

バネ-質点系モデルによる桁間衝突実験のシミュレーション解析

SIMULATION ANALYSIS ON COLLISION TEST BETWEEN TWO STEEL BARS BY MASS-SPRING MODEL

梶田幸秀*, 金光明**, 石川信隆***, 西本安志****

Yukihide KAJITA, Akira KANAMITSU, Nobutaka ISHIKAWA and Yasushi NISHIMOTO

*博士(工学) 防衛大学校助手 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**防衛大学校理工学研究科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

****修士(工学) シバタ工業(株) 技術開発本部 サブリーダー (〒674-0082 明石市魚住町中尾 1058)

キーワード: 積層繊維補強ゴム, 桁間衝突, バネ-質点系モデル

(Laminated fiber reinforced rubber, Collision between girders, Mass-spring model)

1. はじめに

1996年に改訂された道路橋示方書¹⁾では, 上部構造の落下を防止できるよう, 落橋防止システムを設けるように記述されている. さらに, 落橋防止システムの構成要素である落橋防止構造には, 衝撃的な地震力を緩和するため, ゴムなどの緩衝材を用いて耐衝撃性を高める構造とすることが記載されている. そのため, 緩衝材を備えた落橋防止構造の機能性・有効性に関する研究が現在までに数多く実施されている²⁾⁻⁵⁾.

落橋防止構造に関する研究は次のように大きく2つに分けられる. ①落橋防止構造そのものの機能に着目し, その耐力やエネルギー吸収性能または緩衝効果を解明するもの^{2), 3)}と, ②落橋防止構造を高架橋を構成する一つの要素として考え, 高架橋システムの地震時応答における落橋防止構造の影響を解明しようとするもの^{4), 5)}である. いずれの研究目的も重要なものであるが, 構造設計へ反映するためには両者の視点を共存させた研究が望ましい.

ところで, 上記に示した①の研究のほとんどが固定物(橋台や落橋防止壁)に物(上部構造)が衝突する場合について検討されており, 桁間衝突のように衝突する2物体がともに可動状態である物体同士の衝突現象について実験された例は少ない. そのため, 著者らはH型鋼および鋼角柱による桁間衝突実験の模型実験を行い, 桁間衝突のモデル化に対する

資料収集をすでに行った^{6), 7)}.

鋼角柱を用いた模型実験⁷⁾の際には, 桁間衝突による桁端部破壊防止に有効と思われるゴム製および積層繊維補強ゴム製緩衝材に着目し, まず, 局所的性能として(a)衝突荷重の低減性能, (b)高架橋システム応答への寄与としてのエネルギー逸散性能を明らかにすることに努めた. 本論文は, 将来的に上記に示した②の研究(高架橋システムの解析)に用いる基礎的検討として, バネ-質点系モデルによるシミュレーション解析を試みたものである.

2. 桁間衝突実験および考察

桁間衝突実験の詳細な概要は文献7に記載されており, 本論文では3, 4章で述べるシミュレーション解析に必要な部分だけを抽出して記載することにした.

2.1 実験概要

桁間衝突実験の概要としては, 図-1 および写真-1に示すようにガイドレール上に2本の鋼角柱を載せ, 一方の鋼角柱を静止させておき, 他方の鋼角柱に水平高速載荷装置により初速度を与え, 静止させている鋼角柱に衝突させる方法で行った. 本論文では, 静止させている鋼角柱を被衝突鋼材, 初速度を与えた鋼角柱を衝突鋼材と呼ぶ. 実験に用いた鋼角柱は長さ1000mm, 縦・横200mmの正方形断面を有し,

