

地震波特性が桁-橋台間衝突に及ぼす影響

坂本 裕史¹・幸左 賢二²・清水 英樹³・今村 壮宏⁴

¹九州工業大学建設社会工学科 (〒804-8850 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail:e105032y@tobata.kyutech.ac.jp

²九州工業大学建設社会工学科教授 Ph.D. (〒804-8850 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail:kosa@civil.kyutech.ac.jp

³大日本コンサルタント株式会社技術統括部 (〒170-0003 東京都豊島区駒込3丁目23番地1号)

E-mail:shimizu_hideki@nc-con.co.jp

⁴株式会社高速道路総合技術研究所道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市多忠生1-4-1)

E-mail:t.imamura.ab@ri-nexco.co.jp

要旨：本研究では新潟県中越地震において桁衝突による損傷が見られた橋梁を対象に、種々の地震波が主桁と橋台との衝突現象に及ぼす影響に着目し、時刻歴応答解析を行った。解析の結果、橋台への主桁の最大衝突力は、地震波加速度を絶対値で累積した値と相関性が高かった。ついで、最初の衝突力に着目して衝突力と地震波加速度との相関性を検証した結果、衝突するまでの正負を考慮した地震波の累積加速度と相関性が高い結果が得られた。しかし、地震波の累積加速度と衝突力の相関性は、主桁の累積加速度と衝突力の相関性と比較すると相関性が低くなっていた。これは、衝突力が発生する前の大きな変位が生じる時刻と衝突発生時刻の時間間隔が長い場合には、各加速度に差が生じ、相関性が低くなるためと考えられる。

Key Words : Dynamic analysis, Abutment-resistance, Pounding of bridge girder, Acceleration

1. はじめに

我が国の道路橋の設計において地震時は、桁と橋台間に十分な遊間を確保する設計法が一般的であるが、主桁の水平変位を橋台により拘束し、橋脚の変形を低減させる変位拘束工法という考え方がある¹⁾。²⁾。筆者ら³⁾は地震時の地盤条件、遊間量が実橋解析モデルの応答に与える影響の評価を行い、堅固な地盤条件ならば主桁の水平変位を橋台によって十分に拘束することが可能であること、また、遊間量を縮小させると衝突回数は増加するものの、個々の衝突力は減少傾向にあるということを明らかにしている。一方、各地震波の特性が主桁の衝突現象に与える影響は、現在まで十分には明らかにされていない。

そこで、今回実施した研究フローを図-1に示す。検討パラメータは、地震波の特性の相違が桁衝突力に与える影響の分析を行うため、実測波であるJMA川口町EW波形、道路橋示方書V編⁴⁾に記されている標準波のタイプII地震動6波に加え、標準波のタイプI地震波3波の計10波とした。具体的には、各地震波において、発生する地震波加速度、主桁に生じる加速度および桁衝突力の相関性に着目した分析を行った。そこで、主桁の累積加速度と衝突力との

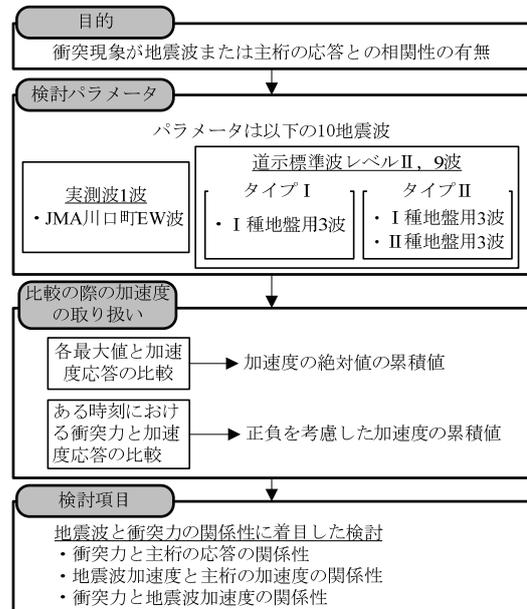


図-1 検討フロー

相関性に対して地震波の累積加速度と衝突力との相関性が相関性が低くなったため、相関性の高かった地震波、相関性の低かった地震波の2ケースに関して衝突するまでの加速度に着目した分析を加えた。

