

繰り返し漸増衝突荷重を受けるPCはりの衝撃応答解析

防衛大学校 学生員○白石博文 正会員 香月 智 フィロ 石川信隆

1. 緒言

ロックシェッド等に用いられるPCはりの耐衝撃性能評価に、逐次に落下高さを大きくする繰り返し衝突実験が行われる場合が多い。実験結果を基にはり部材の持つ非線形の耐力特性を把握するためにはシミュレーション解析を行う必要がある。本研究は、はりの残留変形と除荷領域の剛性に及ぼす履歴効果を考慮して、繰り返し漸増衝突荷重を受けるPCはりの衝撃応答解析法を提案するものである。

2. 実験の概要

実験は、図-1に示すように落錘式衝撃実験装置を用い、高さ25cm、幅20cm、支間長200cmのPCはり供試体に、質量1tonの重錘を支間中央に落下高さを25cm、40cm、60cm、80cmと逐次増やし繰り返し落下衝突をさせたものである。重錘衝突点には局所の損傷を防止する目的で厚さ17cm、長さ40cm、幅15cmのEPPを設置している。

3. 解析手法

実験を図-2のようなはり要素と軸力要素の重錘と緩衝材に離散モデル化し、時刻 $t + \Delta t$ における運動方程式を次式のように表す。

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

ここで、 $\mathbf{M}$ ：質量マトリクス、 $\mathbf{D}$ ：減衰マトリクス、 $\ddot{\mathbf{u}}$ ：時刻 t における剛性抵抗、 $\bar{\mathbf{F}}$ ：時刻 t における剛性抵抗、 $\mathbf{K}$ ：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次テーラー展開マトリクス） $\mathbf{P}$ ：節点外力変位ベクトル、 $\mathbf{u}$ ：変位ベクトルであり、 $(\cdot)$ 記号は、 $\dot{\cdot}$ ：時間に関する1次微分、 Δ ：増分を表す。また、添字は、 $(\cdot)_F$ 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す。また $-$ は、時刻 t で既知となったことを表す。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 法と連立して解くことにより、逐次時刻歴応答が得られる。

はりの曲げモーメントについては、図-4に示すように限界回転角を伴う3段階のトリリニア弾塑性モデルとして取り扱うものとする。この場合の剛性マトリクスは以下のように表される。

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}^T \mathbf{k} \mathbf{B} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{B}$ ：要素の変形適合マトリクス、 $\mathbf{B}^T$ ：変形適合マトリクスの転置行列。まず、弾性範囲については次のようになる。

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_e = \begin{bmatrix} \frac{4E_i I_i}{\ell_i} & -\frac{2E_i I_i}{\ell_i} \\ -\frac{2E_i I_i}{\ell_i} & \frac{4E_i I_i}{\ell_i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 E_i ：はり要素のヤング係数、 I_i ：はり要素の断面2次モーメント、 ℓ_i ：はり要素の長さ。続いて、弾塑性領域では、次のようになる。

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_{ep} = \mathbf{k}_e - \mathbf{k}_e \mathbf{N}_a [\mathbf{N}_a^T \mathbf{k}_e \mathbf{N}_a + \mathbf{H}_a]^{-1} \mathbf{N}_a^T \mathbf{k}_e \quad (4)$$

