

# インピーダンス法による桁間衝突のモデル化 とゴム材の緩衝効果について

近藤博<sup>1</sup>・木村修一<sup>2</sup>・鈴木勝也<sup>3</sup>・本間重雄<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117)

(E-mail:kondohr@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp)

<sup>2</sup>学生会員 工修 東海大学大学院 博士課程後期 工学研究科土木工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>学生会員 東海大学大学院 博士課程前期 工学研究科土木工学専攻(同上)

<sup>4</sup>正会員 Dr.Eng. 東海大学教授 工学部土木工学科 (同上)

兵庫県南部地震では、桁間衝突による被害を受けた橋が多数あり、そのメカニズムの解明が求められている。本研究は、桁モデルとして、波動の挙動が明確な弾性棒を採用し、エネルギー収支を明確するために桁モデルをスチール線で釣り、桁-緩衝材系の衝突実験を行ない、ゴム緩衝材の緩衝効果と桁間衝突現象のインピーダンス法によるモデル化について検討したものである。この結果、本実験方法により、ゴム緩衝材の緩衝効果を検討するために重要となる損失エネルギーが精度よく推定できることを示した。また、インピーダンス法により桁間衝突時の発生応力を推定できることを示すとともに、提案モデルで桁長が大きくなると、衝突応力が大きくなることを確認した。

**Key Words :** *impact, pounding girders, shock absorber, energy loss, impedance*

## 1. はじめに

兵庫県南部地震では、橋梁の桁同士の衝突により被害を受けた橋が多数あった。桁間衝突によって生じる衝撃力は大変大きく、接触部において桁の損傷を生じるだけでなく、支承部やさらには下部構造の損傷につながることも想定される。

桁間衝突による被害の軽減のために、可逆的大変形ときわめて低い弾性率を持つゴムが緩衝材として利用される機会が多くなり、ゴム材の緩衝効果や桁間衝突現象のメカニズム解明のための研究が多くの機関で行われている<sup>1),2),3),4),5),6)</sup>。

島ノ江<sup>2)</sup>は、緩衝装置は衝撃的な力を受けるので、ゴム材の高速変形特性を知る必要があるとの観点から、コンクリート製のブロックに取り付けたゴム緩衝材に台車を衝突させる方法でゴム緩衝材の動的力学特性に関して実験的に検討している。しかし、ゴム緩衝材のエネルギー吸収の取り扱いで、コンクリート製ブロックに入射するエネルギーを考慮していないところに問題がある。

梶田<sup>3)</sup>は、H型鋼供試体にゴム緩衝材を設置し

て桁間衝突実験を行い、供試体の種々の挙動を測定し、衝突応力やゴム材の緩衝効果について検討した。その結果、バネ-質点系モデルで、桁間衝突での衝突力を推定するのは難しく、新たなモデル化が必要と述べている。また、渡邊・川島<sup>4)</sup>は、衝突バネを用いたバネ-質点系モデルで、弾性棒の衝突現象についての再現性について検討している。その結果、衝突バネの剛性が現象の再現性に大きく影響するとともに、適当な衝突バネの剛性が定まった場合でも厳密解のまわりに小刻みに振動すると述べている。

桁間衝突は、振動・波動現象である。よって、小さな模型では、実現象の衝突応力の推定が難しい。そこで、桁間衝突の精度の良い計算モデルの早急な確立が望まれている。

本研究は、このような問題を精度よく検討するためには、波動特性が明確な桁供試体を採用する必要があるとの立場から、桁モデルとしてスチール製丸棒を採用した。また、装置内のエネルギー収支を明確にするために、桁モデルを鋼線で釣り、振り子スタイルで、桁-緩衝材系の衝突実験を行った。そして、得られた観測波形に2点ゲージ解析法<sup>7),8)</sup>を適

用して、衝突継続中の桁供試体の挙動を明らかにするとともに、ゴム緩衝材の緩衝効果(衝突応力とエネルギー損失率等)と桁間衝突現象のインピーダンス法<sup>9), 10), 11)</sup>によるモデル化について検討したものである。

## 2. 1次元の波動

### (1) 2点ゲージ法による応力波解析理論<sup>7), 8)</sup>

2点ゲージ応力波解析法(以下、2点ゲージ法と記す)は、1次元の波動現象に、1次元波動理論を適用して進行波 $\sigma_f$ と後退波 $\sigma_g$ に分離する方法である。

図-1は、桁供試体(被衝突体)における2点ゲージ応力波解析モデルを示したものである。桁供試体の衝突面から $L_1$ の位置に第1ゲージ点を、衝突面から $L_2$ の位置に第2ゲージ点を設ける。衝突体の衝突により被衝突体に入射された応力波が波動伝播速度 $c$ で伝播し、被衝突面や衝突面で反射する場合を考える。

