

RC はりの衝撃挙動特性に関する DEM によるパラメトリック解析

Parametric analysis of impact characteristics of reinforced concrete beams by distinct element method

山本満明*, 榎谷 浩**, 中村佳彦***

Michiaki Yamamoto, Hiroshi Masuya, Yoshihiko Nakamura

*工修, 金沢大学大学院自然科学研究科 博士後期課程 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

**工博, 金沢大学大学院教授, 自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

***前田道路株式会社 (〒141-0021 東京都品川区上大崎 3-14-12)

In this study, we performed the series of parametric analysis by distinct element method for checking the validity in the impact analysis of reinforced concrete beam aiming at the explication of the impact behavior of RC beam, which is one of the most fundamental structural members. As results, the relationships among collision conditions, the characteristics of impact load, displacement of RC beam and the amount of transmitted energy to the beam under various impact conditions were clarified. The fundamental idea for design method of structures under impact loads was also shown.

Key Words: Impact, Reinforced concrete beam, Distinct element method

キーワード: 衝撃, 鉄筋コンクリートはり, 個別要素法

1. まえがき

衝撃力を受ける構造物や構造部材の力学的挙動は静的な場合と一般に異なり, しかも複雑であるため不明な点が多い. 土木構造物や建築構造物の耐衝撃性を検討する場合, 衝撃実験を行いその結果を検討することは重要である. しかしながら, 同一条件下で行った実験結果の再現性が乏しいこと等の理由により, 長い間十分な現象の実験的説明は難しいと考えられてきた. 最近では測定機器のめざましい発展のため, 精度のよい測定が行えるようになってきた. 土木学会の衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会においても, 重要な一つの課題として衝撃実験法, 測定法の検討が行われている^{1,2)}. 著者らも鉄筋コンクリートはりを用いた衝撃実験を行い, 実験方法と測定法についての基礎的知見を明らかにしてきた^{3,4)}.

一方, 構造物の性能照査型耐衝撃設計⁵⁾を確立するためには, 実験結果を補完する意味からも数値解析的な研究が必要不可欠である^{6,7)}. 著者らは, 個別要素法による数値解析手法を進展させ実験結果の検証によりその妥当性と再現性を確認してきた^{8,9)}. また, 我が国の複数の研究者が行った, 矩形 RC はりの衝撃実験に先立つプレアナリシスと実験

後のポストアナリシスにも参加し, 実験結果との比較検証により個別要素法(DEM)の再現性について確認している¹⁰⁾.

本研究では最も基本的な部材の一つである RC はりの衝撃挙動の解明を目指し, RC はりの衝撃破壊解析での有効性を確認している個別要素法によるパラメトリックな衝撃挙動解析を行った. 衝突条件と発生荷重特性そしてエネルギー吸収量などの関係を明らかにし, 部材の耐衝撃性設計検討ための基礎資料を提示している.

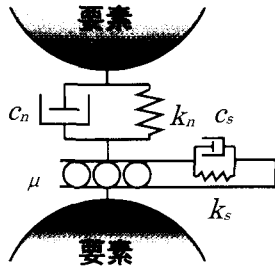
2. 個別要素法による RC はりの衝撃応答解析

2.1 個別要素法による解析の概要

個別要素法は, 大変形を伴う破壊の進展や, 局部破壊にみられる粒子の飛散を再現できる利点により, 近年用いられている.

個別要素法による連続体の解析では, 連続体をある一定の半径を持つ要素の集合体と仮定する. 図-1 に示す通り, 要素間には法線方向および接線方向にばねとダッシュポットを, また, せん断方向の摩擦スライダーを挿入することで, 弾性および非弾性的性質を表現する.

接触判定の条件としては, 図-2 に示すような 2



k_n, k_s : 法線方向と接線方向ばね定数
 c_n, c_s : 法線方向と接線方向減衰係数
 μ : 摩擦係数

図-1 個別要素間の結合モデル

つの円要素の場合であれば次式によって表される。

$$D_{ij} > r_i + r_j \text{ (非接触)} \quad (1a)$$

$$D_{ij} \leq r_i + r_j \text{ (接触)} \quad (1b)$$

ここで、 $D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$: i, j 円要素の中心間距離、 x_i, y_i : i 要素の中心座標、 x_j, y_j : j 要素の中心座標、 r_i, r_j : それぞれ i, j 円要素の半径である。

i, j 円要素が接触している場合には、図-3 に示すように2つの要素中心を結ぶ線が全体座標系 x 軸となす角を α_{ij} (反時計回りを正) とすると、2要素間の法線方向および接線方向相対変位はそれぞれ以下のように表される。

$$\Delta u_n = (\Delta u_i - \Delta u_j) \cos \alpha_{ij} + (\Delta v_i - \Delta v_j) \sin \alpha_{ij} \quad (2a)$$

$$\Delta u_s = -(\Delta u_i - \Delta u_j) \sin \alpha_{ij} + (\Delta v_i - \Delta v_j) \cos \alpha_{ij} + r_i \Delta \phi_i + r_j \Delta \phi_j \quad (2b)$$

ここに、 $\sin \alpha_{ij} = -(y_i - y_j) / R_{ij}$ 、 $\cos \alpha_{ij} = -(x_i - x_j) / R_{ij}$

