

## 重錘衝突を受けるPCはりの衝撃応答解析

IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF PC BEAMS UNDER WEIGHT DROPPING COLLISION

竹本憲介\*, 香月 智\*\*, 石川信隆\*\*\*

Kensuke TAKEMOTO, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA

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

\*\*工博 防衛大学校助教授 土木工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*工博 防衛大学校教授 土木工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: 衝撃応答解析, 重錘衝突実験, 重錘衝撃力

(Impact response analysis, Weight dropping collision, Impact force)

### 1. 緒言

衝撃力を受ける構造物の設計においては, 衝突物の衝突によって構造物に作用する時間依存性のある荷重に対する構造物の抵抗力, すなわち衝撃耐力を適切に推定する手法が必要である. しかし, 衝突実験によって得られる衝撃耐力~変位関係については, 構造基本要素であるPCはりにおいてさえも静的実験で得られたものと衝撃実験のものとは全く一致しないため, その解釈や実験手法をめぐっていろいろな取り組みがなされている. 例えば, 前川ら<sup>1)</sup>は, CFT-PCはりで重錘落下実験によって耐衝撃性を評価しているが, その際の評価は重錘衝撃力であり, 静的曲げ耐力と衝撃載荷時の曲げ耐力はほぼ同じであるが, 終局変位および吸収エネルギーは衝撃載荷の方が大きくなる傾向を指摘している. また, 重錘衝撃力が静的耐力~変位関係とあまりにも異なることを考慮して, 支点反力に着目している例もある. 例えば, 岸ら<sup>2), 3), 4)</sup>は, PCはり, PRCはり, RCはり等で重錘落下実験によって載荷点部の変形と支点反力によって, 得られる曲線の描くループの面積が小さい方が耐衝撃性に優れているとの評価法の視点に立った実験を行い, その際得られる最大支点反力は, 静的耐力の約2倍に増大することを指摘している. ところで, 重錘加速度から算定される衝撃力においては直近には重錘先端とその周辺でのはり局部応答の相互作用による抵抗メカニズムが介在するため, その構成則の影響を強く

受ける可能性がある.

そこで本研究は, この局部の構成則の影響をモデル化するために, EPPを用いた局部緩衝材を介した衝突実験において, その局部緩衝材の構成則を忠実に再現することにより, 重錘衝突を受けるPCはりの衝撃応答解析を試みたものである.

### 2. 動的解析法の基本式

#### 2.1 構造全体の解析式

本研究では, 後述する重錘落下実験を図-1のような軸力要素とはり要素による離散化モデルに表すものとする. この構造全体の運動方程式は, 変位ベクトルと外力ベクトルの既知の部分と未知の部分に分けて次のように表される.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_{ik} & \mathbf{m}_{iu} \\ \mathbf{m}_{ki} & \mathbf{m}_{ku} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_k \\ \ddot{\mathbf{u}}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{ik} & \mathbf{D}_{iu} \\ \mathbf{D}_{ki} & \mathbf{D}_{ku} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_k \\ \dot{\mathbf{u}}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ik} & \mathbf{K}_{iu} \\ \mathbf{K}_{ki} & \mathbf{K}_{ku} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_k \\ \mathbf{u}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_u \\ \mathbf{F}_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで,  $\ddot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{u}}, \mathbf{u}$ : それぞれ節点の加速度, 速度, 変位ベクトル,  $\mathbf{F}$ : 節点外力ベクトル,  $\mathbf{m}$ : 質量マトリクス,  $\mathbf{D}$ : 減衰マトリクス,  $\mathbf{K}$ : 剛性マトリクスであり, 添字  $k$  は, known の略で既知の量を示し, 添字  $u$  は, unknown の略で未知の量を示す, すなわち,  $\mathbf{F}_u$  は未知であり,  $\ddot{\mathbf{u}}_u, \dot{\mathbf{u}}_u, \mathbf{u}_u$  は未知数である. 一方,  $\mathbf{F}_k$  は既知であり,  $\ddot{\mathbf{u}}_k, \dot{\mathbf{u}}_k, \mathbf{u}_k$  は加速度, 速度, または変位が与えられることにより, ニューマークの  $\beta$  法の積分関係によってすべてが既知となる. ちなみに, 構成則が非線形の場合には, 式(1)は変位に関して微小増分間の式に変

