

(I-45)

逆L型 PRC ロックシェッドの衝撃応答解析

防衛大学校 学生員 〇原大輔

防衛大学校

正会員 圓林栄喜

防衛大学校 正会員 香月 智

防衛大学校

フェロー 石川信隆

1. 緒言

ロックシェッドの耐衝撃性を向上させるために、PCはり部材を鉄筋で補強したプレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)ロックシェッドが着目されており、実験的検討が進んでいる¹⁾。本研究は、動的弾塑性骨組構造解析を用いて、予め行ったロックシェッド中型模型実験結果²⁾をシミュレーション解析することを試みたものである。

2. 実験の概要

実験は、図-1 に示すように、3mのはり部材と1mの柱部材を逆L型構造に接合した。ロックシェッド模型に質量1.0tonの重錘を25cm、50cm、100cmの高さから漸増させて落下衝突させる方法で行った。この際、重錘衝突点には局所の損傷を防止する目的でゴム緩衝材(30cm×25cm×5cm)を設置している。供試体はりおよび柱断面の配筋は図-2 に示すとおりである。

3. 解析手法

図-1 に示すロックシェッドを、図-3 のようなはり要素と軸力要素によって離散モデル化し、時刻 $t + \Delta t$ における運動方程式を次式のように表わす。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M}_{FF} & \mathbf{M}_{FS} \\ \mathbf{M}_{SF} & \mathbf{M}_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_F \\ \ddot{\mathbf{u}}_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{D}_{FF} & \mathbf{D}_{FS} \\ \mathbf{D}_{SF} & \mathbf{D}_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{u}}_F \\ \dot{\mathbf{u}}_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{F}_K \\ \mathbf{F}_K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{FF} & \mathbf{K}_{FS} \\ \mathbf{K}_{SF} & \mathbf{K}_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{u}_F \\ \Delta \mathbf{u}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_F \\ \mathbf{P}_S \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$:質量マトリクス、 $\mathbf{D}$:減衰マトリクス、 $[\mathbf{F}_K]$:時刻 t における剛性抵抗力、 $\mathbf{K}$:時刻 t から $t + \Delta t$ 間の増分変形量に関する剛性マトリクス(時刻 t における1次テラー展開マトリクス)、 $\mathbf{P}$:節点外力ベクトル、 $\mathbf{u}$:変位ベクトルであり、 $(\cdot)$ 記号は:時間に関する1次微分、 Δ :増分を表わす。また、添字 $(\cdot)_F$ は、節点の変位、速度、加速度が未知で、外力が既知量として与えられる点に関連することを、 $(\cdot)_S$ は逆に変位、速度または加速度が既知で、外力が未知となる自由度に関することを表わす。

これを、時刻 $t + \Delta t$ における未知の $\ddot{\mathbf{u}}_F$ についてNewmark β 法と連立して解くと次式が得られる。

$$\begin{aligned} [\ddot{\mathbf{u}}_F]_{t+\Delta t} = & \left(\mathbf{M}_{FF} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \mathbf{D}_{FF} + \beta \Delta t^2 \cdot \mathbf{K}_{FF} \right)^{-1} \left[\mathbf{P}_F]_{t+\Delta t} - \mathbf{M}_{FS} [\ddot{\mathbf{u}}_S]_{t+\Delta t} - \mathbf{D}_{FS} [\dot{\mathbf{u}}_S]_{t+\Delta t} - \right. \\ & \left. [\mathbf{F}_K]_{t+\Delta t} - \mathbf{K}_{FS} \Delta \mathbf{u}_S - \mathbf{D}_{FF} [\dot{\mathbf{u}}_F]_t - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{D}_{FF} [\ddot{\mathbf{u}}_F]_t - \mathbf{K}_{FF} \left\{ \Delta t [\dot{\mathbf{u}}_F]_t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 [\ddot{\mathbf{u}}_F]_t \right\} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

以下、これを用いて時刻 $t + \Delta t$ における未知数が次式のように求められる。

$$[\dot{\mathbf{u}}_F]_{t+\Delta t} = [\dot{\mathbf{u}}_F]_t + \Delta \dot{\mathbf{u}}_F = [\dot{\mathbf{u}}_F]_t + \frac{1}{2} ([\ddot{\mathbf{u}}_F]_t + [\ddot{\mathbf{u}}_F]_{t+\Delta t}) \Delta t \quad (3)$$

$$[\mathbf{u}_F]_{t+\Delta t} = [\mathbf{u}_F]_t + \Delta \mathbf{u}_F = [\mathbf{u}_F]_t + [\dot{\mathbf{u}}_F]_t \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) [\ddot{\mathbf{u}}_F]_t \Delta t^2 + \beta [\ddot{\mathbf{u}}_F]_{t+\Delta t} \Delta t^2 \quad (4)$$

