

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

Simulation analysis on collision test between two steel girders with rubber shock absorber

金光明*, 梶田幸秀**, 香月智***, 石川信隆****

Akira KANAMITSU, Yukihide KAJITA, Satoshi KATSUKI and Nobutaka ISHIKAWA

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

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

***工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (〒239-8686 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 横須賀市走水 1-10-20)

Studied herein is a simulation analysis on a collision test between two steel rectangular solid bars with rubber shock absorber. This collision test was carried out to assess the modeling of pounding behavior in girders and to evaluate the mitigating effect of the rubber shock absorber. Test results are compared with those through the analysis carried out by using the spring-mass model considering the non-linear behavior of the rubber shock absorber. Finally, it is found that the velocity of the steel bars after the collision and the time history of the strain at the collision point can be estimated by using the mass-spring model.

Key Words : pounding of girders, rubber shock absorber, collision test, mass-spring-dashpot model

キーワード：桁間衝突，ゴム製緩衝材，衝突試験，バネ-質点-減衰モデル

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²⁾⁻¹⁴⁾が現在までに数多く実施されている。

例えば、園田ら²⁾は、ゴム製緩衝ピンを有する落橋防止連結板装置の力学特性について、弾性応答の使用時レベルと破壊を伴う終局時レベルの2段階でそれぞれ静的および衝撃実験による検討を行い、ゴム製緩衝ピンの力学特性を把握している。島ノ江ら¹⁰⁾は、実験により高面圧の圧縮力を衝撃的に受けた場合のゴム製緩衝装置の力学特性に関して検討し、応力-ひずみ関係におよぼす衝突力の影響、さらにはゴム材質の違いによるエネルギー吸収特性への影響について考察を行っている。また、伊津野ら¹³⁾は、桁が橋脚から落下する場合を想定し、桁間連結装置で桁を支えるための条件に関して考察しており、川島・渡邊¹⁴⁾は、斜橋の落橋防止構造としてケーブル式の桁間連結装置を用いた場合の桁の回転抑制効果について着目し、桁の応答特性を検討している。また、著者らも、3径間連続高架橋を3つ並べたモデルに対して桁間

連結ケーブルや桁-橋脚連結ケーブルの高架橋の地震時挙動における効果を検討¹²⁾し、さらに、積層繊維補強ゴムを落橋防止システム用緩衝材として用いた際の緩衝効果について検討を行っている⁹⁾。

以上を概観すると、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⁾⁻¹⁰⁾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¹¹⁾⁻¹⁴⁾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型钢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¹⁵⁾。

そこで本論文では、桁間衝突のモデル化に関するさらなる検討を行うため、鋼角柱を用いて実験を実施した。さらに実験の際には、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

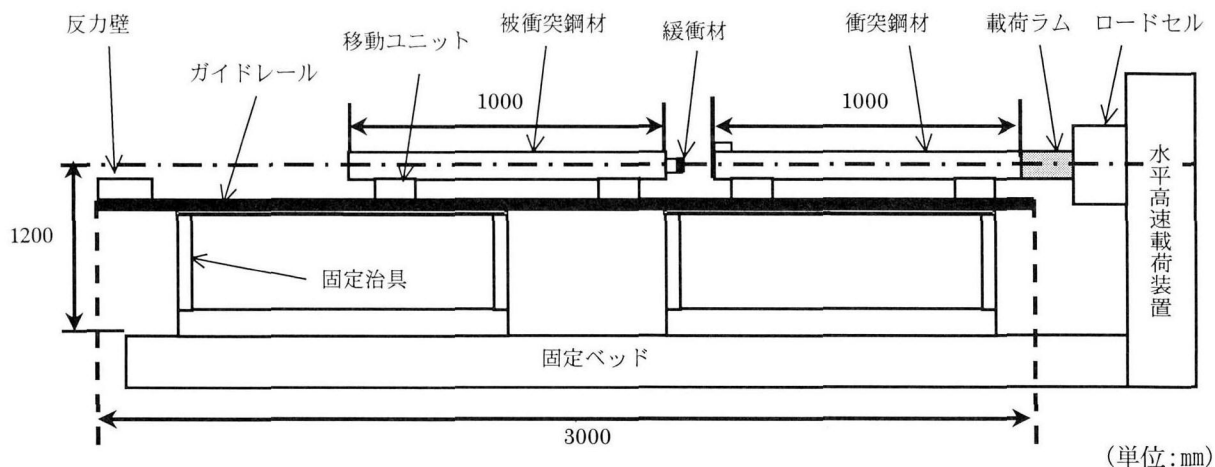


図-1 桁間衝突実験概要図

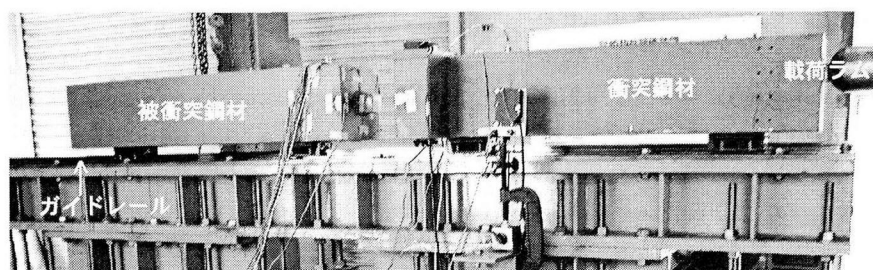


写真-1 実験の状況

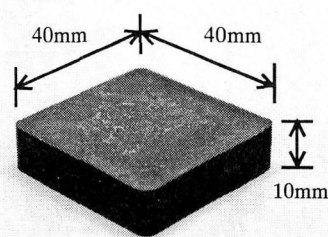


写真-2 ゴム製緩衝材の形状

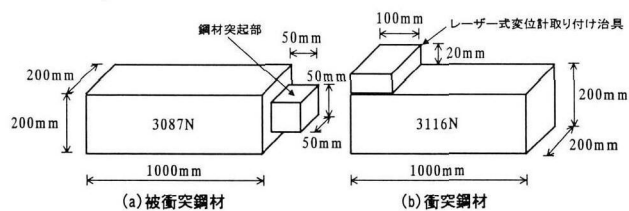


図-2 被衝突鋼材および衝突鋼材の形状

た鋼角柱を衝突鋼材と呼ぶ。実験に用いた鋼角柱は図-2に示すように、長さ1000mm、縦・横200mmの正方形断面を有し、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鋼材本体につけている鋼材突起部やレーザー式変位計取り付け治具のためである。

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。

また、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。

実験に用いたゴム製緩衝材を写真-2に示す。ゴム製緩衝材の大きさは縦・横40mm、厚さ10mmの硬度50度のゴム（天然ゴム）である。ゴム製緩衝材の大きさの決定には、鋼角柱とゴム製緩衝材の重量比が、実橋と同じレベル（重量比14500:1）になるように考慮した。

2. 桁間衝突実験および考察

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荷重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。実際の桁間衝突を模擬した実験を行うためには、2本の鋼角柱が共にある速度をもって衝突させる必要があるが、初速度を与えるための荷重装置が図-1に示すとおり1つしかないため、衝突前は1本の鋼角柱は静止させておき、衝突後は2本とも可動状態になるようガイドレールを用いて実験を行った。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

ゴム製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図-2に示した通り50mm×50mm×50mmの断面を持つ鋼材突起部を設け、写真-3および図-3に示すように鋼材突起部の4面にひずみゲージを貼付した。

図-4に取り付けたゴム製緩衝材の荷重-変形関係を示す。本実験ではゴム製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荷重実験を行うことは困難である。高速荷重時におけるゴム製緩衝材の荷重-変形関係は、いわゆるひずみ速度効果により荷重が上昇すると考えられるが、本研究におけるシミュレーション解析の際のゴム製緩衝材の荷重-変形関係は図-4に示す静的実験結果を用いることにした。また、図-4よりゴム製緩衝材の荷重-変形曲線ではエネルギー吸収に必要なプラトー領域が存在しないため、緩衝効果が小さいことが想定される。そのため、本実験ではゴム製緩衝材に

