

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

Study on Characteristics of Impact Behavior of Reinforced Concrete Beam
from the View of Momentum and Kinetic Energy of Collision Body

中田 吉彦*, 榎谷 浩**, 西村 洋平***

Yoshihiko NAKATA, Hiroshi MASUYA, Youhei NISHIMURA

*工修, 金沢大学大学院, 自然科学研究科後期課程 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)
(小松市都市建設部都市計画課)

** 工博 金沢大学助教授, 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

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

In this study, we describe series of impact experiments to investigate fundamental characteristics of behavior of reinforced concrete beam and to obtain basic data for the establishment of rational design method. We also explain several results of simulation utilizing distinct element method. First of all, impact experiments controlling the momentum and kinetic energy of collision body are explained. From the observation of results of experiments, characteristics of failure mode, impact load, displacement and absorbed energy under conditions of momentum and kinetic energy of collision body have been made clear. Successively, we apply distinct element method to some of these experiments. It has been shown that results analyzed by this method have relatively well agreed with the experimental results.

Key Words: impact test, reinforced concrete beam, kinetic energy, momentum, D.E.M

キーワード: 衝撃実験 鉄筋コンクリートはり, 運動エネルギー, 運動量 個別要素法

1. まえがき

国土の大部分を山岳地帯で占める我が国においては, 落石をはじめとする自然災害の発生率が高いため, 道路交通の安全を確保する目的で落石覆工が設けられている。しかし, 1989 年の福井県越前町で起きた岩盤崩壊等で見られるように, 設計をはるかに超えた衝撃力によって, 構造物に致命的な損傷が生じ, 構造物の崩壊に至ることも少なくない¹⁾。また, 土石流や地震による衝撃力による被害も報告されている^{2), 3)}。

このような衝撃力を受ける RC 構造物や構造物材の力学的挙動は非常に複雑であり, 衝撃力の特性, 構造物の剛性や形状, 構成する材料特性に及ぼすひずみ速度依存性, 構造物内の応力波伝播等の影響を同時に受けるため, 静的の場合と比べて一般に異なることが知られている。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, 不明な点が多いのが現状である。

最近では, 実験に使用される各種測定機器の計測精度が飛躍的に向上し, 従来測定困難とされてきた現象も徐々

に解明されるようになり, 構造部材や構造物の耐衝撃性に関する研究が盛んに行なわれている^{4), 5), 6), 7), 8)}。しかし現時点では, 標準化された実験の規定等はないため, 単純な RC 部材に関してさえ耐衝撃設計法は確立されていない。このような現状により, 土木学会に衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会が設けられ, 衝撃実験法, 測定法について検討が進められている^{5), 9)}。

本研究では, 最も基本的な部材の一つである RC はりの重錘衝突による衝撃挙動特性を解明し, 合理的設計法の確立のための基礎資料を得るために, 重錘落下衝撃実験および個別要素法による RC はりの衝撃解析の適用を行った。具体的には, まず衝撃実験を行い, 衝突体の運動量と運動エネルギーの相違によるはりの破壊形態や荷重や変位, 吸収エネルギー等の応答特性の相違を明確に示した。次に, 個別要素法による RC はりの衝撃解析への適用を行った。コンクリートと鉄筋双方のひずみ速度効果を考慮した解析手法により, 運動量および運動エネルギーの相違による実験で得られた衝撃応答の相違を比較的良好に再現することを示す。

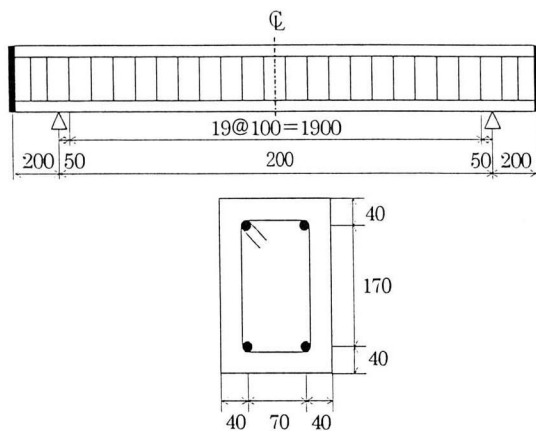


図-1 供試体諸元

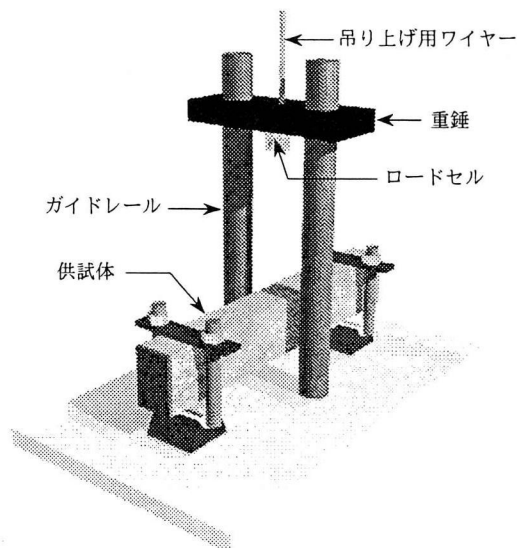


図-2 重錘落下衝撃実験装置

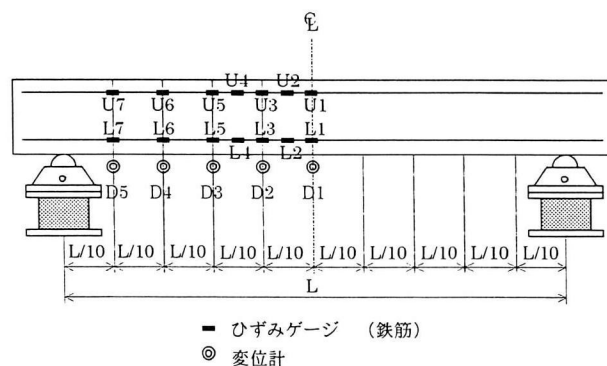


図-3 計測位置

2. 実験概要

2.1 実験供試体とその材料特性

供試体は図-1 に示すように、スパン 200cm の複鉄筋 RC はりを用いた。また、载荷条件としては、重錘の質量、落下高さ(衝突速度)の相違をパラメータとし、衝撃実験の結果を比較、検討するために、合計10体の供試体を使用した。

