

緩衝材を有する2層RCはりの耐衝撃性および多質点系モデルによる衝撃応答解析

IMPACT RESISTANCE OF DOUBLE-LAYERED RC BEAM WITH SHOCK-ABSORBER
AND IMPACT RESPONSE ANALYSIS BY MULTI-MASS MODEL

大野 友則・ 山田 俊二・ 上田 眞稔・ 石川 信隆・ 内田 孝

By Tomonori OHNO, Syunji YAMADA, Masatoshi UEDA, Nobutaka ISHIKAWA,
and Takashi UCHIDA

In civil engineering fields, there are some RC structures to be given the dynamic considerations against such impact loads as the accidental collisions by aircraft, ships and vehicles etc.. A double-layered RC beam member with shock absorber, which is developed in this study, is expected to have the higher impact resistance than the usual RC beam. Thus, the effects of shock absorber on the size of maximum displacement of beam, which is considered to be an index of impact resistance, is experimentally examined. And, to investigate fundamentally the impacted behaviors and impact resistance of double-layered RC beam, the impact analysis by a multi-mass model is presented and executed. Comparing the results by analysis to that by experiment, it can be found that the presented analytical method may be useful to predict the impact resistance of this type of beam.

1. はじめに

原子力発電所、重化学工業プラントなど産業の基幹となる施設あるいは砂防・落石防護構造物などの設計にあたっては、偶発的な事故によって発生する衝撃外力に対してもその安全性を確保することが必要である。構造物が航空機、船舶、車両などの物体の衝突によって衝撃荷重を受けた場合、その応答は衝突する物体と被衝突体が有する質量、剛性、形状あるいは衝突速度などの要因によって大きく異なるため、構造物の衝撃応答を明らかにすることは極めて困難な問題であることが知られている¹⁾。衝撃的外力を対象とする場合は、材料に生ずる応力～ひずみ関係および部材の応答現象が静的外力を対象とするときと全く異なる。さらに、耐衝撃設計は衝撃的外力とその作用を受ける構造物との相互関係を考慮しなければならず、設計に用いる衝撃荷重の設定ならびに構造物や部材自体の耐衝撃性など明らかにすべき問題が多く残されている。

一方、部材の衝撃抵抗力あるいは耐衝撃性の指標として、終局耐力や終局変形量の大きさあるいはこれらを総合的に評価できるエネルギー吸収容量を用いることが合理的であるという認識が定着しつつある²⁾。衝撃荷重に対する部材の応答は、衝突直後の極めて短時間に生ずる応力波による1次応答とその後の時間経過に伴って生じる2次応答(局部および全体応答)に便宜上区分される³⁾。2次応答には、コンクリート部

-
- | | | |
|------|--------------------|-----------------------|
| * | 工博 防衛大学校助教授 土木工学科 | (〒239 横須賀市走水1-10-20) |
| ** | 防衛大学校理工学研究科学生 | (〒239 横須賀市走水1-10-20) |
| *** | (株)竹中工務店技術研究所主席研究員 | (〒136 東京都江東区南砂2-5-14) |
| **** | 工博 防衛大学校教授 土木工学科 | (〒239 横須賀市走水1-10-20) |

材の衝突面で生じる表面破壊と裏面コンクリートの剥離、コンクリート部材への衝突物体の貫入、貫通と部材全体の曲げあるいはせん断変形応答がある。しかしながら、これらの現象は、衝撃外力を考慮する必要があるすべての構造物に共通的に存在するものではない。構造物の種類、目的あるいは用途の相違によって、対象となる外力の特性（速度、重量、剛性など）が異なるので、衝突によって生じる応答や破壊現象にも相違があることは明らかである。すなわち、構造物に応じた破壊条件（設計条件）があり、この条件を満足させるような耐衝撃性の向上を図ることが必要である⁴⁾。

構造物の質量に対して衝突物体の質量が相対的に小さく、衝突速度が非常に大きい場合は、物体の貫通やコンクリート部材の裏面剥離などの局部破壊現象が極めて重要な問題となる。ところで衝突問題は、衝突物体と被衝突体の間のエネルギー授受の観点からも考察することができる。一般に、衝突前に衝突物体が有していたエネルギーは、衝突時の衝突物体自体の変形によるエネルギー吸収、コンクリート表面または裏面の破壊によるエネルギー消散、貫入および貫通抵抗によるエネルギー消散そして部材の変形によるエネルギー吸収などによって置換されると考えられる。したがって、これらいずれかのエネルギー量を増加させることによって所要の耐衝撃性が得られることになる⁴⁾。

このような観点から本研究では、物体の高速衝突（衝突速度が数100m/sec）に対して耐衝撃性の大きい構造部材の開発を目的とするため、通常の鉄筋コンクリートはり（以下、RCはりと呼ぶ）を軸方向上下に切断してその間にゴムを挟んだ形式の2層RCはりを考案し、まず低速衝突実験（衝突速度が数m/sec）によりRCはりの2層化による効果とゴムの緩衝効果について調べている。また、多質点系モデルを用いた応答解析手法を提示し、解析結果と実験結果を比較することにより本解析法の適用性を確認している。なお本研究では、耐衝撃性の指標として衝突点における上下はりの最大変位量の大きさをを用いている。

2. 実験の概要

2.1 試験体

本研究では、RCはりの2層化による効果および緩衝材としてのゴムの効果を調べるために、表-1に示す2シリーズ8種類（試験体名M1～M4、C1～C4）の試験体を用いた。Mシリーズの試験体は、いわゆる通常のRC試験体であり、

