

橋桁と橋台間の衝突における複合構造部材内の 弾性応力波の波動伝播現象に関する有限要素解析

竹内 諒¹・渡邊 学歩²・葛西 昭³・馬越 一也⁴

¹ 学士(工) 山口大学大学院 創成科学研究科 社会建設工学専攻 (〒755- 8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: doboku@.ac.jp

² 博士(工) 山口大学大学院創成科学研究科 社会建設工学専攻 (〒755- 8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: gakuho.w@yamaguchi-u.ac.jp

³ 博士(工) 熊本大学 准教授 大学院先端科学研究部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)
E-mail: kasai@kumamoto-u.ac.jp

⁴ 正会員 株式会社 耐震解析研究所 解析技術センター (〒810-0003 福岡県福岡市中央区春吉 3-21-19)
E-mail: magoshi@scan.co.jp

1. はじめに

近年、地震時に橋梁を支持する地盤が変位したり、上部構造の応答変位が大きくなるなどして、上部構造が隣接構造物と衝突した痕跡や、それらによって生じたとみられる構造部材の被害が報告されている^{1)~6)}。

過去には、1995 年の兵庫県南部地震において、瓦木西高架橋や湊川ランプ橋など、斜橋や曲線桁橋において上部構造と隣接構造との衝突に起因したと見られる落橋の被害が報告され^{7),8)}、橋梁上部構造の衝突が地震時挙動に与える影響についての研究が行われてきた^{例え(ば 9)~11)}。これらにより得られた知見は、上部構造が橋台からの落下や隣接する構造を衝突が生じないように十分な桁掛かり長を設けることや、斜橋や曲線橋の特異な地震時挙動への対策等に活かされている¹²⁾。

橋梁上部構造が隣接する構造に衝突した際の衝突現象の再現については、衝突ばねを用いた解析が一般的となっている^{例え(ば 13)~17)}、これらは衝突時の応力波の一次元波動伝播を理論的根拠としている¹⁸⁾。弾性波速度の異なるコンクリート床版と鋼主桁で構成される複合桁橋構造では、材質の違いにより、異なる弾性波速度で応力波が伝わることも予想される。こうした点に着目し、一次元の波動伝播理論によって衝突現象が説明可能となるかどうかについて研究を行った事例はほぼない。本研究では、コンクリート床版と鋼主桁からなる複合桁橋構造を対象

として、詳細な FE モデルによる有限要素解析により、上部構造衝突時の応力波の波動伝播現象の分析を行う。また、これにより、異なる材料特性を有する部材で構成される複合構造内の波動伝播現象について考察を行ったので、これを報告する。

2. 衝突時の部材内の応力波の波動伝播速度

2 つの弾性棒が軸方向に衝突する場合、衝突による応力波で生じる棒の軸方向変位を u とすると、一次元の波動方程式は以下の通りとなる¹⁸⁾。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで、 C は波動伝播速度であり、次式で与えられる。

$$C^2 = \frac{E}{\rho} \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 E は弾性係数である。

後述する解析では、上部構造にはコンクリートと鋼材を用いた複合構造を対象として、上部構造と橋台部の衝突による上部構造内の応力波の波動伝播に関する数値解析を行う。コンクリートの密度および弾性係数をそれぞれ、 $2.50 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、 $2.5 \times 10^7 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ 、鋼材の密度および弾性係数をそれぞれ、 $7.85 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、 $2.5 \times 10^7 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ とすると、コンクリートおよび鋼材の波動伝播速度はそれぞれ、 3163.3 (m/s) 、 5047.0 (m/s)

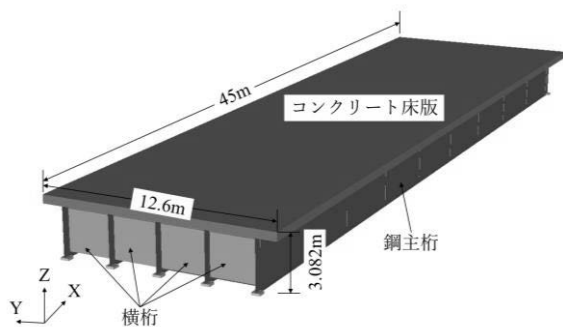


図-1 解析対象構造物

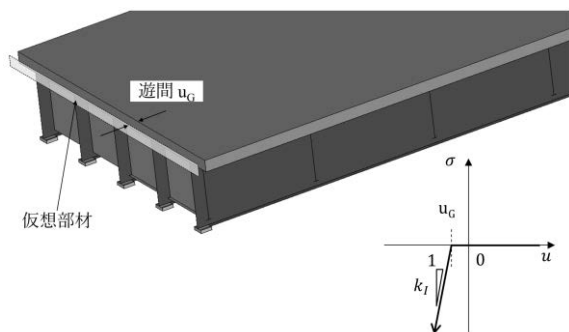


図-3 インターフェース要素とそのモデル化

となり、鋼主桁内の応力波の波動伝播速度の方が、コンクリート床版内の応力波の波動伝播速度よりも 1.6 倍程度速いことが分かる。このような弾性波速度の違いが、複合構造物の衝突現象に及ぼす影響について考察を行う。