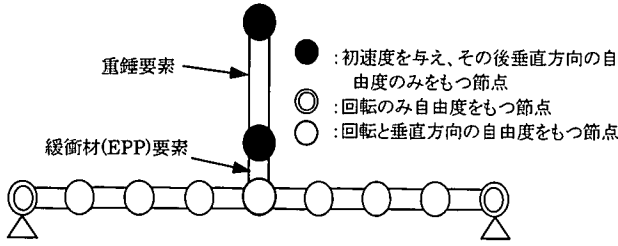


図-1 重錘落下衝突解析モデル

換され、剛性マトリクスは、増分間の接線剛性マトリクスを用いるものとする。まず、式(1)の下段の式を未知項と既知項に整理して、次の運動方程式をニューマークの  $\beta$  法と連立して解く。

$$m_{ku}\ddot{u}_u + D_{ku}\dot{u}_u + K_{ku}u_u = F_k - m_{kk}\ddot{u}_k - D_{kk}\dot{u}_k - K_{kk}u_k \quad (2)$$

よって、 $\ddot{u}_u, \dot{u}_u, u_u$  が既知となるので、未知の外力  $F_u$  は次式によって求められる。

$$F_u = m_{uk}\ddot{u}_k + m_{uu}\ddot{u}_u + D_{uk}\dot{u}_k + D_{uu}\dot{u}_u + K_{uk}u_k + K_{uu}u_u \quad (3)$$

## 2.2 各部材要素の構成則

### (1) 緩衝材の構成則

緩衝材に相当する部分は、弾塑性軸力要素とする。ただし、実験では緩衝材として EPP(Expanded Polypropylen)を用いている。その静的および高速载荷による荷重～変位関係は図-2 に示すようになるが、本研究では、これを図-3 に示すように6段階に線形化した応力( $\sigma$ )～ひずみ( $\varepsilon$ )関係にモデル化するものとした。すなわち、その構成則は次式のようになる。

$$\sigma = \bar{\sigma} + \tilde{E}\Delta\varepsilon \quad (4)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ : 前段階の応力、 $\tilde{E}$ : 増分間の接線ヤング係数、 $\Delta\varepsilon$ : 増分ひずみ。なお、この要素では引張側の応力は生じないものとしている。

### (2) はり要素の剛性マトリクス

図-4 に示す両端に曲げモーメントが働く要素の端回転角ベクトル  $\mathbf{q}$  と節点変位ベクトル  $\mathbf{u}$  との変形適合条件は次式のように表される。

$$\begin{bmatrix} q_{Li} \\ q_{Ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\ell_i} & -1.0 & \frac{1}{\ell_i} & 0 \\ \frac{1}{\ell_i} & 0 & -\frac{1}{\ell_i} & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{Lr} \\ u_{Lo} \\ u_{Rr} \\ u_{Ro} \end{bmatrix} \quad (5)$$

すなわち、変形適合マトリクス  $\mathbf{B}_i$  は次式となる。

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\ell_i} & -1.0 & \frac{1}{\ell_i} & 0 \\ \frac{1}{\ell_i} & 0 & -\frac{1}{\ell_i} & 1.0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