表-1に使用したコンクリートの配合を示す。コンクリートは普通セメントを使用し、粗骨材には最大寸法 25mm、実績率 65.0%、表乾状態における密度 2.66g/cm³ の川砂利を用いた。細骨材には、粒径 5mm、粗粒率 2.60、表乾状態における密度 2.58g/cm³ の川砂を用いた。鉄筋は、圧縮側、引張側ともに横フシ型異形棒鋼 D13 をせん断補強筋には D6 を使用した。なお、使用したコンクリート(材齢 28 日時)と鉄筋の材料特性を表-2 に示す。

表-1 コンクリート配合表

粗骨材の最大寸法(mm)		25
スランプ(cm)		8
水セメント比(%)		52.5
細骨材率(%)		38.4
単位量(kg/m ³)	水	144
	セメント	275
	細骨材	717
	粗骨材	1186
混和剤		0.859

表-2 コンクリート・鉄筋の材料特性

コンクリート	
圧縮強度(MPa)	27.4
引張強度(MPa)	2.5
弾性係数(GPa)	29.6
ポアゾン比	0.16
鉄筋	
降伏応力(MPa)	459
弾性係数(GPa)	209

2.2 実験方法

衝撃実験には、図-2 に示すような重錘落下衝撃実験装置を使用した。これは、質量約 14kg の鋼板を所定の質量に重ね合わせたものとロードセルとを一体化した重錘を、所定の高さまで釣り上げ自由落下させ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拘束している。

図-3 は衝撃実験の計測項目を示したものである。計測項目としては、荷重、支点反力、供試体の変位、鉄筋のひずみである。荷重は重錘下部に取り付けられたロードセル(PCB 社, 207B, 最大 450kN, 最大周波数 15kHz)で、支点反力は、支持点部のロードセル(東京測器社, KC-20, 最大 200kN, 感度 1.07mV/V)で計測を行った。鉄筋のひずみは、ひずみゲージを所定の計測位置に貼付し、変位の計測はレーザー変位計(KEYENCE 社, LB300, 200mm, 最大周波数 915Hz)を用いて測定を行った。

表-3 には供試験体名および载荷条件の一覧を示したものである。表中の MV シリーズは、重錘質量と衝突速度を

表-3 供試体名及び実験パラメータ

供試体名	実験パラメータ			
	重錘質量 (kg)	衝突速度 (m/s)	運動エネルギー (kJ・mm)	運動量 (kN・ms)
MV1	60	6.26	1175.6	375.6
MV2	88	5.16	1171.5	454.1
MV3	130	4.25	1174.0	552.0
MV4	200	3.43	1176.5	686.0
MV5	256	3.04	1182.9	778.2
E1	298	1.98	584.1	590.0
E2	214	2.76	815.1	590.6
E3	144	4.08	1198.5	587.5
E4	116	5.07	1490.9	588.1
E5	102	5.77	1697.9	588.5

組み合わせることにより、重錘の運動エネルギーを一定にし運動量を変化させた場合であり、供試体名の数字が大きいほど運動量が多いことを意味する。また E シリーズは、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより、重錘の運動量を一定にし運動エネルギーを変化させた場合であり、供試体名の数字が大きいほど運動エネルギーが多いことを意味する。

3. 実験結果及び考察

3.1 ひびわれ状況

(1) 運動量の相違による影響

図-4 は、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより、重錘の運動エネルギーを一定にし運動量を変化させた場合の衝撃実験のひびわれ状況を示したものである。これより、衝突速度が比較的大きい MV1 の場合、他に比べはり上面の圧壊や剥離が顕著に現れている。一方、重錘の運動量及び質量が大きい MV4 および MV5 は、他に比べ曲げひびわれの領域が広く、ひびわれの本数も多くなっている。以上より、重錘のもつ運動エネルギーが一定の場合、重錘の衝突速度が大きいほど局所破壊が、また重錘の質量や運動量が多いほど全体的破壊が卓越することがわかる。

(2) 運動エネルギーの相違による影響

図-5 は、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより、重錘の運動量を一定にし運動エネルギーを変化させた場合の衝撃実験のひびわれ状況を示したものである。これより、衝突速度及び運動エネルギーが比較的大きい E4 および E5 は、他に比べはり上面の圧壊・剥離が顕著に現れている。一方、衝突速度及び運動エネルギーが比較的小さい E1 は、曲げひびわれは発生しているが、はり上面の圧壊・剥離はほとんど現れていない。なおひびわれの領域やひびわれの本数については、運動エネルギーが3倍近く増加しているにもかかわらず E1 から E5 まで差がないことがわかる。以上より、重錘のもつ運動量が一定の場合、重錘の運動エネルギーおよび衝突速度が大きいほど、局所破壊が卓越することがわかる。

