

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

Analysis of Impact Behavior of Reinforced Concrete Beam by the Distinct Element Method

中田吉彦、榊谷浩、梶川康男、森嶋芳大

Yoshihiko NAKATA*, Hiroshi MASUYA**, Yasuo KAJIKAWA *** and Yoshihiro MORISHIMA****

*工修 小松市役所 都市整備部 (〒923 小松市小馬出町91)

**工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

***工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

**** 金沢大学大学院 工学研究科土木建設工学専攻 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

The distinct element method is applied to the analysis of the behavior of reinforced concrete beam under impact. At first, we describe how to apply Distinct Element Method to the reinforced concrete beam considering the constitutive models of the concrete and the reinforced concrete bar. The effectiveness of this method is confirmed comparing with experimental data after the parametric studies of the softening of concrete and the rate effect of the steel. Furthermore, the effects of the velocity and momentum of the missile to the behavior of the simply supported become clear.

keywords: impact, reinforced concrete beam, distinct element method

1. まえがき

著者らは、落石覆工などの落石による衝撃問題について研究を行ってきたが、落石が砂などの緩衝層に衝突した場合に構造物に作用する衝撃力や弾性範囲内の応答特性についてはかなり明らかにされてきている^{1,2,3,4,5)}。しかし、落石は自然現象であるため、設計時に想定しなかった規模の落石や岩盤崩落が発生し構造物の破壊により惨事に至ることも少なくないのが現状である。このような落石衝突に対して安全性を確認し設計するために、落石覆工の構造物としての破壊挙動、耐衝撃性の解明が求められている。しかしながら、このような実験データは少なく不明な点が多いのが現状である^{6,7,8,9)}。

落石覆工は橋梁などの土木構造物と同様にはり、柱そして板により構成されるのが一般的である。構造物の挙動を知る上で構造を構成する個々の部材の衝撃破壊挙動の解明がまず必要である。部材の衝撃挙動特性は実験的に得ることが理想的だが、各種の条件下での十分な情報獲得は困難と考えられ、数値工学を用いた数値実験との併用が現実的と考えられる。このような背景で、各種コンクリート板にFEMを適用した宮本らの研究¹⁰⁾、砂防ダムにRBSMを適用した石川らの研究¹¹⁾、板の波動伝播に固有関数展開法を適用した石丸らの研究¹²⁾、コンクリート中の衝撃波伝播と振動問題にDEMを適用した著者らの研究¹³⁾、鉄筋コンクリート板にDEMを適用した森川らの研究¹⁴⁾など各種の数値解析的アプローチが行われている。

このような観点より、本論文は、最も基本的な部材である鉄筋コンクリートはりの比較的低速度の衝突による衝撃破壊挙動の解明をめざし、個別要素法を適用したものである。

最初に、個別要素法による解析方法と鉄筋コンクリートはりへの適用方法について説明する。次にコンクリートの軟化モデルを設定し衝撃挙動に与える影響を考察する。引き続き、コンクリートと鉄筋のひずみ速度効果についてパラメトリックスタディによる検討を行い、実験結果との比較により、本解析方法が実際の鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動をよく再現することを示す。最後に、本解析方法を用いて衝突物の衝突速度や運動量が与える影響について考察し、衝撃力や挙動特性に関し得られた知見を示す。

2. 個別要素法の解析概要

2.1 解析方法

著者らは、粒状体などの不連続体解析に有効とされる個別要素法を発展させ、連続体の衝撃問題へ適用し、その有効性について明らかにしている¹³⁾。また、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、近年盛んに用いられている^{14,15)}。

コンクリートをある一定の半径を持つ要素の集合体と仮定し、図-1に示す通り、要素間の法線方向および接

線方向にばねとダッシュポットを挿入することで、弾性および非弾性的性質を表現する¹⁶⁾。この場合、個々の要素の運動方程式を以下に示す時間に関する差分法を用いて逐次計算を進めた。

$$m[\ddot{u}]^t = -c[\dot{u}]^{t-\Delta t} + k[u]^{t-\Delta t} \quad (1a)$$

$$I[\ddot{\phi}]^t = -cr^2[\dot{\phi}]^{t-\Delta t} + kr^2[\phi]^{t-\Delta t} \quad (1b)$$

ここで、 u および ϕ はそれぞれ並進変位、回転変位、 m および I はそれぞれ各要素の質量、慣性モーメントであり、 k および c はバネ定数と減衰定数である。また、 r は要素を円筒とみなしたときの半径である。なお、ドット(・)は時間に関する微分を表している。

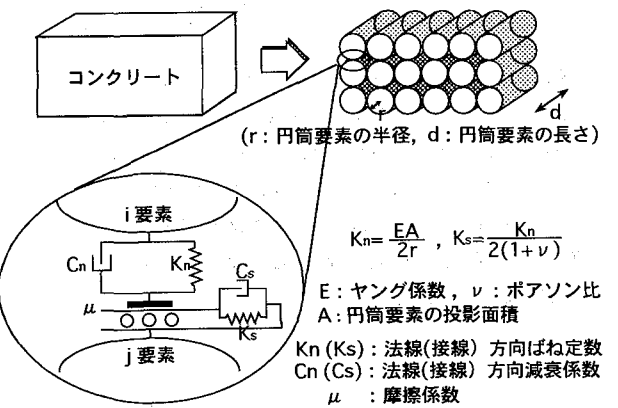


図-1 要素間の結合モデル

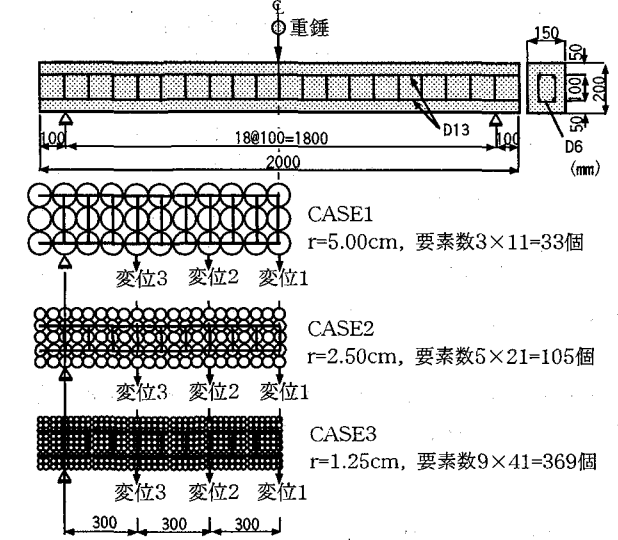


図-2 鉄筋コンクリートはり要素分割

2.2 解析モデル

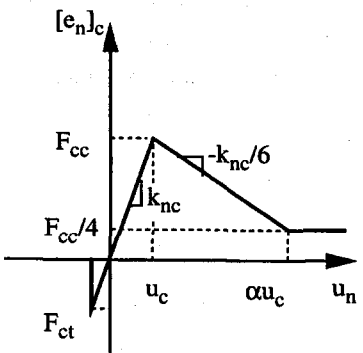
解析対象としたはり、図-2に示す長さ200cm、高さ20cm、幅15cmの単純はりで、質量200kgの剛体の重錘に初速度400cm/sを与え、はりに衝突させる。また、この鉄筋コンクリートはりの解析モデルおよび、解析結果出力位置も図中に示す。著者らは、ここで示した最も使用が容易である要素配列以外の要素配列についても検討を行

