

論文 各種 RC 梁の重錘落下時の非線形応答解析

岸 徳光^{*1}・三上 浩^{*2}・佐藤昌志^{*3}・松岡健一^{*4}

要旨：本論文は、RC 部材のより簡易な弾塑性衝撃応答解析手法を確立することを目的として、重錘落下によって衝撃荷重載荷された RC 梁に関する弾塑性衝撃応答解析を行い、実測結果と比較する形でその妥当性を検討したものである。本研究では、補強筋として異形鉄筋、AFRP ロッド、CFRP ロッドを用いた場合について、特に梁の変形に着目して検討を行った。検討結果、本解析手法は、いずれの RC 梁に対しても大略実測結果と類似な最大応答変位、応答変位性状および残留変形等を算定評価できることが明らかになった。

キーワード：衝撃応答解析、RC 梁、AFRP ロッド、CFRP ロッド

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 梁の耐衝撃性に関する実験的研究を行ってきた [1]。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等、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い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し、それらを用いた構造物に関する耐衝撃設計法を確立するためには実験研究はもとより、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効率的に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 部材のより簡易な弾塑性衝撃応答解析手法を確立することを目的として、補強筋の異なる各種 RC 梁について弾塑性解析を試み、重錘落下による衝撃実験結果と比較することによって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、AFRP ロッド、CFRP ロッドを補強筋とする各種 RC 梁を対象として主に応答変位波形に着目して検討を行っている。なお、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、減衰項は考慮しているが、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等は無視している。

2. 実験概要

本研究において対象とした RC 梁は、図 - 1 に示すような幅 10 cm、梁高 15 cm、純スパン 125 cm の矩形梁である。主筋に用いた各種 RC 梁の補強筋は、異形鉄筋が D10、砂付き AFRP ロッドが RA9S、砂付き CFRP ロッドが RC9S である。RA9S、RC9S は共にロッド表面に 5号珪砂 (平均粒径 0.3 mm) を接着したものを用いている。補強筋は全て複筋配置とし、下端補強筋比は全て約 1% とした。補強筋の材料物性を表 - 1 に示す。なお、AFRP ロッド、CFRP ロッド の特性値はカタログ値であり、異形鉄筋の

*1 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科、工博 (正会員)

*2 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員、工博 (正会員)

*3 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室長 (正会員)

*4 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科、工博 (正会員)

特性値は規格値を示している。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 $E_c = 2.83 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu_c = 0.2$ である。実験結果は文献 [1] に詳細に述べられているように、単一載荷状態でいずれの RC 梁も載荷速度 $v = 4 \text{ m/sec}$ で破壊に至っている。表 2 には、本研究に用いた実験および解析ケースを一覧にして示している。各解析ケースは表に示されているような呼称を用いることとした。すなわち、解析ケースの DC は補強筋が異形鉄筋の場合、AsC、CsC はそれぞれ AFRP ロッド、CFRP ロッドの場合を意味する。また、ハイフン以後の数字は単一載荷時の重錘の載荷速度 $V \text{ (m/sec)}$ である。本研究では減衰定数を決定するために DC に関しては -2, 3, 4 について検討を行い、AsC、CsC に関しては -3 のみについて検討を行うこととした。実験は室蘭工業大学に設置されている重錘落下式衝撃試験機を用い、スパン中央点に限定して載荷することにより行っている。重錘は鋼製で重量が 200 kgf、直径 15 cm で底部の 2 mm が球状になっている。

表 1 補強筋の特性

補強筋名	異形鉄筋 D10	AFRP RA9S	CFRP RC9S
材 質	SD295A	アラミド繊維	カーボン繊維
公称直径 (mm)	9.5	9.0	9.0
公称断面積 (mm ²)	71	63	63
密度 (g/cm ³)	7.85	1.30	1.55
引張耐力 (tonf)	3.2~4.3	9.6	10.0
降伏耐力 (tonf)	2.1以上	—	—
ヤング係数 ($\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)	2.10	0.70	1.20
弾性伸び率 (%)	0.2	2.0	1.2