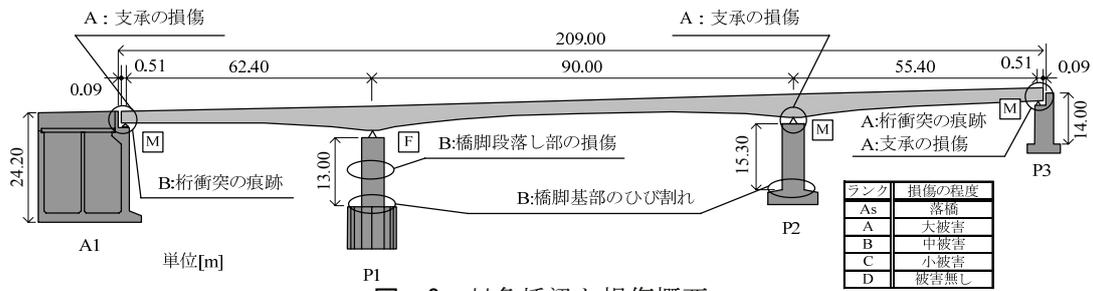


図-2 対象橋梁と損傷概要

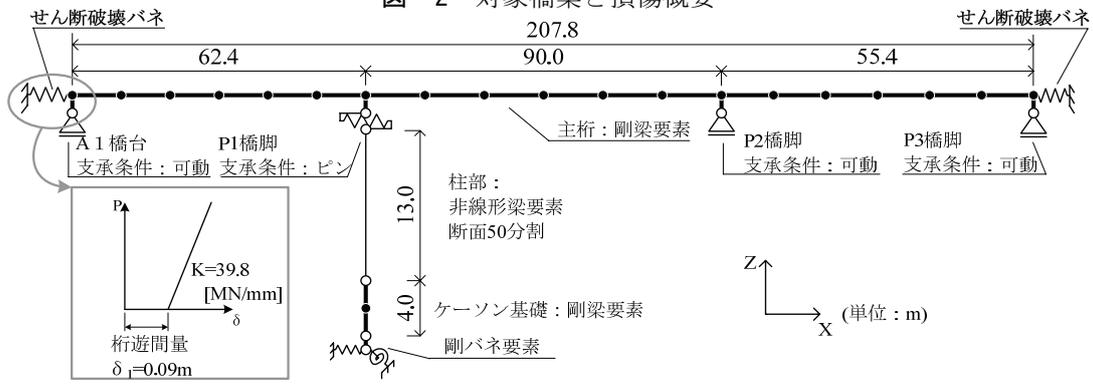


図-3 解析フレームモデル

2. 解析概要

(1) 対象橋梁

検討対象は、図-2 に示す新潟県中越地震において桁衝突が生じ、桁端がパラペットを押し込む損傷が発生した PC3 径間連続箱桁橋³⁾とする。図中の本橋の被災度は、道路震災対策便覧⁵⁾に基づき 5 段階に分類している。本橋には、A1 橋台と P3 橋脚に桁衝突の痕跡があり、主桁は 2 回以上橋脚・橋台に衝突している。本橋の橋軸方向の支承条件は、P1 橋脚が固定のピン支承であり、その他の橋台、橋脚は可動支承である。また、本橋主桁を含む振動単位系の地盤種別は I 種地盤である。

(2) 地震応答解析

解析モデルを図-3に示す。本研究では橋台本体および基礎は移動しないモデルを用い、2次元弾塑性時刻歴応答解析により地震波の相違による桁衝突の検討を行う。本解析モデルはA1橋台、P3橋脚の両端にせん断破壊バネを設置しており、そのせん断破壊バネは、図-3中に示すように主桁と橋台の遊間量0.09[m]を考慮し、バネ定数 $K = 39.8$ [MN/mm]と設定している³⁾。解析に用いた波形は、大規模地震を想定し、表-1に示す地震波を解析パラメータとして検討する。入力地震波は、Case1は本橋近傍で観測されたJMA川口EW波形のうち主要動部分の20秒間を抜き出したものであり、Case2~Case7は道路橋示方書V編⁴⁾に示されているレベル2、タイプII地震動のI種地盤、II種地盤の各3波、Case8~10は道路橋示方書V編に示されているレベル2、タイプI地震動のI種地盤の3波の計10波としている。図-4に各入力地震波の地震波応答加速度スペクトルを示す。Case1は固有周期1.3秒付近で加速度が卓越し、

表-1 解析ケース

Case	入力地震波	地震名	観測地点
Case1	JMA川口EW波形	2004 新潟県中越地震	川口町川口
Case2	II-I-1	1995 兵庫県南部地震	神戸海洋気象台地盤上[NS]
Case3	II-I-2		神戸海洋気象台地盤上[EW]
Case4	II-I-3		猪名川架橋予定地点周辺地盤上
Case5	II-II-1		JR西日本鷹取駅構内地盤上[NS]
Case6	II-II-2		JR西日本鷹取駅構内地盤上[EW]
Case7	II-II-3		大阪ガス葺谷供給所構内地盤上
Case8	I-I-1		1978 宮城県沖地震
Case9	I-I-2	1993 北海道南西沖地震	七峰橋周辺地盤上
Case10	I-I-3		