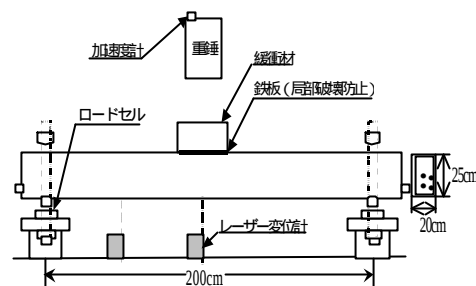


図-1 実験要領

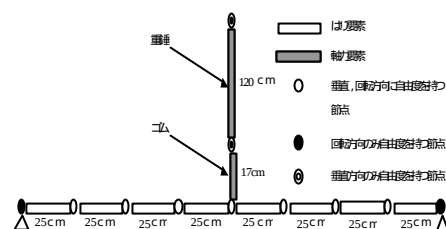
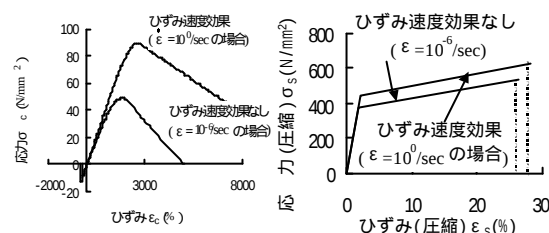
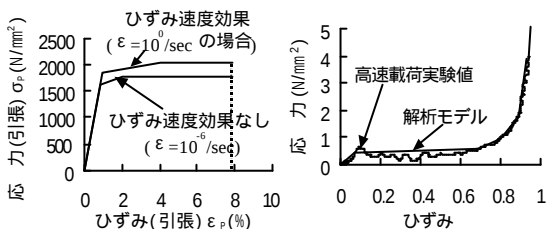


図-2 解析モデル図



(a)コンクリート

(b)鉄筋



(c)PC鋼線

(d)緩衝材(EPP)