い配列修正係数を導入し同じ結果を得ることを確認している¹³⁾。なお、材料諸定数は表-1に示す通りであり、減衰係数は零とし、計算時間刻みは $2.94 \times 10^{-7}(\text{s})$ とした。

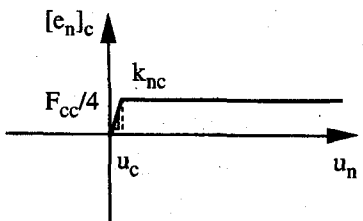
要素の種類としては、コンクリート要素、鉄筋を含むコンクリート要素、スターラップを含む要素、鉄筋およびスターラップを含む要素の4種類である。

表-1 材料諸定数

コンクリート	
弾性係数 (kgf/cm ²)	3.42×10^5
ポアソン比	0.19
圧縮強度 (kgf/cm ²)	281
引張強度 (kgf/cm ²)	28
粘着力 (kgf/cm ²)	70.3
内部摩擦角 (°)	11
比重	2.35
鉄筋、スターラップ	
弾性係数 (kgf/cm ²)	2.13×10^6
ポアソン比	0.30
降伏強度 (kgf/cm ²)	4684
破断ひずみ	0.20
比重	7.85



(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-3 コンクリートの法線方向ばね特性

2.3 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向ばね力-変位関係を図-3(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

$F_{cc}=\sigma_c A$ 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 $F_{ct}=\sigma_c A$ 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。

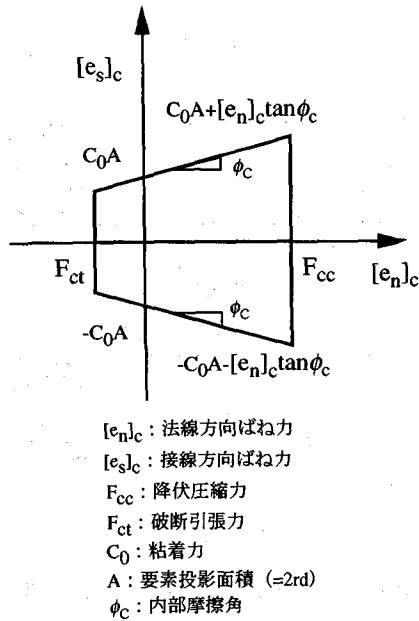
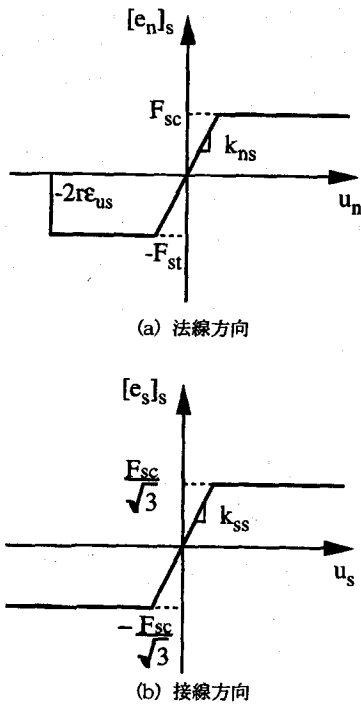


図-4 モール・クーロンの破壊基準



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

図-5 鉄筋のばね特性

破壊が生じた後に再接触する場合、図-3(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-4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、

$$[e_s]_c = \pm(C_0 A + [e_n]_c \tan \phi_c) \quad (2)$$

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) 鉄筋及びスタースラップ

鉄筋の構成モデルとして用いた法線方向ばね力-変位関係を図-5(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 $\epsilon_{us}=20.3\%$)に達すると破壊するものとした。また、図-5(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。

2.4 解析例

図-6は、各要素分割における荷重波形を示したものである。著者らの既往の研究では弾性範囲内では要素分割が大きいほど最大変位が小さく振動周期が短くなる傾向が認められており、はり高さ要素半径の比で定まる修正ばね定数を用いることを提案している¹³⁾。本計算例ではその修正ばね定数を用いた。

要素分割が最も粗いCASE1では、荷重の立ち上がりがするどく、ピークの値が大きいことがわかる。また、作用時間もCASE2、3に比べて極めて短いことがわかる。CASE2、3では、CASE1では見られなかった第2波目の荷重波形が時刻5ms程度から現れている。衝突速度が400cm/sの場合、過去の実験より作用時間は数十ms程度と考えられるため、実際の衝撃現象を再現するには、CASE2及びCASE3程度の要素分割数が必要であると考えられる。

図-7は各要素分割での変位応答を示したものである。また、図-8は時刻40msにおけるクラック図を示したものである。

CASE1においては、各変位は時間とともに単調増加し、ほぼ剛体変位を示していることがわかる。これはスパン中央より15cmの位置、すなわち打撃点付近では下端より発生したクラックが大きく発展し、はり全体としては塑性ヒンジが生じた状態となっているためである。

CASE2では、変位1は衝突後スパン中央の下側鉄筋が5.5ms程度で降伏した後さらに増加し50ms程度で最大値に達し緩やかに減少し85ms程度よりほぼ一定値をとっている。変位2、変位3は位相がおのおの数ms遅れがあるものの同様な応答を示している。

