

桁間衝突現象のモデル化に関する一考察

梶田幸秀¹・西本安志²・石川信隆³・香月智⁴・渡邊英一⁵

¹正会員 修士(工学) 防衛大学校助手 土木工学科(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

²正会員 防衛大学校理工学研究科(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

³フェロー会員 工博 防衛大学校教授 土木工学科(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

⁴正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学科(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

⁵フェロー会員 Ph.D. 工博 京都大学大学院教授 土木工学専攻(〒606-8501 京都市吉田本町)

本研究は、高架橋などの桁間衝突時における運動エネルギーの損失や衝突力に関する基礎的知見を得るためにH型鋼供試体の衝突実験を行い、供試体に発生する衝突力や衝突前後の運動エネルギーの損失およびゴム緩衝材の緩衝効果について検討したものである。実験では、質量52.2(kg)のH型鋼供試体を2体用い、相対速度1.0(m/s)~3.0(m/s)で互いに衝突させ、供試体に発生する衝突力をひずみ計測により、また運動エネルギーは供試体の移動変位を時間微分して算定した速度により評価した。さらに実験結果を線形の衝突バネを用いたバネ-質点系モデルによる解析結果と比較し、桁間衝突解析におけるバネ-質点系モデルの適用性と問題点について検討している。

Key Words : *pounding girders, shock absorber, reaction factor, energy loss, pounding spring*

1. はじめに

大地震時には、一部の重要道の高架橋は緊急車両の走行や救援物資の運搬といったライフラインとしての機能を保持する必要があるため、軽微な損傷を許しても落橋などの致命的な破壊を防がなくてはならない。そのため、高架橋全体の損傷メカニズムや、落橋に至るまでの過程を把握することが重要となり、高架橋の部材単位ではなく全体系をシステムとして取り扱い、地震時応答を評価する必要がある。このような見知から、高架橋を全体システムとしてとらえ、橋脚、基礎、支承、上部構造ならびに落橋防止構造といった各構造要素の相関や桁間衝突などを考慮した解析が震災後多くなされている^{1),2),3)}。

1995年兵庫県南部地震以降、耐震性向上のため、免震支承を有する高架橋が増えている。免震支承では、橋脚に作用する上部構造の地震時慣性力が低減されるが、一方で、上部構造の応答変位が増大するため、桁間衝突や桁と橋台・落橋防止壁などとの衝突の発生頻度が大きくなると予想されている。すな

わち、桁間衝突を考慮した高架橋の解析手法の確立は重要な課題であるといえる。

星ら⁴⁾は高架橋全体系の振動台実験を行い、また、線形の衝突バネ⁵⁾を用いた骨組み構造モデルで応答計算を行うことにより桁の変位ならびに桁間の相対変位を精度よくシミュレートできることを報告している。さらに著者ら⁶⁾も同様な研究を行い、振動台実験を線形の衝突バネでシミュレートできることを確認している。衝突バネを用いると、衝突現象を一つの構造部材として評価できることになり、衝突に際してモデル化を著しく簡略化できるという利点を有する。しかしながら、衝突バネは他のシステムに比して著しく高剛性の要素となり、また離反時には抵抗力を失する極めて特異な局部要素である。このため、少しでも剛性が異なるとシステム全体の挙動が場合によっては、大きく異なることが分かっている^{3),6)}。

一方、高架橋全体系ではなく、衝突現象に着目して行われてきた研究としては、まず窪田ら⁷⁾がガイドレールを用い、重錘(おもり)をコンクリート製

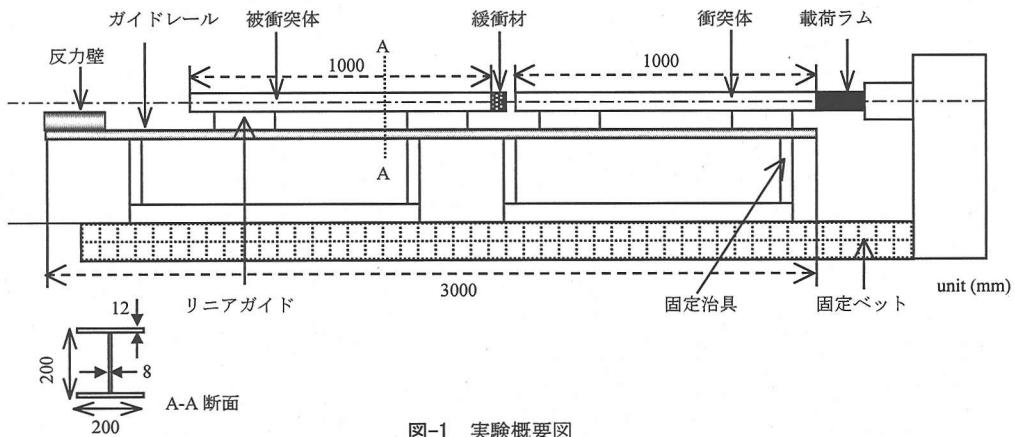


図-1 実験概要図

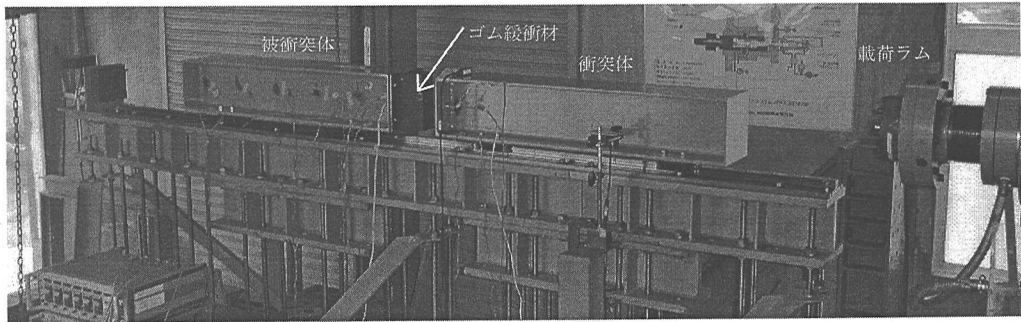


写真-1 実験風景

の壁(落橋防止壁)に衝突させる実験を行っており、また越峠ら⁸⁾は、振動台実験により上部構造と落橋防止壁の衝突を再現している。桁間衝突については、庄司ら⁹⁾が、振動台実験により桁間ならびに桁の移動制限装置にゴム製緩衝材を取りつけることにより、衝突力の低減や上部構造の応答が低減する効果があるとしている。これらの研究により、緩衝材を設置することによって衝突力の低減に関する緩衝効果があることが判ってきた。窪田ら⁷⁾は、桁と落橋防止壁の衝突現象に対して、緩衝材の変位-荷重特性から、発生する衝突力や緩衝材のエネルギー吸収量について検討しているが、衝突現象のモデル化は未解明のままである。

衝突現象のモデル化に着目して行われた研究として袴田・伊津野¹⁰⁾は、衝突バネを非線形バネに拡張することにより衝突時の運動エネルギーの損失を考慮し、衝突問題における簡便で普遍的な取り扱いの可能性について検討しているが、実際の衝突現象を追跡できるか、今後の課題としている。また鈴木ら¹¹⁾は、コンクリート製砂防ダム袖部を研究対象とし、鋼球をコンクリート供試体に衝突させコンクリート供試体の局部損失エネルギーを実験によって算定している。その後、ダミー質量や非線形衝突バネを用

いて実験結果の同定を行い、評価モデルの作成を行っているが、桁間衝突現象への適用は難しいと考えられる。

そこで、本研究では桁間衝突現象のモデル化の第一歩として、H型鋼の衝突実験を行い、基礎的なデータの収集を行うことにした。具体的には、ガイドレール上に橋桁に見立てた2本のH型鋼を設置し、衝突実験を行い、H型鋼に作用する衝突力や衝突前後のH型鋼の速度について測定を行った。この際、桁遊間にゴム緩衝材を設置し、衝突力低減の効果についても検討を行っている。次に、線形の衝突バネを用いたバネ-質点系による解析を行い、バネ-質点系モデルが表現する桁間衝突と実験によって再現した衝突現象とを比較し、その適用性と問題点について検討を行った。

