

先端形状の異なる重錘を用いた曲げ破壊型 RC 梁の重錘衝突実験とその解析

FALLING-WEIGHT IMPACT TEST AND ITS NUMERICAL ANALYSIS OF FLEXURAL-FAILURE-TYPE RC BEAMS
TAKING NOSE-SHAPE OF STEEL-WEIGHT AS VARIABLE

小室雅人*, 岸 徳光**, 三上 浩***, 安藤智啓****

Masato KOMURO, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Tomohiro ANDO

*博(工) 室蘭工業大学助手 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***博(工) 三井建設(株) 主席研究員 (〒270-0132 流山市駒木 518-2)

****博(工) 防衛庁第4研究所 施設構造研究室 (〒229-0006 相模原市淵野辺 2-9-54)

キーワード：重錘先端形状, RC 梁, 衝撃挙動, 衝撃応答解析

(nose-shape of steel-weight, RC beam, impact behavior, impact response analysis)

1. はじめに

近年, 鉄筋コンクリート梁 (RC 梁) の耐衝撃設計法を確立することを目的として, RC 梁の衝撃挙動に関する実験的・解析的研究が多くの研究機関で行われるようになってきた^{1)~3)}. 著者らも, 特に静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁に着目して, 主鉄筋比, 断面寸法, スパン長および重錘質量を変化させた場合の衝撃挙動に関する実験的・解析的研究を試みてきた^{4), 5)}. その結果, 曲げ破壊型 RC 梁に関しては, その衝撃挙動がかなり明らかにされ, 簡易な耐衝撃設計手法も提案されている⁵⁾.

しかしながら, これまでの著者らによる RC 梁に関する研究は, 重錘の先端部形状が扁平な場合のみを対象に行われてきた. 実際の落石現象や航空機の衝突問題を考える場合には, 衝突体の先端部形状が扁平な場合のみならず, 鋭角な場合等様々な曲率を有する場合が想定される. そのため, 重錘の先端部形状が RC 梁の衝撃挙動に与える影響を検討することは重要であるものと考えられる. また, これらの検討は, 実験のみならず数値解析の援用のもとに効率よく実施することが肝要であるものと判断される.

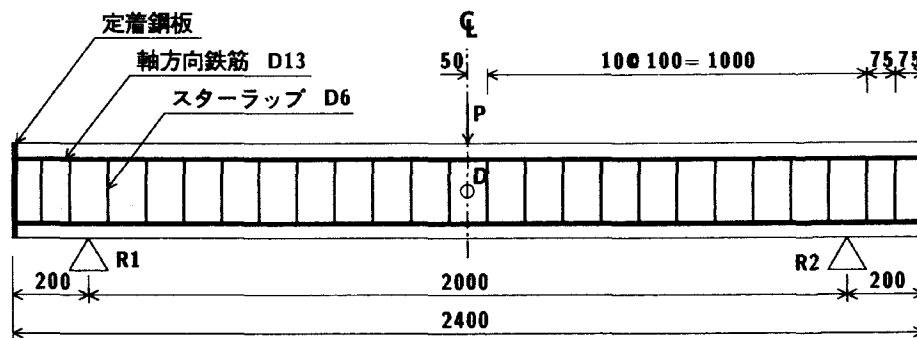
このような観点より, 本研究では先端部曲率が異

なる3種類の重錘を用いた曲げ破壊型 RC 梁の重錘落下衝撃実験およびその衝撃応答解析を行い, 重錘の先端部形状が RC 梁の衝撃挙動に与える影響と本数値解析手法の妥当性に関して検討を行った. なお, 本数値解析には, 一般に市販されている衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA (Ver.950)⁶⁾を用いている.

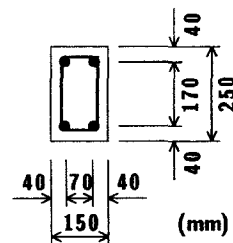
2. 実験概要

図-1には, 本実験および本数値解析に用いた RC 梁の形状寸法および配筋状況を測定項目と併せて示している. 本 RC 梁の形状寸法 (梁幅×梁高×全長) は, 150×250×2,400 mm である. また, 軸方向鉄筋 (D13) は真かぶり 40 mm の位置に, スターラップ (D6) は 100 mm 間隔で配筋されている. さらに, 軸方向鉄筋は梁両端面で厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接されている.

