

I-30 DYNA3D を用いた RC 梁の重錘落下時の弾塑性応答解析

開発土木研究所 正員 佐藤 昌志
 室蘭工業大学 正員 松岡 健一
 三井建設(株) 正員 三上 浩
 室蘭工業大学 学生員 長谷川 康司

1. はじめに

著者等はこれまで、重錘落下式衝撃実験装置を用いて補強筋として丸鋼、異形鉄筋、AFRPロッド、CFRPロッド等を用いた RC梁に関する耐衝撃性に関する実験的研究を行ってきた。その結果 1) 特に、丸鋼、異形鉄筋を補強筋とする RC梁は静載荷時と異なり載荷点部で角折れが生じること、2) AFRPロッドを用いる場合には鉄筋を用いるような角折れが生じず、かつひび割れも梁全体に発生し、衝撃荷重を梁全体で抵抗することが明らかになっている。このように補強筋の材質によって RC梁の耐衝撃特性が大きく異なることが明らかになっている。しかしながら、このような RC部材の耐衝撃挙動に関する研究はまだまだ研究例も少なく出発点に立ったばかりと言っても過言ではない。RC梁等コンクリート構造部材の耐衝撃挙動を解明するためには実験研究はもとより、簡易な弾塑性衝撃応答解析手法を確立し、実験、数値解析の両面から研究を推進することが得策であるものと考えられる。

本論文はこのような観点から、RC部材の弾塑性衝撃応答解析手法を確立することを目的として、DYNA3D による RC梁の弾塑性解析を試み、その妥当性について検討を行ったものである。本研究では、過去に著者等が実験を行った異形鉄筋を補強筋とする RC梁に重錘落下による衝撃荷重を作用させた場合について解析を行い、実験結果と比較する形で解析手法の妥当性について検討を行なっている。尚、本解析ではより単純化した形で検討することを前提としているため、コンクリートあるいは鉄筋の高速載荷による歪速度効果は無視している。

2. 実験概要

今回解析の対象とした RC梁は図-1 に示すような、幅 10cm、桁高 15cm、純スパン 125cm の複鉄筋矩形梁である。補強筋には SD295 D10 を用いている。実験は室蘭工業大学に設置されている重錘落下式万能衝撃試験機を用いて行った。重錘は重量 200kgf、直径 15cm で底部の 2mm が球状になっている。解析に用いた実験ケースは弾性状態から損傷程度の大きい状態までを検討するため、単一載荷状態で載荷速度が $v=2\text{m/sec}$ 、 $v=3\text{m/sec}$ 、 $v=4\text{m/sec}$ の場合である。本 RC梁は載荷速度 $v=4\text{m/sec}$ で破壊に至っている。実験時のコンクリートの物性値は強度が $f'_{ck}=439\text{kgf/cm}^2$ 、弾性係数が $E_c=2.83 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比が $\nu_c=0.2$ である。図-2 に実験時における変位および歪の測定位置を示している。

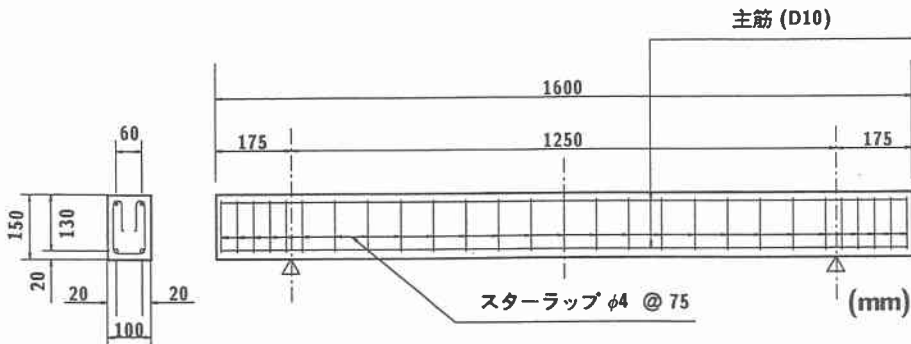


図-1 供試体の形状寸法および補強筋の配置位置

Elasto-Plastic Analysis of RC Beams under weight falling by means of DYNA3D
 by Masashi SATO, Ken-ichi MATSUOKA, Hiroshi MIKAMI, Koji HASEGAWA