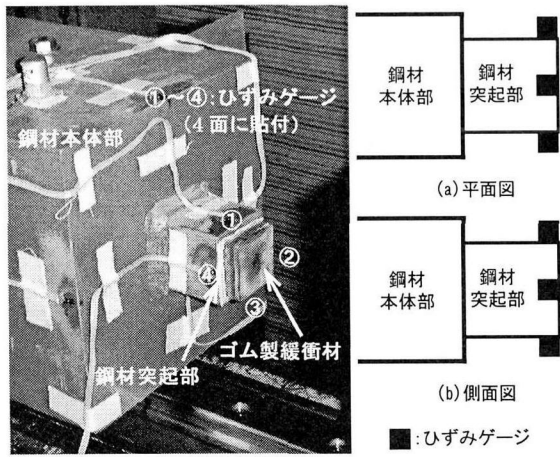


写真-3 鋼材突起部

図-3 鋼材突起部

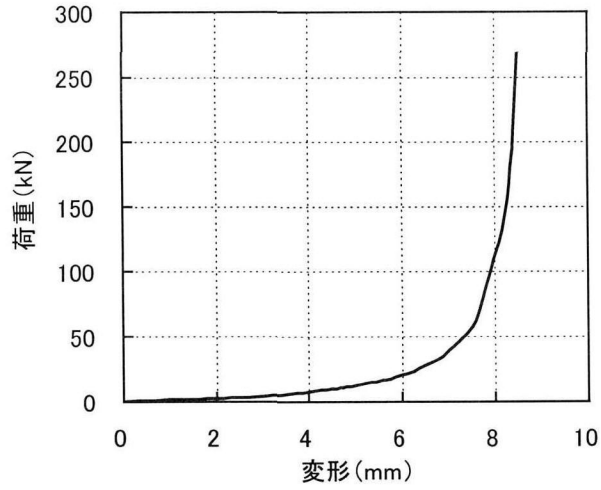


図-4 ゴム製緩衝材の荷重-変形関係

繊維を積層埋設し、エネルギーの吸収能を向上させた積層繊維補強ゴム⁸⁾を用いた実験も行っている。しかしながら、積層繊維補強ゴムを用いた場合のシミュレーション解析はまだ行っていないため、本論文では硬度 50 度の天然ゴムのみを対象とし、積層繊維補強ゴムの場合は割愛した。

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。図-5 にレーザー式変位計で計測した衝突鋼材ならびに被衝突鋼材の移動距離-時間関係さらに衝突鋼材と被衝突鋼材の相対変位-時間関係を示す。図-5 (c) 鋼材相対変位のグラフより、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・離反点を用いて図-5 (a), (b) に示すように衝突点前の 0.01sec 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。

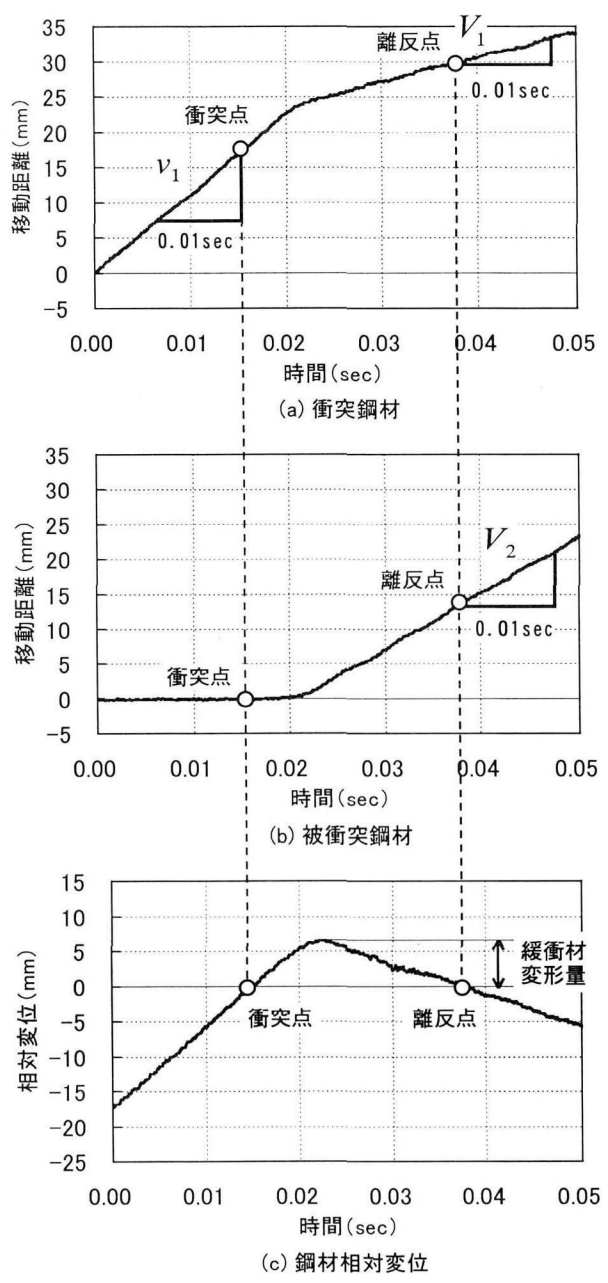


図-5 レーザー式変位計で計測した鋼材の移動距離 (ゴム製緩衝材、設定速度 1.00m/s)

衝突鋼材に与える初速度については、実際の桁間衝突時に発生する最大速度として 1.00m/s を設定し、それ以下の設定速度として 0.25m/s, 0.40m/s, 0.70m/s の計 4 ケースとした。ゴム製緩衝材がある場合とない場合の 2 ケースを設定し、実験ケースとして計 8 通りについて実施した。そして、1つの実験ケースにつき実験は 2 度行い、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。