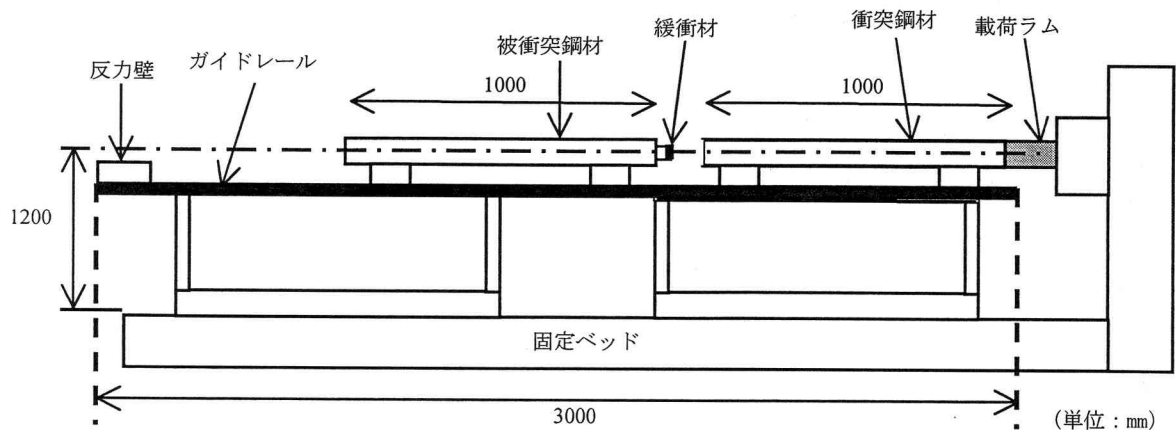


図-1 桁間衝突実験概略図

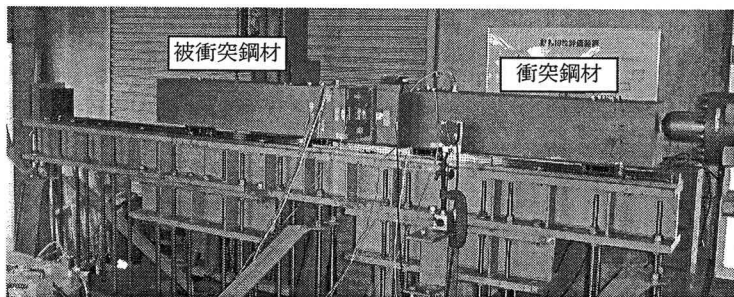


写真-1 実験風景

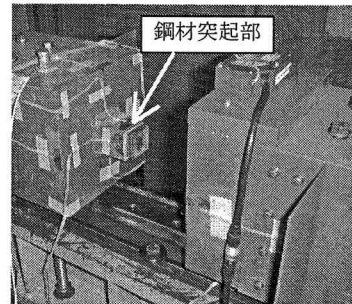


写真-2 衝突面拡大図

材質は SS400 (JIS G 3101), 被衝突鋼材の質量は 315kg, 衝突鋼材の質量は 318kg である。質量に差があるのは, 後述する被衝突鋼材に溶接した鋼材突起部や衝突鋼材に取り付けたレーザー式変位計取り付け治具のためである。

実験に用いたゴム製および積層繊維補強ゴム製緩衝材の大きさは縦・横 40mm, 厚さ 10mm であり, ゴム製緩衝材は硬度 50 度のゴム (天然ゴム) であり, 積層繊維補強ゴム製緩衝材は硬度 50 度のゴムの中に引張強度が 294N/cm の繊維を 5 枚埋設したものを用意した。緩衝材の大きさの決定には, 鋼角柱と緩衝材の重量比が, 実橋と同じレベル (重量比 14500 : 1) になるように考慮した。

緩衝材を取り付けた際の衝突点に生ずる衝突荷重を適切に測定するために被衝突鋼材には 50mm×50mm×50mm の断面を持つ鋼材突起部を設け, 写真-2 に示すように緩衝材をその前面に取り付け, 鋼材突起部の 4 面にひずみゲージを貼付した。

図-2 に取り付けた緩衝材の荷重～変形関係 (静的载荷実験結果) を示す。本実験では緩衝材は高速で圧縮されるが, 緩衝材の厚さが非常に薄いため高速载荷実験を行うことは困難である。高速载荷時におけるゴム製および積層繊維補強ゴム製緩衝材の荷重～変形関係は, ひずみ速度効果により荷重が上昇することは西本らの研究⁸⁾で明らかにされているが,

