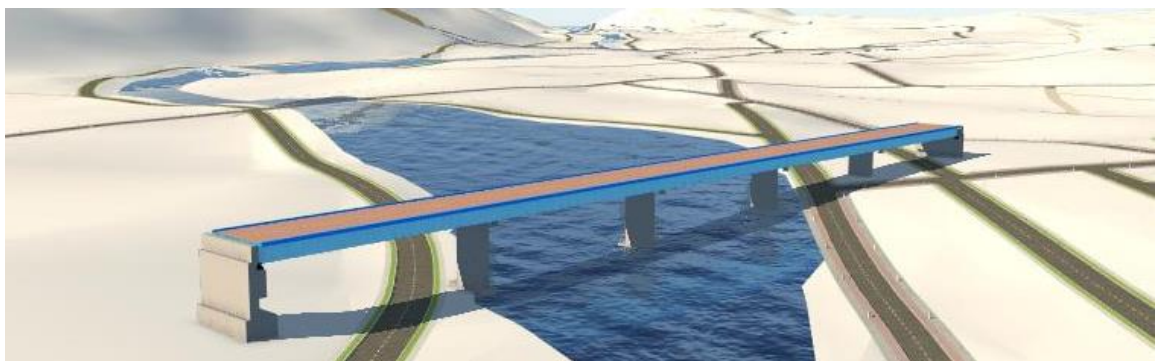


図-1 本研究の対象橋梁構造物

*1 山口大学大学院 創成科学研究科 博士前期課程 (学生会員)

*2 山口大学大学院 創成科学研究科 准教授 (正会員)