CASE3では、最大値がCASE2に比べ小さく、時間的にはピーク時で10ms程度早い、全体挙動はCASE2と同様

であることがわかる。

以上のように要素が極端に粗い場合には破壊挙動を再現できないことが予想されるため、以後の計算はCASE3を基準とすることにする。

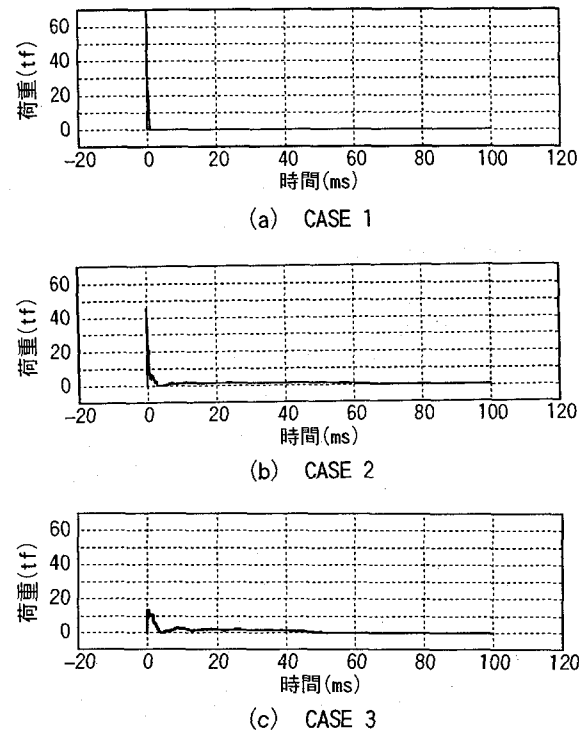


図-6 荷重波形（要素分割の影響）

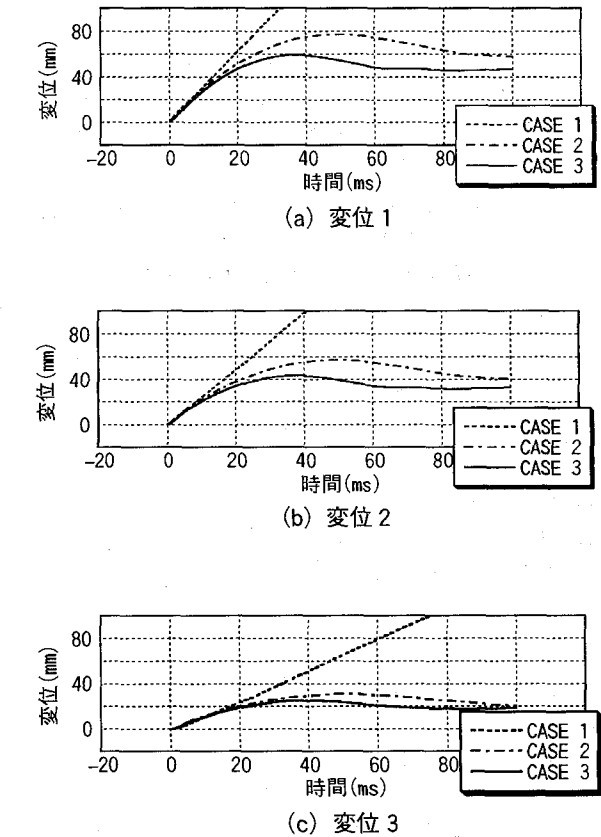


図-7 変位波形（要素分割の影響）

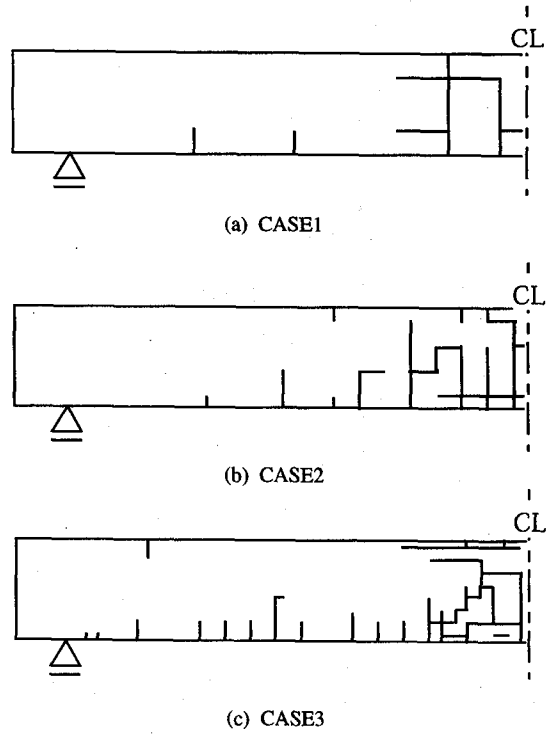


図-8 クラック図（要素分割の影響）

3. 鉄筋コンクリートはりの衝撃応答解析

3.1 軟化モデルの影響

図-9はコンクリートの法線方向ばね特性を表す軟化モデルを示したものである。圧縮強度に到達後の軟化勾配 $k_{ncsf} = -k_{nc}/n$ はそれぞれ $n=4, 6, 12$ である。なお、要素配列については前章のCASE3を用い、解析に用いた諸定数は表-1と同じである。図-10は各軟化モデルの荷重波形を示したものである。軟化勾配がもっとも緩やかな $n=12$ の場合、他の場合に比べ最大値と作用時間がわずかに大きい。これは衝突点の極近傍でしか軟化が認められないためであると考えられる。

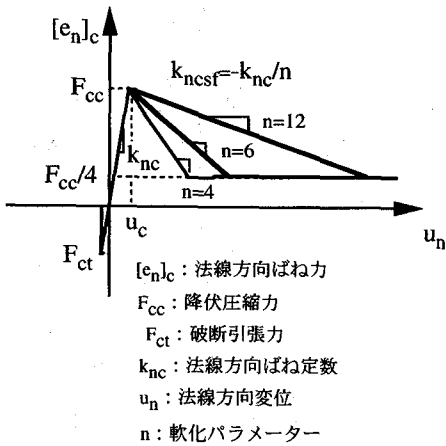
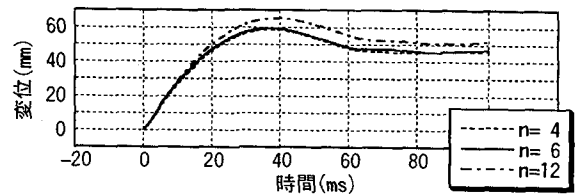


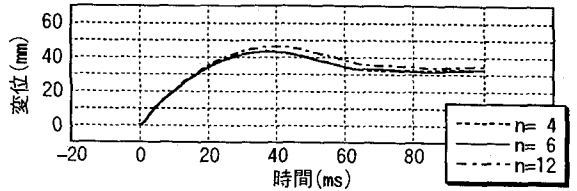
図-9 コンクリートの軟化モデル

図-1 1 は各点における変位波形を示したものである。軟化が最も緩やかな $n=12$ の場合、他の場合に比べ変位がわずかに大きいことがわかる。しかし、波形形状は軟化モデルにはほとんど依存しないことがわかる。