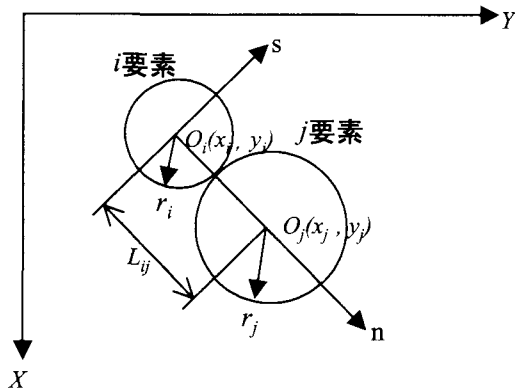


図-2 要素の接触

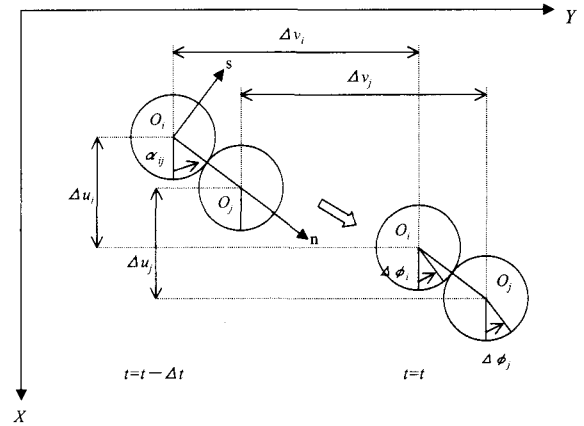


図-3 変位増分

である。

上記の相対変位をもとに、 i, j 円要素間に作用する時刻 t の法線方向および接線方向の力は、以下のように表される。

$$f_n^t = k_n \Delta u_n + c_n \dot{\Delta u}_n \quad (3a)$$

$$f_s^t = k_s \Delta u_s + c_s \dot{\Delta u}_s \quad (3b)$$

各時刻における各要素で全ての接触要素との作用力を以下の式で全体座標系に変換し、全合力を運動方程式に適用することで衝撃応答解析が可能となる。次式は要素 i についての時刻 t での全合力を示したものである。

$$[F_x^i]^t = \sum_j (-f_n^t \cos \alpha_{ij} + f_s^t \sin \alpha_{ij}) \quad (4a)$$

$$[F_y^i]^t = \sum_j (-f_n^t \sin \alpha_{ij} - f_s^t \cos \alpha_{ij}) \quad (4b)$$

$$[M^i]^t = -r_i \sum_j f_s^t \quad (4c)$$

時刻 t の加速度を次式で示される運動方程式より求め、差分法を用いて速度と変位を順次求めることができる。

$$[F_x^i]^t = m_i \ddot{u} \quad (5a)$$

$$[F_y^i]^t = m_i \ddot{v} \quad (5b)$$

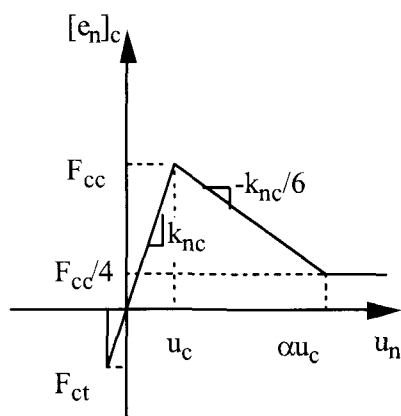
$$[M^i]^t = I_i \ddot{\phi} \quad (5c)$$

ここに、 m_i は要素の質量、 I_i は慣性モーメントである。

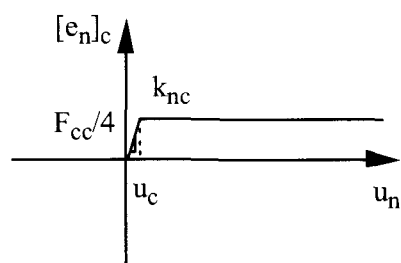
2.2 破壊基準と構成モデル

(1) コンクリート

コンクリートの構成モデルとして用いた法線方



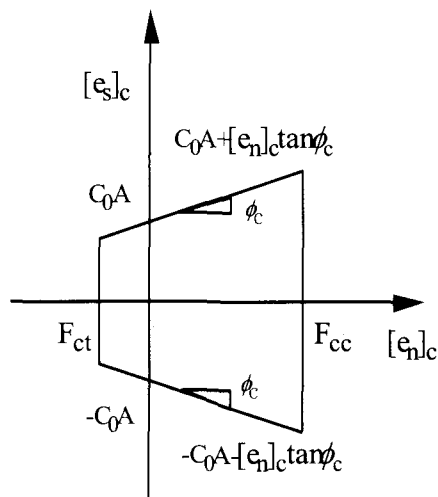
(a) 初期段階



(b) 再接触時

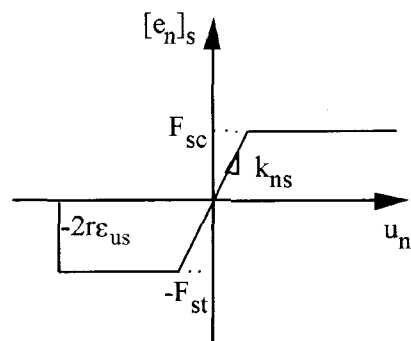
$[e_n]_c$: 法線方向ばね力
 F_{cc} : 降伏圧縮力
 F_{ct} : 破断引張力
 k_{nc} : 法線方向ばね定数
 u_n : 法線方向変位

図-4 コンクリートの法線方向ばね特性

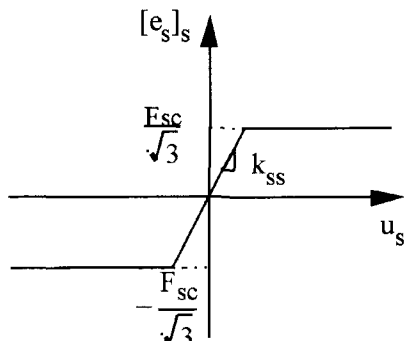


$[e_n]_c$: 法線方向ばね力
 $[e_s]_c$: 接線方向ばね力
 F_{cc} : 降伏圧縮力
 F_{ct} : 破断引張力
 C_0 : 粘着力
 A : 要素投影面積 $2fd$
 ϕ_c : 内部摩擦角