*3 長大(株) 構造事業本部 技術統括部

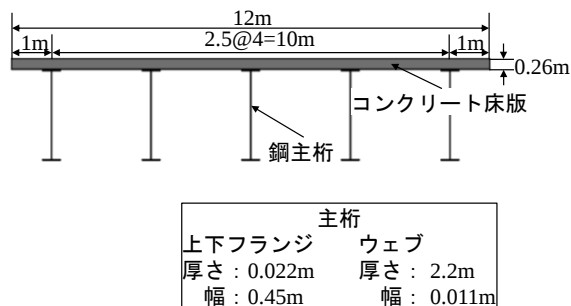


図-2 対象橋梁構造物断面図

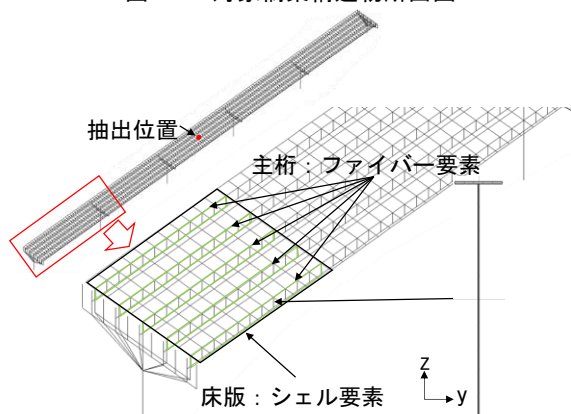


図-4 詳細モデルのモデル化

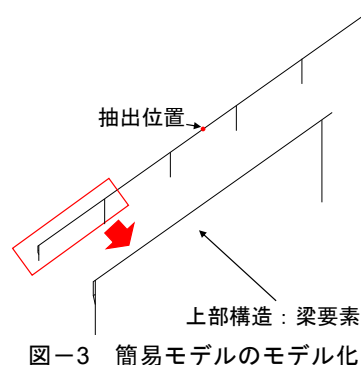


図-3 簡易モデルのモデル化

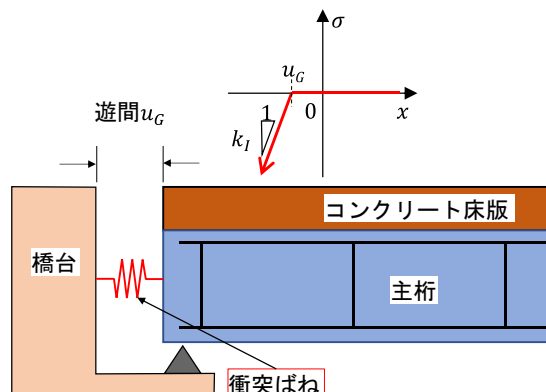


図-5 衝突現象再現のモデル化イメージ

ル) による衝突現象については、十分検証が行われているとは言えない。簡易モデルと詳細モデルによる非線形地震応答解析に基づき、橋梁上部構造の衝突時挙動について比較検討を行い簡易モデルの解析精度の検証を行う。

県道 28 号線沿いに架橋された一連の橋梁構造物群は平成 8 年の道路橋示方書に基づいて設計がなされている。ここでは、平成 8 年同示方書¹⁴⁾に基づき設計された図-1 に示す橋長 200m (支間が 40m) の水平力分散構造で弾性支持された 5 径間連続直線鋼桁橋¹⁸⁾を対象として検討を行う。

2.2 モデル化と衝突現象の再現

下部構造はファイバー要素で、橋脚部フーチング以下は地盤と基盤の相互作用は地盤ばねと呼ばれる要素でモデル化した。なお、橋台については、上部構造衝突時に変形する懸念はあるが、この影響については別途検討中であり、本研究では、床版や主桁に対して不利な条件となるように、橋台は地盤に固定されているものと仮定して解析を行った。支承部については、上部構造に橋台と衝突する程の変位が生じると、ゴム支承に相当せん断ひずみが発生することが懸念されるが、ここでは衝突現象に注目するために支承は線形ばね要素でモデル化した。

図-2 には断面図を示すが上部構造は、コンクリート床版と鋼主桁からなっている。簡易モデルを図-3 に示すが、床版・主桁を鋼換算した断面積 (0.5914m^2) をも

つ弾性梁要素でモデル化した。一方、詳細モデルは図-4 に示すように、主桁をファイバー要素で、床版をシェル要素 (Mindlin Shell) でモデル化し、床版と主桁はオフセット要素で結合させている。また、衝突現象を再現するために、図-5 に示すように、上部構造と橋台パラペット間に衝突ばね要素を挿入した。これは、上部構造と橋台間の遊間が初期遊間量 (0.35m) よりも小さくなった時点で剛性を発揮する非線形ばね要素である。接触時のばね剛性は隣接する構造要素の軸方向剛性を与えるが、簡易モデルの場合は上部構造要素の軸方向剛性を^{9)~12)}、詳細モデルでは、主桁を表すファイバー要素の軸方向剛性¹⁷⁾をそれぞれ与えることで、衝突現象を精度よく再現することが出来る。なお、床版と橋台間には一般に緩衝装置が挿入されていることから、詳細モデルでは、床版が橋台間に衝突はせず、床版よりも主桁が先に橋台に衝突すると仮定して、主桁~橋台間のみ衝突ばねを挿入した。

2.3 入力地震動

図-6 には本研究の非線形地震応答解析に用いた入力地震動の 2016 年熊本地震の際に西原村小森で観測された断層走行成分 (以後、FP 成分と記述) と 1995 年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された断層直交方向 (以後、FN 成分と記述) の加速度時刻歴を示す。ただし、兵庫県南部地震の記録は角度補正を行っている。同図より、熊本地震は 1 秒から 6 秒、兵庫県南部地震は 2 秒から 7 秒に示すような強震動が観測された。