#### a) 応力波の分離

1次元波動理論の重ね合わせの原理から、時刻 $t$ における第1ゲージ点の応力 $\sigma(L_1, t)$ と第2ゲージ点の応力 $\sigma(L_2, t)$ は、次のように表される。

$$\sigma(L_1, t) = \sigma_f(L_1, t) + \sigma_g(L_1, t) \quad (1)$$

$$\sigma(L_2, t) = \sigma_f(L_2, t) + \sigma_g(L_2, t) \quad (2)$$

また、時刻 $t = t$ に第1ゲージ点を通過する進行波 $\sigma_f(L_1, t)$ は、時刻 $t = t + (L_1 - L_2)/c$ に第2ゲージ点に到達する。したがって、第2ゲージ点を通過する進行波 $\sigma_f(L_2, t)$ は、次のように表すことができる。

$$\sigma_f(L_1, t) = \sigma_f(L_2, t - T_{12}) \quad (3)$$

ここに、 $T_{12}$ は応力波が点 $L_1$ から点 $L_2$ まで伝播するのに必要な時間であり、次式で与えられる。

$$T_{12} = (L_2 - L_1)/c \quad (4)$$

同様に、第1ゲージ点と第2ゲージ点の後退波についても、次の関係が成り立つ。

$$\sigma_g(L_2, t) = \sigma_g(L_1, t + T_{12}) \quad (5)$$

したがって、第1ゲージ点の進行波と後退波は次式で与えられる。

$$\sigma_f(L_1, t) = \sigma(L_1, t) - \sigma(L_2, t - T_{12}) - \sigma_f(L_1, t - 2T_{12}) \quad (6)$$

$$\sigma_g(L_1, t) = \sigma(L_2, t - T_{12}) - \sigma_f(L_1, t - 2T_{12}) \quad (7)$$

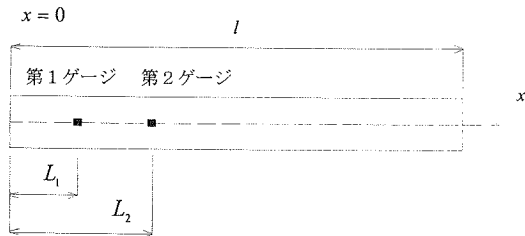


図-1 応力波解析モデル

衝突体が衝突する以前には、被衝突体は静止している。すなわち、衝突体と被衝突体が衝突した時点 $t=0$ とすれば、 $t=0$ の初期条件として、 $\sigma(L_1, 0) = 0$ 、 $\sigma(L_2, 0) = 0$ 、 $\sigma_f(L_1, 0) = 0$ である。このような初期条件がわかっているため、式(6)と式(7)を用いることにより、第1ゲージ点で測定した応力波形 $\sigma(L_1, t)$ と第2ゲージ点で測定した応力波形 $\sigma(L_2, t)$ から、第1ゲージ点の進行波と後退波を分離して求めることができる。以上のように求めた $\sigma_f(L_1, t)$ と $\sigma_g(L_1, t)$ から、桁供試体中の任意点の応力、速度、変位を算定することが可能となる。

#### b) 桁供試体中の任意点における応力

桁供試体中の任意点( $x = x$ )のある時刻 $t$ での応力は、重ね合わせの原理により、次式で表される。

$$\sigma(x, t) = \sigma_f(x, t) + \sigma_g(x, t) \quad (8)$$

また、 $\sigma_f(x, t)$ と $\sigma_g(x, t)$ は第1ゲージ点における進行波および後退波を用いて、次のように表すことができる。

$$\sigma_f(x, t) = \sigma_f(L_1, t - T_{1x}) \quad (9)$$

$$\sigma_g(x, t) = \sigma_g(L_1, t + T_{1x}) \quad (10)$$

ここに、 $T_{1x} = (x - L_1)/c$ である。

したがって、式(8)は次のように表せる。

$$\sigma(x, t) = \sigma_f(L_1, t - T_{1x}) + \sigma_g(L_1, t + T_{1x}) \quad (11)$$

さらに、衝突端( $x=0$ )の応力 $\sigma(0, t)$ は、式(11)において $x=0$ とすることにより、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma(0, t) &= \sigma_f(0, t) + \sigma_g(0, t) \\ &= \sigma_f\left(L_1, t + \frac{L_1}{c}\right) + \sigma_g\left(L_1, t - \frac{L_1}{c}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

衝突端応力の時間変化は、衝突体から被衝突体に伝わる打撃エネルギーを算定する上で重要なものとなる。

### c) 桁供試体中の変位速度と変位

応力と変位速度の間には、波動方程式の解から、 $\sigma_f = \rho c v_f$  と  $\sigma_g = -\rho c v_g$  の関係が成立する(ここに、 $\rho$  は桁供試体の密度である)。よって、桁供試体中の任意点 ( $x = x$ ) のある時刻  $t$  での変位速度  $v$  は次のように表すことができる。

$$v(x, t) = \frac{1}{\rho c} \{ \sigma_f(x, t) - \sigma_g(x, t) \} \quad (13)$$

変位  $u$  は、変位速度  $v$  を時間  $t$  について積分することにより、次式で与えられる。

$$\rho u(x, t) = \frac{1}{\rho c} \int_0^t \{ \sigma_f(x, t) - \sigma_g(x, t) \} dt \quad (14)$$

また、衝突面の変位速度および変位は、式(13)、(14)に、 $x=0$ を代入することにより求めることができる。

### (2) 波動エネルギー

弾性棒中を波動が伝播すると、波にともなって波動エネルギーが移動する。波動伝播前に、 $x$ にあった点が時刻  $t$  に  $u(x, t)$  だけ移動したとすると、単位体積あたりの波動による運動エネルギー  $U_k$  とひずみエネルギー  $U_e$  は、それぞれ次式で表せる。

$$U_k = \frac{1}{2} \rho \left[ \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \right]^2 \quad (15)$$

$$U_e = \frac{1}{2} E \left[ \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right]^2 \quad (16)$$

ここに、 $E$  は弾性棒の弾性係数である。

一方向に進む波では、ひずみと変位速度の関係は  $\varepsilon = v/c$  であるので  $U_k = U_e$  となる。よって、単位体積あたりの波動エネルギーは次式で表せる。

$$\begin{aligned} U(x, t) &= U_k + U_e \\ &= E \left[ \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right]^2 \end{aligned} \quad (17)$$

