

I-64 AFRP ロッドを補強筋とする RC 梁 の弾塑性衝撃応答解析

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光  
 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

土木、建築構造物の耐衝撃性に関する研究は、昭和 50 年代まで原子力発電施設構造物を対象に行われてきた。その後、平成元年福井県越前海岸で発生した岩盤崩壊による落石覆工の破壊を契機に、落石や土石流、あるいは車両や船舶、航空機等の衝撃的外力を受ける構造物や、これらの構造要素である RC、PC 部材の耐衝撃性に関する研究が行われるようになった。しかしながら、構造物の衝撃問題において、解析的には波動伝播の問題や塑性域を考慮した解析が要求されること、実験的には衝撃荷重載荷装置や各センサーからの出力波形を  $\mu\text{sec}$  単位で計測可能な測定器が必要となることより、未だ研究事例が少ないのが現状である。

RC 梁の耐衝撃性に関する研究に限定すると、高橋<sup>1)</sup>は高速載荷試験機を用いた RC 梁や鋼板とコンクリートの合成梁に関する研究を行なっている。また、井元<sup>2)</sup>は RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を行い、重錘落下高さ、主鉄筋量、帯鉄筋量を変化させた場合の RC 梁の応答性状について検討している。また、数値解析も試み、衝撃荷重載荷時の初期の応答に限定して応答解析に及ぼす解析モデルの検討を行っている。一方、著者等<sup>3)</sup>も独自に丸鋼、異形鉄筋、AFRP ロッド、CFRP ロッド等を補強筋とする RC 梁の重錘落下衝撃実験を行っている。その結果、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、未だ RC 梁の耐衝撃設計法を確立するには至っていない。RC 梁等コンクリート構造部材の耐衝撃挙動を解明し、コンクリート構造物の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、実験と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に、補強筋比の異なる RC 梁についての重錘落下による弾塑性応答解析を試み、実験結果と比較することによってその適用性について検討を行った。本研究では、著者等が過去に重錘落下衝撃実験を行った 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なっている。尚、本解析では、より単純化した形で弾塑性衝撃応答解析手法の適用性を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、コンクリートおよび補強筋の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 15 cm、梁高 24 cm、純スパン 200 cm の複筋矩形梁である。本実験では支点部のリバウンドを防止するために、RC 梁の両端面から 25 cm の位置で鋼製の治具を用いて梁の上下を固定している。治具全体は RC 梁の回転を許容し、ピン支持に近い構造となっている。衝撃荷重はピン支持された RC 梁のスパン中央部に重量が 200 kgf、直径 15 cm の重錘を所定の高さから自由落下させることによって載荷している。各 RC 梁に対する重錘落下による載荷は、衝突速度 1 m/sec から 1 m/sec 刻みで増加させる繰り返し落下実験を行い、破壊に至った最終載荷速度を確認の後、その最終載荷

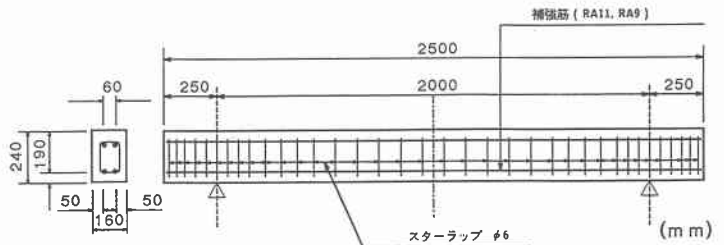


図-1 複筋 RC 型模型の配筋状況

Elasto-Plastic Impact Response Analysis of RC Beams reinforced with AFRP Rods  
 by Norimitu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Koji HASEGAWA