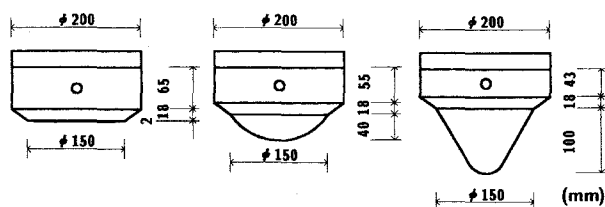
実験は, RC 梁を跳ね上がり防止用治具付の支点治具上に設置し, 梁スパン中央部に質量 300 kg の円柱状鋼製重錘を所定の高さより自由落下させることにより行っている. 支点治具全体は, RC 梁の回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている. ここでは, 曲率半径 r が 1) 1,407 mm (曲率小; CS),



P : 重錘衝撃力
R (=R1+R2) : 支点反力
D : 載荷点変位



図－１ RC 梁の形状寸法および測定項目



(a) 曲率小 ; CS (b) 曲率中 ; CM (c) 曲率大 ; CL

図－２ 重錘先端形状一覧

表－１ 解析ケース一覧

試験体名	静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断余裕度 α	衝突速度 V (m/s)
CS-4.5	137.4	38.2	3.6	4, 5
CM-4.5				
CL-4.5				

表－２ コンクリートの力学的特性値

実験時材令 (日)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
36	41.4	23.1	0.23

表－３ 鉄筋の力学的特性値

鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D13	SD345	373	206	0.3
D6	SD295A	368		

2) 90 mm (曲率中; CM), 3) 30 mm (曲率大; CL) と異なる 3 種類の重錘先端部を製作し実験に採用している (図－２ 参照)。重錘の衝突速度 V は、各重錘先端形状に対して $V=4, 5$ m/s を設定している。従って、実験ケースは、重錘が 3 種類と衝突速度が 2 種類の組み合わせからなる計 6 ケースである。実験における測定項目は、図－１に示すように重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力) および載荷点変位 D (以後、変位) に関する応答波形である。

表－１には、用いた RC 梁の静的設計値を一覧にして示している。表中、静的せん断耐力 V_{usc} および静的曲げ耐力 P_{usc} は、土木学会コンクリート標準示方書に基づき算定している。せん断余裕度 α は V_{usc} を P_{usc} で除した値である。本試験体の場合には $\alpha>1.0$ であることより、RC 梁は静載荷時には曲げ型で破壊することが予想される。表－２、３には、実験時におけるコンクリートおよび鉄筋 (軸方向鉄筋, スターラップ) の力学的特性値を示している。

３．実験結果

図－３および図－４には、衝突速度 $V=4, 5$ m/s における CS, CM, CL 試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 D に関する各応答波形を比較して示している。ここでは、各波形は原波形を用いて整理している。また、 P に関しては時間軸を拡大し、10 ms 間に対して示している。

両図より、重錘衝撃力波形 P の場合には、衝突速度 V に拘わらず、重錘の先端部曲率が大きくなるほど振幅は小さく、継続時間は長く示されていることが分かる。重錘の先端部形状が曲率小と曲率大である CS と CL 試験体を比較すると、衝突速度 V に拘わらず、振幅は CS の場合で 4 倍程度大きく、一方継続時間は CL の場合で 3 倍程度大きい。

次に、支点反力波形 R について見ると、衝突速度 V に拘わらず、各波形には若干の高周波成分が励起されているものの、大略正弦半波の類似な分布性状を呈していることが分かる。詳細に見ると、 $V=4$ m/s の場合には、振幅の大きさや波動の継続時間に各載荷条件でそれほど大差がない。一方、 $V=5$ m/s の場合には、曲率中、曲率大である CM と CL 試験体の継続時間が、曲率小である CS 試験体より

