

弾塑性衝撃応答解析法の RC 梁への適用性

APPLICABILITY OF ELASTO-PLASTIC IMPACT RESPONSE ANALYSIS ON RC BEAMS

岸 徳光* 三上 浩** 小室雅人*** 松岡 健一****

Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Masato KOMURO and Ken-ichi MATSUOKA

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

** 工博 三井建設(株)技術研究所 主任研究員 (〒270-01 千葉県流山市駒木 518-1)

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

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

In order to establish a rational anti-impact design procedure of RC structures, it is recommended to conduct not only the experimental study but also the analytical one. However, no simple and reliable analytical method has been established yet. In this paper, in order to apply a nonlinear impact analysis program using a simple constitutive law, an applicability of the elasto-plastic impact analysis method on RC beams is discussed. The analytical program used here is a general purpose program for nonlinear impact analysis of structures named as LS-DYNA3D which has been originally developed at Lorence Livermore National Laboratory.

Numerical results obtained by the program are confirmed by comparing them with the displacement waves for 6 types of RC beams obtained from experimental study. It is made clear that the proposed simple method can estimate the maximum displacement, residual displacement and wave configurations of displacement for all types of RC beams considered here.

Key Words: impact problem, elasto-plastic impact analysis, RC beams

1. はじめに

土木、建築構造物の耐衝撃性に関する研究は、これ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。

RC 梁の耐衝撃性に関する研究に限定すると、高橋¹⁾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っている。また、井元²⁾は RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を行い、重錘落下高さ、主鉄筋量および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³⁾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。

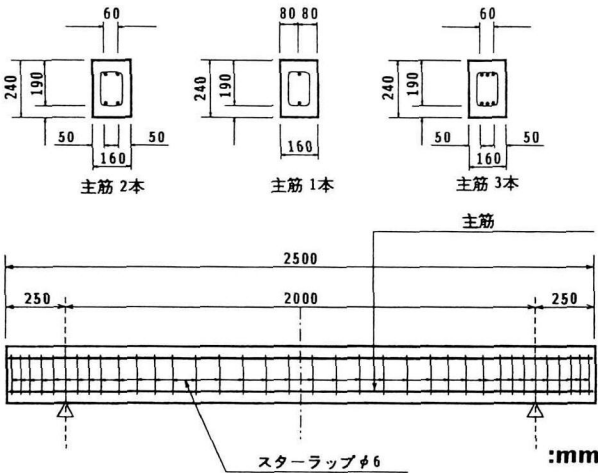
RC 梁等コンクリート構造部材の耐衝撃挙動を解明し、コンクリート構造物の耐衝撃設計法を確立するためには、実験研究はもとより、より単純な構成則を用いて弾塑性衝撃応答解析手法を確立し、実験と数値解析の両面から効率的に研究を推進することが得策であるものと考えられる。

このような観点から、本論文は RC 部材のより単純な構成則を用いて弾塑性衝撃応答解析手法を確立することを目的として、鉄筋比の異なる RC 梁についての重錘落下による弾塑性応答解析を試み、測定信頼度が最も高いと考えられる変位波形に関して、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。著者等は先に鉄筋比の異なる 6 種類の RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を行い、低速度衝撃を受ける RC 梁の耐衝撃性について検討を行っている⁴⁾。本研究ではこれらの RC 梁を対象として検討を行うこととした。

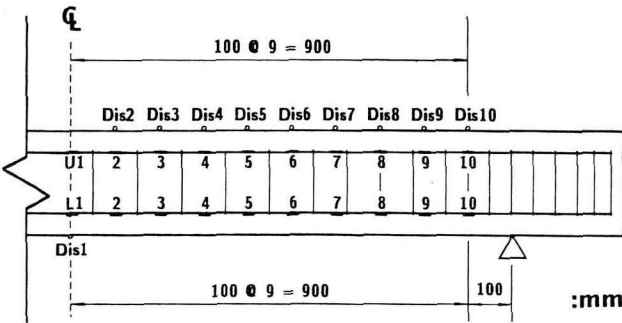
本解析では、より単純な構成則を用いた場合の RC 梁の衝撃挙動解析への弾塑性衝撃応答解析手法の適用性を検討することを前提としているため、塑性化によるエネルギー吸収や質量に比例する減衰効果は考慮しているが、コンクリートおよび鉄筋の歪速度効果等は無視している。また、鉄筋には等方便化を考慮した等方弾塑性体モデルを採用した。その硬化係数は、応答解析結果と実験結果を比較することによって決定している。