速度で単一に載荷することとした。ここでは、RC 梁の破壊を残留変形量が梁の純スパンの 1/50 (4 cm) 程度に至った状態と定義している。本研究で数値解析の対象とした実験結果は表-1 に示されているような補強筋比および載荷速度の異なる 6 ケースで、そのうち 3 ケースは繰返し落下実験時の 1 m/sec 載荷実験で、他の 3 ケースは最終載荷速度で単一に載荷したものである。解析ケース名は表に示されているように補強筋の呼び径および本数と載荷速度で表している。測定項目は図-2 に示しているように RC 梁上縁の変位である。変位測定には容量 80 mm の非接触式変位計 (レーザ式変位計、周波数特性が DC ~ 700 Hz) を用いている。尚、各 RC 梁に用いている補強筋の材質はアラミド繊維を用いた砂付き AFRP ロッドで表面に 5 号珪砂を接着したものであり、その力学的特性は密度 1.30 g/cm<sup>3</sup>、弾性係数 0.70 × 10<sup>6</sup> kgf/cm<sup>2</sup>、最大弾性伸び率 2.0 %、である。またコンクリートの力学的特性は表-2 に示しているとおりである。コンクリートの呼び強度は全て  $f_{ck} = 255 \text{ kgf/cm}^2$  であるが、2 回に分けて打設したため圧縮強度及び力学的特性が異なっている。

表-1 解析ケースの一覧

解析ケース	補強筋		補強筋比 (%)	載荷速度 (m/sec)
	径	本数		
RA9-2-1	RA9	2	0.42	1
RA11-2-1	RA11	2	0.56	1
D0-2-1	D6	2	0.00	1
RA9-2-6	RA9	2	0.42	6
RA11-2-6	RA11	2	0.56	6
D0-2-3	D6	2	0.00	3

表-2 コンクリートの力学的特性

試験体名	衝撃実験時 材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
D0-2	25	288	2.12 × 10 <sup>5</sup>	0.155
RA9-2,11-2	28	291	2.25 × 10 <sup>5</sup>	0.143

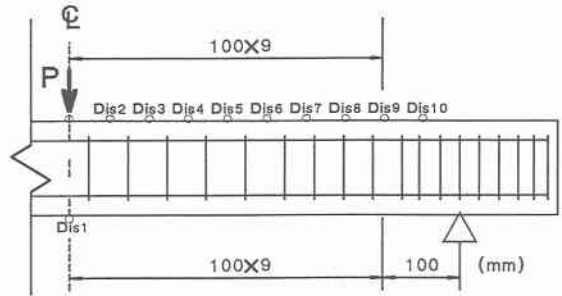


図-2 変位測定位置

### 3. 解析仮定

#### 3.1 RC梁のモデル化

本研究に用いた衝撃応答解析用有限要素法プログラムは、汎用プログラムであるLS-DYNA3D (以後これをDYNA3D と呼ぶこととする) である。DYNA3D は時間積分を中心差分に基づく陽解法で、解析の時間刻みは 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。その他の特徴はプログラムマニュアル<sup>4)</sup>あるいは土木学会編「構造物の衝撃挙動と設計法」<sup>5)</sup>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跳ね上がり防止用の治具を介してピン支持とし、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、下部が直径 15 cm の円柱体である。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 144.2 cm、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-3 に RC 梁と重錘の要素分割図を示している。要素分割はコンクリートおよび補強筋、重錘の要素には三次元固体要素を用いている。また、スターラップ (φ6) は他の要素に比較して小さく数値計算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。全要素数、全節点数は全ての RC 梁に対してそれぞれ 1483, 2322 である。また、上述の条件に基づ

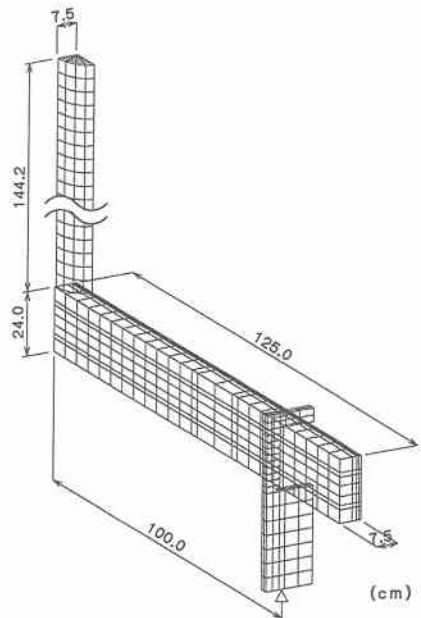


図-3 RC 梁および重錘の要素分割図

づいた数値解析の時間刻みは約 0.40  $\mu\text{sec}$  である。全数値解析時間は実験結果と長期的な変形状態について比較検討するため 160 msec までとしている。なお、1 ケース当たりの解析時間は NEWS - 5000X で約 15 時間である。