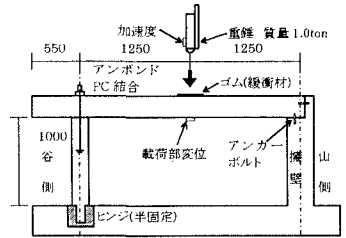


図-1 実験状況図

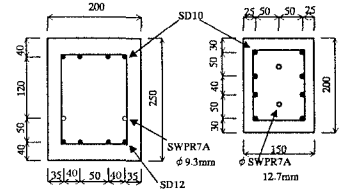


図-2 断面寸法図

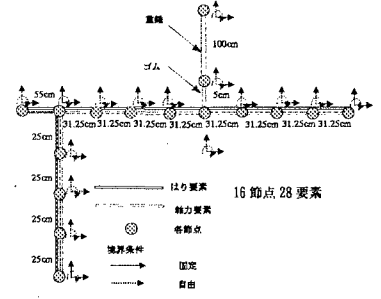


図-3 解析モデル図

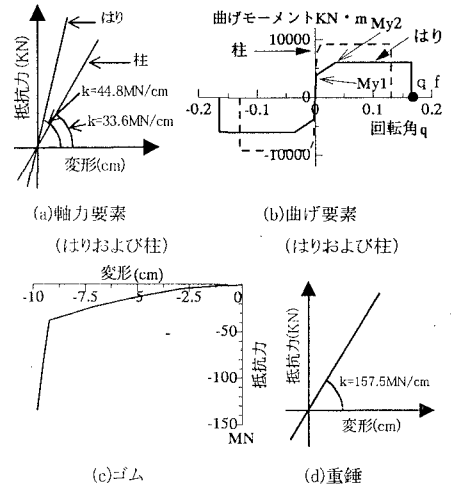


図-4 各部材の構成則

キーワード: 動的弾塑性骨組構造解析, 重錘落下衝突実験, はり柱全体構造

連絡先: 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 電話 (0468)41-3810 FAX (0468)44-5913

よって、時刻 $t + \Delta t$ における未知の外力(衝撃力)が次式のように求められる。

$$[F_s]_{t+\Delta t} = M_{SF} [\ddot{u}_F]_{t+\Delta t} + M_{SS} [\ddot{u}_S]_{t+\Delta t} + D_{SF} [\dot{u}_F]_{t+\Delta t} + D_{SS} [\dot{u}_S]_{t+\Delta t} + \{F_K\}_s \}_{t+\Delta t} \quad (5)$$

なお、減衰マトリクスについては、次式のようなレイリー減衰公式を用いた。

$$D = \alpha_R M + \beta_R K^0 \quad (6)$$

ただし、 α_R :質量項係数、 β_R :剛性項係数、 K^0 :解析初期の剛性マトリクス。

ここで、はり、柱および重錘の軸力に対する構成則は、図-4(a),(d)に示すようなり、またゴム緩衝材については図-4(c)のような非線形の軸力要素を用いた。すなわち、これらの抵抗力 Q と変形 q の関係を次式によって与えた。 $Q = \bar{Q} + k_N \cdot \Delta q$ (7)

ただし、 Q : $t + \Delta t$ における軸力、 $\bar{Q}$: t における軸力、 k_N :軸力剛性、 Δq : Δt 間の増分変形。また、はりおよび柱の曲げモーメントに対する構成則は、図-4(b)に示すような4段階の線形化された弾塑性モデルとし、その構成則は次式となる。

$$\begin{pmatrix} Q_R \\ Q_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Q}_R \\ \bar{Q}_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{RR} & k_{RL} \\ k_{LR} & k_{LL} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta q_R \\ \Delta q_L \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで、 Q : $t + \Delta t$ における曲げモーメント、 $\bar{Q}$: t における曲げモーメント、 k :弾塑性接線剛性マトリクス、 Δq : Δt 間の増分端回転角、添字、R、L:それぞれ要素の右端、左端を表わす。