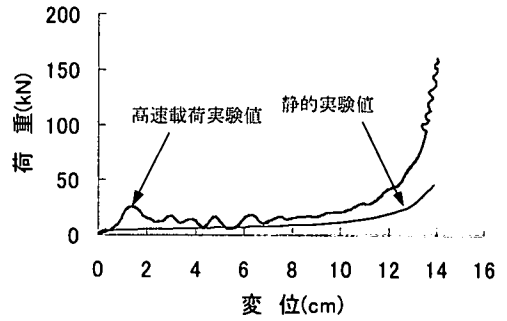


図-2 緩衝材(EPP)の荷重～変位関係

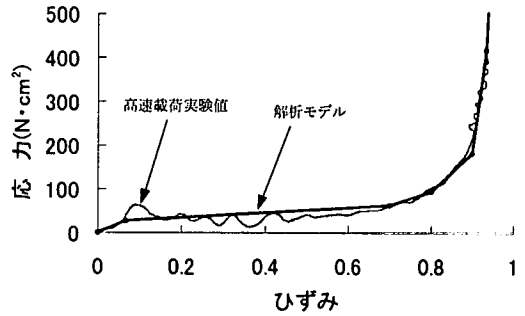
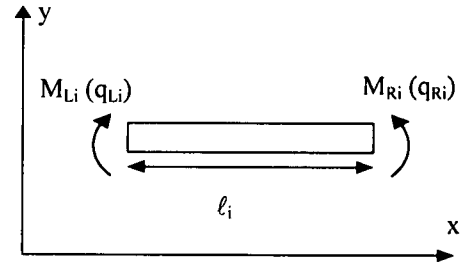
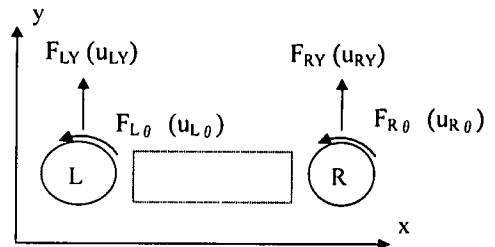


図-3 緩衝材(EPP)の応力～ひずみ関係



(a) 要素曲げモーメント(M)と端回転角(q)



(b) 節点外力と(F)と変位(u)

図-4 はりモデル

また、節点外力  $\mathbf{F}$  と端曲げモーメント  $\mathbf{M}$  との関係は仮想仕事の原理によって次式となる。

$$\begin{bmatrix} F_{Lr} \\ F_{L\theta} \\ F_{Rr} \\ F_{R\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\ell_i} & \frac{1}{\ell_i} \\ -1.0 & 0 \\ \frac{1}{\ell_i} & -\frac{1}{\ell_i} \\ 0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{Li} \\ M_{Ri} \end{bmatrix} \quad (7)$$

曲げモーメント～回転角関係(構成則)については、図-5 に示すように限界回転角  $q_r$  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。この場合の構成則は以下のように表される。まず、弾性範囲については、次のようになる。

$$\Delta \mathbf{M} = \mathbf{k}_e \Delta \mathbf{q} \quad (8)$$

$$\mathbf{k}_e = \begin{bmatrix} \frac{4E_i I_i}{\ell_i} & -\frac{2E_i I_i}{\ell_i} \\ -\frac{2E_i I_i}{\ell_i} & \frac{4E_i I_i}{\ell_i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 $E_i$  は要素のヤング係数、 $I_i$  は要素の断面2次モーメント、 $\ell_i$  は要素の長さであり、複合材料断面では、 $\phi_i = M_i / E_i I_i$  として求められる。ここで、 $\phi_i$  は断面曲率である。続いて、弾塑性領域では、次のようになる。

$$\Delta \mathbf{M} = \mathbf{k}_{ep} \Delta \mathbf{q} \quad (10a)$$

$$\mathbf{k}_{ep} = \mathbf{k}_e - \mathbf{k}_e \mathbf{N}_a [\mathbf{N}_a^T \mathbf{K}_e \mathbf{N}_a + \mathbf{H}_a]^{-1} \mathbf{N}_a^T \mathbf{k}_e \quad (10b)$$

ここで、 $\mathbf{N}_a$ 、 $\mathbf{H}_a$  は次のように表される降伏条件式の中で、アクティブになっているものの係数マトリクス、またはベクトルを表す。

$$\psi = \mathbf{N}^T \mathbf{M} - \mathbf{H} \lambda - \mathbf{r} \leq 0 \quad (11)$$

ここで、 $\psi$  : 降伏条件式ベクトル、 $\mathbf{N}$  : 降伏条件式の法線方向マトリクス、 $\mathbf{H}$  : 硬化係数、 $\lambda$  : 塑性乗数ベクトル、 $\mathbf{r}$  : 塑性容量ベクトルである。式(9)は式(10)の一部として表されることを考慮すると、要素の接線剛性マトリクスは次式として表される。

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{B}_i^T \mathbf{k}_{ep} \mathbf{B}_i \quad (12)$$

この具体的な曲げモーメント～端回転角の関係については、実断面について、断面分割法を用いて曲げモーメント～曲率関係を求めたうえで、図-5のように3段階の弾塑性モデルとし、この曲率に有効断面高さの2/3の高さを乗ずること(塑性ヒンジ長)により端回転角 $q$ に変換した。なお、断面分割法では、PC鋼材、鉄筋、コンクリートの各材料に対して、ひずみ速度効果および拘束効果を考慮した構成則を用いた<sup>5),6)</sup>。ボンドPCはりの入力値を表-1に示す。