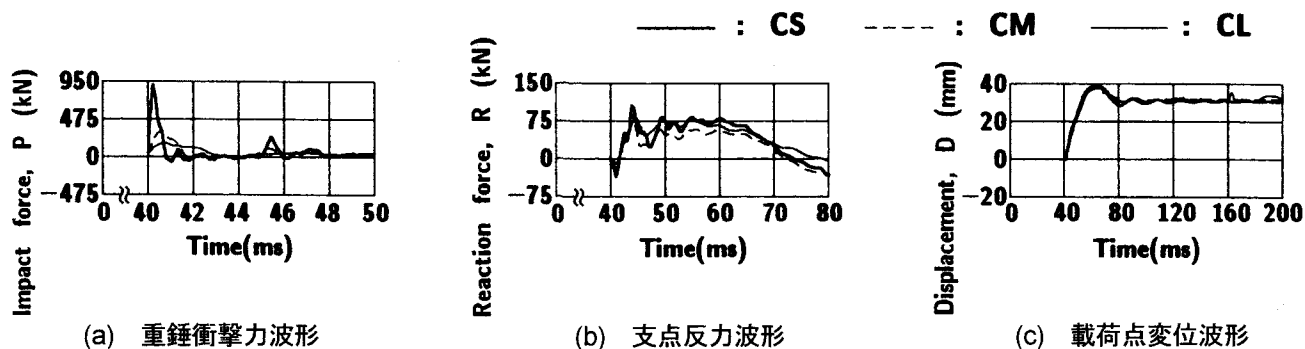


図-3 各応答波形の比較 ($V = 4$ m/s)

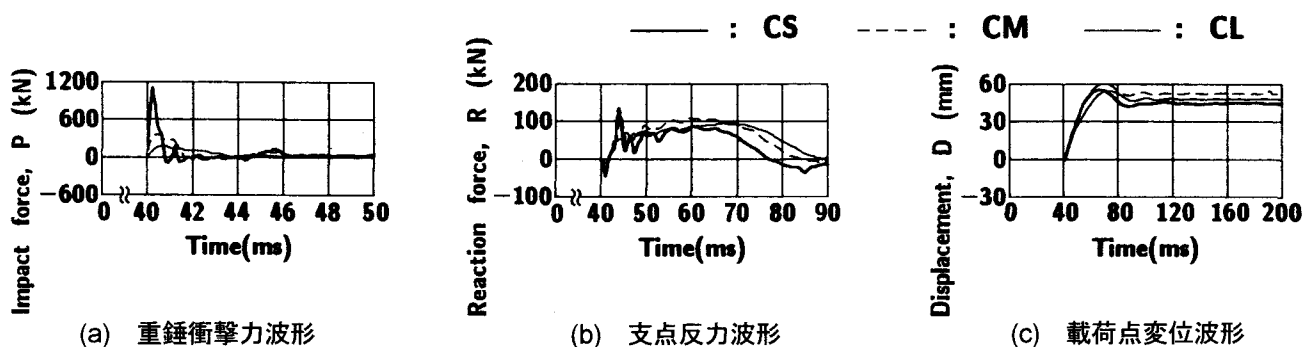


図-4 各応答波形の比較 ($V = 5$ m/s)

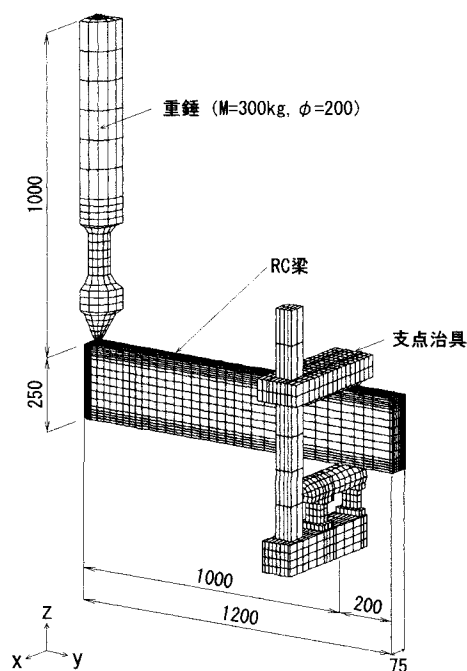


図-5 有限要素モデル

長く示されている。これは、後述するひび割れ分布において、CM と CL 試験体の載荷点部のコンクリートが著しく剥落していることから、衝突時に重錘がコンクリートに貫入する形となり、荷重の作用時間が若干長くなったものと考えられる。