### 3. 2 物性モデル

本数値解析では、コンクリートや補強筋に対する弾塑性モデルとして DYNA3D にあらかじめ組み込まれているモデルを用いることとした。すなわち、コンクリート要素に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 の条件に従うこととしている。また、補強筋の

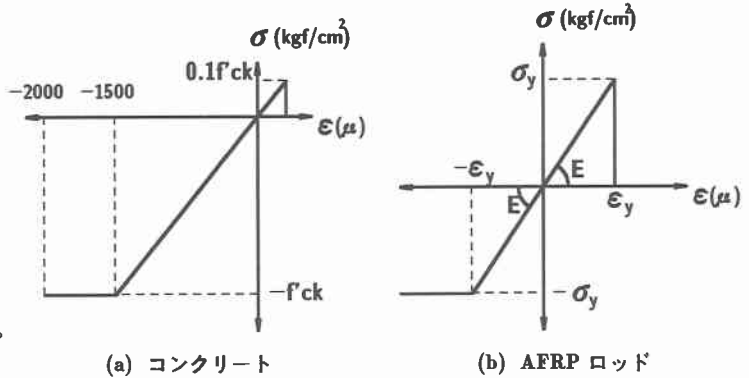


図-4 数値解析に用いた応力-歪曲線

要素についても、コンクリート要素と同様のモデルを用いている。数値解析に用いたコンクリートおよび補強筋の応力-歪曲線を図-4 に示している。コンクリートは一軸圧縮試験結果に基づき、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、引張破壊応力は降伏応力の 1/10 と仮定した。また、補強筋についても同様に土質体・クラッシュャブルモデルを用い、材料定数は弾性係数  $E = 0.7 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、降伏応力、引張破壊応力ともに  $14000 \text{ kgf/cm}^2$  を用いることとした。

## 4. 数値解析結果と実験値との比較

### 4. 1 減衰定数の決定

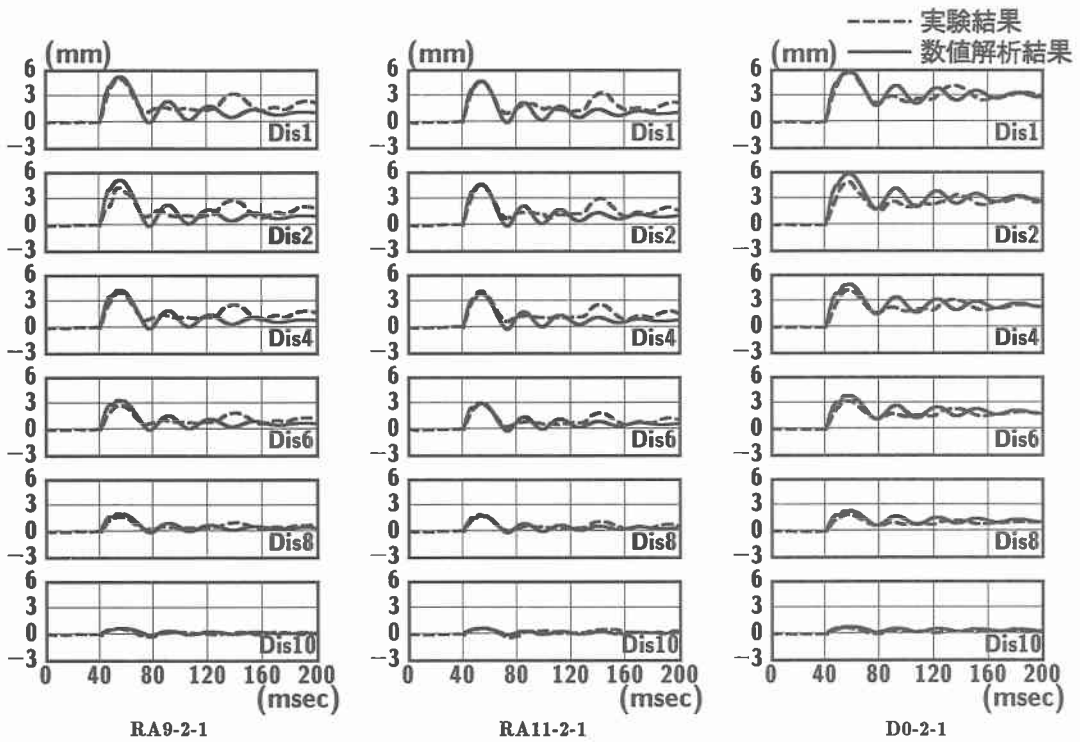
減衰定数は材料ごとに固有の特性値を有しているものと考えられるが、本解析では、全要素について等しい減衰定数を有するものと簡略化している。過去の研究では減衰定数  $h=0.0 \sim 0.10$  と変化させた場合の数値解析を行い、実験結果と比較することによって適切な減衰定数  $h$  を決定してきた。その結果 1) 減衰定数の大きさによって大きな差があまり生じない 2) 減衰定数  $h=0.05$  とした場合の解析結果が実験結果と最もよく対応する 等が明らかとなった。従って、本数値解析では全ての解析ケースの減衰定数を  $h=0.05$  として解析するものとする。