### 3. 重錘落下実験の概要

#### 3.1 実験の方法

重錘落下実験は、落錘式衝撃実験装置を用い、150cm、250cmの高さからガイドを通じて重錘を自由落下衝突させた。また、図-6に示すように支点部にはロードセルを設置し、跳ね上がり防止用治具ではりの

表-1 ボンドPCはりの入力データ

断面積(cm <sup>2</sup> )	375
密度(kg/cm <sup>3</sup> )	2.50×10 <sup>-3</sup>
等価曲げ剛性 EI(N・cm <sup>2</sup> )	6.43×10 <sup>10</sup>
曲げモーメント M <sub>y1</sub> (N・cm)	4.51×10 <sup>6</sup>
硬化係数 H1(N・cm <sup>2</sup> )	1.62×10 <sup>8</sup>
曲げモーメント M <sub>y2</sub> (N・cm)	6.65×10 <sup>6</sup>
硬化係数 H2(N・cm <sup>2</sup> )	0.098
終局回転角 $q_F$	0.07

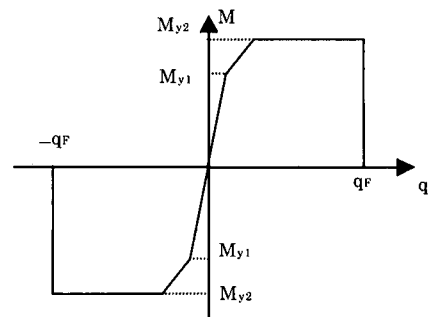


図-5 はり要素の曲げモーメント～回転角関係

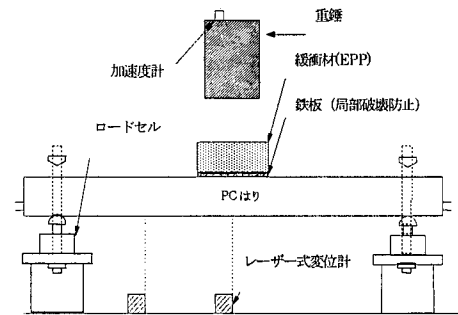


図-6 実験要領

上縁を固定した。はりの載荷点部にはポリプロピレン(EPP)の緩衝材を設置している。緩衝材は、はりに伝達される荷重を分散させ、局部破壊を防止するため、基本的にはりの耐力に局部破壊が及ぼす影響を無視することができる。その大きさは厚さ15cm、長さ40cm、幅15cmである。なお、重錘が深く侵入し、直接はりに衝突した際の局部破壊を防止するためにEPPの下にはさらに厚さ4.5mmの鉄板を敷いた。

静的実験には、アムスラー試験機を用いて中央点単一載荷により実験を行った。

#### 3.2 計測項目及び計測要領

衝突実験時の計測項目は、表-2に示すように、重錘加速度(衝撃実験のみ)、支点反力、はり中央点直

表-2 測定項目

計測項目	計測器材	諸元等
加速度	加速度計 (重錘)	測定範囲:500G 応答周波数: 10000Hz
支点反力	ロードセル	容量:98.1kN
変位	レーザ式 変位計	測定範囲:300± 100mm 応答周波数: 915Hz

表-3 材料諸元

材料	項目	数値	材料	項目	数値
全般	幅	15cm	鉄筋	径(圧縮側)	D6
	高さ	25cm		降伏点	370N/mm <sup>2</sup>
	長さ	150cm		引張強度	530N/mm <sup>2</sup>
	スパン	200cm		破断時のび	26.5%
コンクリート	圧縮強度	49.4N/mm <sup>2</sup>	PC鋼材	径(より線)	φ 9.3mm
スターラップ*	径	D10		初期 プレストレスカ	66.6kN
	間隔	5cm		0.2%永久伸びに 対する荷重	90.9kN
	高さ	21cm		引張荷重	98.7kN
	幅	11cm		破断時伸び	7.9%