2. 桁間衝突実験

(1) 実験概要

実験は防衛大学校が所有する動的物性評価装置を加速装置として利用して行った。本装置はアキュムレーターに蓄積された高圧の油を一気に解放するこ

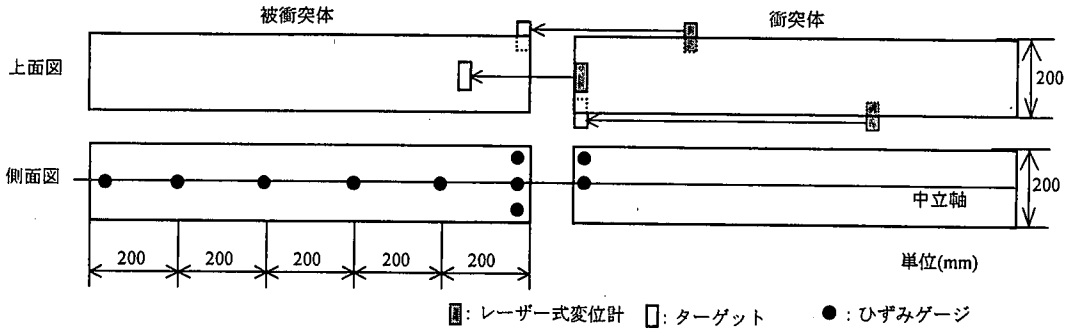


図-2 計測装置取り付け位置

とにより荷重ラムを最大 3(m/s)の速さで 15(cm)押し出すことができる。実験は、図-1 ならびに写真-1 に示すとおり、長さ 3(m)のガイドレール上に長さ 1(m)の H 型鋼を 2 本直列に並べ、1 本は静止させた状態にしておき、もう 1 本は荷重ラムを一定速度で押し出すことにより初速度を与え、静止している H 型鋼に衝突させ、桁間衝突を再現した。また、ガイドレールを用いることにより、H 型鋼が移動する際に発生する動摩擦力を極力低減させ、衝突時において摩擦力による損失エネルギーを極力抑えている。なお、本実験では、荷重ラムにより一定速度で押し出される H 型鋼を衝突体、静止させた状態の H 型鋼を被衝突体と呼ぶものとする。

(2) 実験供試体と実験ケース

実験で使用した H 型鋼は日本工業規格 (JIS G 3192) に基づいた高さ 200(mm)、辺 200(mm)、ウェブ厚 8(mm)、フランジ厚 12(mm)、断面積 63.53(cm²)、単位長さ質量 49.9(kg/m)のものであり、この H 型鋼の両端に厚さ 4.5(mm)の鉄板を溶接で取りつけた。このため、H 型鋼の直接衝突では、H 型鋼断面全体が同時に接触することになり、ゴム緩衝材を取りつけた場合は、その表面反力は、断面全体にほぼ均等に広がって作用することが期待できる。なお、H 型鋼の両端につけた板を含めた重量は 511(N)である。次に、緩衝材としては硬度 30 (密度 1051.9(kg/m³))、硬度 50 (密度 1155.6(kg/m³)) のゴムならびに硬度 50 のゴムシートを使用した。ゴムシートは、縦・横 200(mm)、厚さ 2(mm)の単なる平面形状であり、その他は縦・横 150(mm)、厚さ 30(mm)の直方体形状である。本実験は、重力の影響が非常に小さい試験であるため Replica 相似則¹²⁾を適用できると仮定した。Replica 相似則では実現象の速度と模型実験での速度の相似比は 1 である。伊津野・武野¹³⁾は数値解析より 1995 年兵庫県南部地震時の上部構造の応答速度は 1.0(m/s)~2.0(m/s)と報告している。よって本実験

では、衝突体に与える初速度を 1.0(m/s)、2.0(m/s)、3.0(m/s)の 3 種類とした。すなわち、本実験を実際の現象に照らし合わせると、高さ 2(m)、フランジ幅 2(m)、長さ 20(m)の H 型鋼が 1995 年兵庫県南部地震クラスの大地震を受け、相対速度 1.0(m/s)~3.0(m/s)で衝突する現象に相当すると考えて良い。

(3) 計測項目

2 物体の衝突問題では、次に挙げる 3 つのことが一般に示されている。①撃力が発生する、②衝突前後で運動量保存則が成立する、③衝突前後で運動エネルギーは損失される。本実験でもこれらの項目を検討項目とし、衝突時の衝突力と衝突前後の速度の算定を行うことにした。これらの物理量を算定するために、衝突体・被衝突体の移動距離、H 型鋼間の相対距離、衝突体の衝突面でのひずみならびに被衝突体の衝突面と軸方向のひずみの計測を行った。衝突体・被衝突体の移動距離ならびに H 型鋼間の相対距離はレーザー式変位計にて、ひずみについてはひずみゲージにより計測している。これらの計測項目より、衝突体・被衝突体の移動距離を時間で微分することにより衝突体・被衝突体の速度を、衝突体・被衝突体の衝突面に発生したひずみに H 型鋼の弾性係数と断面積を乗ずることにより衝突体・被衝突体の衝突面に作用する衝突力を算定した。ひずみゲージ、レーザー式変位計の設置位置を図-2 に示す。用いたレーザー式変位計は、(株)キーエンス製の LB-300 であり、測定範囲は 20(cm)から 40(cm)、分解能 50(μm)、応答性 915(Hz)の性能を有するものである。ひずみゲージの添付位置は、図-2 に示すとおり、H 型鋼端面に取りつけた厚さ 4.5(mm)の鉄板ではなく、H 型鋼自身であり、端面から約 2(cm)のところである。被衝突体の衝突面には上フランジ、ウェブ、下フランジの 3 カ所にひずみゲージを添付している。しかし、衝突体については計測チャンネル数の都合上、下フランジでの計測は行っていない。なお、サ

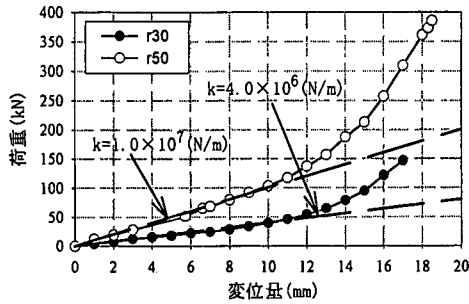


図-3 静的試験結果

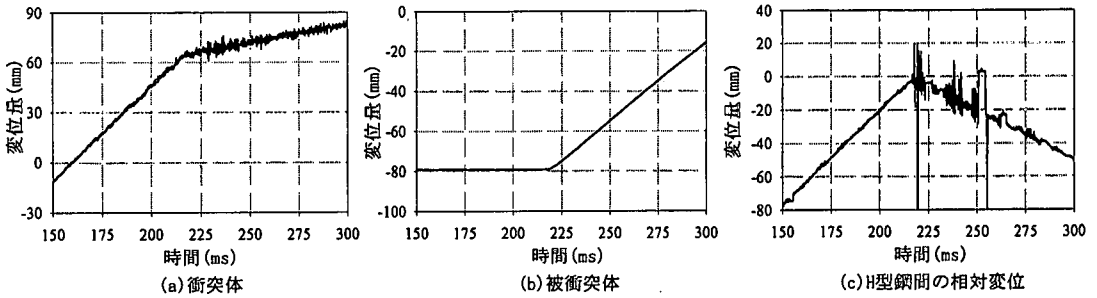


図-4 実験から得られた変位データ (緩衝材なし, $v=1.0$ (m/s))