### 4. 2 重錘落下速度 1 m/sec 載荷時の応答変位波形

図-5 は補強筋比の異なる RC 梁各点の繰り返し載荷で重錘落下速度が 1 m/sec 載荷時の変位応答波形について、実験結果と数値解析結果を比較して示している。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。図より、波動の立ち上がりから最大応答値に達するまでは、全てのケースにおいて数値解析結果は実験結果と一致した波動性状を示している。また、除荷後の残留変位については振動性状が異なっているようであるが残留変位値はよく対応しているものと考えられる。図-6 には各 RC 梁の衝撃荷重載荷位置の最大応答変位と残留変位に関して数値解析結果と実験結果を比較して示している。図中 45° の勾配を持つ線は数値解析結果と実験結果が一致していることを意味しており、この線より下の領域は実験値が大きいことを、上の領域は数値解析結果が大きいことを示している。(a) 図は、最大応答変位に関する結果であるが RA9-2-1, RA11-2-1, D0-2-1 全て数値解析結果と実験結果の誤差は 0.22 mm 以下の値でよく一致している。残留変位に関しては (b) 図より、D0-2-1 は 0.16 mm の誤差でよく一致している。AFRP ロッドで補強した梁 (RA9, RA11) の場合には数値解析結果が実験結果より小さな値となっている。しかしながらその差は 0.5 mm 程度と小さい。

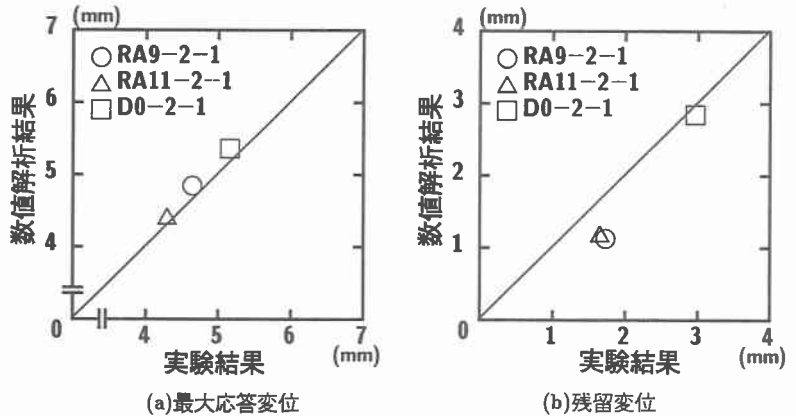
### 4. 3 重錘落下速度が破壊に至る最終載荷速度時の応答変位波形

図-7 は補強筋比の異なる RC 梁各点の重錘落下速度が破壊に至る最終載荷速度時の変位応答波形について、実験結果と数値解析結果を比較して示している。図より、実験結果は RA9-2-6, RA11-2-6, D0-2-3 と波動の立ち上がりか