3. 解析で対象とした橋梁上部構造とそのモデル化

(1) 解析対象の概要

本研究では、熊本地震によって、上部構造との衝突の痕跡が橋台部に確認されている連続曲線高架橋を対象に、その上部構造の一部をモデル化して有限要素法に基づく地震応答解析を行い、上部構造と橋台間の衝突現象の再現を試みた。図-1 には、本解析で対象とした橋梁上部構造を示すが、コンクリート床版と鋼主桁（5 主桁）からなる幅員 12m、スパン 45m 上下 2 車線の複合鈑桁である。主桁の一部を取り出した部分構造を、図-2 に示すが、主桁高さ 2.632m であり、主桁同士は 4.5m 間隔に配置された横構により互いに連結されている。各桁の両端はゴム支承によって弾性支持されており、これによって、橋桁は 1 次固有周期は 1.31 秒で、橋軸方向に並進振動するモードが卓越する振動特性を有する。

(2) 上部構造と隣接構造間の衝突に関するモデル化

樑部材同士の衝突現象を構造解析で再現する際には、衝突ばねと呼ばれる接触時に高い剛性を発揮する仮想の

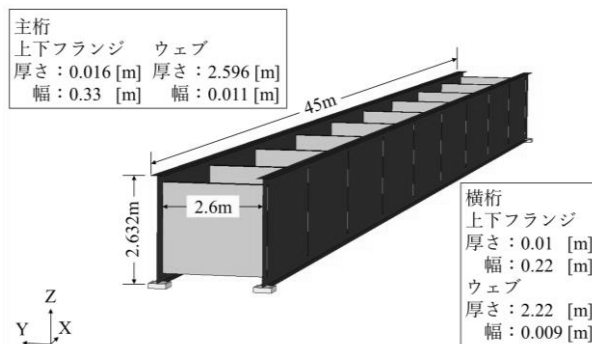


図-2 主桁の概要

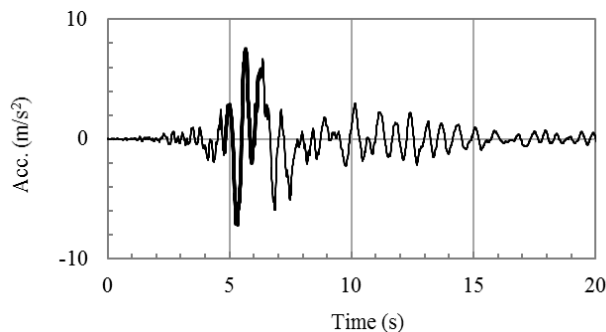


図-4 入力地震動

ばね要素を用いるのが一般的である。しかし、本解析では上部構造を有限要素モデルでモデル化しているために、衝突ばねを用いると隣接構造間との接触位置が限定され、衝突力が正しく評価できない可能性が懸念される。このため、本解析では橋台部と接触する床版端面と橋台壁面の間に仮想の要素（インターフェース要素）を配置して、これが接触時にのみ高い剛性や応力が生じるようにすることにより、上部構造と隣接構造間の衝突現象をモデル化した。なお、このインターフェースの接触現象を表す仮想要素は、方向を変えると摩擦現象を表す要素として用いることができ、本解析で用いた汎用構造解析ソフト（Diana）では、図-3 に示す通り、応力と変位の関係として、その非線形性が定義できるようになっている。なお、橋台部をモデル化する際には、背面土の影響を考慮する必要があるが、背面土の剛性次第で橋台部の挙動が大きく変化するために、本解析では橋台部はあえてモデル化せず、固定点（固定壁面）としてモデル化している。

(3) 動的解析手法および入力地震動

後述する章では、主桁部をシェル要素で床版部をソリッド要素でモデル化した上部構造（複合鈑桁構造）の FE モデルを用いて、Newmark β 法による非線形地震応答解析を実施した。

