

地震時の橋梁における隣接部材の衝突速度に関する考察

伊津野和行¹・武野志之歩²

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

²学生会員 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）

1. はじめに

地震時保有耐力法レベルの地震応答では、橋梁の変位応答が大きくなったことに加え、ゴム支承が利用されるようになったこともあり、隣接する桁や可動支承の移動制限装置などで部材の衝突が起こる可能性がある。近年、地震時に隣接する桁間の衝突を想定し、その衝撃緩和を考える研究が盛んである^{1)~5)}。しかし、実際の地震時にどの程度の速度で衝突し、どの程度の衝撃力を緩和する必要があるのか、実際の地震記録から解析した例は少ない。隣接部材の衝突が観測された地震記録の解析例はいくつかあり、それぞれ重要な検討が数多くなされているが^{6),7)}、加速度記録に関する考察がほとんどであり、速度に関する記述は少ない。加速度については、地盤加速度が0.1G程度なのに対し、桁における加速度は1Gに達するような記録が得られている例⁸⁾もあり、隣接部材の衝突の影響は大きい。本研究では、地震記録から見た隣接部材の衝突現象について検討し、また、数値解析で得られた値について考察を加える。

2. 地震記録に見る衝突速度

まず、地震計の記録に現れた衝突波形（加速度波形）について2つの例を示し、数値積分によって速度波形を求めて検討する。

(1) 東神戸大橋

阪神高速道路5号湾岸線の斜張橋である東神戸大橋では、1995年兵庫県南部地震における大きな加速度波形が記録された^{7),8)}。地盤における記録は、道路橋へ適用する標準波形の基になっており、地震応答解析によく利用されている。しかし、塔頂における記録は1G以上で振り切れており、塔上段梁および塔下段梁における記録はスパ

イク的な波形が記録されているため、いずれも地震応答解析に用いられることはない。デジタル記録として一般に公開されているのも、地盤における記録のみである。

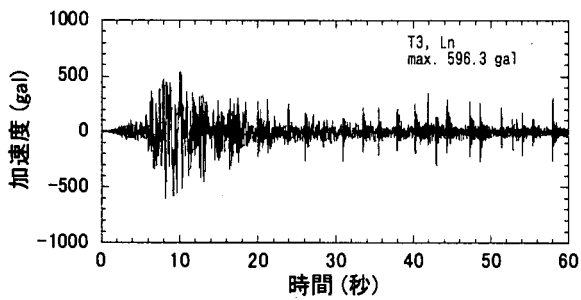
図-1に、塔下段梁における加速度記録を示す。

地震時に、神戸側の支承が損傷を受け、桁が跳ね上がって伸縮装置部で52cmの段差が生じた。塔下段梁部の記録には、図-1の時間軸で約10秒以降、スパイク状の波形が2~3秒ごとに一度周期的に現れている。特に橋軸直角方向記録と鉛直方向記録に顕著である。これは、主桁端部における取り付け部の桁との衝突、支承部の損傷（ウインド沓の破損）、ケーブルの影響などが原因として考えられている⁸⁾。

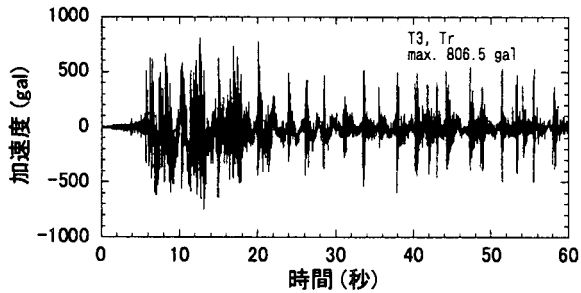
報告書には速度波形は記載されておらず、最大値のみが表示されている。記載されている最大値⁸⁾を見ると、加速度は、地盤で300~400galだったのが、塔下段梁で600~800galに大きくなっている。一方、速度は、地盤で70~90kineだったのが、塔下段梁で90~100kineと、さほど大きくはなっていない。加速度波形のスパイク的な波形が、速度波形ではそれほど大きく影響していないのではないかと考えられる。