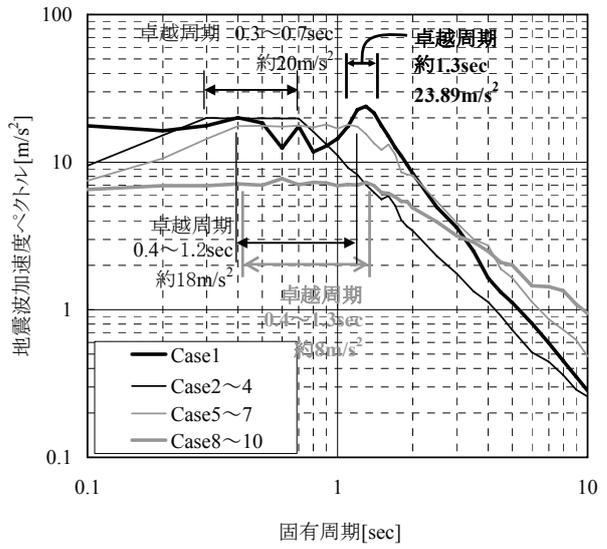


図-4 地震波応答加速度スペクトル

その値は 23.89m/s^2 である。Case2~4は0.3秒から0.7秒付近で加速度が卓越し、その値が約 20m/s^2 となる。Case5~7は0.4秒から1.2秒付近で加速度が卓越し、その値は約 18m/s^2 である。また、Case8~10は0.4秒から1.3秒付近で加速度が卓越しその値は約 8m/s^2 である。各々のケースを比較するとタイプII地震動には1秒までの短周期成分には明確な差が見られないが、1秒から2秒の付近でCase1, Case2~4, Case5~7に差が見られ、Case2~4, Case5~7, Case1の順で大きくなる。またタイプIとタイプII地震動を比較すると、卓越周期に大きな違いはないが、卓越周期付近の加速度スペクトルの値が 8m/s^2 と 20m/s^2 であり、大きく異なる。

図-5に地震波の累積絶対加速度と最大加速度の関係を示す。本図では式(1)に示すように各地震波に対して、0.01秒毎の加速度の絶対値を累積し、累積絶対加速度 α_{total} として算出する。

$$\alpha_{total} = \sum_{k=1}^N |\alpha_k| \quad (1)$$

α_k : 各時刻kにおける地震波加速度

また、最大加速度は、累積絶対加速度との相関性を評価するため絶対値で示している。この図より最大加速度は、実測波であるCase1のみが大きく異なるという結果が得られた。これは、Case2~7は道路橋示方書V編⁴⁾に規定する加速度スペクトルに基づいて設定しており、振幅調整を行い特別なピークは平滑化していると考えられる。また、累積絶対加速度は最大であるCase5と最小であるCase8には1.7倍程度の差が見られた。

3. 代表的解析結果

代表例として Case3 (レベル 2, タイプ II, I種地盤) の応答結果を示す。

図-6 に衝突力の時刻歴図を示す。本図より最初の衝突は P3 橋脚側で発生しており、その後、約0.25秒毎に衝突を繰返し計7回衝突が発生している。A1橋台に着目すると、最大衝突力はA1橋台1回目の衝突で発生しており、その時の衝突力は-552MNである。

図-7 に A1 橋台側の桁端と地震波の時刻歴応答加速度図を示す。なお、本図は主桁に生じる加速度と地震波の相関性を検証するため地震波方向を反転させている。主桁に生じる加速度と地震波で6.75秒付近に着目すると、振幅の大きさに違いは見られるが、周期の大きさは主桁に生じる加速度と地震波で同程度であり、主桁に生じる加速度は地震波にほぼ追従することがわかる。

図-8 に主桁の時刻歴応答速度図を示す。図のAB区間では衝突開始時速度0.84m/s(A点)でP3橋脚に衝突し、衝突後の速度が-0.79m/s(B点)であるこ

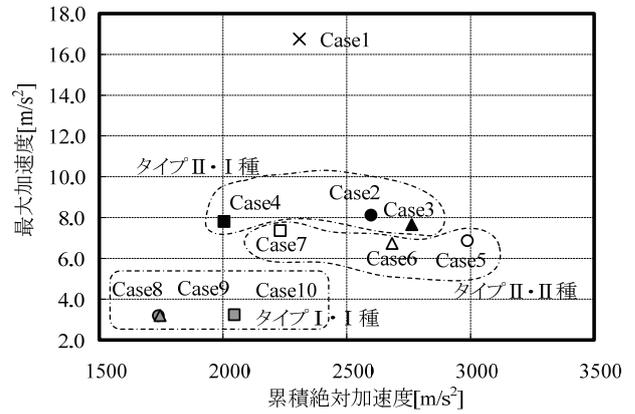


図-5 地震波累積絶対加速度-最大加速度関係

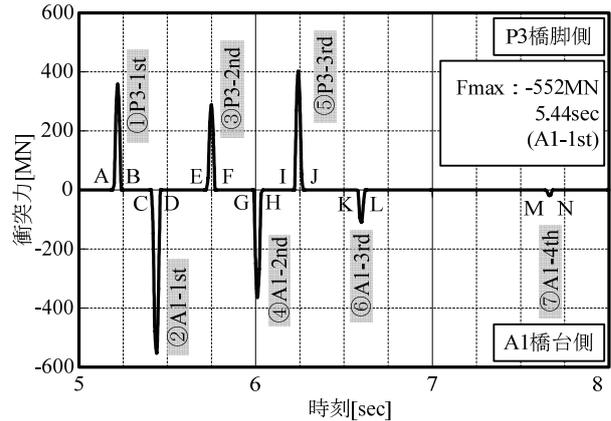


図-6 衝突力の時刻歴図(Case3)