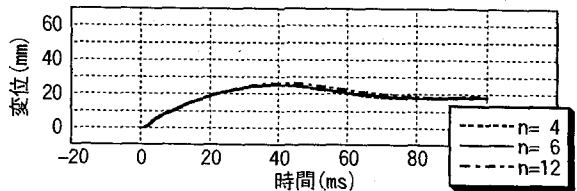
鉄筋コンクリートはりが衝撃を受ける場合には、はりに吸収されるエネルギーは耐衝撃性を評価する場合に非常に重要である。衝撃時のエネルギーは、はりの弾性ひずみエネルギーと運動エネルギーなど以外には、はりに損傷が生じる場合、コンクリートの破壊に消費されるエネルギーと鋼材の塑性変形に要するエネルギーが特に重要と考えられる。そこでここでは破壊エネルギーについて調べてみた。図-1 2 はコンクリートと鉄筋の塑性エネルギーの時間変化を示したものである。ここではコンクリートの塑性ひずみエネルギーとはコンクリートの引張破壊時のひずみエネルギーと圧縮降伏後のひずみエネルギーの部材全体における総和とし、鉄筋の塑性ひずみエネルギーとは鉄筋降伏によるひずみエネルギーの部材全体における総和とした。コンクリートの塑性ひずみエネルギーは、どの場合も衝突と同時に急激に立ち上がり、時刻5msには最大値に達している。この場合も軟化モデルによる有意な影響はほとんど認められない。鉄筋の塑性ひずみエネルギーは5ms程度より比較的緩やかに増加し始め35ms程度で最大値に達している。軟化勾配がもっとも緩やかな $n=12$ の場合、他の場合に比べ最大値がわずかに大きい、有意な差異はほとんどないことがわかる。



(a) 変位 1

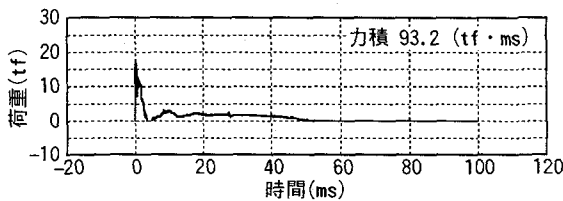


(b) 変位 2

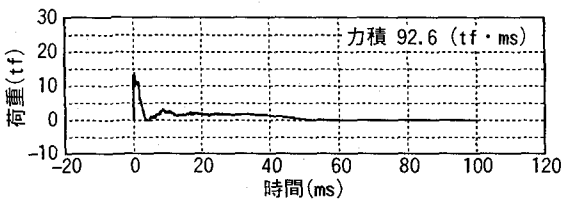


(c) 変位 3

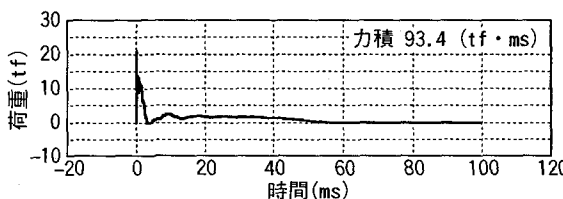
図-1 1 変位波形（軟化モデルの影響）



(a) $n = 4$

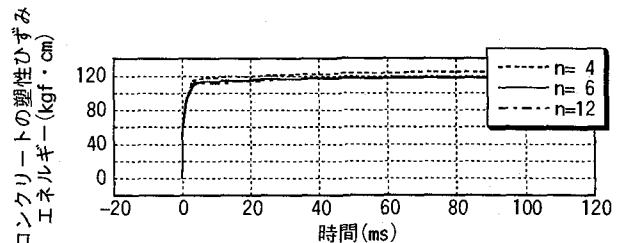


(b) $n = 6$

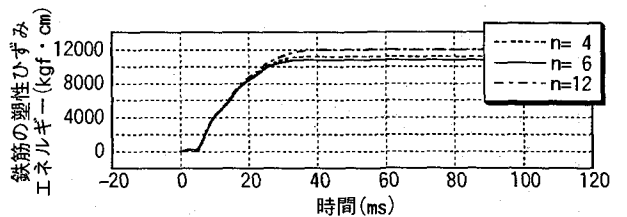


(c) $n = 12$

図-1 0 荷重波形（軟化モデルの影響）



(a) コンクリートの塑性ひずみエネルギー



(b) 鉄筋の塑性ひずみエネルギー

図-1 2 塑性ひずみエネルギーの変化（軟化モデルの影響）

3.2 材料のひずみ速度効果による影響

ここでは、著者らが行った鉄筋コンクリートはりの衝撃実験に本解析方法を適用し、材料のひずみ速度効果による影響について比較検討する。

(1) 実験の概要

図-13は重錘落下式衝撃実験で使用した実験装置を示す。これは鉄板を重ね合わせロードセルと一体化した重錘（総質量193kg）を磁石を用いて所定の高さまで釣り上げ自由落下させるいわゆる自由落下式の実験装置である。はりの支点部ではリバウンドを防ぐため鋼製の治具により上下方向を固定されている¹⁷⁾。

実験に用いた鉄筋コンクリート供試体と解析に用いたモデルを図-14に示す。

(2) ひずみ速度効果考慮モデル

衝撃特性などの載荷速度が大きい荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の挙動特性は、材料に生ずるひずみ速度の影響により静的な場合に比べ異なるといわれている⁷⁾。材料のひずみ速度効果はかなり明らかにされてきているが、高速の場合、実験条件の設定や測定上の問題点また寸法効果の影響などにより、広く解析や設計に用いられるレベルまで十分には明らかにされていないのが現状である。既往の研究として、コンクリートについては竹田ら¹⁸⁾、山口ら¹⁹⁾の研究が、鋼材については高橋ら²⁰⁾、岩井ら²¹⁾の研究があげられる。

本研究では鉄筋に関しては次式で示される高橋らの提案式を用いた。

$$DIF_s = 1.202 + 0.040 \log \dot{\epsilon}_s \tag{3}$$

ただし、 DIF_s はひずみ速度効果による強度増加率、 $\dot{\epsilon}_s$ は鉄筋のひずみ速度である。実験ではりの中央下側鉄筋の応答初期のひずみ速度の値を代入し、 DIF_s は1.2を得た。

また、コンクリートの材料特性に及ぼすひずみ速度効果は、一般的に引張の場合最大で圧縮が最小、曲げはその中間であると報告されている。また、コンクリートの増加率は鋼材に比べ一般に大きいとされている⁷⁾。しかし、各強度の増加率の詳細については現在もお不明な点も多い。このような現状より、本研究では、ひずみレベルなどと無関係にコンクリートの圧縮強度の DIF_{cc} を1.7、引張強度の増加率 DIF_{ct} を3.7と仮定した¹⁹⁾。

