

ゴム製緩衝材による桁間衝突時における緩衝効果と その評価モデルに関する基礎的研究

THE FUNDAMENTAL STUDY ON THE EFFECT AND THE EVALUATED MODEL OF A RUBBER-TYPE
SHOCK ABSORBER IN POUNDING GIRDERS

梶田幸秀*, 西本安志**, 石川信隆***, 香月智****, 渡邊英一*****

*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)

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

***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)

****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)

*****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)

キーワード: 桁間衝突、ゴム製緩衝材、反発係数、エネルギー損失
(pounding girders, shock absorber, reaction factor, energy loss)

1. はじめに

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、上部構造の応答変位が増大するという性質を有しており、その結果、桁間衝突や桁と橋台・落橋防止壁などの衝突の発生頻度が大きくなると予想されている。桁間衝突や桁と橋台・落橋防止壁などの衝突時には衝撃的に大きな力が発生すると考えられるため、ゴムなどの緩衝材を設置することにより桁端部、橋台、落橋防止壁などの損傷を防ぐことが検討されており、緩衝材を設置することによる緩衝効果についての研究が行われている。現在までに桁と落橋防止壁の衝突については、窪田ら¹⁾がガイドレールを用い、重錘(おもり)をコンクリート製の壁(落橋防止壁)に衝突させる実験を行っており、また越峠ら²⁾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。これらの実験から、落橋防止壁にゴム製緩衝材を取りつけることにより、落橋防止壁に作用する力の低減を確認している。一方、桁間衝突については、庄司ら³⁾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。窪田らの研究¹⁾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の検討がなされて

いるが、桁間衝突に対しては未だ検討が行われていない。

そこで本研究では、ガイドレール上に橋桁に見立てた2本のH型鋼を設置することにより桁間衝突の再現実験を試み、種々の緩衝材を桁間に設置した場合のH型鋼に作用する衝突力や衝突前後のH型鋼の速度などについて測定を行った。さらに実験で得られた桁間衝突のモデル化のための基礎的なデータをもとにバネ-質点系モデルを用いることにより、桁間衝突現象をシミュレートできるか否かの検討を行った。

2. 桁間衝突実験

2.1 実験概要

本実験は、写真-1に示すような動的物性評価装置を使用した。本実験装置は、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とにより載荷ラムを最大3(m/s)の速さで15(cm)押し出すことができる。実験は、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本並べ、1本は静止させた状態にしておき、もう1本は載荷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低減させ、衝突時において摩擦力によるエネルギー損失を極力抑えている。なお、本実験では、載荷ラムにより一定速度