したがって、単位面積を単位時間に通過する波動エネルギー  $J$  は次式で表せる。

$$\begin{aligned} J(x, t) &= cU(x, t) \\ &= Z_s \left[ \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \right]^2 \end{aligned} \quad (18)$$

ここに、 $Z_s (= \sqrt{E\rho})$  は媒質の音響インピーダンスといい、式からも明らかなように、媒質の波を伝える能力を示している。

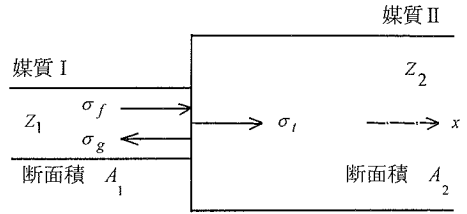


図-2 境界での反射と透過

## 3. インピーダンス法

### (1) 2種の媒質の境界での反射と透過

桁-緩衝材系の問題をインピーダンス法で扱うには、2種の媒質での境界条件について解く必要がある。

図-2に示すような、機械インピーダンス  $Z (= AE/c$ , ここに、 $A$  は媒質の断面積である) の異なる媒質 I, II の境界での応力波の伝播について考察する。媒質 I の機械インピーダンスを  $Z_1$ 、媒質 II の機械インピーダンスを  $Z_2$  とする。媒質 I を  $x$  軸の正方向に進む進行波  $\sigma_f$  が境界面に達すると、その一部は反射し  $x$  軸の負方向に後退波  $\sigma_g$  として媒質 I を、一部は境界面を通して透過波  $\sigma_t$  として媒質 II の中に伝わっていく。この境界では力が釣合うとともに変位速度が等しいので次式の関係が成立する。

$$A_1(\sigma_f + \sigma_g) = A_2\sigma_t \quad (19)$$

$$v_f + v_g = v_t \quad (20)$$

式(19)に応力と変位速度の関係を代入して整理すると次のようになる。

$$Z_1(v_g - v_f) = Z_2v_t \quad (21)$$

式(20)と式(21)から

$$v_g = \frac{(Z_1 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2)} v_f \quad v_t = \frac{2Z_1}{(Z_1 + Z_2)} v_f \quad (22)$$

となる。式(22)に変位速度と応力の関係を代入すると、

$$F_g = -\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} F_f \quad F_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} F_f \quad (23)$$

となる。ここで、 $F (= A\sigma)$  は力である。

進行波と後退波、透過波との力の比を

$$\alpha = -\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (24)$$

$$\beta = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (25)$$

とおき、 $\alpha$ を反射係数、 $\beta$ を透過係数と呼ぶ。

$Z_1 = Z_2$ のとき、式(22)、(23)から

$$v_g = 0, \quad v_t = v_f, \quad F_g = 0, \quad F_t = F_f \quad (26)$$

となり、反射波は発生せず、波動は全て境界を通過することになる。また、 $Z_2 = 0$ のときは、

$$v_g = v_f, \quad v_t = 2v_f, \quad F_g = -F_f, \quad F_t = 0 \quad (27)$$

となり、媒質IIがない場合は境界面が2倍の速さで変位するので、圧縮波が引張波に変換し、後退することを意味している。

## (2) インピーダンス法<sup>9), 10)</sup>

桁-緩衝材系のような、波動が多重反射するような場合の検討には、音響管の解析に利用されているインピーダンス法が有効である。図-3(a)に示すように、桁-緩衝材系を多数の要素が接続しているものと考え、その特性は各要素内の波動伝播時間と、 $i$ 番目と $i+1$ 番目の境界の反射係数 $\alpha$ によって表すことができる。いま、要素 $N_i$ の長さを $l_i$ 、波動伝播速度を $c_i$ 、機械インピーダンスを $Z_i$ とする。さらに、要素 $N_{i+1}$ の機械インピーダンスを $Z_{i+1}$ とする。これらを用いると、波動伝播時間 $\Delta t_i$ は次式で表せる。

$$\Delta t_i = \frac{l_i}{c_i} \quad (28)$$

また、要素 $N_i$ と要素 $N_{i+1}$ の間の境界面での反射係数 $\alpha_i$ は、式(24)から次のように表すことができる。

$$\alpha_i = \frac{-Z_i + Z_{i+1}}{Z_i + Z_{i+1}} \quad (29)$$

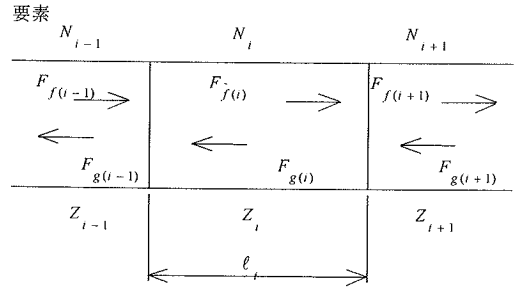
また、反射係数を用いると、要素の両境界面での弾性波の反射と透過の状況は図-3(b)のように表現できる。

さらに、時刻 $t$ における要素内 $N_i$ での進行波と後退波をそれぞれ $F_{f(t)}$ 、 $F_{g(t)}$ とすると、時刻 $t + \Delta t_i$ のときの進行波と後退波はそれぞれ次のようになる。