表-1 試験の種類および条件

試験体の タイプ		試験体 呼び名	重錘 重量 (kg)	衝 突 速 度 (m/s)	主 鉄 筋		スチール ⁷⁾		緩衝材 (ゴム)	
					種類	pt (%)	種類	pw (%)	剛 性 (kg/cm ²)	厚さ (mm)
M 試 験 体		M1-100	100	8.0	4D13	0.84	D6 φ200	0.21		
		M1-150	150							
		M2-100	100	8.0	4D13	0.84	D6 φ50	0.85		
		M2-150	150							
		M3-100	100	8.0	6D13	1.33	D6 φ200	0.21		
		M3-150	150							
		M4-100	100	4.0	8D13	1.68	D6 φ200	0.21		
				8.0						
C 試 験 体		C1-100	100	8.0	8D13	1.69	D6 φ200	0.21	0	0
		C2-100	100	4.0 8.0					24	15
		C3-100	100	4.0 8.0					24	30
		C3-150	150	8.0						
		C4-100	100	4.0 8.0					200	30

2層RCはりとの衝撃応答の相違を比較する目的で試験を行っている。2層化したRCはりの上、下はりは、Mシリーズ試験体断面を水平に半分に切断した大きさである。このはりは、すべての試験体に共通である。図-1および表-1に、その寸法・諸元を示す。耐衝撃性に影響を及ぼすと考えられる試験体の諸元としては、緩衝材の有無、厚さ、剛さの他に主鉄筋比やスターラップ筋比が挙げられる。Mシリーズでは、主として主鉄筋比とスターラップ筋比の相違による影響について調べている。C1試験体は、緩衝材を有しない2層RCはりであり、同一の諸元をもつ通常RCはりのM4試験体に対して積層の効果を調べた。C2～C4は、それぞれ表-1に示す弾性係数および厚さの異なるゴムシートを上下はりの間に挟んだ、緩衝材を有する2層RCはりである。なお、RCはりとゴムシートは接着していない。

2.2 実験装置および計測

実験装置の概要を、図-2に示す。落錐式衝撃载荷装置は、重量約10kgfの鋼板を重ねて所定の重量に調整した重錘を電磁石を用いて所定の高さにつり上げ、電源を切ることによって自由落下させる装置である。重錘は、ガイド棒によって試験体中央に衝突させることができる。試験条件を両端単純支持とするために、試験体を回転が自由なローラー支持台に乗せ、さらに衝突時に両端の跳ね上がりを拘束するために、ナイフエッジを有する挟具により支持点でRCはりを挟み込んだ。

実験における計測は、衝突による荷重、上下各はりのたわみによる変位および引張側鉄筋のひずみである。荷重は、重錘下部に取り付けたロード・セルを試験体に直接衝突させることにより得られた値である。変位は、図-3に示す位置に差動トランス変位計（米国シェービッツ社製、交流式、応答周波数10kHz、型名3000、4000HR）のコア・ロッドの一端を取り付けて計測した。また、ひずみの計測位置を図-3に示す。

2.3 実験条件

RCはりの積層化および緩衝材としてのゴムによる緩衝効果を調べる目的から、主鉄筋比およびスターラ

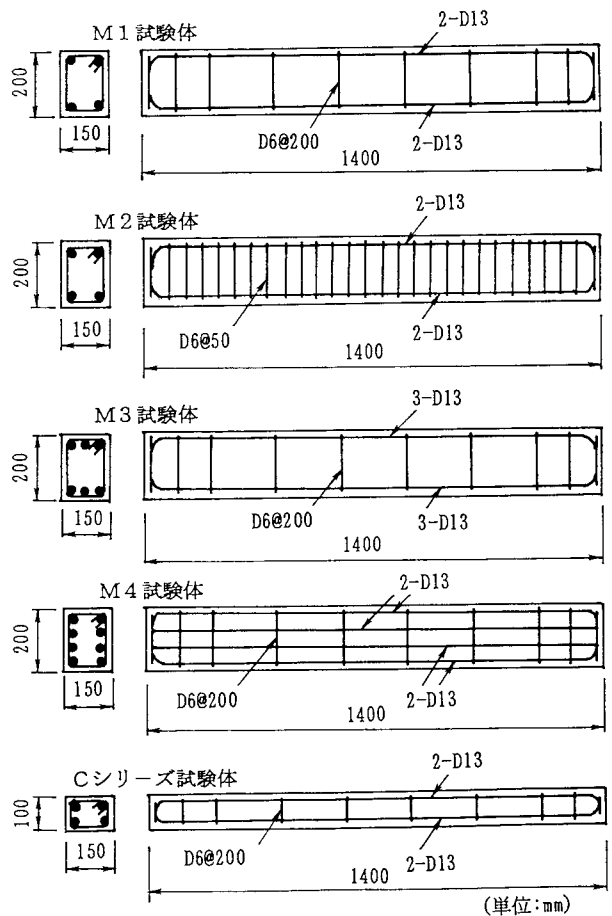


図-1 MおよびCシリーズ試験体

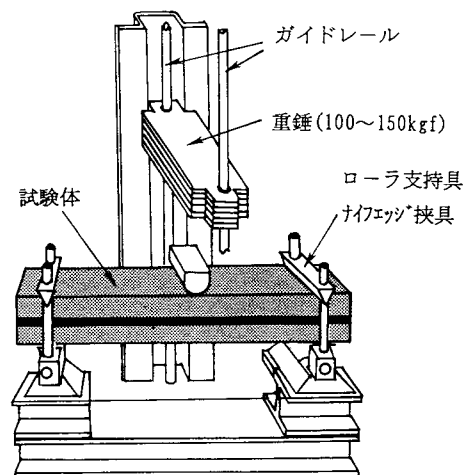


図-2 落錐式衝撃実験装置の概要

ップ筋比の異なる通常RCはり試験体および諸元の異なる緩衝材を有する試験体を用いて衝突速度および重錘重量を変化させた数種類の実験を行った。

実施した実験の概要を表-1に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 試験体の損傷状況および変位応答

