

運動エネルギーおよび運動量がRCはりの衝撃挙動に及ぼす影響について

STUDY ON THE EFFECT OF THE KINETIC ENERGY AND IMPULSE OF COLLISION MASS TO DYNAMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM UNDER IMPACT

西村 洋平*, 中田 吉彦**, 橘 紗代子***, 梶谷 浩****, 梶川 康男*****

Youhei NISHIMURA, Yoshihiko NAKATA, Sayoko TACHIBANA, Hiroshi MASUYA, Yasuo KAJIKAWA

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

** 工博, 小松市 都市建設部都市計画課 (〒923 小松市小馬出町 91)

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

**** 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)

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

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

(impact test, reinforced concrete beam, kinetic energy, momentum, D.E.M)

1. まえがき

山間部にも交通量の多い道路が建設される現代では落石災害もあり, 構造物の安全性が大きな問題になっている。そのため, 道路交通の災害に対する安全性の向上が望まれている。しかしながら, 自然災害においては, その発生の不確実性や規模の想定が困難なこと等から, 構造物が破壊に至ってしまうこともある。このような衝撃力を受ける RC 構造物や構造部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。

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, 運動エネルギーと運動量をパラメータとする重錘落下衝撃実験および個別要素法による RC はりの衝撃解析への適用を行った。

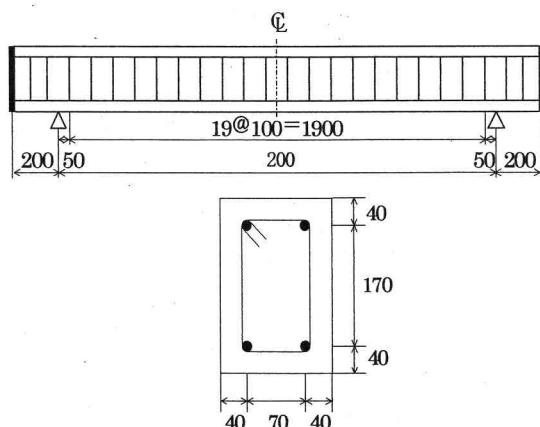


図-1 供試体寸法

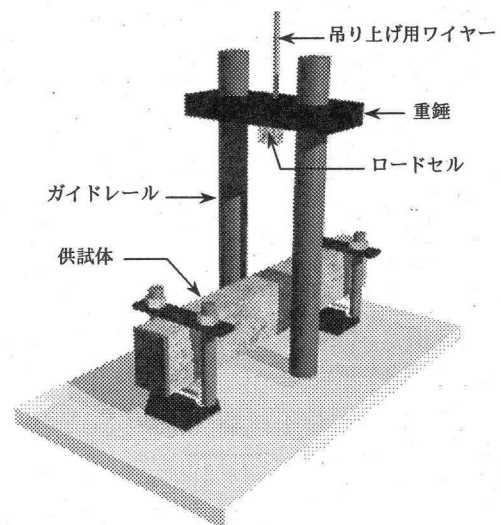


図-2 重錘落下式実験装置

表-1 供試体名および実験パラメータ

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)	運動量 (kN・ms)	運動エネルギー (kJ)	運動量 (kN・ms)
MV1	60	6.26	1175.0	375.3	一定	一定
MV2	88	5.16	1172.9	454.7	一定	一定
MV3	130	4.25	1172.1	551.7	一定	一定
MV4	200	3.43	1175.0	686.0	一定	一定
MV5	256	3.04	1178.0	777.1	一定	一定
E1	298	1.98	584.1	590.0	一定	一定
E2	214	2.76	817.3	591.7	一定	一定
E3	144	4.08	1199.5	587.8	一定	一定
E4	116	5.07	1489.2	587.8	一定	一定
E5	102	5.77	1699.3	588.8	一定	一定