そこで、塔下段梁部分における加速度記録を積分し、速度波形を計算した。図-2に計算した速度波形を示す。積分にあたっては、ハイパスフィルターを用いて9秒以上の長周期成分をカットし、周波数領域で積分した。

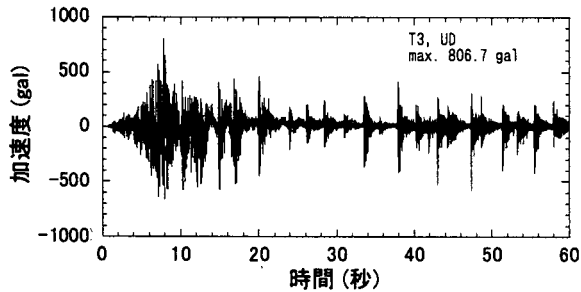
図-2の速度波形をみると、水平方向には90~100 kineとなっている。ただし15秒以降は、スパイク状の加速度は速度波形にほとんど影響していないことがわかる。橋軸方向と上下方向には30kine程度の波形が見られるが、橋軸直角方向には大きな波形が見られない。15秒以降は、主要動が収まった後の自由振動に近い振動による隣接部材の衝突だと考えられる。この結果から、自由振動に対する衝突としては、30kine程度を考えておけばよいのではないかと考えられる。



(a) 橋軸方向

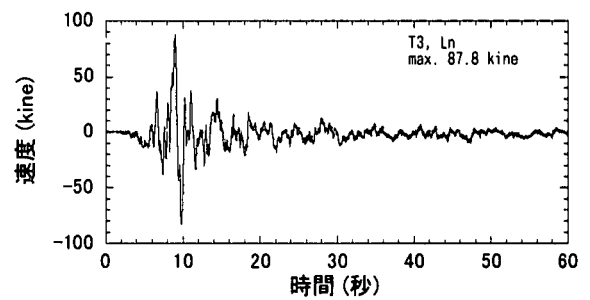


(b) 橋軸直角方向

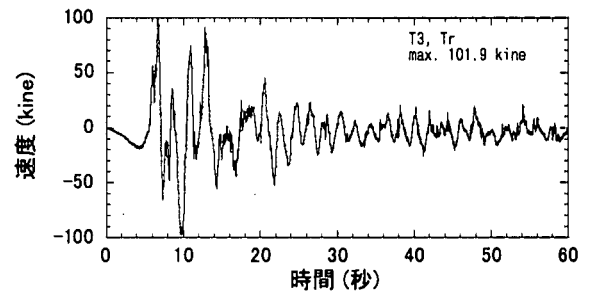


(c) 鉛直方向

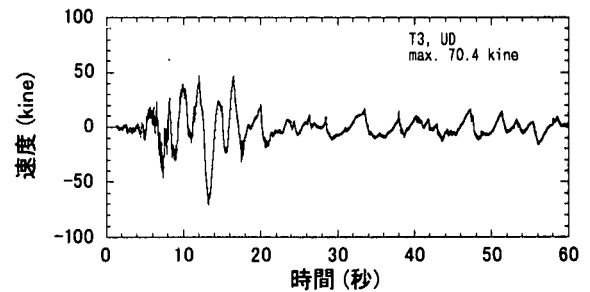
図-1 東神戸大橋における加速度波形（塔下段梁部の観測値）



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向



(c) 鉛直方向

図-2 東神戸大橋における速度波形（計算値）

10秒付近に見られる大きな速度応答には、支承部の破壊が影響している可能性がある。支承部の破壊がおこった時点の特定は困難だが、10秒前後と考えるのが妥当であろう。この時点における速度は、約100kineである。橋梁の規模や考える場所によっても異なるが、このケースに類する橋梁では、支承部の破壊によって隣接部材が衝突する速度として、少なくとも100kineを考える必要がある。