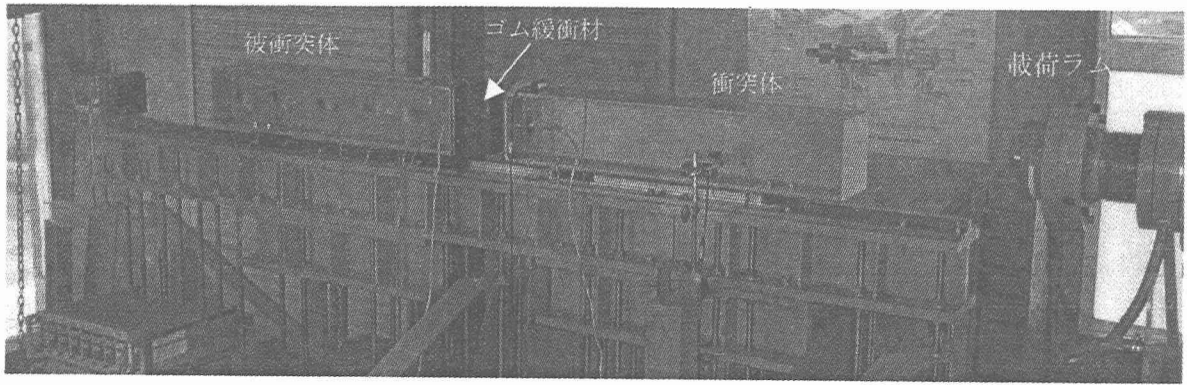


写真-1 実験風景

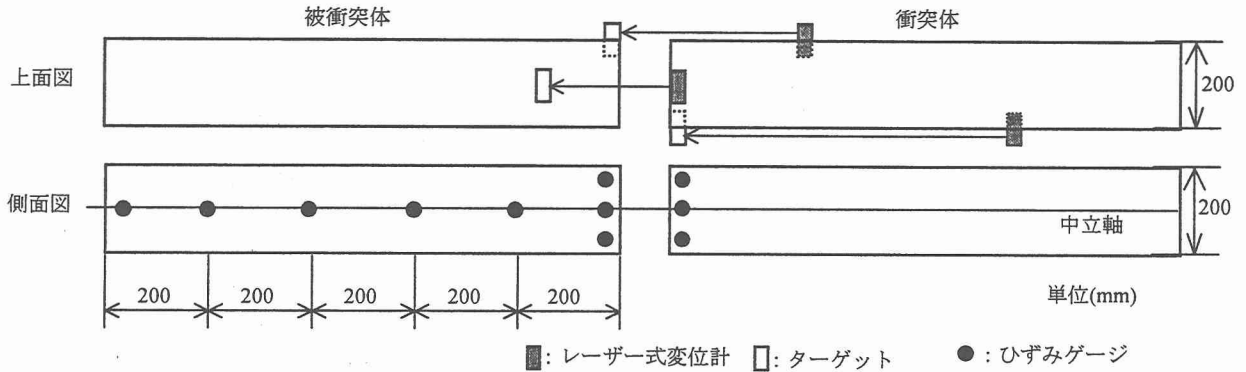


図-1 計測装置取り付け位置

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び、被衝突体の衝突面に種々の緩衝材を取りつけている。

2.2 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)、重量 489(N)のものであり、この H 型鋼の両端に厚さ 4.5(mm)の鉄板を取りつけた。これは、ゴム供試体を取りつけるためと衝突力を H 型鋼断面全体に作用させるためである。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)) の総ゴムならびに硬度 50 の総ゴムの中に繊維を 3 枚埋設した積層繊維補強ゴム (密度 1540.7(kg/m³)) を用意した。形状については、いずれも縦・横 150(mm)、厚さ 30(mm)の直方体形状である。今回の実験は、重力の影響が非常に小さい試験であるため相似則としては Replica 則を適用できると考えられる。Replica 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。伊津野ら⁴⁾は、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)と報告されているため、衝突体に与える初速度として 1.0(m/s)、2.0(m/s)、3.0(m/s)の 3 種類の初速度を与えている。

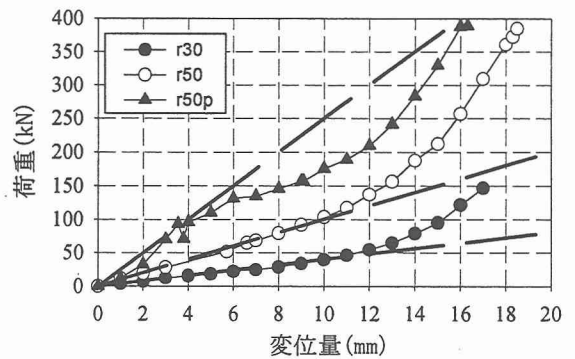


図-2 静的試験結果

2.3 計測項目

計測項目は衝突体・被衝突体の移動距離、H 型鋼間の相対距離、衝突体の衝突面でひずみならびに被衝突体の衝突面と被衝突体全体のひずみである。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計測を行った。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-1 に示す。なお、サンプリング時間間隔は、衝突体に

表-1 実験結果 (計測された速度)

