

I-502

多質点系モデルによる積層RCはりの衝撃応答解析と耐衝撃性の評価

防衛大学校 学員 山田 俊二

防衛大学校 正員 石川 信隆

同 正員 大野 友則

竹中工務店 正員 上田 眞稔

同 正員 内田 孝

技術研究所

1. まえがき

航空機、船舶あるいは車両の衝突、落石や土石流あるいは爆発などのような事故に起因して発生する衝撃的外力を受ける鉄筋コンクリート（RC）構造物は、衝撃荷重に対する応答や耐衝撃性などに関する検討が重要である。衝撃応答解析に関しては、最近活発な研究が進められており有限要素法、個別要素法、有限帯板理論に基づく方法など多くの手法を用いた解析的検討が行われている。またRCはりやスラブ部材などの耐衝撃性に関する問題も、衝撃実験や高速載荷実験などにより定量的な評価を行う試みが実験的に行われており、重要な知見が蓄積されている。衝撃力を受けるRC部材の挙動は、衝突直後に生ずる応力波による1次応答と高速度の荷重による局部的破壊現象が特徴である。そこで耐衝撃性の向上を図る目的から、緩衝材を組み合わせた各種の複合RC構造部材が提案されている。本研究は、2層化したRCはりの中間に緩衝材としてゴムを挟んだ積層RCはりを対象として、ばね-マスモデルを用いた簡便な衝撃応答解析法を提案するものである。また、ゴムの緩衝効果による積層はりの耐衝撃性について考察を行っている。

2. 積層RCはりの衝撃応答解析

(1)解析モデル：試験体は、通常のRCはりと比較を行う目的から、過去に行ったRC試験体（15×20×140cm）の寸法を基準として、図-1に示すような15×10×140cmのRCはりを単純に2段に重ねた積層RCはりである。試験体の種類は、厚さと剛性の異なるゴムを緩衝材として用いた3種類である。なお、ゴムと上下のRCはりとの接着は行っていない。試験体の諸元を表-1に示す。

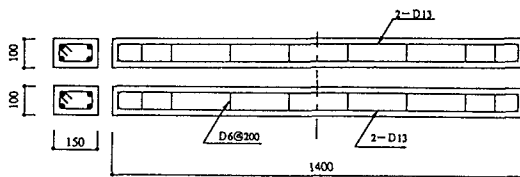


図-1 積層RCはり試験体

解析モデルは、図-2に示すようにゴムを中間に有する上下のRCはりを質量を持たない任意数の剛体パネルに分割し、はりの質量と剛性はパネル間に置いた質点が有する多質点系とした。また、緩衝材としてのゴムは分割されたパネル長に対応する部分をばねに置換し、上下の質点間に配置した。この際、ばねと上下の質点とは連結していない。

表-1 試験体のタイプと諸元

試験体のタイプ	試験体呼び名	重錘重量 kgf	衝突速度 m/s	主鉄筋		スチールファイバー		ゴム	
					p1 (%)		p2 (%)	剛性 Er	厚 tr
C	C1-100	100	8m/s	8D13	1.69	D6 φ200	0.21	0	0
	C2-100	100	4m/s 8m/s					24	15
	C3-100	100	4m/s 8m/s					24	30
	C3-150	150	8m/s						
	C4-100	100	4m/s 8m/s					200	30

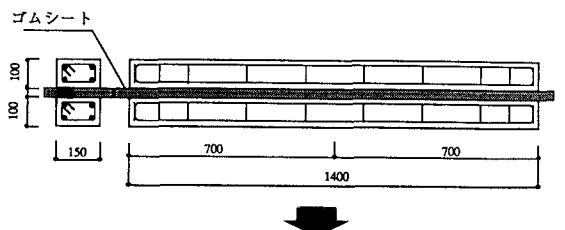


図-2 解析モデル

(2)応答解析式の定式化：図-2中の質点 i, i および $i+1$ における力のつり合いおよび隣接するパネル間の変形適合条件から、次の運動方程式が得られる。

$$a) \text{上はり} : m_{i,u} \ddot{y}_{i,u} = (M_{i+1,u} - 2M_{i,u} + M_{i-1,u})/q - F_i \quad (i \neq 1)$$

$$m_{1,u} \ddot{y}_{1,u} = (M_{1-1,u} - M_{1,u})/q - F_1 + P \quad (i = 1)$$

$$b) \text{下はり} : m_{i,l} \ddot{y}_{i,l} = (M_{i+1,l} - 2M_{i,l} + M_{i-1,l})/q + F_i \quad (i \neq 1)$$

$$m_{1,l} \ddot{y}_{1,l} = (M_{1-1,l} - M_{1,l})/q + F_1 \quad (i = 1)$$

ここに、 M_i は分割点 i での作用曲げモーメント、 F_i はばね i に作用する力、 P は衝撃荷重、 q はパネル長である。曲げモーメント M_i と曲率の間には、 $M_i = \phi_i \cdot (EI)_i$ の関係がある。