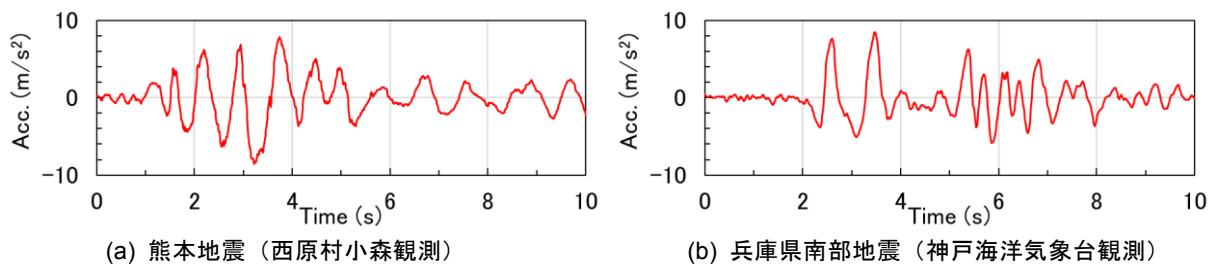


図-6 本研究で用いた地震動記録

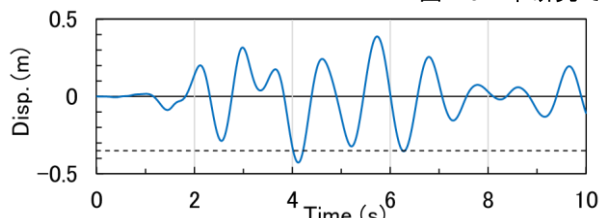


図-7 衝突現象を考慮しない桁間相対変位時刻歴

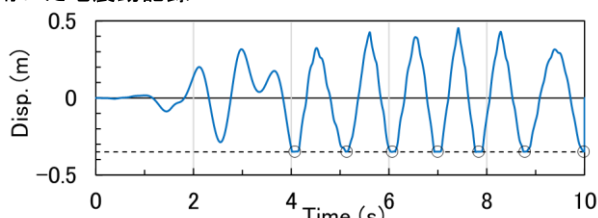


図-8 衝突ばねの桁間相対変位時刻歴

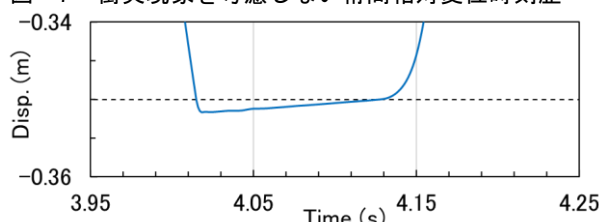


図-9 4秒付近衝突時相対変位時刻歴拡大

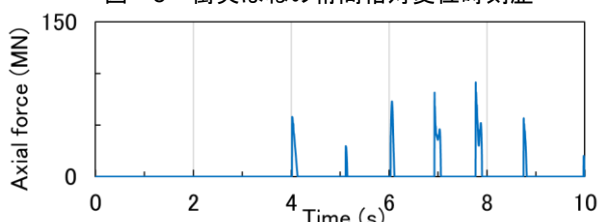


図-10 衝突ばねの衝突力時刻歴

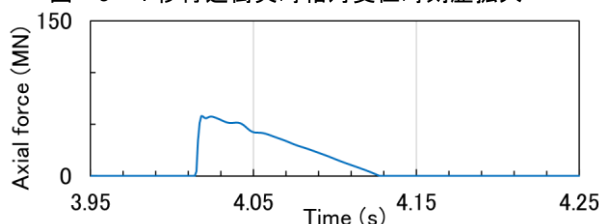


図-11 4秒付近衝突時衝突力時刻歴拡大

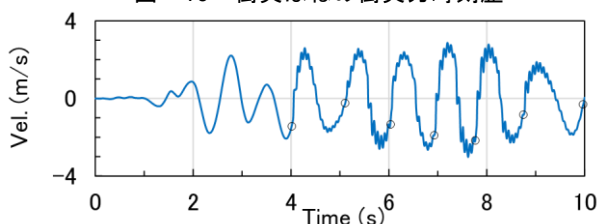


図-12 抽出位置の相対速度時刻歴

3. 詳細モデルを用いた主桁・床版の応力分担率の評価

西原村小森で観測されたFP成分を入力し、衝突現象を考慮しない場合の上部構造と橋台の相対変位応答の時刻歴を図-7に示す。同図の縦軸の正側は橋台から離れることを示しており、負側は橋台に近づくことを示している。遊間量に相当する0.35mを超えており、上部構造と橋台が衝突することが示唆される。