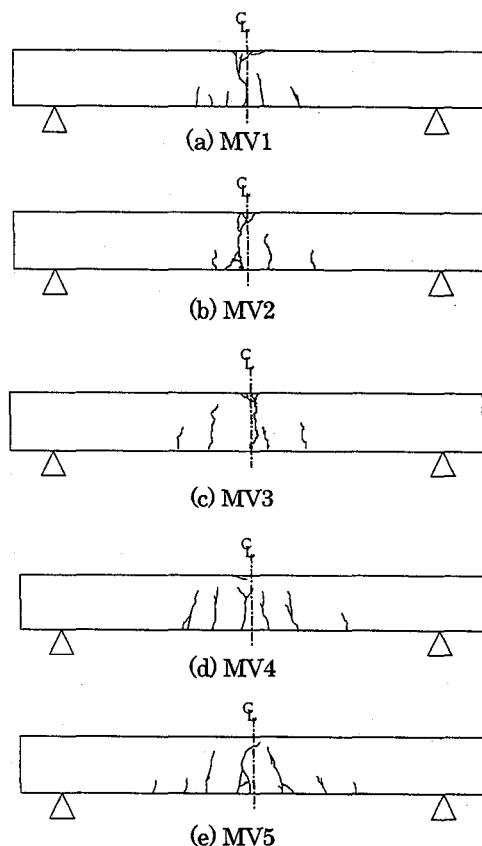


図-4 MV シリーズのひびわれ状況

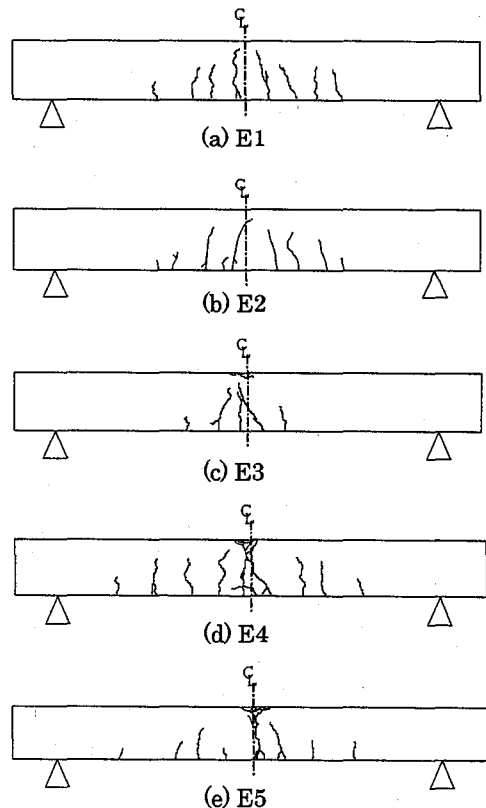


図-5 E シリーズのひびわれ状況

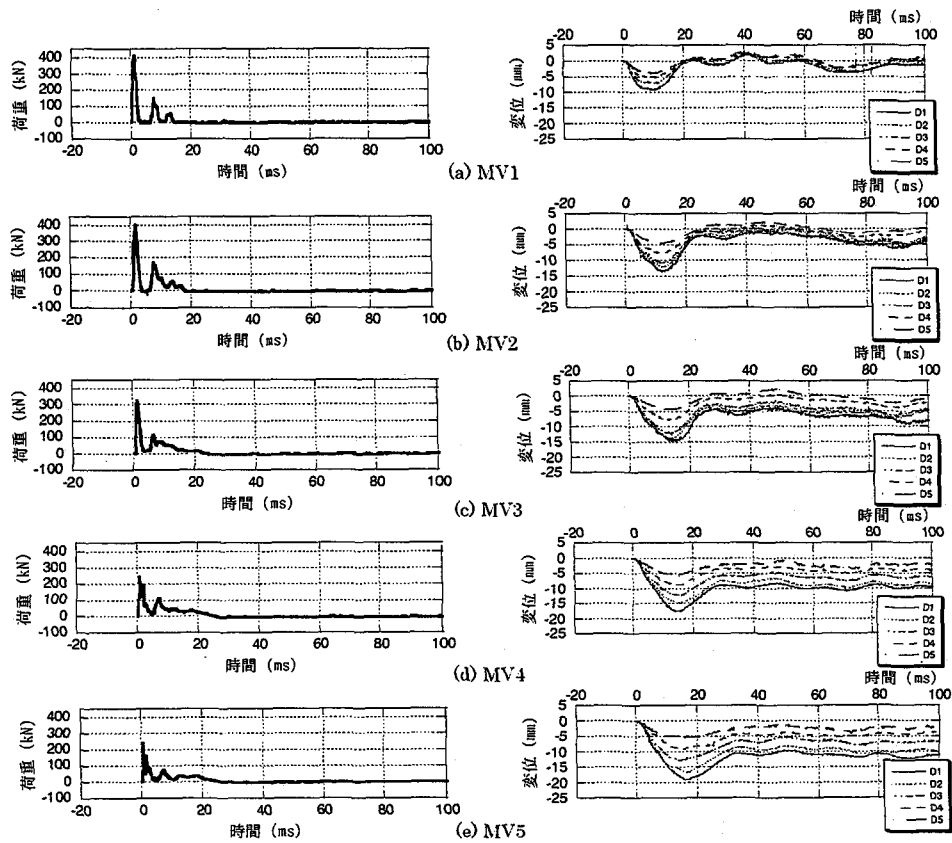


図-6 MVシリーズの荷重・変位応答

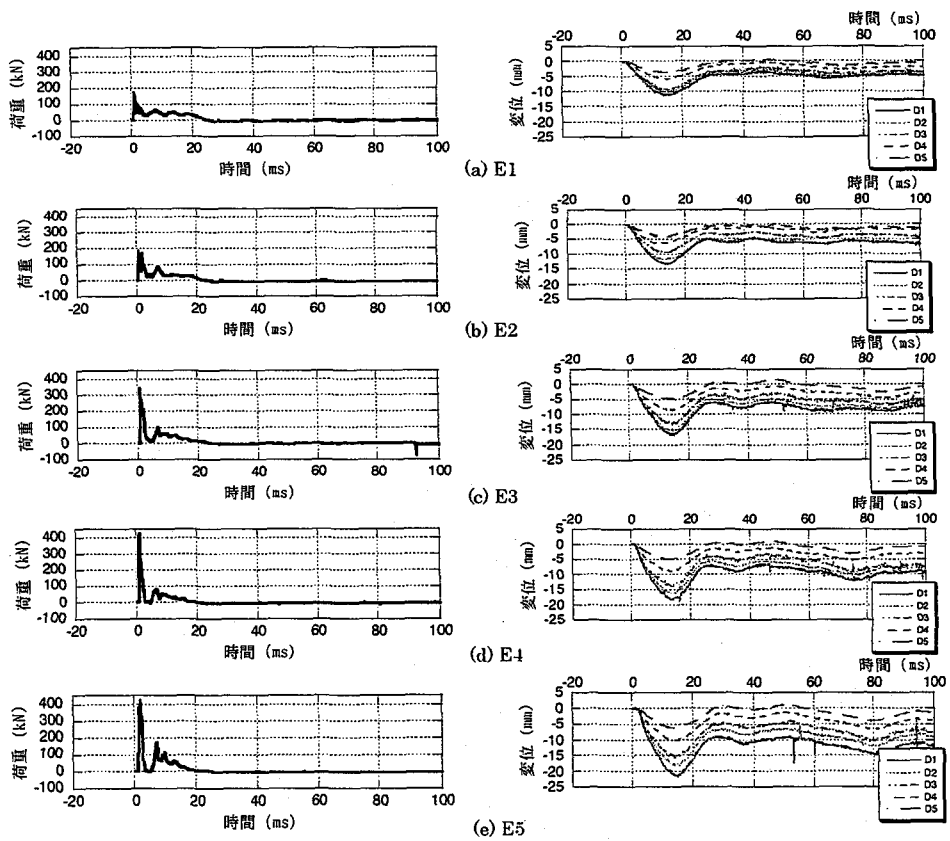


図-7 Eシリーズの荷重・変位応答

3. 2 荷重、変位の応答特性

(1)運動量の相違による影響

図-6 は、重錘の運動エネルギーを一定にし運動量を変化させた場合の衝撃実験の荷重波形および変位波形を示したものである。荷重波形では、衝撃初期に立ち上がりが急激で作用時間の短い第1波が発生しているが、衝突速度が大きいほど、第1波目の最大荷重が大きく、運動量(重錘の質量)が大きいほど作用時間が大きいことがわかる。その後再度、荷重波形が立ち上がり、ピークに到達後緩やかに減少する第2波目の波形が発生しているが、第1波目と同様に、衝突速度が大きいほど、第2波目のピークが大きく、運動量(重錘の質量)が大きいほど作用時間が大きいことがわかる。変位波形では、衝撃力波形に現れるような2つのピークが現れず、ピーク後、小さい振幅で振動しているが、これは残留変位である。また、運動量(重錘の質量)が大きいほど、最大変位および残留変位が大きいことが確認できる。なお、力積については、運動量の相違による明確な差異は認められなかった。