表－1 載荷試験体一覧

試験体名	主鉄筋		鉄筋比 (%)	載荷速度 (m/sec)
	径	本数		
D10-1	D10	1	0.23	3
D10-2	D10	2	0.47	4
D10-3	D10	3	0.69	4
D13-2	D13	2	0.83	4
D16-2	D16	2	1.31	5
D19-2	D19	2	1.88	6



図－1 複鉄筋 RC 梁模型の配筋状況



図－2 歪および変位測定位置

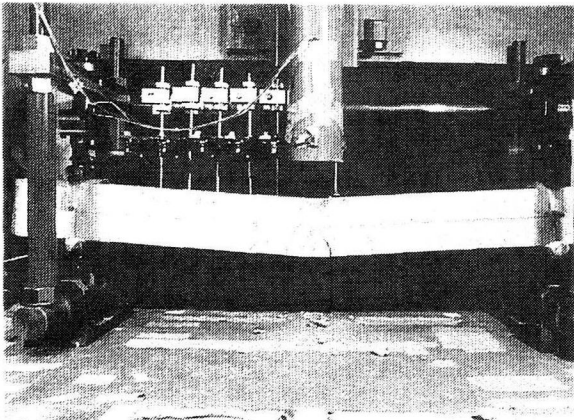
2. 実験の概要

本研究で対象としたRC梁は図－1に示すような幅16cm、梁高24cmおよび純スパン200cmの複鉄筋矩形梁である。実験に用いた試験体は表－1に示されているような鉄筋比の異なる6体である。試験体名は表に示されているように異形鉄筋の呼び径および本数（－以下）で表している。

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25cm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200kgf、直径15cm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

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 ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
D10-1,2,3	29～32	251	2.33×10 ⁵	0.207
D13,16,19	27～29	378	2.71×10 ⁵	0.190



写真－1 RC梁および変位計の設置状況

荷している。各RC梁に対する重錘落下による載荷は、別に表－1と同一の試験体を作製して載荷速度1m/secから1m/secきざ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、その最終載荷速度で単一に載荷することとした⁴⁾。表－1の右端に載荷速度を示している。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(4cm)程度に至った状態と定義している。

測定項目は図－2に示しているように上下端鉄筋歪および同一点のRC梁上縁の変位である。変位測定には容量80mmの非接触式変位計（レーザ式変位計、周波数特性がDC～700Hz）を用いている。なお、各RC梁に用いている異形鉄筋の材質はD10、13、16がSD295A、D19がSD345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力学的特性が異なっている。写真－1には実験時のRC梁および変位計の設置状況を示している。