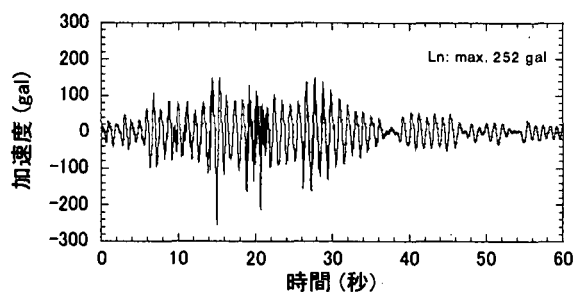
(2) 琵琶湖大橋

琵琶湖大橋は滋賀県の堅田と守山とを結ぶ橋梁で、昭和39年に建設された。1995年兵庫県南部地震時に、琵琶湖大橋ボックス桁内部（P5橋脚上）の強震計が作動した。設置されているのは、SMAC-B2型強震計であり、加速度がアナログ波形として記録される。1995年兵庫県南部地震の記録が、建設省土木研究所において、0.01秒間隔でデジタル化された⁹⁾。なお、滋賀県南部における1995年兵庫県南部地震時の震度階はⅢ～Ⅳであった。

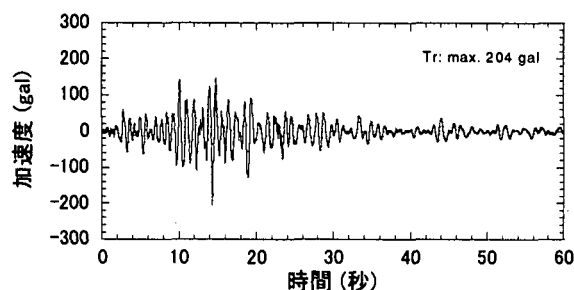
観測された加速度波形、それを元に計算された速度波形、変位波形、加速度のフーリエスペクトルを、それぞれ図-3～6に示す。

図-3の加速度波形は、(a)橋軸方向が最大252gal、(b)橋軸直角方向が最大204gal、(c)鉛直方向は最大38galである。強震部分は橋軸方向で20秒間、他は10秒間程度である。橋軸方向は他の方向に比べて減衰が小さい。本観測地点付近では、桁がラーメン橋脚で支持されており、橋軸直角方向と橋軸方向の減衰特性に差があるものと考えられる。これは、平成9年度に行われた制動試験の結果にも現れていた。

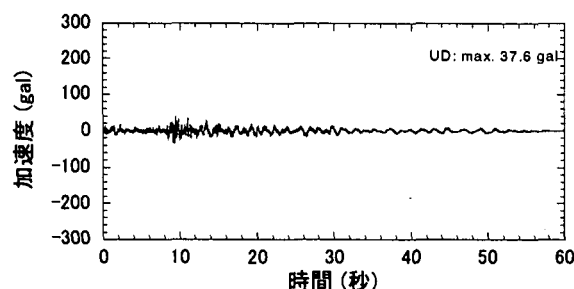
橋軸方向の最大値は252galであるが、200galを越えるのは、2回のスパイク的な波だけである。スパイク的な波を除けば、最大100gal程度の波形である。図-3の時間軸で14秒に橋軸直角方向に200galまで大きく揺れ、その後すぐ橋軸方向にスパイク的な波形が発生している。橋軸直角方向に大きく揺れたことによって、ジョイント部等で接触・衝突が生じた可能性がある。



