

I-15 重錘落下衝撃を受ける RC 梁の三次元弾塑性応答解析

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 正員 小 室 雅 人
 室蘭工業大学 学生員 山 内 昌 昭

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 μsec 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。

著者等はこれまで丸鋼、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い、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を明らかにしている。¹⁾ また、これらの実験結果をある程度推測可能にするために簡易な弾塑性衝撃応答解析手法の適用性について検討を行ってきた。その結果、大略実験結果の変位挙動、最大応答変位及び残留変位等を算定評価できることが明らかになった。²⁾ しかしながら、このような RC 梁の耐衝撃挙動に関する数値解析の研究は未だ研究例も少なく出発点にたったばかりと言っても過言ではない。そこで、本論文では、より信頼性の高い解析手法を確立することを目的として、断面寸法の異なる 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解析手法の妥当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。なお、本解析では RC 梁の耐衝撃挙動解析へのより簡易な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、塑性化によるエネルギー吸収や質量に比例する減衰効果は考慮しているが、コンクリートあるいは鉄筋の歪速度効果等を鉄筋の弾性線形硬化モデルの硬化係数の中に含める形で評価している。

2. 実験概要

今回解析の対象とした RC 梁は、図-1に示すような断面寸法の異なる 3 タイプの複鉄筋矩形梁である。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

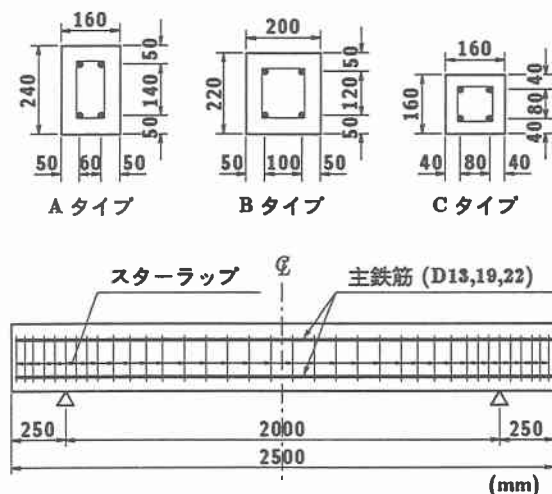


図-1 複鉄筋 RC 梁模型の配筋状況

Three-Dimensional Elasto-Plastic Impact Analysis of RC Beams under Weight Falling
 by Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Masato KOMURO, Masa-aki YAMAUCHI

確認の後、その最終載荷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試験体は表-1 に示されているような断面寸法および補強筋比の異なる 6 ケースである。表中の解析ケース名は断面タイプおよび補強筋の呼び径を示している。なお実験時のコンクリートの力学的特性は表-2 で示している。測定項目は図-2 に示しているように、RC 梁上縁の変位と上下端鉄筋歪である。実験時におけ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。

3. 解析仮定

3.1. RC 梁のモデル化

本解析で用いた衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA3D³⁾ (以後 DYNA3D と呼ぶこととする) 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。図-3 には、解析ケース A-19 における梁と重錘の要素分割状況を示している。本解析では、コンクリート、補強筋および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 ($\phi 6$) は他の要素と比較して小さく、数値計算時間に大きな影響を与えることより、剛性、断面積および重量が等価な梁要素にモデル化している。全要素数、全節点数は各ケースにより多少異なるが、解析ケース A-19 で 4272, 5390 である。また、上述の条件に基づいた数値解析の時間刻みは約 0.70 μsec 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 HP9000 /C160 で約 3 時間である。

3.2. 物性モデル

本数値解析では、コンクリートや鉄筋に対する弾塑性モデルとして DYNA3D にあらかじめ組み

表-1 解析ケースの一覧

解析ケース	断面タイプ	補強筋		補強筋比 (%)	載荷速度 (m/sec)
		径	本数		
A-19	A	D19	2	1.88	6
A-22	A	D22	2	2.55	6
B-13	B	D13	2	0.75	5
B-19	B	D19	2	1.69	6
C-13	C	D13	2	1.32	4
C-19	C	D19	2	2.98	5