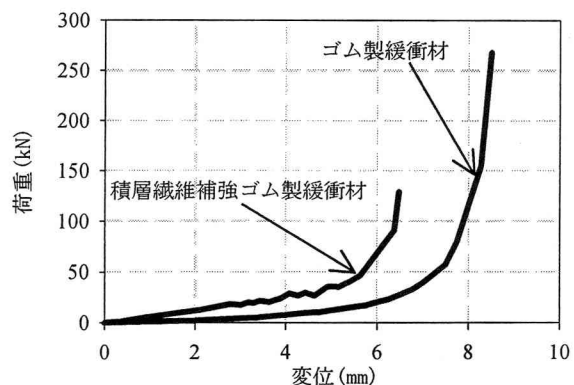


図-2 緩衝材の荷重～変位関係

上昇の割合などは不明な点が多いためシミュレーション解析における緩衝材の荷重～変形関係は図-2 に示す静的载荷実験結果を用いることとした。

実験の測定項目は, 衝突鋼材ならびに被衝突鋼材の移動距離, 衝突鋼材と被衝突鋼材の相対変位ならびに鋼材突起部のひずみである。鋼材の速度については, 鋼材相対変位～時間関係より, 相対変位が 0 のときは, 衝突鋼材と被衝突鋼材がちょうど接触し, 相対変位が正のときは, 2 本の鋼材が接触しさらに緩衝材が変形していることを示している。すなわち, 最初に相対変位が 0 になった点が衝突点, 次に 0 になった点が離反点である。このように定義した衝突点・離反点を用いて, 衝突鋼材ならびに被衝突鋼材の移動距離～時間関係において, 衝突点前の 0.01sec

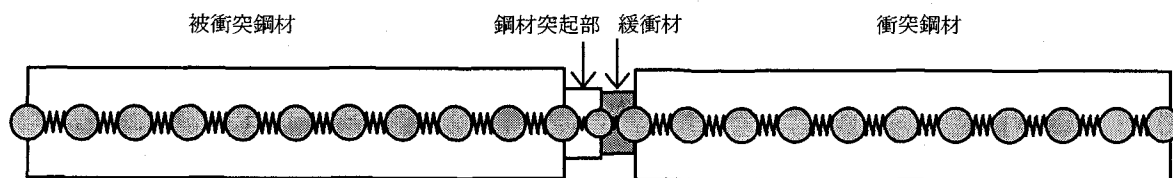


図-3 バネ-質点系モデル

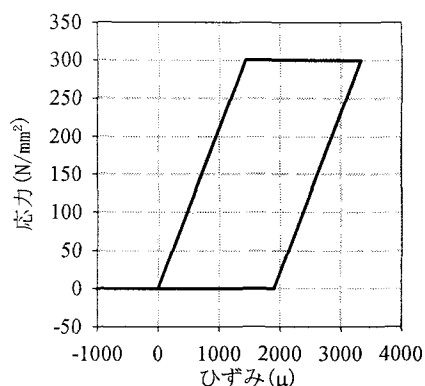


図-4 鋼材突起部の応力～ひずみ関係

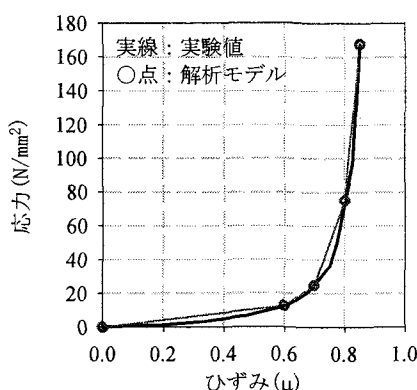


図-5 ゴム製緩衝材の応力～ひずみ関係

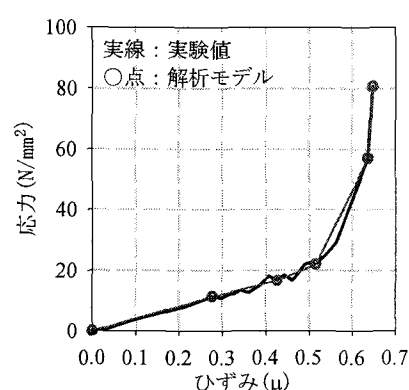


図-6 積層繊維補強ゴム製緩衝材の
応力～ひずみ関係

および離反点後の 0.01sec を時間微分することにより衝突前の衝突鋼材の速度 v_1 、衝突後の衝突鋼材の速度 V_1 ならびに衝突後の被衝突鋼材の速度 V_2 を算出した。

続いて 2 物体の衝突問題では、一般に物体の衝突前後の運動量の変化量は衝突中にその物体が受けていた力積に等しいが、本実験においてレーザー式変位計から求めた速度を用いて算出した運動量の変化量と、ひずみゲージの値から算出した衝突中の力積に大きな違いが認められた⁹⁾。これは、文献 9 でも述べているが鋼材突起部に作用している応力分布が一樣でないことが原因と考えられ、本論文において衝撃力の算出には、レーザー式変位計で得られた時間-移動距離関係を 2 回微分することにより加速度を求め、その加速度に鋼材質量を乗ずることにより衝撃力を算定した。