2. RCはりの衝撃実験

2. 1 実験方法

供試体は図-1 に示すようなスパン2000mmの複鉄筋RCはりを用いた。図-2 には重錘落下式実験装置を示す。実験時には所定の質量に調整した重錘とロードセルを一体にしたものを所定の高さまで吊り上げ、はりに自由落下させる。その際、ガイドレールに沿って落下させることで重錘の水平を保持した。また、はりの跳ね上がりを防止するために支点部を拘束具で固定した。表-1 には供試体名および実験パラメータを示す。表中のMV1～MV5 は重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより、衝突時の重錘の運動エネルギーを一定とし、運動量を変化させた実験である。また、E1～E5 は同様に衝突時の重錘の運動量を一定とし、運動エネルギーを変化させて行った実験である。

2. 2 実験結果

(1) ひびわれ状況

図-3 にMVシリーズおよびEシリーズのひびわれ状況を示す。MVシリーズの場合、衝突速度が大きいMV1 では他に比べ、はり上面の圧壊や剥離など局所的破壊が顕著に見られる。一方、重錘の運動量および質量が大きいMV4 やMV5 では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おり、全体的破壊が大きくなることがわかる。したがって、重錘の持つ運動エネルギーが

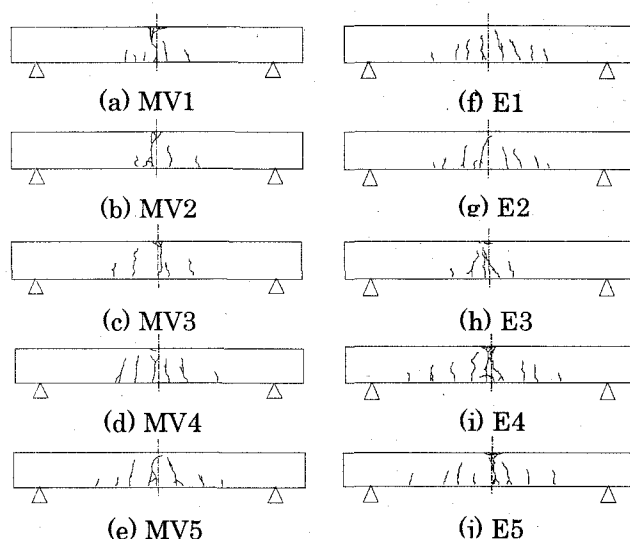


図-3 MVシリーズおよびEシリーズのひびわれ状況

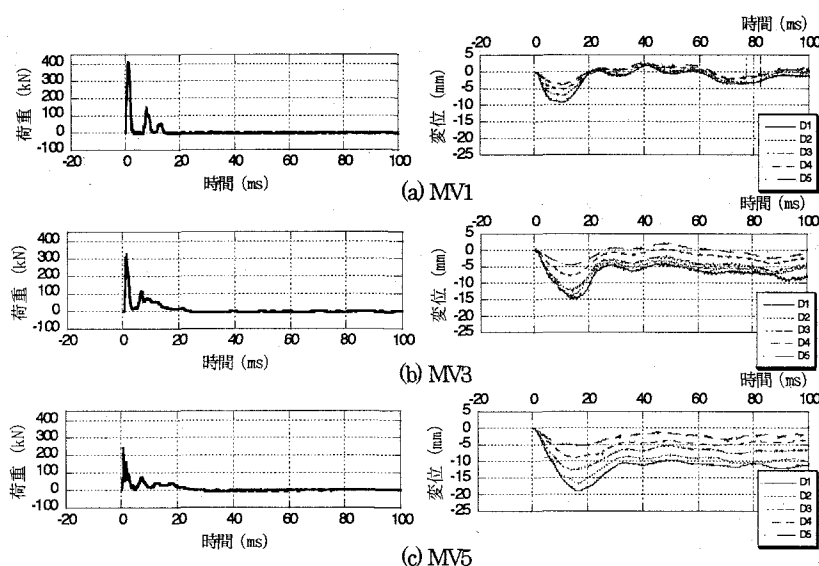


図-4 MVシリーズの荷重波形・変位波形

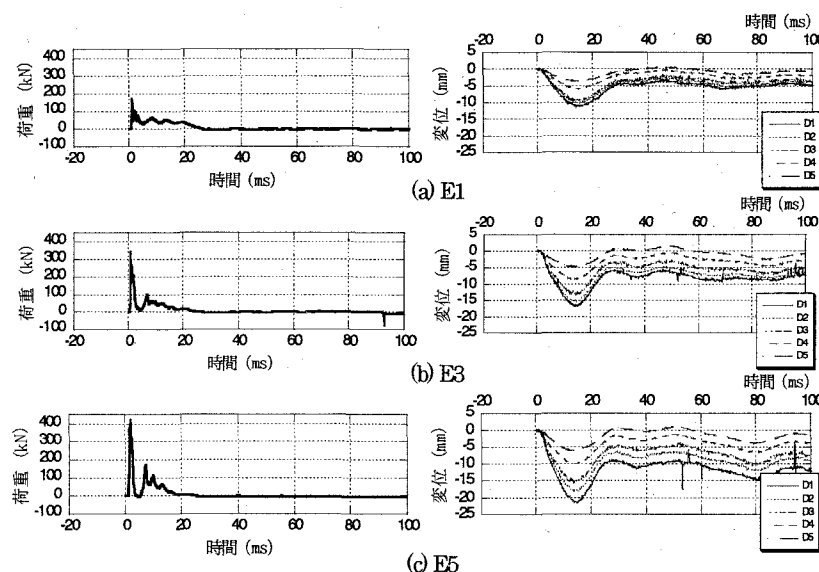


図-5 Eシリーズの荷重波形・変位波形

一定の場合、重錘の衝突速度が大きいほど局所的破壊が、また、重錘の質量や運動量が大きいほど全体的破壊が大きくなることがわかる。