表-2 コンクリートの力学的特性

試験体	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
A-19 B-19 C-19	86	284	1.97×10^5	0.19
A-22 B-13 C-13	85	252	1.20×10^5	0.20

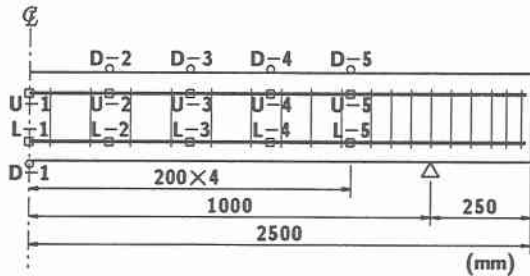


図-2 変位および歪測定位置

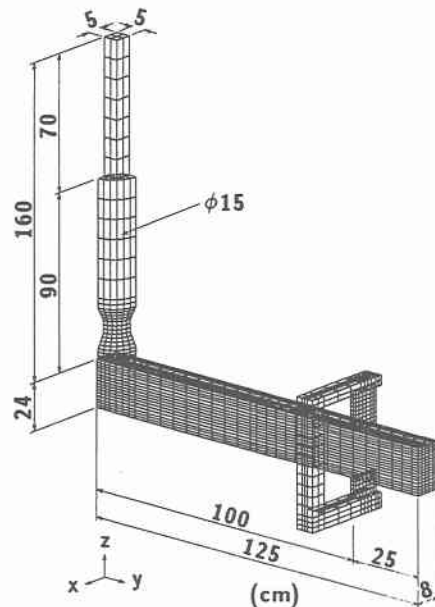


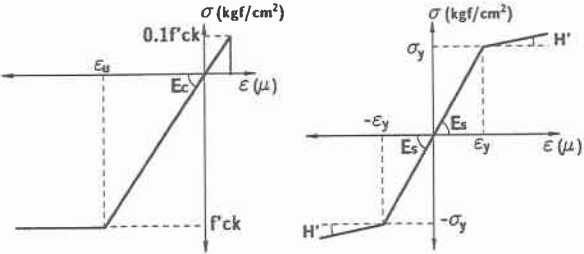
図-3 RC 梁および重錘の要素分割図

込まれているモデルを用いることとした。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が伝達されない。また、降伏の判定は Von Mises の条件に従うこととしている。異形鉄筋の要素は、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。数値解析に用いたコンクリートおよび異形鉄筋の応力-歪曲線を図-4 に示している。コンクリートは材料試験結果を基に、バイリニア型にモデル化した。また、引張側のカットオフ値は破壊応力の $1/10$ と仮定した。異形鉄筋は公称の材料定数（弾性係数 $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、降伏応力が SD295A で 3000 kgf/cm^2 、SD345 で 3500 kgf/cm^2 とし、ポアソン比を $\nu_s = 0.3$ とする）を用いることとした。

4. 数値解析結果と実験結果の比較

4.1. 鉄筋要素の硬化係数 H' の決定

本研究では、より簡易な RC 梁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いることより、コンクリートあるいは鉄筋の歪速度効果による強度の上昇を無視することとした。しかしながら、RC 梁が著しい損傷を受け大きなひびわれの発生とともに鉄筋が塑性域に達するような場合には、これら歪速度効果が無視できないものと考えられる。本研究ではこのような状態に対処するために、特に鉄筋要素に弾性線