表 2 解析ケース一覧

ケース	補強筋	載荷速度 (m/sec)
DC-2	D10	2
DC-3		3
DC-4		4
AsC-3	RA9S	3
CsC-3	RC9S	3

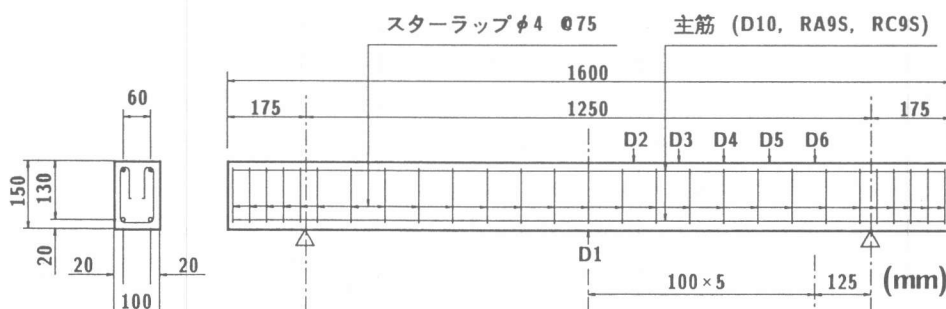


図 1 供試体の形状寸法と配筋及び測定位置

3. 解析仮定

3.1 RC 梁のモデル化

本研究に用いた衝撃解析用有限要素法プログラムは汎用プログラム LS-DYNA3D (以後、簡略化してこれを DYNA3D と呼ぶ) である。DYNA3D は時間積分を中心差分に基づく陽解法で、解析の時間刻みが Courant 条件を満たすようにコード内で決定されている。また要素積分は計算時間を短縮するためにガウスの 1 点積分法を用いている。その他の特徴は文献 [2] あるいは文献 [3] に述べられていることより、ここでは省略することとする。本解析プログラムは、衝突時の速度を衝突体に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 に示すように RC 梁が二軸対称であることより、支点の境界条件を実験状態に合わせてピン支持とし、自由端部を含めた四半分を解析断面とした。また、重錘は全長が 161 cm で、上部が直方体、下部が円柱体である。下部円柱体は直径が 15 cm、長さが 91 cm である。本解析では、これを先端形状が実物と同一で、直径が 15 cm、長さが 10 cm で重量が 200 kgf の円柱体にモデル化し、要素分割を行っている。

図-2にRC梁と重錘の要素分割図を示している。なお、解析ではコンクリートおよび主筋、重錘の要素として三次元固体要素を用いている。また、スターラップ(φ4)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、剛性、断面積、重量が等価な梁要素にモデル化している。全分割数は844である。解析の時間刻みは約1.2μsecである。全解析時間は長期的な変形状態について実験結果と比較検討するため160msecまでとしている。また、変位の測点は図-1に示しているD1～D6の6点である。なお、1ケース当たりの解析時間はNEWS-5000WIで約10時間である。