4. 計算結果と考察

解析では、別途行った断面分割法によって求めたはりや柱断面の曲げモーメント～曲率関係をもとに、構成則の入力値を決定して、表-1 に示すような入力条件で解析を行った。対象とする実験は、落下高さ 25cm, 50cm の履歴荷重を受けた後の、落下高さ 100cm の実験をシミュレートすることとした。図-5 に重錘加速度に質量を乗じて得られる重錘衝撃力の時刻歴応答を実験値と比較して示す。解析値は 20ms で急激に立ち上がってピーク値を迎えるため実験値の約 1.5 倍の大きな衝撃力を与えることになるが、60ms までの全体の応答による力積はほぼ実験値と一致している。図-6 にはり衝突点下端の変位の時刻歴応答を示す。解析値は実験値に比べて 20ms から 30ms までの変位の増加が急激であるが、最大応答変位が約 2.5cm となる点において一致している。図-7 にはり時間軸を同調させた重錘衝撃力～変位関係を示す。実験結果が最大荷重 200kN であるのに対して、解析値は 300kN と約 1.5 倍の荷重を発生するが、最終変位が 2.5cm となる非線型応答の特性は概ねトレースできている。しかし、全体的に解析値の方が大きな吸収エネルギーとなっており、その理由は図-6 におけるはりの変位の応答が実験結果よりも早いことから、はりの構成則の抵抗力が実際の部材よりも小さいためではないかと考えられる。また、この実験の荷重～変位関係による吸収エネルギーを算定すると 345kN・cm となり、重錘の初期ポテンシャルエネルギー 1000kN・cm の約 35% となる。すなわち、残りの約 65% のエネルギーが構造に伝達されていない。このようなエネルギー消失の特性は、打撃点の力のやり取りを支配するゴム要素の構成則に依存するものと考えられ、この点についてさらに詳細な検討を要する。

参考文献

- 1) 佐藤弘史, 間瀬利明, 二川英夫, 園林栄喜, 石川信隆, 若林修: 靱性を高めた PC ロックシエッドの斜め衝撃載荷実験, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp. 91 ~ 96, 1998 年 6 月

表-1 解析条件

時間増分		1.0×10^{-6}
重錘	レイリー減衰係数	$\alpha_R=0, \beta_R=4.0 \times 10^{-3}$
	弾性剛性	$k=1.58 \times 10^7$ (MN/cm)
ゴム	質量	1000 (kg)
	非線形軸力	
柱	質量	3 (kg)
	質量	0.75 (kg/cm)
	軸力剛性	$k=33.6$ (MN/cm)
	曲げ初期剛性	200 (MN・cm)
	第1降伏モーメント	$M_{Y1}=2.0 \times 10^3$ (kN・cm)
	第2降伏モーメント	$M_{Y2}=4.0 \times 10^3$ (kN・cm)
	破壊塑性回転角	$\phi_u=0.09$ (rad)
はり	質量	1.23 (kg/cm)
	軸力剛性	$k=44.8$ (MN/cm)
	曲げ初期剛性	640 (MN・cm)
	第1降伏モーメント	$M_{Y1}=6.4 \times 10^3$ (kN・cm)
	第2降伏モーメント	$M_{Y2}=7.0 \times 10^3$ (kN・cm)
	破壊塑性回転角	$\phi_u=0.08$ (rad)

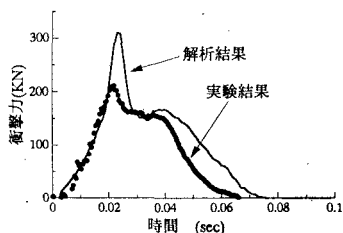


図-5 重錘衝撃力～時間関係

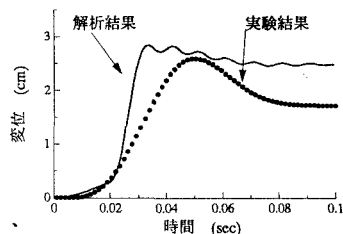


図-6 はり中央変位～時間関係

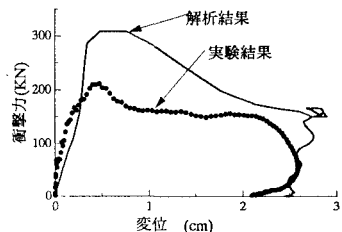


図-7 重錘衝撃力～はり中央変位