さらに、変位波形 D について見ると、衝突速度 $V = 4$ m/s の場合には、各波形は波動の立ち上がりから減衰に至るまで非常に良く対応した分布性状になっていることが分かる。一方、 $V = 5$ m/s の場合には、CL 試験体において、最大変位値に至るまでの波動の勾配が他の試験体よりも緩やかになっていることや、残留変位成分の大きさが各 RC 梁で若干異なっていることを除くと、各波形は大略類似の分布性状となっている。

以上より、支点反力波形および変位波形は、重錘の先端部形状に拘わらず、ほぼ同様の分布性状を示すことが明らかになった。しかしながら、重錘衝撃力波形の場合には、重錘の先端部曲率が大いほど最大振幅は小さく、衝撃初期の波形成分の継続時間は長くなることも分かった。

4. 数値解析条件および仮定

4.1 数値解析モデル

図-5 には、曲率大の重錘を用いた場合の全体の有限要素モデルを示している。解析対象は、RC 梁の対称性を考慮してスパン方向および断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。適用した要素タイプは、8 節点あるいは 6 節点の三次元固体要素である。し

かしながら、スターラップ要素には、解析時間の短縮を考慮して、剛性、断面積、重量が等価な梁要素を適用した。全節点数および全要素数は、図-5に示すモデルの場合でそれぞれ 10,263, 8,395 である。なお、要素の積分点数は1点積分を基本としているが、軸方向鉄筋に関しては断面方向に1要素でモデル化しているため、解析精度を考慮して8点積分としている。

コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリートと軸方向鉄筋およびスターラップ要素間には、完全付着を仮定している。衝撃荷重は、RC 梁上に設置した重錘要素の全節点に設定した衝突速度を付加することにより与えている。なお、全数値解析時間は、重錘が RC 梁に衝突した時点から RC 梁がほぼ定常状態に至るまでの 160 ms 間とした。

4.2 材料物性モデル

コンクリート要素は、圧縮領域に対しては相当歪が $1,500 \mu$ に達した状態で降伏するものと仮定し、完全弾塑性のバイリニア型にモデル化している。一方、引張領域に関しては破壊圧力に達した段階で圧力が零に除荷されるカットオフモデルを用いている。なお、降伏応力には圧縮強度 f_c を、また引張側の破壊圧力には降伏応力の $1/10 (= 0.1 f_c)$ を仮定している。降伏条件には von Mises の降伏条件を採用している。

軸方向鉄筋要素には、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを採用している。降伏応力 σ_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、材料試験結果に基づき表-3に示す値を採用している。降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととし、予備解析結果に基づき塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の 1% と仮定した。その他の要素（スターラップ、重錘、支点治具および定着鋼板）には弾性体モデルを適用している。それらの弾性係数およびポアソン比には、それぞれ $E=206 \text{ GPa}$, $\nu=0.3$ を用いている。

5. 数値解析結果と実験結果の比較

5.1 各応答波形の比較

図-6および図-7には、衝突速度 $V=4, 5 \text{ m/s}$ における重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 D

の各応答波形に関する数値解析結果を実験結果と比較して示している。また、数値解析における重錘衝撃力および支点反力は、重錘および支点治具とコンクリートの要素間に定義した接触面に生じる鉛直方向の接触反力を集積することにより算定している。

最初に、図-6の衝突速度 $V=4 \text{ m/s}$ の結果について検討を行う。(a)図の重錘衝撃力波形 P について見ると、数値解析結果と実験結果は、重錘の先端部曲率の大きさに拘わらず、最大振幅値には若干の差異が見られるものの、波動の立ち上がりから減衰に至るまで両者で良く対応した分布性状を示していることが分かる。すなわち、両波動は衝撃初期の振幅が大きく継続時間の短い波形成分（第一波）と、その後の振幅が小さく継続時間の比較的長い波形成分（第二波）の二波から成る分布性状を示している。また、曲率の大きさの影響に着目すると、第一波の最大振幅が曲率の増大に伴い大幅に減少していることが分かる。しかしながら、第二波目のピーク値は、曲率の大きさに拘わらずほぼ同様となっている。