Eシリーズの場合、衝突速度及び運動エネルギーが比較的小さいE1は、はり上面の圧壊・剥離はほとんど現れていない。一方、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。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まで大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、局所的破壊が大きくなることがわかる。

(2) 荷重・変位

荷重は載荷点での衝撃荷重とし、変位は載荷点下縁から200mm間隔で5箇所で計測し、それぞれをD1～D5とした。図-4にMVシリーズの荷重波形、変位波形を示す。荷重波形についてみると、衝突初期に瞬間的に発生する1波目が最も大きく、この最大値が最大荷重となることがわかる。最大荷重はMV1のように衝突速度が大きくなるほど大きくなることがわかる。その後、再度波形が立ち上がり、ピーク到達後緩やかに減少する2波目が確認できる。2波目の最大値も1波目同様に衝突速度が大きいほど大きくなることがわかる。また、荷重作用時間についてはMV5のように運動量（重錘質量）が大きいほど大きくなることがわかる。変位波形について見ると載荷点下縁の変位であるD1が最も大きく、支点に近づくにつれて変位が小さくなるのがわかる。また、運動量（重錘質量）が大きいほど、最大変位および残留変位が大きくなることがわかる。

Eシリーズの荷重波形については、運動エネルギーが大きい、つまり衝突速度が大きいほど最大荷重が大きくなった。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となる結果となった。変位波形については運動エネルギー（衝突速度）が大きいほど最大変位および残留変位が大きくなる結果となった。