3.1 地震時衝突挙動の再現

衝突することが示唆されることから、衝突を考慮して解析を行った。遊間量は衝突が発生する様に0.35mと設定を行った。図-8には桁間の相対変位時刻歴を示すが衝突現象の考慮有無によって地震時挙動が大きく異なっている。黒の点線は遊間量0.35mを示している。上部構造は、橋台に接近と離反を繰り返しながら、○で示す時刻で上部構造と橋台の相対変位量が遊間量に達した。時刻4秒付近に発生した衝突の相対変位時刻歴の拡大を図-9に示すが、4.014秒で上部構造と橋台の相対変位量が遊間量に達し、めり込むように衝突し、その後4.128秒で上部構造が橋台から離れていることが分

かる。各主桁に取り付けた衝突ばねに発生した衝突力の総和について時刻歴を図-10に、時刻4秒付近で発生した衝突の衝突力時刻歴の拡大を図-11に示すが、上部構造と橋台の相対変位が遊間量に達した同時刻において、衝突力が発生していることが分かる。また、○で示した衝突すべてにおいて、同様な現象が発生している。図-12には桁間の相対速度時刻歴を示す。上部構造が橋台に衝突する直前の速度を○で示しているが、衝突によって上部構造は速度を変化させていることが分かる。また、衝突が生じた4秒以降に於いて、応力波の伝播に伴う高周波振動が励起されている。なお、各衝突によって、衝突直前速度が異なるため衝突力は異なっており、衝突直前速度が大きいとそれに伴って、衝突力が大きくなっている。

3.2 主桁・床版間の応力分担率の評価

モデル化の違いが地震時の応答に影響を及ぼすのか検討を行う。簡易モデルと詳細モデルの相対変位時刻歴、速度時刻歴、衝突ばねに発生した衝突力時刻歴、図-3及び図-4の抽出位置で発生した応力時刻歴を、そ