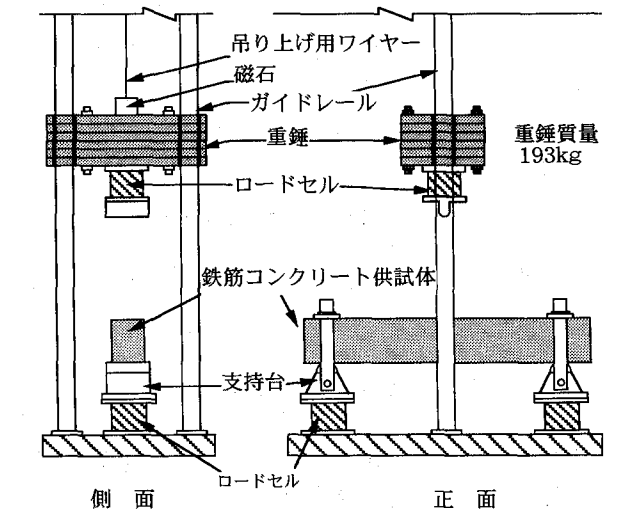


図-13 実験概要図

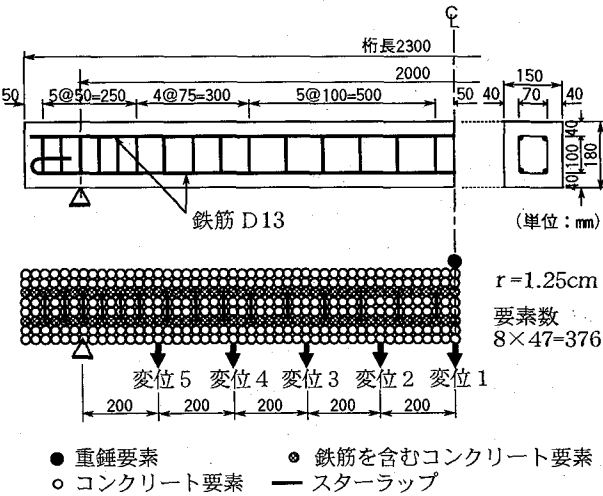


図-14 供試体と解析モデル図

(3) 実験結果との比較検討

ひずみ速度効果による影響を実験値と比較検討するために、解析に用いたケースは表-2に示す通りである。

表-2 各ケースにおける動的強度増加率

CASE	DIF_{cc}	DIF_{ct}	DIF_s
A	-	-	-
B	1.7	3.7	-
C	-	-	1.2
D	1.7	3.7	1.2

解析のケースは、ひずみ速度効果を、鉄筋とコンクリートのどちらも考慮しないもの（CASE A）、コンクリートのみを考慮するもの（CASE B）、鉄筋のみを考慮するもの（CASE C）そして鉄筋とコンクリートのどちらも考慮するもの（CASE D）の4種類とした。

図-15は重錘質量193kg、衝突速度400cm/sの条件下での荷重波形を示したものである。初期の荷重最大値はコンクリートのひずみ速度効果を考慮していないCASE AとCASE Cで小さく、コンクリートのひずみ速度効果を考慮したCASE BとCASE Dでは大きくなっている。これよりコンクリートのひずみ速度効果の方が鉄筋のひずみ速度効果に比べ最大値に与える影響が大きいことがわかる。一方、力積については、CASE Aで最も小さく、CASE B、CASE C、CASE Dの順で大きくなっている。これより、鉄筋のひずみ速度効果の方がコンクリートのひずみ速度効果に比べ力積に与える影響が大きいことがわかる。また、本計算例ではCASE D、すなわちコンクリートと鉄筋双方のひずみ速度効果を考慮した場合が、最も実験をよく再現している。

図-16は各点における変位波形を示したものである。変位の最大値はどの点においてもCASE Aで最も大きく、CASE C、CASE B、CASE Dの順で小さくなっている。これよりコンクリートのひずみ速度効果の方が鉄筋のひずみ速度効果に比べ最大値に与える影響が大きいことがわ

かる。本計算例ではCASE D、すなわちコンクリートと鉄筋双方のひずみ速度効果を考慮した場合の変位波形が最も実験波形を再現している。図-17は時刻40msにおけるクラック図を示したものである。これからもコンクリートと鉄筋双方のひずみ速度効果を考慮したCASE Dのひび割れ状況が実験結果に近いことがわかる。

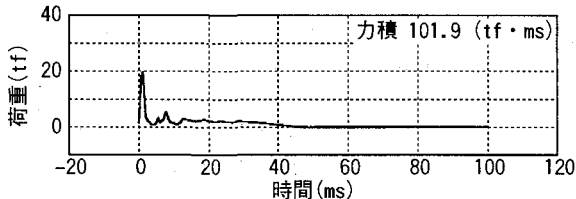
3.3 衝突条件と鉄筋コンクリートはりの衝撃破壊特性

前節までのコンクリートと鋼材の破壊基準やひずみ速度効果の影響について検討した結果、本解析方法により

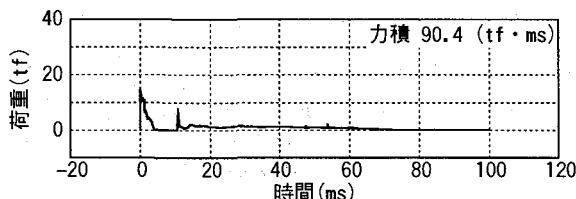
鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動を再現できることがわかった。ここでは鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動特性の一般化のための基礎資料を得ることを目的として、重錘の衝突条件が鉄筋コンクリートはりの破壊特性に与える影響についていくつか数値計算により検討する。

(1) 衝突速度の影響

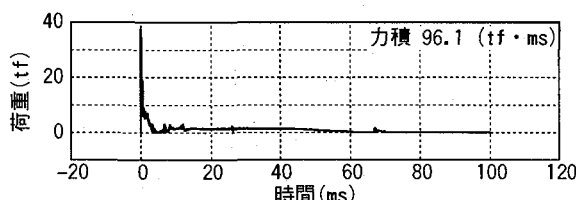
ここでは衝突物の速度の影響について検討する。すなわち、衝突物である重錘の質量は一定とし速度を100cm/sより400cm/sまで変化させた4ケースについて解析した。



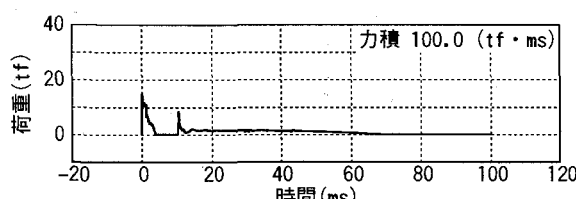
(a) 実験



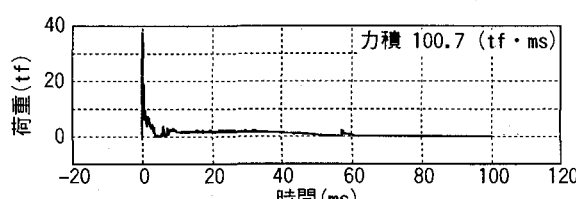
(b) CASE A



(c) CASE B



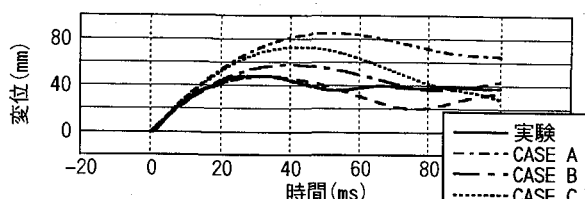
(d) CASE C



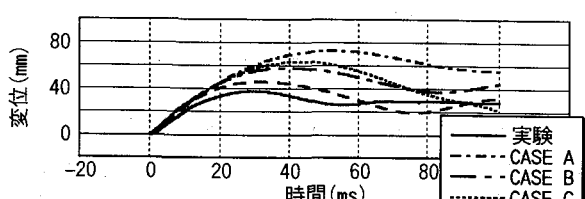
(e) CASE D

図-15 荷重波形

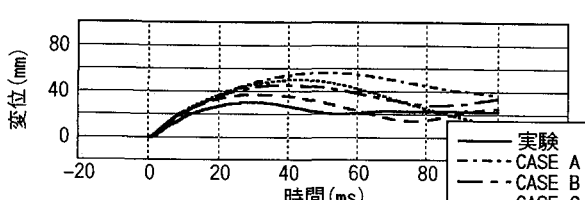
(ひずみ速度効果の影響、衝突速度400cm/s)