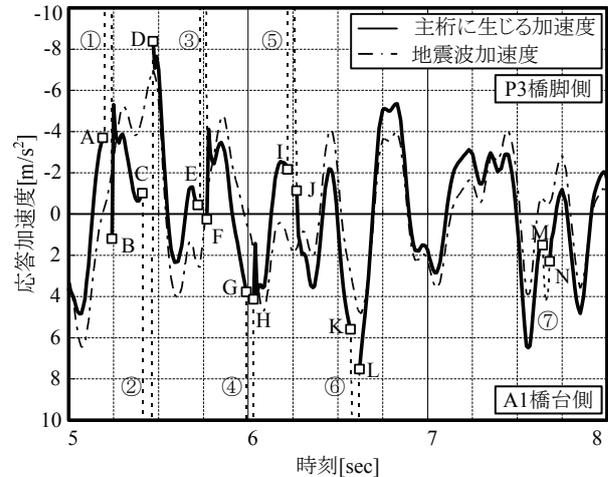


図-7 時刻歴応答加速度図(Case3)

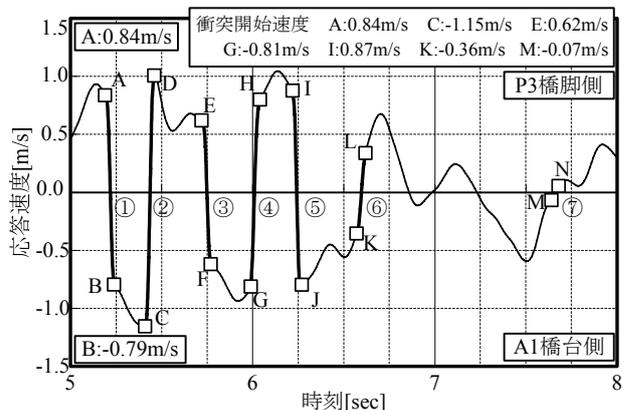


図-8 時刻歴応答速度図(Case3)

とから、衝突時の速度がほぼそのまま反発の速度として発生している。A1橋台側の最大衝突力が発生する衝突開始時の5.41秒時に最大速度が発生しており、その際の速度は-1.15m/sである。また、A1橋台側の衝突に着目して衝突開始時の速度(図-8)と衝突力(図-6)を比較すると、例えば衝突力がCD区間、GH区間、KL区間の順に減少しているのに対し、衝突開始時の速度もC点(-1.15m/s)、G点(-0.81m/s)、K点(-0.36m/s)の順に減少していることがわかる。従って、衝突開始時の速度が大きいほど衝突力が大きくなり、衝突開始時の速度が衝突力の大小を決定することがわかる。

4. パラメータ解析結果

(1) A1橋台側衝突力と地震波加速度関係

各地震波の特性の違いを調べるためにA1橋台の最大衝突力に着目し、各地震波の衝突力一覧を表-3に示す。タイプI地震動とタイプII地震動を比較すると最大衝突力、衝突回数ともに大きな違いがある。これは、図-5に示すように地震波の累積絶対加速度がタイプI地震動とタイプII地震動で異なるためである。また、Case2~7のタイプII地震動に関しては、図-4に示すように地震波スペクトルが同地盤種別3波毎に同様のスペクトルであるが、個別に見ると最大衝突力が異なるという結果が得られた。よって、地震波スペクトルは同様な地震波であっても個々の波形特性によりこのような差が生じたと考えられる。

(2) 最初の衝突に関する分析

著者らは、これまで桁衝突力は直前の桁速度に依存し、その桁速度は桁衝突後の反発速度と累積加速度に依存することを明らかにしている³⁾。ここでは、反発の影響のない最初の衝突に関して衝突力と桁加速度の関係を検証する。

最初の衝突に関して、図-6に示すようにP3橋脚側で衝突が発生しているため、衝突の方向を考慮する必要があると考えられる。そこで、1回目の衝突に関して、衝突の方向を考慮した式(2)より累積加速度を算出する。

$$\alpha'_{total} = \sum_{k=1}^N \alpha_k \quad (2)$$

図-9に各ケースの最初の衝突時までの主桁の累積加速度と衝突力の関係を示す。なお、正の値がP3橋脚側への衝突、負の値がA1橋台側の衝突を表している。最初の衝突に着目したところ、衝突力と衝突するまでの累積加速度には相関性が見られ、衝突力は累積加速度が大きくなるほど大きくなる傾向が見られる。

次に、地震波と衝突力の関係性を検討するために、衝突力と相関性があると考えられる主桁に生じる加

表-3 衝突力一覧

Case	A1橋台 最大衝突力	発生時刻	全体 衝突回数	地盤 種別	平均値	地震波 タイプ	平均値
1	-504MN	9.81sec	11回	I種	-489MN	実測波	-504MN
2	-482MN	5.80sec	12回				
3	-552MN	5.44sec	7回				
4	-416MN	7.80sec	4回	II種	-478MN	タイプII 地震動	-481MN
5	-548MN	4.47sec	16回				
6	-359MN	4.62sec	18回				
7	-528MN	5.11sec	10回	I種	-175MN	タイプI 地震動	-175MN
8	-207MN	9.12sec	4回				
9	-211MN	13.44sec	2回				
10	-107MN	25.85sec	2回				