前述の通り本解析で対象としている上部構造は、熊本地震の際に被災した連続曲線高架橋の上部構造の一部で

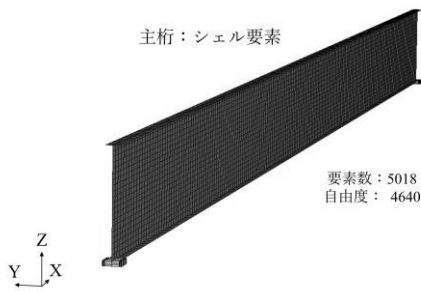


図-5 1本主桁のFEモデル

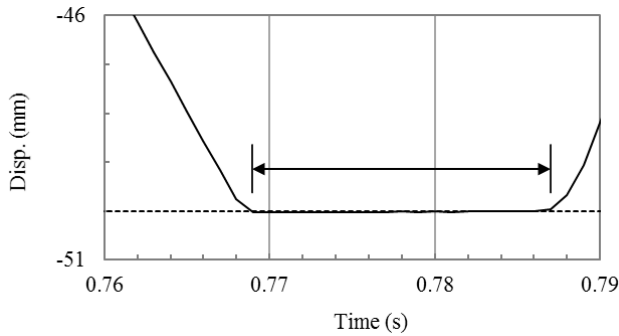


図-7 衝突時間内の変位時刻歴

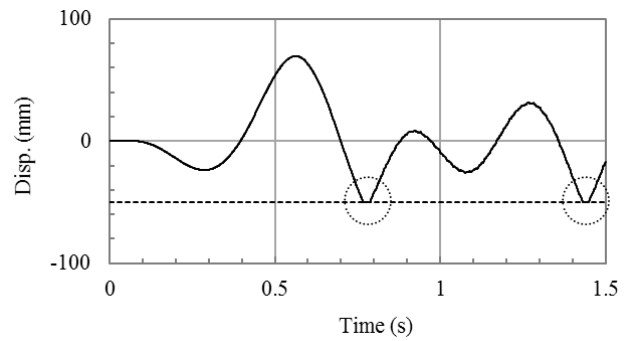


図-6 単主桁の変位時刻歴

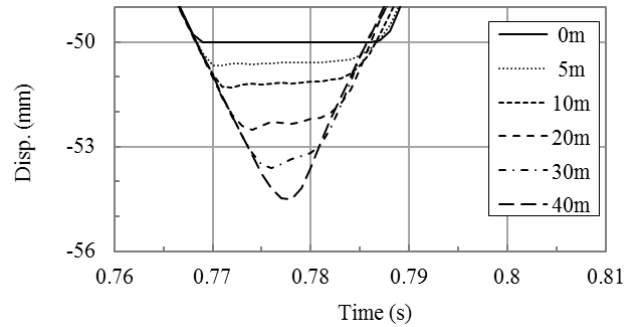


図-8 各位置における衝突時間内の変位比較

ある。別途実施している連続曲線高架橋の非線形地震応答解析²⁰⁾では、図-4に示す西原村の強震動記録を入力地震動としている。本解析では、同図に太線で示した4.8秒から6.3秒間の主要動部分を本解析における入力地震動として用いた。また、減衰はレイリー減衰によりモデル化し、振動数比例項（質量比例減衰）および振動数に反比例する項（剛性比例減衰）のパラメーターをそれぞれ、 $\alpha = 0.007$ 、 $\beta = 0$ とした。

4. 単一材料からなる構造の波動伝播解析

複合鋼桁構造の波動伝播解析を実施する前に、単一材料による上部構造の衝突現象の再現と波動伝播解析を実施することで、有限要素法に基づく衝突現象の妥当性について検証を行った。

(1) 単一材料構造物の概要

図-5には、本章で対象とした主桁単体のFEモデルを示す。これは、前章にて詳述した鋼桁構造を構成する鋼主桁である。主桁は上下のフランジとウェブをそれぞれシェル要素を用いてモデル化を行った。長手方向に200分割、高さ方向に20分割をして、要素の一辺の長さが概ね2.5cm程度と十分小さくなるようにモデル化した。その結果、主桁単体の要素数は5018、自由度数は4640となった。また、衝突現象を再現するために図-3に示

したインターフェース要素を主桁端面に配置した。なお、主桁と橋台の遊間を $u_g = 5\text{cm}$ としてモデル化した。

(2) 衝突時における桁の変形挙動

図-6には、主桁端面の応答変位を示す。変位が正側（+側）に向かうほど橋台から離れ、負側（-側）に向かうほど橋台に近づく。主桁は橋台に接近と離反を繰り返しながら、0.78秒付近において遊間量相当の変位が発生し、主桁が橋台に接触したことが示唆される。図-7には、図-6に示した応答変位を0.78秒付近について拡大して示す。主桁の変位が0.768秒で遊間量に達し、これが0.786秒まで保持され、その後、主桁の変位は減少し、橋台から離れるように移動している。0.018秒間だけ主桁と橋台が接触していることを表している。

同時刻帯における桁端面から10m置きの各点の主桁の変位の時刻歴を図-8に示す。桁端面（0m）は遊間量を維持しているが、反対側の端面に向かうほど桁は橋台側に押し込まれるように変形していることが分かる。

(3) 衝突時における桁内部を伝播する応力波

図-9には、衝突時における主桁内部の直応力分布を衝突発生（0.768秒）から終了（0.777秒）までの時刻帯で示す。桁の変位が遊間量に達した0.768秒から左桁端面から20 (MPa)程度の圧縮応力（正值）が発生し、衝突時間 $t_1 = 0.018$ の半分の時刻0.777秒で反対側端面ま