(a) コンクリート (b) 鉄筋
図-4 数値解析に用いた応力歪曲線

形硬化モデルを適用し、実験結果との比較によって最適な係数を決定することにより、これらの効果を考慮することとした。従って、ここで決定される硬化係数 H' には鉄筋の材料特性の他、歪速度効果等、不確定な要素が含まれたものとなっている。ここでは、特に A-19 の試験体に関して検討を行うことによって、硬化係数 H' を決定することとした。設定した硬化係数 H' は $H' = 0$ 、 $E_s/12$ および $E_s/6$ の 3 ケースである。なお、減衰定数に関しては後項で詳細に検討するが、ここでは全要素に対して $h = 0.05$ とした。図-5 に各点の変位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。

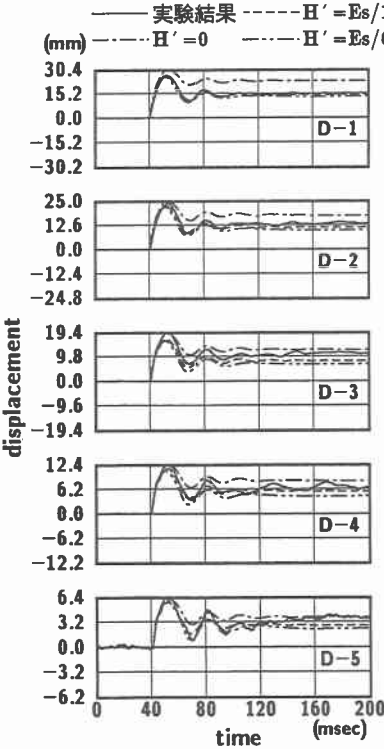


図-5 各硬化係数 H' の数値解析結果と実験結果の比較 (A-19, $h=0.05$)