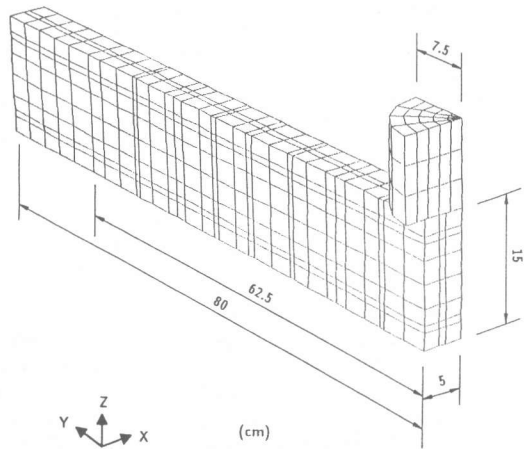


図-2 要素分割図

3.2 物性モデル

本解析ではDYNA3Dにあらかじめ組み込まれている材料モデルを用いることとした。すなわち、コンクリート、AFRP ロッド、CFRP ロッドは引張による破壊を考慮した土質体・クラッシュャブルモデルを用いて評価している。このモデルは、圧力がカットオフ値に達すると要素が破壊したとみなされ引張応力を伝達しないようになっている。また、降伏の判定はVon Misesの条件に従うものとしている。異形鉄筋は、降伏後の硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを用いて評価している。各材料の応力-歪曲線を図-3に示している。コンクリートは材料試験結果に基づき、0.2%歪時の応力を降伏応力とし、0.15%歪に達した状態で降伏するものと仮定してバイリニア型にモデル化した。また、引張側の破壊応力は降伏応力の1/10と仮定した。また、AFRP ロッド、CFRP ロッドは表-1に基づいた弾性係数、弾性伸び率を採用した。なお、圧縮側は弾性伸び限界で降伏するバイリニア型にモデル化している。異形鉄筋もFRPロッドと同様に表-1に基づいた材料定数を採用し、引張側、圧縮側とも降伏後の硬化係数を $H' = 0.7 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ と仮定している。

4. 解析結果と実験値の比較

4.1 減衰定数の決定

減衰定数はDC-2, 3, 4の各点の変位波形に関する解析結果と実験結果を比較する形で決定することとし、その値をAsC-3, CsC-3についても適用することとする。減衰定数は材料ごとに固有の特性値を有しているものと考えられるが、本研究では全要素について等しい減衰定数を有するものと簡略化している。

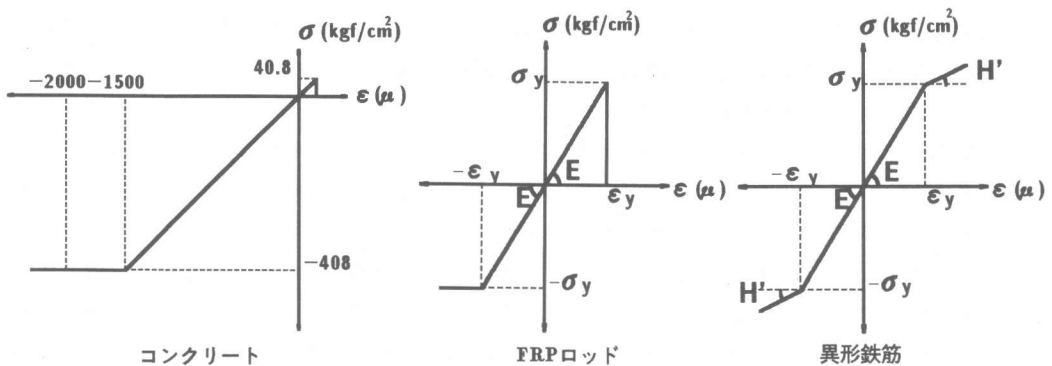


図-3 各材料の応力-歪曲線

図-4に減衰定数 $h=0, 0.05, 0.10, 0.15$ とする場合は図-1に示された各点 (D1~D6) の応答変位波形を実験結果と比較して示している。図中、全ケースの測点 D1 は測定中に治具が破損し測定不能となったため振り切れた状態になっている。図より、DC-2 の場合は、 $h = 0.1 \sim 0.15$ とする解析結果が実験結果と比較的よく対応しているようである。一方、DC-3、-4 では減衰性が小さく、 $h = 0$ の場合の解析結果が実験結果に最も近い応答性状を示している。以上より、本研究では DC-2, 3, 4 に関する平均的な値として $h = 0.05$ を仮定して、以後の解析を行うこととする。