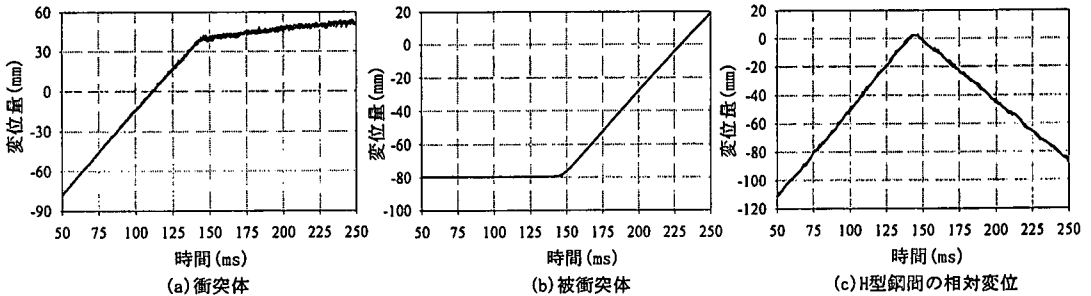


図-5 実験から得られた変位データ (硬度30, $v=1.0$ (m/s))

ンプリング時間間隔は、衝突体に与える初速度が 1.0 (m/s)のときは 0.1 (ms), 2.0 (m/s)のときは 0.03 (ms), 3.0 (m/s)のときは 0.025 (ms)である。

3. 実験結果および考察

(1) 緩衝材の力学特性

桁間衝突実験に先立って、緩衝材として用いたゴムの静的圧縮実験を行った。実験は 500 (kN)用アムスラー試験機を用い、供試体(緩衝材として用いたゴム)の厚さの 40% に縮むまで載荷した。静的圧縮実験の結果を図-3に示す。なお、ゴムシートについては厚さが薄いため実験を行っていない。図中では、硬度 30 、硬度 50 のゴムをそれぞれ $r30$ 、 $r50$ と表し

ている。グラフより圧縮変位 10 (mm)付近までは、2種類の供試体ともにほぼ線形の挙動を示し、それ以降は急激に荷重が立ち上がっている。図-3中の鎖線は、次章の解析で用いるゴムの初期剛性の値を示しており、硬度 30 のゴムのときは 4.0×10^6 (N/m)、硬度 50 のゴムのときは 1.0×10^7 (N/m)であり、硬度 30 のゴムの時は 50 (kN)の荷重まで、硬度 50 のゴムの時は 100 (kN)の荷重までは、線形範囲であると仮定できる。

(2) 衝突前後の速度の算出方法

図-4に初速度 1.0 (m/s)、緩衝材がない場合の衝突体・被衝突体の変位ならびにH型鋼間の相対変位を、図-5に初速度 1.0 (m/s)、緩衝材として硬度 30 のゴムを設置した場合の衝突体・被衝突体ならびにH型鋼

表-1 実験より算出した速度

入力設定初速度	緩衝材の種類	衝突前の衝突体の速度 (m/s)	衝突後の衝突体の速度 (m/s)	衝突後の被衝突体の速度(m/s)
v=1.0(m/s)	なし	1.19	0.19	0.78
	硬度 30	1.26	0.15	0.95
	硬度 50	1.22	0.15	0.93
	ゴムシート	1.13	0.25	0.85
v=2.0(m/s)	なし	2.14	0.39	1.65
	硬度 30	2.54	0.21	2.14
	硬度 50	2.42	0.27	2.07
	ゴムシート	2.17	0.44	1.76
v=3.0(m/s)	なし	3.13	0.41	2.41
	硬度 30	3.13	0.34	2.65
	硬度 50	3.13	0.36	2.63
	ゴムシート	2.92	0.62	2.25

表-2 緩衝材の最大圧縮変位

入力設定初速度	緩衝材の種類	最大圧縮変位(mm)	静的変位-圧縮荷重曲線から換算した発生荷重(kN)
v=1.0(m/s)	硬度 30	2.78	12.0
	硬度 50	2.44	23.0
v=2.0(m/s)	硬度 30	8.84	33.0
	硬度 50	8.94	91.0
v=3.0(m/s)	硬度 30	10.45	44.0
	硬度 50	9.72	103.0

間の相対変位を示す。衝突体、被衝突体の変位量は、レーザー式変位計からの距離をあらわし、H型鋼間の相対変位は、緩衝材がない場合は、H型鋼が接触した状態を変位量 0(mm)、緩衝材がある場合は衝突体と緩衝材前面が接触した状態（緩衝材は変形していない）を変位量 0(mm)としている。衝突体・被衝突体の衝突前の速度は、衝突が発生した時間から 20(ms)前と 30(ms)前の変位量より求め、衝突後の速度は衝突が発生した時間から 20(ms)後と 30(ms)後の変位量より求めることにした。しかしながら、変位データは振動しているため、衝突前後 20(ms)付近と 30(ms)付近のデータを無作為に抽出し、変位量を時間間隔で除することにより速度を算出した。データの抽出は 10 回行い、その平均値を実験より算出した速度としている。なお、無作為に抽出した 10 回のデータにおいて算出したそれぞれの速度には大きな違いはなかった。表-1 に実験より得られた衝突前後の衝突体・被衝突体の速度を、表-2 に緩衝材の最大圧縮変位と最大圧縮変位から図-3 の静的試験結果より算定される発生荷重を示す。表-2 において、初速度 2.0(m/s)のときに硬度 30 と硬度 50 のゴムで最大圧縮変位が逆転しているが、その理由は判明しておらず、またこの差が有意な差なのかという点も今後の研究課題である。

(3) ガイドレールの動摩擦力の影響について

実験結果の考察の前に、ガイドレールの動摩擦力が供試体の速度および運動エネルギーの減少にどの

ような影響をおよぼすかについて検討を行った。衝突体の初速度が 1(m/s)のときには被衝突体は、図-1 に示す反力壁に衝突する前に停止したため、先述の方法で求めた衝突後の被衝突体の速度と停止するまでの距離よりガイドレールの動摩擦係数を算定した。算定式を式(1)に示す。算定に使用したデータは、先に示したとおり、緩衝材の種類によらず衝突体の初速度が 1(m/s)のときであり、全体で 8 回である。式(1)より算定した結果、8 回の算定の結果、動摩擦係数は 0.0652 から 0.0683 の範囲にあり、平均で 0.067 となった。

$$\mu = \frac{V_2^2}{2dg} \quad (1)$$

ここで、 μ : 動摩擦係数、 V_2 : 被衝突体の衝突後の速度、 d : 被衝突体の移動距離、 g : 重力加速度である。H型鋼供試体に作用する外力が動摩擦力のみと仮定すると、供試体の速度-時間関係は式(2)のようになる。

$$v_t = -\mu g t + C = -0.66t + C \quad (2)$$

ここで、 v_t : 任意時刻の速度(m/s)、 C : 積分定数。式(2)より動摩擦力により供試体は 1 秒あたり 0.66(m/s)速度が減少することがわかる。実験での速度の算出は、衝突時から前後 30(ms)以内の現象を用いており、30(ms)の間で供試体の速度は 0.0198(m/s)減少するが、これは表-1 で算出した速度に比べると非常に小さい値である。また、速度が 0.02(m/s)減少することによる運動エネルギーの減少は、0.01(N・m)であり、衝突