図-5 モール・クーロンの破壊基準



(a) 法線方向



(b) 接線方向

$[e_n]_s$: 法線方向ばね力
 $[e_s]_s$: 接線方向ばね力
 k_{ns} : 法線方向ばね定数
 k_{ss} : 接線方向ばね定数
 $2r$: 要素間の初期中心点間距離
 u_n : 法線方向変位
 u_s : 接線方向変位
 F_{sc} : 降伏力
 F_{st} : 引張力
 ϵ_{us} : 引張限界ひずみ

図-6 鉄筋のばね特性

向ばね力-変位関係を図-4(a) に示す。初期の段階では、法線方向ばね定数を k_{nc} とし、法線方向ばね力 $[e_n]_c$ が降伏圧縮力 $F_{cc} = s_{cc}A$ を越える時には初期ばね定数 k_{nc} の $1/6$ で軟化し、圧縮方向ばね力が応力解放により降伏圧縮力の $1/4$ に達すると、そのままの応力を維持するものとした。引張側は破断引張力 $F_{ct} = s_{ct}A$ を越えると法線方向ばね力 $[e_n]_c$ は応力をすべて解放するものとした。

破壊が生じた後に再接触する場合、図-4(b) に示すように圧縮方向には降伏圧縮力の $1/4$ まで抵抗できるものとした。

接線方向ばね力としては、図-5 に示すモール・クーロンの破壊基準を採用した。その破壊基準は、法線方向の圧縮及び引張基準に満たない場合、

$$[e_s]_c = \pm (C_0 \cdot A + [e_n]_c \cdot \tan \phi_c) \quad (6)$$

であり、法線方向の圧縮及び引張基準を越えると $[e_s]_c$ は零とした。

(2) 鉄筋及びスターラップ

鉄筋の構成モデルとして用いた法線方向ばね力

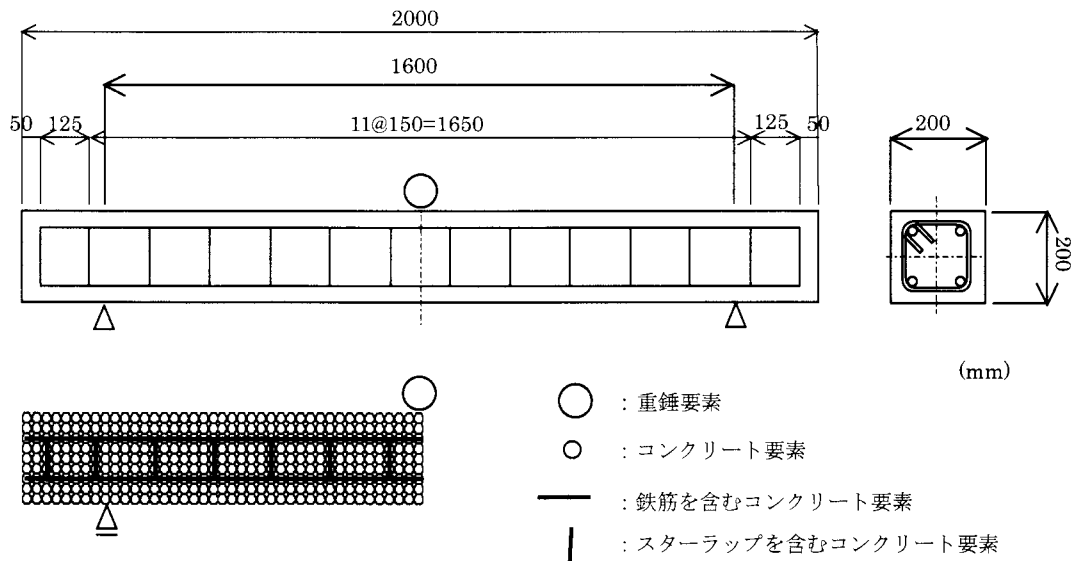


図-7 解析対象とした RC はりと解析モデル

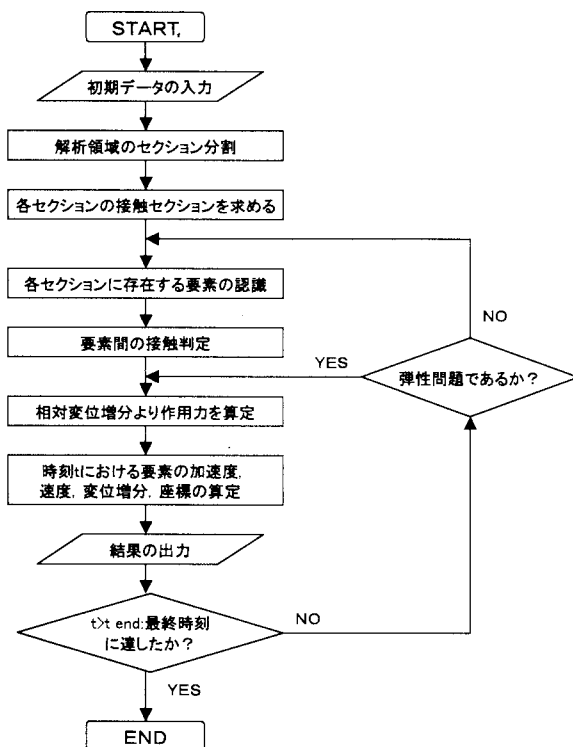


図-8 個別要素法の解析フローチャート

-変位関係を図-6(a) に示す。法線ばね力 $[e_n]_s$ は、降伏後引張限界ひずみ ε_{us} （本研究では $\varepsilon_{us}=20\%$ ）に達すると破壊するものとした。また、図-6(b) に接線方向ばね力-変位関係を示す。接線方向ばね力 $[e_s]_s$ は降伏後も一定の値を保つものとした。スタースラップも鉄筋と同様なばねの構成モデルとした。これらのばねはコンクリートばねと重ね合わせて用いた。

表-1 材料諸定数

コンクリート	
弾性係数 E_c (GPa)	29.7
ポアソン比 ν_c	0.167
圧縮強度 (MPa)	27.4
引張強度 (MPa)	2.51
鉄 筋	
弾性係数 E_s (GPa)	206
ポアソン比 ν_s	0.3
降伏強度 (MPa)	343