2.2 実験結果および考察

(1) 衝突前後の衝突鋼材・被衝突鋼材の速度

レーザー式変位計より得られた衝突鋼材ならびに被衝突鋼材の衝突前の速度および衝突後の速度を図-6, 7

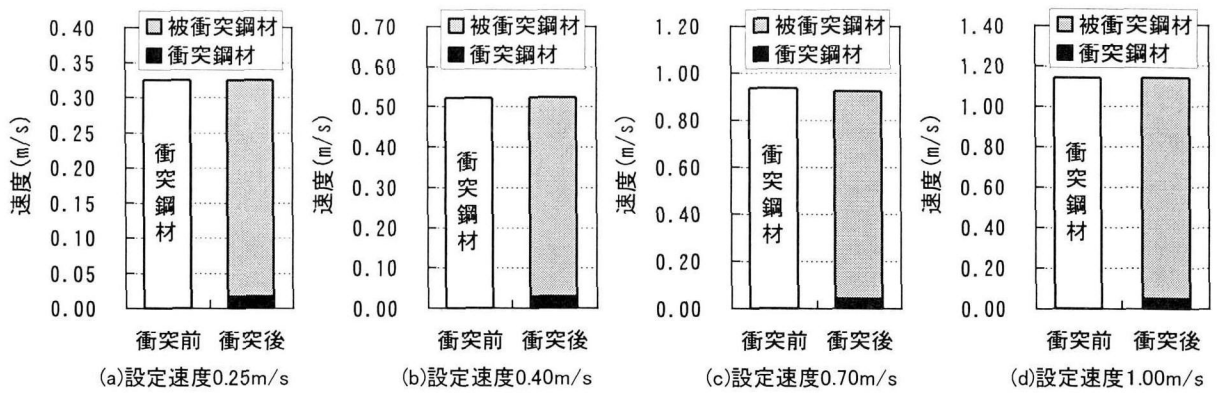


図-6 変位計より得られた衝突前および衝突後の鋼材速度（緩衝材なし）

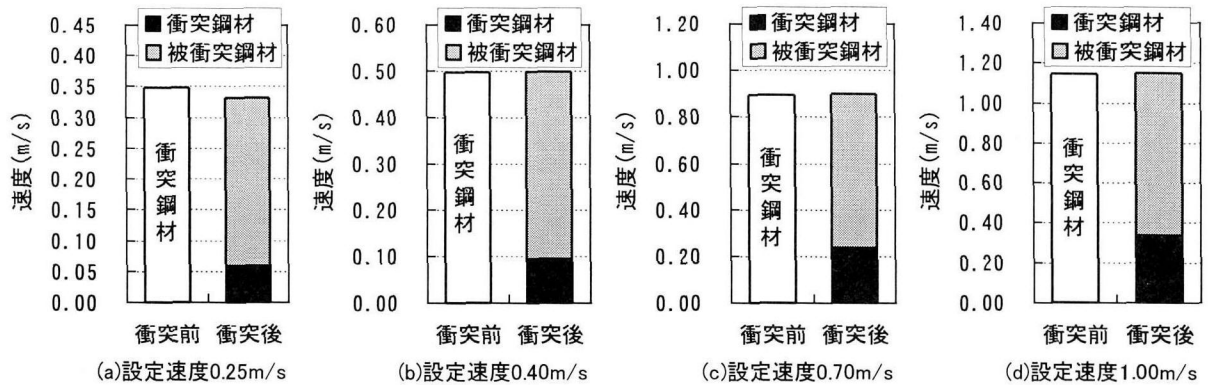


図-7 変位計より得られた衝突前および衝突後の鋼材速度（ゴム製緩衝材あり）

に示す。図-6は緩衝材がない場合、図-7はゴム製緩衝材がある場合である。このとき、各速度損失に影響する要因としてガイドレールの動摩擦力が考えられる。本実験に先がけて、ガイドレールの動摩擦係数を算定した結果、動摩擦係数はおよそ0.0090～0.0155の範囲にあり、鋼材の速度は衝突前後それぞれ0.01secで求めているため、そのときの動摩擦力による速度損失は最大 1.52×10^{-3} m/sとなり、0.25 m/sと比べて約0.5%と非常に小さい。よって、ガイドレールによる速度損失は無視できると考えられる。

ここで、2物体の衝突問題では運動量保存則が成立し、式(1)のように表される。

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 V_1 + m_2 V_2 \quad (1)$$

ここで、 m_1, m_2 ：衝突鋼材および被衝突鋼材の質量、 v_1, v_2 ：衝突前の衝突鋼材および被衝突鋼材の速度、 V_1, V_2 ：衝突後の衝突鋼材および被衝突鋼材の速度である。本実験では、被衝突鋼材の衝突前の速度は0 m/s ($v_2 = 0$ m/s) より、式(1)は式(2)のように書き換えられる。

$$m_1 v_1 = m_1 V_1 + m_2 V_2 \quad (2)$$

さらに本実験では、衝突鋼材ならびに被衝突鋼材の質量は318kgと315kgとほぼ等しい。よって、式(2)は式(3)のようになる。

$$v_1 = V_1 + V_2 \quad (3)$$

表-1 衝突によるエネルギー損失量とエネルギー損失の割合

(a) ゴム製緩衝材なしの場合

設定速度(m/s)	エネルギー損失量(kN・mm)	エネルギー損失の割合(%)
0.25	1.7	10.3
0.40	3.8	8.7
0.70	16.9	12.2
1.00	19.3	9.4

(b) ゴム製緩衝材ありの場合

設定速度(m/s)	エネルギー損失量(kN・mm)	エネルギー損失の割合(%)
0.25	6.9	35.9
0.40	17.8	42.9
0.70	48.8	38.4
1.00	107.4	43.6

つまり、本実験において運動量保存則が成立するためには、衝突前の衝突鋼材の速度が衝突後の衝突鋼材と被衝突鋼材の速度の和に等しくならなければならない。本実験では、ゴム製緩衝材の有無や設定速度にかかわらず運動量保存則が成立していることが図-6、7より確認できる。例えば、図-6(a)の場合設定速度は0.25m/sであるが、測定された衝突前の衝突鋼材の速度は $v_1 = 0.33$ m/sで、衝突後には衝突鋼材が $V_1 = 0.02$ m/sで被衝突鋼材が $V_2 = 0.31$ m/sとなり、式(3)を満足している。これらのことは図-6、7のすべてに成立していることがわかる。

ところで、運動量保存則が成立していてもエネルギー

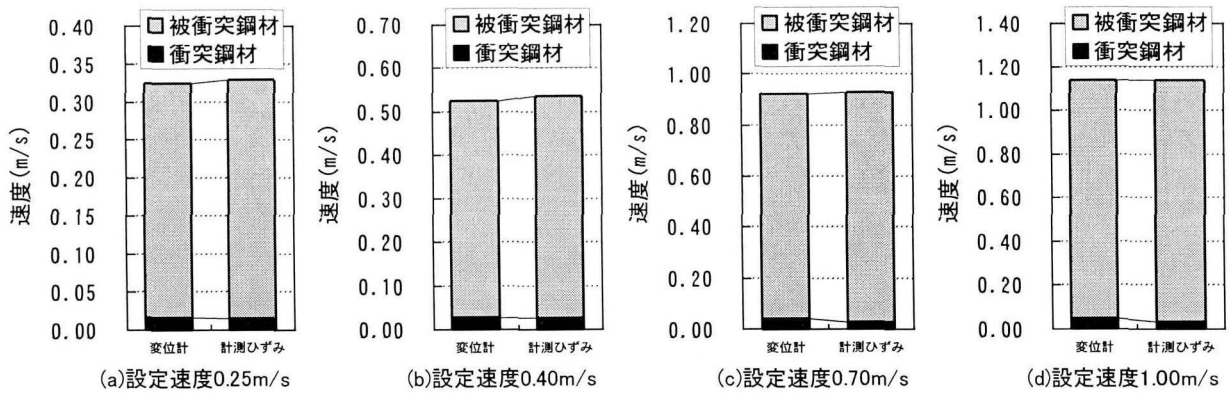


図-8 変位計および計測ひずみより得られた衝突後の速度比較（緩衝材なし）

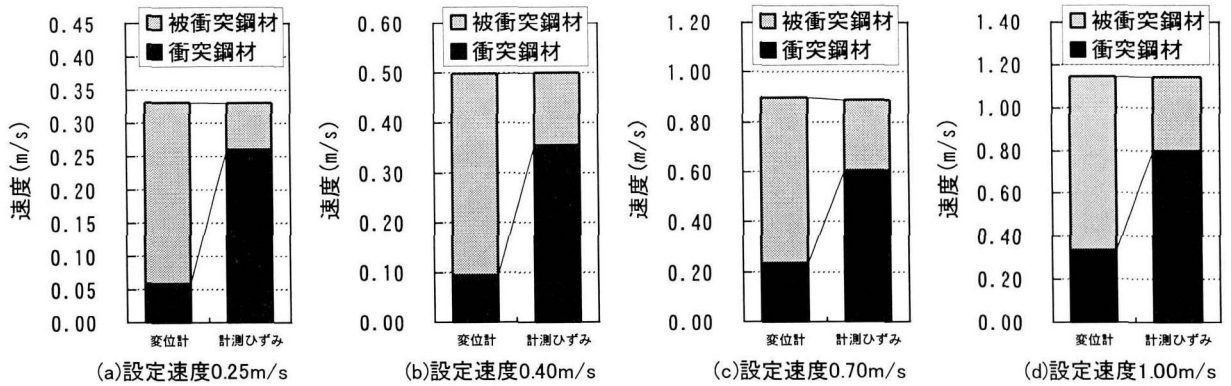


図-9 変位計および計測ひずみより得られた衝突後の速度比較（実験生データ，ゴム製緩衝材あり）

保存則については別途検討が必要である。そこで本実験では、式(4)によりエネルギー損失量を求めることにした。

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \left(\frac{1}{2} m_1 V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 V_2^2 \right) \quad (4)$$