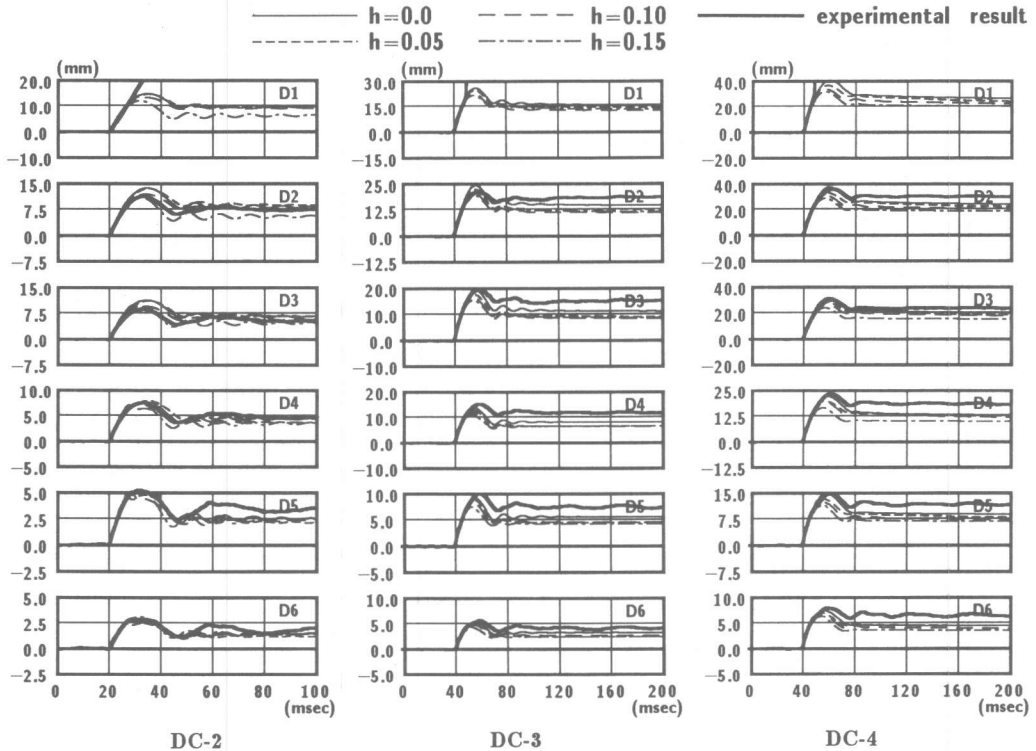


図-4 減衰定数を変化させた場合の各測点の応答変位波形と実測結果の比較

4.2 変位波形

図-5に $h = 0.05$ とした場合の DC-3, AsC-3, CsC-3 に対する各点の応答変位波形を実測結果と比較して示している。また、図-6には重錘衝突時を起点とした時の各経過時間における応答変位分布を実測結果と比較して示している。図-5より、DC-3 の場合は最大応答値に達するまでは解析結果と実験結果がほぼ類似の応答性状を示している。その後の変動性状も両者類似なものとなっているが、残留変形は解析結果が実測結果よりも若干小さく示されているようである。AsC-3 に関して、D1 は測定中に治具が破損して測定不能となったため比較対象から除くこととする。図より、D2~D6 における波形の立上がりから最大応答値到達までの解析結果は、実験結果と良く対応していることがわかる。その後、除荷時に解析結果は実験結果よりも若干大きめの値を示しているが、残留変形状態では両者類似の分布性状を示している。一方、CsC-3 に関して、解析結果はいずれの測点においても最大応答値が実験結果より若干小さな値となっている。しかしながら、除荷時および残留変形状態における両者の差は AsC-3 の場合よりも小さく、解析結果が実験結果に良く対応していることが確認できる。図-6より、各経過時間ごとの変形状態を実測結果と比較すると、解析結果は DC, AsC, CsC 梁とも最大応答変位発生時 ($t = 10, 20$ msec) から残留変形状態に至るまで、大略実測結果と類似の分布性状を示していることがわかる。