2.3 RC はりと解析モデル

図-7 に本研究で対象とした RC はりと解析モデルを示す。また、表-1 は RC はりの材料諸定数を示したものである。本解析で用いた要素半径は 12.5 mm であり、要素数は 369 個とした。図-8 に本解析のフローチャートを示す。

表-2 と表-3 に本研究の解析対象とした衝突条件を示す。表-2 で示したのは、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより、運動量を一定とする 2 グループであり、表-3 は衝突エネルギーを一定とした 2 グループである。衝突する重錘の運動量が 200 Ns と 350 Ns のものがそれぞれ 5 ケースずつ、重錘の衝突エネルギーが 100 Nm と 500 Nm のものがそれぞれ 7 ケースと 5 ケースである。

3. 解析結果および考察

表-2 衝突条件一覧（運動量一定）

CASE	質量 (kg)	速度 (m/s)	運動量 (kN・ms)	エネルギー (kN・mm)
MS1	100.0	2.00	200	200.0
MS2	150.0	1.33		132.7
MS3	200.0	1.00		100.0
MS4	250.0	0.80		80.0
MS5	300.0	0.67		67.3
ML1	90.0	3.89	350	680.6
ML2	100.0	3.50		612.5
ML3	122.3	2.86		500.0
ML4	150.0	2.33		408.3
ML5	200.0	1.75		306.3

表-3 衝突条件一覧（衝突エネルギー一定）

CASE	質量 (kg)	速度 (m/s)	運動量 (kN・ms)	エネルギー (kN・mm)
ES1	50.0	2.00	100.0	100
ES2	69.0	1.70	117.3	
ES3	100.0	1.41	141.0	
ES4	139.0	1.20	166.8	
ES5	200.0	1.00	200.0	
ES6	247.0	0.90	222.3	
EL1	62.5	4.00	250.0	500
EL2	122.3	2.86	350.0	
EL3	160.0	2.50	400.0	
EL4	250.0	2.00	500.0	
EL5	350.0	1.69	591.5	

重錘が RC はりに衝突時の衝撃荷重の最大値、荷重の作用時間、はりに作用する力積などについてパラメトリックに行った解析結果を示しその特性について考察する。

3.1 発生最大荷重

図-9 は、重錘質量、衝突速度、初期運動量そして衝突エネルギーと発生する衝撃力の最大値の関係を示したものである。同図(a)より衝突エネルギーが一定の場合も運動量が一定の場合も、最大荷重は重錘質量が大きくなると減少することがわかる。同図(b)より、どの場合においても、衝突速度が大きくなると最大荷重がほぼ線形的に増加することがわかる。同図(c)より衝突時の運動量が同じであっても、速度と質量の組み合わせにより最大荷重

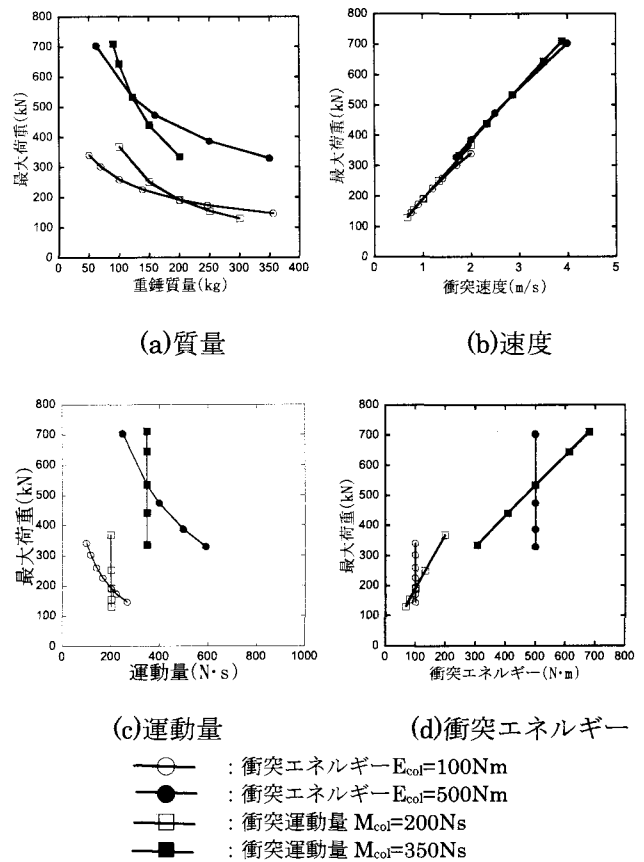


図-9 各種パラメーターと最大荷重

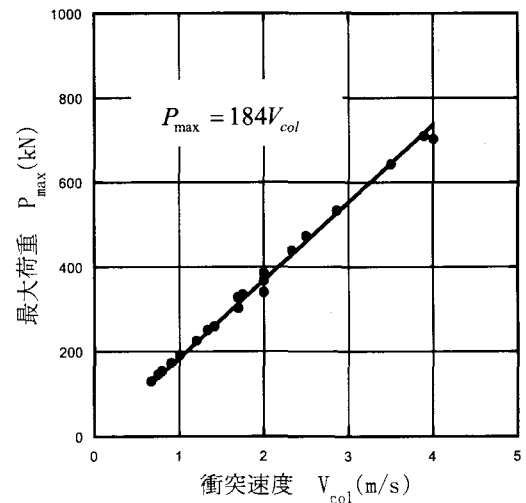


図-10 衝突速度と最大荷重

が大きく異なることがわかる。一方エネルギー一定の場合には運動量が大きいくほど衝突速度が小さくなるため最大荷重が小さくなることがわかる。また、同図(d)より運動量が一定の場合衝突エネルギーが増加すると最大荷重が増加し、衝突エネルギーが一定の場合には衝突速度が大きいくほど最大荷重が大きくなることがわかる。これらの傾向は著者らが過去に行った重錘落下実験結果でも同様な傾向を明らかに示している¹¹⁾。