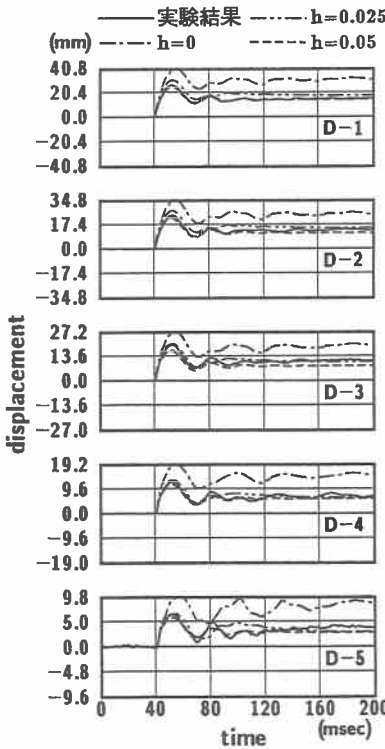
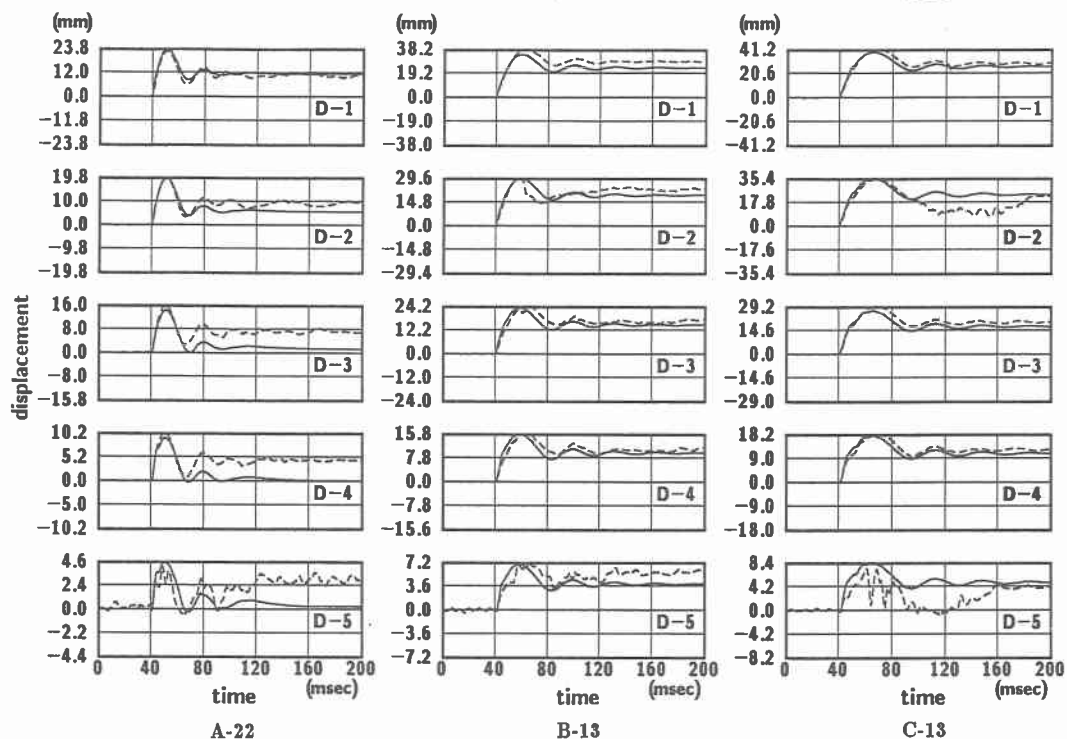
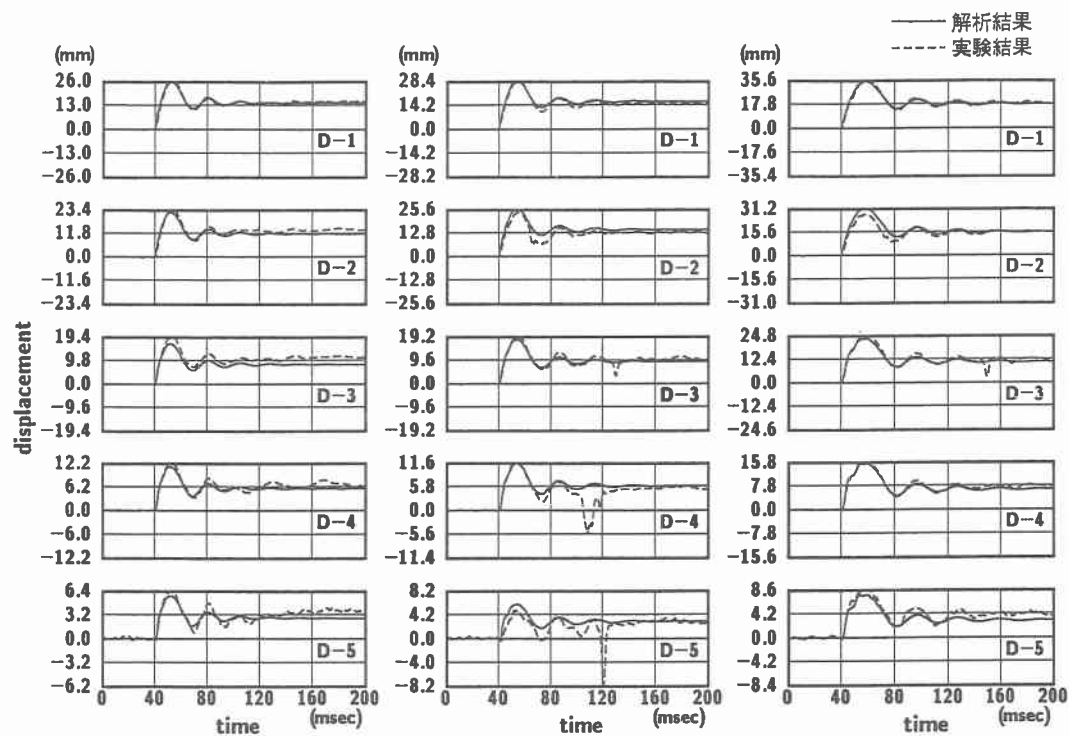