(a) 橋軸方向

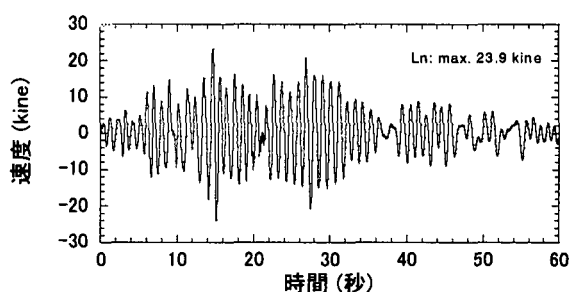


(b) 橋軸直角方向

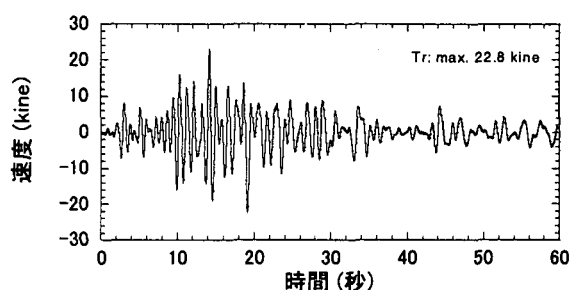


(c) 鉛直方向

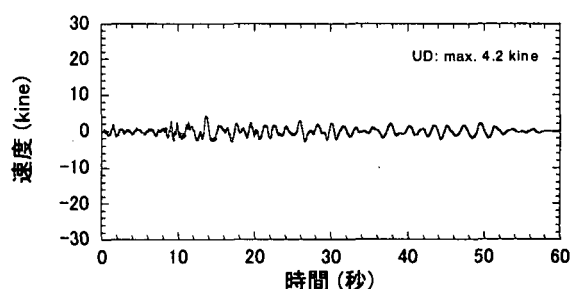
図-3 琵琶湖大橋で観測された加速度波形



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向



(c) 鉛直方向

図-4 琵琶湖大橋の計算された速度波形

図-4の速度波形の最大値は、(a)(b)の水平方向が約20kine、(c)鉛直方向は約4kineであった。衝突速度は大きくないが、衝突しなければ最大100gal程度の小さな加速度波形であっても、衝突によって加速度が約2倍、速度応答も20kine程度は生じるということには注意を要する。

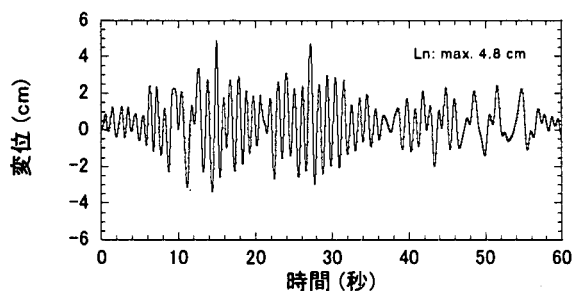
図-5の変位波形では、(a)(b)の水平方向が5cm程度、(c)鉛直方向が1cm程度である。P5橋脚の曲げ変形による水平方向の降伏変位は7cmと推定されており、橋梁はほぼ弾性範囲内で挙動したと考えられる。橋軸方向は減衰が小さく、振動が大きくなる箇所が数カ所存在する。この応答波形から推測すると、橋軸方向の減衰定数は $\lambda=0.02$ 以下、橋軸直角方向は0.05程度であろう。鉛直方向の揺れが小さいのは、強震計が桁の支点上に設置されているからである。

1997年12月時点における桁遊間の実測値は、桁の左右でそれぞれ326mm、および153mmであった。隣接桁は強震計が設置されている桁よりも小さな単純桁であり、変位応答はより小さいものと推定されるが、もし同程度の

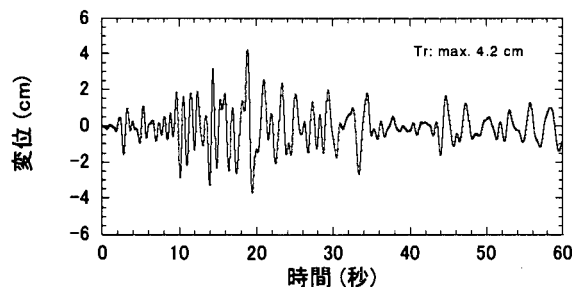
変位で逆位相で揺れたとしても、その相対変位は桁遊間よりも小さい。また、数値積分にあたっては、9秒以上の長周期成分をハイパスフィルターで取り除いているが、これはアナログ式加速度計の記録を積分するに足らず、かなり長周期まで考慮していることになる。したがって、計算された変位は過大評価していることになり、このことから考えても桁どうしが衝突する可能性は低い。よって、記録に現れたスパイク波形は、桁どうしの衝突によるものではなく、ジョイント部の衝突だと推測される。