図-4に、重錘重量が $W=150\text{kgf}$ で、衝突速度が $V=8\text{m/sec}$ のときの損傷状況の比較を示している。主鉄筋比が同じM1とM2試験体では、その相違はあまり認められない。主鉄筋比が大きいM3およびC3試験体では、損傷が衝突点近傍に集中する傾向がある。次に、Cシリーズ試験体を対象として、衝突速度の大きさの相違（重錘重量 $W=100\text{kgf}$ ）による損傷を比較すると、図-5のようになる。衝突速度が2倍では、衝突エネルギーでは4倍になるので、損傷は著しく大きくなる。緩衝材（ゴム）の有無および厚さ（弾性係数 $E_r=24\text{kgf/cm}^2$ ）の相違による損傷状況の違いをみると、衝突速度が 4m/sec では緩衝材の厚さが 15mm のC2試験体の損傷が最も軽微である。衝突速度が 8m/sec では、軟かくかつ厚い緩衝材を有するC3試験体の損傷が軽微になる。いずれの速度においても、厚い緩衝材を有するC3試験体に生じたひびわれの範囲が広く、荷重分散の効果が認められる。

次に、緩衝材の有無および剛さによる相違を調べるために、C1試験体と緩衝材の厚さが等しい（ $t=30\text{mm}$ ）C3、C4試験体に対し、重量 $W=100\text{kgf}$ の重錘を速度 4m/sec および 8m/sec で衝突させた。図-6に、その結果を示す。図-6(a)から、衝突速度が 4m/sec の場合には、緩衝材を有しかつ剛いC4試験体の損傷が小さい。しかし衝突速度が 8m/sec になると、ひびわれの数やひろがりと同程度になるが、軟らかい緩衝材を有するC3試験体のひびわれの幅が小さく残留変位量も小さい。

図-7は、積層化の影響を調べた

ものである。M4とC1試験体は、同一の主鉄筋比とスターラップ筋比（ $p_t=1.68\%$, $p_w=0.21\%$ ）であるが、曲げ耐力が異なる。損傷状況をみると、当然両者のひびわれ状況には相違が認められる。

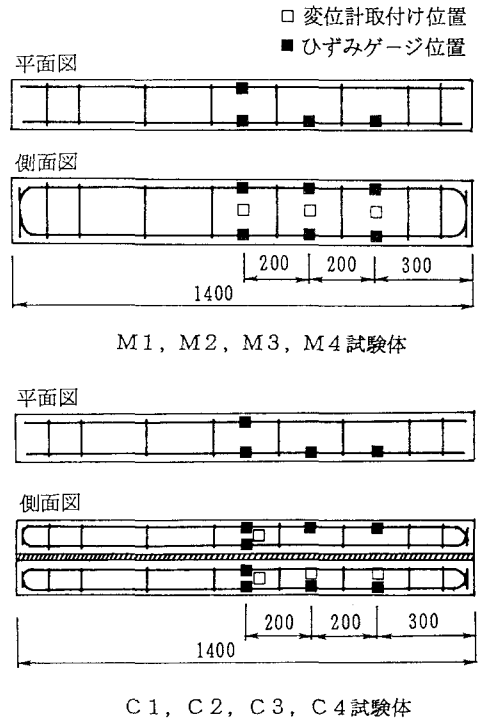


図-3 計測の種類および位置

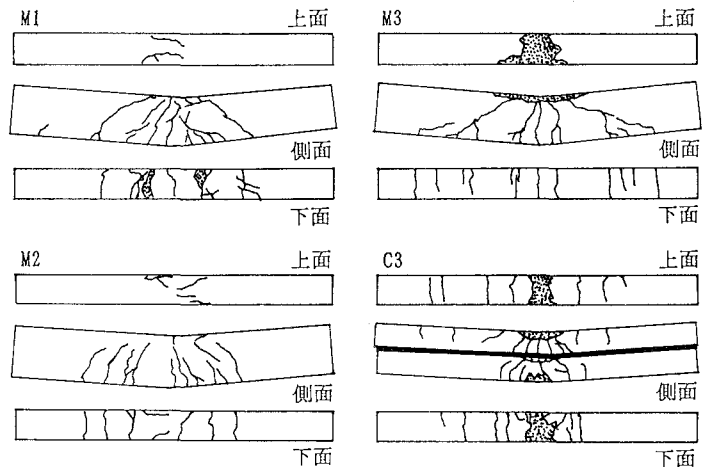


図-4 損傷状況の比較（ $V=8\text{m/sec}$, $W=150\text{kgf}$ ）

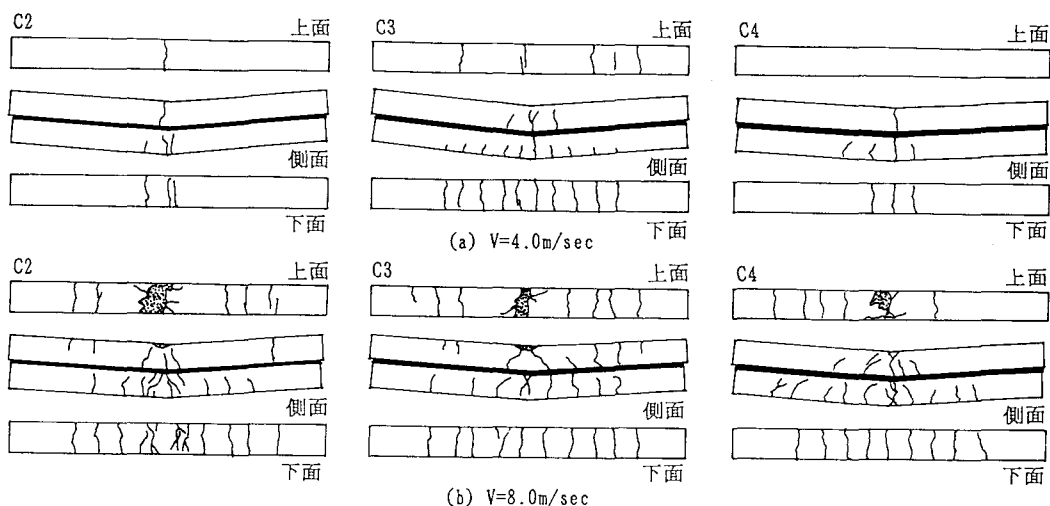


図-5 衝突速度の相違による損傷の比較(W=100kgf)