実験では、衝突鋼材に与える初速度については、0.25, 0.40, 0.70, 1.00, 2.00m/s を設定したが、シミュレーション解析では、0.40, 0.70, 1.00m/s の 3 ケースについて行った。なお模型実験においては、1 つの実験ケースにつき 2 度の実験を行い、2 度ともほぼ同じ値が計測されており再現性の高い実験であることを確認している。

3. 衝撃応答解析法

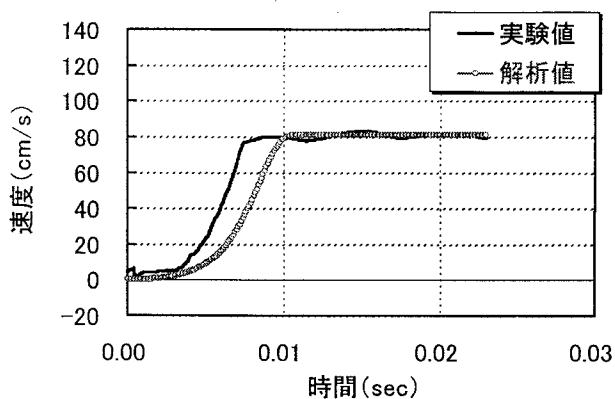
3.1 解析モデル

高架橋の全体システムの地震応答解析の際には

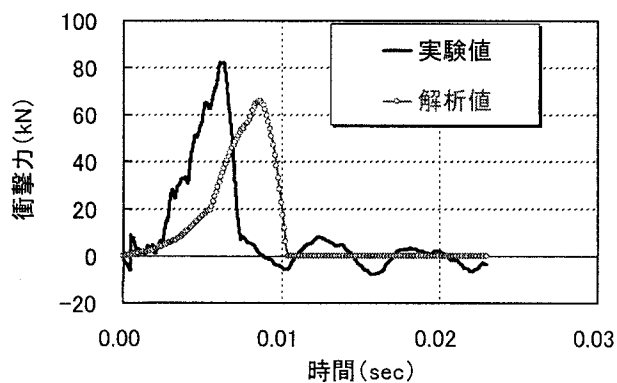
計算負担を考慮してバネ-質点系モデルや骨組モデルを用いることが多い。前述の実験結果を将来的に高架橋の全体応答解析に反映するため、模型実験のシミュレーション解析はバネ-質点系モデルで検討することとした。

本解析で用いたバネ-質点系モデルを図-3 に示す。衝突鋼材は鋼材本体部を 10 分割し、被衝突鋼材は鋼材本体部 10 分割に鋼材突起部要素と緩衝材要素をつけている。通常、2 物体の衝突問題を解析する際には、物体の接触・離反を表す仮想の衝突バネを用いる⁹⁾。しかし今回の解析では、衝突時における鋼材突起部に発生する衝撃力の大きさと衝突終了直後の衝突鋼材、被衝突鋼材の速度を得ることを目的としており、衝突終了後の衝突鋼材・被衝突鋼材の運動は考慮に入れていないため、仮想の衝突バネにより物体の離反を表すことは考慮しないことにした。

衝突鋼材ならびに被衝突鋼材本体部の復元力特性は弾性モデルとし、剛性は EA/L (E : 鋼のヤング率, A : 要素の断面積, L : 要素長) より算出した。鋼材突起部の復元力特性は図-4 に示すバイリニア型とした。なお、本実験で使用した鋼角柱は SS400 材であるが、鋼材そのものの材料実験は行っていないため、降伏応力については、ひずみ速度効果を考慮して SS400 材の公称値である 240N/mm^2 よりも 1.25 倍大きい値である 300N/mm^2 を用いている。初期剛性は $1.03 \times 10^7 \text{kN/m}$ を用いた。また、降伏後の塑性時の 2 次剛性は初期剛性の 0.01 倍としている。除荷