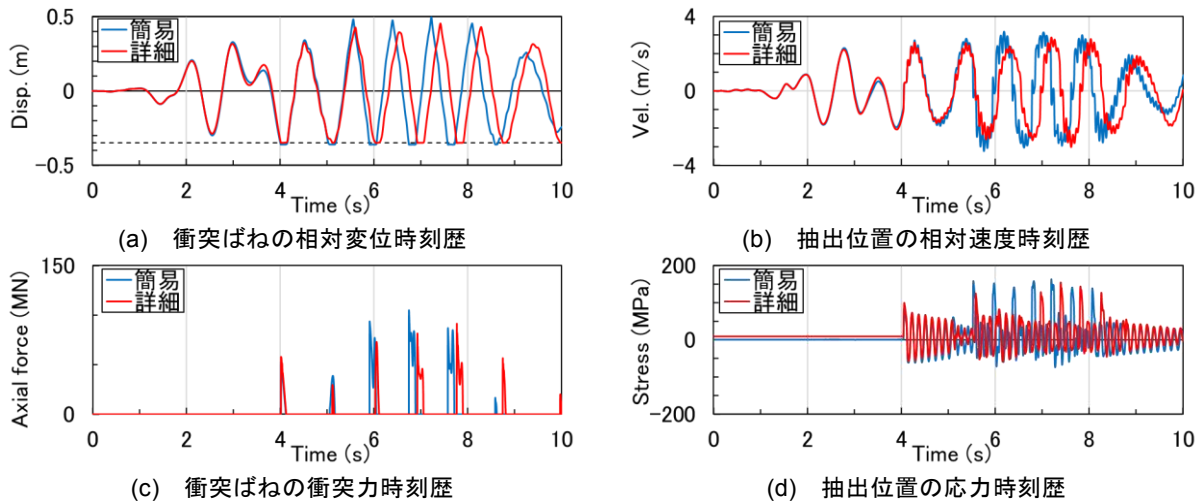


図-13 詳細モデルと簡易モデルによる地震地応答比較

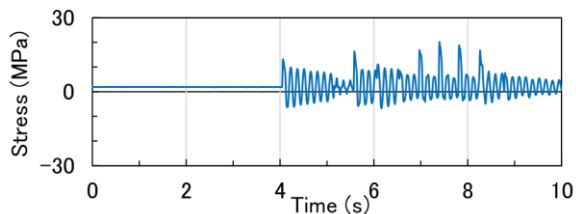


図-14 抽出位置の床版に発生した応力時刻歴

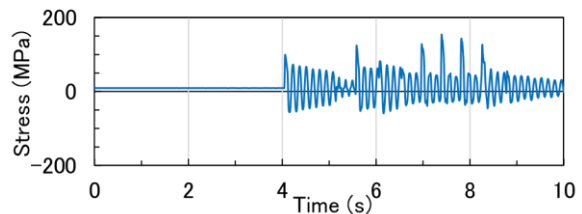


図-15 抽出位置の主桁に発生した応力時刻歴

れぞれ、図-13の(a), (b), (c), (d)に示す。詳細モデルの応力は、床版、主桁それぞれで発生した応力の合算値である。赤線が詳細モデル、青線が簡易モデルを示しているが、最初の衝突以降衝突タイミングが異なっている。しかしながら、相対変位や速度の挙動や衝突の際に発生した応力が概ね等しいことから、詳細モデルと簡易モデルで概ね等しい挙動が再現されている。

衝突によって床組みを構成する各部材に応力が流れるのか、またその負担の割合を調べるために、RC床版中央および縦桁中央に生じる軸応力の時刻歴応答を図-14および図-15に示す。詳細モデルでの解析では、8秒付近の衝突が一番大きな衝突力が発生しているが、その衝突の際に、床版には、最大18.8MPa、主桁に最大143.6MPaの応力が発生している。衝突によって上部構造に発生した応力の0.116倍の応力が床版に伝達したことが分かる。

一方、全体応力を σ とし、床版に作用する応力を σ_1 、主桁に作用する応力を σ_2 とすると式(1)の関係式が成立する。ここで、応力は式(2)の関係式を持ち、式(1)と式(2)より、全体応力のうち床版に作用する応力の割合は式(3)となり、割合を求めると、

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (1)$$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2)$$

$$\sigma_1/\sigma = 1 - E_2/E_1 + E_2 \quad (3)$$

ここで、ひずみは同一であるとし、床版のコンクリートヤング率 $E_1: 2.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ であり、主桁の鋼材ヤング

率 $E_2: 2.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ と定義している。これより、全体応力のうち床版に作用する応力の割合は、0.111倍である。解析値と概ね近い値である。よって、簡易モデルにおいても床版に作用する応力が算出できることから、以降は計算時間を減らし簡易モデルを用いたパラメトリックスタディを実施した。

4. 衝突によるRC床版への衝突応力の速度依存性

衝突直前速度の大きさによって、衝突力の大きさが決まる傾向である。そのことから、衝突直前速度を変更するために様々な条件の変更を行い、解析を行った。

4.1 入力地震動の違いが衝突時挙動に及ぼす影響

図-16に遊間量0.35mの場合で、西原村小森で観測されたFP成分と神戸海洋気象台で観測されたFN成分を入力した場合の相対変位時刻歴、速度時刻歴、衝突ばねに発生した衝突力時刻歴を示す。熊本地震と同様に兵庫県南部地震においても、上部構造が橋台に接近と離反を繰り返しながら複数回上部構造と橋台の相対変位量が遊間量に達している。熊本地震と兵庫県南部地震では当然地震動の波形が異なるため、最初の衝突現象が発生するまでの挙動は異なる。しかしながら、初めの衝突した後、両橋台間を繰り返しながら衝突していることから、衝突力や相対速度に多少誤差はあるが、衝突後の地震時挙動は概ね似た挙動を示している。