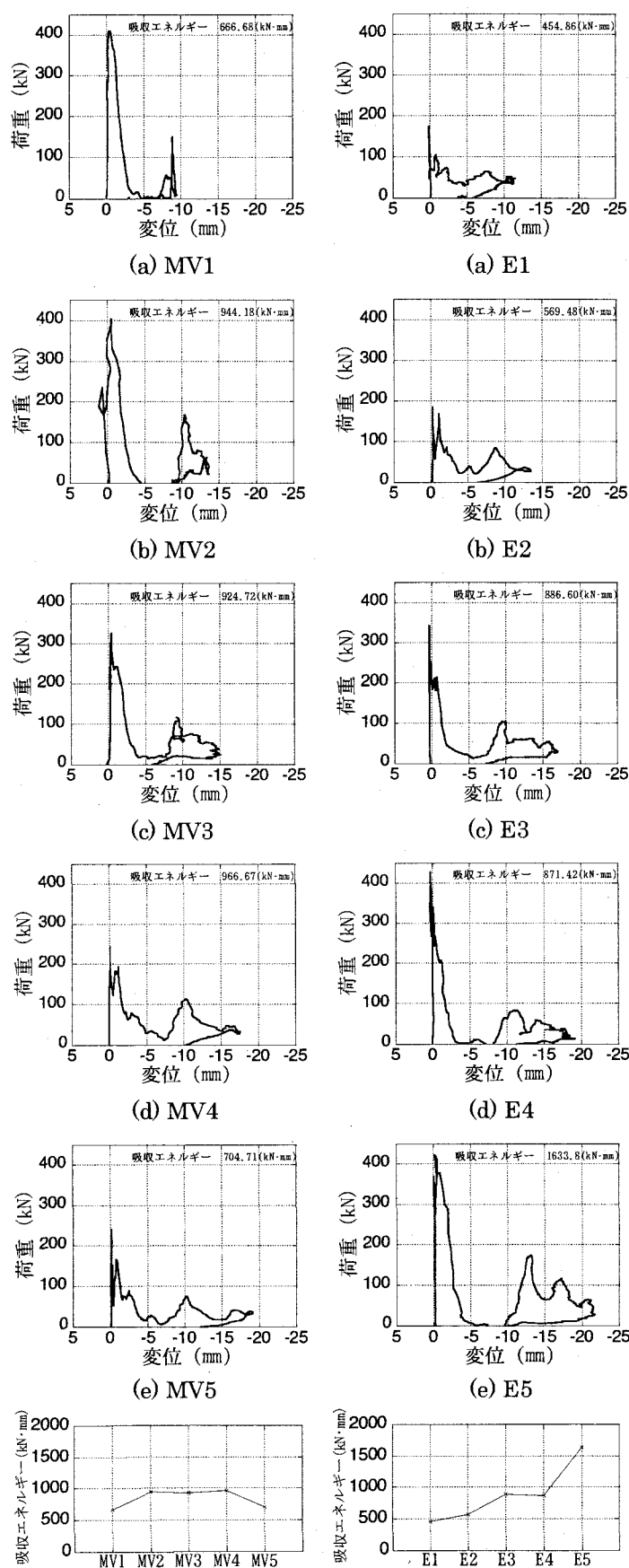


図-5 MVシリーズの荷重-変位関係とエネルギーの比較

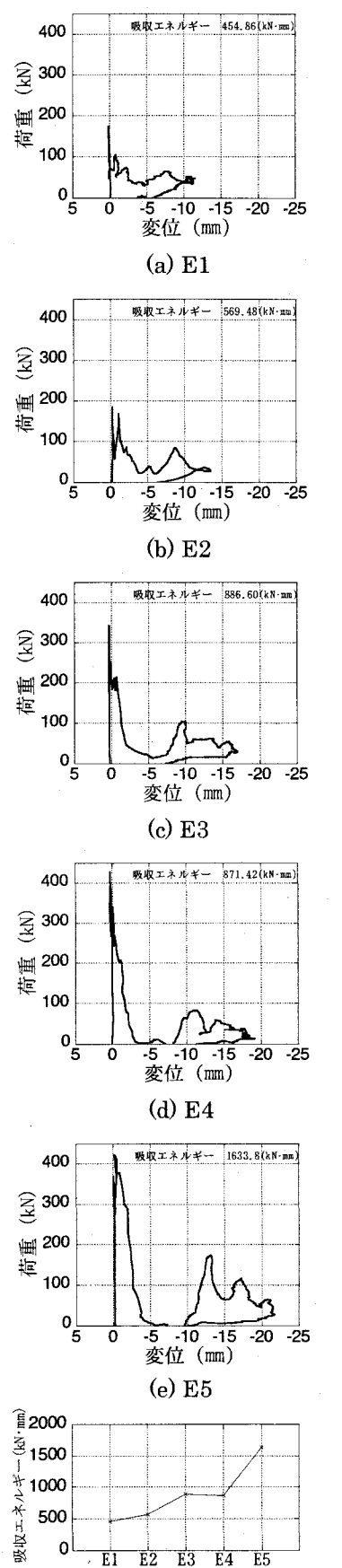


図-6 Eシリーズの荷重-変位関係とエネルギーの比較

(3) 吸収エネルギー

本研究では、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した。図-5に荷重-変位関係を示す。いずれも、衝突初期の荷重第1波と変位によって構成される1つ目のループと、その後の荷重第2波と変位によって構成される2つ目のループが確認できる。