衝突前の入力速度	緩衝材の種類	衝突後の衝突体の最大速度 V_1 (m/s)	衝突後の被衝突体の最大速度 V_2 (m/s)
v=1.0(m/s)	none	0.189	0.784
	r30	0.150	0.947
	r50	0.146	0.928
	r50p	0.199	0.879
v=2.0(m/s)	none	0.392	1.645
	r30	0.212	2.135
	r50	0.273	2.073
	r50p	0.361	1.807
v=3.0(m/s)	none	0.410	2.407
	r30	0.344	2.646
	r50	0.359	2.632
	r50p	0.453	2.290

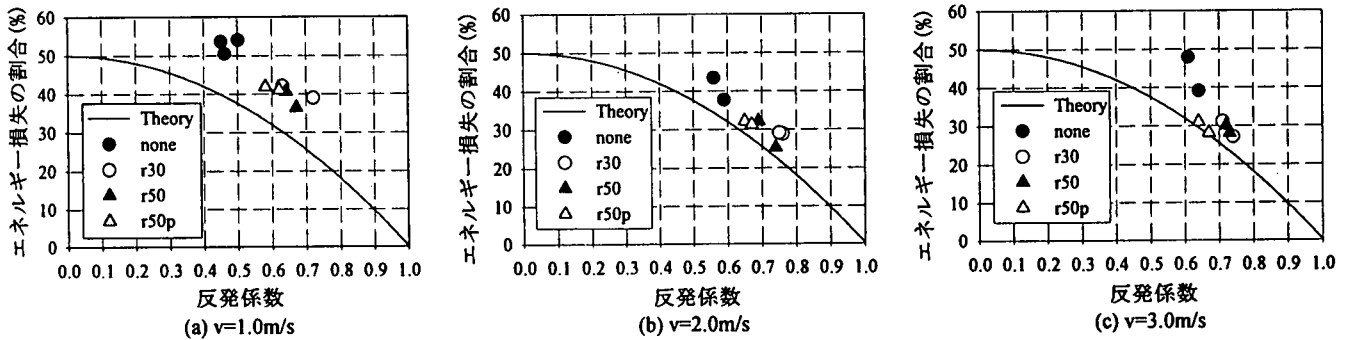


図-3 反発係数とエネルギー損失の割合

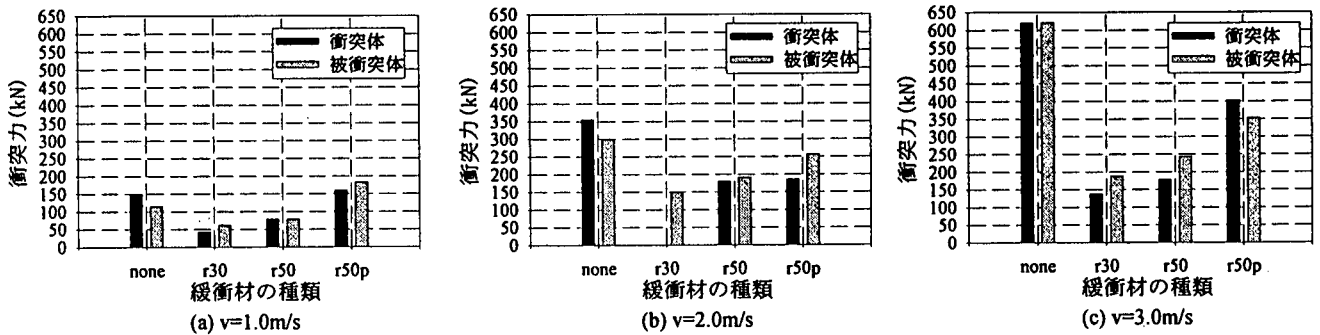


図-4 H型鋼に作用する衝突力

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)とした。

2.4 実験結果および考察

(1) 緩衝材の力学特性

桁間衝突実験の前に、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)用アムスラ一試験機を用い、供試体(緩衝材として用いたゴム)の厚さの 60%まで載荷した。静的圧縮実験の結果を図-2 に示す。ここで硬度 30、50 の総ゴムをそれぞれ r30、r50 と表し、積層繊維補強ゴムは r50p と表している。図-2 中の鎖線は、次章の解析で用いる初期剛性の値を示しており、硬度 30 総ゴムのときは 4.0×10^6 (N/m)、硬度 50 総ゴムのときは 1.0×10^7 (N/m)、積層繊維補強ゴムは 2.5×10^7 (N/m)である。