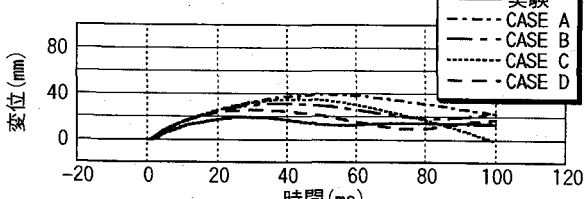
(a) 変位1



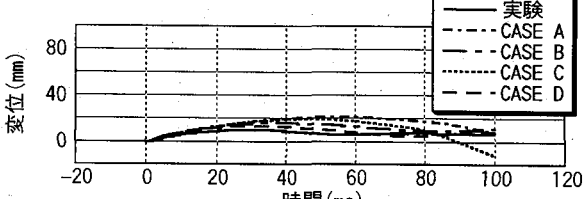
(b) 変位2



(c) 変位3



(d) 変位4



(e) 変位5

図-16 変位波形

(ひずみ速度効果の影響、衝突速度400cm/s)

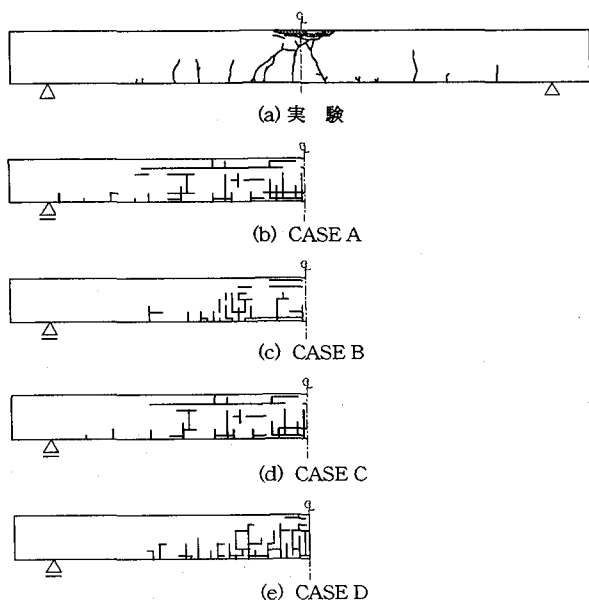


図-17 クラック図
(ひずみ速度効果の影響、衝突速度400cm/s)

表-3は解析に用いた条件を示したものである。解析対象とした鉄筋コンクリートはりとは図-14に示したものと同一のものとした。また材料のひずみ速度効果としては表-2のCASE Dと同じとしコンクリートと鉄筋の両方に対して考慮した ($DIF_{cc}=1.7$ 、 $DIF_{ct}=3.7$ 、 $DIF_s=1.2$)。

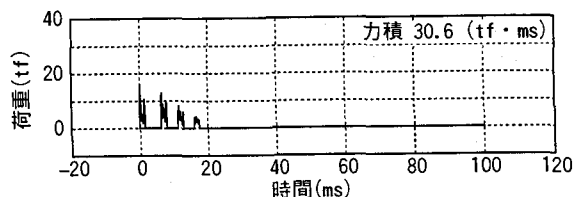
表-3 重錘衝突条件 (速度変化)

CASE	質量 (kg)	速度 (cm/s)	衝突エネルギー (kgf・cm)	運動量 (tf・ms)
1	193	100	984 (1)	19.7 (1)
2	193	200	3936 (4)	39.4 (2)
3	193	300	8856 (9)	59.0 (3)
4	193	400	15744 (16)	78.7 (4)

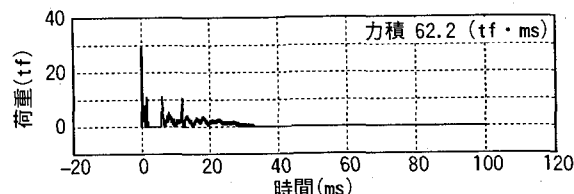
() 内はCASE1を基準とした値

図-18は各ケースについて荷重波形を示したものである。衝突速度が1倍、2倍、3倍、4倍と変化させると重錘の初期運動量も同じ割合で増加し、衝突エネルギーは1倍、4倍、9倍、16倍となる。衝突速度が増加すると衝突初期の荷重の最大値は増加しているが、衝突速度が400cm/sでは300cm/sの場合とほとんど差がないことがわかる。また衝突速度が小さい場合、何度か重錘が再衝突していることが明確にわかる。速度が大きくなると再衝突の回数が減少し、見かけ上最初に時間的に短い大きな波のあと比較的平坦な小さい波が継続する形状になることがわかる。これは一般に鉄筋コンクリートはりの衝撃実験で観測される傾向と一致している。

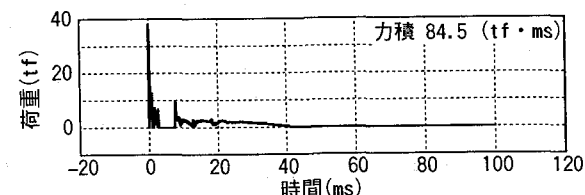
図-19は衝突速度と衝突点直下の変位1の最大値との関係を示したものである。変位の最大値は衝突速度の増加に伴って増加する。しかし、変位の最大値は衝突速度に単純に比例せず、200、300、400cm/sでは順に衝突速



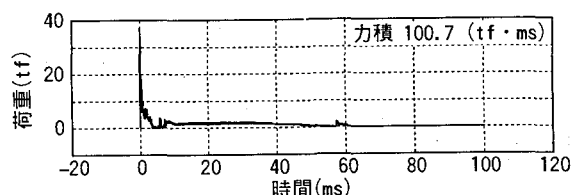
(a) CASE 1 (衝突速度100cm/s)



(b) CASE 2 (衝突速度200cm/s)



(c) CASE 3 (衝突速度300cm/s)