4.2 遊間の違いが衝突挙動に与える影響

3章で述べた通り衝突直前の橋桁の速度に比例して

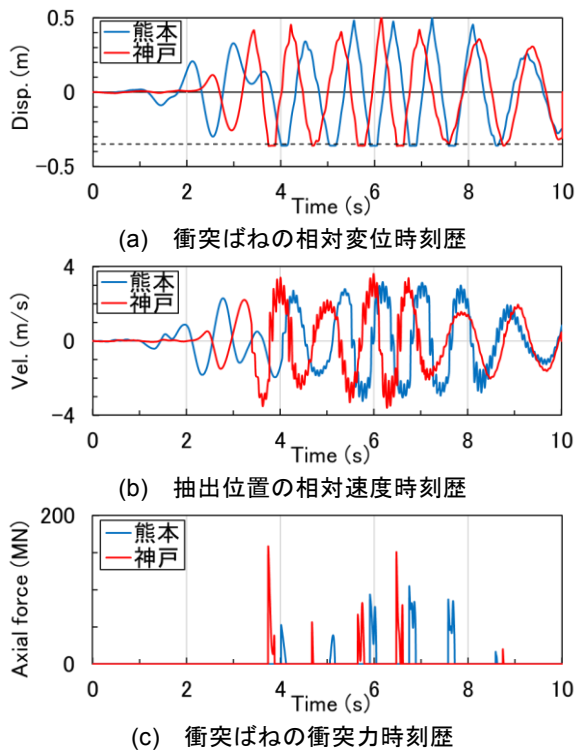


図-16 熊本地震と兵庫県南部地震地応答比較

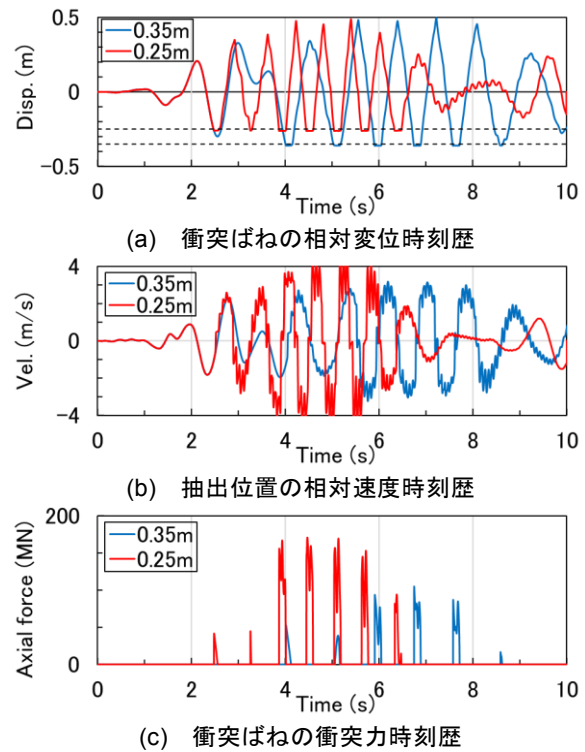


図-17 遊間量による地震地応答比較

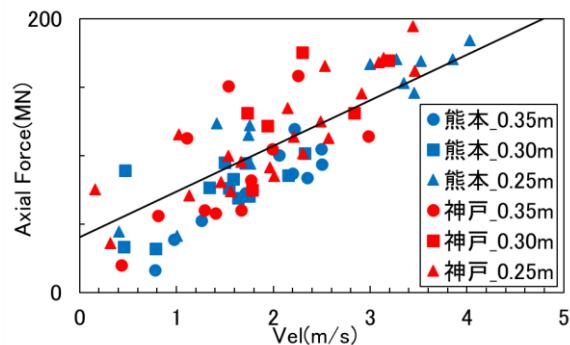


図-18 衝突ばねの衝突力と衝突直前速度の関係

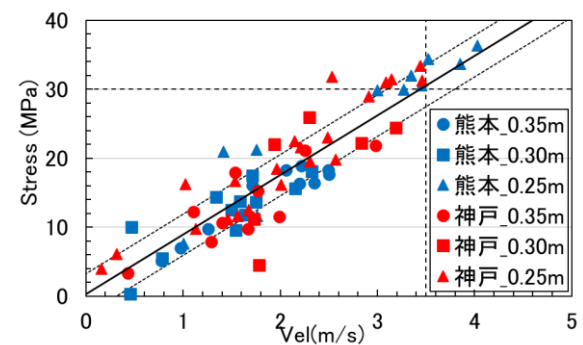


図-19 抽出位置での床版応力と衝突直前速度の関係

衝突力が大きくなる。桁の遊間量を変えて、衝突するタイミング及び衝突直前の桁の相対応答速度が衝突力に及ぼす影響について分析を行った。ここで遊間量として、0.3mと0.25mとする。図-17には異なる遊間量を設けた場合の相対変位時刻歴、速度時刻歴、衝突ばねに発生した衝突力時刻歴をそれぞれ示す。遊間量を狭くしたことで衝突が発生しやすくなり、衝突回数が増えている。また、衝突現象の発生間隔も短くなっている。これは、遊間が小さくなることで橋台への接近と離反の周期が短くなったためであると考えられる。速度時刻歴、衝突力時刻歴より、上部構造の速度応答も大きくなり、衝突直前速度も速くなっている。その結果衝突力も大きくなっている。

4.3 衝突直前速度の依存性

これまでに、解析を行った西原村小森で観測された