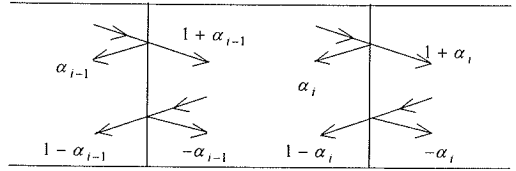
$$F_{f(t)}(t + \Delta t_i) = F_{f(t)}(t)(1 + \alpha_{i-1}) - F_{g(t)}(t)\alpha_{i-1} \quad (30)$$

$$F_{g(t)}(t + \Delta t_i) = F_{g(t)}(t)(1 - \alpha_i) + F_{f(t)}(t)\alpha_i \quad (31)$$

式(30)と式(31)を重ね合わせたものが、要素 $N_i$ での時刻 $t + \Delta t_i$ における力(挙動)を示したものと



(a) 要素モデルと応力波



(b) 境界面での反射と透過

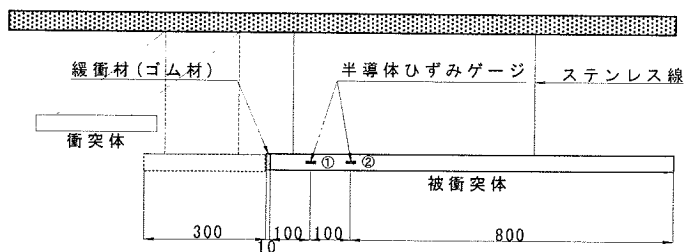
図-3 要素モデルと弾性波の挙動

なり、このようにして各要素に生じる、力(挙動)-時間関係を求める手法をインピーダンス法と呼ぶ。

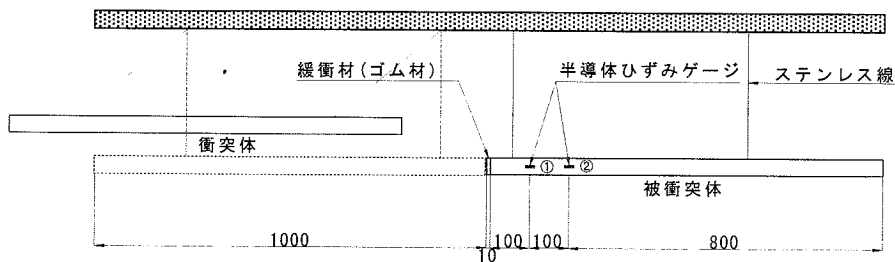
## 4. 実験装置と方法

図-4は、実験装置の概要を示したものである。桁のモデルには直径25mmのスチール製丸棒(以下、桁供試体と記す)を採用した。桁供試体をステンレス線で吊り下げ、衝突体を振り子スタイルで被衝突体に衝突させる方式を採用した。これは、桁供試体に生ずる弾性波に与える周辺摩擦の影響を排除するためである。また、被衝突体の衝突面から10mmと20mmの位置に応力波測定と2点ゲージ法解析に用いる半導体ゲージを、曲げの影響を排除するために対象に貼付しブリッジを組んだ。応力波のサンプリングタイムは、緩衝材を設置しない実験では $1\mu s$ 、緩衝材を設置した実験では $5\mu s$ でロガーステーションを用いて収録・処理した。

図-4(a)は、実験方法の検証に採用したもので、衝突体の長さが300mm、被衝突体の長さが1000mmとなっている。これは、両者の長さを同一にすると、反対面(非衝突面)からの弾性波の回り込みにより、正確な波長(衝突体と被衝突体の接触時間)が測定波形に現れないからである。



(a) 検証実験装置(実験装置A)



(b) 桁間衝突実験装置(実験装置B)

図-4 実験装置の概要

図-4(b)は、桁間衝突の現象解明に用いたもので、衝突体の長さが1000mmで、被衝突体と同一の長さになっている。衝突実験は緩衝材無しの場合と、緩衝材を取り付けた実験を行った。用いたゴム製緩衝材は、直径25mm、厚さ10mmで硬度30と硬度50の2種である(硬度は、ダイヤモンド半球を先端に付けたハンマを落下させたときの、反発する高さに比例する量である)。

兵庫県南部地震の上部構造の応答速度は2.0m/s程度になると報告<sup>2)</sup>されている。よって本実験は、衝突体を所定の高さから自由落下させて、衝突速度1.0m/sと2.0m/sの2段階で実施した。

図-5は、緩衝材の静的载荷試験(载荷速度1mm/min)での応力-ひずみ関係と、高速载荷装置を用いて、载荷速度1m/sでの応力-ひずみ関係を示したものである。図から、ゴムの変形特性は载荷速度の影響を受けることがわかる。

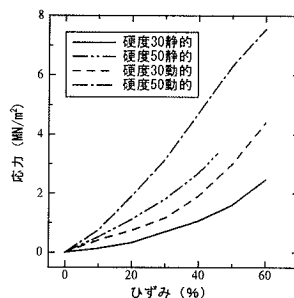


図-5 緩衝材の応力-ひずみ曲線

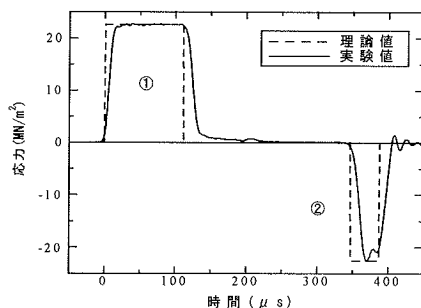


図-6 理論波形と測定波形

## 5. 実験結果と検討

### (1) 試験装置の検証

図-6は、実験装置Aを用いて、緩衝材なしで衝突体を所定の高さから自由落下させて、衝突速度1.1m/sで実験したときのゲージ①での測定波形と理論波形を並べて示したものである。実験装置と計測システム等の影響で、測定波形の立ち上がりが少々遅れるものの両者がよく一致していることがわ