(2) 動摩擦係数の算定

実験結果の考察の前に、動摩擦係数の値を求める

ことにした。衝突体の初速度が 1(m/s)のときには被衝突体は反力壁に衝突する前に停止したため、衝突後の被衝突体の速度と停止するまでの距離より動摩擦係数を算定した。算定式を式(1)に示す。式(1)より算定した結果、動摩擦係数は平均で 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。なお、ガイドレールの動摩擦係数は速度による変化を無視できると考え、初速度 1(m/s)の時の場合に求めた動摩擦係数を初速度 2(m/s)、3(m/s)のときにもそのまま適用した。

(3) 衝突後の速度

レーザー式変位計により計測された相対変位を微

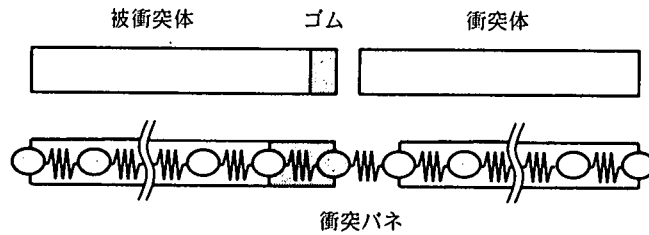


図-5 パネー質点系モデル

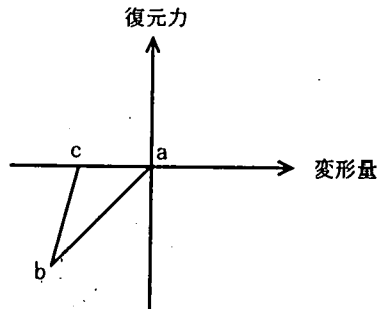


図-6 ゴムの復元力モデル

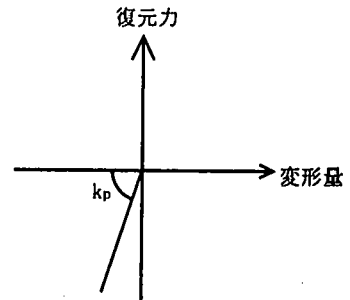


図-7 衝突バネの復元力モデル

分することにより衝突後の衝突体の最大速度 V_1 、被衝突体の最大速度 V_2 を表-1 のように求めた。これより緩衝材を入れることにより被衝突体の衝突後の最大速度が大きくなっていることがわかる。

(4) 種々の緩衝材による反発係数とエネルギー損失

今回の実験においては、運動量保存則ならびに反発係数はそれぞれ式(2)、(3)のように表される。

$$mv = mV_1 + (m + m')V_2 \quad (2)$$

$$e = -\frac{V_1 - V_2}{v} = \frac{V_2 - V_1}{v} \quad (3)$$

ここで m : H 型鋼の質量、 m' : 緩衝材の質量、 v : 衝突前の衝突体の初速度、 V_1 : 衝突後の衝突体の最大速度、 V_2 : 衝突後の被衝突体の最大速度、 e : 反発係数である。

また式(4)のようにエネルギー損失の割合を定義する。

$$\Delta E = \frac{mv^2 - \{mV_1^2 + (m + m')V_2^2\}}{mv^2} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 ΔE : エネルギーの損失の割合である。式(2)と式(3)を式(4)に代入し、式展開を行うことにより、運動量保存則が成立するときの反発係数とエネルギー損失の割合の関係式である式(5)が導かれる。

$$\Delta E = \frac{2m^2 + 3mm' + m'^2}{4m^2 + 4mm' + m'^2} (1 - e^2) \times 100 \quad (5)$$