(d) CASE 4 (衝突速度400cm/s)

図-18 荷重波形 (衝突速度の影響)

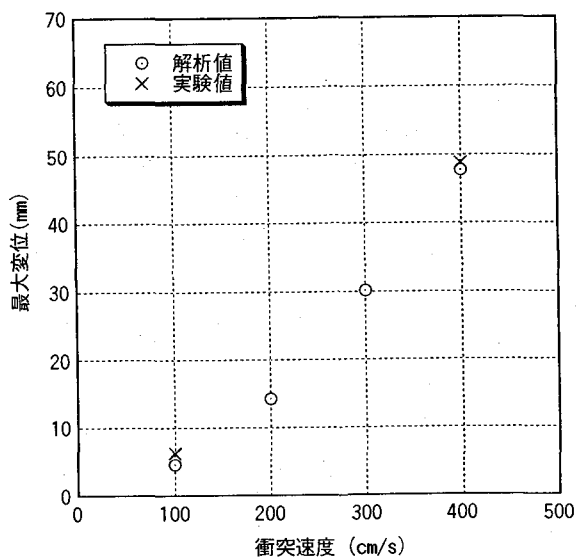
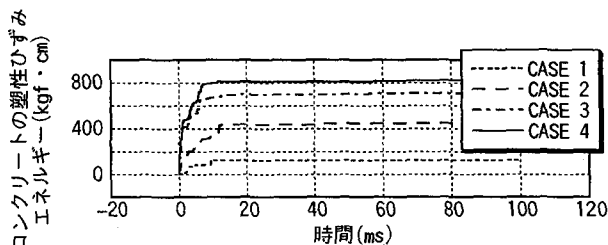
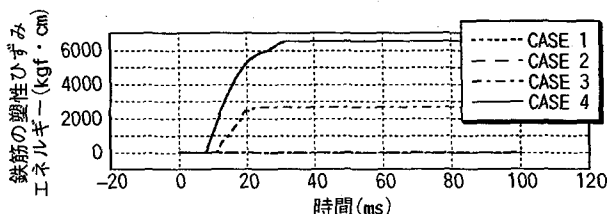


図-19 衝突速度と最大変位 (衝突速度の影響)



(a) コンクリートの塑性ひずみエネルギー



(b) 鉄筋の塑性ひずみエネルギー

図-20 塑性ひずみエネルギーの変化
(衝突速度の影響)

度が100cm/s の場合の3倍、6倍、10倍程度となっており、変位の増加率は速度が大きいほど大きいことがわかる。

図-20はコンクリートと鉄筋の塑性エネルギー変化を示したものである。どの場合においても衝突時より急激に増加し15msまでにはほぼ最大値に達している。衝突速度の増加に伴い、コンクリートの塑性エネルギーの最大値はCASE1の3.3倍、5.3倍、6.0倍と増加しているが、増加割合は低下している。これは、コンクリートの圧縮降伏は衝突点の近傍にみられるだけで、あとはエネルギー量の小さい引張破壊が比較的広く分布するためであると考えられる。これも一般に鉄筋コンクリートはりの衝撃実験で認められる事実と呼応している。

一方、鉄筋の塑性エネルギーは、衝突速度が小さいCASE1とCASE2では鉄筋が降伏しないためゼロとなっている。CASE3とCASE4では衝突後10ms前後から急激に増加し始め、CASE3では20ms程度でCASE4では30ms程度で最大値に達している。鉄筋の塑性エネルギーとコンクリートの塑性エネルギーを比較すると、鉄筋の塑性エネルギーの最大値は、CASE3ではコンクリートの塑性エネルギーの3.8倍、CASE4では8.0倍と非常に大きい。これより、鉄筋コンクリート部材が衝撃作用を受ける場合においても静的荷重作用の場合と同様に、鉄筋の伸び能力が部材のエネルギー吸収能に大きく関与することが再認識できる。これは大きなエネルギーを受ける場合に、より顕著であることが本計算例よりわかる。

(2) 運動量の影響

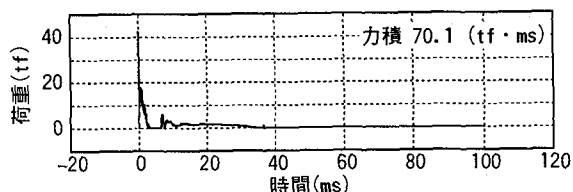
表-4は解析に用いた条件を示したものである。衝突物である重錘の質量と衝突速度を組み合わせることにより、衝突エネルギーを一定とし運動量を変化させている。解析対象の鉄筋コンクリートはり材料のひずみ速度効果のケースは3.3(1)で使用したものと同一とした。

表-4 重錘衝突条件 (衝突エネルギー一定)

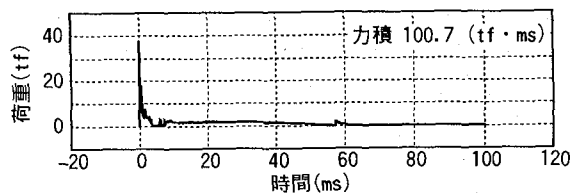
CASE	質量 (kg)	速度 (cm/s)	衝突エネルギー (kgf·cm)	運動量 (tf·ms)
A	96.5	566	15744 (1)	55.7 (1.0)
B	193	400	15744 (1)	78.7 (1.4)
C	386	283	15744 (1)	111.3 (2.0)

() 内はCASE Aを基準とした値

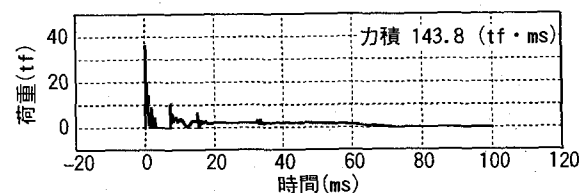
図-21は各ケースについて荷重波形を示したものである。荷重波形については、衝突エネルギーが同じでも荷重のピークおよび作用時間に相違があることがわかる。衝突初期の最大荷重はCASE Aで最も大きく、CASE B、CASE Cの順で少しではあるが減少している。これより、荷重のピーク値は衝突速度と相関が強いと考えられる。また荷重波形の5ms以後、CASE A、B、Cの順で作用時間が長くなることがわかる。これより、重錘質量が大きいほど作用時間が長くなっており、作用時間は重錘質量と相関が強いと考えられる。また力積は、CASE BではCASE Aの1.4倍、CASE Cでは2倍となり、運動量と最も相関性が強いことがわかる。



(a) CASE A (重錘質量96.5kg)



(b) CASE B (重錘質量193kg)



(c) CASE C (重錘質量386kg)

図-21 荷重波形
(衝突エネルギー一定)

図-22は各ケースの運動量と変位1の最大値との関係を示したものである。変位の最大値はCASE BでCASE Aの1.2倍、CASE Cで1.5倍と衝突エネルギーの大きさが同じであるにも関わらず運動量が多いほど変位が大きいたことがわかる。