3. 解析仮定

3. 1 RC梁のモデル化

解析に用いた衝撃解析用汎用プログラム DYNA3D は、衝突体に衝突時の速度を与えることにより衝突体と被衝突体の一体解析が可能である。ここでは図-1に示す RC梁が二軸対称となっていることより、自由端部を含めた四半分を解析断面と仮定した。また、重錘は実寸が直径 15cm、長さ 144cm の円柱体であるが、これを先端形状、重量が等しい長さ 10cm、直径 15cm の円柱体にモデル化し要素分割を行っている。図-3に RC梁と重錘の要素分割図を示している。尚、コンクリートおよび主筋 (D10)、重錘は三次元固体要素を、またスターラップ ($\phi 4$) は他の要素に比較して小さく、解析時間に大きな影響を与えることよりスターラップと等しい剛性、断面積、重量を有する梁要素にモデル化している。全分割数は 844 である。

3. 2 物性モデル

コンクリートの圧縮降伏強度、弾性係数は実測結果から得られた前述の f_{ck} 、 E_c を採用することとした。圧縮側の降伏歪はコンクリート標準示方書に基づいて 0.2% と仮定している。また、引張破壊強度は $f_{tk}/10$ としている。主鉄筋およびスターラップの物性値は公称値を用いることとし、弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s はそれぞれ $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\nu_s=0.3$ としている。また、降伏後の硬化係数は $H'=0.7 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ と仮定した。コンクリートと鉄筋付着部は両者節点を共有することとし、付着要素等特別な要素は採用していない。また、減衰定数は全要素 10% と仮定している。

4. 解析結果と実験値との比較

4. 1 応答変位

4. 1. 1 応答変位波形

図-4 は RC 梁各点の変位応答波形について、実験結果と解析結果を比較して示している。なお図中、各載荷速度における測点 D1 の実験結果は変位計の設置不良により途中より正確な波形を与えていないようであり、比較の対象から除くこととする。実験結果は、重錘による衝撃載荷によって RC 梁が変形を開始し、最大値に達した後除荷とともにある程度まで復元し、その後残留しているようである。最大値に対する残留の程度は載荷速度が大きい程大きくなっている。実験結果と解析結果を比較すると、載荷速度 $v=2\text{m/sec}$ の場合には、波動の立ち上がりから除荷時の復元状態までの D2 ~ D6 における解析結果は実験結果とほぼよく近似していることが分かる。載荷速度 $v=3\text{m/sec}$ 、 $v=4\text{m/sec}$ の場合には、波動の立ち上がりが両者よく一致しているものの残留部の大きさは解析結果が実験結果より小さく示されているようである。しかしながら、各測点の波動が各点の最大応答値を基準にして表示されていることを考慮に入れると、いずれの載荷速度に対しても解析結果は実験値とよく近似しているものと考えられる。