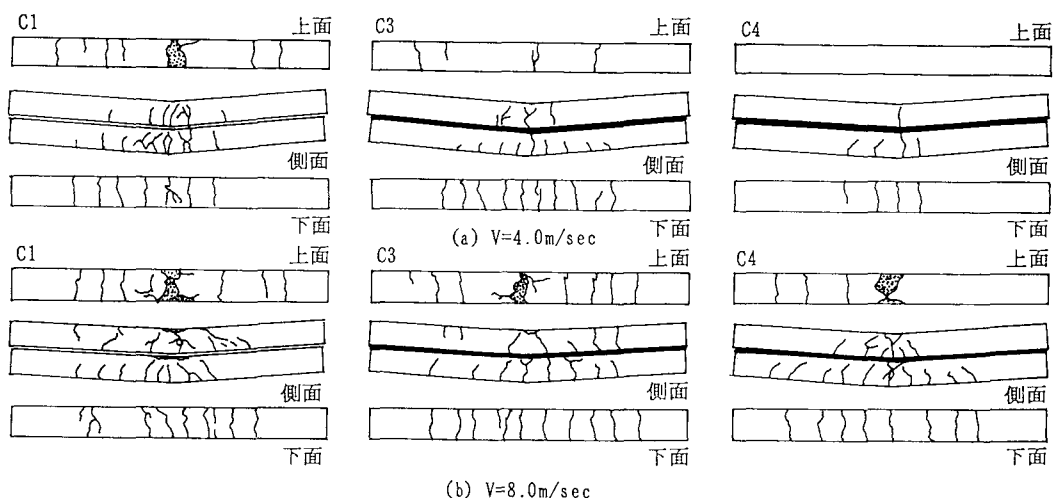


図-6 緩衝材(ゴム)の剛さの相違による損傷の比較(W=100kgf, t=30mm)

図-8には、衝突速度が4m/secの場合の変位応答の比較を示している。図から、通常RCはりのM4試験体の方が、最大応答変位量および残留変位量が小さい。これは、上述したように曲げ耐力の相違によるものと考えられる。図-9に、Cシリーズの実験で得られた荷重および変位の時刻歴応答の一例を示す。

3.2 耐衝撃性に影響を及ぼす各種要因による検討

試験体に生じた損傷および変位応答の結果に基づいて、試験体が有する各種要因毎にその効果を調べると以下のようになる。

(1)重錘重量の影響：衝突速度が一定 ($V=8\text{m/sec}$) で重量が異なる ($W=100, 150\text{kgf}$) 場合には、衝突時の外力エネルギー比は1:1.5である。通常RCはりの損傷状況は、重量が大きくなると載荷点を中心にひびわれの生じる範囲が広るとともに、ひびわれの長さ、大きさおよび数が増加する傾向がみられる。一方、断面が小さいRCはりを2層に重ねた2層RCはりでは、ひびわれが載荷点近傍に集中して局所的な損傷が進展する傾向が認められた。

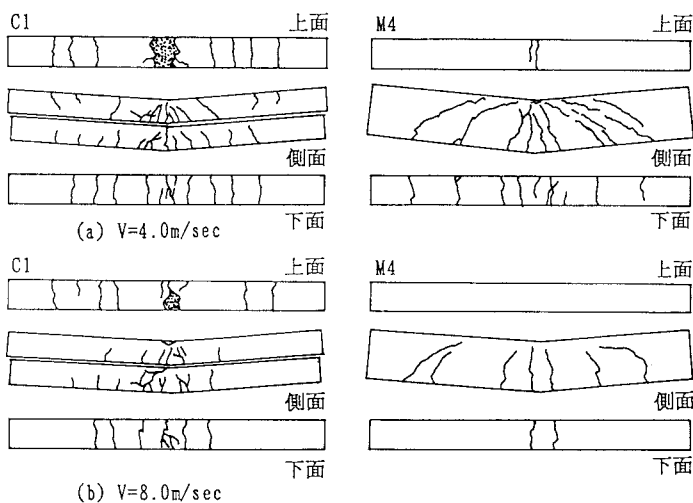


図-7 積層化による損傷の比較($W=100\text{kgf}$)

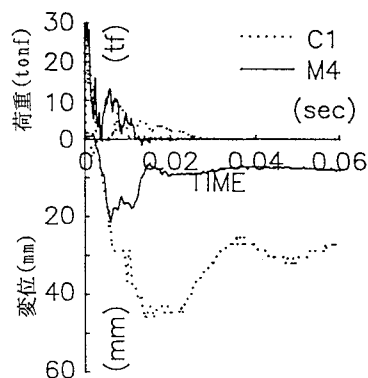


図-8 積層化による変位応答の比較

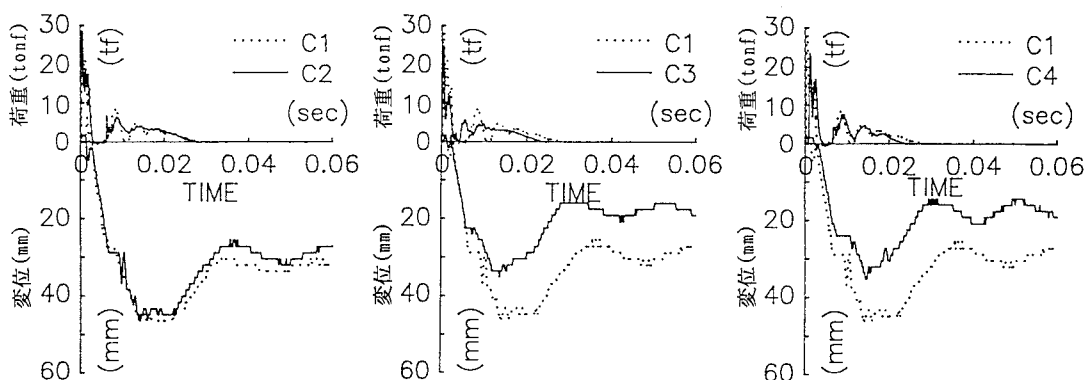


図-9 Cシリーズ試験体の変位応答の比較
($W=100\text{kgf}$, $V=8.0\text{m/sec}$)