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ユーザ

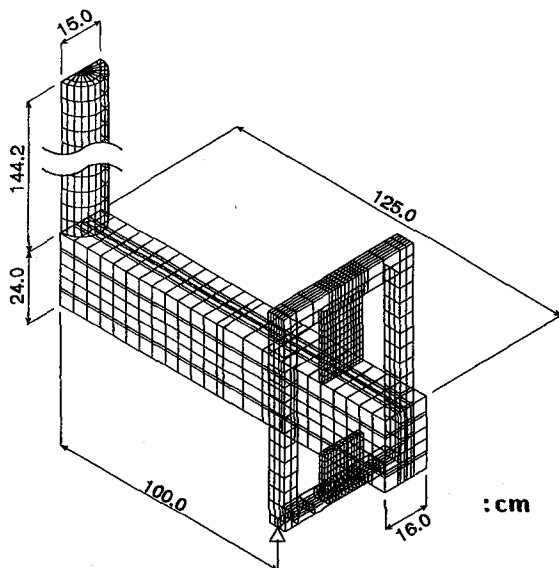


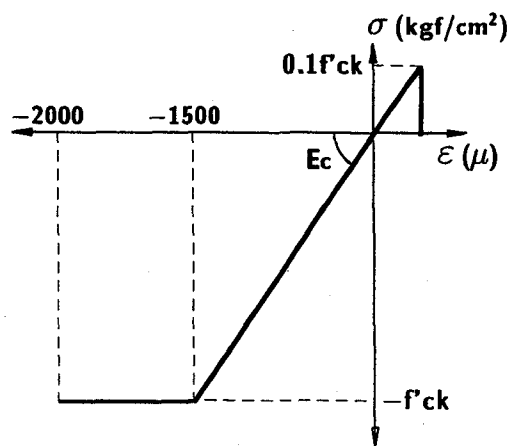
図-3 RC梁および重錘の要素分割例

ーズマニュアル⁵⁾あるいは土木学会編「構造物の衝撃挙動と設計法」⁶⁾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。図-1に示すように解析対象のRC梁は二軸対称である。しかしながら、主鉄筋が1本および3本の場合には幅方向中心部の要素分割が細くなることより、ここでは自由端部も含めた半スパン断面を解析対象とした。支点の境界条件は、材料の構成則以外の影響をできるだけ排除するため、実験時の境界条件に合わせるため跳ね上がり防止用の治具を介してピン支持としている。また、重錘は全長が161cmで、上部が直方体、下部が直径15cm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15cm、長さが144.2cmおよび重量が200kgfの円柱体にモデル化した。

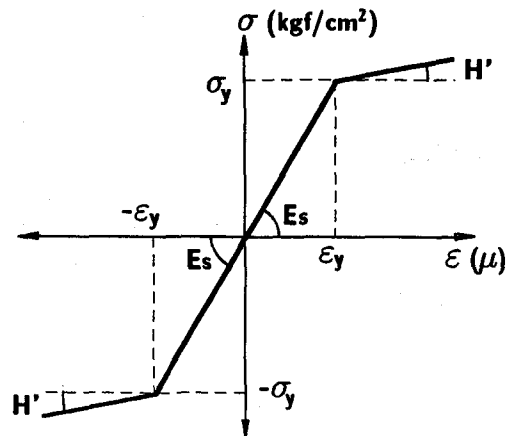
図-3にはD10-3のRC梁と重錘の要素分割状況を示している。本解析ではコンクリート、主鉄筋および重錘の要素には8節点固体要素を用いている。また、スターラップ($\phi 6$)は他の要素に比較して小さく数値計算時間に大きな影響を与えることより、剛性、断面積および重量が等価な梁要素にモデル化している。総要素数、総節点数は各RC梁に対して異なり、それぞれ3822~6070、5192~7756程度である。また、数値解析の時間刻みは約0.70 μsec である。全数値解析時間は実験結果と長期的な変形状態について比較検討するため160 msecまでとしている。なお、1ケース当たりの解析時間はHP90-00/C160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



(a) コンクリート



(b) 異形鉄筋

図-4 数値解析に用いた各材料の応力-歪曲線モデル

による破壊を考慮した土質体・クラッシュ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' を導入し、等方硬化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。本研究では降伏応力として圧縮強度を仮定した。また、引張側の破壊応力は降伏応力の1/10と仮定した。なお、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 σ_y がSD295Aで3000 kgf/cm²、SD345Aで3500 kgf/cm²とし、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ 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、より単純な構成則を用いて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いる