以上より、運動量(重錘の質量)は最大変位、荷重作用時間と正の相関関係にあり、これは図-4(e)に示したようにMV5 のひびわれの領域が他より広いことと関連し、全体的破壊が卓越することに対応する。また、衝突速度は、最大荷重と正の相関関係にあり、これは図-4(a)に示したようにMV1 の載荷点近傍の破壊が他より進展していることと関連し、局所破壊が卓越することに対応する。

(2)運動エネルギーの相違による影響

図-7 は、重錘の運動量を一定にし運動エネルギーを変化させた場合の衝撃実験の荷重波形および変位波形を示したものである。荷重波形では、(1)運動量の相違による影響でも見られるような第1波目と第2波目の波形が発生しているが、運動エネルギー(衝突速度)が大きいほど、第1波目および第2波目のピーク値が大きい、作用時間については、運動エネルギーの相違によらずほぼ一定であることがわかる。変位波形では、(1)運動量の相違による影響でも見られるような第1波の波形を示しているが、運動エネルギー(衝突速度)が大きいほど、最大変位および残留変位が大きいことが確認できる。なお、力積については、運動エネルギーの相違による明確な差異は認められなかった。

以上より、運動エネルギー(衝突速度)は最大荷重、最大変位と正の相関関係にあり、これは、図-5(e)に示したようにE5 の載荷点近傍の破壊が他より大きいことと関連し、局所破壊が卓越することに対応する。

3. 3 吸収エネルギー

ここでは、はりの変形に費やされるエネルギー、すなわち荷重—変位曲線を積分して得られた値を吸収エネルギーと定義する。用いる荷重は載荷点荷重 P であり、変位はスパン中央のはり下面の変位 δ である。