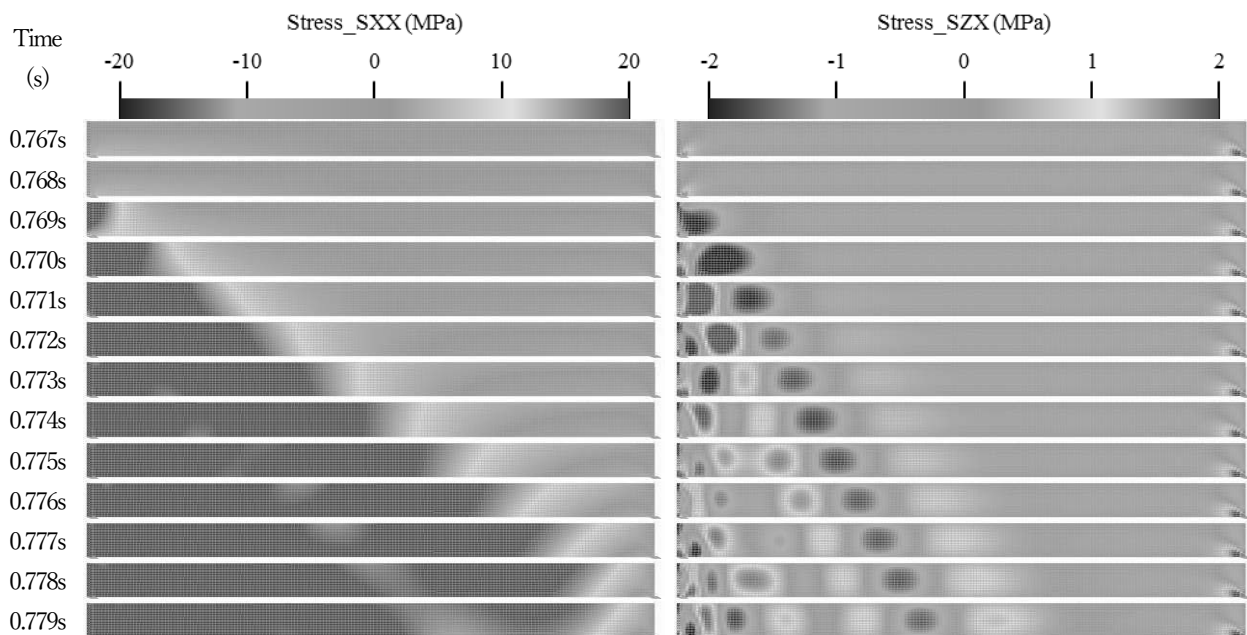
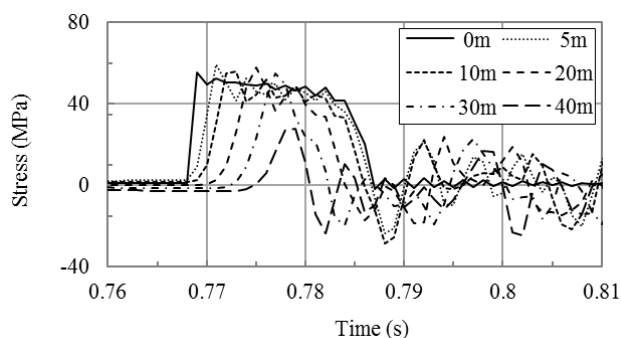
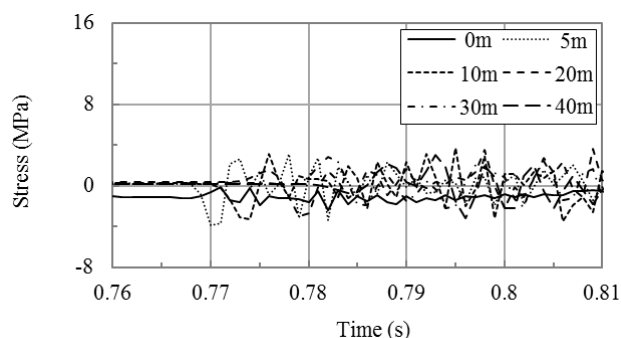


図-9 衝突時間内の直応力分布

図-10 衝突時間内のせん断応力分布



(a) 直応力



(b) せん断応力

図-11 各位置における衝突時間内の応力比較

で応力波が伝播している様子が確認できる。比較のために、図-10には、同時刻帯における主桁内部のせん断応力分布を示す。直応力とせん断応力においても同様に、桁が遊間に達した時点でせん断応力が生じ、右側に伝播している様子が確認できる。また、直応力の波の伝播する速度よりも、せん断応力の波の伝播速度が遅いことも整合する。

図-11の(a)には、桁端面から10m置きの断面中央に生じる直応力の時刻歴を示す。衝突開始(0.768秒)と供に実線で示した衝突面(0m)の応力値が急激に上昇していることが確認できる。また、時刻0.777秒において、衝突面と反対側(40m)の地点の直応力が励起されていることから、衝突によって発生した応力波が桁内部を伝播していることが示唆される。なお、その後は、衝突面の反対側(40m)の地点から衝突面(0m)に向かって順々に応力が低下していき、桁が橋台から離れる0.786

秒以降では桁内部の応力が概ね0に収束している。以上により、衝突によって発生した直応力が桁内部を一往復した後、桁が橋台から離れており、単一材料による主桁の衝突現象においても一次元波動伝播理論が適用可能であることが確認できた。なお、以上により衝突継続時間(0.018秒)から逆算される応力波の平均伝播速度は約5000m/sとなり、これは、前述した鋼部材の弾性波速度5047.0m/sに概ね一致している。

図-11の(b)には、せん断応力の時刻歴を同図の(a)と同様に示す。直応力に比べてせん断応力は1/10倍の振幅レベルとなっている他、0点周りを振動しており、衝突現象との明確な関連性は見られなかった。