かる。図の①部の理論波形の継続時間は、衝突体を弾性波が往復する時間の約120μsとなっている。よって、この部分(①部)の波動エネルギーが衝突体の保持した位置エネルギーと一致することになる。測定波形のこの部分の波動エネルギーを計算したところ、理論値の98%になった。これを本研究では入

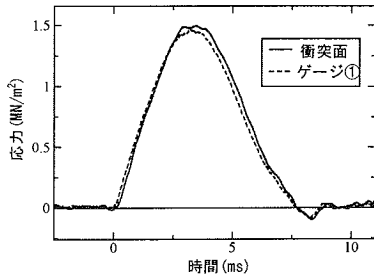


図-7 衝突面とゲージ点での応力の比較

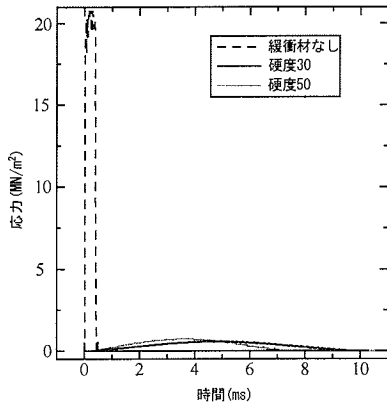


図-8 実験波形の比較(速度 1m)

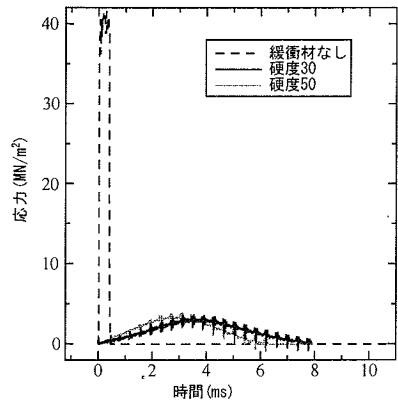


図-9 実験波形の比較(速度 2m)

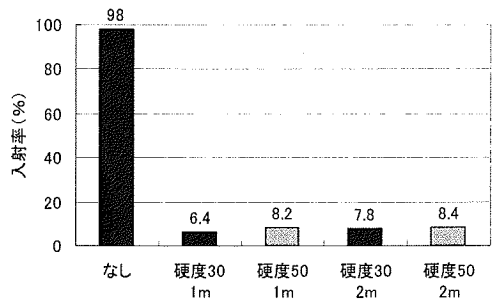


図-10 入射波動エネルギー率

射エネルギー率 98%と呼ぶことにする。図の②部は、入射された波動が桁供試体内で振動しているものである(このときの出力波形をインピーダンス法で計算すると、理論波形に重なります)。

図-7は、実験装置 A を用いて、硬度 30 の緩衝材を設置し、衝突体を速度 1.1m/s で衝突させたときのゲージ①での測定波形と、ゲージ①とゲージ②の測定波形から 2 点ゲージ法解析により求めた衝突面での応力波形を並べて示したものである。図から、両者はよく一致していることが分かる。これは緩衝材の機械インピーダンスが桁供試体の機械インピーダンスに比較して非常に小さいために、被衝突体の衝突面が自由端的に挙動していることを示している。これは、ゲージでの測定波形が、衝突面からの入射応力-時間関係を示すことを意味する。よって、式(18)を適用して入射波動エネルギーを精度よく求めることができる。

## (2) 桁間衝突実験の測定波形例

図-8は、実験装置 B を用いて、衝突速度 1.0m/s で、緩衝材なしの場合と緩衝材 2 種を設置して実験したときのゲージ①での測定波形を示したものである。図から、緩衝材なしの場合の測定波形と緩衝材を設置したときの測定波形の形状が大きく異なるこ

とがわかる。緩衝材なしの場合の応力は 20.6MN/m<sup>2</sup> であるが、硬度 30 および硬度 50 の緩衝材を設置すると、そのときの最大応力はそれぞれ、約 1.14MN/m<sup>2</sup> と約 1.50MN/m<sup>2</sup> と非常に小さくなることがわかる。また、応力波の継続時間は緩衝材なしの場合は約 0.4ms であるが、硬度 30 と硬度 50 の緩衝材を設置すると、それぞれ約 9.2ms と約 7.1ms と非常に大きくなることもわかる。

図-9は、衝突速度が 2.0m/s の場合のものである。緩衝材なしの場合の応力は 41.2MN/m<sup>2</sup>、硬度 30 および硬度 50 の緩衝材を設置すると、最大応力はそれぞれ、約 3.07MN/m<sup>2</sup> と約 2.88MN/m<sup>2</sup> となった。また、応力波の継続時間は、それぞれ約 8.2ms と約 6.3ms となり、衝突速度が速くなると、衝突の継続時間が短くなることもわかる。

以上の結果から、ゴム緩衝材を設置すると、応力波の継続時間は非常に長くなるものの、発生応力値は小さくなり、ゴム緩衝材の緩衝効果が非常に大きいことがわかる。

### (3) 入射波動エネルギー率

ゴム緩衝材を設置しない場合、図-8, 9 からも明らかなように、衝突体の持っていたエネルギーのほぼ全てが被衝突体に発生する波動エネルギーに変換される。図-8, 9 の緩衝材無しの場合の実験波形から求めたに入射波動エネルギー率も約 98% になった。