以上より、最大荷重 P_{max} は衝突速度 V_{col} と比例関係が

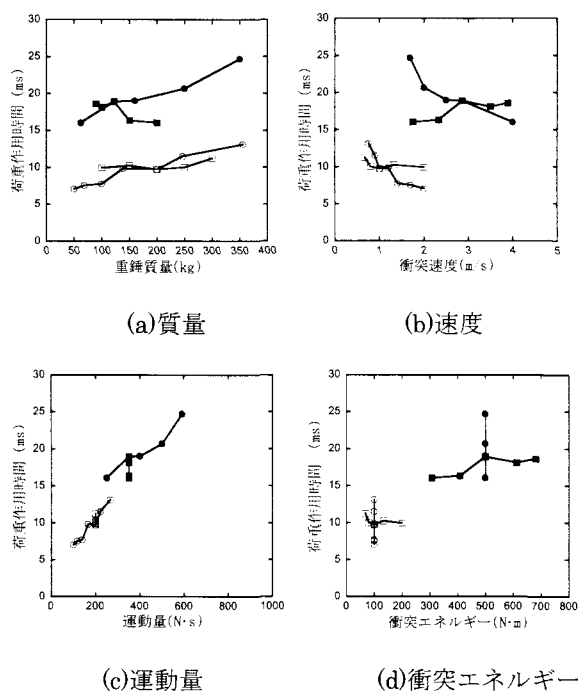


図-11 各種パラメーターと作用時間

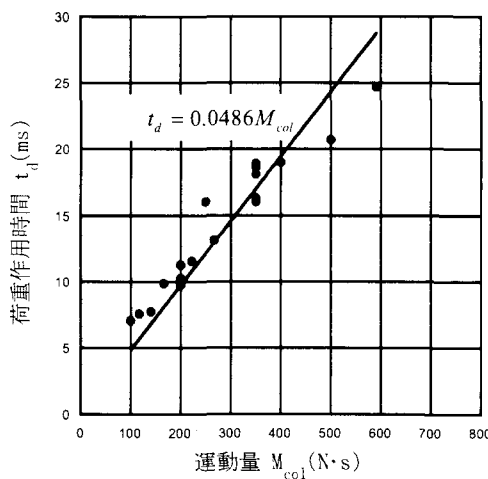


図-12 運動量と作用時間

認められ、近似式として次式が得られる。図-10に解析結果とともに示す。

$$P_{\max} = 184 V_{col} \quad (\text{kN}) \quad (7)$$

3.2 荷重の作用時間

図-11は、重錘質量、衝突速度、初期運動量そして衝突エネルギーと衝撃荷重の作用時間の関係を示したものである。同図(a)より最大荷重は重錘質量が大きくなると非常に緩やかに増加することがわかる。ただし、運動量が350Nsと大きい場合にはその傾向は不明瞭である。同図(b)より、どの場合においても、衝突速度が大きくなると作用時間が小さくなることがわかる。同図(c)より運動量

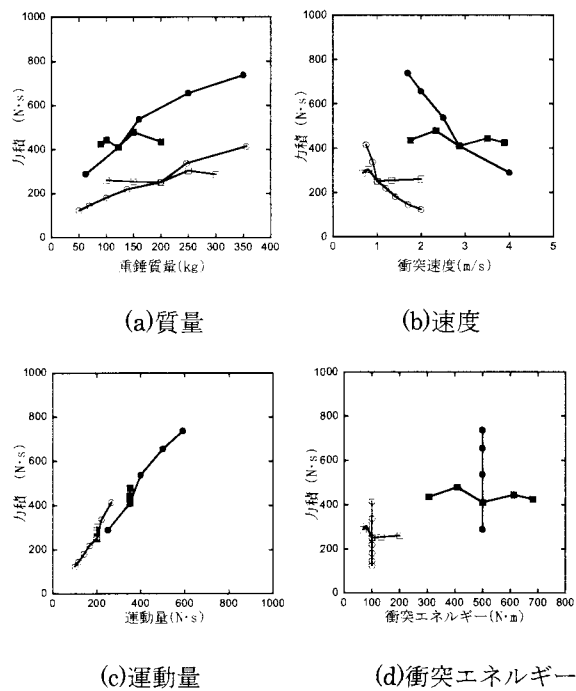


図-13 各種パラメーターと力積

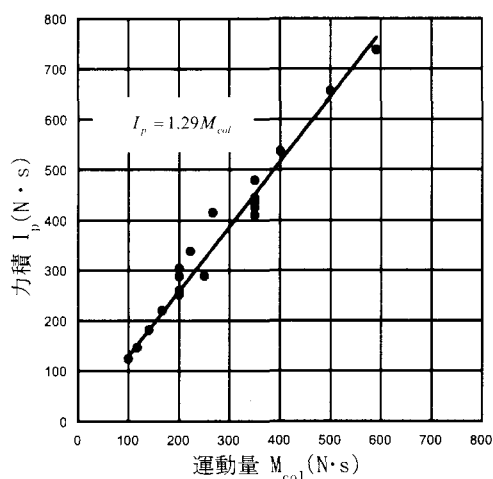


図-14 運動量と力積

が増加すると作用時間が単調に増加することがわかる。運動量が同じでエネルギーが異なっても作用時間に大きな差異はないことがわかる。また、同図(d)より運動量が一定の場合衝突エネルギーが増加しても作用時間にほとんど変化がなく、衝突エネルギーが一定の場合には運動量が大きいほど作用時間が大きくなることがわかる。以上より、荷重の作用時間 t_d は衝突時の運動量 M_{col} と比例関係にあると仮定すると次式が得られる。図-12に解析結果とともに示す。