(4) 接触面の剛性の影響

前述した解析で設定した桁と隣接構造間の荷重変位関係の剛性を基準剛性(1倍)として、剛性を10倍、0.1

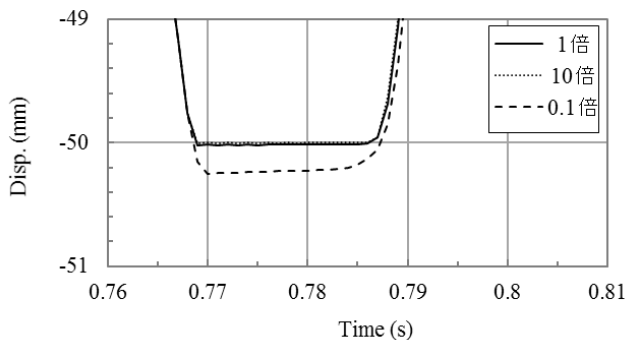


図-12 剛性別の変位時刻歴

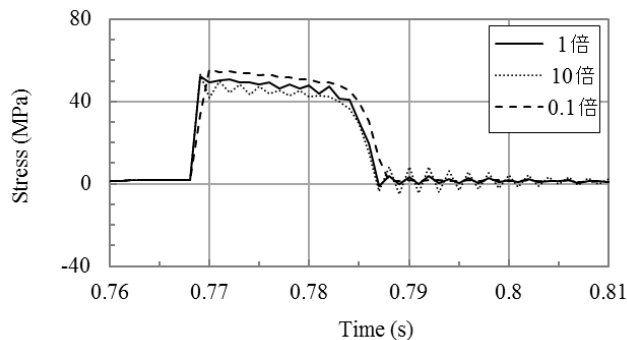


図-13 剛性別の直応力時刻歴

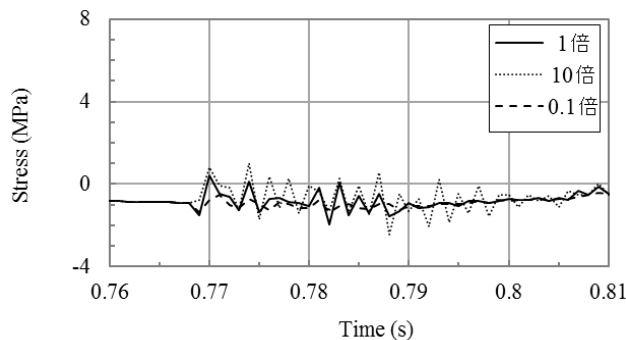


図-14 剛性別のせん断応力時刻歴

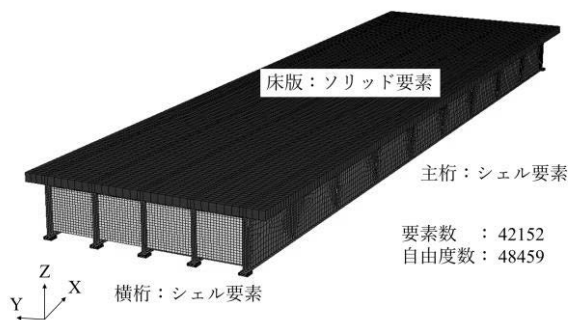


図-15 複合構造の FE モデル

倍した2つの解析を行い、各解析の衝突時の挙動及び応力状態の比較を行った。

図-12には、剛性別の衝突時間内変位履歴の比較を示す。また、図-13には、直応力の時刻歴応答、図-14には、せん断応力の時刻歴応答を示す。隣接構造間の荷重変位関係の剛性を10倍した場合、衝突時の変位は基準剛性（1倍）の場合と比べて大きな変化はなかった。しかし、衝突時に桁内部に発生する直応力及びせん断応力の時刻歴において大きな振動が発生しており、不安定な解析結果となった。一方、荷重変位関係の剛性を0.1倍した場合、桁は橋台中へとめり込み（オーバーラップが大きく）、衝突時間は基準剛性の時に比べて長くなった。

5. 複合構造物の波動伝播解析

コンクリート床版と鋼主桁からなる複合版桁橋の上部構造について同様の地震応答解析を行い、衝突時の波動伝播現象について分析を行った。

(1) 複合構造物の概要

図-1に示した複合版桁を、図-15に示す様に、コンクリート床版はソリッド要素で、鋼主桁と横桁はシェル要素でそれぞれモデル化を行った。この結果、要素数が42152、自由度数が48459のFEモデルとなった。なお、衝突現象を表すインターフェース要素を床版と隣接する

橋台部に配置し、桁遊間を $u_g = 35\text{cm}$ としてモデル化を行った。なお、主桁部は実構造においても、橋台部とは桁遊間以上の遊間があるために、衝突現象を表すインターフェース要素は設けていない。

(2) 衝突時における橋桁の変形挙動

図-16には、床版端面の相対変位の時刻歴応答を示す。変位が正側（+側）に向かうほど、上部構造は橋台から離れ、負側（-側）に向かうほど上部構造が橋台に近づく。上部構造は一度橋台から離れた後、橋台に接近する方向に変位し、1.38秒付近で、橋桁の変位量が遊間量に達している。このため、図-17には同時刻帯の相対変位を拡大して示す。橋桁は1.367秒で遊間量を超えた後、一定の変位を維持する。その後、1.397秒で橋台から離れていく様子が確認出来る。以上により、衝突継続時間 T_I は0.029秒となる。

(3) 複合構造内の応力の波動伝播

図-18には、衝突時の床版に生じる直応力の分布を衝突開始時刻1.367秒から1.381秒まで0.02秒ごとに図示する。衝突開始の1.367秒から、床版端面には圧縮応力が発生している。その後、衝突時間の半分の時刻1.381秒には衝突面の反対側にまで直応力波が達している様子が確認できる。また、図-19には、衝突開始時刻からの主桁内部に生じる直応力分布を0.01秒ごとに示す。こ