(b)図の支点反力波形 R について見ると、ここでも数値解析結果と実験結果は、曲率の大きさに拘わらず両者で大略類似した分布性状となっていることが分かる。すなわち、波動が最大応答値まで比較的急勾配で増加した後一旦減少し、その後再度増大し第2ピーク値に達した後ほぼ同程度の値を持続し、やがて緩やかな勾配で零レベルに減少している。(c)図の変位波形 D に関しても、CS, CM, CL 試験体とも、最大応答値まではその立ち上がり勾配や最大値が数値解析結果と実験結果で非常によく対応していることが分かる。また、最大応答値以降に関しても、その振動特性や残留変位値が比較的良く対応している。

次に、図-7の衝突速度 $V=5 \text{ m/s}$ の結果について見ると、図より衝突速度 V が大きく梁の塑性化がより顕著になる場合においても、重錘衝撃力 P 、支点反力 R 、変位 D の各応答波形は、曲率大における R の分布性状を除くと、重錘の先端部曲率の大小に拘わらず、数値解析結果と実験結果は比較的良く対応していることが確認できる。なお、曲率大の場合において R の分布性状が異なるのは、後述の図-8に示されているように、実験では載荷点近傍部のコンクリートが著しく剥落していることより、その影響によるものと推察される。なお、衝突速度 $V=4 \text{ m/s}$ における波形との差異に着目すると、 $V=5$

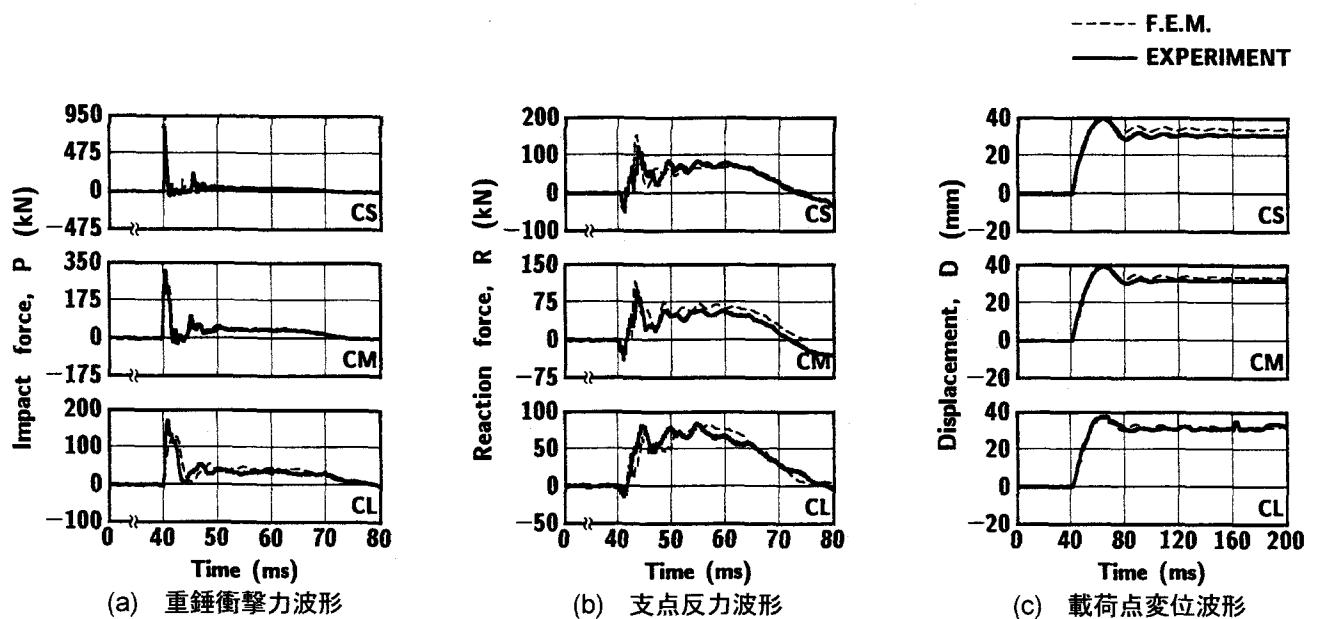


図-6 各応答波形に関する比較 ($V = 4 \text{ m/s}$)