$$t_d = 0.0486 M_{col} \quad (\text{ms}) \quad (8)$$

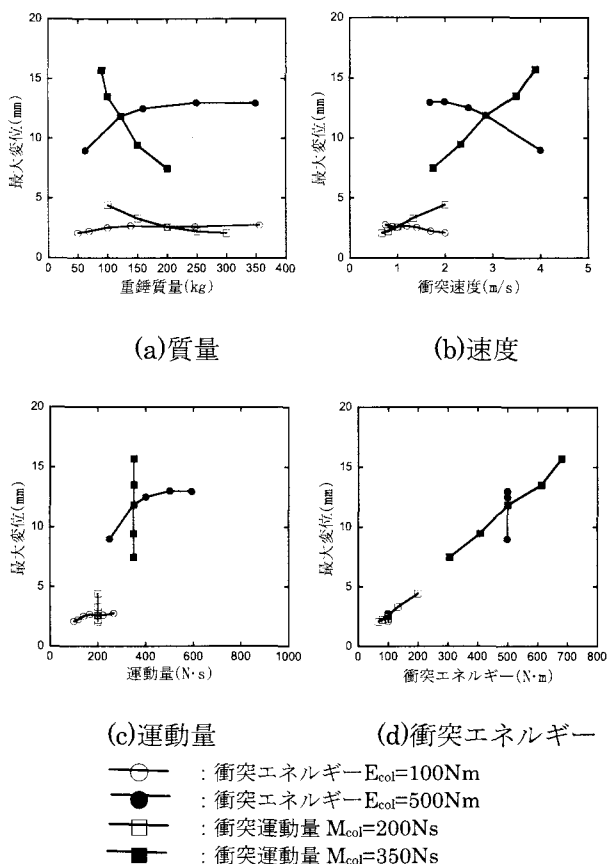


図-15 各種パラメーターと最大変位

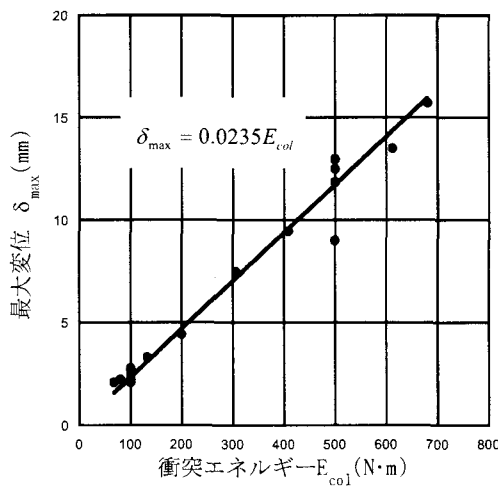


図-16 運動エネルギーと最大変位

3.3 力積

図-13は、重錘質量、衝突速度、初期運動量そして衝突エネルギーと衝撃荷重による力積の関係を示したものである。同図(a)より最大荷重は重錘質量が大きくなるといずれの場合も緩やかに増加することがわかる。同図(b)より、どの場合においても、衝突速度が大きくなると力積が小さくなることをわかる。これは最大荷重の傾向と異なり、作用時間の傾向と同じであることより、衝突初期に発生する大きな荷重よりむしろそれに引き続く小さな荷重作用が力積を支配することがわかる。同図(c)より運

動量が増加すると力積が単調に増加することがわかる。運動量が同じでエネルギーが異なっても力積には大きな差異はないことがわかる。また、同図(d)より運動量が一定の場合衝突エネルギーが増加しても力積に変化はなく、衝突エネルギーが一定の場合には運動量が大きいほど力積が大きくなることをわかる。

以上より、荷重による力積 I_p は衝突時の運動量 M_{col} と比例関係にあると仮定すると次式が得られる。図-14に解析結果とともに示す。ここで示した解析では、重錘とはりとの衝突時に、重錘は衝突後反発し、衝突前と後では速度の向きが異なるため、発生する力積は重錘の初期運動量より大きい。

$$I_p = 1.29 M_{col} \quad (\text{N} \cdot \text{s}) \quad (9)$$

3.4 応答最大変位

図-15は、重錘質量、衝突速度、初期運動量そして衝突エネルギーとはりに生ずるスパン中央の最大変位の関係を示したものである。同図(a)より運動量が一定の場合に、最大変位は重錘質量が大きくなると減少することがわかる。エネルギーが一定の場合には重錘質量が増加すると増加の傾向が見られるもののある程度以上ではほとんど影響しないことがわかる。同図(b)より、運動量が同じ場合には衝突速度の増加に伴い最大変位が増加することがわかる。衝突エネルギーが同じ場合には、衝突速度が大きい時に最大変位の減少が一部認められるものの衝突速度の影響は比較的小さい。同図(c)より衝突時の運動量が同じであっても、速度と質量の組み合わせにより最大変位が大きく異なることがわかる。一方エネルギー一定の場合には運動量が小さいときに最大変位がやや小さいものの大きな差異は認められない。また、同図(d)より衝突エネルギーが増加すると最大変位が増加するが、衝突エネルギーが一定の場合、運動量が異なっても最大変位に大きな差異は認められない。これらの傾向は著者らが過去に行った重錘落下実験結果でも同様な傾向を明らかに示している¹¹⁾。

最大変位 δ_{max} が衝突エネルギー E_{col} と比例関係にあるとすると次式が得られる。図-16に解析値とともに近似式を示す。

$$\delta_{max} = 0.0235 E_{col} \quad (\text{mm}) \quad (10)$$

3.5 吸収エネルギー

図-17は、重錘質量、衝突速度、初期運動量そして衝突エネルギーと吸収エネルギーの関係を示したものである。なお、吸収エネルギーとは衝撃力とはりのスパン中央変位によって囲まれる面積のことである。同図(a)より運動量が一定の場合には、最大変位は重錘質量が大きくなると減少することがわかる。エネルギーが一定の場合には