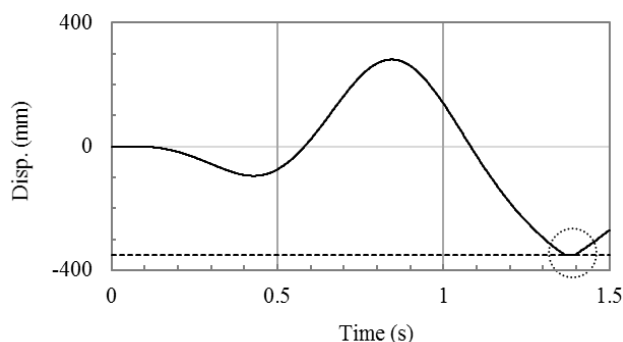


図-16 橋桁端面の変位時刻歴

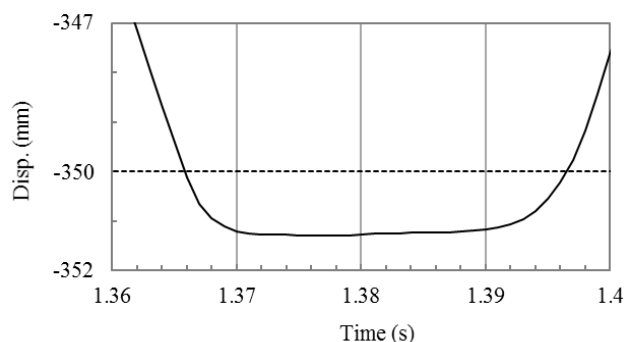


図-17 衝突時間内の変位時刻歴

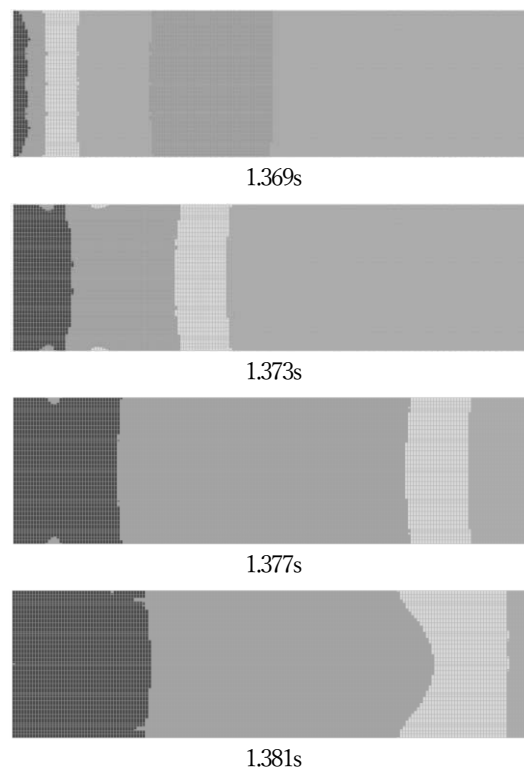
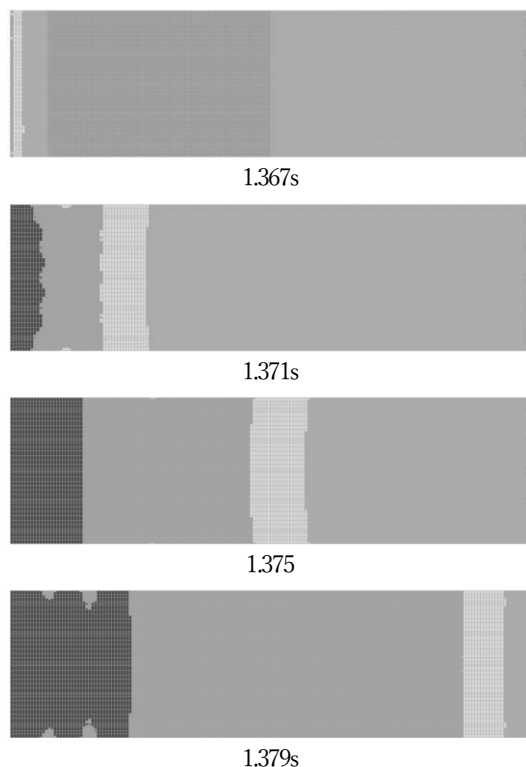


図-18 床版内を伝播する直応力の時間分布

らも衝突開始時刻 1.367 秒で、橋桁端面に圧縮応力が発生し、その後、1.381 秒で反対側端面まで応力波が伝播している様子が確認できる。

前述した通りコンクリート床版と鋼主桁では波動伝播速度が 1.6 倍程度異なるにも関わらず、衝突開始から 0.014 秒間で一様に直応力が伝播している。このとき、平均波動伝播速度を求めると $3214 (m/s)$ が得られる。このことから、コンクリート床版と鋼主桁からなる複合鈹桁内の波動伝播速度は、一様に、コンクリート床版内の波動伝播速度 $3163 (m/s)$ に近い値を示している。

この複合鈹桁構造は、コンクリート床版の断面積が $3.78m^2$ 、鋼主桁の断面積が $0.039116m^2$ となっており、各部材の弾性波速度をこれらの断面積で重み付けした加重平均値 $3183m/s$ に近い値を示している。異種部材の複合構造物で隣接構造物と衝突したとき、各部材には一様な