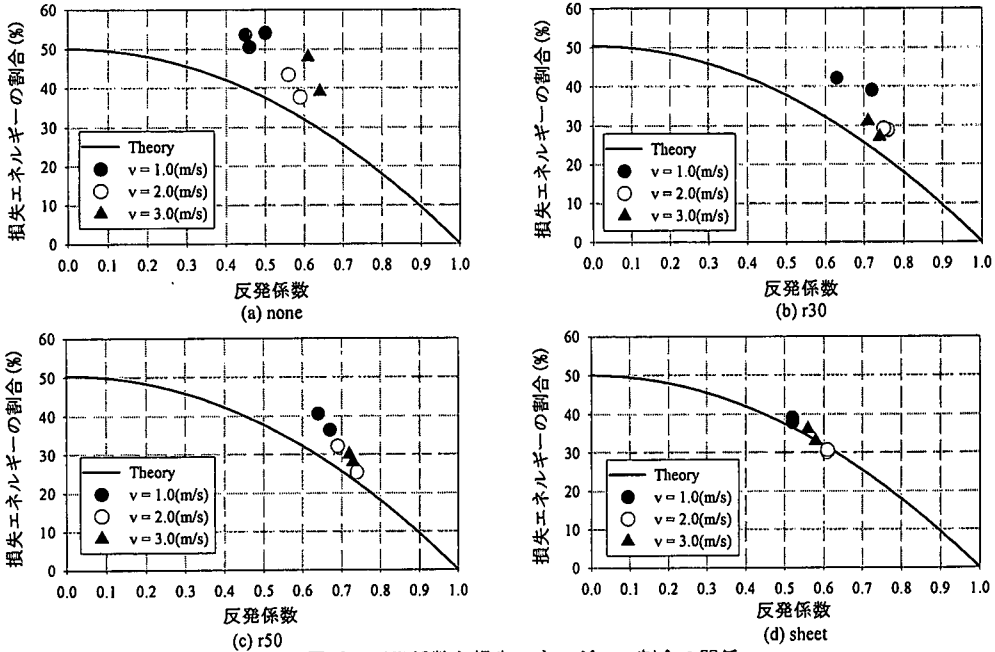


図-6 反発係数と損失エネルギーの割合の関係

前に供試体が持っている運動エネルギー $26.1(\text{N}\cdot\text{m})$ と比べても非常に小さい。よって、動摩擦力による速度の減少や運動エネルギーの減少は無視できると考えられる。

(4) 運動量保存則成立の確認

2物体の衝突現象では、衝突前後で運動エネルギーは保存されないが、運動量保存則は成立する。今回の実験において、運動量保存則は式(3)のように表される。

$$mv = mV_1 + (m + m')V_2 \quad (3)$$

ここで、 m : H型鋼の質量、 m' : 緩衝材の質量、 v : 衝突前の衝突体の速度、 V_1 : 衝突後の衝突体の速度、 V_2 : 衝突後の被衝突体の速度である。つづいて反発係数については式(4)のように表される。

$$e = -\frac{V_1 - V_2}{v} = \frac{V_2 - V_1}{v} \quad (4)$$

ここで、 e : 反発係数である。また衝突前と衝突後の運動エネルギーは式(5)、式(6)のように表される。本実験では衝突後の損失エネルギーを式(7)、損失エネルギーの割合を式(8)のように定義する。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

$$E' = \frac{1}{2}mV_1^2 + \frac{1}{2}(m + m')V_2^2 \quad (6)$$

$$\Delta E = E - E' \quad (7)$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{mv^2 - \{mV_1^2 + (m + m')V_2^2\}}{mv^2} \quad (8)$$

ここで、 E : 衝突前の運動エネルギー、 E' : 衝突後の運動エネルギー、 ΔE : 損失エネルギーである。式(3)と式(4)を式(8)に代入し、式を再整理することにより、運動量保存則が成立するときの反発係数と損失エネルギーの割合の関係式として次式が導かれる。

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{m + m'}{2m + m'}(1 - e^2) \quad (9)$$

図-6に各緩衝材において、初速度の違いによる反発係数と損失エネルギーの割合の関係を示す。図-6の中のTheoryとは式(9)を表す曲線であり、緩衝材がない場合をnone、硬度30のゴムをr30、硬度50のゴムをr50、ゴムシートをsheetと表している。プロットしたデータが曲線上にあるということは、衝突時に運動量保存則が成立していることを表し、曲線よりも上側にある場合は、運動量も衝突後に損失していることを表している。緩衝材がない場合については、いずれの初速度においても曲線よりも上にあり、運動量が衝突時に損失していることがわかる。これについては、緩衝材がない場合は図-4に示すとおり変位波形に高周波数成分が含まれており、平均速度を算出しているが、誤差が導入されたという理由が考えられる。緩衝材を入れた場合は、初速度1(m/s)の時、やや曲線から上へずれる傾向にあるが、

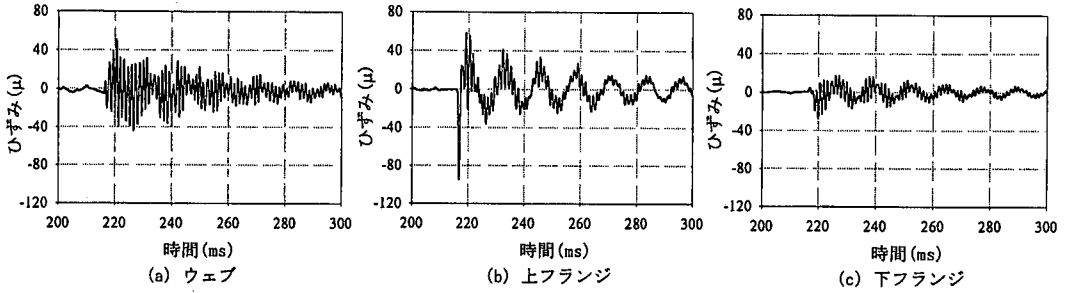


図-7 被衝突体の衝突面のひずみ-時間関係 (緩衝材なし, $v=1.0$ (m/s))

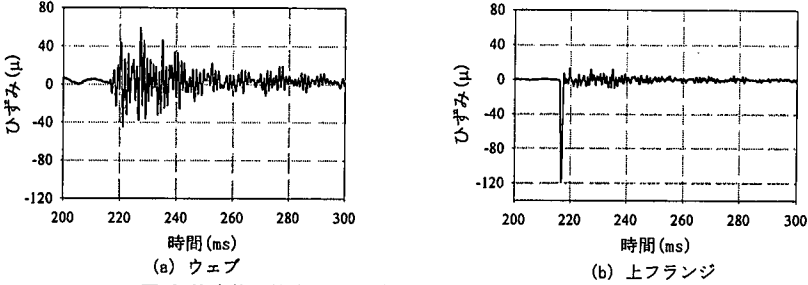


図-8 衝突体の衝突面のひずみ-時間関係 (緩衝材なし, $v=1.0$ (m/s))

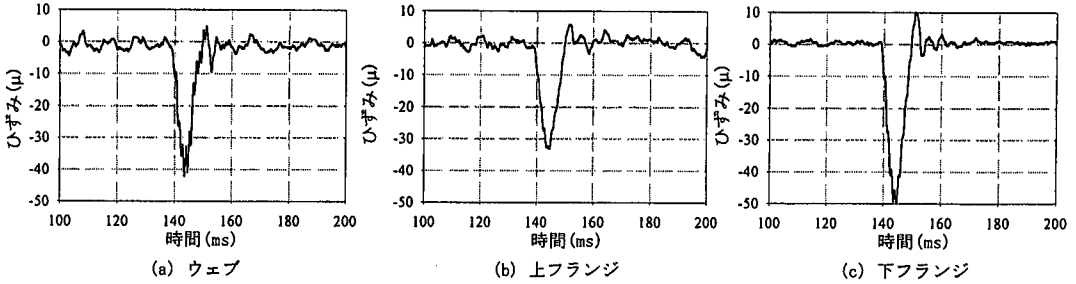


図-9 被衝突体の衝突面のひずみ-時間関係 (硬度30, $v=1.0$ (m/s))

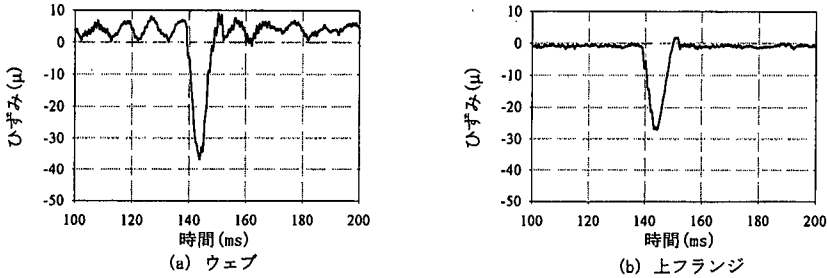


図-10 衝突体の衝突面のひずみ-時間関係 (硬度30, $v=1.0$ (m/s))

その他のケースも含めて運動量保存則がほぼ成立すると考えられる。また緩衝材の剛性が大きくなるほど、曲線上に分布することがわかる。これは、後述の表-3 に示すが、剛性が大きいほど衝突継続時間が短くなっているため、衝突中に動摩擦力が作用している時間が短くなる。そのため剛性が大きくなるほど供試体の減速が生じにくく、運動量保存則が成立しやすくなることがわかる。