図一五 応答変位波形に関する数値解析結果と実験結果との比較

ら最大応答値に達し、その後除荷され変位が残留している。AFRPロッドで補強された梁は最大応答値に達した後ある程度復元しているが無補強に近い D0-2-3 の場合には復元の程度が小さく残留変位が大きいがわかる。数値解析結果は実験結果と類似した波動性状を示しており、除荷後の振動性状も含め実験結果とよく対応していることがわかる。図一八には各 RC 梁の衝撃荷重載荷位置の最大応答変位と残留変位に関して数値解析結果と実験結果を比較して示している。尚、RA9-2-6 については実験結果が振り切れているため比較の対象としないものとした。(a)図より、RA11-2-6 の数値解析結果の最大応答変位は 1.93 mm、D0-2-3 では 5.80 mm 程度実験結果よりも大きい。残留変位に関しては (b)図より RA11-2-6、D0-2-1 両者ともに 6.0 mm 程度の誤差がある。載荷速度 1 m/sec 載荷時に比べ誤差値は大きいようであるが、梁の塑性域が広がっていること、最大応答変位が 10 倍程度大きくなっていること等を考慮すると解析値は実験値に比較的よく対応しているものと考えられる。



図一六 最大応答変位および残留変位に関する数値解析結果と実験結果の比較

図一八には各 RC 梁の衝撃荷重載荷位置の最大応答変位と残留変位に関して数値解析結果と実験結果を比較して示している。尚、RA9-2-6 については実験結果が振り切れているため比較の対象としないものとした。(a)図より、RA11-2-6 の数値解析結果の最大応答変位は 1.93 mm、D0-2-3 では 5.80 mm 程度実験結果よりも大きい。残留変位に関しては (b)図より RA11-2-6、D0-2-1 両者ともに 6.0 mm 程度の誤差がある。載荷速度 1 m/sec 載荷時に比べ誤差値は大きいようであるが、梁の塑性域が広がっていること、最大応答変位が 10 倍程度大きくなっていること等を考慮すると解析値は実験値に比較的よく対応しているものと考えられる。

#### 4.4 軸方向応力および変形の状況

図一九は各 RC 梁の各最大応答変位発生時近傍の (1 m/sec 載荷時は 10 msec、最終載荷速度載荷時は 20 msec) 補強筋配置位置断面軸方向応力分布と変形状態を示している。尚、図中青色の部分が圧縮応力を表し、赤色の部分が引張応