4. 1. 2 応答変位分布の経時変化

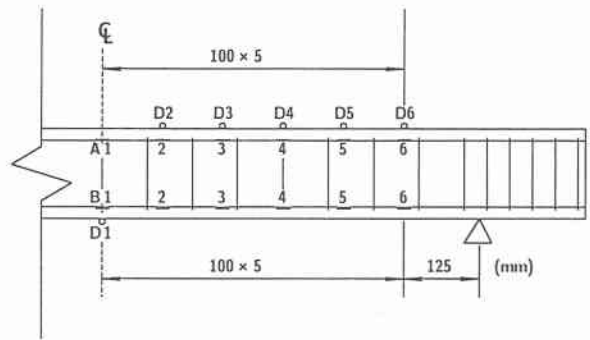


図-2 歪および変位の測定位置

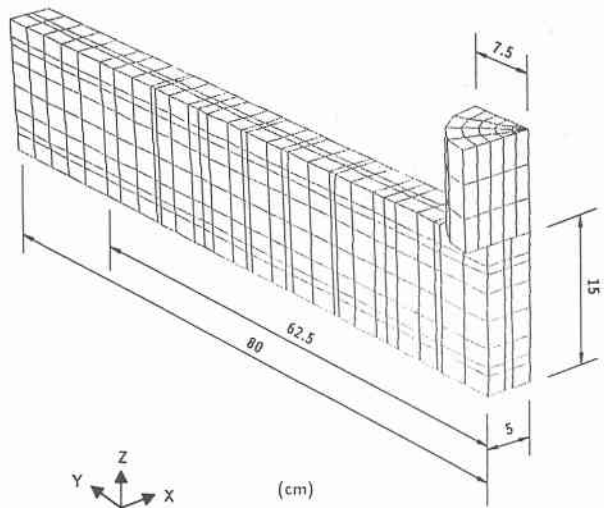


図-3 要素分割図

図-5には波動の立ち上がりから40msecまでの衝撃初期の梁の変形状態について実験結果と解析結果を比較して示している。図-4でも示されているように、載荷速度 $v=2\text{m/sec}$ の場合には解析結果と実験結果とがよく一致している。また、載荷速度 $v=3\text{m/sec}$, 4m/sec の場合にも、解析結果は実験結果よりも多少過小評価する傾向にあるが実験結果の得られた特性をよく近似しているものと考えられる。