図-6の加速度記録のフーリエスペクトルでは、(a)橋軸方向では1Hz、(b)橋軸直角方向では1.2Hz、(c)鉛直方向では0.5~1.5Hzに卓越振動数がある。特に水平方向成分では明確なピークが現れている。1Hzおよび1.2Hzは、橋脚の橋軸方向および橋軸直角方向の1次振動だと考えられる。これは、制動試験の結果とも整合した。

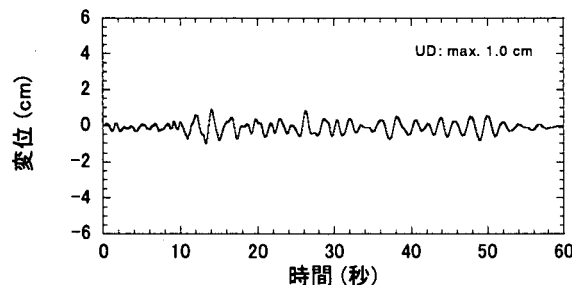
また、図-6(a)の橋軸方向には7Hzにもピークがあり、これは橋梁の局所的な振動、あるいは前述のジョイント部の接触だと考えられる。



(a) 橋軸方向

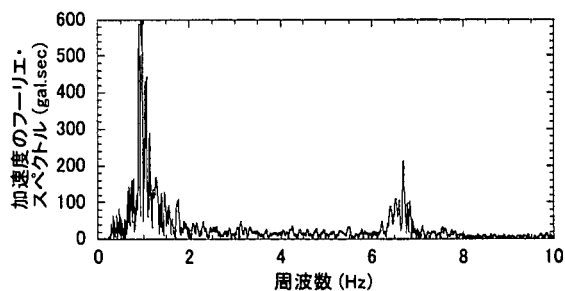


(b) 橋軸直角方向

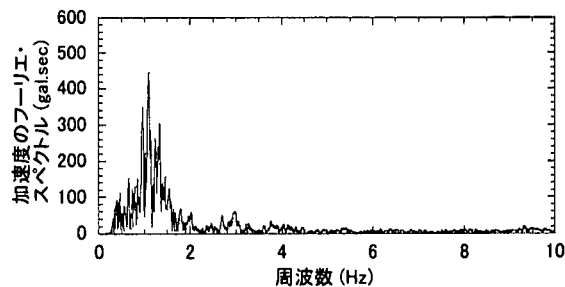


(c) 鉛直方向

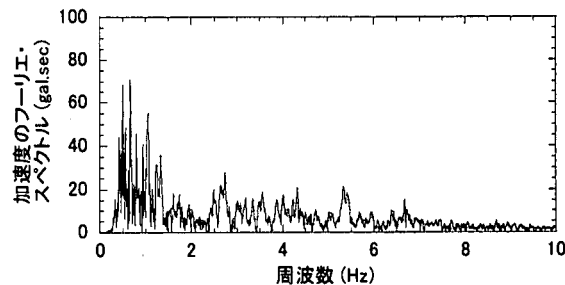
図-5 琵琶湖大橋の計算された変位波形



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向



(c) 鉛直方向

図-6 琵琶湖大橋の加速度フーリエスペクトル

これらの結果から、震度階Ⅲ～Ⅳ程度の地震時にも、20kine程度の応答速度は考慮しておく必要があることがわかる。

3. 数値解析における衝突速度

前章では、地震計の記録に現れた衝突現象について、衝突速度に関する検討を行った。ここでは、衝突を考慮した地震応答シミュレーションを行った場合、どの程度の応答速度が生じるのか、著者らの数値解析¹⁰⁾を例として記述する。

長大橋に中小橋梁が隣接するとき、その質量差や材質の相違により、設計で考慮しなかった外力が中小橋に作用する可能性がある。特に、振動単位ごとに固有周期が著しく異なる場合、その連結部には大きな相対変位が生じ、可動支承の移動制限装置の存在によって予期できない荷重の作用が想定される。