図-3 に、各緩衝材において実験ケース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-3 の中の Theory とは式(5)を表す曲線であり、緩衝材がない場合を none、硬度 30 の総ゴムを r30、硬度 50 の総ゴムを r50、積層繊維補強ゴムを r50p 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。緩衝材を入れた場合は、初速度 1(m/s) のときは若干曲線よりも上にあるが、運動量保存則が成立していると考えられる。また、反発係数は緩衝材がない場合は 0.5~0.6 であるのに対し、緩衝材を入れると 0.6~0.7 となり、反発しやすくまた衝突時に失われるエネルギー量が小さくなることがわかる。

(5) H 型鋼に作用する衝突力について

H 型鋼に作用する衝突力については、ひずみゲージの値から式(6)を用いて求めている。

$$F = E_s \cdot A \cdot \epsilon \quad (6)$$

ここで、 F : H 型鋼に作用する力、 E_s : H 型鋼の弾性係数 ($=2.06 \times 10^{11} (\text{N/m}^2)$)、 A : H 型鋼の断面積 ($6.353 \times 10^{-3} (\text{m}^2)$)、 ϵ : 計測されたひずみである。図-4 に各実験ケースにおける緩衝材の種類による衝突体に作用する最大衝突力と被衝突体に作用する最大衝突力を示す。なお、図-4 で H 型鋼に作用する衝突力が 600kN を越えているものは、ひずみゲージの計測範囲 500 μ を越えているものであり、実際に H 型鋼に作用する力は 600kN よりも大きい。図-4 より緩衝材による H 型鋼に作用する力の低減が明らかにみられる。また注目すべき点は、緩衝材がある場合は衝突体に作用する衝突力よりも被衝突体に作用する衝突力の方が大きい。これは緩衝材を介した重錘落下実