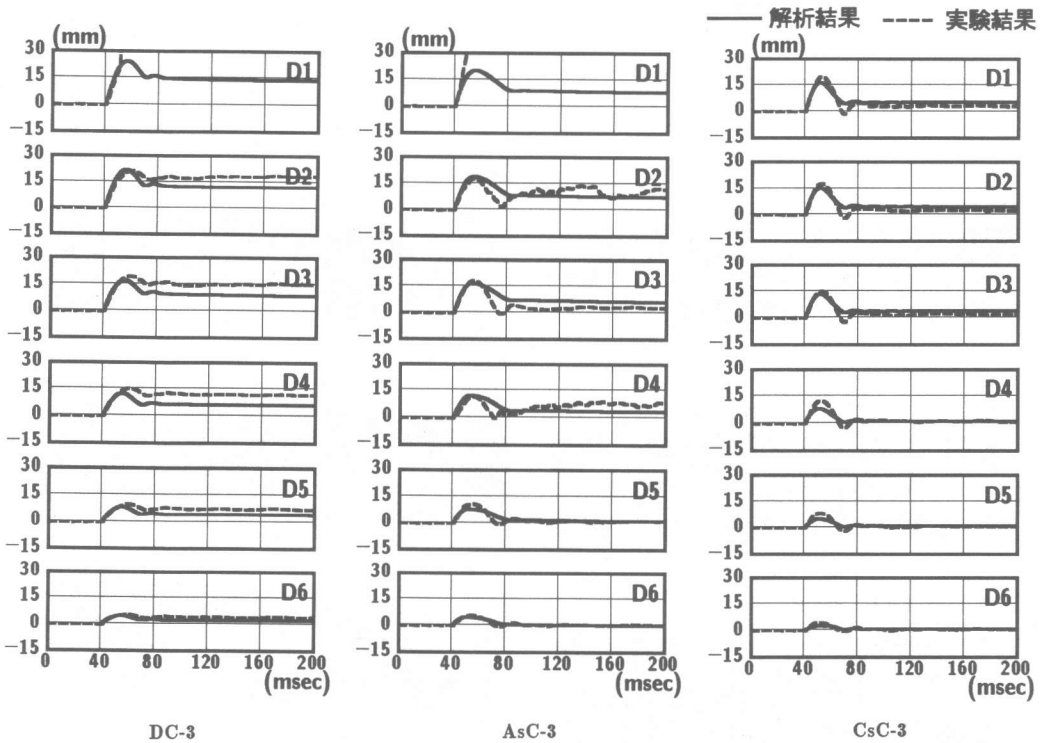


図 - 5 荷重速度 $v = 3 \text{ m/sec}$ 時の各種 RC 梁の応答変位波形

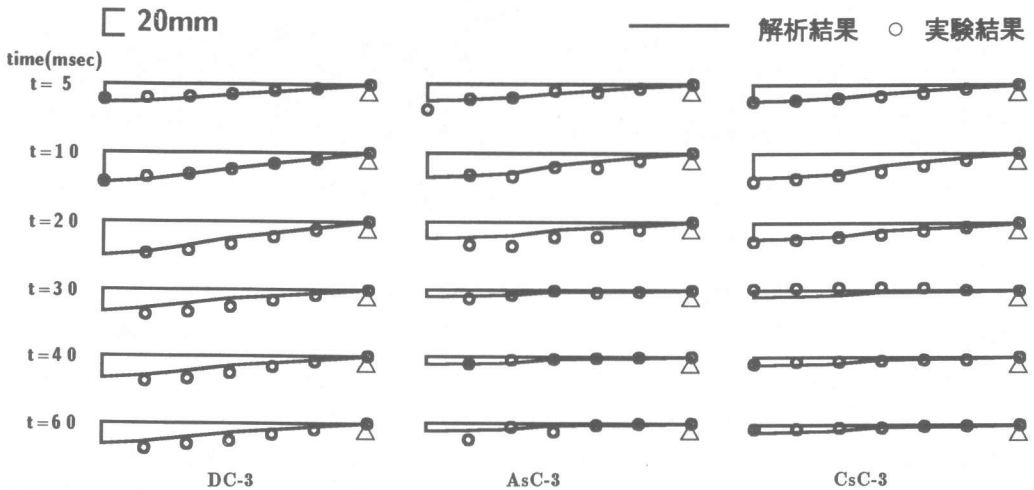


図 - 6 荷重速度 $v = 3 \text{ m/sec}$ 時の各種 RC 梁の応答変位分布の経時変化

4. 3 軸方向応力の伝播状況および変形状態

重錘衝突後の RC 梁の軸方向応力分布の時間的な推移状況や各時間の変形状態に関して、解析結果の一例として図 - 7 に DC-3 の場合について示した。図は補強筋が配置されている断面に関する結果である。図より、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状況は、重錘衝突の初期状態に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。