文献10)では、湾岸部の連続高架橋などでよく見られる

軟弱地盤に支持された長大橋とそのアプローチ橋を振動単位としてモデル化し、数値シミュレーションにより、その地震時相互作用について検討した。その結果、大地震時に桁が大きく変位し、可動支承が移動制限装置にあたった場合、構造物全体に大きな荷重が作用することを確認した。

図-7に対象橋梁図を、図-8に解析モデル図を示す。上部構造部材は長大橋を鋼桁とし、他の径間は合成鋼箱桁とした。また、橋脚は本線が鋼製、側道がRC製と仮定した。本研究は、軟弱地盤上の高架橋を構成する橋脚や桁が、地震時に相互作用を生起する現象の解明を主眼にしており、地震時に橋脚や桁が破壊して塑性域に入って応答することまでのモデル化は行わなかった。よって、桁・橋脚及び基礎構造はすべて線形部材とした。

これらに比べ、非線形性が卓越すると思われる支承部分と地盤に関しては、非線形ばね部材とみなして扱った。本論文における検討結果は、地震応答によって主たる非線形性が地盤及び支承部に生じ、橋脚が線形応答するこ

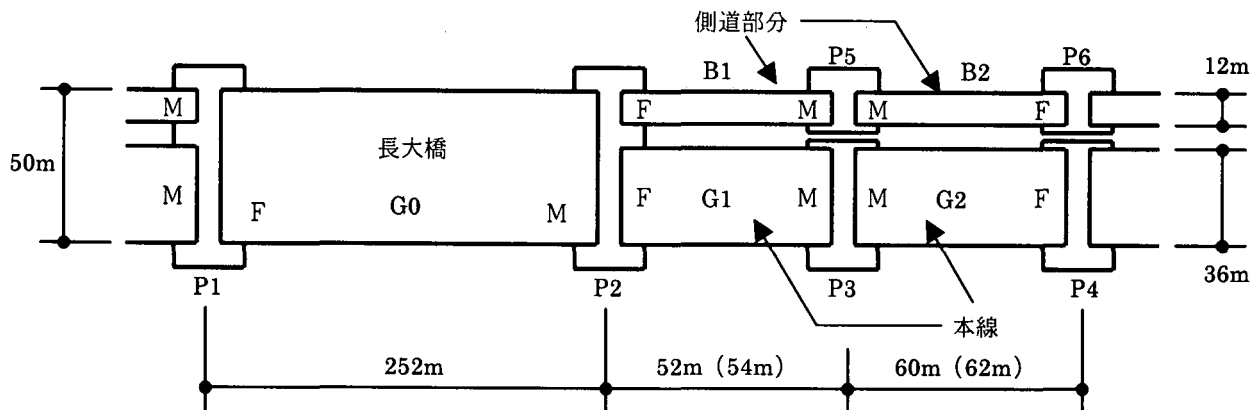


図-7 長大橋と隣接径間の平面図¹⁰⁾