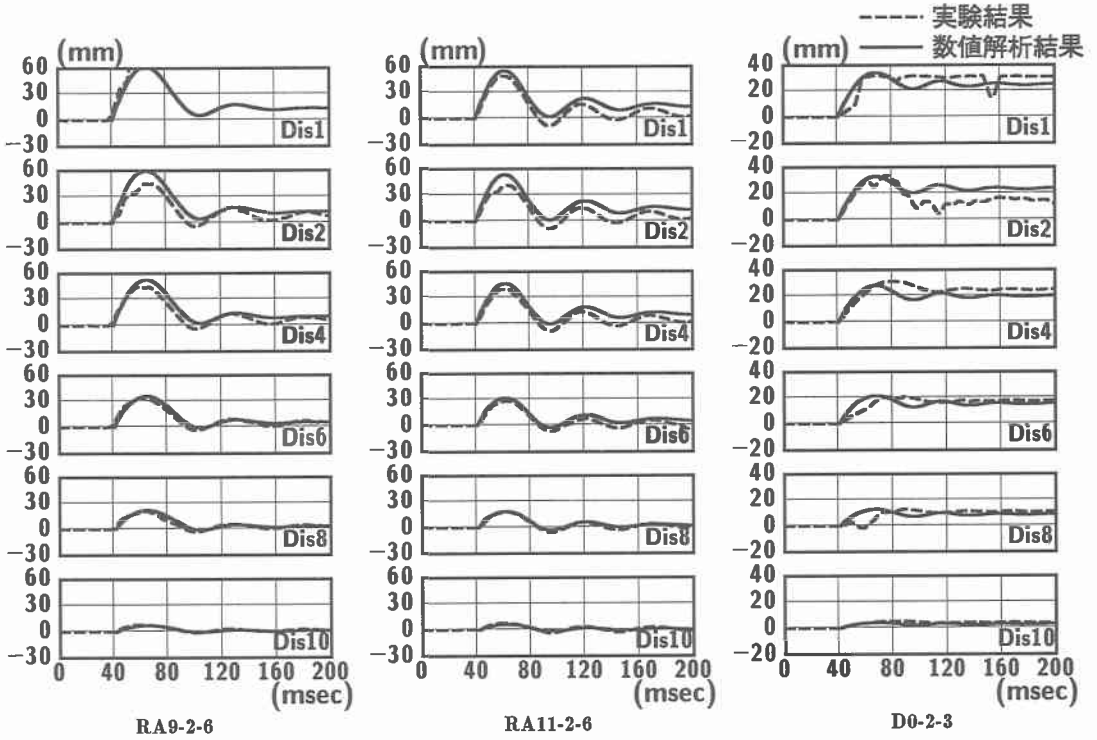
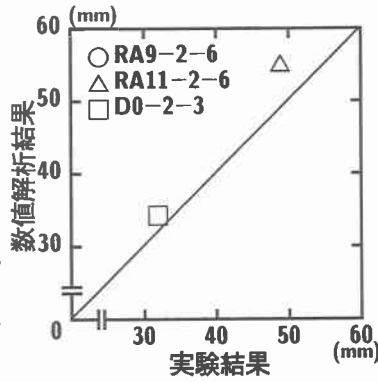
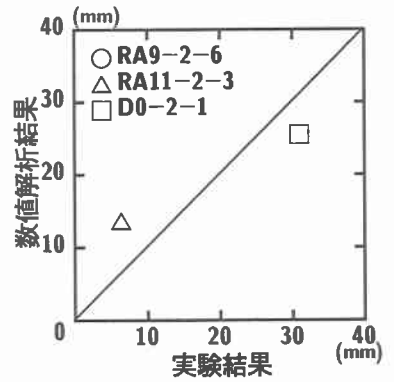


図-7 応答変位波形に関する数値解析結果と実験結果との比較

力を表している。変形状態は数値解析結果を実寸法に対して5倍に拡大して示している。また、図-10に参考のためRA9-2-6, RA11-2-6, D0-2-3の3ケースの実験終了時のひび割れ図を示している。図より、いずれの場合も載荷速度の大きさによって変形状態、軸方向応力分布状況とも大きく異なっていることがわかる。本数値解析によってひび割れ箇所を特定することは困難であるが、水平方向および斜めひび割れは圧縮



(a)最大応答変位



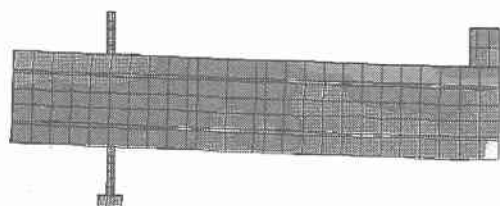
(b)残留変位

図-8 最大応答変位および残留変位に関する数値解析結果と実験結果の比較

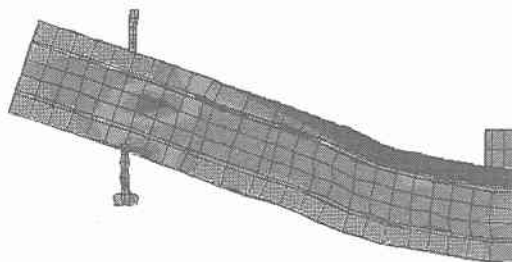
割れは引張応力の大きい領域に発生しているものと考えられることより、数値解析結果と実験結果のひび割れ図を比較すると、RA9-2-6, RA11-2-6の上縁部や斜めひび割れ部の領域は数値解析結果からの軸方向応力分布状態からも推察することができる。また、D0-2-3の場合も上縁載荷点近傍部や下縁部の曲げひび割れ、および支持点近傍部のひび割れの傾向が数値解析結果より推察することができる。