FP成分、神戸海洋気象台で観測されたFN成分それぞれの遊間量0.35m、0.3m、0.25mの衝突直前速度と衝突ばねに発生した衝突力の関係を図-18に示す。なお速度依存性を調べるために、回帰分析を行い、次式に示す回帰式を得た。

$$F = 33.325v + 40.48 \quad (4)$$

西原村小森のFP成分、神戸海洋気象台のFN成分は、同程度の衝突直前速度でも、神戸海洋気象台で観測された地震動の方が、衝突力が大きくなる傾向である。

図-19に前章で算出した床版への応力割合を用いて、抽出位置で発生した床版に作用する応力と衝突直前速度の関係を示す。なお図-18と同様に回帰分析を行い、次式に示す回帰式を得た。

$$\sigma = 8.635v + 0.2971 \quad (5)$$

$$\sigma = 8.635v + 0.2971 \pm 3 \quad (6)$$

また、黒のドット線は、近似線の1割の応力を増減したものであり、ばらつきの大きさは3MPa程度である。床版に作用する応力の場合では、図-18の関係図と比べるとばらつきが小さく、概ね衝突直前速度に比例して応力が大きくなることが分かる。

衝突によって伝播する弾性圧縮応力波によって、床版が損傷・破壊するとは考えにくい。圧縮強度(30MPa)に達することで損傷が生じると仮定すると、その衝突直前速度は3.5m/s程度であり、遊間量を0.3m以上確保してしておけば、損傷が抑えられると推測される。