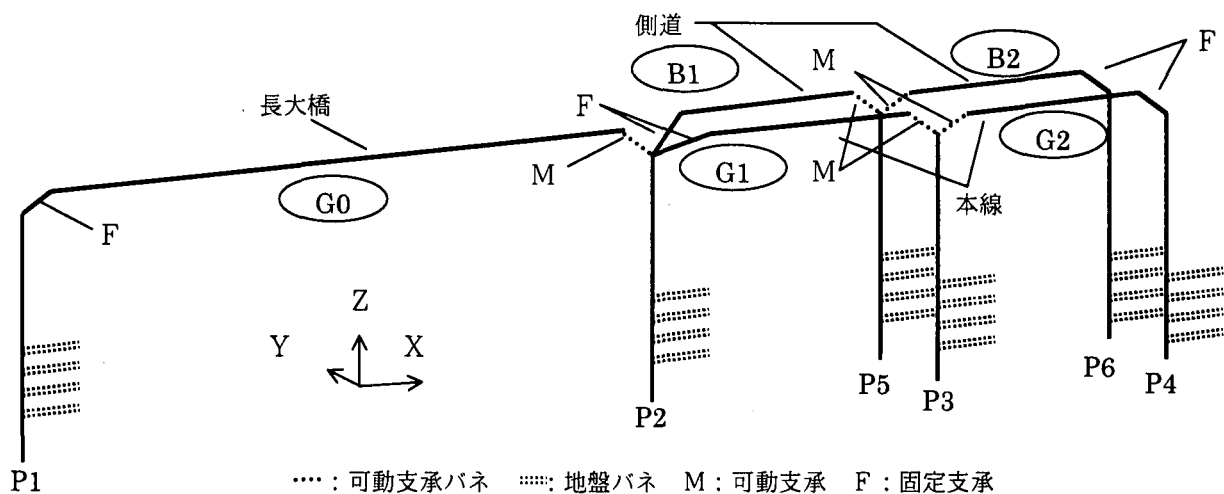


図-8 解析モデル図¹⁰⁾

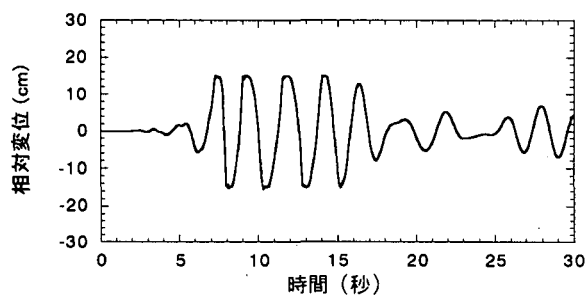


図-9 長大橋可動支承における変位

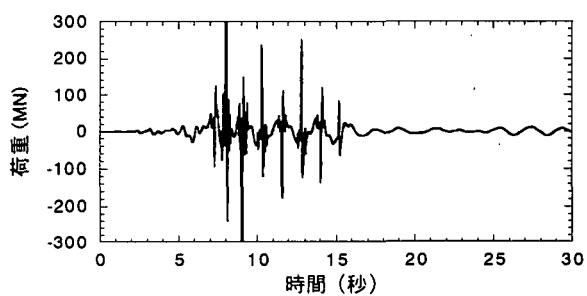


図-10 長大橋可動支承に生じる荷重

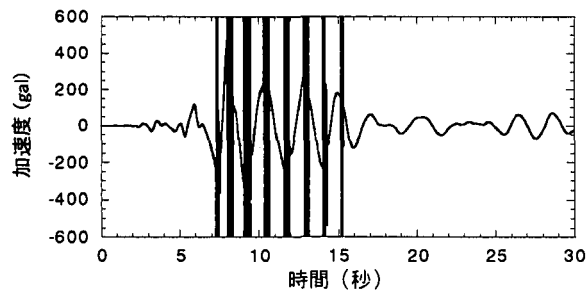


図-11 長大橋桁部における加速度

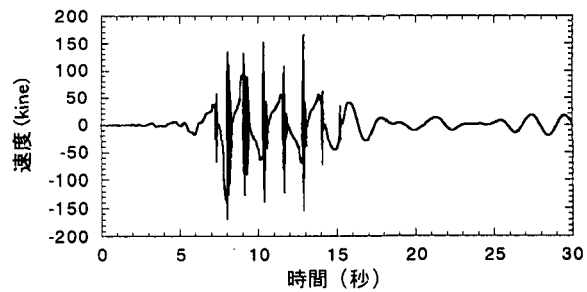


図-12 長大橋桁部における速度

とを前提とした結果であることを付記する。なお、各部材の減衰定数は、桁及び橋脚の鋼製部材に対して2%、RC部材に対して5%、地盤ばねに対して20%を仮定した。

解析に用いる入力地震波としては、1995年兵庫県南部地震時の、東神戸大橋近傍地盤における観測記録を用いた。E-W成分を橋軸方向に、N-S成分を橋軸直角方向に用い、水平2成分を同時入力して解析を行った。各質点に同じ地震加速度が、直接入力されるものとした。