(5) 損失エネルギーについて

損失エネルギーが発生する理由として、衝突中、物体は変形し、その際に運動エネルギーの幾分か熱エネルギー（分子の運動エネルギー）と内部的弾性ポテンシャルエネルギー（分子間の位置エネルギー）として失われたり、衝突の際に空気分子を振動させて音として失われたりすることが考えられる。図-6 より損失エネルギーの割合については緩衝材がない場合は 40%~50%であるのに対し、緩衝材を入れると 30%~40%となる。つまり緩衝材を入れるこ

表-3 被衝突体に作用した最大衝突力

入力設定初速度	緩衝材の種類	式(10)より求めた衝突力 (kN)	式(11)より求めた衝突力 (kN)	衝突継続時間(ms)
v=1.0(m/s)	なし	28.51	41.32	1.1
	硬度 30	55.50	53.70	12.5
	硬度 50	75.31	73.75	7.5
	ゴムシート	119.78	164.75	1.4
v=2.0(m/s)	なし	65.35	100.95	1.1
	硬度 30	126.64	122.91	10.0
	硬度 50	176.34	172.14	6.9
	ゴムシート	—	—	1.3
v=3.0(m/s)	なし	—	—	1.1
	硬度 30	148.23	154.86	9.6
	硬度 50	178.64	189.27	7.0
	ゴムシート	—	—	1.2

とにより損失エネルギーは緩衝材がない場合よりも小さくなり、衝突後の運動エネルギーは緩衝材がある場合の方が無い場合に比べて大きくなることを表している。

(6) H型鋼に作用する衝突力の算定方法

図-7 に初速度 1.0(m/s)、緩衝材がない場合に被衝突体の衝突面で計測された時間-ひずみ関係を、図-8 に初速度 1.0(m/s)、緩衝材がない場合に衝突体の衝突面で計測された時間-ひずみ関係を示す。また図-9、図-10 には、初速度 1.0(m/s)、硬度 30 ゴムの場合に衝突体・被衝突体の衝突面で計測された時間-ひずみ関係を示す。図-2 に示したとおり、衝突体の下フランジにはひずみゲージは添付していない。H型鋼断面全体が同時に接触するように H型鋼端部に鉄板をつけたが、図-7、図-8 よりわかるように、上フランジ部分で衝突が起きていることが確認できる。この理由として、ガイドレールと H型鋼供試体の設置において、衝突体と被衝突体の間でほんのわずかであるが、水平がとれていなかったことが原因と考えられる。なお、この傾向は、ゴムシートにおいても同様に見られた。一方、緩衝材を取りつけた図-9、図-10 を見てみると H型鋼断面全体にほぼ均等にひずみが発生していることが判る。これは、硬度 50 ゴムのときも同様である。

衝突力の算定方法には、式(10)と式(11)に示す 2通りの方法を用いた。式(10)は H型鋼を 3つの部分に分けて衝突力を求める方法であり、式(11)は H型鋼に作用するひずみの平均値から求める方法である。

$$F = E_s (\varepsilon_1 A_1 + \varepsilon_2 A_2 + \varepsilon_3 A_3) \quad (10)$$

$$F = E_s (A_1 + A_2 + A_3) \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)}{3} \quad (11)$$

$$A_1 = A_3 = B \cdot t_1 \quad (12)$$

$$A_2 = (H - 2t_1) \cdot t_2 \quad (13)$$

ここで、 F : H型鋼に作用する衝突力、 E_s : H型鋼の弾性係数 ($=2.06 \times 10^{11} \text{ (N/m}^2\text{)}$)、 A_1 : H型鋼の上フランジの断面積、 A_2 : H型鋼のウェブの断面積、 A_3 : H型鋼の下フランジの断面積、 ε_1 : 上フランジのひずみ、 ε_2 : ウェブのひずみ、 ε_3 : 下フランジのひずみ、 B : H型鋼の辺 ($=200 \text{ (mm)}$)、 H : H型鋼の高さ ($=200 \text{ (mm)}$)、 t_1 : ウェブ厚 ($=8 \text{ (mm)}$)、 t_2 : フランジ厚 ($=12 \text{ (mm)}$)である。図-7、図-8 より緩衝材がない場合ならびにゴムシートの場合は、上フランジに最大圧縮ひずみが作用した時間にウェブや下フランジに発生したひずみの値を用いて衝突力を算定した。図-9、図-10 より緩衝材がある場合は、おのおのの最大圧縮ひずみの値を用いて衝突力を算定した。なお、圧縮ひずみの最大値を示す時間のずれは、どのケースにおいても約 1.5(ms)に収まっているので、この方法を用いても問題ないと考えられる。

(7) H型鋼に作用する衝突力について

ここで、式(10)、式(11)により算定した被衝突体に作用する最大衝突力と衝突継続時間を表-3 に示す。なお表中で、初速度 2(m/s)のときのゴムシート、初速度 3(m/s)のときの緩衝材なし、ゴムシートについては、上フランジのひずみの値が計測設定範囲である 500(μ)を超過したため、値を記していない。また衝突継続時間は、圧縮ひずみが作用しはじめた時間から、次にひずみの値が 0(μ)になった時間と定義し、緩衝材なし、ゴムシートの場合は上フランジで得られたデータを、緩衝材がある場合はウェブで得られたデータをもとに算定した。

緩衝材がある場合は、H型鋼全体に均等にひずみが作用しているため、式(10)、式(11)より求めた表-3 における衝突力に大きな違いはない。しかしながら、緩衝材がない場合やゴムシートの場合は、上フランジ部分のみの片当たりの影響のため式(10)、式(11)より求めた衝突力が大きく異なった。また、ゴムを入

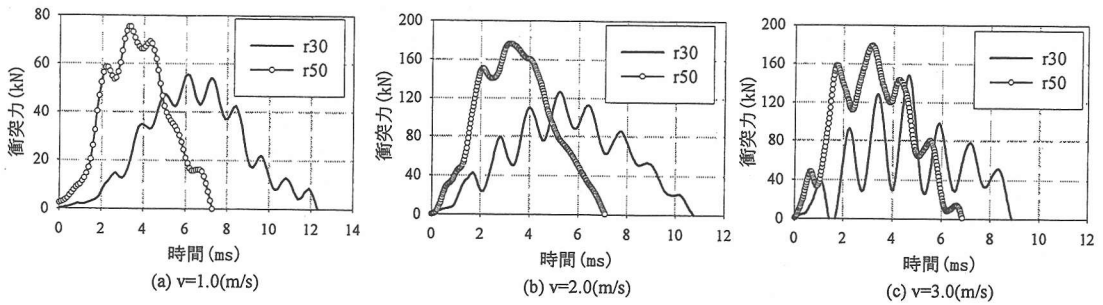


図-11 被衝突体に作用する時間-衝撃力曲線

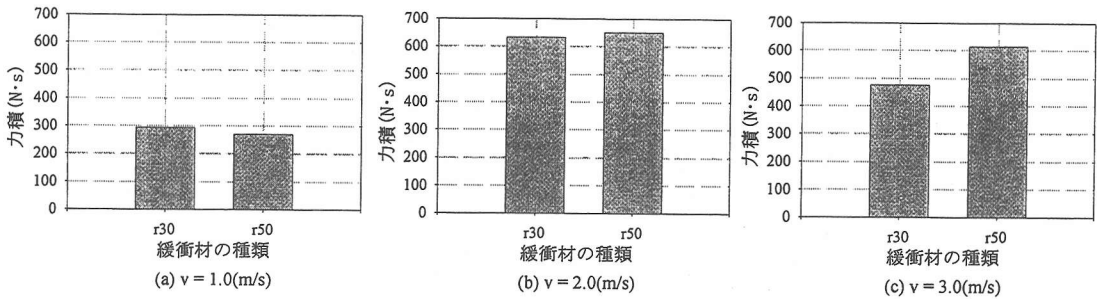


図-12 被衝突体に作用する力積

れることによる衝撃力の低減は数多くの研究で証明されているが、本実験結果からそれが得られなかったのは、緩衝材がない場合について、上フランジ部分のみの片当たりを起こしたためであると考えられる。衝突継続時間については、緩衝材を入れることにより衝突継続時間を長くできることがわかる。また、硬度 30、硬度 50 のゴムでは、衝突継続時間が初速度 1.0(m/s)よりも 2.0(m/s)では短くなるが、初速度が 2.0(m/s)と 3.0(m/s)のときはほとんど変化が認められないことが判る。