弾性波速度の応力波が伝播し、その波速度は各部材の弾性波速度を断面積で加重平均した値になると考えられる。コンクリート床版内の波動伝播現象が、鋼主桁内部の波動伝播を拘束し、一様な伝播速度で変形およびひずみが伝播している結果ではないかと推察される。

図-20 には、衝突時のせん断応力分布を示す。直応力と同様に、衝突現象が起きると橋桁端面にせん断応力が発生しており、直応力の波よりも遅い速度で応力波が伝播している様子が確認できる。しかし、図-10 に示した、単一主桁の波動伝播解析結果とは異なり、直応力の波頭位置を先頭に微小ではあるが、せん断応力の残影が確認できる。これは、コンクリート床版内を伝播する直応力が主桁内にせん断変形を励起させたことが原因ではないかと推察される。

図-21 には、衝突面 (0m) から反対側 (40m) までの

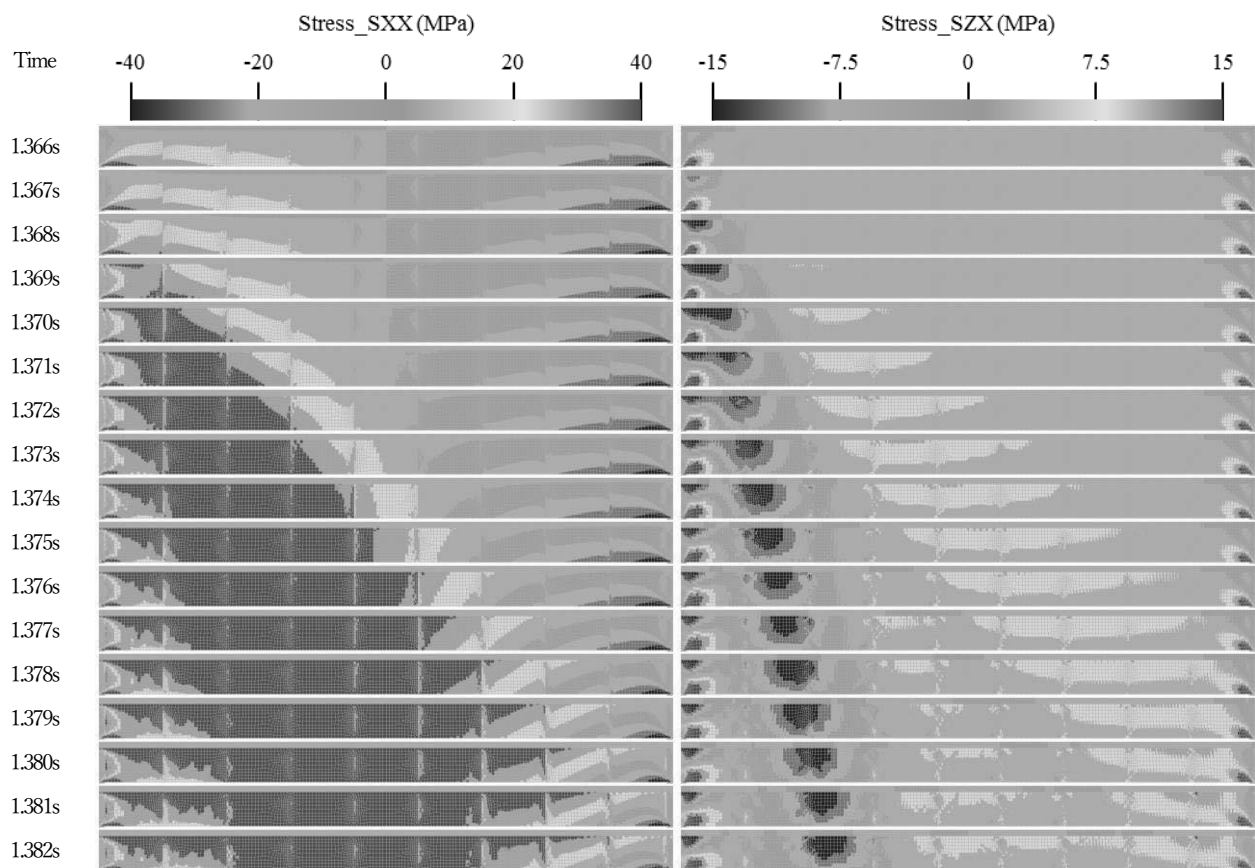
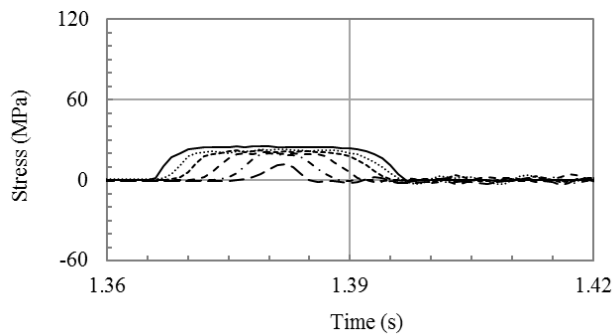
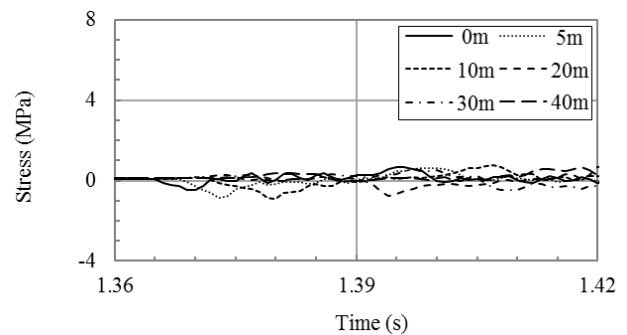