(2)衝突速度の影響：重錘重量が一定 ($W=100\text{kgf}$) で速度が異なる ($V=4.8\text{m/sec}$) 場合、外力エネルギー比は1:4となる。通常RCはり(M4)では、エネルギーの増大にともなって載荷点近傍のひびわれが増加しはりの軸方向全体にわたって曲げせん断ひびわれが進展する。2層RCはりでは、上側はりの載荷面のコンクリートかぶりが剥落するとともに、載荷点近傍にひびわれが集中する。下側はりには、上側はりに作用した集中外力が分散されて作用する結果、はり全体にわたって曲げひびわれが生じている。また、上側はりの上面に曲げひびわれが生じていることから、衝突後上側はりは負の曲げ変形も生じたことがわかる。

(3)主鉄筋の影響：鉄筋比が小さい場合には、載荷点近傍に損傷が集中する。鉄筋比の増大にともない、ひびわれの範囲ははり全体に広がる傾向がみられる。また、外力エネルギーが大きくなると載荷点（上側はり上面）の損傷が大きくなる。

(4)スターラップの影響：ひびわれが生ずる範囲は、スターラップ筋比の大小によらずほぼ同程度である。スターラップ筋比が小さい場合には、曲げせん断ひびわれが卓越するが、スターラップ筋比の増大にともな

てせん断が拘束され曲げひびわれが卓越する。

(5) ゴムの剛さによる影響：ゴムをはりの間に有することにより、荷重が分散され局部的な損傷から全体へと移行する傾向がみられる。ゴム厚が同じC3とC4試験体を比較すると、その相違は顕著ではないが軟らかいC3の方がややひびわれが生じる範囲が小さくなる。

(6) ゴムの厚さによる影響：ゴムの材質が同じ場合、厚い方が荷重の分散および吸収効果が大きい。

(7) 積層化の影響：ひびわれ損傷モードが異なる。

4. 多質点系モデルによる衝撃応答解析

4.1 緩衝材を有する2層RCはりの解析モデル

実際のRCはりは、連続した質量と剛性を有するが、これを図-10に示すような任意長の剛体で質量を持たないパネル要素に分割し、はりの質量と剛性はパネル要素の接合点に集中させた。上下のはりの間の緩衝材は、質量を無視し、圧縮ばねとして上下の質点の間に挿入した。質点位置*i*の上下質点における力のつり合いから、次に示す運動方程式が導かれる（図-11(a)参照）。

$$m_{ui} \ddot{y}_{u,i} = P_i + (M_{u,i+1} - M_{u,i})/L_{i+1} - (M_{u,i} - M_{u,i-1})/L_i - P_{ki} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$m_{li} \ddot{y}_{l,i} = (M_{l,i+1} - M_{l,i})/L_{i+1} - (M_{l,i} - M_{l,i-1})/L_i + P_{ki}$$

ここに、 m_{ui} 、 m_{li} 、 $\ddot{y}_{u,i}$ 、 $\ddot{y}_{l,i}$ は、点*i*の上下質点における集中質量、応答加速度； P_i 、 P_{ki} は、それぞれ点*i*の上、下質点に作用する外力； L_i はパネル*i*の要素長、； $M_{u,i}$ 、 $M_{l,i}$ は点*i*の上下質点に作用する曲げモーメント（ $M_{u,l,i+1} - M_{u,l,i} = V_{u,l,i+1} \cdot L_{i+1}$ 、 $M_{u,l,i} - M_{u,l,i-1} = V_{i-1} \cdot L_i$ ）である。

次に、図-11(b)に示す幾何学的関係から、以下の変形適合条件が得られる。

$$\begin{aligned} \theta_{u,i} &= -y_{u,i-1}/L_i + y_{u,i} \cdot (1/L_i + 1/L_{i+1}) - y_{u,i+1}/L_{i+1} \\ \theta_{l,i} &= -y_{l,i-1}/L_i + y_{l,i} \cdot (1/L_i + 1/L_{i+1}) - y_{l,i+1}/L_{i+1} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

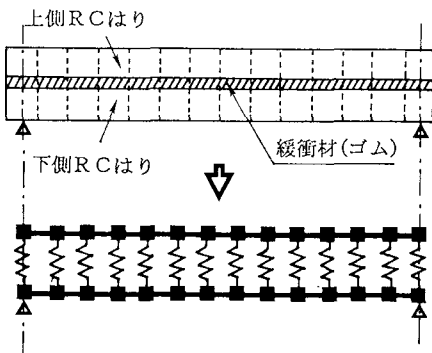
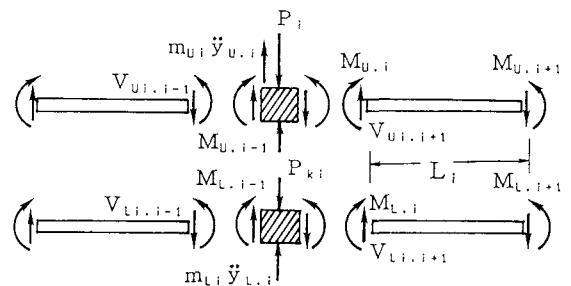


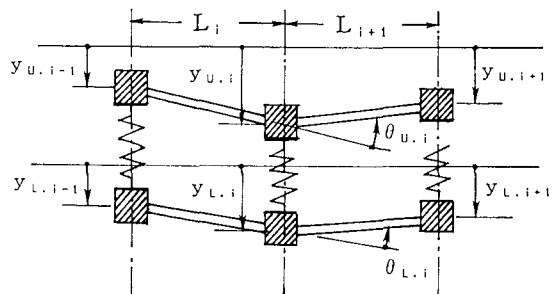
図-10 多質点系はりモデルによる2層RCはりのモデル化

ここに、 $\theta_{u,i}$ 、 $\theta_{l,i}$ 、 $y_{u,i}$ 、 $y_{l,i}$ は、それぞれ点*i*における上下質点の回転角および変位である。また、 $L_i/2$ から $L_{i+1}/2$ までの区間の曲率 $\phi_{u,i}$ 、 $\phi_{l,i}$ を一定と仮定すれば、回転角 $\theta_{u,i}$ 、 $\theta_{l,i}$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} \theta_{u,i} &= \phi_{u,i} \cdot (L_i + L_{i+1})/2 \\ \theta_{l,i} &= \phi_{l,i} \cdot (L_i + L_{i+1})/2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$