(3)曲げモーメントと曲率 ($M \sim \phi$) 関係モデル：図-3に示すように、載荷速度の増大による上、下降伏曲げモーメントの上昇効果を導入した履歴モデルを用いた。図中の、上および下降伏曲げモーメント ($M_{Y,u}$ 、 $M_{Y,l}$) は次式で与えられる¹⁾。

$$M_{Y,u} = 0.898 + s M_Y + 0.324 (\log \phi) + 0.062 (\log \phi)^2 + 0.005 (\log \phi)^3$$

$$M_{Y,l} = 0.544 + s M_Y + 0.066 (\log \phi)$$

ここに、 $s M_Y$ は静的載荷に対する降伏曲げモーメント、 ϕ は曲率速度。

(4)ばねの復元力特性：図-4は、ゴムの荷重～変位関係を示したものである。図中の実線は、実験で使用した厚さが1.5および3.0cmで縦横25×25cmの大きさのゴムに対して高速圧縮載荷実験を行って得られた結果であり、破線はTreloarの理論式²⁾から得られる関係を図示したものである。厚さによって復元力特性が異なるが、Treloar式は実験で得られたその特性を良好に表わしていることが認められる。そこで、本研究では、ばねの復元力特性を次式で与えるものとした。

$f = G \cdot (1 + 2/\alpha^3)$ ここに、 f は単位面積当りのばね力、 G はゴムの弾性率(kgf/cm²)、 $\alpha = (\delta/\delta_0)$ は伸長比である。

(5)解析結果：図-5は、積層RCはりの上側より中央点での変位時刻歴の解析結果と実験結果との比較を示す。解析にあたっては、実験で計測された荷重～時間を入力として用いた。単純な多質点系モデルに、載荷速度の影響とゴムの復元力特性を導入することにより、積層RCはりの衝撃応答を良好にシミュレートできることが認められる。図-6は、本解析法を用いてゴムによる緩衝効果を調べた結果である。図から、緩衝材の剛性が小さくかつ厚くなるほど、最大応答変位量が小さくなり衝撃緩衝効果が増大することが認められる。

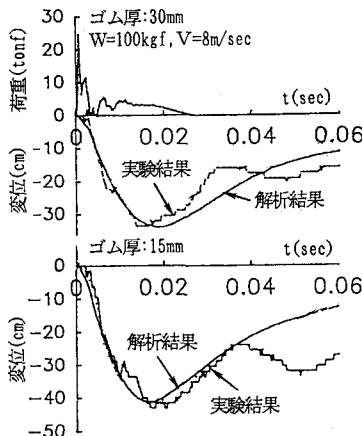


図-5 変位応答の比較

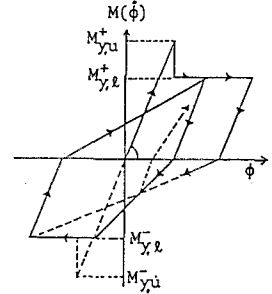


図-3 M- ϕ 履歴モデル

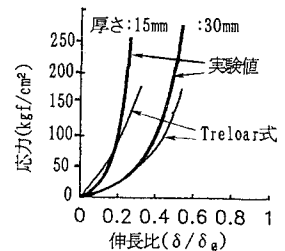


図-4 ゴムの特性

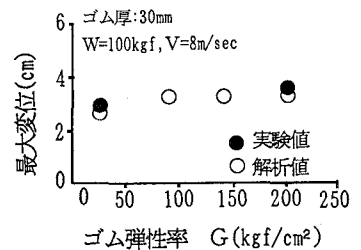
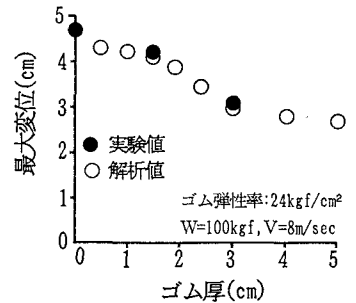


図-6 緩衝効果

1)高橋ら：ひずみ速度効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの衝撃曲げ応答解析，構造工学論文集，Vol.32A，pp.669～682，1986。 2)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。