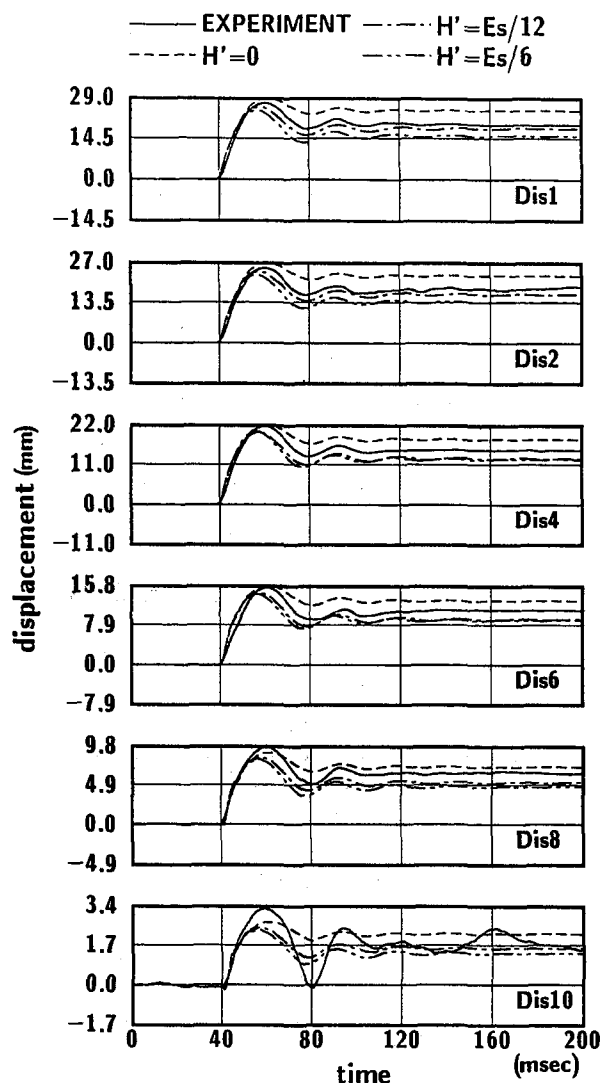


図-5 硬化係数 H' を変化させた場合の数値解析結果と実験結果の比較 (D10-3, $V=4\text{m/sec}$, $h=0.05$)

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RC梁の動的応答性状に少なからず影響を与えるものと推察される。本研究ではこのような状態に対処するために、鉄筋要素に等方硬化を考慮した等方弾塑性体モデルを適用し、応答解析結果と実験結果との比較によって最適な硬化係数 H' を決定することにより、それらの影響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、不確定な効果が含まれたものとなっている。ここでは、特に D10-3 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 $H' = 0$, $E_s/12$, $E_s/6$ 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に各点の応答変位波形に関する数値解析結果と実験結

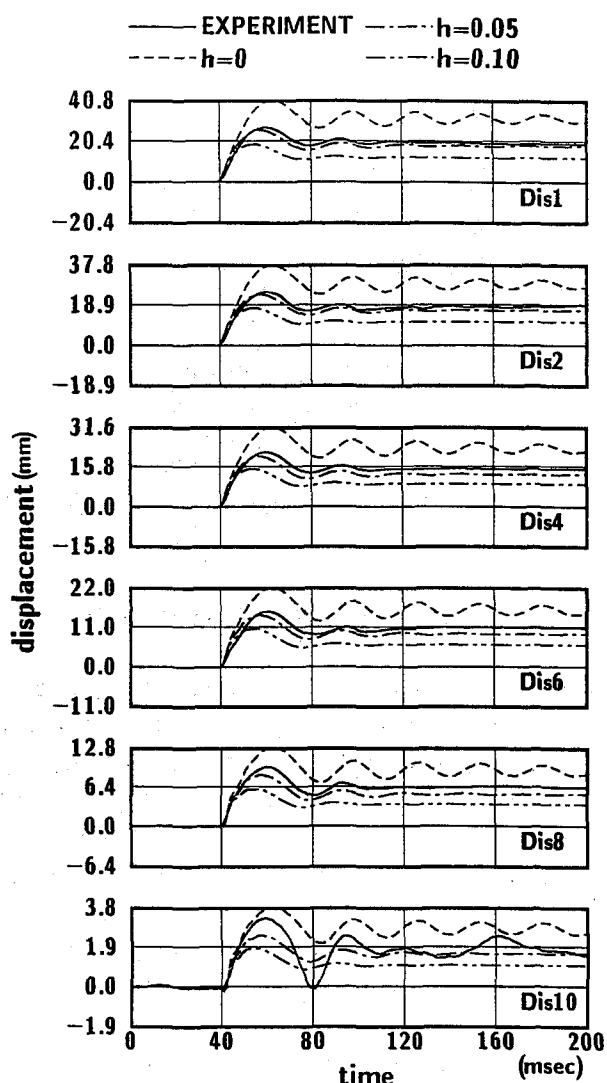


図-6 減衰定数 h を変化させた場合の数値解析結果と実験結果の比較 (D10-3, $V=4\text{m/sec}$, $H' = E_s/12$)