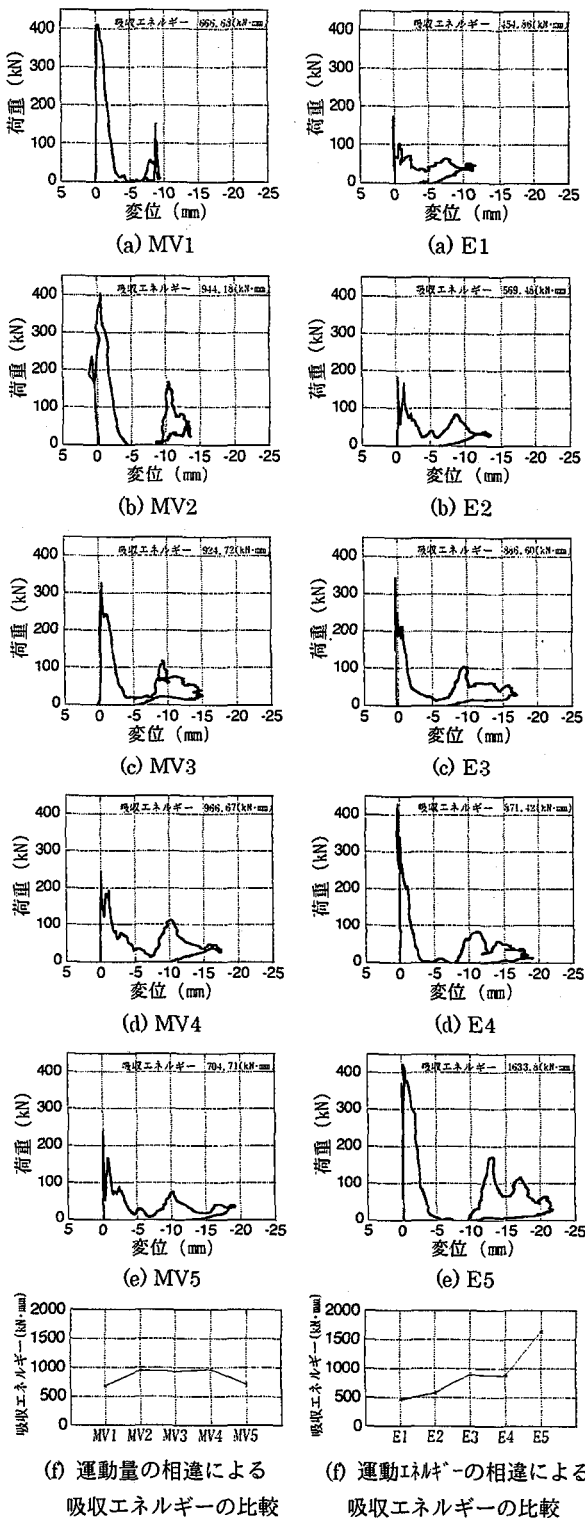


図-8 MV シリーズの荷重-変位関係と吸収エネルギー

図-9 E シリーズの荷重-変位関係と吸収エネルギー

(1)運動量の相違による影響

図-8 は、MV シリーズ、すなわち、運動エネルギーを一定のもとでの重錘の運動量が異なる場合の荷重-変位関係と吸収エネルギーを示したものである。これより、運動量が最も小さい場合、すなわち質量が小さく衝突速度が大きい

MV1 では、衝突初期の大きな荷重の急激な減少に伴い変位が発生しはじめ、変位が 5mm 程度で荷重が消失し荷重-変位ループが一度終了する。この時点で重錘と RC はりの接触が一旦なくなったことになる。その後、変位が 7mm 程度に達した時点で重錘の再接触により新たな荷重-変位ループを描く。このように、荷重-変位関係は明確に 2 つの部分に分けられる。この MV1 では、前者のループによる吸収エネルギーが後者より大きく、前者すなわち衝撃の初期に多くのエネルギーがはりに伝達されたことになる。3.1(1)で示したひびわれ状況をあわせて考えると、第1波目のエネルギーが衝突点付近の圧壊、剥離にかなり費やされたと推論される。

一方、運動量が最も大きい場合、すなわち質量が大きく衝突速度が小さい MV5 では、MV1 で述べた二つのループがつながった荷重-変位関係が認められる。すなわち、重錘と RC はりとの分離はこの場合生じていない。衝突初期以降、他に比べ緩やかな荷重の増減を伴って変位が増加している。MV1 の 2 番目のループに相当する部分のエネルギーの割合も比較的大きく、全体としてゆるやかなエネルギー伝達が行われている。3.1(1)で示したひびわれ状況とあわせて考えると、第2波目のエネルギーがはりの全体にわたる曲げひびわれの進展に、かなり費やされたと推論される。

また、図-8(f)より、2つのループを加えた全吸収エネルギーについては、運動量の影響についての明確な差異は認められなかった。これは、衝突時の運動エネルギーが同じ場合、3.2(1)の結果を合わせて考えると、本実験の範囲内では、運動量(質量、衝突速度)の違いは衝突初期の最大荷重及び最大変位にかなり影響を与えるが、はりの全吸収エネルギーに与える影響は比較的小さいといえる。

(2)運動エネルギーの相違による影響

図-9 は、E シリーズ、すなわち、運動量を一定のもとでの重錘の運動エネルギーが異なる場合の荷重-変位関係と吸収エネルギーを示したものである。

これより、運動エネルギーが最も小さい場合、すなわち質量が大きく衝突速度が小さい E1 では、前述の MV5 で述べたように二つのループがつながった荷重-変位関係が認められる。衝突初期以降、他に比べ緩やかな荷重の増減を伴って変位が増加し、全体としてゆるやかなエネルギー伝達が行われている。これは、3.1(2)で示したはりの全体にわたる曲げひびわれの分布と対応している。

一方、運動エネルギーが最も大きい場合、すなわち質量が小さく衝突速度が大きい E5 では、衝突初期の大きな荷重の急激な減少に伴い変位が発生しはじめ、変位が 5mm 程度で荷重が消失し荷重-変位ループが一度終了する。この時点で重錘と RC はりの接触が一旦なくなったことになる。その後、変位が 10mm 程度に達した時点で重錘の再接触により新たな荷重-変位ループを描く。このように、荷重-変位関係は明確に 2 つの部分に分けられる。この E5 では、

前者および後者のループによる吸収エネルギーがともに大きい。3.1(2)で示したひびわれ状況をあわせて考えると衝突点付近の圧壊、剥離には前者のエネルギーが費やされ、はり全体にわたる曲げひびわれには後者のエネルギーが費やされたと推論される。

また、図-9(f)より、2つのループを加えた全吸収エネルギーについては、運動エネルギーが大きいほど全吸収エネルギーが大きいことが確認できる。

4. 個別要素法による解析

衝撃力を受ける RC 構造物や構造部材の力学的挙動は、衝撃力の特性、構造物の剛性や形状、構成する材料特性に及ぼすひずみ速度依存性、構造物内の応力波伝播等の影響を同時に受けるため、静的の場合と比べて非常に複雑である。

特に、土木構造物は、鋼・コンクリートからなる複合構造であるため、問題を一層複雑なものとしている。したがって、衝撃挙動特性を解明するために、実験による研究のほか精度良く再現できる理論的研究あるいは数値解析的研究方法が望まれており、数値解析法に関する研究も各機関で盛んに行なわれている^{10), 11), 12), 13)}。

本研究では、Candall¹⁴⁾が提案した地盤、石、岩盤等の粒状体を対象とした不連続体の解析に有効である個別要素法を用い、本研究で示した RC はりの衝撃挙動解析への適用を行った。