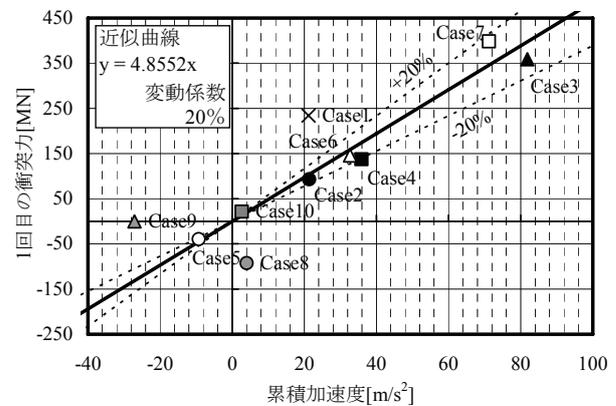


図-9 主桁の累積加速度－衝突力関係図

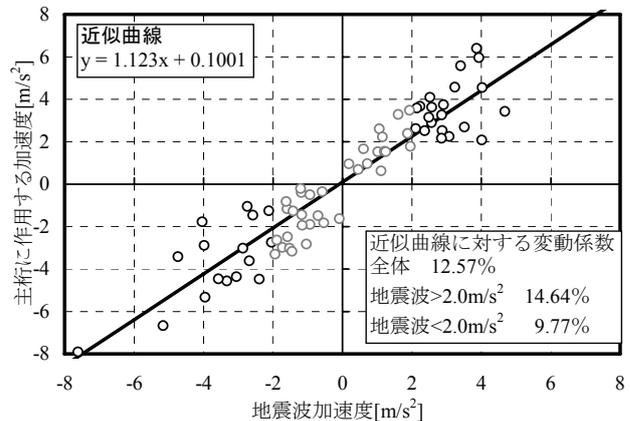


図-10 地震波－主桁応答の加速度関係図 (Case3)

速度と地震波加速度の関係を検討する。

図-10に地震波と主桁に生じる加速度の関係図を示す。なお、本図のプロットは、主桁に生じる加速度が地震波加速度に対応する点の符号別のピークのみを示している。また、衝突している時間については、主桁に生じる加速度のみが卓越するので、衝突が発生している区間±0.02秒は対象外としている。Case3の地震波と主桁に生じる加速度の比率は、

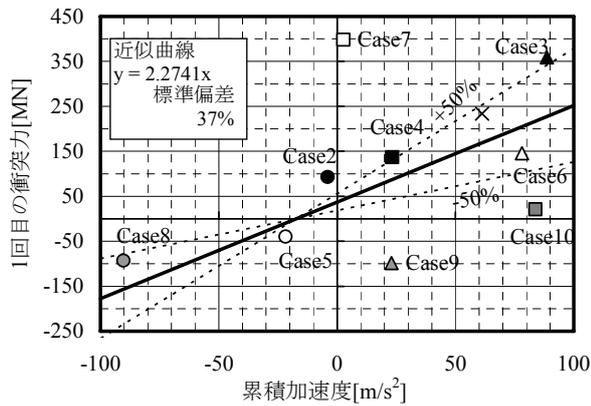


図-11 地震波累積加速度－衝突力関係

1:1.12であり、近似曲線に対する変動係数は12.57%であった。本図より地震波加速度と主桁に生じる加速度との相関性は高いといえる。

図-11に全てのケースの最初の衝突力と地震波累積加速度を示している。なお、本図は図-9の主桁に生じる累積加速度との比較を行うために地震波方向を反転させている。1回目の衝突に着目したところ、地震波の累積加速度と衝突力には相関性があり、地震波の累積加速度が大きくなるほど、衝突力は大きくなる傾向が見られた。しかし、地震波累積加速度と衝突力は、図-9に示す主桁に生じる累積加速度と比較すると、精度が低くなる傾向が見られた。そこで、地震波累積加速度－衝突力関係の相関性が高いCase3、相関性の低いCase9について以下にその原因を検討する。

図-12にCase3の主要動が発生し始める3.0秒から1回目の衝突発生時(5.19秒)までの時刻歴応答加速度図を示す。まず、地震波、主桁応答において、ある時刻における極小値から次の極小値までの時刻を1周期と定義し、衝突が発生する5.19秒時までのそれぞれの周期を算出した。その結果を図-13に示す。1周期毎に周期を算出した結果、衝突するまでの周期の平均は地震波加速度が0.247秒、主桁の加速度が0.248秒となり、地震波と主桁応答の周期はほぼ同様となり、地震波に対して主桁は同じ周期で振動していると考えられる。

図-14に時刻歴応答変位図を示す。本図より衝突する1.0秒前までは、20mm程度の微小変位を繰り返しているが、衝突直前の1.0秒程度でA1橋台側に大きな変位が発生している。そこで、衝突直前の全体の挙動を検証するために、図-15に衝突直前のP1橋脚の変形図を示す。本図は主桁の応答変位に関して衝突直前の大きな1波の変位の極大値発生時(①4.55秒時)、変位0.0m時(②4.65秒時)、極小値発生時(③4.91秒時)に着目してP1橋脚の変形、地震波の加速度および主桁の加速度の関係を示したものである。本図より各時刻のP1橋脚基部の塑性率に着目すると、③4.91秒時において8.13の大きな塑性率が発生しており、主桁に生じる加速度に若干の差異が生じるがその0.28秒後の5.19秒時に衝突が発生しているため、累積加速度に与える影響は少ないと考えられる。