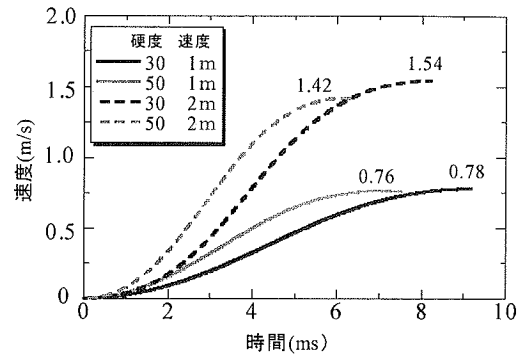
図-10 に、全条件での実験波形から求めた入射波動エネルギー率を示した。図からも明らかなように、緩衝材がある場合の入射率は 6.4~8.4% と非常に小さくなるのがわかる。これは、ゴム緩衝材を設置していない場合は、衝突体が衝突直前に保持していた全エネルギーが、衝突継続時間の約 0.4ms の間(衝突体を弾性波が往復するのに要する時間)に被衝突体へ波動エネルギーとして入射される。一方、緩衝材がある場合には、衝突体の保持していたエネルギーは、衝突継続中に時々刻々と変化する、①被衝突体の波動エネルギー成分、②被衝突体の運動エネルギー成分、③衝突体の波動エネルギー成分、④衝突体の運動エネルギー成分、⑤ゴム材の吸収エネルギー成分等に分散して存在するので、入射波動エネルギーとしては小さくなる。また、硬度 50 の緩衝材を設置したほうが、硬度 30 より入射率が若干大きくなっている。衝突速度を大きくすると、発生応力は大きくなるが、入射波動エネルギー率には大きな差はなかった。

### (4) 桁供試体の衝突継続中の速度変化

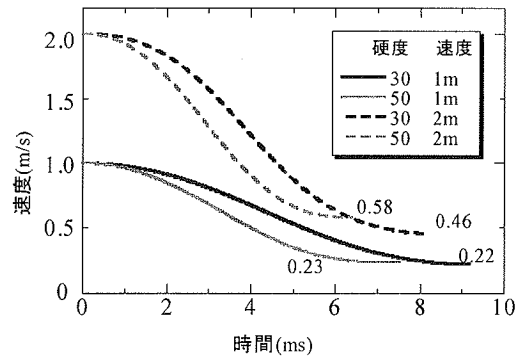
5.(1)で述べたように、緩衝材を設置したときのゲージでの測定波形は、衝突面での応力-時間関係を示す。よって、衝突面に作用する力積から被衝突体の速度-時間関係を求めることができる。

図-11 は、桁供試体の衝突中の速度変化を示したものである。図(a)は、図-8, 9 の緩衝材を設置した場合の測定波形を用いて、力積と運動量の関係から、被衝突体の速度-時間関係を求めたものである。図から明らかなように、緩衝材を設置することにより、被衝突体の速度が 22~29%程度落ちることがわかる。また、被衝突体の速度は、硬度 30 の緩衝材を設置したほうが硬度 50 に比較してわずかではあるが、速度が大きくなる興味ある結果が得られた。桁間に硬度が大きいものが設置されると、衝突力は大きくなるが、衝突継続時間が短くなるのでこのような現象が生じたものである。この結果は高架橋を全体システムとして検討する場合、橋の形状や橋の振動特性によって緩衝材の最適硬度があることを示唆するものである。

同一寸法の供試体による桁間衝突実験では、衝突体にも、被衝突体と同様な応力波が入射される。そ



(a) 被衝突体



(b)

(b) 衝突体

図-11 桁供試体の衝突中の速度変化

表-1 衝突体と被衝突体の速度

衝突速度 (m/s)	緩衝材	衝突体の速度 (m/s)	被衝突体の速度 (m/s)
1.0	なし	0	1.00
	硬度30	0.22	0.78
	硬度50	0.24	0.76
2.0	なし	0	2.00
	硬度30	0.46	1.54
	硬度50	0.58	1.42

ここで、衝突体の衝突直前の速度を設定速度と仮定し、ゲージでの測定波形を用いて衝突体の速度-時間関係を求めたものを図(b)に示した。図から明らかなように、衝突体の速度は被衝突体の抵抗を受け時々刻々低下して行く様子がわかる。

### (5) 緩衝材による損失エネルギー率

表-1 は、桁間衝突前後の桁供試体の速度をまとめて示したものである(図-11 参照)。表中の緩衝材無しの場合の数値は理想状態での値を示した。

表-2 桁供試体の運動エネルギーと損失エネルギー

衝突速度 (m/s)	緩衝材	衝突体の 運動エネルギー(%)	被衝突体の 運動エネルギー(%)	損失エネルギー (%)
1.0	なし	0	100	0
	硬度30	4.8	60.8	34.4
	硬度50	5.8	57.8	36.4
2.0	なし	0	100	0
	硬度30	5.3	59.3	35.4
	硬度50	8.4	50.4	41.2

いま、衝突体が衝突直前に保持している運動エネルギーを 100%とする。そうすると、桁間衝突後に、桁供試体が保持する運動エネルギー率は、速度の自乗に比例するので表-2 に示したようになる。表には緩衝材によるエネルギー損失率も示した。エネルギー損失率は、硬度 30 と硬度 50 を比較すると硬度 50 のほうが大きくなった。また、速度が大きくなると損失率が増加することもわかる。さらに、表に示した、緩衝材のエネルギー損失率は従来の結果に比較して小さいこともわかる。これは、従来の研究が、コンクリートブロック等に緩衝材を設置して実験を行ったために、試験装置に入射される波動エネルギーを損失エネルギーとして算定していると推察される。