図-5にMVシリーズの荷重-変位関係を示す。MVシリーズの荷重-変位曲線では、運動量が増えるにつれて1つ目のループは荷重方向に小さくなり、2つ目のループは変位方向に大きくなる傾向にある。(1)のひびわれ状況と併せて考えると、1つ目のループは局所的破壊に、2つ目のループは全体的破壊に対応していると推測できる。また、図-5(f)より、2つのループを合計した全吸収エネルギーについては、運動量の相違による明確な影響は認められなかった。

図-6にEシリーズの荷重-変位関係を示す。Eシリーズの荷重-変位曲線では、運動エネルギーが増えるにつれてどちらのループも大きくなる傾向にある。これは運動エネルギーが増えるにつれて局所的破壊、全体的破壊ともに大きくなるという破壊状況と対応していると推測できる。また、図-6(f)より、全吸収エネルギーは、運動エネルギーが増加するほど大きくなるのがわかる。

3. 個別要素法による解析

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用いられている^{1),2)}。本研究では、個別要素法を材料のひずみ速度効果や圧縮後の軟化挙動を考慮した衝撃挙動解析に適用した。

個別要素法では、コンクリ

ートのある一定の半径を持つ要素の集合体と仮定し、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³⁾。図-7に本解析で対象としたRCはりと解析モデルを示す。要素半径は12.5mm、要素数は539個、減衰係数は簡単のためゼロとした。

また、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、材料に生じ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⁴⁾。このような材料のひずみ速度効果はかなり明らかにされているが、高速の場合、実験条件の

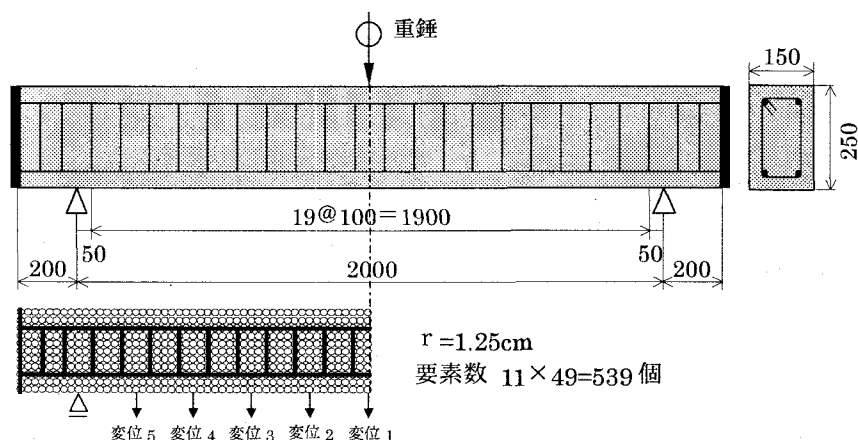
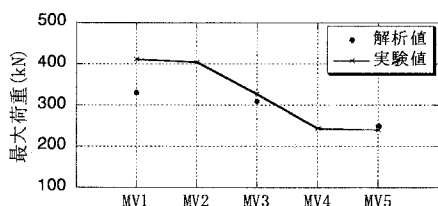
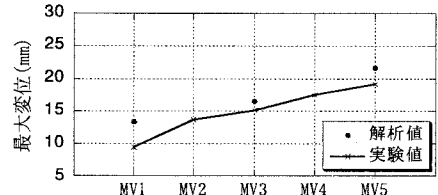