果を比較して示している。図より、 $H' = 0$ の場合には数値解析結果は全ての変位に関して実験結果より大きな応答性状を示している。また、 $H' = E_s/6$ の場合は若干過小評価となることがわかる。3ケースの中で $H' = E_s/12$ の場合が最も試験結果とよく対応していることがわかる。これより、以後の数値解析は、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载荷によってRC梁が破壊に至ったときの载荷速度を用いた単一载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。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

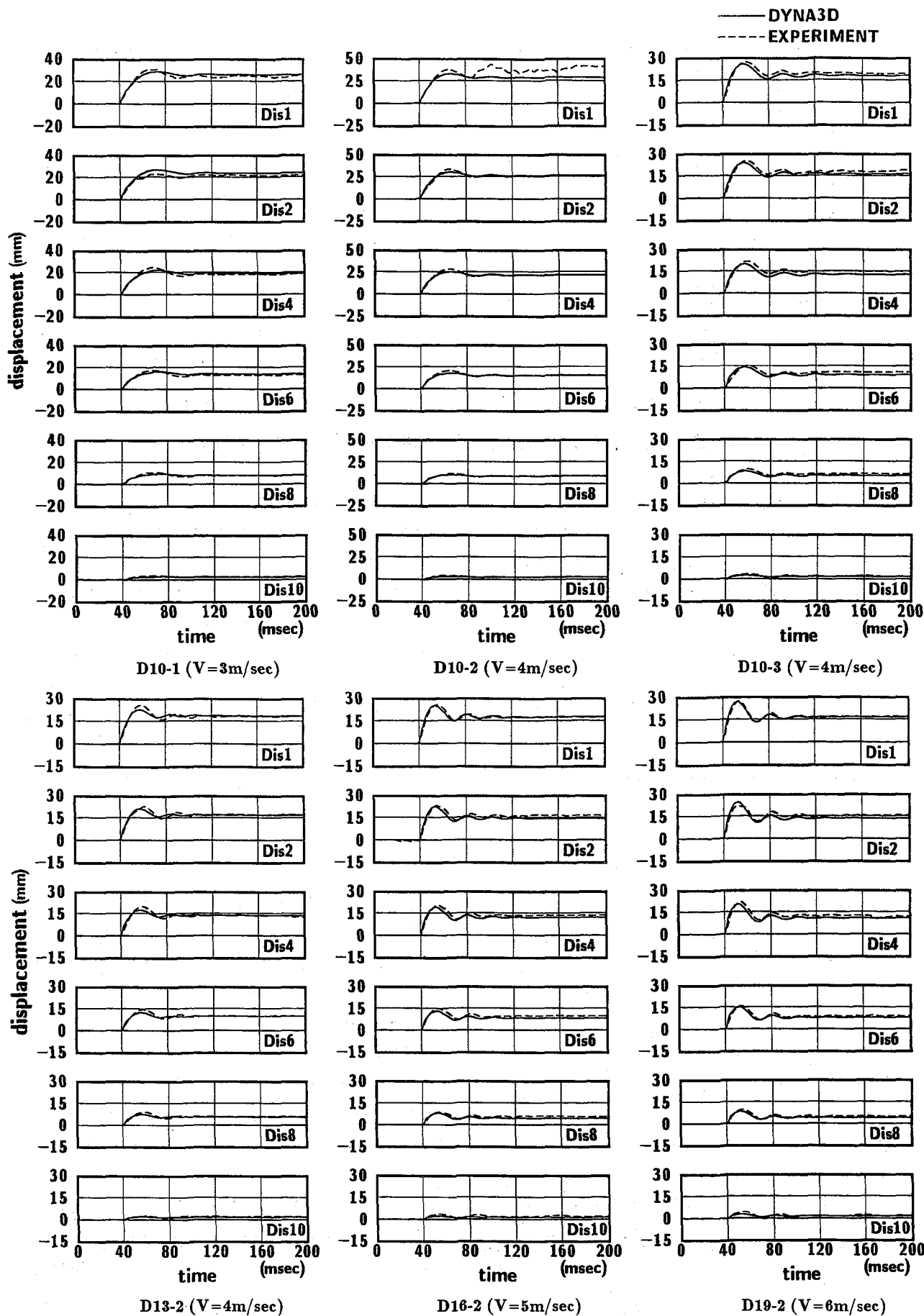
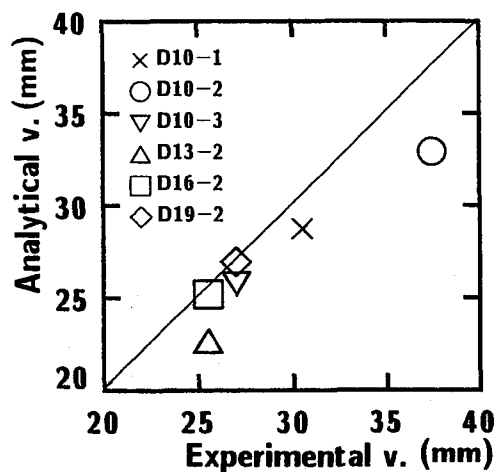
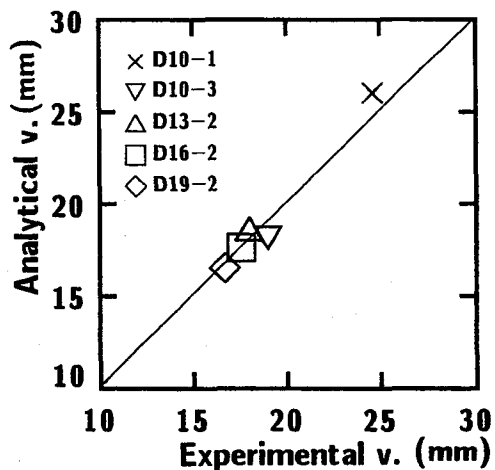