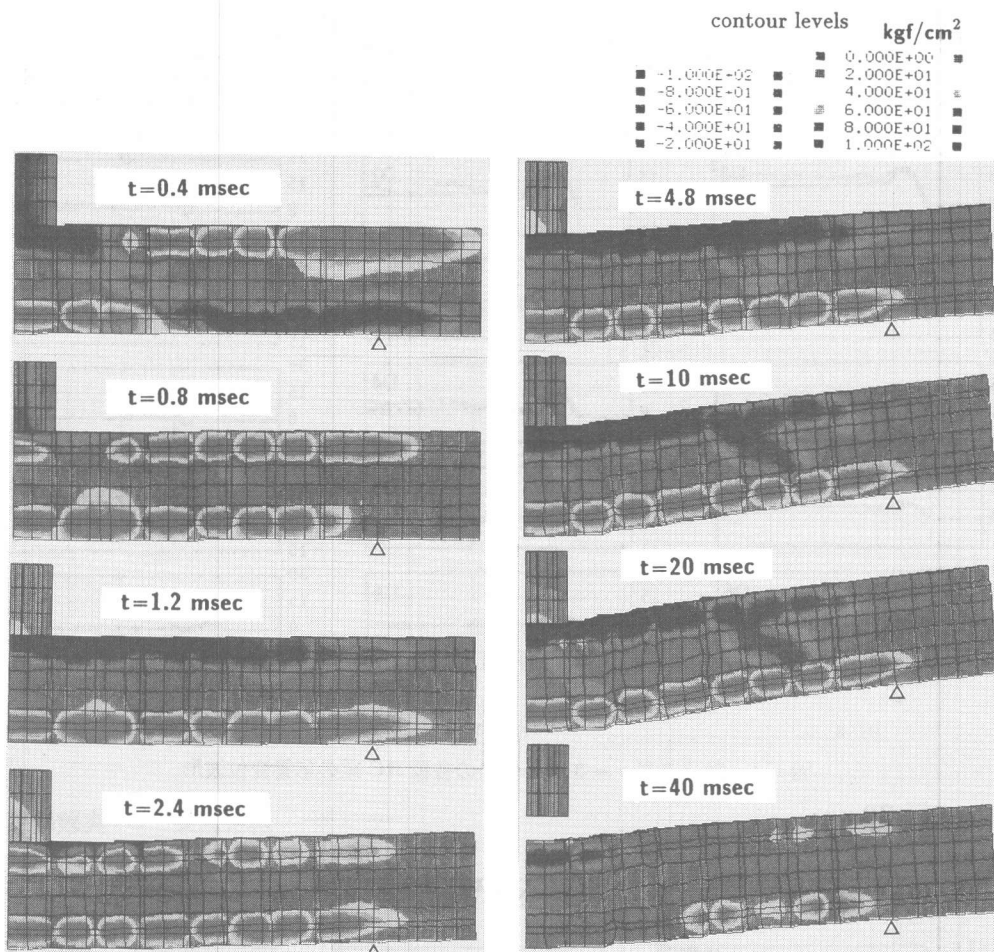


図 - 7 DC-3 の配筋位置断面における軸方向応力分布と変形状態の時間的推移状況

5. まとめ

RC 部材のより簡便な弾塑性衝撃応答解析手法を確立することを目的として、重錘落下による衝撃荷重載荷時の補強筋の異なる各種 RC 梁についての弾塑性衝撃応答解析を試み、実測結果と比較することによって解析手法の妥当性について検討を行った。解析は弾塑性衝撃応答解析用の汎用プログラムである LS-DYNA3D を用いて行った。本研究では補強筋として異形鉄筋、AFRP ロッド、CFRP ロッドを用いた場合の RC 梁について検討を行った。本解析はコンクリートの歪速度効果を無視した簡略仮定の基に行った。検討結果、いずれの補強筋を用いた場合に関しても、解析結果は、大略実測結果と類似な最大応変変位、応変変位性状および残留変形等を算定評価できることが明らかになった。

今後、補強筋の異なる各種 RC 梁に対する適切な減衰常数の決定や、試験体の大きさを変化させた場合についても詳細な検討を行い、より信頼性の高い解析法にしたいと考えている。

参考文献

- 1) 岸 徳光・三上 浩・田村富雄・松岡健一：RC 梁の衝撃挙動におよぼす補強筋特性の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16, No. 2, pp. 1105-1110, 1994.
- 2) Hallquist, J.O. : LS-DYNA3D User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1993.9.
- 3) 構造工学シリーズ 6，構造物の衝撃挙動と設計法，土木学会，1993