図-6 各減衰定数 h の数値解析結果と実験結果の比較 (A-19, $H' = E_s/12$)



図一七 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

図より、 $H' = 0$ の場合は載荷点で実験結果より大きな変位波形を示している。また、 $H' = E_s/6$ は $H' = E_s/12$ とほぼ同様な変位波形を示しているが、実験結果を若干過小評価することになる。したがって、 $H' = E_s/12$ の場合が最も実験結果と対応していることがわかる。これより、今後の数値解析は、全て $H' = E_s/12$ とすることとする。

4.2. 減衰定数の決定

本研究では、前述のように繰り返し荷重載荷によって RC 梁が破壊に至ったときの載荷速度を用いた単一載荷実験に対する数値解析を行っている。従って、全ての RC 梁においてコンクリート要素、鉄筋要素とも弾塑性状態になり、その塑性歪エネルギー成分が大きな減衰作用を示すものと考えられる。しかしながら、質点の振動にともなう質量に依存した減衰効果も含まれているものと考えられる。ここでは、その効果を考慮するため、最低次の弾性固有振動周期に対する減衰定数（本文では以後、この減衰定数を単に減衰定数 h と呼ぶこととする）を設定して減衰係数を決定し解析を行った。ここでは減衰定数 h を $h = 0, 0.025$ および 0.05 と変化させて数値解析を行い、実験結果と比較することによって適切な減衰定数 h を決定することとした。数値解析に用いた試験体は A-19 である。図-6 に減衰定数 h を変化させた場合の各点の変位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。図より、減衰定数 h の小さい順に変位は大きい応答性状を示している。実験値は、減衰定数 $h = 0.05$ 、もしくは 0.025 と 0.05 の間の応答を示していることより、減衰定数 $h = 0.05$ の場合が実験値と最もよく対応していることがわかる。本数値解析では以後の解析において、減衰定数を $h = 0.05$ とすることとする。

4.3. 応答変位波形分布

図-7 は前項で決定した鉄筋の硬化係数 $H' = E_s/12$ 、減衰定数 $h = 0.05$ を用い、本研究で対象とした全ケースの 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。図より、最大応答変位および残留変位に関する数値解析結果は実験結果より過小評価している箇所もあるが、大略数値解析結果は実験結果とよく対応し、再現しているものと考えられる。

図-8 には各 RC 梁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いる。従って、この線より下の領域は実験値が大きいことを、上の領域は解析結果が大きいことを示している。図より B-13 および C-13 は最大応答変位ならびに残留変位の数値解析結果が実験結果より小さな値を示している。これは両者の応答値が大きいことより、塑性域のモデル化による影響と考えられる。一方、その他のケースについては、両者はほぼ一致していることより、解析結果は断面寸法の異なる RC 梁に対しても十分評価することができる。

4.4. ひびわれ分布と最大主応力分布の関係

図-9 には実験終了時の RC 梁側面に発生したひびわれ図と、最大応答時（ほぼ 5 msec 経過時）の最大主応力分布図を比較して示している。なお、最大主応力分布図は解析された半スパンの結果をスパン中心軸に関して左右に展開している。載荷点および支点近傍部のひびわれは衝撃初期に発生すると考えられることより、最大応答時の最大主応力分布とは必ずしも対応しないものと考えられる。しかしながら、鉄筋比が小さく曲