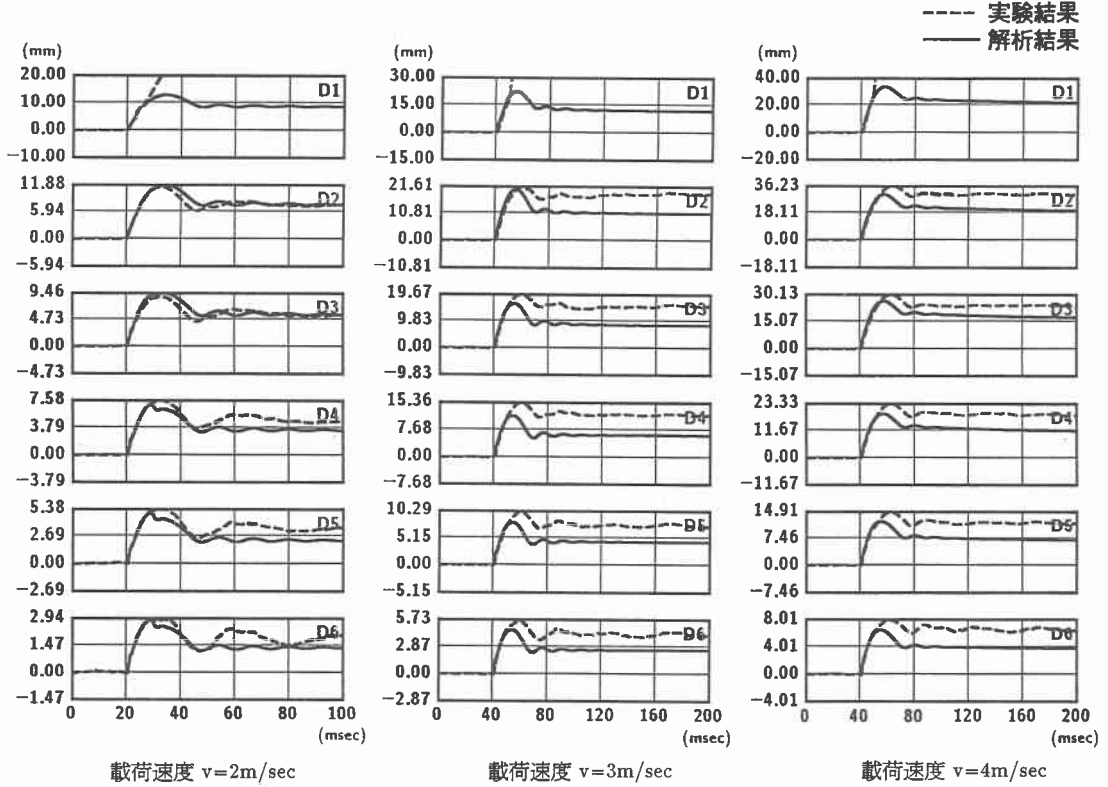


図-4 応答変位波形

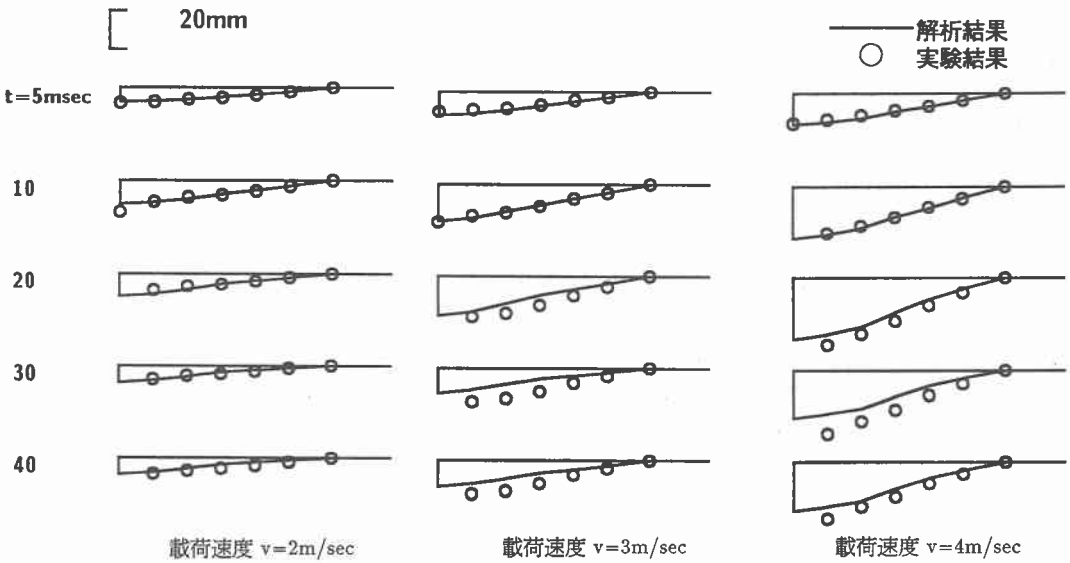


図-5 応答変位分布の経時変化

4. 2 補強筋の応答歪波形

図-6は RC梁各点の上端筋歪応答波形、図-7は下端筋歪応答波形について、実験結果と解析結果を比較して示している。載荷速度 $v=2\text{m/sec}$ の場合、実験結果は B1 で下端筋歪が既に振り切れ、上端筋歪 A1 が零近傍の値となっていることより、載荷点直下にひび割れが発生し、かつ中立軸が上端筋近傍まで上昇した状態となっているものと考えられる。これに対し、解析結果は下端筋歪 B1 が 6000μ に達し、かつ上端筋歪 A1 も実験結果同様零近傍の値となっているが、その後上下端筋歪ともにそれぞれ 1000μ , 4000μ 程度の引張歪となり正曲げと軸引張の状態が重ね合わされた状態となっている。載荷点以外の測点について考察すると、A,B2 に関して A2点は実験結果と解析結果が類似の分布を示している。また、B2点は解析結果が実験結果より若干小さくなっている。これより、A,B2点では解析結果は実験結果の特性を比較的良好に近似しているものと考えられる。A,B3 に関しては、波動の変動状態が実験結果と解析結果両者類似のものとなっている。歪の値を比較すると、上下端筋歪とも解析結果は実験結果よりも大きく示されている。他 A,B4~6 点部の歪成分に関しては、変動状態は A,B3点部同様両者類似なものとなっているが、解析結果の上下端筋歪は実験結果よりそれぞれ圧縮側、引張側に大きな値となっている。載荷速度 $v=3\text{m/sec}$, 4m/sec の場合について比較すると、載荷点下の応答を除き、値は異なるものの解析結果と実験結果の歪波形はほぼ両者類似なものとなっていることがわかる。載荷時には解析結果は上端筋歪が圧縮歪、下端筋が B6点の歪でも 550μ と大きな引張歪となっているが、除荷後は上端筋はほぼ零歪を基準として減衰振動状態となり、下端筋歪は大きな引張側の残留歪となっている。これは、ほぼ梁全体にひび割れが発生し中立軸が上端筋近傍に移動していることを意味している。一方、実験結果は A4~6点部は負の曲率となり支点部で回転が拘束されているような状態を示している。