図-9 に示したウェブに作用した時間-ひずみ曲線において、ひずみの最大値を式(10)で算定した最大衝撃力に変換した時間-衝撃力曲線を図-11 に示す。図-12 に、図-11 の時間-衝撃力曲線より得られた H 型鋼に作用する力積を示す。図-12 より硬度の違いによらず力積の値はほぼ一定であることが判る。またこの力積は、衝突前に H 型鋼が保有していた運動量(52(N·s), 104(N·s), 156(N·s))よりもはるかに大きい。この結果は、Newton の第 2 法則から式(14)のように導かれる H 型鋼に作用した力積が H 型鋼の速度変化になるという関係式に照らし合わせると整合性がない。

$$\int F dt = m \cdot \Delta v \quad (14)$$

ここで、 F : H 型鋼に作用した衝撃力、 m : H 型鋼の質量、 Δv : 衝突前後の H 型鋼の速度変化である。しかしながら、たとえば硬度 30 のゴムでは、衝突継続時間(約 10(ms))の間にゴムの中で発生した応力波は

ゴムの応力波の伝播速度(約 75.5(m/s))から考えると、厚さ 30(mm)のゴムの中を約 13 往復している。ゴムに比べて H 型鋼の弾性係数(ヤング率)は、 10^4 倍以上大きくなる。つまり、ゴムと H 型鋼の境界面は、ゴムから見ると固定端に近い状態であると考えられる。固定端では、同じ大きさの同符号の応力波が反射するため、固定端面の応力は、入射応力の 2 倍になる。つまり、衝突継続時間中にゴムの中を応力波が数往復することと H 型鋼との境界面で応力が増幅されることにより、H 型鋼に作用した衝撃力は大きくなり、しいては衝撃力から求めた力積の値も大きくなったと考えられる。また図-11 のように時間-衝撃力曲線が波打っているのは、ゴムの中に発生した応力波が往復しているために起こる現象ではないかと考えられる。

また、表-2 に示した緩衝材の最大圧縮変位量から算定した衝撃力と表-3 に示したひずみゲージから算定した衝撃力では差があることがわかる。この理由について先述の通り、ゴムの中に発生した応力波の影響とゴムの圧縮強度において、圧縮速度の影響を考慮していないという点などが、ひずみから算定した衝撃力と最大圧縮変位量から算定した衝撃力が合わない理由と考えられる。

(8) 本実験の再現性について

最後に、本実験は、各実験ケースにおいてそれぞれ 2 回ずつ行っている。実験において、設定速度が

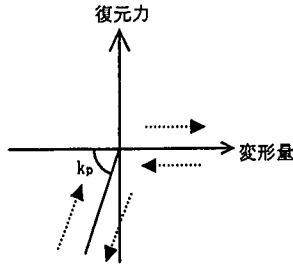


図-13 衝突パネの復元力モデル

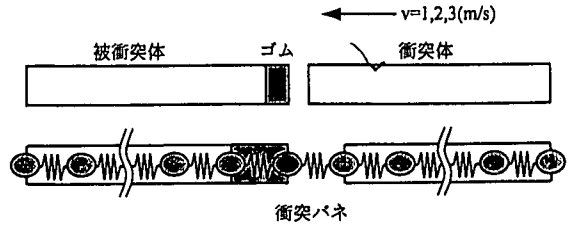
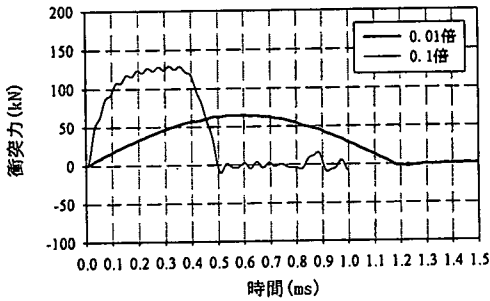
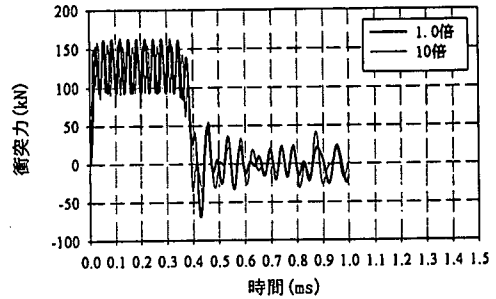


図-14 パネ-質点系モデル



(a) 衝突パネの剛性が基準剛性の0.01倍, 0.1倍の場合



(b) 衝突パネの剛性が基準剛性の1.0倍, 10倍の場合

図-15 緩衝材がない場合の時間-衝突力関係 ($v=1.0$ (m/s))

1(m/s)の場合、緩衝材の種類が4種類であるため(緩衝材なしを含める)実験を8回行っているが、実際に得られた速度は、1.06(m/s)から1.29(m/s)と少しばらついている。しかしながら、同じ緩衝材を用いた場合、設定初速度が同じならば得られる反発係数や損失エネルギー量は、図-6に示すとおりほぼ一致しており、本実験は再現性の高い実験であるといえる。

4. 衝突パネを用いた桁間衝突解析

(1)はじめに

2 物体の衝突問題で一般的に用いられている線形の衝突パネを用いて桁間衝突解析を行うことにより、パネ-質点系モデルの桁間衝突現象への適用性について検討を行った。図-13に衝突パネの復元力モデルを示す。解析においては、緩衝材がない場合とある場合とに分けて考えた。初速度については、1.0(m/s)の場合についてのみ行っているが、実験においては、表-2に示すとおり衝突体の初速度は正確に1.0(m/s)ではない。しかし、解析では入力初速度として1.0(m/s)を与えている。これは、パネ-質点系モデルの解析結果がどのような現象を表現しているかに注目するためである。緩衝材がある場合については硬度30のゴムのみを取り上げた。重量についてはH

型钢の両端に取りつけた板の重量は含まず、48.9(N)で行っている。図-14に解析に用いたパネ-質点系モデルを示す。なお本解析では、H型钢は弾性体とし、H型钢を15分割、ゴムは1分割としている。すなわち、緩衝材がないときは32自由度系、緩衝材があるときは33自由度系モデルとして計算を行っている。

(2)解析結果(緩衝材がない場合)

a)衝突力について

実験では、衝突力を精度よく計測できなかったため、解析結果の考察のみにとどめる。材質(密度とヤング率)が同じで、長さと同じ物体の衝突問題に対して、線形の衝突パネの剛性が解析結果に与える影響についてはすでに渡邊・川島¹⁴⁾が研究を実施しているが、緩衝材がある場合との比較のため、解析を実施した。衝突パネの剛性は渡邊らの研究を参考に式(15)で求められる衝突体の軸方向剛性と同じ値を基準として用いた。

$$k_p = \frac{EA}{(\ell/n)} \quad (15)$$

ここで、 k_p : H型钢(衝突体)の軸方向剛性、 n : 分割数、 E : H型钢の弾性係数(=2.06×10¹¹ (N/m²)), A : H型钢の断面積(6.353×10⁻³ (m²)), ℓ : H型钢の長さ(=1.0(m))である。本解析では、H型钢を15分割と