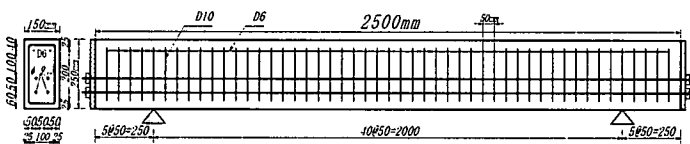


図-7 ボンド PC はりの供試体寸法図

下および 1/4 点変位である。計測要領は、重錘加速度については重錘上部に加速度計を設置し、支点反力については支点部に設置したロードセル、変位についてはレーザ式変位計によりそれぞれ計測した。

### 3.3 供試体

供試体は、図-7 に示すようにボンド PC はりであり、供試体長 2.5m、支点間距離 2.0m、15cm×25cm の断面内にφ9.3mm のPC鋼より線を4本、D6圧縮鉄筋を2本有するものである。材料諸元を表-3 に示す。

## 4. 解析結果と考察

### 4.1 静的実験

図-8 に静的載荷実験で得られたボンド PC はりの抵抗力～変位関係を示す。その抵抗力は変位 2.6cm でピーク値を迎えた後その耐力を維持し、変位 8.1cm で PC 鋼線の破断によって耐力が失われている。これを提案する単純はりモデルで解析すると図中の太線の結果が得られる。静的実験への解析モデルの推定値は、ピーク値付近までは良く一致し、破断点変位も良く推定できている。

### 4.2 重錘落下衝突実験

図-9 に重錘落下衝突解析で得られた重錘の速度～時間関係を示す。重錘は、初速度 542cm/s であり衝突を開始し、25ms まではほぼその速度を保つが、

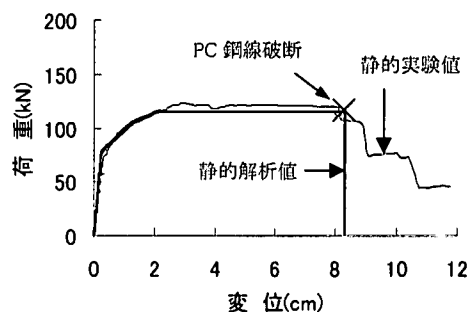


図-8 ボンド PC はりの抵抗力～変位関係

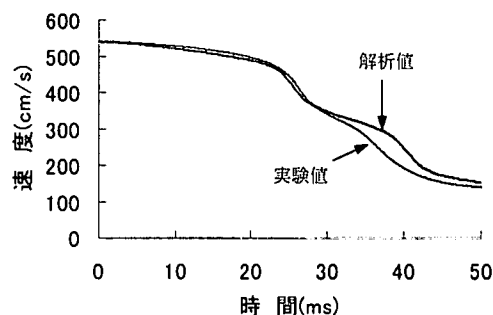


図-9 重錘の速度～時間関係

その後急に速度が低下する。この25msまではEPPが初期の圧縮変形している状態であり、重錘の速度を低下させる抵抗力を発揮していない状態である。25ms で急に低下した速度は、42.0ms で再度低下し、その後は一定の速度で低下している。これは、42.0ms でありが破断し、抵抗力を発揮なくなるためである。なお、これらの傾向は、図中の実験値と良く一致している。

図-10 には解析と実験のはりの載荷点下部変位～時間関係を示す。25ms まではEPPの抵抗力が小さいためほとんど変位が生じていないが、25ms 以降ほぼ単調に変位は増加し、42.0ms で PC 鋼材の破断に対応する破壊が表れる。この傾向も実験値と一致してい