ここで、 ΔE ：エネルギー損失量。

式(4)を用いて各実験ケースにおけるエネルギー損失量およびエネルギー損失の割合（エネルギー損失量を衝突前の衝突鋼材の運動エネルギーで除した値）を表-1に示す。表-1より、ゴム製緩衝材がない場合には、いずれの衝突速度においてもエネルギー損失が10%程度とほとんどなく、ほぼ弾性衝突となっている。つまり図-5からもわかるが、衝突後の被衝突鋼材の速度は衝突前の衝突鋼材の速度とほぼ同じになる。緩衝材がある場合では、どの実験ケースにおいても、衝突により運動エネルギーが約40%程度損失していることがわかる。このことは、ゴム製緩衝材の非線形特性によって消費エネルギーが発生したと考えられる。また、衝突速度が大きくなると損失エネルギー量が大きくなることから、ゴム製緩衝材による消費エネルギーも衝突速度が大きくなるにつれ、大きくなると考えられる。

(2) 鋼材突起部の計測ひずみからの鋼材速度の算定

鋼材速度の算定法には衝突面のひずみゲージを用いる方法もある。質量 m の物体に力 F が作用したときの運動方程式はNewtonの第2法則より式(5)のように表される。

$$F(t) = m \cdot \frac{dv(t)}{dt} \quad (5)$$

ここで、 F ：物体に作用した力、 m ：物体の質量、 v ：物体の速度、 t ：時間。

式(5)を展開すると式(6)のようになり、式(6)をある時間範囲（時刻0秒から t_e 秒）で積分すると式(7)のように表される。

$$F(t) dt = m dv(t) \quad (6)$$

$$\int_0^{t_e} F(t) dt = \int_0^{t_e} m dv(t) = m(v_{t_e} - v_0) \quad (7)$$

ここで、 v_{t_e} ：時刻 t_e での物体の速度、 v_0 ：時刻0での物体の速度である。

上記の式(7)は、ある時間範囲（0秒から t_e 秒）までに受けた力の合計が、時刻0から時刻 t_e の運動量の変化量に等しいことを述べている。ここで、式(7)を本実験に当てはめ、鋼材に作用した力を式(8)として考えると式(9)を導くことができる。

$$F(t) = EA\varepsilon(t) \quad (8)$$

$$EA \int_0^{t_e} \varepsilon(t) dt = m(v_{t_e} - v_0) \quad (9)$$

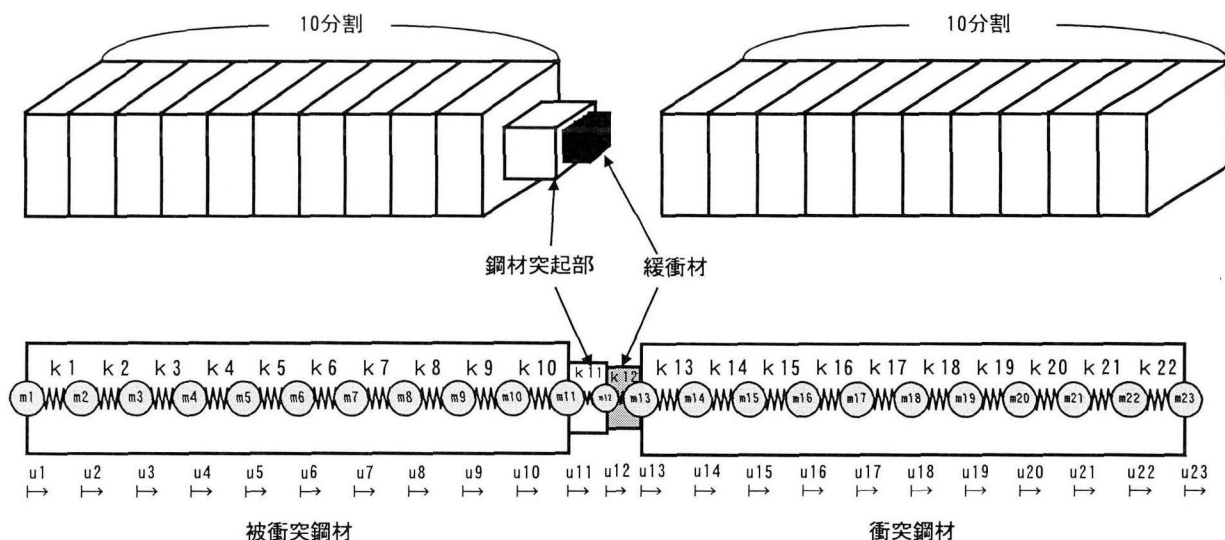


図-10 解析モデル

ここで、 E ：鋼材のヤング係数、 A ：鋼材突起部の断面積、 ε ：鋼材突起部で計測されたひずみ。

式(9)において被衝突鋼材を対象として考え、衝突前の被衝突鋼材の速度が 0 m/s であることを考慮に入れると式(10)のように表される。

$$EA \int_0^{t_e} \varepsilon(t) dt = mv^2_{t_e} \quad (10)$$

ただし、 $v^2_{t_e}$ ：被衝突鋼材の衝突後の速度。なお、ここで上付きの 2 は被衝突鋼材を意味している。

次に、衝突鋼材については、Newton の第 3 法則（作用・反作用の法則）により、衝突鋼材の受ける力は被衝突鋼材の受ける力と等しく、力の作用する向きが反対であるので式(9)は式(11)のように表すことができる。

$$-EA \int_0^{t_e} \varepsilon(t) dt = -m(v^1_{t_e} - v^1_0) \quad (11)$$

ただし、 $v^1_0, v^1_{t_e}$ ：衝突鋼材の衝突前および衝突後の速度であり、上付きの 1 は衝突鋼材を意味している。

なお、衝突鋼材の衝突前の速度 v^1_0 については、レーザー式変位計より変位を計測し、これを微分して求めた。よって、式(11)より衝突鋼材の衝突後の速度 $v^1_{t_e}$ を求めることができる。

以上のように、計測ひずみの時刻歴から得られた衝突鋼材、被衝突鋼材の速度を図-8、9 に示す。図-8 は緩衝材がない場合、図-9 は緩衝材がある場合である。図-8 より緩衝材なしの場合は、変位計で得た速度と計測ひずみで得た値とはほぼ一致していることがわかる。しかし、図-9 のゴム製緩衝材ありの場合は、被衝突鋼材の算定値は実験値に比べて小さな値を示す傾向がある。これは、計測されたひずみから被衝突鋼材の衝突後の速度を式(10)より算定する際に、計測したひずみが突起部断面全体に様に働いている（実際は鋼材突起部の側面で 4 力

表-2 補正係数 α

(a) 緩衝材がない場合

設定速度 (m/s)	0.25	0.40	0.70	1.00
補正係数 α	1.0	1.0	1.0	1.0

(b) ゴム製緩衝材がある場合

設定速度 (m/s)	0.25	0.40	0.70	1.00
補正係数 α	4.0	2.7	2.3	2.3

所測定した)と仮定したためである。しかし、剛体とゴムに静的に一定な荷重を与えた場合、ゴムの背面の荷重分布（剛体に作用する荷重分布）は一様とならないことが潤田ら¹⁶⁾の研究により明らかにされている。そこで、本研究では荷重分布を補正する係数として、レーザー式変位計から換算される衝突前後の運動量の変化量がひずみゲージから得られる力積と一致するような補正係数 α を式(12)から求めた。

$$\alpha = \frac{m(v_{t_e} - v_0)}{EA \int_0^{t_e} \varepsilon(t) dt} \quad (12)$$

ここで、 α ：補正係数、 ε ：計測されたひずみ、 $m(v_{t_e} - v_0)$ ：レーザー式変位計より求めた速度による運動量変化量。

式(12)より得られた補正係数 α と設定速度の関係を表-2 に示す。まず、表-2 (a) 緩衝材がない場合は、補正係数 α を 1.0 (補正なし) とした。また、表-2 (b) ゴム製緩衝材がある場合について、補正係数 α の値は衝突速度が小さいときはやや大きくなったが、約 2.5 前後の値をとることがわかる。なお、衝突力の解析値と実験値の比較をする際には、実験値はあらかじめ補正係数 α を乗じた値を用いている。