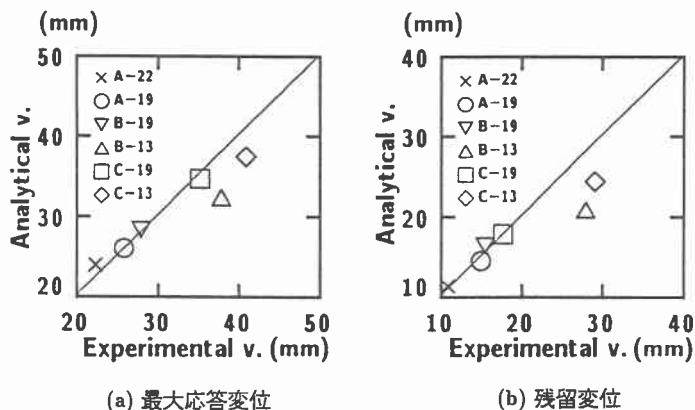
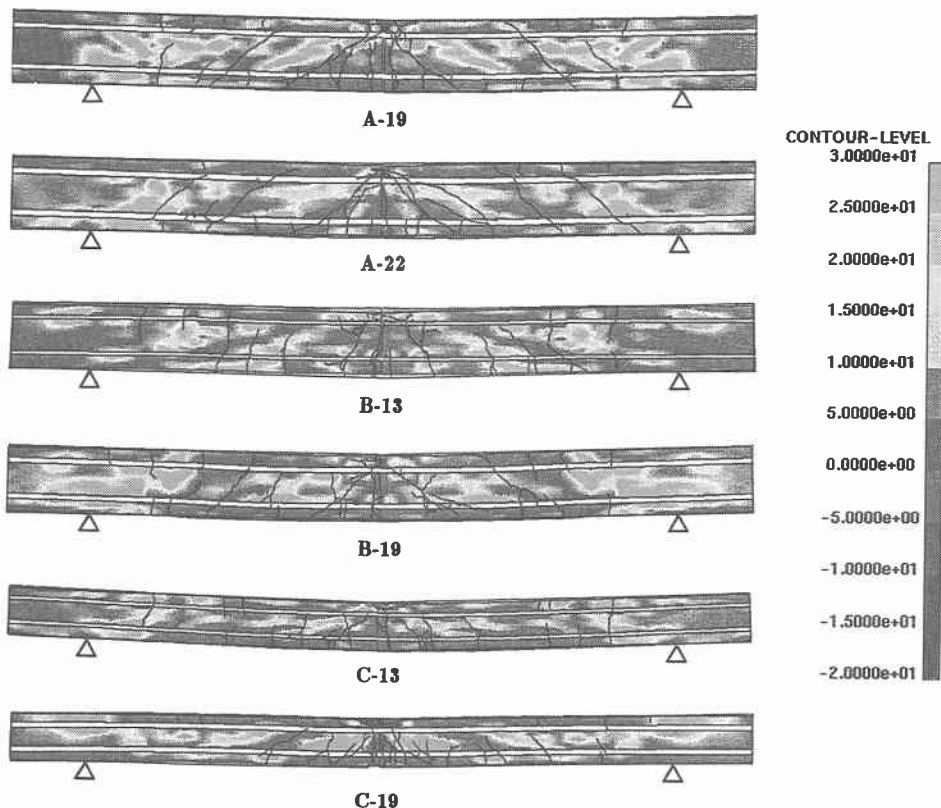


図-8 最大応答変位および残留変位の比較



図－9 実験終了時のひびわれ図と最大応答時の主応力の等色線

げひびわれが卓越する梁（B-13）の場合は引張応力が点在している。また、鉄筋比が大きくせん断破壊が先行するような梁（A-19, A-22）の場合は、載荷点および支点より $l/4$ 点近傍部には斜めひびわれの傾向を示す引張応力分布が示されている。

これより、本数値解析によってひびわれ箇所を特定することは困難であるが、RC 梁の変形状態やひびわれの性状等、コンクリートの塑性化の定性的な特性を推定することは十分可能であるものと考えられる。

5. まとめ

RC 梁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断面寸法の異なる 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。

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) 岸 徳光・三上 浩・長谷川康司：AFRP ロッドを補強筋とする RC 梁の弾塑性衝撃応答解析，土木学会北海道支部論文報告集，第 52 号 (A), pp. 306-311, 1996.
- 3) Hallquist, J.O. : LS-DYNA3D User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1993.9.