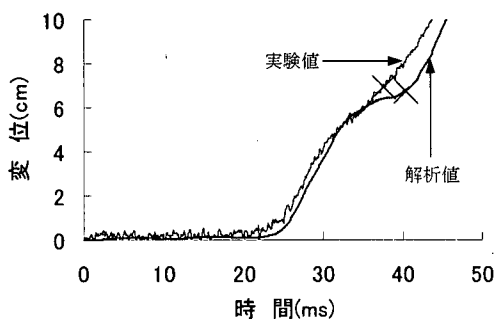


図-10 荷重点下部変位～時間関係

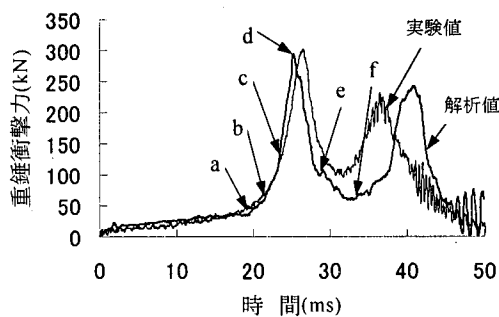


図-11 重錘衝撃力～時間関係

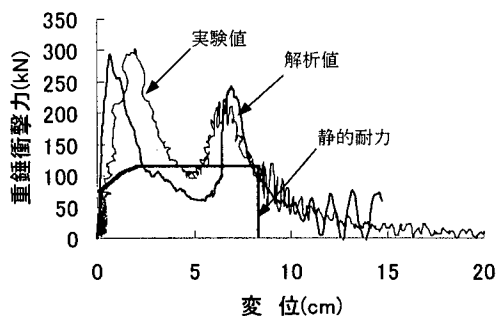


図-12 重錘衝撃力～荷重点下部変位関係

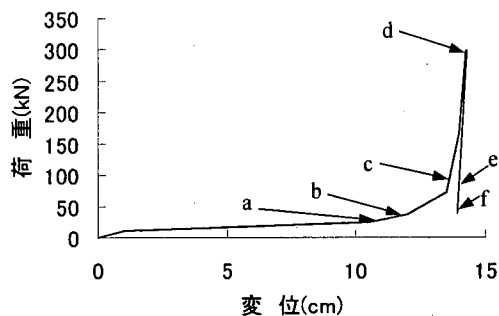


図-13 緩衝材要素の応答経過

る。

図-11 に重錘衝撃力 ( $m_c \ddot{u}_c$ ) と時間の関係を示す。解析も実験も 20ms を境に急激に重錘衝撃力が増加し、実験値では 26ms、解析では 25ms でピーク値の 300kN に達している。その後、急激に低下した重錘は再度緩やかに上昇して、実験では 37.5ms で、解析では 42.0ms で 2つ目の小さなピーク値を迎えている。この2つのグラフから、このはりの重錘落下実験に対する荷重～変位関係を描くと、図-12 のようになる。解析値は実験値よりも衝突直後の荷重の立ち上がりが早いと全体的に良くシミュレートしている。しかし、参考までにこの解析で用いたはりの静的抵抗力～変位曲線とは、全く異なっており、ピーク値だけを比べると、衝撃時には耐力が静的の約 2.5 倍にも達している。そこで、図-12 の変位 2.5cm 未満の第1ピークに至る重錘衝撃力の時間経過点を図-11 の a～f 点に求めて、この間の緩衝材の抵抗力～変形曲線にプロットすると図-13 のようになり、図-2(または図-3)に極めて一致している。すなわち、この緩衝材の構成則の非線形形状が、そのまま図-11 や図-12 の抵抗力の立ち上がり特性に転写されていることがわかる。つまり局部緩衝材の構成則が重錘衝撃力に著しく大きな影響を及ぼしていることがわかる。これは、図-14 に示す重錘～緩衝材～はりの動的な力の釣り合い関係から当然のことでもある。

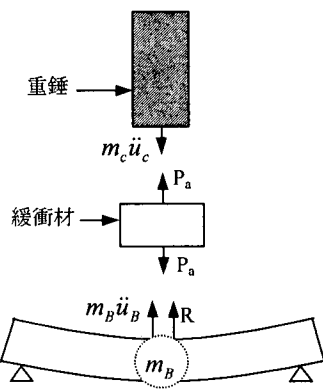


図-14 緩衝材の力の釣り合い

しかし、その一方で、緩衝材の抵抗力  $P_a$  は、はりの接触によって図-14 に示すように緩衝材直下におけるはりの抵抗力 ( $R = Ku$ ) とその周辺の慣性力 ( $m_B \ddot{u}_B$ ) とつり合っている。そこで、解析で得られたはりの抵抗力の時刻歴応答と重錘衝撃力と重ね合わせると大部分では一致するものの、ピークを迎えるところでは、その差異が大きくなる。すなわち、はりの慣性力が直接関与しているその割合を調べると第1ピークでは 23%、第2ピークでは 27%程度はりの慣性力が重錘衝撃力に寄与していることがわかる。次に図-15 に示す  $t=42ms$  以降の網掛けの部分では、はりの中央部が破壊しており曲げモーメントは 0 である。しかし、大きな振動が現れ、あたかも耐力が継続しているように見える。この結果、図-10 に示すように変位 7cm 以