(a) 上下質点における力のつり合い



(b) パネルの変形適合条件

図-11 任意位置の質点*i*における力のつり合いおよび上、下はりの変形適合条件

式(2)と式(3)から、点*i*における曲率と変位の関係が次のように得られる。

$$\begin{aligned}\phi_{u,i} &= 2\{-y_{u,i-1}/L_i + y_{u,i} \cdot (1/L_i + 1/L_{i+1}) - y_{u,i+1}/L_{i+1}\} / (L_i + L_{i+1}) \\ \phi_{L,i} &= 2\{-y_{L,i-1}/L_i + y_{L,i} \cdot (1/L_i + 1/L_{i+1}) - y_{L,i+1}/L_{i+1}\} / (L_i + L_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (4)\end{aligned}$$

また点*i*における曲率速度($\dot{\phi}$)と変位速度($\dot{y}$)との関係は、式(4)と同様の形式で以下のように表される。

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_{u,i} &= 2\{-\dot{y}_{u,i-1}/L_i + \dot{y}_{u,i} \cdot (1/L_i + 1/L_{i+1}) - \dot{y}_{u,i+1}/L_{i+1}\} / (L_i + L_{i+1}) \\ \dot{\phi}_{L,i} &= 2\{-\dot{y}_{L,i-1}/L_i + \dot{y}_{L,i} \cdot (1/L_i + 1/L_{i+1}) - \dot{y}_{L,i+1}/L_{i+1}\} / (L_i + L_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (5)\end{aligned}$$

ここで、解析に用いる曲げモーメントと曲率の履歴モデル(M $\sim\phi$ モデル)は、ひずみ速度の影響を考慮した図-12に示す動的履歴モデル^{5), 6), 7)}を用いる。図中の、上および下降伏曲げモーメント($M_{V,U}$ 、 $M_{V,L}$)は、以下の式で与えられる⁵⁾。

$$\begin{aligned}M_{V,U} &= 0.898 + {}_sM_V + 0.324(\log \dot{\phi}) + 0.062(\log \dot{\phi})^2 + 0.005(\log \dot{\phi})^3 \\ M_{V,L} &= 0.544 + {}_sM_V + 0.066(\log \dot{\phi}) \quad \dots\dots\dots (6)\end{aligned}$$

ここに、 ${}_sM_V$ は静的荷重に対する降伏曲げモーメントである。衝撃応答解析における数値積分には、Newmarkの β 法($\beta=1/6$)を用い、時間増分は解の安定性を検討した結果から $\Delta t=0.00001\text{sec}$ とした。

4.2 緩衝材(ゴム)のばね特性^{8), 9)}

ゴム特性を表現する式としては、加硫ゴムを対象としたTreloarの式⁸⁾がある。これは、1辺が1cmの立方体のゴムに圧縮力が作用する場合の応力と変形の関係を理論的に求めたものであり、次式で与えられる。

$$F = (\rho R T / M) \cdot (\alpha - 1/\alpha^2) = G \cdot (\alpha - 1/\alpha^2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 F は応力(kgf/cm²)、 ρ は密度(=0.95gr/cm³)、 R は気体常数($8.3 \times 10^7 \text{erg/deg}\cdot\text{mol}$)、 T は絶対温度($T=300^\circ\text{K}$)、 M は高分子鎖1個の分子量(=6 $\times 10^3$:無次元量)、 α は伸長比(=1- $\Delta l/l$)、 $G = \rho R T / M$ (kgf/cm²)である。

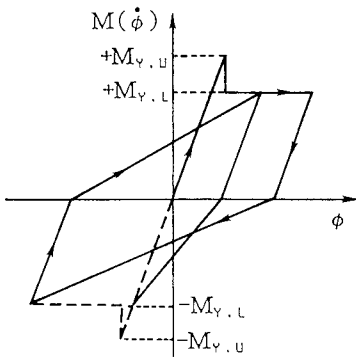


図-12 動的M $\sim\phi$ 履歴モデル

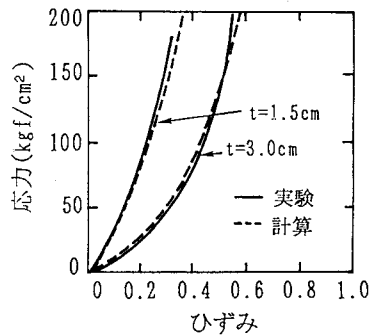


図-13 ゴム材料の応力 $\sim$ ひずみ特性

さて、本研究で用いたゴムは厚さに比べて荷重作用面の面積が極めて大きいゴム板である。あらかじめ行った予備解析の段階で、Treloar式をそのまま用いると解析結果が実験結果と合わないことが明らかとなった。このため、載荷面積の大きさおよび厚さの異なるゴム試験片を用いた数種類の圧縮試験（表-2参照）を行い、その結果に基づいて式(7)を次のように修正した。

$$F = G \cdot (\alpha - 1/\alpha^2) / N \cdot D \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 N は厚さと載荷面の長辺の比、 D は載荷面の面積(cm²)である。式(8)から得られる結果を実験結果と比較すれば、図-13の破線のようにになる。図からわかるように、式(8)を用いれば任意の大きさの矩形ゴム板の応力 $\sim$ 変形関係を表すことができる。さらに、本解析に用いるばねは、分割したRCはりの要素長に対