図-3 材料の構成則

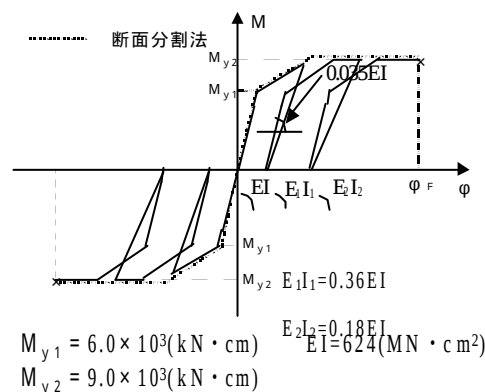


図-4 はり要素の曲げモーメント～曲率関係

キーワード：繰り返し漸増衝突荷重、PCはり、衝撃応答解析

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

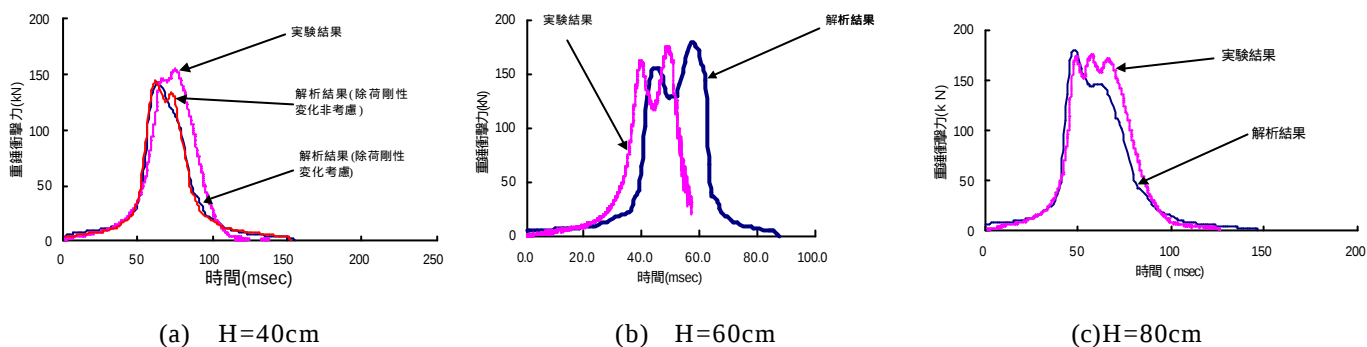


図-5 重錘衝撃力～時間関係

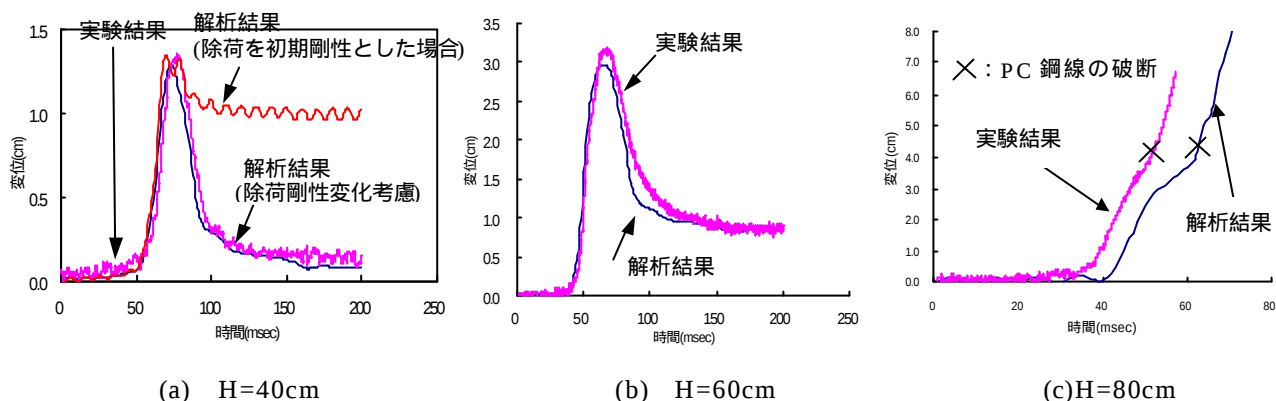


図-6 はり中央変位～時間関係

ここで、 N_a 、 H_a は降伏条件式の中で、アクティブになっている降伏条件へ法線外向きの係数マトリクス、および硬化係数ベクトル。

この弾塑性剛性マトリクスの作成にあたっては、図-3に示す材料構成則を用いて、断面分割法を用いて図-4の破線に示すような除荷を考慮しない曲げモーメント～曲率関係を与える。図-4の曲率にはり高の1/2を乗じて接線角に変換する。

逐次に生じる除荷過程では前段階の残留変位の増加に伴って勾配が緩くなるように図-4の実線のように順次除荷勾配を変化したものを与える。

4. 計算結果と考察

図-5に落下高 $H=40\text{cm}$ 、 60cm 、 80cm の重錘衝撃力～時間関係を示す。 $H=40\text{cm}$ の時の最大重錘衝撃力は約 150kN であり、そのピークは連続した2段階となるためややフラットな形状を示している。これらの傾向およびその発生時刻について、解析は実験結果をほぼ完全にシミュレートしている。 $H=60\text{cm}$ では、実験のピーク値は 155kN と 170kN の2段階がかなり

明瞭に分かれ後者の方が大きい。この点については解析も同様の結果となっているが、荷重の立ち上がる時間が実験よりも遅れている。これは、実験で緩衝材を繰り返し使用したため、その柔らかい変形領域が減少していたためと思われる。図-6には、 $H=40\text{cm}$ 、 60cm 、 80cm におけるはり中央点の変位の時刻歴を示す。ここで、実験のはり変位とは、はりの下縁の変位である。図-6(a)には、比較のために提案解析モデルとは異なって、除荷を初期剛性と同じに戻す場合の解析結果を示している。いずれの除荷モデルにおいても、変位のピーク値 1.5cm までは、実験結果と良く一致している。しかし、実験では、この後に残留変位が 0.2cm となるまで変位が戻るのに対し、初期剛性で戻るモデルでは残留変位が 1.0cm となり実験値と全く一致しない。一方、提案モデルの除荷時の剛性変化を考慮する場合は良く一致している。図-6(b)、(c)に提案モデルのみの解析結果を示すが、実験結果を良くシミュレートできている。特に $H=80\text{cm}$ の場合に実験では約 4.1cm でPC鋼線が破断して破壊するが、解析でも約 4.2cm で破断しており破壊点も良く一致する。図-7に図-5と6から得られる重錘衝撃力～変位関係を示す。解析では除荷領域の高周期振動が実験よりも大きく表れるため、滑らかな復元が表現できていないが概ね良く一致している。

参考文献 1) 中田吉彦, 榎谷浩, 梶川康男, 熊谷貴秀; 重錘衝突による鉄筋コンクリートはりの衝撃特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 vol.46A, pp1831~1842, 2000年3月

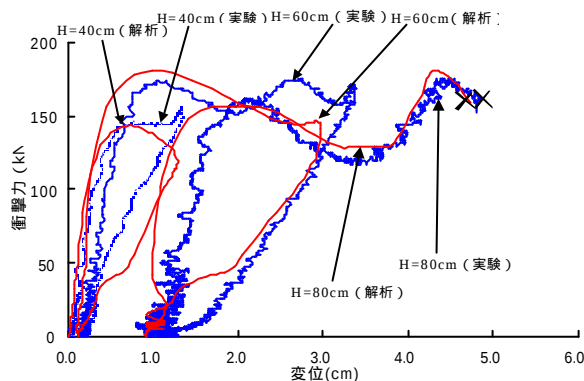


図-7 重錘衝撃力～はり中央点変位関係