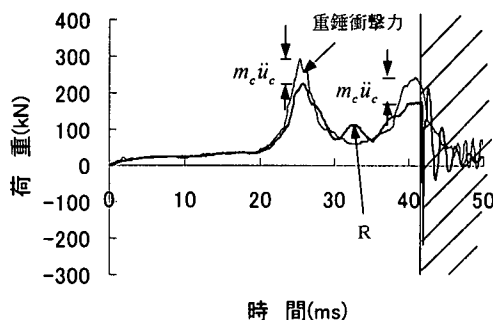


図-15 重錘衝撃力に占めるはりの抵抗力

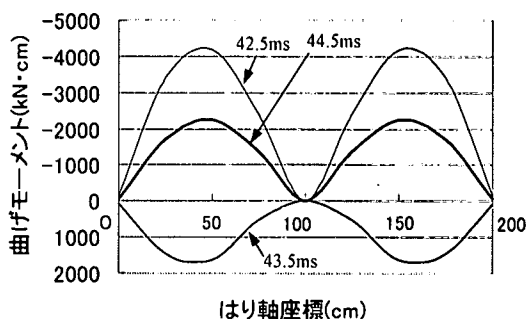


図-16 中央点破断後のはりのモーメント分布

降も耐力があるかのような結果になっており、これが実験結果とも良く合っている。そこで、この領域でのはり内部の曲げモーメント分布を調べると、図-16のようになっている。これは図-17に模式的に表すように、中央点は破壊してはりの耐力が失われているにもかかわらず、残片のはりが慣性力とその弾性的曲げ耐力を抵抗源として、振動しながら反力を与えていることがわかる。

## 5. 結言

本研究は、簡易な弾塑性はりのモデルを用いた動的解析によって、予め行ったPCはりの重錘落下衝突実験を解析し、重錘衝撃力に及ぼす衝突点近傍の構成則の影響について検討したものである。本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 緩衝材(EPP)の動的構成則を忠実に表現することにより、ボンドPCはりの重錘衝撃力をシミュレートすることができる。その際、重錘衝撃力は緩衝材の影響を大きく受けることがわかった。
- (2) 重錘落下衝突解析では、はりの静的耐力の約2.5倍の重錘衝撃力が検出される。これは、実験結果とも一致するが、その際約25%が衝突点近傍のはりの慣性力である。
- (3) 重錘衝撃力は、はり中央点の破壊後においてもはりの慣性力との動的バランスにより見かけの抵抗力を検出する可能性がある。

## 参考文献

- 1) 前川幸次, 吉田博, 塩見昌紀: 鋼管・コンクリート複合はりの静的及び衝撃載荷実験, 構造工学論文

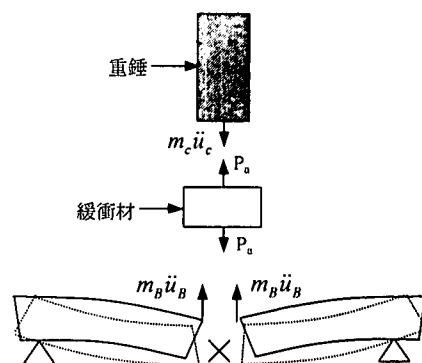


図-17 中央点破断後の力の釣り合い

集, Vol.43A, pp.1481-1488, 1997.3.

- 2) 岸徳光, 竹本伸一, 三上浩, 今野久志: T型 PRC 梁の静的・衝撃耐荷性状に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1827-1838, 1998.3.
- 3) 松岡健一, 岸徳光, 佐藤昌志, 安藤智啓: FRPシート曲げ補強RC梁の静的・衝撃荷重載荷実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1585-1590, 1999.
- 4) 岸徳光, 三上浩, 今野久志: T型 PRC 梁の静的・衝撃耐荷性状に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1827-1838, 1998.3.
- 6) 高橋芳彦, 大野友則, 太田俊昭, 日野伸一: 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.
- 6) 園田佳臣, 小林直行, 石川信隆, 佐藤紘志: ひずみ速度効果を考慮したPCはり部材の動的曲げ耐力と変形性能, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1455-1465, 1992.3.