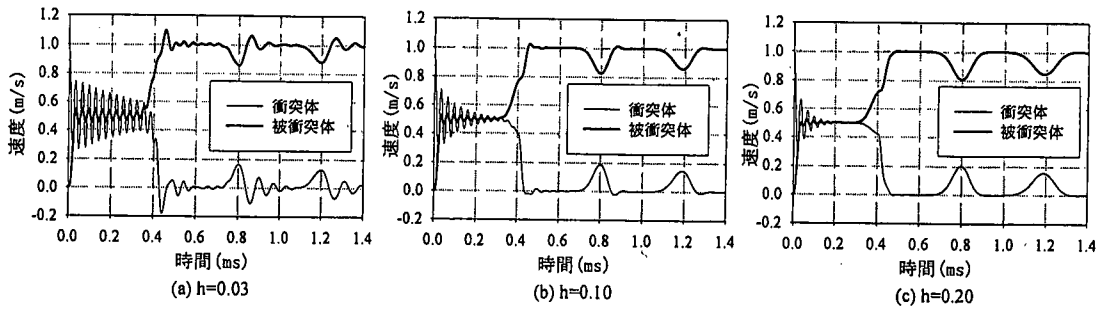


図-16 H型鋼の速度-時間関係(緩衝材なし, $v=1.0$ (m/s))

しているため、 k_p の値は 2.0×10^{10} (N/m)である。衝突パネの剛性を式(15)の値を基準に0.01倍、0.1倍、1.0倍、10倍と変化させて解析を行った。今回のモデルの最小固有周期は固有値解析より 1.3×10^{-5} 秒であったため、解析における時間間隔は 1.0×10^{-7} 秒とした。図-15に解析により得られた被衝突体に作用する時間-衝突力関係を示す。解析では、引張力を正としているが、実験においては衝突力を正としているので、図-15では圧縮力を正としている。図より、衝突パネの剛性が基準の0.01倍のときには他のケースに比べて、衝突継続時間が長く、衝突力は小さいが、その他のケースでは、衝突力、衝突継続時間ともに一定値に収束することがわかる。なおこのとき、解析値が示す衝突継続時間(0.4(ms))は1次元の棒の衝突における弾性応力波理論の理論解と一致している¹⁵⁾。時間-衝突力曲線を積分することにより力積の値を調べると、衝突パネの剛性に関わらず常に約 48 (N·s)の値が得られた。この値は衝突前にH型鋼が保有していた運動量 48.9 (N·s)の値に等しい。つまり、解析ではH型鋼が保有していた運動量に等しい力積が供試体に与えられている。

b) 損失エネルギーについて

先ほど行った線形の衝突パネを用いた解析では、衝突前後で運動エネルギーは保存されている。ここでは、H型鋼の減衰定数(材料の持つ粘性)を考慮することにより、衝突前後の損失エネルギーを求めることにした。なお、通常H型鋼の軸方向の減衰定数は0.03で計算が行われているが、本解析では0.03, 0.10, 0.20の3種類で行った。減衰定数を大きくした理由は、衝突時の損失エネルギーは構造物の減衰によっておきるのかを確認するためである。衝突パネの剛性は式(15)の値を用いている。図-16に衝突体・被衝突体の衝突面の質点の速度を示す。図よりH型鋼の減衰定数を考慮しても、衝突後、衝突体の速度は0(m/s)になり、被衝突体の速度は1(m/s)になる

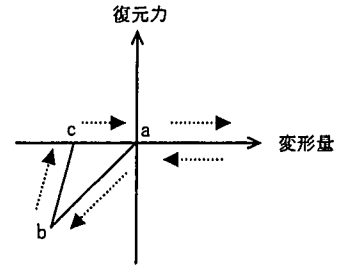


図-17 ゴムの復元力モデル

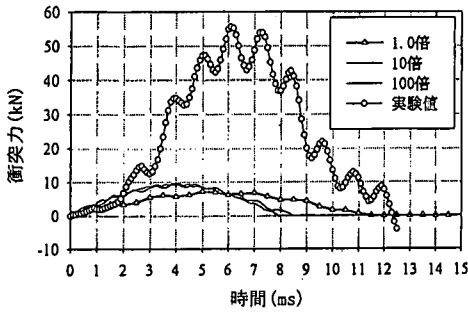
ため、H型鋼の減衰定数による損失エネルギーがほとんどないことがわかる。なお、0.8(ms)、1.2(ms)付近で速度が変化するのは、応力波が0.4(ms)でH型鋼の中を往復するので、衝突後も減衰せずに残っている応力波が衝突面に現れていることを示している。

緩衝材がない場合に損失エネルギーを評価するには、袴田・伊津野¹⁰⁾が行っている非線形の衝突パネを用いる方法が有効であることがわかる。一方で、第1章において線形の衝突パネを使った高架橋全体系の解析において、星⁴⁾や著者ら⁶⁾の研究より、振動台実験を線形の衝突パネでシミュレートできることを述べているが、これは、桁間衝突時の損失エネルギーが振動台より構造物に入力されるエネルギーに比べると極めて小さく、構造物の応答におよぼす影響が小さいと考えられる。すなわち、実橋梁の地震時応答解析において、桁間衝突時の損失エネルギーを考慮するかどうかは、今後の研究課題であると考えられる。

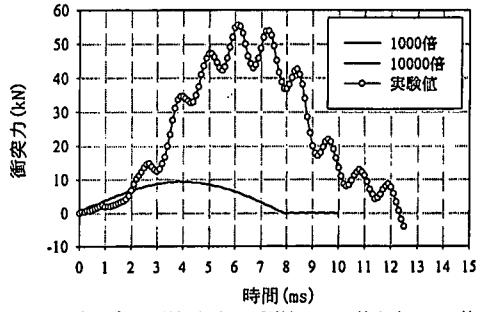
(3) 解析結果(緩衝材がある場合)

a) 衝突力について

緩衝材がある場合は、柔なものと剛なものの接触問題になるため、まずは衝突パネの剛性について検討を行った。本実験で用いた硬度30のゴムの軸方向剛性は 4.0×10^6 (N/m)であり、解析でのH型鋼の軸方向剛性は 2.0×10^{10} (N/m)である。よって衝突パネの剛

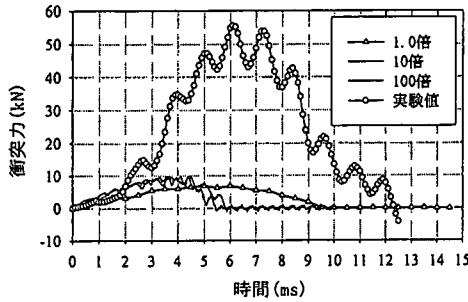


(a) 衝突パネの剛性がゴムの剛性の1倍から100倍の場合

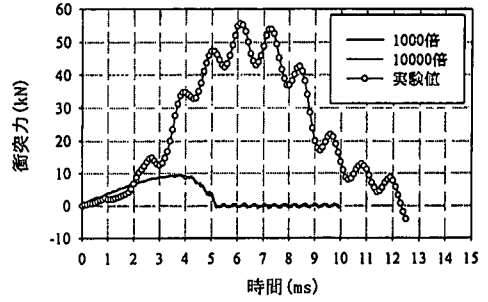


(b) 衝突パネの剛性がゴムの剛性の1000倍から10000倍の場合

図-18 ゴムの復元力が線形の場合の時間-衝突力関係 (硬度30, $v=1.0$ (m/s))



(a) 衝突パネの剛性がゴムの剛性の1倍から100倍の場合



(b) 衝突パネの剛性がゴムの剛性の1000倍から10000倍の場合

図-19 ゴムの復元力が非線形の場合の時間-衝突力関係 (硬度30, $v=1.0$ (m/s))