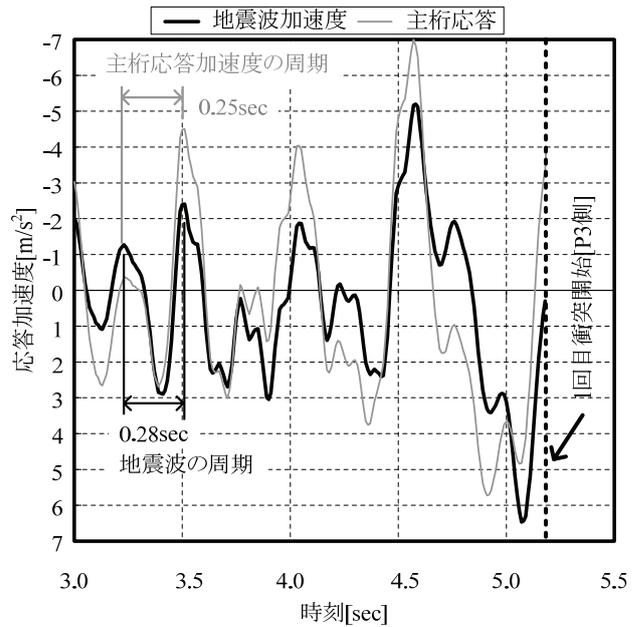


図-12 時刻歴応答加速度図(Case3)

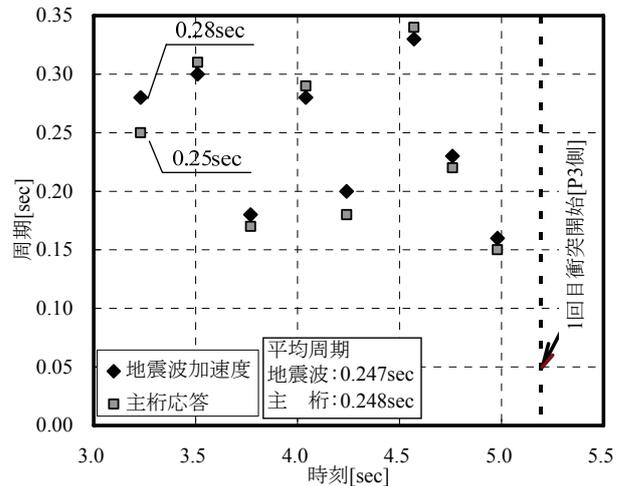


図-13 地震波－主桁応答の周期関係(Case3)

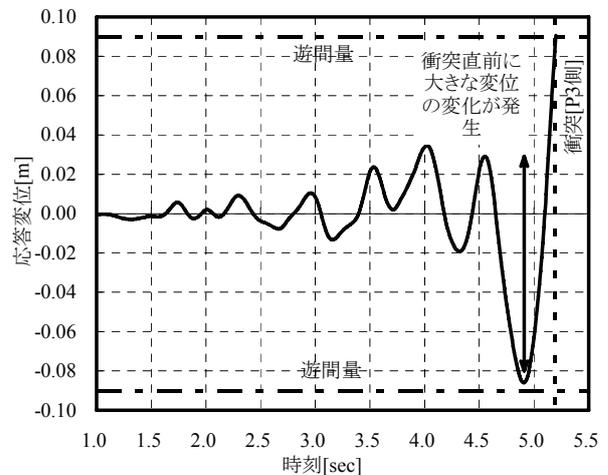


図-14 時刻歴応答変位図(Case3)

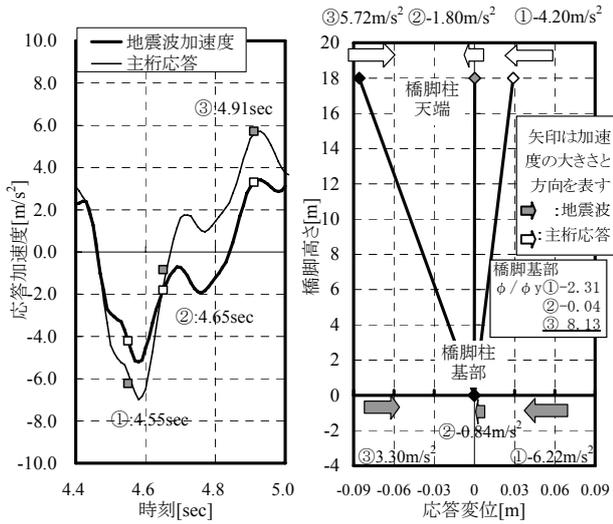


図-15 Case3のP1橋脚変形図(衝突直前)

次に、式(2)より算出した地震波、主桁に生じる累積加速度の時間に伴う変化量を検証するために、図-16に時刻歴累積加速度図を示す。1回目の衝突発生時までの主桁に生じる累積加速度 81.9m/s^2 から衝突力を式(3)より算出すると 359.0MN 発生している。その値と実際に1回目の衝突で発生した衝突力である 359.1MN を比較するとほぼ同程度であり、図-9, 11に示すように各累積加速度と衝突力に相関性が高いことがわかる。

$$V = \sum \alpha \times 0.01 \quad (3)$$

$$F = m \times (2 \sum \alpha) / \Delta t$$

m:主桁質量(=6029.6ton)