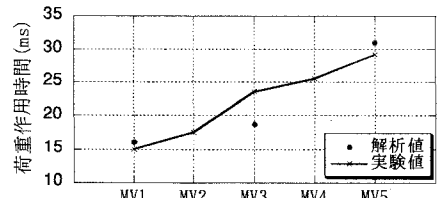
図-7 RCはりと解析モデル



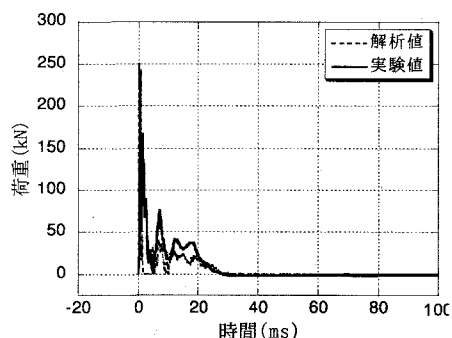
(a) 最大荷重



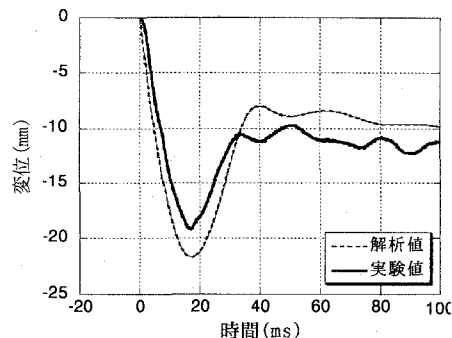
(b) 最大変位



(c) 荷重作用時間



(a) 荷重波形



(b) 変位波形

図-8 MVシリーズの代表特性値

図-9 MV5の荷重・変位波形

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。本研究では、過去の研究⁵⁾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 として解析を行った。

3. 1 解析結果

解析は、MVシリーズ、Eシリーズ各々3ケース、つまりMV1, MV3, MV5, E1, E3, E5について行った。MVシリーズの解析結果と実験結果で代表特性値を比較したものを図-8に示す。比較的高速度の衝突であるMV1では実験を十分に再現できていないが、比較的低速度の衝突であるMV3, MV5では実験をよく再現できていることが分かる。また、比較的良好に再現できていたMV5の荷重波形、変位波形について解析結果と実験結果で比較したものを図

-9に示す。荷重波形では衝突初期の荷重1波目の最大値については実験をよく再現しているが、2波目の波形では解析結果のほうが実験結果よりやや小さくなっていることがわかる。また、荷重作用時間についてはよく再現できていることがわかる。変位波形では、最大変位は解析結果のほうが大きく出ているが、残留変位は解析結果のほうがやや小さくなっている。しかし、全体として解析が実験をよく再現しているのがわかる。Eシリーズについても同様に解析結果と実験結果の比較を行ったが、MVシリーズと同様に比較的低速度の衝突であるE1, E3については実験をよく再現できていた。

3. 2 弾性解析での減衰の考慮

本研究では、減衰定数は簡単のためゼロとしてきた。しかし、今後の解析で減衰を考慮していくにあたって、ここでは弾性解析において法線方向のばねについての減衰を導入し、その影響について検討した。解析モ