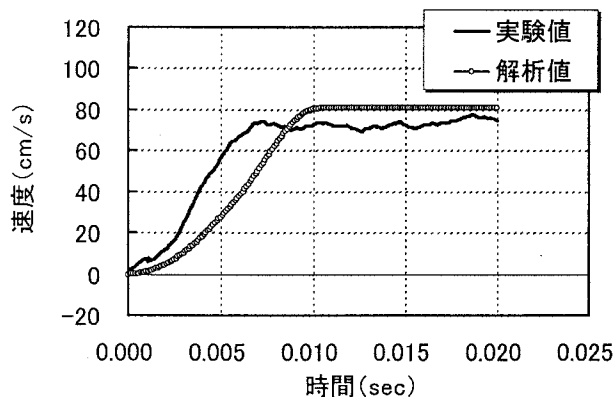


(a) 速度～時間関係

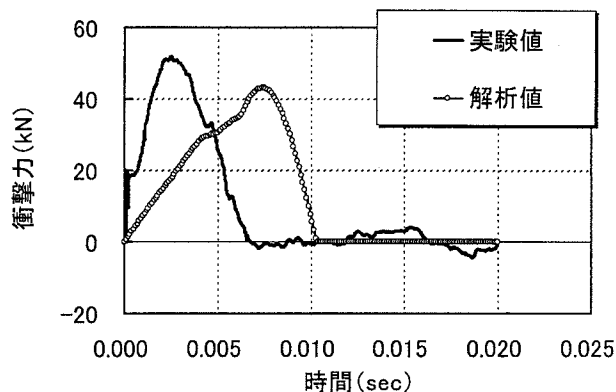


(b) 衝撃力～時間関係

図-7 時間～速度，衝撃力関係（ゴム製緩衝材，設定速度 1.00m/s）



(a) 速度～時間関係



(b) 衝撃力～時間関係

図-8 時間～速度，衝撃力関係（積層繊維補強ゴム製緩衝材，設定速度 1.00m/s）

は弾性剛性で復元するものとした。続いて図-5, 6 にゴム製緩衝材および積層繊維補強ゴム製緩衝材の応力～ひずみ関係を示す。これは，図-2 に示した緩衝材の静的載荷実験を 4 段階および 5 段階の直線で近似化したモデルである。なお，除荷過程は静的載荷実験では求められないので線形と仮定し，衝突後の被衝突鋼材の速度において，解析値と実験値がほぼ一致するように除荷剛性を変化させた。

本来ならば鋼材突起部ならびにゴム製緩衝材の復元力特性は，引張側にも抵抗力を発揮するべきであるが，緩衝材および鋼材突起部は衝突点に近く，引張力が働く場合には離反過程にあるものとして抵抗力が生じないモデルとした。

3.2 解析手法

本解析対象は外力の作用がないため運動方程式は，式(1)で表される。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad (1)$$

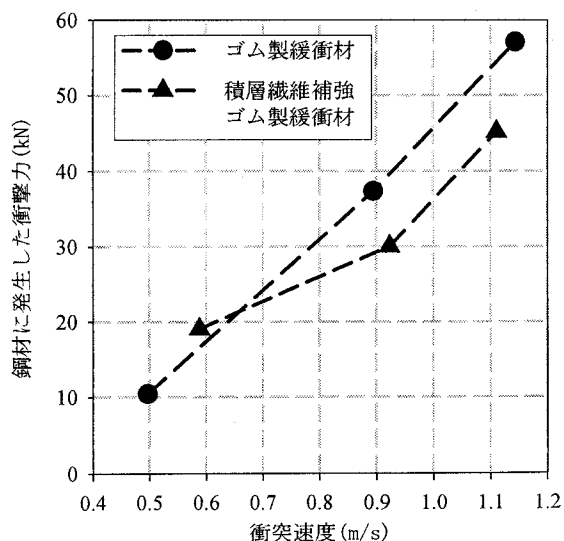


図-9 最大衝撃力～衝突速度関係

ここで， M ， C ， K はそれぞれ，質量マトリックス，減衰マトリックス，剛性マトリックス， u ， $\dot{u}$ ， $\ddot{u}$ はそれぞれ質点の変位，速度，加速度ベクトルである。質量マトリックスは集中質量モデルとし，式(2)によ