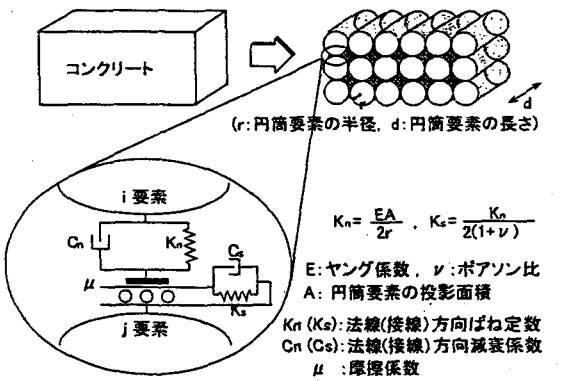


図-10 要素間の結合モデル

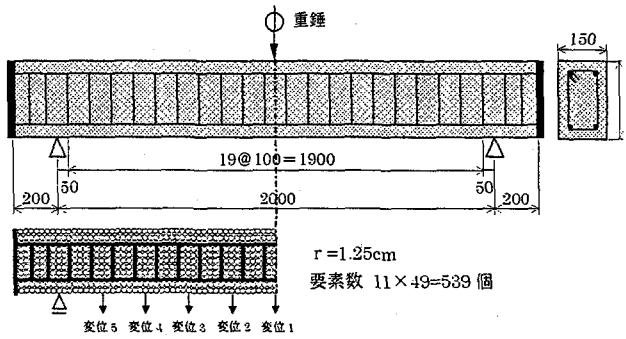
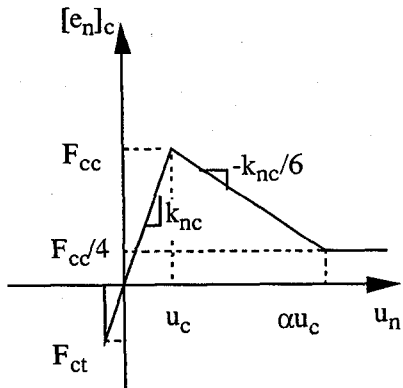


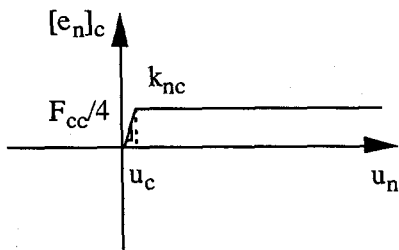
図-11 鉄筋コンクリートはり要素分割

表-4 材料諸定数

コンクリート	
弾性係数 (GPa)	29.7
ポアソン比	0.16
圧縮強度 (MPa)	27.4
引張強度 (MPa)	2.51
粘着力 (MPa)	6.85
内部摩擦角 (°)	11
比重	2.4
鉄筋・スターラップ	
弾性係数 (GPa)	206
ポアソン比	0.30
降伏強度 (MPa)	459
破断ひずみ	0.20
比重	7.85



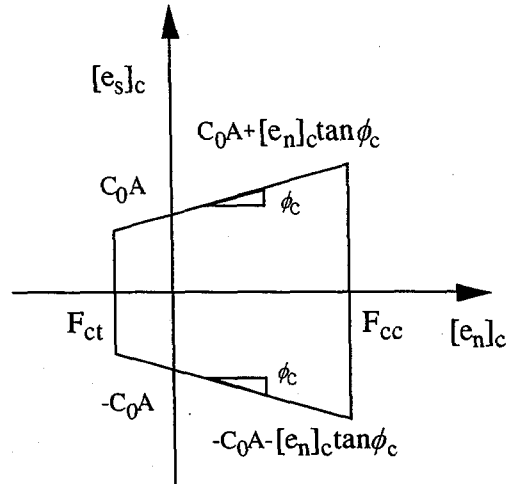
(a) 初期段階



(b) 再接触時

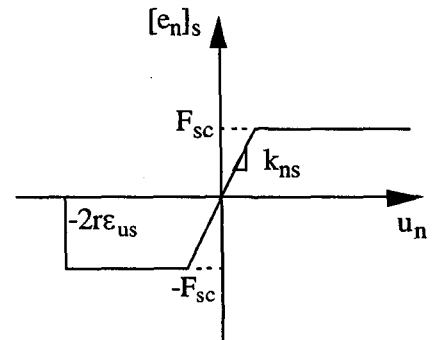
$[e_n]_c$: 法線方向ばね力
 F_{cc} : 降伏圧縮力
 F_{ct} : 破断引張力
 k_{nc} : 法線方向ばね定数
 u_n : 法線方向変位
 u_c : 降伏時の変位
 $\alpha = 5.5$

図-12 コンクリートの法線方向ばね特性

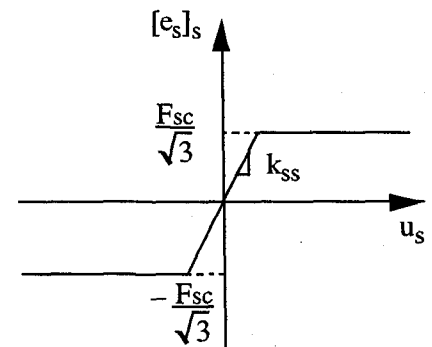


$[e_n]_c$: 法線方向ばね力
 $[e_s]_c$: 接線方向ばね力
 F_{cc} : 降伏圧縮力
 F_{ct} : 破断引張力
 C_0 : 粘着力
 A : 要素投影面積 (=2rd)
 ϕ_c : 内部摩擦角

図-13 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
 u_n : 法線方向変位
 u_s : 接線方向変位
 F_{sc} : 降伏力
 ϵ_{us} : 引張限界ひずみ
 $2r$: 要素間の初期中心点間距離

図-14 鉄筋のばね特性

4. 1 解析方法および解析モデル

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、コンクリート構造物の破壊解析にも盛んに用いられている^{15),16)}。

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た¹⁷⁾。また、ひずみ速度効果や圧縮破壊後の軟化挙動を考慮した弾塑性解析へ適用し、衝撃挙動特性についていくつかの知見を示している¹⁸⁾。

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-10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¹⁹⁾。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。

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

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

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($\cdot$)は時間に関する微分を表している。

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および解析結果出力位置を図-11に示す。なお、材料諸定数は、表-4に示す通りであり、減衰係数は、本研究では簡単のため零とし、計算時間刻みは $3.79 \times 10^{-7}(s)$ 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コンクリート要素、鉄筋およびスターラップを含むコンクリート要素の4種類である。