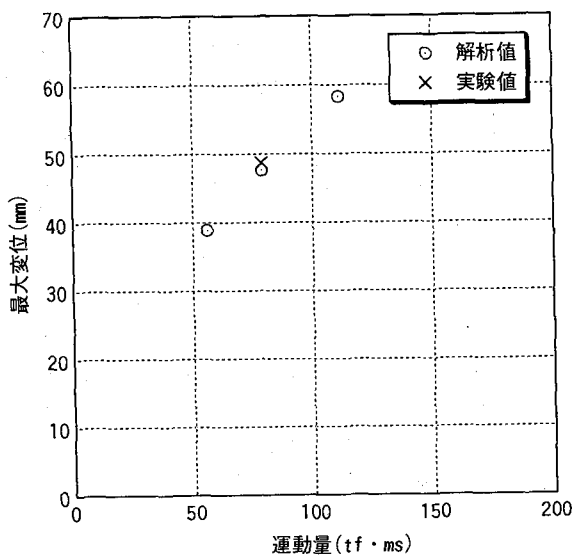


図-2.2 運動量と最大変位
(衝突エネルギー一定)

4. 結論

本研究で得られた主な結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) 3種のコンクリートの軟化モデルを用いたシミュレーションを行った結果、本研究範囲内では、破壊挙動に及ぼすコンクリートの軟化特性の影響は小さいことがわかった。
- (2) コンクリートと鉄筋の材料特性に既往の研究に基づくひずみ速度効果を考慮した結果、それらの衝撃挙動に与える影響が大きいことが明らかとなった。
- (3) コンクリートのひずみ速度効果は衝撃荷重波形に与える影響が大きく、鉄筋のひずみ速度効果の影響は小さいことがわかった。
- (4) 本解析法によれば、コンクリートと鉄筋双方のひずみ速度効果を考慮することにより、実験で得られた衝撃応答を比較的良好に再現できることを示した。
- (5) 衝突速度の増加、すなわち衝突エネルギーを増加させた場合、コンクリートの吸収エネルギーの増加率は低下し、逆に鉄筋の吸収エネルギーが増加することを解析的に示した。
- (6) 衝突エネルギー一定の下では、衝突速度と荷重の最大値に、また衝突体の質量と荷重作用時間にも相関関係があることを解析的に示した。さらに、鉄筋コンクリート部材の衝撃挙動を直接支配する衝突時に発生する荷重による力積は、衝突体の運動量が大いほど大きいことが明らかとなった。

本研究では、限られた条件下ではあるが、個別要素法の鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析への適用方法と鉄筋コンクリート衝撃特性についていくつかの知見を示した。しかしながら、鉄筋コンクリートはりのより一般的な衝撃挙動特性については、今後さらに実験を含め研究を進める必要があると考えている。

参考文献

- 1) 榎谷浩、御嶽諒、梶川康男：鋼製ロックシェッド上への落石衝突実験とエネルギー分担に関する一考察、構造工学論文集、Vol.37A、pp.1627-1636、1991年3月
- 2) 榎谷浩、梶川康男、黒川敏広：荷重係数設計法の落石覆工への適用について、構造工学論文集、Vol.41A、pp.1299-1308、1991年3月
- 3) 榎谷浩、フランソア デキュードラ：敷砂上への落石衝突による荷重の評価に関する一考察、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.275-278、1996年5月
- 4) 岸徳光、佐藤昌志、西弘明、渡辺敏：敷砂を緩衝材とする実規模逆L型PC落石覆工の重錘落下衝撃実験、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.203-208、1996年5月
- 5) 佐藤弘志、今野久志、平尾彰洋、若林修：構造形式の異なるロックシェッド模型の衝撃載荷実験、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.191-196、1996年5月
- 6) 園田恵一郎：落石覆工の設計法についての一提案、構造工学論文集、Vol.39A pp.1563-1572、1993年3月
- 7) 土木学会衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法、土木学会、構造工学シリーズ6、1994年1月
- 8) 園田佳巨、石川信隆、園田恵一郎、太田俊昭：PC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
- 9) 園田佳巨、佐藤紘志、石川信隆：PC落石覆工の衝撃応答解析、第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.264-269、1993年5月
- 10) 宮本文穂、三戸雅文、中村秀明：せん断補強筋を用いたRC版の3次元衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価、構造工学論文集、Vol.43A、pp.1547-1554、1997年3月
- 11) 石川信隆、鈴木真次、水山高久、石川芳治、古川浩平：RC製砂防ダム袖部の衝撃破壊に対する剛体ばねモデルの適用性、計算工学講演会論文集、日本計算工学会、Vol.1、No.2、pp.895-898、1996年5月
- 12) 石丸和宏、小林治俊、園田恵一郎：弾性板の波動伝播解析に関する固有関数展開法と有限要素法、計算工学講演会論文集、日本計算工学会、Vol.1、No.2、pp.875-878、1996年5月
- 13) 榎谷浩、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
- 14) 森川博司、河西良幸、坪田張二、小鹿紀英、瀬戸裕、澤本佳和：RC板の衝撃破壊に対する個別要素法の適用性、計算工学講演会論文集、日本計算工学会、Vol.1、No.2、pp.887-890、1996年5月
- 15) 鈴木真次、石川信隆、古川浩平、水山高久、石川芳治：個別要素法による鉄筋で補強した砂防ダム袖部の衝撃破壊解析、構造工学論文集、Vol.43A、pp.1555-1566、1997年3月

- 16)吉田博、梶谷浩、今井和昭：個別要素法による敷砂上への落石の衝撃特性に関する解析、土木学会論文集、No.392/I-9、pp.297-306、1988年4月
- 17)森嶋芳大、清水泰成、梶谷浩、梶川康男：共通試験体を用いたRCはりの衝撃実験について、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、第1部(B)、pp.400-401、1997年9月
- 18)竹田仁一、立川博之：高速圧縮荷重を受けるコンクリートの力学的諸性質とその基本的関係式（構造物および構造材料の高速度荷重に対する力学的性質の研究、その4）、日本建築学会論文集、第78、pp.1-6、1962年
- 19)山口弘、藤本一男、野村設郎：高圧3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-歪関係式（その2 高速載荷）、日本建築学会論文報告集、第396号、pp.50-59、1989年
- 20)高橋芳彦、大野友則、内田孝、太田俊昭、日野伸一：高速変形する高強度コンクリートの動力学特性、第3回材料の衝撃問題シンポジウム講演論文集、1989年
- 21)岩井、吉田、中村、若林：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究（その1 コンクリートと鋼材の応力-歪関係に及ぼす歪速度の影響）、日本建築学会論文報告集、第314号、pp.102-111、1982年4月

(1997年9月26日受付)