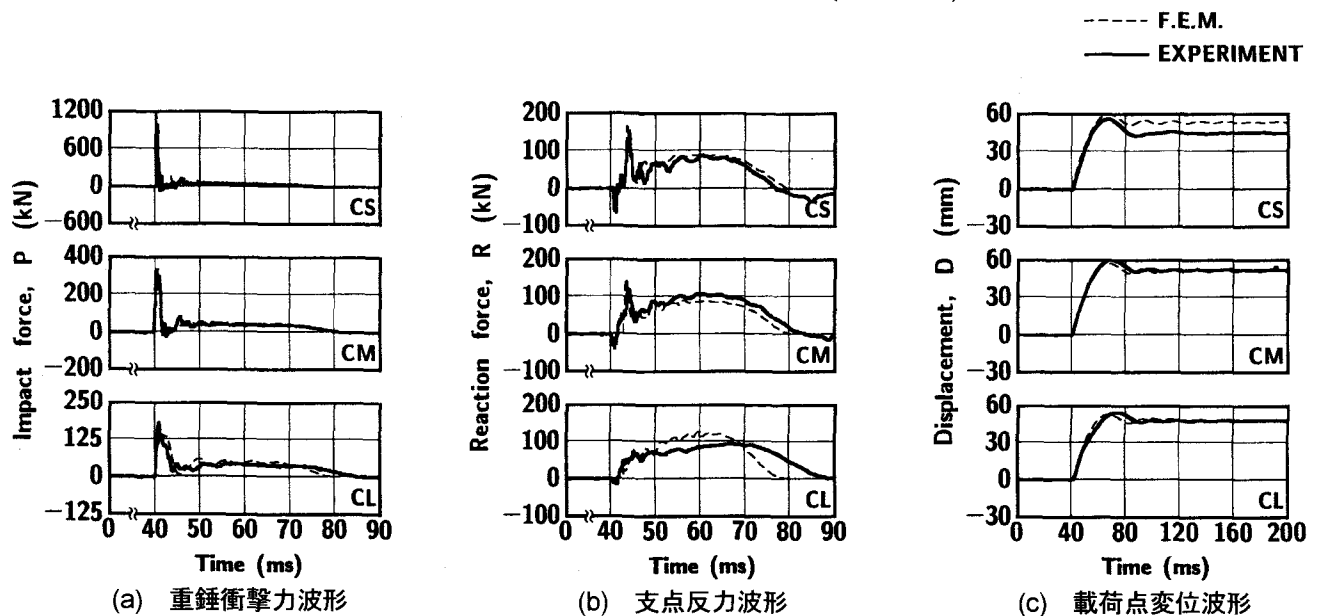


図-7 各応答波形に関する比較 ($V = 5 \text{ m/s}$)

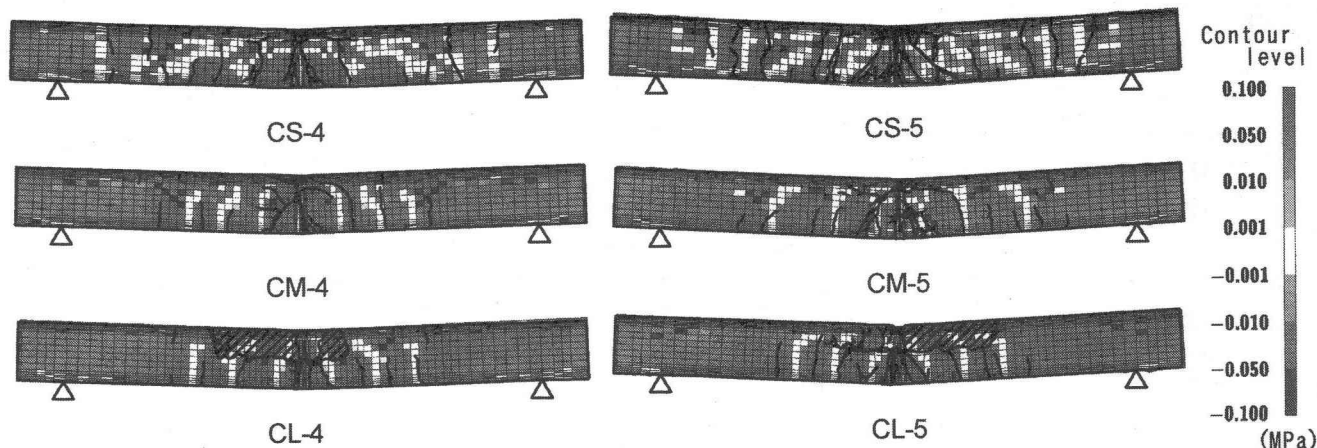
m/s の場合には $V = 4 \text{ m/s}$ の場合に比べて P, R の最大振幅が大きく、かつ荷重の作用時間が延長していることが分かる。また、 D の最大振幅および振動周期も大きいことが分かる。しかしながら、全体的な分布性状はいずれの波形に関しても $V = 4 \text{ m/s}$ の場合と類似である。