4. 2 材料の構成モデルおよびひずみ速度効果モデル

(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-12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 $F_{cc} = \sigma_{cc}A$ 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 $F_{ct} = \sigma_{ct}A$ 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-12(b)に示すように圧縮方向には降伏圧縮力の $1/4$ まで低抗できるものとした。

接線方向ばね力としては、図-13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、法線方向の圧縮および引張基準を越えると $[e_s]_c$ は零とした。

(2) 鉄筋およびスターラップ

鉄筋の構成モデルとして用いた法線方向ばね力-変位関係を図-14(a)に示す。法線方向ばね力 $[e_n]_s$ は、降伏後引張限界ひずみ ε_{us} に達すると破壊するものとした。また、図-14(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。

(3) ひずみ速度効果を考慮したモデル

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²⁰⁾。

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。

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²⁰⁾。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、過去の研究¹⁸⁾よりコンクリートの圧縮強度の動的強度増加率 DIF_{cc} を2.4、引張強度の動的強度増加率 DIF_{ct} を3.7、鉄筋の降伏強度の動的強度増加率 DIF_s を1.2と仮定した。

4. 3 実験結果と解析結果との比較・検討

解析では、重錘の持つ運動量および運動エネルギーの影響について、各々3ケース、つまりMVシリーズではMV1, MV3, MV5を、EシリーズではE1, E3, E5を実験結果と比較した。

(1) 運動量の相違による影響

図-15は、MV5の場合の荷重波形および載荷点下縁の変位波形について、実験結果と解析結果を示したものである。荷重波形から、衝突初期における第1波目の最大値については、解析は実験をよく再現しているが、第2波目の波形については、解析結果は実験結果よりやや小さいが、荷重作用時間はよく再現していることがわかる。変位波形から、立ち上がりは、解析結果がやや実験結果より早く、最大変位は解析結果が大きく、残留変位は実験結果がやや

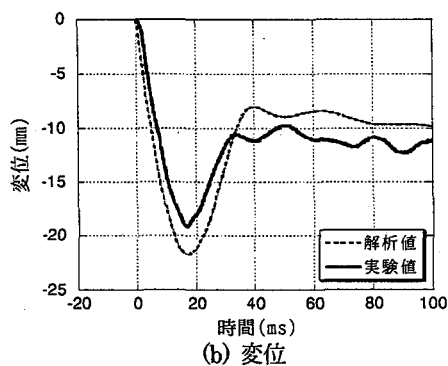
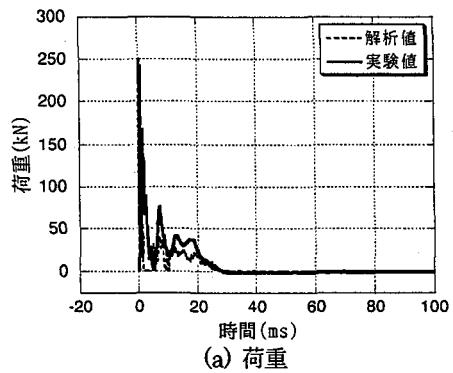


図-15 MV5の荷重・変位応答

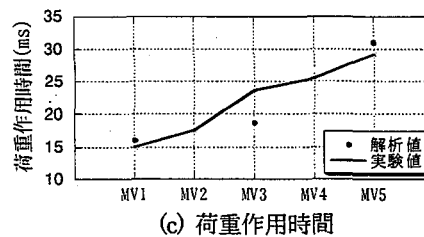
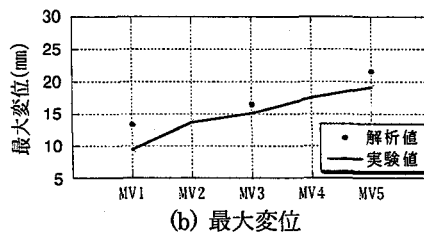
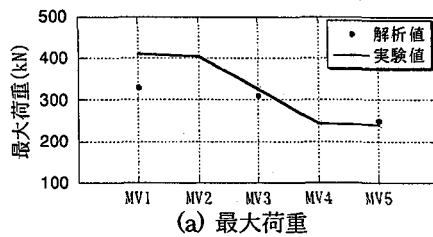


図-16 MVシリーズの代表特性値

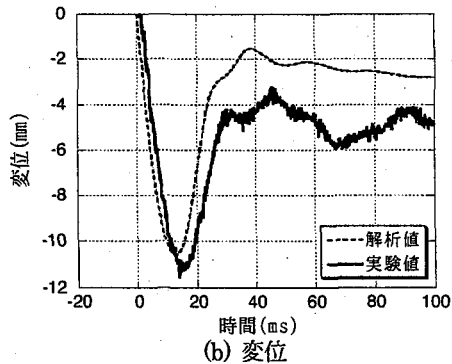
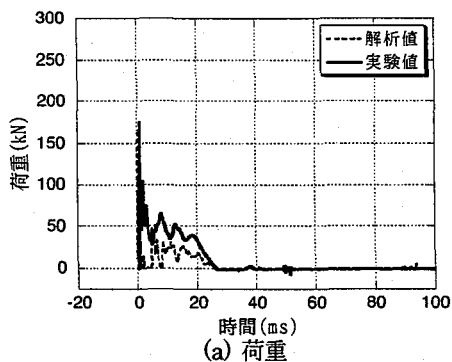


図-17 E1の荷重・変位応答

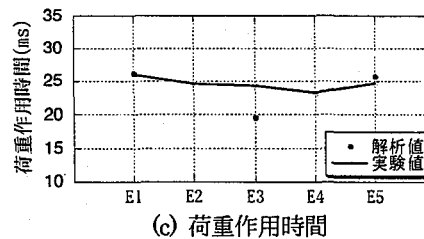
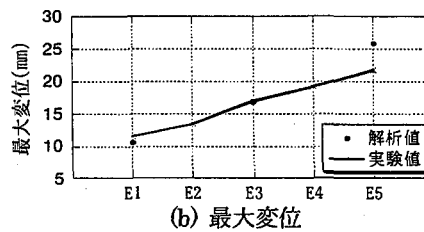
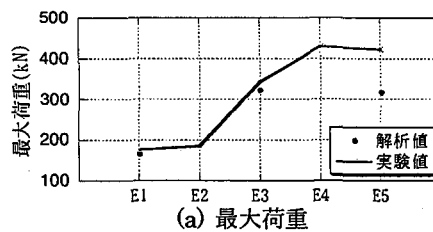