## 5 まとめ

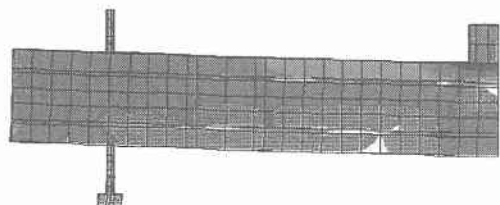
RC部材のより簡便な弾塑性衝撃応答解析を確立することを目的として、重錘落下による衝撃荷重載荷時の補強筋をAFRPロッドとした場合の補強筋比および載荷速度の異なる6ケースの弾塑性衝撃応答解析を試み、実験結果と比較す



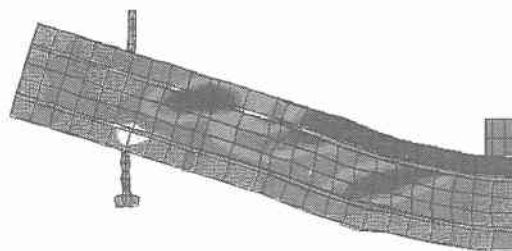
RA9-2-1 ( t= 10 msec )



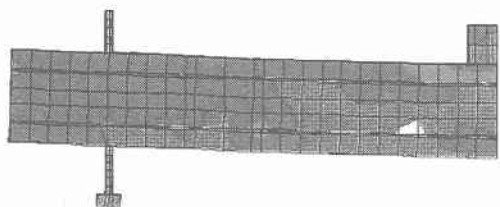
RA9-2-6 ( t= 20 msec )



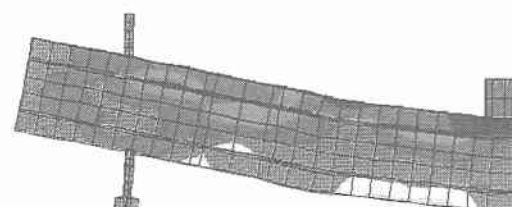
RA11-2-1 ( t= 10 msec )



RA11-2-6 ( t= 20 msec )



D0-2-1 ( t= 10 msec )



D0-2-3 ( t= 20 msec )

図-9 補強筋配置位置断面軸方向応力分布と変形状態

ることによって解析手法の適用性について検討を行った。本研究では、特に RC 梁の各点の変位波形に着目して検討を行った。解析は弾塑性衝撃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 6 ケースの解析結果より、本解析手法は大略実験結果の変位挙動、最大応答変位および残留変位等を算定評価できることが明らかになった。今後、断面寸法を変化させた場合についても検討を行い、より信頼性の高い解析手法にしたいと考えている。

参考文献

- 1) 高橋芳彦：「高速載荷試験による鉄筋コンクリートはり、および鋼柱・コンクリート合成はりの耐衝撃性評価に関する基礎的研究」九州大学工学部、学位論文、1990.12.
- 2) 井元勝慶：「原子力施設鉄筋コンクリート構造物の非線形挙動と衝撃挙動に関する研究」名古屋大学工学部、学位論文、1994.12.
- 3) 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.
- 4) Hallquist, J.O. : LS-DYNA3D User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1993.9.
- 5) 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

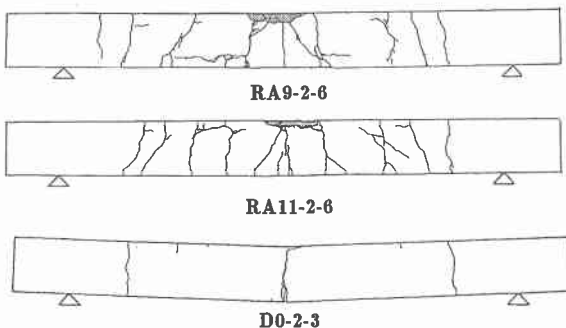


図-10 実験終了時のひび割れ図