以上より、本数値解析手法を用いることにより、重錘落下衝撃を受ける RC 梁の重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形が、重錘の先端部曲率の大きさに拘わらず、精度良く推定できることが明らかになった。

5.2 第1主応力分布とひび割れ分布の比較

コンクリート要素に適用した材料構成則の考え方に基づくと、最大応答変位発生時近傍におけるコンクリート要素の第1主応力が零応力を示している場合は、その要素に発生する応力が微小であるか、ひび割れが発生していることと等価であることを意味している。ここでは、このようにして得られるひび割れ分布予測と実験より得られるひび割れ分布を比較することにより、本評価方法の妥当性について検討を行った。

図-8には、RC 梁の最大変位発生時近傍における RC 梁側面の第1主応力分布を実験終了後の



図－8 最大変位発生時近傍の第1主応力分布と実験終了後のコンクリートのひび割れ分布

RC 梁側面のひび割れ分布と比較して示している。

図より、曲率小 (CS) の場合について見ると、衝突速度 $V=4\text{ m/s}$ における実験終了後の曲げひび割れはスパン全体に渡って発生している。解析結果では、荷重点部から梁下縁の斜め方向に進展するひび割れを除くと、このような曲げひび割れ分布を大略再現しているものと判断される。 $V=5\text{ m/s}$ においても、実験終了後の曲げひび割れの分布は $V=4\text{ m/s}$ の場合とほぼ同様であり、解析結果もこれらの分布を大略再現していることが分かる。

一方、曲率中 (CM) および曲率大 (CL) の場合について見ると、実験終了後の曲げひび割れは、衝突速度 V に拘わらず、曲率小の場合に比べてスパン中央部に集中して発生している。数値解析結果は、このような傾向を良くシミュレートしていることが分かる。なお、CM、CL に関する数値解析結果には、曲率小の場合に見られた斜めひび割れが現れず、実験結果と対応した傾向を示している。

6. まとめ

本研究では、先端部曲率が異なる3種類の重錘を用いた曲げ破壊型 RC 梁の重錘落下衝撃実験およびその衝撃応答解析を行い、重錘の先端部形状が RC 梁の衝撃挙動に与える影響と本数値解析手法の妥当性に関して検討を行った。本研究より得られた結果を要約すると、

- (1) 支点反力波形および変位波形は、重錘の先端部形状に拘わらずほぼ同様の分布性状となる。
- (2) 重錘衝撃力波形の場合には、重錘の先端部曲率が高いほど最大振幅は小さく、衝撃初期の波形成分の継続時間は長くなる。
- (3) 本数値解析手法を用いることにより、重錘落下

を受ける RC 梁の重錘衝撃力、支点反力、変位に関する応答波形を、重錘の先端部形状に拘わらず精度良くシミュレートすることが可能である。

- (4) 最大変位発生時の第1主応力分布図を用いて、RC 梁に発生するひび割れ分布を、重錘の先端部形状に拘わらず比較的精度良く予測することができる。

参考文献

- 1) 井元勝慶, 大野友則, 佐々木晃, 小暮幹太: 重錘落下衝突を受ける RC はり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 1201-1212, 1995.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静荷重時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp. 215-233, 1999.
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静荷重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考案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp. 177-190, 2000.
- 6) Hallquist, J.O.: *LS-DYNA User's Manual, Ver. 950*, Livermore Software Technology Corporation, 1999.