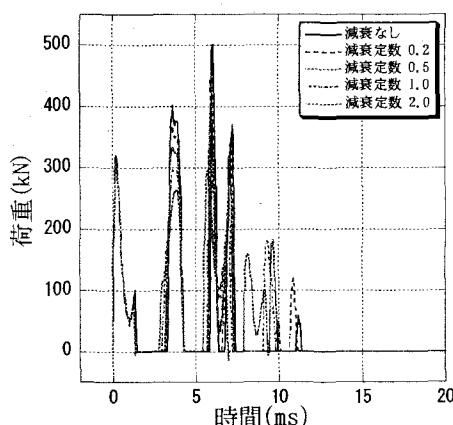


図-10 荷重波形の比較

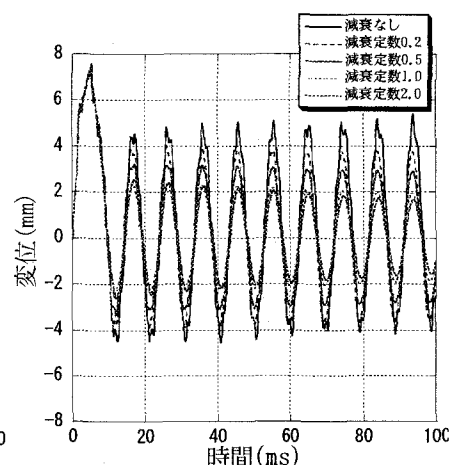
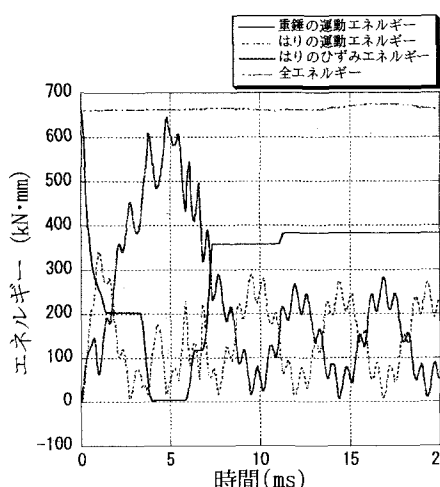
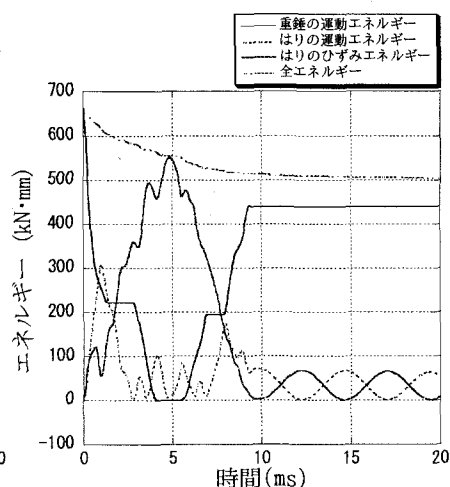


図-11 変位波形の比較



(a) 減衰なし



(b) 減衰定数 2.0

図-12 エネルギーの変化

デルはこれまでと同様、スパン 2000mmのRCはりを用い、張り出し部はなしとした。減衰定数は、解析で用いている法線方向ばねの限界減衰定数と、導入する減衰係数の比として計算した。解析は減衰定数 0.2, 0.5, 1.0, 2.0の場合について行った。

図-10 は減衰なしの場合と各減衰定数の場合の荷重波形を比較したものである。それぞれ4~5回荷重が出ているのが確認できる。いずれのケースでも荷重1波目については波形も最大値もほとんど差がなく、減衰を導入しても1波目には影響が出ないことがわかる。また、その後発生する荷重2波目以降については減衰定数が大きくなるほどその最大値が小さくなることがわかる。

図-11 は同様に変位波形について比較したものであるが、重錘とはり衝突している間に発生する1波目についてはいずれのケースでもほとんど差がない。しかし、重錘がはりから浮き上がった後の振動である2

波目以降では減衰定数が大きくなるほど振幅が小さくなることが確認できる。

図-12 は減衰なしの場合と減衰定数 2.0 の場合のエネルギーの変化を示したものである。重錘の運動エネルギーについて見ると、はりの衝突後急激に減少していき、5 ms 以降では重錘の跳ね返りのためエネルギーが増加していくのが確認できる。この間に何度か波形が水平になるところがあるが、その部分では重錘とはり要素が離れていることになる。これは、図-10 の荷重波形の荷重がゼロになっている部分と対応しており、重錘がはりから完全に浮き上がるまでに重錘とはり要素が数回衝突していることがわかる。はりの運動エネルギー、ひずみエネルギーは、はりの変位に応じて変化しており、図-11 の変位波形と対応していることがわかる。また、3つのエネルギーの合計値である全エネルギーについては、減衰なしのほうではほぼ一定であるのに対し、減衰定数 2.0 のほうでは減少していくのが確認できる。

5. まとめ

本研究では、RC はりの衝撃挙動の解明を目指し、重錘落下衝撃実験および個別要素法による衝撃挙動解析を行った。本研究で得られた結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) 重錘のもつ運動エネルギーが一定の条件下での運動量の相違、運動量が一定の条件下での運動エネルギーの相違による RC はりのひびわれ状況の特徴について実験的に明らかにした。
- (2) 重錘のもつ運動エネルギーが一定の場合、運動量と最大変位、荷重作用時間は正の相関関係にあり、最大荷重は重錘の衝突速度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、運動エネルギーと最大荷重、最大変位、全吸収エネルギーは正の相関関係が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の相違によらずほぼ一定であった。
- (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 RC はりの衝撃挙動解析では、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において、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。
- (6) 減衰を導入した弾性解析では、減衰の有無、減衰定数の相違による、荷重波形、変位波形、エネルギーの変化への影響を示した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 中田吉彦, 榎谷浩, 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