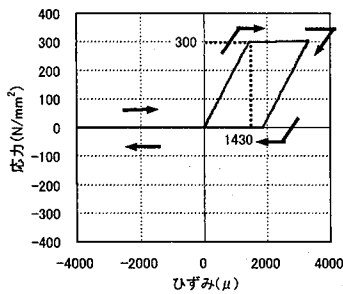


図-11 鋼材突起部の復元力特性

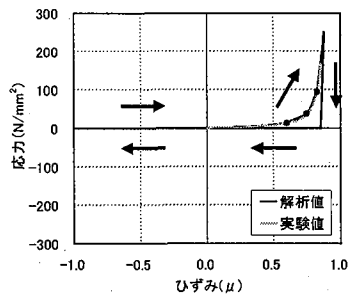


図-12 ゴム製緩衝材の復元力特性

3. 衝撃応答解析法

3.1 解析モデル

前述の実験的成果を将来的に高架橋の全体システムの地震応答解析に反映するには、解析モデル化の検討をする必要がある。その際、全体系応答解析には計算負担を考慮してバネ-質点系モデルを用いることが多い。

本解析で用いたバネ-質点系モデルを図-10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。なお、ゴム製緩衝材なしの場合には緩衝材要素を除いた。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¹⁷⁾。しかし今回の解析では、衝突時における鋼材突起部のひずみ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完全弾性モデルとし、その剛性は $8.23 \times 10^7 \text{ kN/m}$ とした。鋼材突起部の復元力特性は図-11に示す塑性化を考慮した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 240 N/mm^2 よりも1.25倍大きい値である 300 N/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。なお、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。除荷は弾性剛性で復元するものとした。続いて図-12にゴム製緩衝材の復元力特性を示す。これは、ゴム製緩衝材の静的実験を4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。

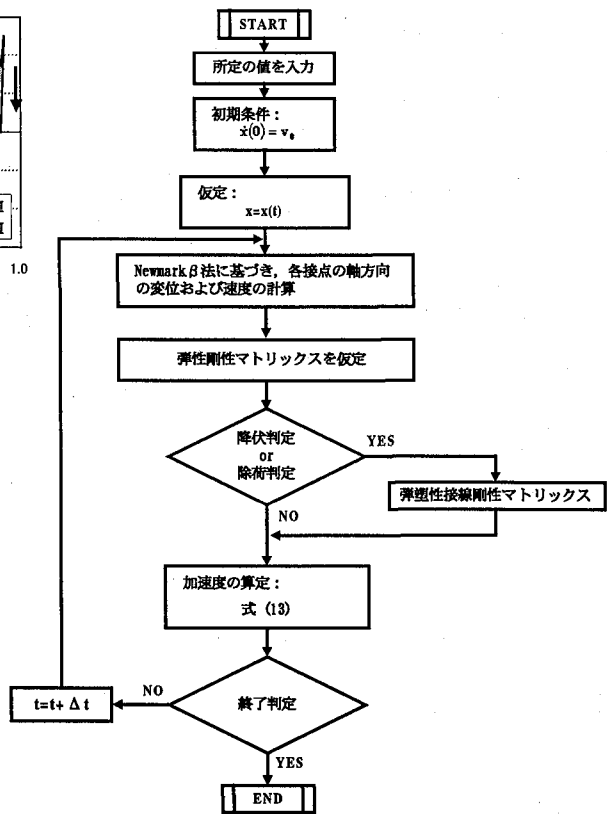


図-13 ニューマークβ法のフローチャート

3.2 解析手法

この運動方程式は、式(13)に示すニューマークβ法を用いて解析した。

$$\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \left[\mathbf{m} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \beta \Delta t^2 \tilde{\mathbf{K}} \right]^{-1} \quad (13)$$

$$\left[\mathbf{F}_{t+\Delta t} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_t - \mathbf{F}_k - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C}\ddot{\mathbf{u}}_t - \tilde{\mathbf{K}} \left(\Delta t \dot{\mathbf{u}}_t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_t \right) \right]$$

ここで、 $\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ ：時刻 $t + \Delta t$ での加速度、 $\dot{\mathbf{u}}_t$ ：時刻 t での速度、 β ：係数 $1/6$ 、 \mathbf{C} ：粘性係数、 $\tilde{\mathbf{K}}$ ：時刻 t における接線剛性マトリックスである。なお、質量マトリックスは集中質量モデルとし、式(14)によって求められる。