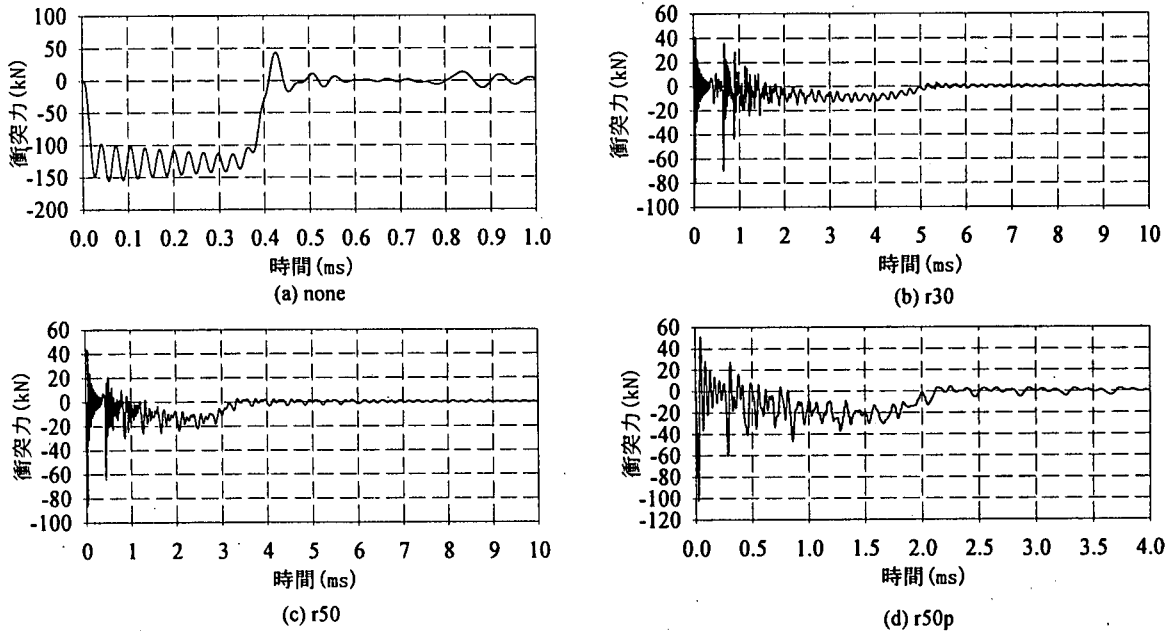


図-8 衝突体に作用する衝突力 (v=1(m/s))

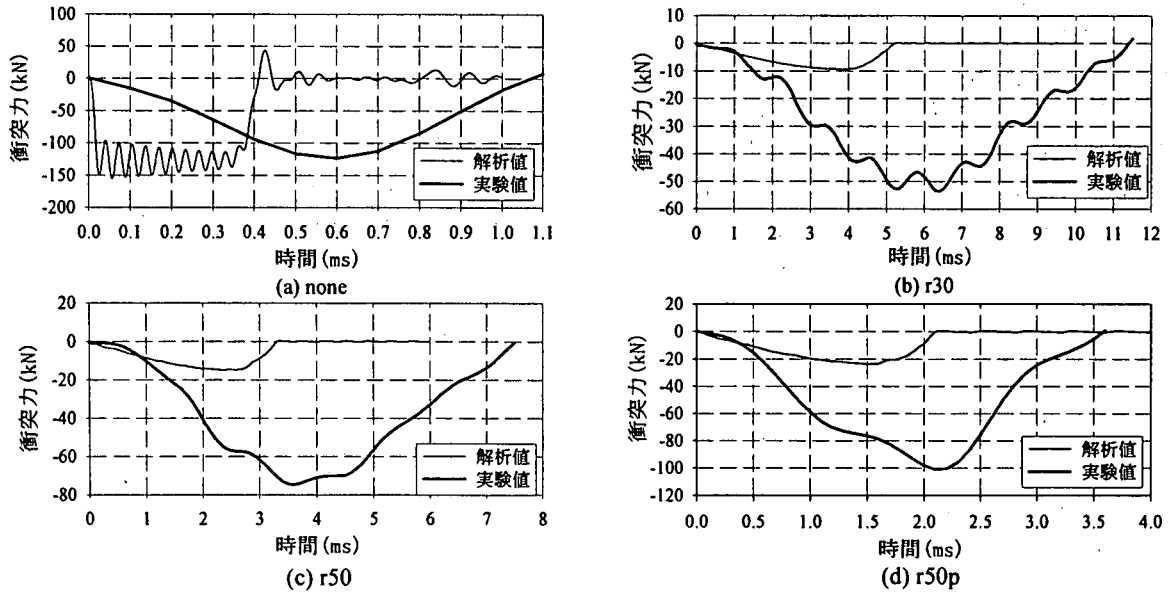


図-9 被衝突体に作用する衝突力 (v=1.0(m/s))

験で重錘衝撃力よりも伝達衝撃力の方が大きくなる現象と一致しているものと考えられる⁵⁾。

3. 実験結果のシミュレーション

3.1 はじめに

ここでは、桁間衝突問題を簡単なバネ-質点系モデルでも表現できるかどうかについて第2章の実験結果をシミュレートすることにより検証したものである。本解析は、モデルの適用性についての検討を主目的としているため、初速度 1.0(m/s)の場合についてのみ行っている。図-5に解析に用いたバネ-質点系モデルを示す。