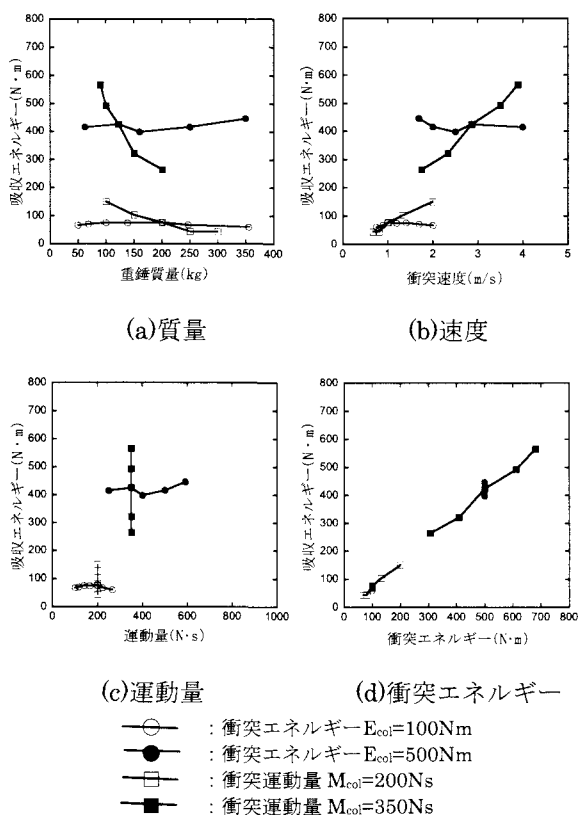


図-17 各種パラメータと吸収エネルギー

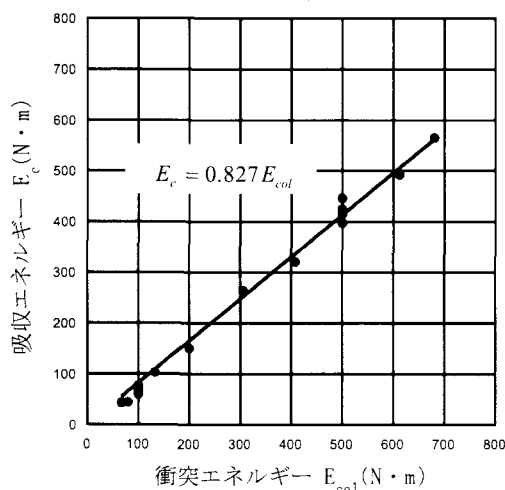


図-18 運動エネルギーと吸収エネルギー

重錘質量が変化しても吸収エネルギーには変化は認められない。同図(b)より、運動量が同じ場合には衝突速度の増加に伴い吸収エネルギーが増加することがわかる。衝突エネルギーが同じ場合には、衝突速度によらず吸収エネルギーはほぼ一定である。同図(c)より衝突時の運動量が同じであっても、速度と質量の組み合わせにより吸収が大きく異なることがわかる。一方エネルギー一定の場合には吸収エネルギーに大きな差異は認められない。また、同図(d)より衝突エネルギーが増加すると吸収が増加するが、衝突エネルギーが一定の場合、運動量が異なっても吸収エネルギーの差異はきわめて小さいことがわか

る。

吸収エネルギー E_c が衝突エネルギー E_{col} と比例関係にあるとすると次式が得られる。図-18に解析値とともに近似式を示す。

$$E_c = 0.827 E_{col} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (11)$$

3.6 衝撃特性値とその利用

以上の解析結果と考察により、重錘が RC はりに衝突する場合の特性値は図-19に示すようにまとめられる。すなわち、荷重の最大値は衝突速度に、荷重の作用時間と力積は衝突運動量に、変位と吸収エネルギーは衝突エネルギーに比例していることが明らかとなった。

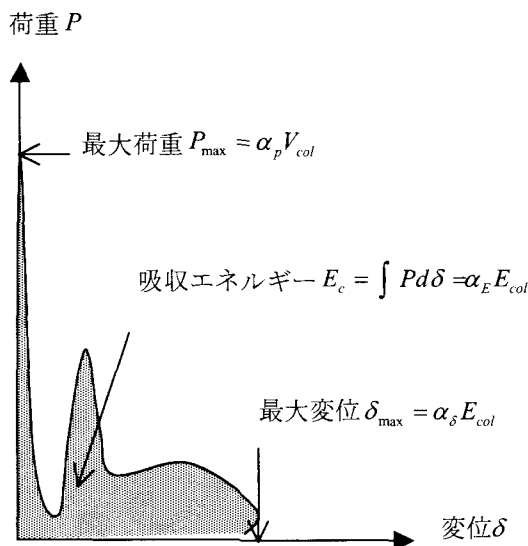
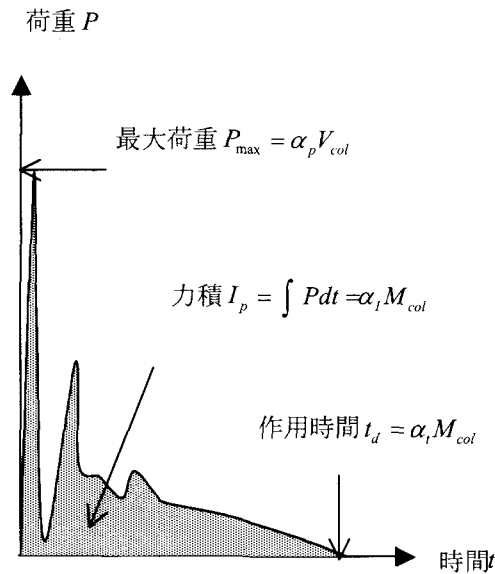
岸らは RC はりの衝撃実験により曲げ破壊型の吸収エネルギー量を明らかにしている。そして、得られた支点反力を荷重と等価することにより、曲げ破壊型の耐力を吸収エネルギーと終局変形量を用いた定式化を提案している¹²⁾。また、著者らは、クッション材がある場合の構造物に伝達されるエネルギー算定の近似式を示している¹³⁾。このような現状に鑑み、今後、耐衝撃設計を行うためには、部材や構造物の性能照査を行う一つの有力な方法として、吸収エネルギー（伝達エネルギー）を用いることが考えられる。