次に、地震波の累積加速度と衝突力の相関性が低かったCase9に関して、図-17に時刻歴応答加速度図を示す。1回目の衝突が発生する9.15秒時までの挙動に着目すると、5.2秒～5.7秒(A区間)、6.0～6.7秒(B区間)、6.8～7.7秒(C区間)付近は、地震波加速度と主桁に生じる応答加速度に大きな差異が生じている。また、図-18に同時刻の時刻歴変位図を示す。AからC区間の地震波加速度と主桁に生じる加速度が大きく異なっている箇所には、主桁の変位が急激に変化していることがわかる。そこで、地震波と主桁に生じる加速度に大きな差異が生じているA区間に着目して、図-19に5.0～6.0秒までの加速度-変位関係を示す。主桁の変位は地震波と主桁に生じる加速度の差異が生じ始める時刻において急激に変化し始めており、5.0秒～6.0秒までの最小変位が発生する5.45秒時に最大 2.41m/s^2 の加速度の差異が生じていることがわかる。

図-20にA区間を含む5.0秒～6.0秒までのP1橋脚変形図を示す。本図は、地震波と主桁に生じる加速度の差異が生じ始める時刻(①5.12秒時)、加速度の差異が最も大きな時刻(②5.45秒時)に着目し、P1橋脚の変形および各々の加速度の関係を示したものである。図-15と同様にP1橋脚基部の塑性率に着目す

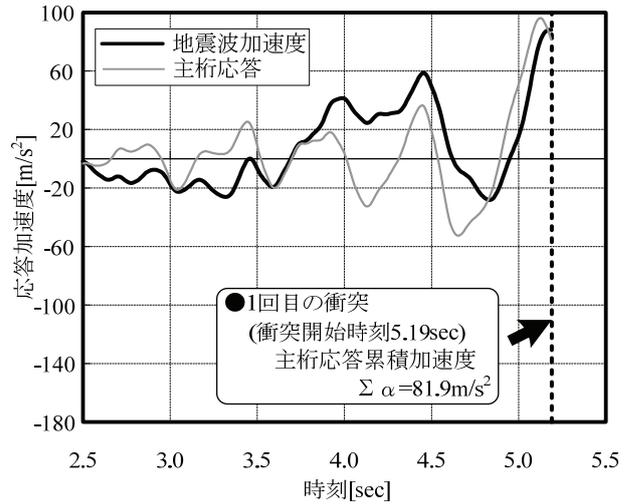


図-16 時刻歴累積加速度図(Case3)

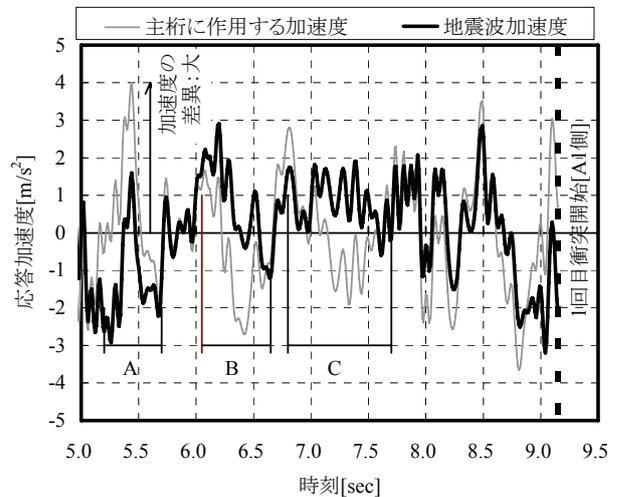


図-17 時刻歴応答加速度図(Case9)

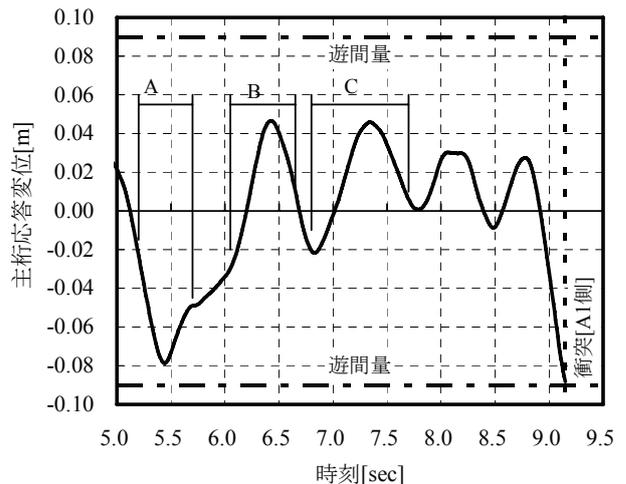


図-18 時刻歴応答変位図(Case9)

ると、加速度の差異が最も大きな時刻(②5.45秒時)において8.25と大きな塑性率が発生している。また、1回目の衝突は3.70秒後の9.15秒時に発生している。従って、塑性域に達してから衝突するまでの時間間