5. 結論

本研究では、衝突現象を考慮して、衝突直前速度と衝突力の関係に着目し、骨組み構造解析によって、床版に作用する応力の危惧される衝突直前速度の推定を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 地震時に上部構造の変位が大きくなり、その変位が初期遊間量よりも大きくなると隣接する橋台に衝突するが、初期遊間量が小さいと、両橋台間を往復しながら衝突を繰り返す挙動が確認された。
- 2) 詳細モデルを用いた衝突解析に基づいて、上部構造を構成する床版と主桁の応力分担率の評価を行った。床版と主桁の応力分担率は、部材の弾性係数の違いに依存し、式(3)で推定可能となる。
- 3) 衝突直前速度と衝突力の関係は、ばらつきが大きかったが、衝突直前速度と床版に作用する応力の関係は、ばらつきが小さく地震動や遊間量に関わらず概ね比例関係になることが分かった。
- 4) 床版に作用する応力と衝突直前速度の関係より、床版コンクリートの最大圧縮強度を30MPa程度とすると、床版が衝突によって損傷する衝突直前速度は3.5m/s程度であることが分かった。

参考文献

- 1) 大住道生、要因は、地盤変位か振動か ～熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷痕に基づく要因分析～、第10回CAESAR講演会、2017.8.
<https://www.pwri.go.jp/caesar/lecture/lecture10.html>
- 2) 性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会 活動報告書、題V編 熊本地震による橋梁被害の分析、公益社団法人 土木学会 地震工学委員会、平成30年3月。
- 3) 本橋英樹、野中哲也、馬越一也、中村真貴、原田隆典：熊本地震の断層近傍における地震動と橋梁被害の再現解析、構造工学論文集、Vol. 63A, pp. 339-352, 2017. 3.

- 4) 堺 淳一、運上茂樹、星隈順一：大規模地震における落橋メカニズムと落橋防止構造の効果に関する分析、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 7, No. 1, pp. 55-71, 2005.
- 5) 田崎賢治、幸左賢二、山口栄輝、庄司学：桁衝突による橋梁の被害分析、土木学会論文集、No. 794/I-72, pp. 134-156, 2005.
- 6) Tzu Ying Lee, Wen Hsiao Hung, Kun Jun Chung : Seismic-induced collapse simulation of bridges using simple implicit dynamic analysis, Engineering Structures, Vol.177, pp.1-11, 2018, 12.
- 7) 大塚久哲、神田昌幸、鈴木基行、吉澤努：水平地震動による曲線橋上部構造の移動挙動解析、土木学会論文集、No. 570/I-40, pp. 305-314, 1997. 7.
- 8) 大塚久哲、神田昌幸、鈴木基行、川神雅秀：斜橋の水平地震動による回転挙動解析、土木学会論文集、No. 5701/I-40, pp. 315-324, 1997.
- 9) 川島一彦：動的解析における衝突のモデル化に関する一考察、土木学会論文報告集、第308号、123-126, 1981.
- 10) 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. 10.
- 11) 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. 4.
- 12) 阿部雅人、藤野陽三、吉田純二、朱兵、柳野和也：地震時における橋桁の衝突現象のモデル化と実験的検証、土木学会論文集、No. 759/I-67, pp. 181-197, 2004.
- 13) 玉井宏樹、園田佳巨、後藤恵一、梶田幸秀、濱本明久：桁端衝突による橋台の損傷度評価および衝突ばね特性に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol. 53A, 2007. 3.
- 14) 社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編, pp. 275-290, 2017.
- 15) 宇治橋貞、宮崎祐介：衝撃工学、コロナ社, pp. 21-69, 2020.
- 16) 幸左賢二、後藤僚一、金山亨、高橋良和：ロッキング橋脚上の桁と変位制限構造遊間の影響検討、土木学会論文集、Vol. 76, No. 4, p. I_47-I_56, 2020.
- 17) 竹内諒、渡邊学歩、馬越一也、葛西昭：複合鈑桁橋の地震時衝突現象に関する有限要素法に基づく構造解析、土木学会論文集、Vol. 76, No. 4, pp. I_695-I_708, 2020.
- 18) 社) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料, p. 2.1-2.139, 平成9年3月。