$$m_i = \frac{\rho}{2} (l_j A_j + l_k A_k) \quad (14)$$

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、バネ剛性は式(15)によって求められる。

$$k_i = \frac{\tilde{E} A_i}{l_i} \quad (15)$$

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

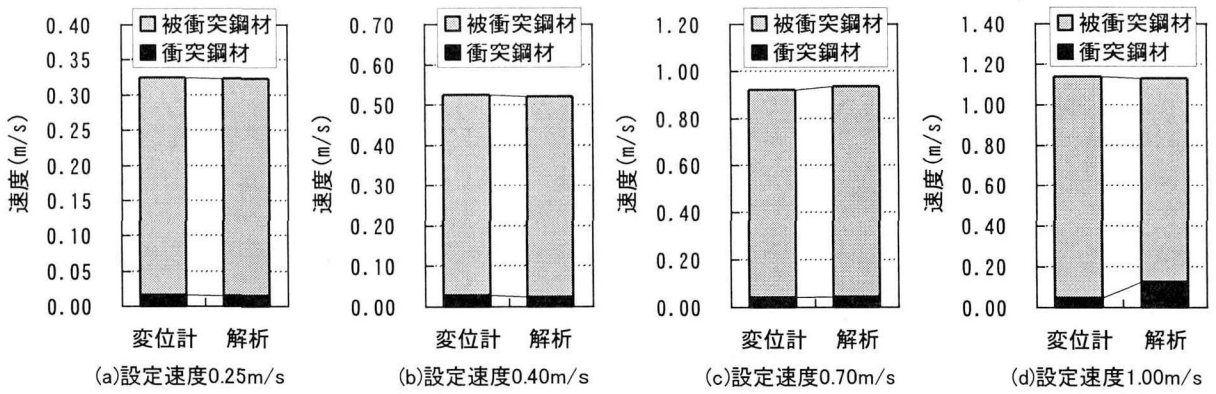


図-14 変位計および解析から得られた速度（衝突後，緩衝材なし）

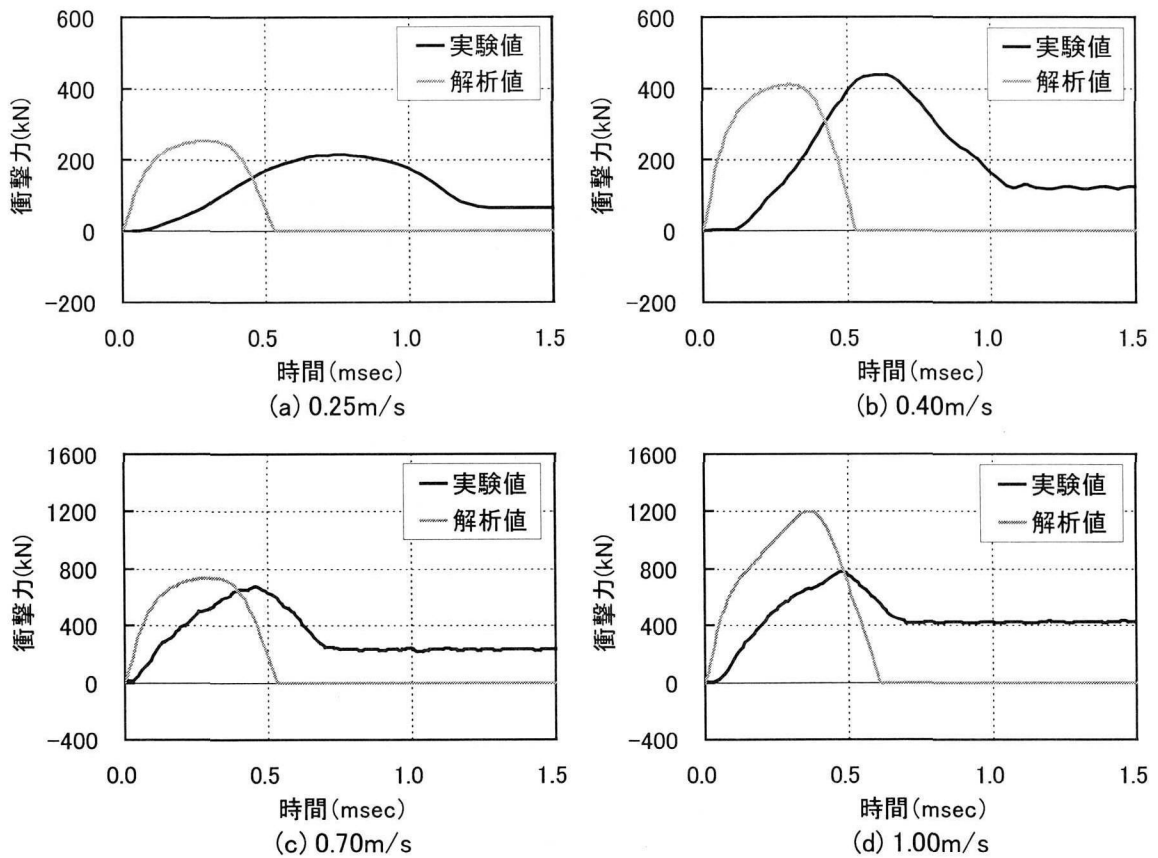


図-15 衝撃力-時間関係のグラフ（緩衝材なし）

定数 C_i は式(16)によって要素ごと与えられる。

$$C_i = \alpha_i m_i + \beta_i k_i \quad (16)$$

ここで、 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してその位置からの移動量により表している。

計算手順としては、Newmark β 法に基づいて図-13 に

示すようなフローチャートになる。初期条件として衝突鋼材の衝突速度を与える。直線上での衝突現象なので、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 ($7 \times 10^{-4} \text{sec} \sim 1 \times 10^{-2} \text{sec}$) から積分時間間隔 (Δt) を $1.0 \times 10^{-6} \text{ (sec)}$ 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 ゴム製緩衝材がない場合

図-14 に変位計および解析で得られた衝突後の衝突鋼材および被衝突鋼材のそれぞれの速度を示す。解析にお

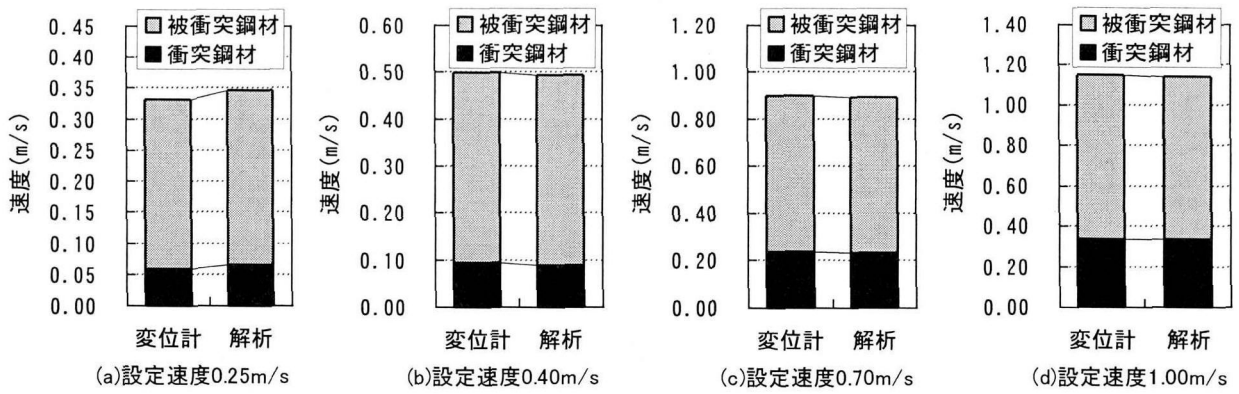


図-16 変位計から得られた速度と解析から得られた速度（衝突後，ゴム製緩衝材あり）

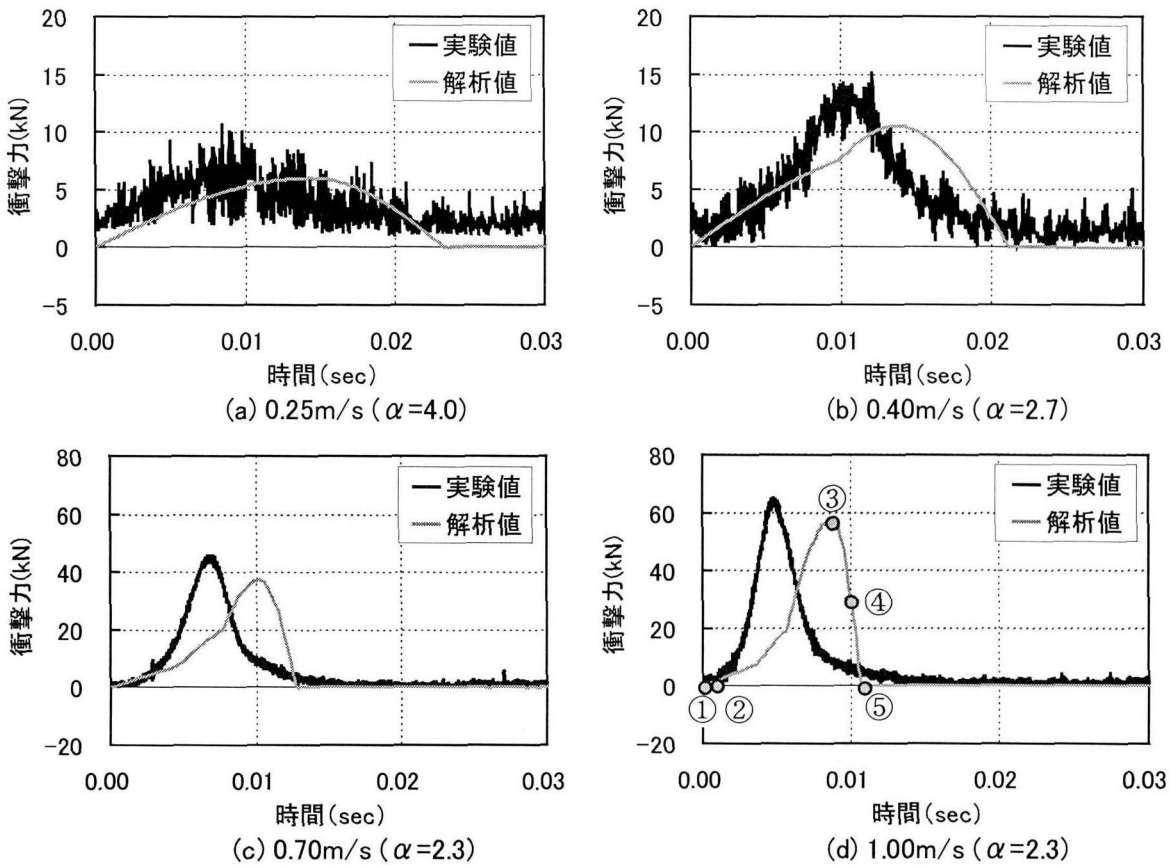


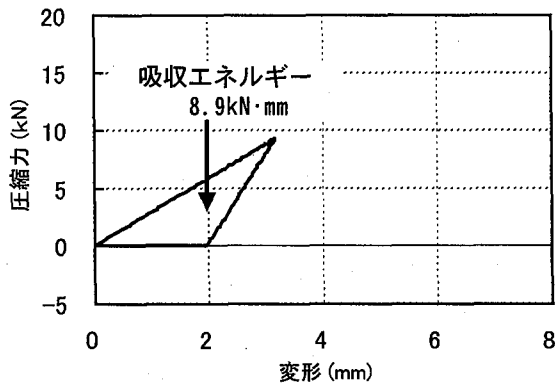
図-17 衝撃力-時間関係（ゴム製緩衝材，補正実験値）

ける鋼材の速度は，図-10 に示す解析モデルの鋼材の重心点である節点番号6（被衝突鋼材）と節点番号18（衝突鋼材）の速度である。図-14 より，各設定速度における変位計から得られた実験値の速度と解析から求められた速度は(d)設定速度 1.00m/s を除いて概ね一致しており，解析の妥当性が検証される。ここで，(d)設定速度 1.00m/s の場合について，解析値が実験値と比べて少し異なっている理由として，解析では鋼材突起部が塑性域に入っており，鋼材突起部でエネルギーが損失されているためであると考えられる。