性はゴムの軸方向剛性の 1, 10, 100, 1000, 10000 倍の 5 種類について解析を行った。つまり衝突パネの剛性は、ゴムの軸方向剛性の値から H 型鋼の軸方向剛性の 2 倍の値の範囲について解析を行っていることになる。図-17 にゴムの復元力特性に関して戻りを考慮した復元力特性を示す。ゴムの初期剛性 (a-b 間) は 4.0×10^6 (N/m) を用い、除荷剛性 (b-c 間) は便宜上、初期剛性の 10 倍とした。このモデルの最小固有周期は 2.2×10^{-3} 秒であったため、解析における時間間隔は 1.0×10^{-7} 秒とした。図-18 にゴムの復元力特性を線形とした場合、被衝突体に作用する時間-衝突力関係を、図-19 にゴムの復元力特性を非線形とした場合、被衝突体に作用する時間-衝突力関係を示す。図中には図-11 の実験結果も示している。図-18, 図-19 では、実験値との比較を行っているため、図中では圧縮力が正となっている。また、図-18, 図-19 ともに衝突パネの剛性が基準剛性の 10 倍から 10000 倍に変化させても解析結果には有意な差異はなく、図中では重なっている。まず、図-18 と図-19 より最大衝突力点まではほぼ一緒であるが、その後、ゴムの復元力特性を非線形とした図-19 の

方がはやく衝突が終わっていることがわかる。緩衝材がない場合と同じように解析による時間-衝突力関係より H 型鋼に作用した力積の大きさを求めると衝突パネの剛性に関わらず、図-18 では約 48 (N·s) となり、衝突前に衝突体が持っている運動量 48.9 (N·s) と等しい。図-19 では、衝突パネの剛性がゴムの軸方向剛性と等しいときは 41 (N·s)、そのほかの場合は 31 (N·s) であった。つまり緩衝材がある場合でも、解析では H 型鋼に作用する力積は衝突前の運動量に等しいもしくは小さくなるのに対し、実験では衝突力から求めた力積は衝突前の運動量が保有する運動量の数倍の大きさを有しているため、パネ-質点系モデルで衝突力を推定することは難しい。つまり、ゴムに発生する応力波の影響やゴムと H 型鋼供試体の接触面の影響を考慮できるように、ゴムにおいても多質点系でモデル化するなど、新たなモデル化が必要であると考えられる。

b) 損失エネルギーについて

H 型鋼の減衰定数が損失エネルギーに及ぼす影響が小さいことは緩衝材がない場合の解析で判った。つまり、パネ-質点系で損失エネルギーを表現する

には、図-17 のようにゴムに戻りを考慮した非線形の復元力特性を用いるか、非線形の衝突バネを用いる方法が有効である。ここで重要なのは実験においても運動量保存則が成立していることを確認している。バネ-質点系モデルを用いた解析では運動量保存則が成立するので、損失エネルギーを非線形な履歴性状で正しく評価できれば、衝突後の H 型鋼の速度、すなわち反発係数も適切に評価していることになる。

5. 結論

本研究では、H 型鋼の衝突実験を行い、実験で得られたデータをもとに桁間衝突現象について分析を行った。また現在、一般的に行われている線形の衝突バネを用いたバネ-質点系モデルでの解析はどのような現象を評価しているのかを考察し、実験結果と比較することにより桁間衝突現象に適用できるかどうかについて検討を行った。以下に、本研究で得られた結果を要約する。

- 1) 緩衝材がある場合には運動量保存則が成立することが実験で確かめられた。
- 2) 緩衝材がある場合は、無い場合に比べて損失エネルギーは小さい。
- 3) 軸方向剛性が柔らかい硬度 30 のゴムの方が、硬度 50 のゴムよりも衝突力の低減効果は大きい。
- 4) 硬度 30、硬度 50 のゴムを桁遊間に設置することにより衝突力から求めた力積は、衝突前に H 型鋼が持っていた運動量よりも大きくなる。
- 5) 解析における衝突力の推定において、緩衝材がある場合、現モデルでは H 型鋼に作用する力積は、衝突前に H 型鋼が保有する運動量に等しいため、実験値をシミュレートすることは難しい。
- 6) 解析における損失エネルギーの推定において、H 型鋼の減衰定数による損失エネルギーはほとんどないことが判った。すなわち、損失エネルギーを考慮するためには、H 型鋼、ゴム、衝突バネのいずれかのバネにおいて非線形性を考慮する手段を用いなければならない。

本研究は、H 型鋼供試体の衝突実験をもとに桁間衝突現象のモデル化に対する基礎的データを収集したが、今回の実験データだけでは、桁間衝突モデルの構築に対して、量的にも質的にも不十分であると考えられる。特に、緩衝材がない場合の実験精度を上げ、さらなる実験を実施すべきであると考えている。

今後、桁間衝突を含めた実橋梁の応答解析を行う

とき、衝突による損失エネルギーを考慮する場合には、衝突バネの非線形化や、運動量保存則が成立することを利用して、衝突する 2 物体の剛性比から反発係数をあらかじめ算定しておく方法などを用いる必要があると考えられる。また、緩衝材がある場合の桁に作用する衝突力を算定する際には、本研究でのバネ-質点系モデルで推測することは難しいと考えられるため、3 次元での解析や応力波の伝播などを考慮できる解析手法を用いる必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 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, 1999.1.
- 2) 西川大介, 目黒公郎: 兵庫県南部地震による阪神高速 3 号線高架橋崩壊被害のメカニズム解析, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集 Vol.2, pp.1017-1020, 1997.7.
- 3) 梶田幸秀, 渡邊英一, 杉浦邦征, 丸山忠明, 永田和寿: 鋼製支承の破損を考慮した連続高架橋の地震時応答性状と落橋防止装置の有効性の検討, 構造工学論文集 Vol.45A, pp.903-914, 1999.3.
- 4) 星恵津子, 川島一彦, 庄司学: 桁間衝突を緩和させるための圧縮側および引張側緩衝装置の有効性に関する研究, 第 3 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.233-236, 1999.12.
- 5) 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, 土木学会論文集, Vol.308, pp.123-126, 1981.4.
- 6) 梶田幸秀, 渡邊英一, 宇都宮智昭, 永田和寿, 津村洋祐: 衝突を考慮した高架橋モデルの振動台実験とそのシミュレーション, 第 3 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.209-216, 2000.1.
- 7) 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および地震応答解析, 日本道路公団試験研究報告, Vol.34, 1997.11.
- 8) 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 53 回年次学術講演会講演概要集, I-B161, pp.322~323, 1998.10.
- 9) 庄司学, 川島一彦, Anat Ruangrassamee, 運上茂樹, 足立幸郎, 長屋和宏: 振動台実験によるゴム製緩衝装置の有効性に関する検討, 第 2 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.427~432, 1998.12.
- 10) 袴田文雄, 伊津野和行: 非線形バネによる衝突問題の解析に関する基礎的検討, 第 3 回地震時保有耐力法に

- 基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.215-220, 1999.12.
- 11) 鈴木真次, 香月智, 石川信隆, 石川芳治, 古川浩平: 鋼球のコンクリート供試体への振り子式衝突実験による局部損失エネルギーとその評価モデルに関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.91-105, 1996.7.
- 12) 喜多龍一郎, 酒巻勝, 小暮幹太, 藤掛一典: 低速度の落錘衝撃模型実験における載荷条件の設定について, 土木学会第 50 回年次学術講演会, pp.1062-1063, 1995.9.
- 13) 伊津野和行, 武野志之歩: 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, 第 3 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.-209-214, 1999.12.
- 14) 渡邊学歩, 川島一彦: 衝突バネを用いた桁間衝突の解析精度, 第 2 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 1998.12.
- 15) 林卓夫, 田中吉之助: 衝撃工学, 日刊工業新聞社, 1988.8.
- (2000. 3. 15 受付)

ASSESSMENT ON MODELING OF POUNDING BEHAVIOR IN GIRDERS OF ELEVATED BRIDGES

Yukihide KAJITA, Yasushi NISHIMOTO, Nobutaka ISHIKAWA,
Satoshi KATSUKI and Eiichi WATANABE

Studied herein is an experimental and analytical assessment on the modeling of pounding behavior in girders of elevated bridges, paying attention to the energy loss and the impact force during the pounding. The effect of rubber shock absorber on the reduction of impact force is also discussed. The pounding of girders is examined experimentally by colliding the two steel specimens each other with relative velocity ranging from 1(m/s) to 3(m/s). Experimental results are compared to those through the response analysis carried out by using the spring-mass-dashpot model including the linear spring for the pounding. It is recommended that a nonlinear spring for pounding should be developed in order to consider properly the energy loss during the pounding.