図-7 応答変位波形に関する数値解析結果と実験結果との比較

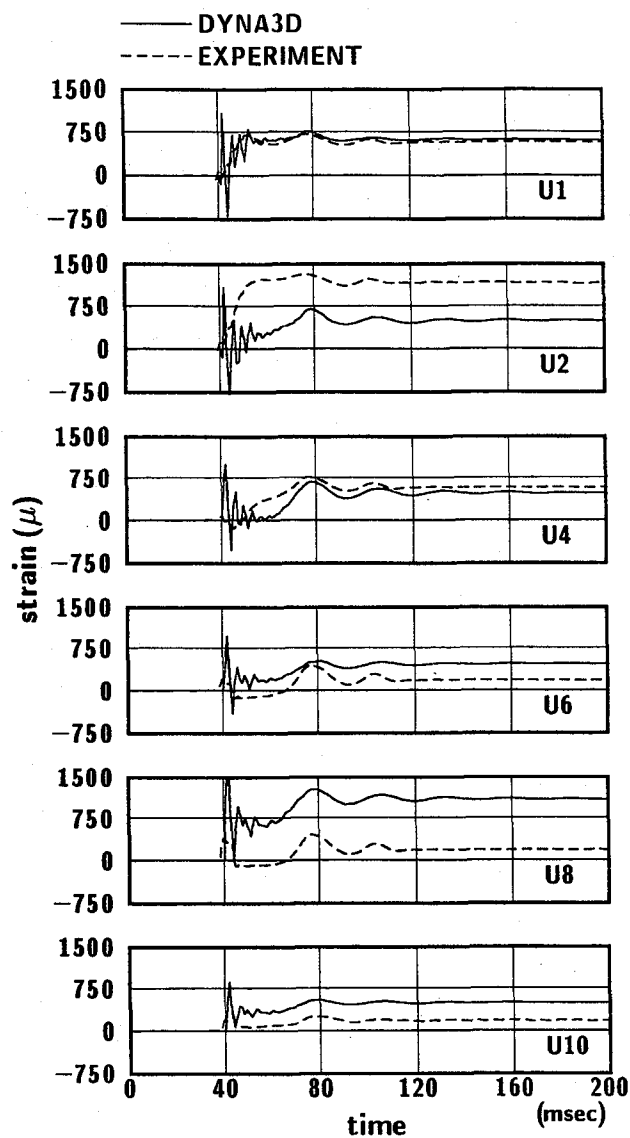


(a) 最大応答変位

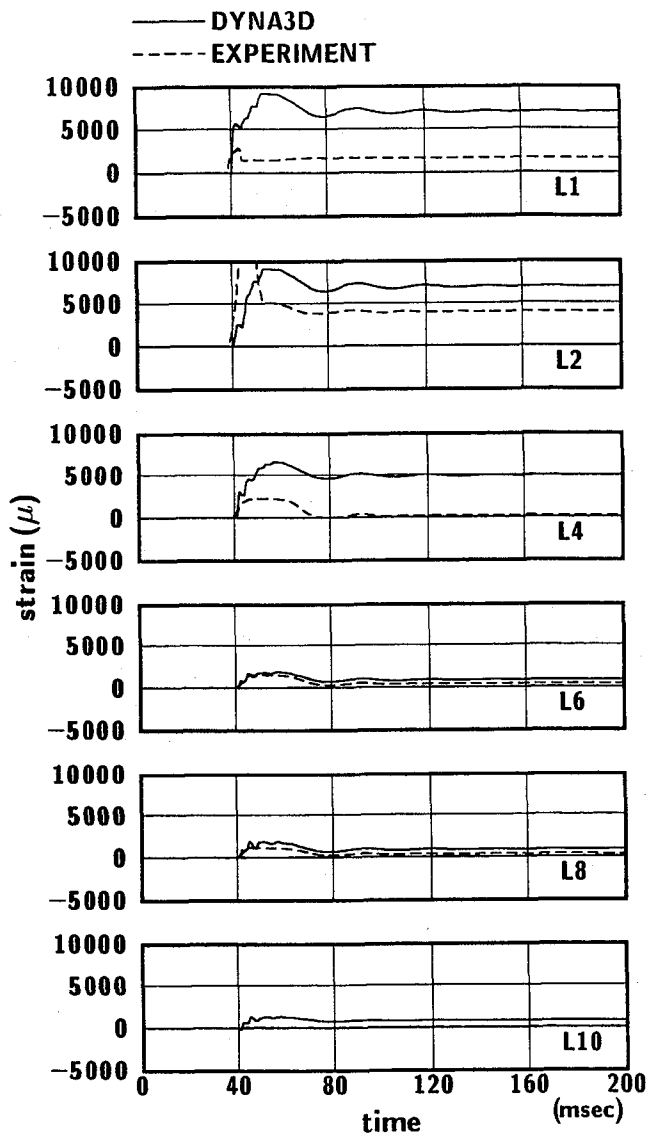


(b) 残留変位

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との比較



(a) 上端鉄筋歪



(b) 下端鉄筋歪

図-9 応答歪波形に関する数値解析結果と実験結果との比較 (D10-3, $V=4\text{m/sec}$)

に減衰定数 h と呼ぶこととする)を設定して数値解析を行った。ここでは、最初に減衰定数 h を $h=0, 0.05, 0.10$ 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 D10-3 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 $h=0$ の場合は他の $h=0.05, 0.10$ の場合より大きな応答性状を示していることがわかる。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より、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 には本研究で対象とした全 RC 梁の応答変位波形について、鉄筋の硬化係数 $H' = E_s/12$ 、減衰定数 $h=0.05$ を用いた場合の数値解析結果と実験結果を比較して示している。図より、残留変位に関する数値解析結果が実験結果より過小評価している箇所もあるが、大略、数値解析結果は最大応答変位、残留変位および振動性状とも実験結果とよく対応していることがわかる。