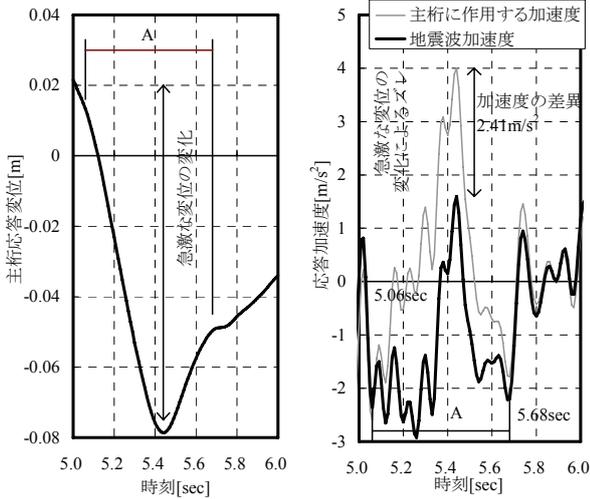


図-19 応答変位-加速度関係図(5.0~6.0秒)

隔が長いことが原因で、各々の累積加速度の間で差異が生じたと考えられる。図-16と同様に各々の累積加速度の時間変化量を検証するため、図-21に時刻歴累積加速度図を示す。本図より各々の累積加速度波形はA、B、C区間で大きく異なっており、その原因は、図-17、20に示すように大きな塑性率が発生した5.45秒以降から衝突が発生する9.15秒時までに地震波と主桁に生じる加速度の差異が大きく、その差異が蓄積され、累積加速度の相違が生じたと考えられる。

5. まとめ

地震波の特性が桁衝突現象に及ぼす影響を評価した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 最初の衝突に着目して衝突力と主桁に生じる加速度との相関性を検証し、衝突するまでの主桁に生じる加速度の累積値と衝突力は、相関性が高いことを明らかにした。
- 2) 最初の衝突に着目して衝突力と地震波加速度との相関性を検証し、衝突するまでの地震波加速度の累積値と衝突力は、主桁に比べ精度は低くなるが、相関性が見られた。
- 3) 地震波累積加速度と主桁に生じる累積加速度に大きな差異が生じる要因として、衝突する前に大きな変位が生じ、橋脚基部が塑性域に達することから地震波と主桁に生じる加速度に大きな差異が生じることが挙げられる。また、衝突する時刻と衝突しないが大きな変位が発生している時刻が離れていることが、地震波と主桁の累積加速度の差異を大きくしたと考えられる。

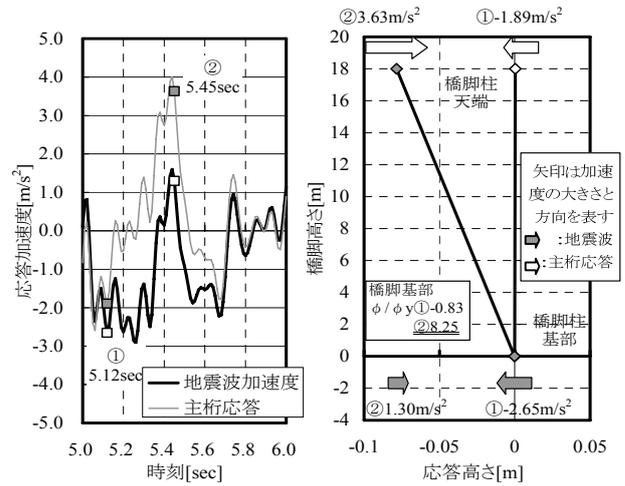


図-20 Case9のP1橋脚変形図(衝突3.0~4.0秒前)

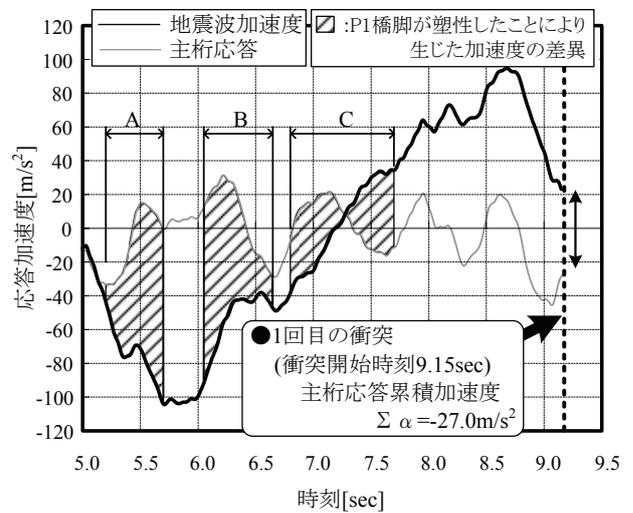


図-21 時刻歴累積加速度図(Case9)

参考文献

- 1) 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, 土木学会論文誌, No.661, I-53, pp.251-264, 2000.10
- 2) 庄司学, 川島一彦, Anat Rungrasamee, 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.45-A2, pp.891-902, 1999.3
- 3) 幸左賢二, 坂本裕史, 二井伸一: 設定遊間量の差異が桁衝突に及ぼす影響評価, 第17回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 2008.11
- 4) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2002.3
- 5) 社団法人日本道路協会: 道路震災対策便覧(震災復旧編), 1988.2