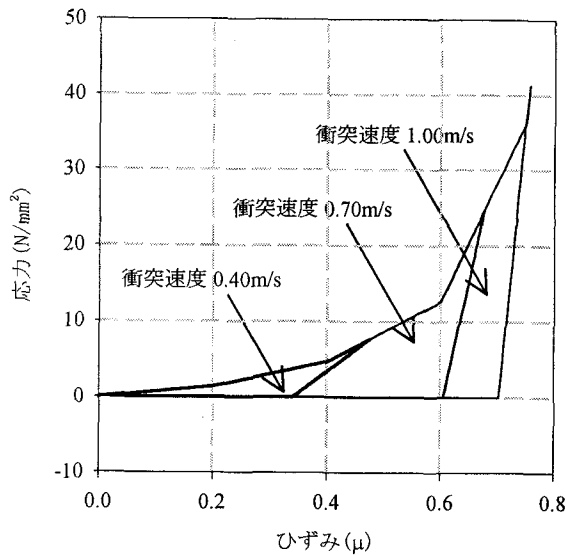


図-10 ゴム製緩衝材の応力～ひずみ関係

って求めた。

$$m_i = \frac{\rho}{2} (l_j A_j + l_k A_k) \quad (2)$$

ここで、 m_i : i 点の質点の質量、 ρ : 密度、 l_j, l_k : i 点に接合された要素長、 A_j, A_k : i 点に接合された要素断面積である。

さらに、剛性マトリックスは式(3)によって求められる。

$$k_i = \frac{\tilde{E} A_i}{l_i} \quad (3)$$

ここで、 k_i : 質点 $i-1$ と i の間にある初期剛性、 $\tilde{E}$: 非線形を含む時刻 t でのひずみ ε_i に対応する接線ヤング係数、 l_i : 質点 $i-1$ と i の間の長さである。

また、減衰はレーリー減衰を仮定し、式(4)により求めた。

$$c_i = \alpha_i m_i + \beta_i k_i \quad (4)$$

ここで、 c_i : 要素 i の減衰定数、 α_i : 要素 i の粘性減衰、 β_i : 要素 i の構造減衰比例定数である。

解析パラメータとして表-3 に示す値を用いて解析を実施した。なお、本解析においては 2 本の鋼材が衝突した時点を時刻の起点 ($t=0$) とし、鋼材の各質点の変位は $t=0$ の時点における各質点位置を基準と

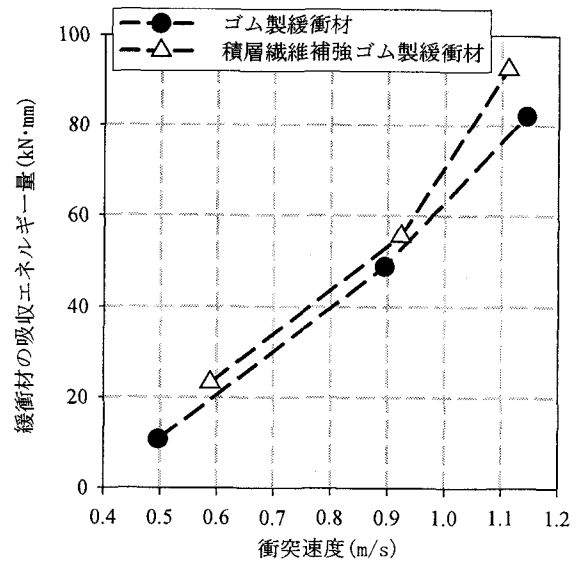


図-11 吸収エネルギー量～衝突速度関係

してその位置からの移動量により表している。

計算手法としては、Newmark β 法 ($\beta=1/6$) を用い、初期条件として衝突鋼材を表す質点に実験で計測された衝突鋼材の衝突速度を与えた。本実験は直線上での衝突現象のため、1 次元問題として取扱うこととし、回転やねじれについては考慮していない。実験の衝突継続時間 ($1 \times 10^{-2} \text{ sec} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ sec}$) から積分時間間隔を $1 \times 10^{-6} \text{ sec}$ とし、衝突終了後までを計算している。

4. シミュレーション解析結果

4.1 衝突後の速度および衝撃力

図-7 に設定速度 1.0 m/s の場合のゴム製緩衝材、図-8 に設定速度 1.0 m/s の場合の積層繊維補強ゴム製緩衝材の被衝突鋼材の速度～時間関係および衝撃力～時間関係のグラフを示す。図-7, 8 より、いずれの緩衝材においても解析により得られた速度は実験で得られた速度を概ねシミュレートしている。しかしながら、衝撃力～時間関係をみるといずれの緩衝材においても解析値の最大衝撃力は実験値の最大衝撃力より若干小さくなる傾向があることや、最大衝撃力の生じる時間が遅れることがわかる。このことは、実験ではゴム製緩衝材は高速で圧縮されているのに対し、解析でのゴム製緩衝材の構成則は図-2 に示す静的実験結果を用いていることが関係していると考えられる。