図-9に長大橋可動支承に生じる変位を、図-10に長大橋可動支承に作用する荷重を示す。支承部に生じる変位は、最初の6秒間ほどは移動制限値内($\pm 15\text{cm}$)で自由な挙動を示しているが、その後+側と-側にあわせて8回衝突しているのみられる。また、図-10より、衝突の度に100MNを超える荷重が支承部に作用していることがわかる。

この時の加速度応答波形を図-11に、速度応答波形を図-12に示す。加速度応答は、最大値が大きすぎて最大値まではグラフに記載しておらず、振り切れた波形になっているが、数十Gを8回記録しており、衝突時に大きな加速度が生じている。

速度応答は最大200kine程度であるが、スパイク状の波形が見られる。衝突しなければ最大応答速度は100kine程度だと考えられる。このようなスパイク状の速度波形が生じると、衝撃波が発生する可能性があり、振動問題のみならず、衝撃問題の検討も必要であろう。これまでの橋梁における地震観測記録は、ほとんどが加速度計によるものであり、速度記録は積分によって計算されている。実際にこの図-12のような衝撃的な速度波形が存在するのかどうかは不明であるが、これまでの加速度計から積分された速度記録には現れなかっただけという可能性もある。

以上、数値解析では、計算上約200kineの衝突速度が生じている。衝突ばねの剛性をどのように設定するかによっても答は変わってくる可能性があるが、地震記録の解析結果とあわせて考えると、100~200kineの衝突速度を考慮しておく必要があるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、地震時における隣接部材の衝突速度に関して、地震記録および数値解析から検討した。検討項目についてまとめると、以下のようになる。

- 1) 大規模橋梁における隣接部材との衝突が記録された地震観測記録としては、最大速度約100kineの記録がある。
- 2) 自由振動による衝突速度では、30kine程度の記録がある。

- 3) 震度階IV~Vの地域における橋梁のジョイント部の衝突記録では、約20kineのものがある。
- 4) 数値解析では、約200kineの衝突速度が計算される場合がある。衝撃的な波形となることもあり、振動問題のみならず、衝撃問題の検討が必要となる可能性もある。

謝辞：東神戸大橋の記録を利用するにあたっては、阪神高速道路公団の丹波寛夫氏および小林寛氏にお世話になった。また、琵琶湖大橋の記録の利用にあたっては、滋賀県道路公社の三和啓司氏にお世話になった。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 矢部正明・竹村浩志・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年3月。
- 2) 窪田賢司・菅野匡・上東泰・石田博：緩衝効果を有する落橋防止装置の衝突実験及び効果の検証，土木学会第52回年次学術講演会，第I部B，pp.418-419，1997年9月。
- 3) Malhotra, P.K.: Dynamics of seismic pounding at expansion joints of concrete bridges, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.124, No.7, pp.794-802, July 1998.
- 4) 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年1月。
- 5) 越峠雅博・運上茂樹・足立幸郎・長屋和宏：弾塑性特性を有する緩衝構造の衝撃吸収効果に関する実験的検討，第25回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，pp.857-860，1999年7月。
- 6) Malhotra, P.K., Huang, M.J. and Shakal, A.F.: Seismic interaction at separation joints of an instrumented concrete bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.24, pp.1055-1067, 1995.
- 7) 山崎文雄・Todor Ganey・石崎浩・北沢正彦：東神戸大橋の兵庫県南部地震時の応答シミュレーション，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.613-616，1997年7月。
- 8) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：地震・地震動，阪神・淡路大震災調査報告，共通編-2，pp.255-258，1998年2月。
- 9) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録(No.21)，土木研究所彙報第64号，1995年6月。
- 10) 伊津野和行・武野志之歩・中井博：長大橋とそのアプローチの地震時相互作用に関する考察，土木学会論文集，No.633/I-49，pp.169-180，1999年10月。