静的荷重を RC はりが受ける場合、図-20に示す荷重変位曲線による簡易なモデル化が可能である。この場合のエネルギーは、 $P_u \delta_u$ といった平行四辺形の面積として求めることができる。ここに P_u は静的曲げ耐力、 δ_u は許容限界変位である。このエネルギーが、式(11)で示したような衝撃による吸収エネルギー（はりへの伝達エネルギー）と等しいとすると、静的曲げ耐力 P_u の算定が次式のように可能となる。

$$P_u = \alpha_E \frac{E_{col}}{\delta_u} \quad (12)$$

ここに、 E_{col} は衝撃エネルギー（入力エネルギー）であり、 α_E は部材への伝達率を表す定数であり、本例では $\alpha_E = 0.827$ が得られている。

本研究では、ある RC はりのスパン中央に比較的低速度の衝撃が作用して、はりに曲げ型の破壊を生ずる場合についての検討結果を示した。今後、性能照査型耐衝撃設計法の確立に向け、実験による検証を含め、一般的な α_E の算定についてさらなる検討とデータの蓄積が必要と考えている。なお、本論文では、式(7)～式(12)で表される衝撃応答に関する諸量算定の近似式を示したが、これらの適用範囲は、1)境界条件 単純梁、2)荷重作用位置 スパン



V_{col} : 衝突速度
 t_d : 荷重作用時間
 M_{col} : 衝突運動量
 E_{col} : 衝突エネルギー
 $\alpha_p, \alpha_t, \alpha_I, \alpha_\delta, \alpha_E$: 比例定数

図-19 衝撃特性値

中央, 3)重錘質量 50~386 kg, 4)衝突速度 1.00~6.26 m/s, 5)衝撃体形状 円形である。

4. 結 論

本研究では最も基本的な部材の一つである RC はりの衝撃挙動の解明を目指し、RC はりの衝撃破壊解析での有効性を確認している個別要素法による

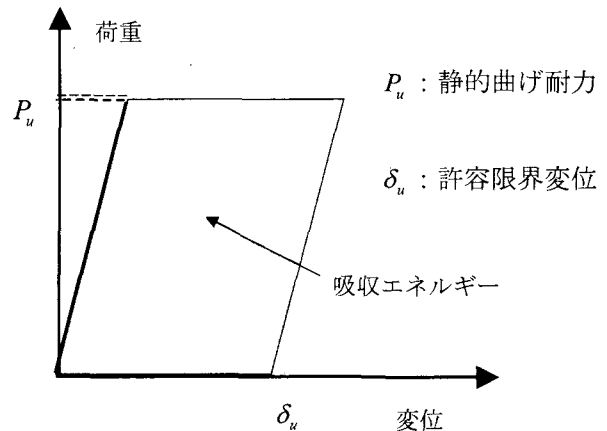


図-20 荷重変位関係の一般モデル

パラメトリックな衝撃挙動解析を行った。

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 個別要素法による RC はりの衝撃解析法を示すとともに、各種条件下の解析により得られた衝撃特性値についての検討結果を示した。
- (2) 比較的低速度(6m/s 程度)の衝突においては、荷重の最大値は衝突速度に、荷重の作用時間と力積は衝突運動量に、変位と吸収エネルギーは衝突エネルギーに比例していることを明らかにし、変位を表す近似式と適用範囲を示した。
- (3) 吸収エネルギーが衝突エネルギーとの関係で与えられることより、エネルギーの観点から求まる等価な耐衝撃曲げ耐力について議論し、今後の性能設計型耐衝撃設計法への一つの可能性を示した。

参考文献

- 1) 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会：委員会経過報告，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集第Ⅱ編，土木学会，2000年6月
- 2) 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会：衝撃実験・解析の基礎と応用，構造工学シリーズ15，土木学会，2004年3月
- 3) 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，pp.1831-1842，2000年3月
- 4) 山本満明，榎谷浩，音田奨，堀江義徳，熊谷貴秀：鉄筋コンクリートはりに対する重錘落下衝撃実験とその挙動に関する考察，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1683-1694，2001年3月
- 5) 土木・建築にかかる設計の基本検討委員会：土木・建築にかかる設計の基本，国土交通省，2002年10月

- 6) 衝撃問題研究小委員会：ロックシェットの耐衝撃設計，土木学会，構造工学シリーズ 8，1998 年 11 月
- 7) 園田佳巨，石川信隆，園田恵一郎，太田俊昭：P C 落石覆工の耐荷力評価と安全性照査法に関する研究，土木学会論文集，No. 495/ I -28，pp. 83-92，1994 年 7 月
- 8) 榊谷浩，中田吉彦，梶川康男：個別要素法の衝撃問題への適用に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 1477-1487，1992 年 3 月
- 9) 中田吉彦，榊谷浩，梶川康男，森嶋芳大：個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol. 44A，1761-1771，1998 年 3 月
- 10) 矩形 RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関するラウンドロビンアナリシス，構造工学論文集，Vol. 49A，1299-1310，2003 年 3 月
- 11) 衝突体の運動エネルギーおよび運動量に着目した RC はりの衝撃特性に関する研究，構造工学論文集，Vol. 48A，1493-1503，2002 年 3 月
- 12) 岸徳光，三上浩，松岡健一，安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案，土木学会論文集，No. 647/ I -51，pp. 177-190，2000 年 4 月
- 13) 榊谷浩，中田吉彦：DEM と FEM の結合解析手法の開発と落石覆工解析への適用について，土木学会論文集，No. 710/ I -60，pp. 113-128，2002 年 7 月

(2004 年 9 月 17 日受付)