(6) 衝突中の緩衝材の応力-ひずみ関係

5.(4)で、衝突体と被衝突体の速度-時間関係を示した。これらを時間で積分すると衝突体と被衝突体の変位-時間関係が求まる。両者の変位の差を求めると、衝突継続中の緩衝材の圧縮量になる。図-12 は、圧縮量から求めたひずみ値と測定波形から求めた応力値を用いて、衝突継続中の緩衝材の応力-ひずみ関係を描いたものである。今回の 4 種の実験では、表-2 に示したように、硬度 50 で衝突速度 2m のときの損失エネルギーが最も大きくなったが、図に示した履歴特性からもこのことが推察される。

図-13 は、衝突継続中のゴム緩衝材への実際の载荷速度と時間関係を示したものである。载荷速度は時間とともに低下しゼロになり、その後反転(除荷)しいく様子がわかる。

6. 機械インピーダンス法によるシミュレーション

(1) インピーダンス法による計算波形と実験波形の比較

モデル化にあたり問題になってくるのが、緩衝材の弾性係数の決定である。図-5 に示したように、

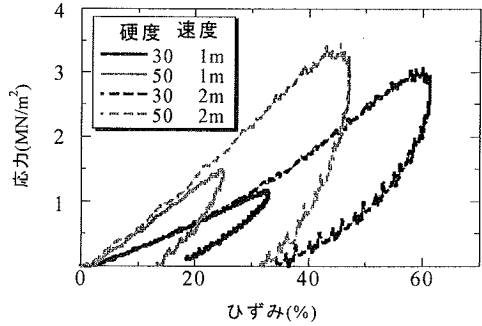


図-12 ゴム緩衝材の衝突中の応力-ひずみ関係

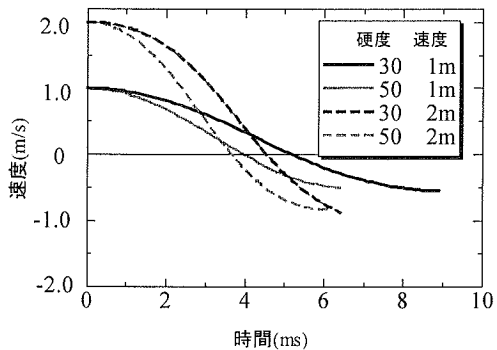
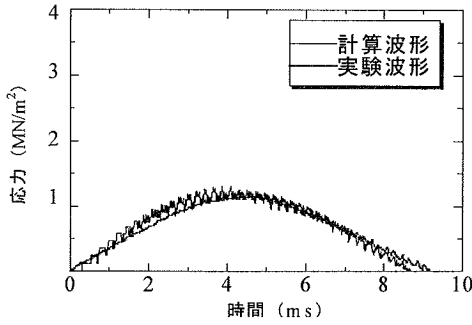


図-13 ゴム緩衝材への载荷速度

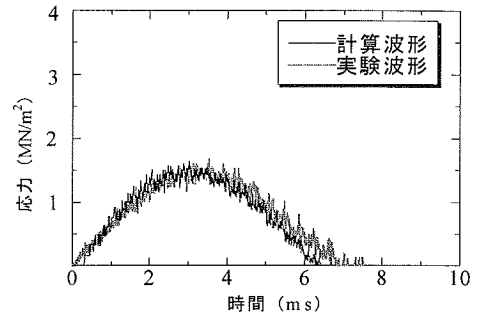
ゴムの変形特性は载荷速度により変化するとともに、形状寸法等によっても異なる。さらに、桁間衝突では、図-13 に示したように、衝突継続中にも载荷速度が変化する。そこで、今回の計算では、衝突継続中の平均的な緩衝材の弾性係数として、図-12 に示した応力-ひずみ関係の最大応力を  $\sigma_{max}$  としたとき、 $1/3 \times \sigma_{max}$  点と  $2/3 \times \sigma_{max}$  点を結ぶ直線の勾配値を採用した。

図-14 は、実験波形とインピーダンス法によるシミュレーション結果を比較して示したものである。図からわかるようにインピーダンス法により、かなりの精度で桁間衝突が再現できていることがわかる。

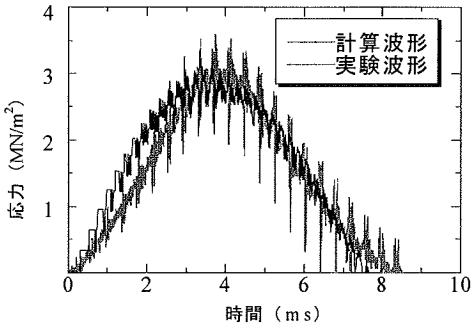




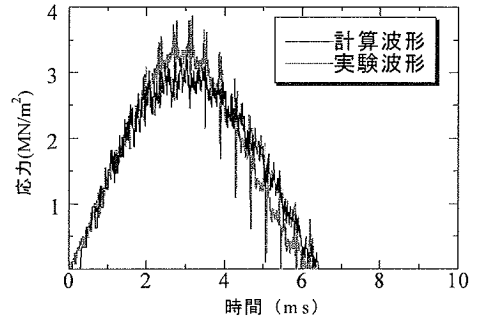
(a) 硬度 30-衝突速度 1m



(c) 硬度 50-衝突速度 1m



(b) 硬度 30-衝突速度 2m



(d) 硬度 50-衝突速度 2m

図-14 実験波形と計算波形の比較

## (2) インピーダンス法による桁長の検討

以上の実験と解析は、長さ 1m の桁供試体を用いて行ったものである。そこで、実際の桁長を想定し、ゴム緩衝材の厚さは 10mm で、桁長(衝突体と被衝突体の長さは同一)を大きくした場合の発生応力-時間関係についてインピーダンス法を用いて検討した。図-15 はそのときの計算結果の一例を示したものであるが、桁長が長くなると衝突時間が長くなり、発生応力が大きくなるのがわかる。このことから、小さな桁供試体を用いた場合は、寸法効果を考慮して発生応力を推定する必要がある。