図-9 に衝突速度と最大衝撃力の関係を示す。積層繊維補強ゴム製は衝突速度が遅い 0.5 m/s 付近ではゴ

ム製緩衝材と同程度の衝撃力を示しているが、衝突速度が速くなるとゴム製緩衝材に比べて衝撃力が小さくなっていることがわかる。これは、衝突速度が速くなり積層繊維補強ゴム製緩衝材の埋設繊維が切れた効果が現れたものと考えられる。

4.2 緩衝材の吸収エネルギー

図-10 に解析で得られたゴム製緩衝材の圧縮力と変形関係を示す。前述したとおり除荷過程は載荷経路と異なるので、ヒステリシスループが描かれておりエネルギーが緩衝材により吸収されたことがわかる。図-11 に緩衝材が吸収したエネルギー量の比較を示す。図-11 より衝突速度が遅くても、緩衝材が吸収したエネルギー量は積層繊維補強ゴム製緩衝材の方がゴム製緩衝材よりも少し大きいことがわかる。これは、積層繊維補強ゴム製緩衝材は繊維を積層埋設したため初期剛性がゴム製緩衝材よりも大きいため、エネルギー吸収量が大きくなったのではないかと考えられる。

5. 結論

本研究では、桁間衝突におけるゴム製および積層繊維補強ゴム製緩衝材の緩衝効果を把握するために行った鋼角柱の衝突実験を、簡易なバネ-質点系モデルによりシミュレーション可能かどうか検討を行った。以下に本研究で得られた結果を要約する。

- (1) 衝突後の速度に関して、実験で変位計から算出した速度とバネ-質点系解析で求められた速度はほぼ同じ値を示すことから解析値は実験値を概ねシミュレートしている。
- (2) 緩衝材がある場合の最大衝撃力については、解析値が若干下回っており、また最大衝撃力を迎える時間は解析値の方が速くなっている。
- (3) ゴム製緩衝材と積層繊維補強ゴム製緩衝材の最大衝撃力を比較すると、衝突速度が遅い場合は、同程度か積層繊維補強ゴム製の方が少し大きくなるが、衝突速度が速くなると明らかに積層繊維補強ゴム製緩衝材の衝撃力の方が小さくなる。
- (4) 緩衝材が吸収したエネルギー量に着目すると、積層繊維補強ゴム製緩衝材の方が、いずれの衝突速度においても吸収したエネルギー量が大きくなる。

最後に、本論文で得られた成果を実高架橋の地震

時応答解析に適用する場合は、高架橋全体系の挙動、すなわち応答変位量が重要となるため、桁のモデル化は本論文のシミュレーション解析のとおり単純なバネ-質点系モデルで十分解析可能と考えられるが、桁端部の応力状態などを照査するためには、3次元解析や有限要素法を用いた解析などさらに詳細なモデル化が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方諸・同解説V耐震設計編，1996.12.
- 2) 越峠雅博，運上茂樹，足立幸郎，長屋和宏：弾塑性型特性を有する円筒形ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関する実験研究，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.99-112，2001.4.
- 3) 島ノ江哲，長谷川恵一，川島一彦，庄司学：衝突力を受けるゴム製緩衝装置の動的特性，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.219-234，2001.4.
- 4) 伊津野和行，小林紘士，鎌田耕平：桁落下を想定した桁間ケーブル連結装置の所要条件に関する考察，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.319-324，2001.1.
- 5) 川島一彦，渡邊学歩：斜橋における落橋防止構造の有効性に関する研究，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.141-159，2001.4.
- 6) 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.
- 7) 梶田幸秀，金光明，西本安志，石川信隆：積層繊維補強ゴム緩衝材を用いた桁間衝突時における緩衝効果に関する実験的研究，鋼構造論文集第9巻第33号，pp.37-47，2002.3.
- 8) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1865-1874，2000.3.
- 9) 金光明，梶田幸秀，香月智，石川信隆：ゴム製緩衝材を用いた桁間衝突実験のシミュレーション解析，構造工学論文集，Vol.48A，pp.887-898，2002.3.
- 10) 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.