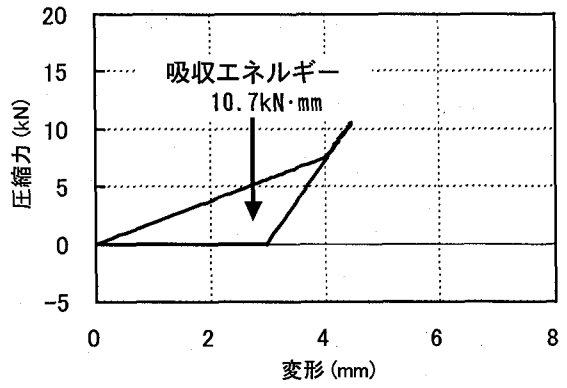
図-15 に鋼材突起部の衝撃力-時間関係を示す。解析における衝撃力は鋼材突起部要素に作用した衝撃力を表

表-3 解析パラメータ

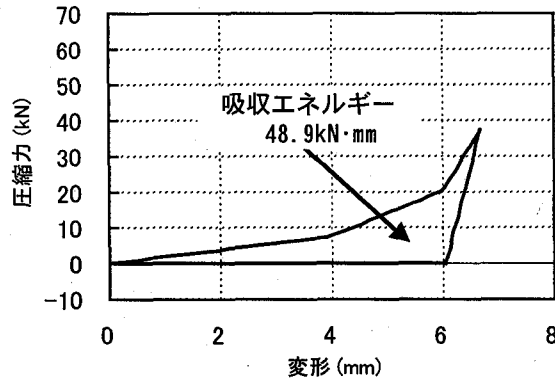
項目	単位	数値
鋼材のヤング係数 (E)	N/mm ²	2.06×10 ⁵
鋼材の密度 (ρ)	kg/cm ³	7.9×10 ⁻³
鋼材本体部断面積 (A)	mm ²	4.0×10 ⁴
鋼材突起部断面積 (A)	mm ²	2.5×10 ³
鋼材本体部一要素長 (l)	m	1.0×10 ⁻¹
鋼材突起部一要素長 (l)	m	5.0×10 ⁻²
粘性減衰 (α _v)		0
構造減衰比例定数 (β _p)		1.0×10 ⁻⁵



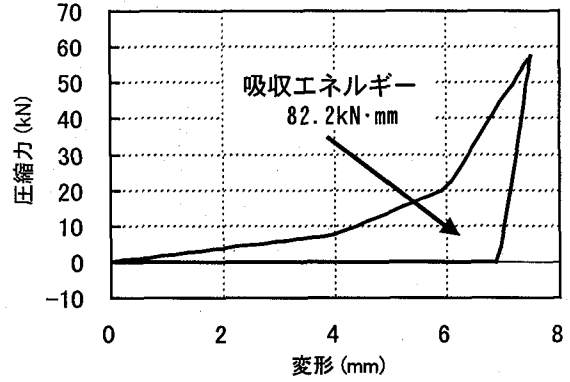
(a) 0.25m/s



(b) 0.40m/s



(c) 0.70m/s



(d) 1.00m/s

図-18 ゴム製緩衝材の圧縮力-変形関係

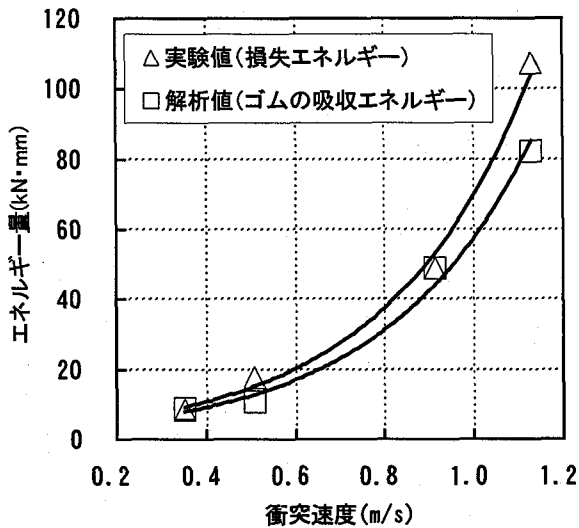


図-19 エネルギー量と衝突速度の関係

している。図-15 より衝突継続時間に関しては、設定速度が遅くなるほど解析値は実験値と比較して短く、また、最大衝撃力が発生する時間に関しては、解析値の方が実験値に比較して早くなる傾向がある。このことは、ガイドレールを用いることにより衝突時間中の動摩擦力を極力小さくしたが、衝突速度が遅くなるにつれガイドレールの動摩擦力の影響により実験での衝突継続時間が長くなったためと考えられる。

なお、最大衝撃力については(d) 1.00m/s の場合を除い

て概ね同じ値を示している。

4.2 ゴム製緩衝材がある場合

図-16 に衝突後の衝突鋼材および被衝突鋼材の速度を、図-17 に鋼材突起部の衝撃力-時間関係を示す。図-16 より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。図-17 より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には図-4 に示す静的実験結果を用いており、ひずみ速度効果による衝撃力の上昇の影響が考慮されていないためと考えられる。

図-18 に解析で得られたゴムの圧縮力と変形関係を示す。図-12 で示したように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吸収されたことがわかる。表-1 に示される実験で計測されたエネルギー損失量と図-18 の解析結果より得られたゴムのエネルギーの比較を図-19 に示す。

図-19 より、解析値より得られたゴムのエネルギー吸収量と比較して、実験でのエネルギー損失量がやや大きくなる傾向がある。このことは、実験においては、ゴムの吸収エネルギーの他にも桁間衝突時に発生する音によるエネルギーやゴム製緩衝材の熱エネルギーにより、運動エネルギーが損失されているのと考えられるので、解析

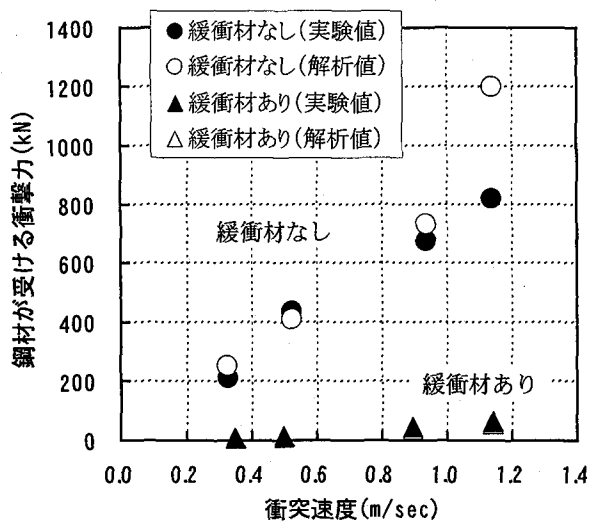


図-20 鋼材が受ける衝撃力と速度の関係

で得られたゴムの吸収エネルギー量よりも若干大きくなったと考えられる。

4.3 鋼材が受ける衝撃力

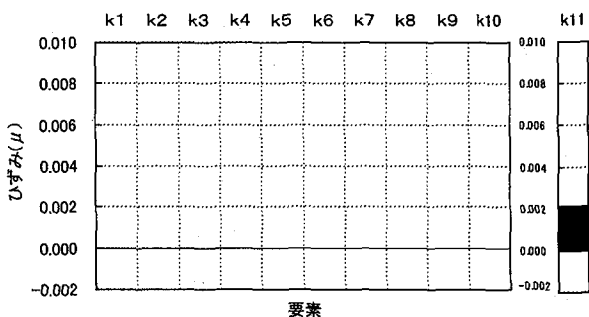
図-20 に鋼材が受ける衝撃力と速度の関係について示す。衝突鋼材の衝突速度が増加すると、鋼材が受ける衝撃力が増加する。今回行った速度の範囲では実験値、解析値とも緩衝材ありは緩衝材なしと比較して、衝撃力が約 1/15 に低減されることがわかった。