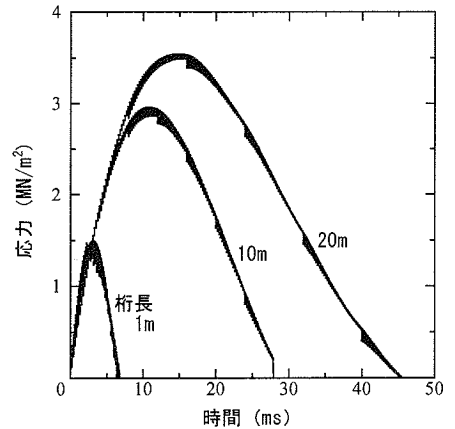


図-15 桁長と衝突応力の関係 (硬度 30-1m)

## 7. まとめ

桁間衝突のメカニズム解明には、ゴム緩衝材と桁の問題を分離して検討する必要があるとの立場から、波動特性が明確な桁供試体を用いて基礎的実験を行い、ゴム材の緩衝効果と、桁間衝突のインピーダンス法によるモデル化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) ゴム緩衝材による損失エネルギーを精度良く求めるためには、反力装置(ロードセル設置台等)

に入射される波動エネルギーを考慮できる試験手法を採用する必要がある。

2) ゴム緩衝材による損失エネルギーの算定に、本手法は有効である。

3) ゴム緩衝材の衝突応力の低減効果は硬度 30 のほうが硬度 50 より大きいのが、衝突後の被衝突体の速度は、硬度 30 の緩衝材を設置したほうが、硬度 50 の場合よりわずかに大きくなった。

- 4) 桁間衝突継続中のゴム緩衝材の载荷履歴中央部の弾性係数を採用すると、インピーダンス法により桁に生じる衝突応力が精度良く推定できる。
- 5) インピーダンス法により桁長の影響を検討したところ、桁長が大きくなると衝突応力が大きくなるので、模型実験の結果から衝突応力を推定する場合には寸法効果を考慮する必要がある。  
インピーダンス法は変断面の弾性体にも比較的簡単に応用できるので、実桁に近い桁供試体を用いて実験を行うとともに、そのシミュレーション法の完成に努めたい。
- 4) 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.
- 5) 園田佳巨, 西本安志, 石川信隆, 彦坂熙: 落橋防止用矩形形状ゴム製緩衝材の性能評価法に関する基本的考察, 土木学会論文集, No. 689/ I -57, pp. 215-224, 2001. 10.
- 6) 西本安志, 園田佳巨, 石川信隆, 彦坂熙, 西川信二郎: 落橋防止用矩形形状ゴム緩衝材の設計法に関する一考察, 土木学会論文集, No. 689/ I -57, pp. 355-360, 2001. 10.
- 7) 柳原直人, 斉藤博: 一次元弾性応力波理論に基づく衝撃力, 速度, 変位の測定理論と測定システム, 日本機械学会論文集(C 編), 51 巻, 464 号, pp. 790-796, 1985. 4.
- 8) 西田義親, 松本樹典, 河上清和, 石本一鶴: 2点ゲージ法による杭打ち時の応力解析, 第 22 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1219-1222, 1985. 6.
- 9) 野村昭一郎, 武者利光, 内藤喜之, 森泉豊栄: 振動・波動入門, コロナ社, pp. 143-151, 1991.
- 10) 谷川恭雄, 尼崎省二, 近藤博他: コンクリート構造物の非破壊検査・診断技術, 技術情報協会, pp. 60-67, 2000.
- 11) 木村修一, 滝沢進, 本間重雄, 近藤博: ロードセルの動的応答特性, 東海大学紀要工学部, Vol. 40, No. 1, pp. 95-99, 2000.

謝辞: 終わりに、この研究に協力された卒研究生の小林貴洋君, 多江隼人君, 那須野貴彦君, 高野亮介君に感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 潤田久也, 川島一彦, 庄司学, 須藤千秋: 高面圧を受ける直方体ゴム緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究, 土木学会論文集, No. 661/ I -53, pp. 71-83, 2000. 10.
- 2) 島ノ江哲, 長谷川恵一, 川島和彦, 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.
- 3) 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.

(2003. 3. 20 受付)

## ON THE MODELING OF BUMPING BEHAVIOR IN GIRDERS BASED ON IMPEDANCE METHOD AND THE DAMPING EFFECT OF SHOCK ABSORBING RUBBER

Hiroshi KONDO, Syuichi KIMURA, Katsuya SUZUKI and Shigeo HONMA

During 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake, many bridges were damaged due to bumping behavior in girders, and which mechanism has been required to be elucidated. This study investigates the damping effect of shock absorbing rubber placed between girders and the modeling of girder-absorber system based on the impedance method. An elastic rod having apparent wave characteristics was employed as the girder model, and which was suspended by steel wires in order to make clear its energy balances in the bumping experiment. It was revealed that the energy losses, which become important for investigating the damping effects of shock absorbing rubber, could be estimated with high accuracy by the impedance method. This method also enables one to estimate the arising stresses at bumping, and confirmed that the bumping stress increases as the length of girder model increases.