図-19 主桁内を伝播する直応力の時間分布

図-20 主桁内を伝播するせん断応力の時間分布

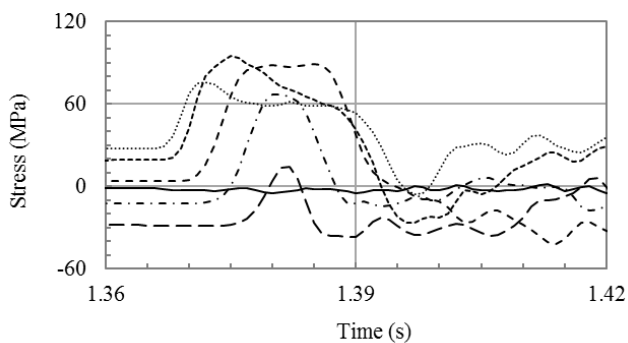


(a) 直応力

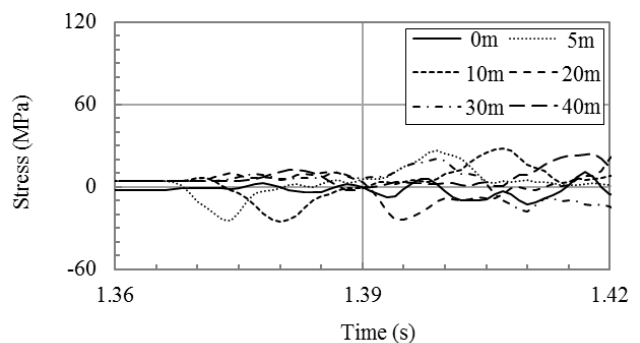


(b) せん断応力

図-21 床版の各点に作用する応力の比較



(a) 直応力



(b) せん断応力

図-22 主桁の各点に作用する直応力の比較

コンクリート床版に生じる直応力およびせん断応力の時刻歴を示す。また、図-22 には、鋼主桁に生じる直応力

およびせん断応力の時刻歴を示す。両者を比較すると、コンクリート床版に比べて鋼主桁に生じる応力度が高く

なっている。コンクリート床版に生じる最大応力度に比べて、鋼主桁に生じる最大応力は3倍程度大きくなっている。これは、弾性係数の違いに大きく影響を受けたと推定される。

6. 結論

本研究では、複合材料から構成される上部構造が橋台等の隣接構造との衝突現象に着目し、有限要素法に基づく三次元構造解析によって、衝突時の鋼コンクリート鈑桁内の波動伝播現象の再現を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 3次元のFEM解析に基づく、単一材料の主桁と橋台間の衝突現象は、一次元波動伝播理論に基づいていることが確認され、理論値とほぼ等しい波動伝播速度が得られた。
- 2) FEM解析の結果、主桁内部には直応力波だけでなく、せん断応力波が伝播しており、その伝播速度が直応力波の伝播速度よりも遅い。
- 3) 衝突時の剛性を10倍および0.1倍と変化させて、衝突現象および応力波の波動伝播について分析を行った結果、剛性を10倍とすると数値振動がみられ、0.1倍とすると衝突継続時間が正しく求められないことが分かった。
- 4) コンクリート床版と鋼主桁から構成される複合鈑桁橋に於いても、衝突した際に発生する応力波が、コンクリート床版と鋼主桁内を一樣な速度で伝播する様子が確認された。これにより、衝突現象が、単一材料からなる棒部材同様に、一次元波動伝播理論に基づくことが立証された。
- 5) 複合構造の場合には、伝播速度の遅いコンクリート床版内の挙動に、主桁の変形および波動伝播現象が拘束されることが分かった。
- 6) 複合鈑桁橋の直応力波の波動伝播速度は、各部材の弾性波速度を面積で加重平均した値に等しくなることが確認された。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 大住道生、星隈順一：熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷根に基づく要因分析、第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演

- 論文集、土木学会、2017.7.
- 3) 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>
- 4) 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.
- 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) 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.67, No.1, pp. 55-71, 2005.
- 8) 運上茂樹、星隈順一、堺淳一、上田健介：過去の大規模地震における落橋事例とその分析、土木研究所資料、独立行政法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ、第 4158 号、2009.12.
- 9) 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.
- 10) 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. 570/I-40, pp. 315-324, 1997.
- 11) 矢部正明、武村浩志、川島一彦：直橋および斜橋の桁間衝突とその影響、構造工学論文集、土木学会、Vol.43A, pp.781-791, 1997.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) Goldsmith, W.: Impact, Edward Arnold, London, 1960.
- 19) 益田、渡邊、葛西、馬越他：2016年熊本地震による大切畑大橋の被害分析、地震時保有水平耐力シンポジウム論文集、19 卷 pp. 177-184, 2016.7.a