図-18 Eシリーズの代表特性値

大きい、解析は実験を比較的良好にシミュレートしていることがわかる。

図-16は、MVシリーズにおける最大荷重、最大変位、荷重作用時間について、実験結果と解析結果を示したものである。3.2(1)でも述べたように実験では、運動量(重錘の質量)が大きいほど、最大変位、荷重作用時間が大きく、運動量が小さい(衝突速度が大きい)ほど最大荷重が大きい。

解析結果では、最大荷重および最大変位について、MV1のような比較的高速度の衝突の衝突については、解析は実験を十分には再現できていないが、MV3 および MV5 のような比較的低速度の衝突については、実験をよく再現していることがわかる。この原因として、本解析では一定のひずみ速度効果を考慮していることや衝突点近傍については、要素の大きさや配置、重錘とコンクリート間のばね定数、減衰等のいろいろな問題が複合していることが考えられ、今後再現性を高めるため、検討をしていきたいと考えている。

(2)運動エネルギーの相違による影響

図-17は、E1の場合の荷重波形および載荷点下縁の変位波形について、実験結果と解析結果を示したものである。荷重波形から、衝突初期における第1波目の最大値については、解析は実験をよく再現しているが、第2波目の波形については、解析結果は実験結果よりやや小さいが、荷重作用時間はよく再現していることがわかる。変位波形から、立ち上がりは、解析結果がやや実験結果より早く、最大変位および残留変位ともに、解析結果が実験結果より小さいが、解析は実験を比較的良好にシミュレートしていることがわかる。

図-18は、Eシリーズにおける最大荷重、最大変位、荷重作用時間について、実験結果と解析結果を示したものである。3.2(2)でも述べたように実験では、運動エネルギー(衝突速度)が大きいほど、最大荷重、最大変位が大きく、荷重作用時間については、運動エネルギーの相違によらずほぼ一定であることがわかる。解析結果では、最大荷重および最大変位について、E5のような比較的高速度の衝突の衝突については、解析は実験を十分には再現できていないが、E1 および E3 のような比較的低速度の衝突については、実験をよく再現していることがわかる。

5. まとめ

本研究では、もっとも基本的な部材であるRCはりに対して重錘落下衝撃実験および個別要素法による衝撃解析の適用を行った。本研究で得られた結論をまとめると以下の通りである。

(1) 重錘のもつ運動量および運動エネルギーの相違による鉄筋コンクリートはりのひびわれ状況について実験的にその特徴を明らかにした。

(2) 本研究の範囲内では、重錘のもつ運動エネルギーが一定の場合、運動量は、最大変位、荷重作用時間と正の相関関係にあり、また衝突速度は、最大荷重と正の相関関係にあることがわかった。また、全吸収エネルギーは、運動量の相違によらずほぼ一定であった。

(3) 重錘のもつ運動量が一定の場合、運動エネルギーは、最大荷重、最大変位、全吸収エネルギーと正の相関関係にあることがわかった。また、荷重作用時間は、運動エネルギーによらずほぼ一定値であった。

(4) 各種条件下の荷重-変位関係を具体的に示し、吸収エネルギーとRCはりの破壊性状の関係について明らかにした。

(5) 個別要素法による解析手法では、コンクリートと鉄筋のひずみ速度効果を考慮することにより、比較的低速度の衝突の範囲において、実験で得られた衝撃応答、つまり運動量および運動量エネルギーの相違による衝撃応答の相違を比較的良好に再現できることを示した。

実験および解析の結果から、衝突体の運動エネルギーと運動量に着目した場合、RCはりの衝撃応答には衝突体の運動エネルギーが最も依存するものと考えている。今後、解析においては、再現性を高めるため、比較的高速度の衝突の場合のひずみ速度効果等に対する研究が必要と考えている。

参考文献

- 1) 川上秀男:ロックシェッドの崩壊機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No2, pp.701-706, 1990年6月
- 2) 松浦幹佳, 島田功, 小林治俊, 園田恵一郎: 衝撃的地震動によるRCラーメン橋脚の破壊解析, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.183-188, 1998年6月.
- 3) 原田耕司, 日野伸一, 石川信隆, 香月智: 衝撃的地震動を受けるRC橋脚模型における繊維補強効果について, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.195-200, 1998年6月.
- 4) 土木学会: 構造工学シリーズ8, ロックシェッドの耐衝撃設計, 1998年12月.
- 5) 土木学会: 第II編, 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会経過報告, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.1-117, 2000年6月.
- 6) 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
- 7) 松尾修, 佐々木哲也, 小村辰彦: 模型実験に基づく落石防護擁壁の設計法の提案, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.217-222, 2000年6月.

- 8) 中田吉彦, 榊谷浩, 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.
- 9) 大野友則, 藤掛一典, 井元勝慶, 別府万寿博: 衝撃現象の計測におけるいくつかの問題点, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.183-188, 2000年6月.
- 10) 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 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999年4月
- 11) 小池明夫, 三上隆: 粘性抵抗を考慮した不連続変形法による落石衝撃解析, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1719-1726, 2001年3月
- 12) 宮本文穂, 三戸雅文, 中村秀明: セン断補強筋を用いた 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
- 13) 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
- 14) Cundall, P.A.: Rational design of tunnel supports—a computer Model for rock mass behavior using interactive graphics for the input and output of geometrical data, technical report MRD-2-74, Missouri River Division, U.S.Army Corps of Engineers, 1974
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 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, pp.1761-1771, 1998年3月
- 19) 木山英郎・藤村 尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, 第333号, pp.137-146, 1983年5月
- 20) 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

(2001年9月14日受付)