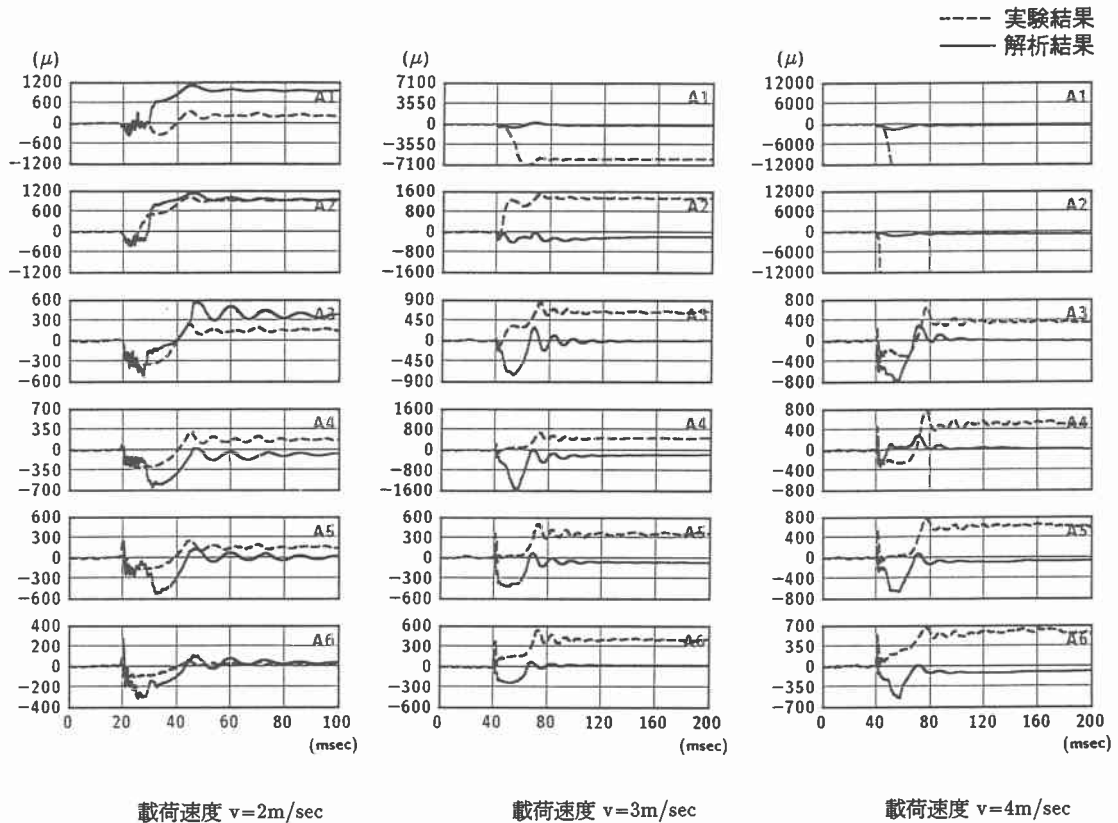


図-6 上端歪の応答波形

----- 実験結果
 ——— 解析結果

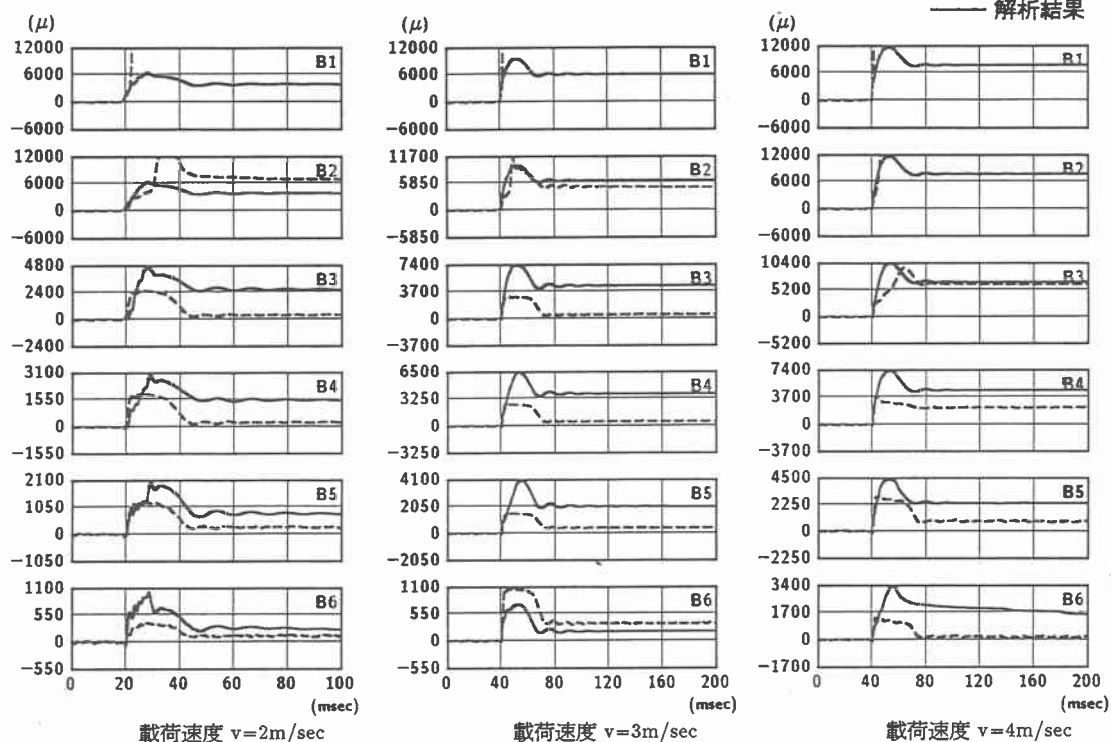
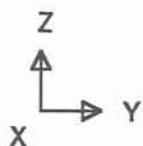


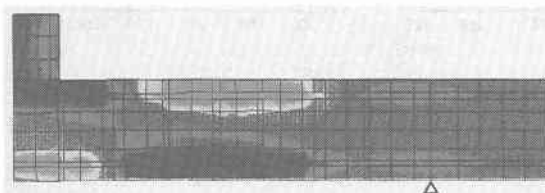
図-7 下端筋歪の応答波形

4. 3 軸方向応力の伝播状況

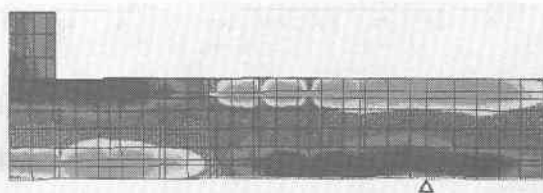
図-8には $v=2\text{m/sec}$ 載荷時における補強筋が配置されている断面の変形状況と軸方向応力の伝播状況を示す。重錘衝突の初期の状態から重錘が RC梁から離れる状態までの軸方向応力の推移状況、および変形状態がわかる。衝撃荷重載荷時の応力の伝播性状は、重錘衝突の初期状態は局所的な分布性状を示し、時間の経過とともに上端筋は圧縮応力、下端筋は引張応力へと変化している。さらに時間が経過すると載荷点下の引張領域が上端まで達し、広く塑性化が進行している状態が示されている。