3.2 解析条件

解析においては、H型鋼の減衰定数を3%、ゴムの復元力特性を図-6に示すとおり戻りを考慮した形にした。ゴムの初期剛性(a-b間)は2.4(1)に示した値を用い、除荷剛性(b-c間)は便宜上、初期剛性の10倍としている。また図-7に衝突バネの復元力特性を示している。解析においては、H型鋼を15分割、ゴムは1分割とし、合計33質点として計算している。衝突バネの剛性は、渡邊らの研究⁶⁾を参考に式(7)で求められる衝突体の軸剛性と同一値を用いた。

$$k_p = \frac{nEA}{l} \quad (7)$$

ここで、 k_p : H型鋼(衝突体)の軸方向剛性、 n :

表-2 エネルギー損失の割合

緩衝材の種類	エネルギー損失の割合(解析値)	解析値/実験値
なし	0.0	0
硬度 30	45.3	1.12
硬度 50	45.3	1.18
積層繊維補強ゴム	45.6	1.10

分割数、 E : H型鋼の弾性係数 ($=2.06 \times 10^{11} \text{ (N/m}^2\text{)}$)、 A : H型鋼の断面積 ($6.353 \times 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$)、 l : H型鋼の長さ ($=1.0 \text{ (m)}$) である。本解析では、H型鋼を15分割しているため、 k_p の値は $2.0 \times 10^{10} \text{ (N/m)}$ である。なお、衝突バネの剛性を変化させて解析を行ったが、衝突バネの剛性を衝突体の軸剛性の0.1倍から10倍の間で変化させても解析結果に違いが見られないことを確認している。解析における時間間隔は 1.0×10^{-7} 秒とした。

3.3 計算結果

計算結果として、緩衝材がない場合、硬度 30 総ゴム、硬度 50 総ゴム、積層繊維補強ゴムを挟んだ場合に衝突体に作用する衝突力を図-8に、被衝突体に作用する衝突力を図-9に示す。図-9では実験値との比較を行っている。また、表-2に解析で得られたエネルギー損失の割合と解析値と実験値との比率を示す。図-8より衝突体に作用する衝突力は大きく振動しており、どの値をH型鋼に作用する力と定義するかは難しい。図-9より被衝突体に作用する衝突力は、緩衝材がないときは、解析値の振動の中心値と実験値はほぼ一致しているが、緩衝材があるときは、解析値は実験値に比べると極めて小さな値を示していることがわかる。また表-2より緩衝材がない場合では、解析においてエネルギー損失が行われていない。つまりH型鋼の材料減衰によるエネルギー損失はほとんどないことがわかる。緩衝材がある場合には、エネルギー損失の割合は実験値よりも少し大きくなっている。緩衝材がある場合については実験において運動量保存則が成立することが確認されている。解析においても運動量保存則が成立することを確認しているので、ゴムの戻りの剛性を適切に評価すればエネルギー損失については解析により求めることができると考えられる。

4. 結論

本研究では、桁間衝突の再現を目的とした実験を

行い、実験で得られたデータをもとに桁間衝突現象をバネ-質点系モデルで解析できるかどうかの適用性について検討を行った。以下に、本研究で得られた結論を箇条書きにて示す。

- 1) 実験より緩衝材がある場合には運動量保存則が成り立つ。
- 2) 緩衝材によりH型鋼に作用する衝突力は低減できる。また今回のように片側のH型鋼に緩衝材をつけた場合には2本のH型鋼に作用する力は同じではない。
- 3) 緩衝材がない場合にはエネルギー損失や衝突継続時間をバネ-質点系モデルで評価することは難しい。
- 4) 緩衝材がある場合には、ゴムの非線形性を考慮することによりエネルギー損失を表現できる。これより、実験において運動量保存則が成立していることからバネ-質点系モデルでもエネルギー損失を推定することは可能である。しかしながら、被衝突体に作用する衝突力は実験値よりはるかに小さな値を示す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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、1999. 12.
- 5) 園田佳巨、佐藤紘志、石川信隆、榎谷浩：落石墜工への落石のエネルギー伝達に関する基礎的考察、土木学会論文集、No. 446/I-19、pp. 147-155、1992. 4.
- 6) 渡邉学歩、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.