応するゴム部分に相当する。したがって、モデルの1要素当りのばね力 P_k は、次式で与えられる。

$$P_k = G \cdot (\alpha - 1/\alpha^2) / (W/L) \cdot D \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 W はゴムの厚さ(cm)、 L はRCはりのスパン長(cm)、 D は分割したRCはりの要素部分の面積(cm^2)である。なお、ゴムの圧縮試験では、

載荷速度の異なる3種類の試験、すなわち静的、低速度(約0.04m/sec)および高速速度(約4.0m/sec)載荷試験を行った。

図-14には、静的および高速載荷に対する結果を示している。図から、ゴムの応力～変形関係に及ぼす載荷速度の影響は、変位が小さい範囲ではあまり大きくなかった。したがって、式(9)は静的試験の結果に基づいて定式化したものである。

表-2 ゴム試験片の圧縮試験

試験片番号	ゴム剛性 (kgf/cm ²)	厚さ (mm)	縦 (cm)	横 (cm)	載荷速度
1	24	15	30.0	30.0	静的載荷
2		30	30.0	30.0	
3		15	15.0	15.0	
4		30	15.0	15.0	低速載荷 約0.04m/s
5		60	15.0	15.0	
6		15	15.0	5.0	高速載荷 約4.0m/s
7		30	15.0	5.0	

5. 応答解析モデルの適用性と2層RCはりの耐衝撃性について

5.1 解析結果と実験結果の比較

図-15～17に、変位応答の時刻歴について解析と実験結果の比較を示す。なお、解析においては、実験で得られた荷重～時間データを入力として用いた。

図-15は、緩衝材を有しない2層RCはり(C1試験体)に、重量100kgfの重錘が4.0および8.0m/secの速度で衝突した結果である。この試験体では、はりの間に緩衝材が存在しないので、解析モデルのばね力は便宜的にコンクリートの縦弾性係数(2.1×10^5 kg/cm²)を代入して求めた。この図を見ると、両者は良く一致していることがわかる。このことから、コンクリート同士の衝突問題では、接触ばね力を算定する際に定数としてコンクリートの縦弾性係数を用いると良い。図-16は、重量100kgfの重錘が4.0および

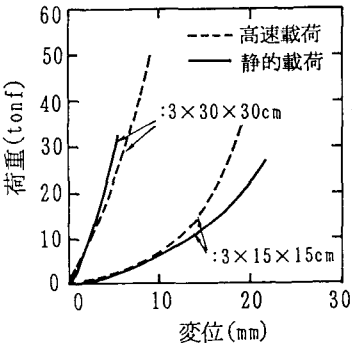


図-14 ゴム材料の荷重～変形特性に及ぼす載荷速度の影響

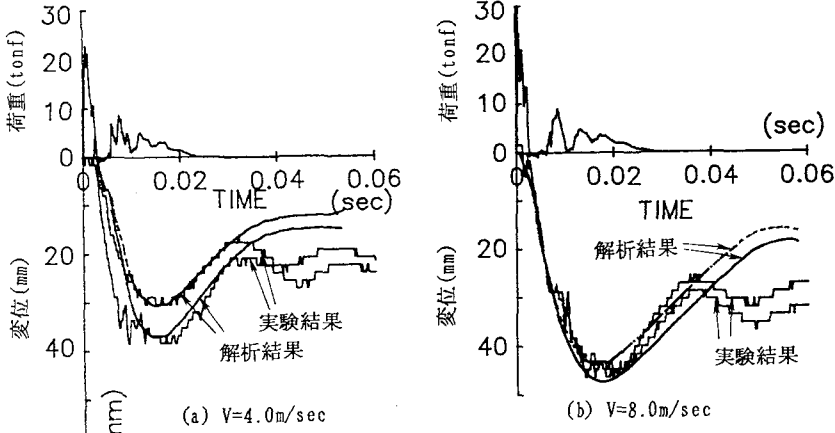


図-15 変位応答の比較(C1試験体:W=100kgf)

8.0m/secの速度でC2試験体（ゴム厚15mm）に衝突した結果、図-17は重量100kgfの重錘が4.0および8.0m/secの速度でC3試験体（ゴム厚30mm）に衝突した結果を示す。これらの結果から、本研究で提示した解析モデルおよびばね特性を用いることにより、低速度衝突に対する2層RCはりの衝撃応答を載荷後から最大変位近傍まで良好にシミュレートできることが認められる。

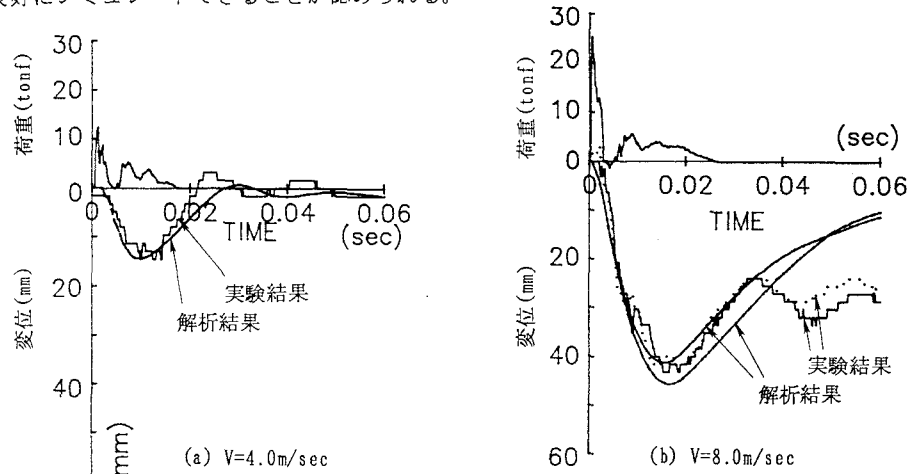


図-16 変位応答の比較(C2試験体:W=100kgf)