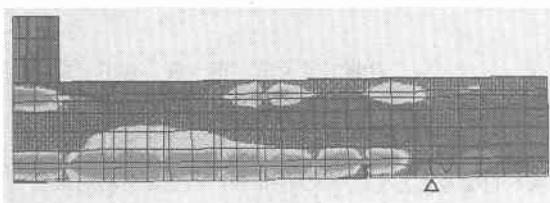
contour levels		
■	-1.000E+02	■
■	-3.000E+01	■
■	-5.000E+01	■
■	-4.000E+01	■
■	-2.000E+01	■
■	0.000E+00	■
■	2.000E+01	■
■	4.000E+01	■
■	6.000E+01	■
■	8.000E+01	■
■	1.000E+02	■



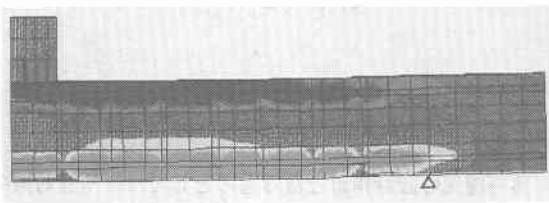
経過時間 $t=0.2\text{msec}$



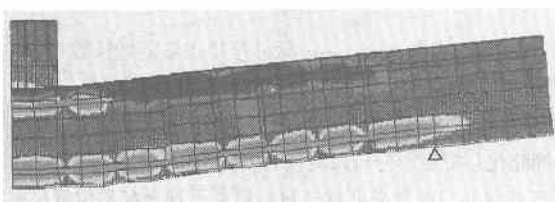
経過時間 $t=0.4\text{msec}$



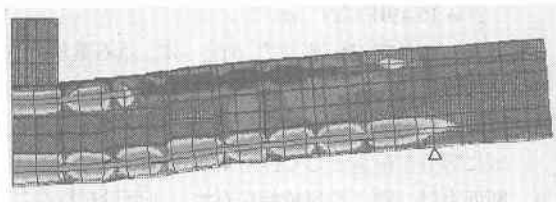
経過時間 $t=0.8\text{msec}$



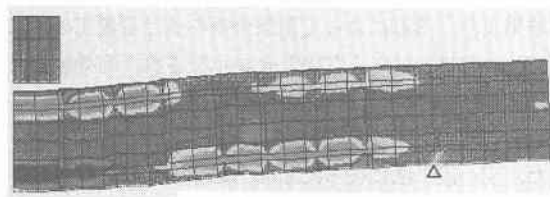
経過時間 $t=1.0\text{msec}$



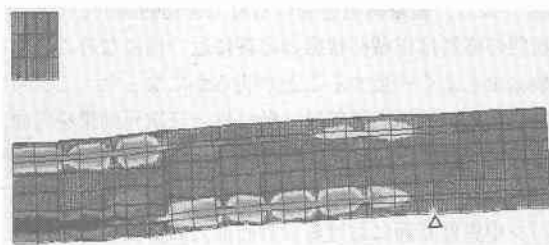
経過時間 $t=10.0\text{msec}$



経過時間 $t=20.0\text{msec}$



経過時間 $t=30.0\text{msec}$



経過時間 $t=80.0\text{msec}$

図-8 軸方向応答応力分布経時変化

5. まとめ

RC梁の弾塑性衝撃解析手法を確立することを目的として、異形鉄筋を補強筋とする複鉄筋 RC梁に 200kgf の重錘を自由落下させた場合の弾塑性挙動を衝撃解析汎用プログラム DYNA3D を用いて解析を行った。本研究では、できるだけ簡略な形で解析を行うために、構成材料の歪速度効果を無視し、かつ静的な材料物性を採用した。

検討結果、本解析結果は実験結果で得られた変位波形、および補強筋歪波形と類似の応答波形を得ることが明かとなった。今後、補強筋の特性が異なる場合や断面形状の異なる RC梁についての検討も行い、より精度の高い RC梁の弾塑性解析手法を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) Hallquist.J.O. : LS-DYNA3D User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1993.9.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一, 田中 功, 松坂 祐介 : 補強筋の特性とコンクリート強度が RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす影響, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 50 号, pp.180~185,1993