4.4 鋼材内部のひずみ分布について

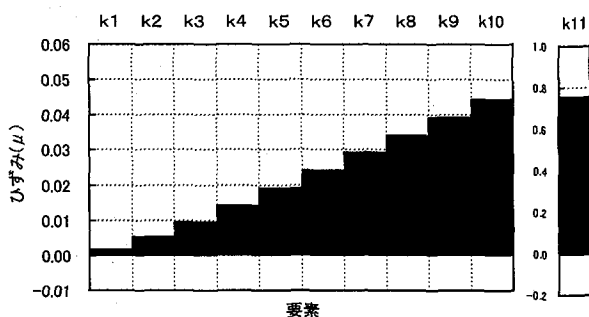
衝撃力が作用する際に鋼材中を伝播する応力波について検討を行った。図-21 にゴム製緩衝材がある場合、設定速度 1.00m/s における被衝突鋼材のひずみ分布について、被衝突鋼材本体および鋼材突起部について示している。なお、図-21 のグラフ(a)~(e)は、図-17 (d) 1.00m/s のときの①~⑤点に対応している。

図-21 (a) $t = 1.0 \times 10^{-5}$ (sec) (①点) は鋼材の材質 SS400 の公称値を用いて求められる応力波伝搬速度 $c = \sqrt{E/\rho}$ (E : ヤング係数, ρ : 密度) ≈ 5000 m/s に対して、鋼材突起部 (k11) の一要素長 5cm の伝搬時間に相当するものである。図-21 (a)より第 11 要素のみにひずみが生じており、それより先の要素にはひずみが伝搬していない様子が見られる。続いて、図-21 (b) $t = 2.0 \times 10^{-4}$ (sec) (②点) は被衝突鋼材の全長に応力波が伝搬する時間であるが、解析においても確かにひずみが第 1 要素である鋼材の先端に到達しており、ひずみ分布は 3 角形状となっている。続いて、図-21 (c) $t = 8.8 \times 10^{-3}$ (sec) (③点) は鋼材突起部ひずみ (k11) が最大値 111 μ となる時間であるが、ひずみ分布形状は 3 角形に保たれたまま図-21 (b) に比べて相似的に大きくなっており、鋼材に大きなひずみエネルギーが蓄積されていることがわかる。

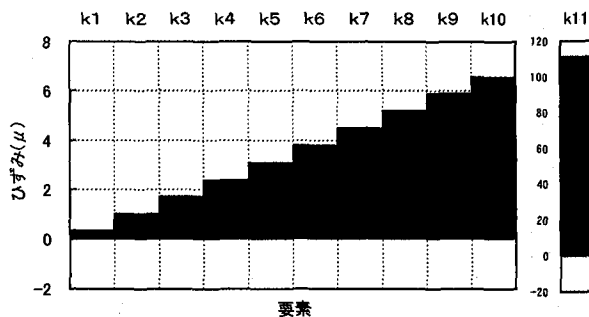
その後、離反過程に入り、 $t = 1.0 \times 10^{-2}$ (sec) (④点) におけるひずみ分布形状は 3 角形に保たれたまま相似



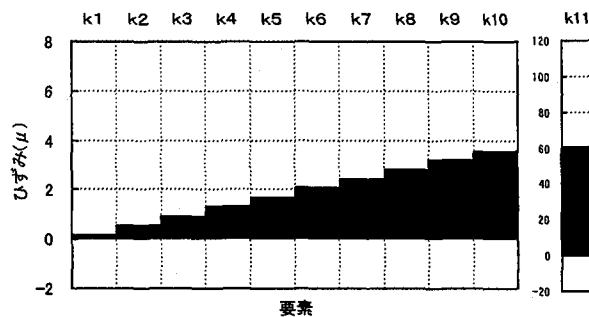
(a) 1.0×10^{-5} sec (①点)



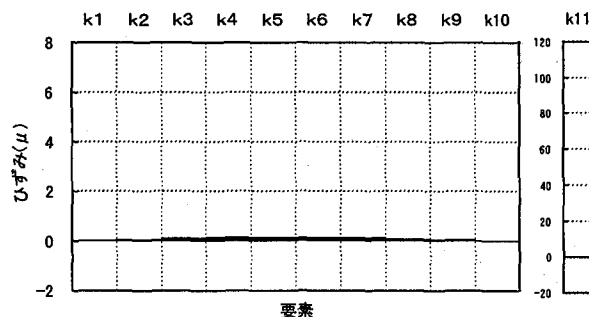
(b) 2.0×10^{-4} sec (②点)



(c) 8.8×10^{-3} sec (③点)



(d) 1.0×10^{-2} sec (④点)



(e) 1.1×10^{-2} sec (⑤点)

図-21 被衝突鋼材内のひずみ分布 (設定速度 1.00m/s, ゴム製緩衝材あり)

的にひずみの値が小さくなる傾向を示し、2つの鋼材はそれぞれ圧縮状況から離反していく様子がうかがえる。

図-21 (e) $t=1.1 \times 10^{-2}$ (sec) (⑤点) は衝突が終了した時間であり、ひずみはほとんど発生していないことがわかる。

5. 結論

本研究では、桁間衝突における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。解析に当たっては、ゴム製緩衝材の非線形性ならびに戻り剛性について考慮し、実験結果との比較検討を行った。以下に本研究で得られた結果を要約する。

- (1) 実験よりゴム製緩衝材がない場合は、衝突時に運動エネルギーの損失はほとんどないが、ゴム製緩衝材を用いると衝突時に運動エネルギーが約 40% 消失することがわかった。すなわち、ゴム製緩衝材を用いると衝突後における鋼材の速度 (エネルギー) は小さくなることから、高架橋全体系を考えた場合の桁の応答としては好ましい傾向である。
- (2) 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。
- (3) ゴム製緩衝材がある場合の、衝撃力-時間関係の解析値から最大衝撃力および衝突継続時間はほぼシミュレートしている。
- (4) ゴム製緩衝材がある場合の最大衝撃力は緩衝材がない場合の約 1/15 となり、明確に低下し桁端部の破壊を防止する効果が期待できる。
- (5) 衝撃力-時間関係の衝撃力の最大値になる時間が実験と解析において異なっている点については今後の検討が必要である。

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) 園田佳巨，衛藤芳昭，石川信隆，生駒信康，彦坂熙：ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察，土木学会論文集，No.598/I-44，pp.333-346，1998.7.
- 3) 梅曙東，西村宣男，北脇道夫，福田清，松崎慎一郎：

隣接橋梁の地震時衝突による衝撃力の緩和法に関する実験，鋼構造年次論文報告集，第7巻，pp.1-8，1999.11.

- 4) 都築昭夫，長島文雄，中田宏司，金子修，大竹省吾：鋼製緩衝材の荷重変形特性に関する実験的検討，鋼構造年次論文報告集，第7巻，pp.9-14，1999.11.
- 5) 長島文雄，皆川勝，島田泰至，寺尾圭史，佐藤豪：鋼製緩衝材の荷重変形特性に関する解析的検討，鋼構造年次論文報告集，第7巻，pp.15-22，1999.11.
- 6) 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製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.
- 7) 村田清満，高山智宏，後藤貴士，生駒信康：エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置，第2回防震・制震コロキウム論文集，土木学会地震工学委員会，pp.173-178，2000.11.
- 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落錘式衝撃実験と伝達荷重の予測に関する一考察，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1655-1664，2001.3.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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製耐震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.
- 17) 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.

(2001年9月14日受付)