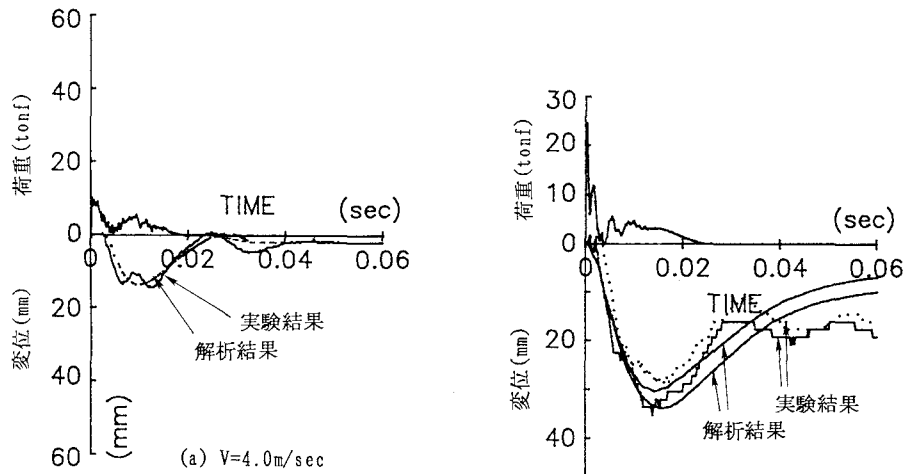


図-17 変位応答の比較(C3試験体:W=100kgf)

5.2 2層RCはりの耐衝撃性に及ぼす緩衝材の効果

図-18は、弾性係数 E_r が $E_r=24\text{kgf/cm}^2$ のゴムを用いたとき、厚さの相違が最大応答変位の大きさに及ぼす影響を調べたものである。図中、□印は解析結果を表し、■印は実験結果を表す。解析結果は実験で得られた最大変位の大きさと良好に一致している。ゴムの厚さが増加するにつれて、最大変位量は減少している。次に図-19は、ゴム厚さが一定 (30mm) の場合、弾性係数の相違による影響を調べたものである。この図においても、解析値と実験値は良好に一致していることがわかる。弾性係数が増大する、すなわち硬くなるにつれて、最大変位量が増加する傾向が認められる。

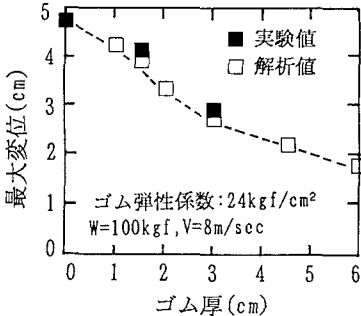


図-18 最大変位量とゴム厚さの関係

6. おわりに

本研究は、緩衝材を有する2層RCはりの衝撃応答特性および耐衝撃性を検討するために、多質点系モデルを用いた簡便な解析手法を提案したものである。解析モデルは、連続体としてのRCはりを集中質量系に置換した離散化モデルである。また、緩衝材として用いたゴムの応力～変形関係として、ゴムの大きさを考慮した特性式を提示した。本解析法を用いて得られた変位応答は実験結果と良好に一致した。したがって、衝撃力を受ける2層RCはりの衝撃挙動および耐衝撃性を検討する際に有効であると考えられる。

本研究で得られた成果ならびに問題点は以下のように要約できる。

- (1) 緩衝材として同一規格のゴムを使用した場合、弾性係数が小さく（軟質）かつ厚さが大きいほど緩衝効果が増大する。
- (2) ゴムの弾性係数の大きさは、ゴムの寸法（幅、長さおよび厚さ）により変化する。また、ゴム材料のひずみ速度効果の影響は顕著でなく、無視できる。
- (3) 柔らかいゴムを用いた場合、上側はりよりも下側はりの変位量が大きくなる。ゴムが硬質になると、上下はりの変位応答はほぼ同様になる。
- (4) 低速度の衝撃力に対する2層RCはりの衝撃実験結果に対して、本解析法は有効であることが認められた。しかしながら、より高速の衝撃問題に対して適用するためには高速衝突実験による衝撃荷重特性の評価も含めた実験的検討がさらに必要である。

謝辞：本研究で行った数値計算の一部は、酒巻 勝君が卒業研究として行ったものである。ここに付記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 宮本文徳・M.W.King・榊井弘樹：構造物に作用する衝撃力特性のモデル化に関する基礎的研究、構造工学論文集Vol.37A, pp.1555～1566, 1991.3.
- 2) 園田・佐藤・石川：エネルギー基準による落石覆工上のサンドクッション厚の算定法に関する一考察、構造工学論文集Vol.27A, pp.1617～1625, 1991.3.
- 3) 竹田仁一：衝撃問題に対する基本的考え方、落石による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.151～156, 1991.3.
- 4) 三上 浩・岸 徳光・松岡健一・能町純雄：組紐状AFRPロッドを用いたコンクリートスラブの重錘落下衝撃挙動、構造工学論文集Vol.37A, pp.1591～1602, 1991.3.
- 5) 高橋・塩冶・大野・石川・内田：ひずみ速度を考慮した鉄筋コンクリートはりの曲げ衝撃応答解析、構造工学論文集Vol.32A, pp.669～682, 1986.3.
- 6) 高橋・大野・太田・日野：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果、構造工学論文集Vol.37A, pp.1567～1580, 1991.3.
- 7) 土木学会：動的解析と耐震設計[第1巻] 地震動・動的特性、技報堂出版、pp.123～140, 1989.6.
- 8) Treloar, L.R.G.: The Physics of Rubber Elasticity, Oxford at the Clarendon Press, pp.64～98, 1967.
- 9) 岩柳茂夫：基礎物理学シリーズ レオロジー、朝倉書店、pp.27～31, 昭和49年.

(1991年9月30日受付)

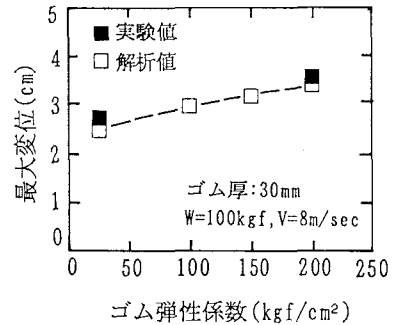


図-19 最大変位量とゴム弾性係数の関係