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結果が大きいことを、上の領域は解析結果が大きいことを意味している。なお、D10-2 梁の実験結果(図-7)に関しては最大変位が荷重除荷後に発生していること、および荷重載荷後の波形が他の RC 梁のそれに比較して明らかに不自然であることより、荷重除荷後に治具の不具合が生じたものと判断した。従って、最大変位に関しては荷重載荷時の値を採用することとし、残留変位に関しては比較対象から除外した。

(a) 図より、最大応答変位に関しては、いずれも実験結果が解析結果より大きい値となっている。しかしながら、最大誤差が D10-2 梁で 4.7 mm、最小誤差が D19-2 梁で 0.2 mm であることより、数値解析結果は実験結果によく対応しているものと判断される。一方、(b) 図の残留変位に関しては、数値解析結果と実験結果との差が最大応答変位の場合より小さく、最大誤差は D10-1 梁の場合であり、数値解析結果が実験結果より 1.2 mm 程度小さい。その他の梁に関する相対誤差は全て 1mm 以内である。これより本数値解析結果は、RC 梁の破壊規準設定等において重要である残留変位に関しても、実験結果とよく対応していることがわかる。

4.4 応答歪波形分布

試験体 D10-3 を対象として、断面中央部の上下端鉄筋歪に関する数値解析を行った。図-9 に数値解析結果と実験結果を比較して示している。一般に弾塑性状態に

おける RC 構造の鉄筋歪は、特に引張領域においてコンクリートのひびわれ位置の影響を大きく受けることより、数値解析結果と実験結果を一致させることが困難である。

上端鉄筋歪波形(図-9a)に関して、数値解析結果は衝撃初期に高周波振動状態を示しているが、波動の立ち上がりから約 15 msec 経過以降には減衰して低次振動状態となっている。一方、実験結果は衝撃初期の高周波振動状態が示されていない。大略的にみると、U1, U4, U6 に関する数値解析結果と実験結果はよく対応しているようである。U2, U8, U10 に関しては、除荷後の直流成分を除いた波形性状がよく対応しているものの、それぞれ U2 は実験結果、U8, U10 は数値解析結果の直流成分が大きく示されている。現象的には、数値解析結果、実験結果とも上端鉄筋歪でありながら引張歪波形を示している。これは、衝撃荷重載荷によって梁の中立軸が上端鉄筋位置よりも上側に推移したことによるものと考えられる。

下端鉄筋歪波形(図-9b)に関して、実験結果は L2 において 4000 μ 程度の残留歪が発生しているものの、他の L4 ~ L10 では残留歪が 500 μ 以下となっており、RC 梁が載荷点部における角折れに近い状態となっていることを示している。それに対し、数値解析結果は L1, L2 の載荷点で 7000 μ 、L4 で 5000 μ 程度の残留歪を示しているが、L6 ~ L10 では実験結果と同程度の残留歪を示している。これより、数値解析結果では梁中央点(載荷点)から 30 ~ 40 cm 部の実験結果より広い領域で角折れに近い状態となっていることが推察される。従って、数値解析結果と実験結果は L1 ~ L4 の領域で異なった性状を示しているが、L6, L8 では両者ほぼ対応していることがわかる。このように、鉄筋の実歪波形がコンクリートのひびわれ位置に大きく影響されることより、鉄筋歪波形に関しては、梁全体にわたって数値解析結果を実験結果に対応させることが非常に困難な問題であるものと判断される。

4.5 主応力および変形の時間的な推移状況

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、図-10 には数値解析結果の一例として試験体 D16-2 の場合の結果を示した。図は主鉄筋が配置されている断面内のコンクリート部の第1主応力および第3主応力分布の等色図を示している。図中の単位は kgf/cm^2 であり、正(赤色)が引張応力、負(青色)が圧縮応力を示している。本研究では、コンクリートの引張応力が $f_{tk}/10$ に達した状態でひびわれが発生するものと仮定していることより、30~40 kgf/cm^2 の等色図はひびわれ発生のある領域として評価することとする。また、変形状態は実変位を5倍に拡大している。なお、図中の経過時間は重錘が RC 梁に衝突する時点を経過時間としたものであり、括弧内の時間は図-7の時間軸に対応している。

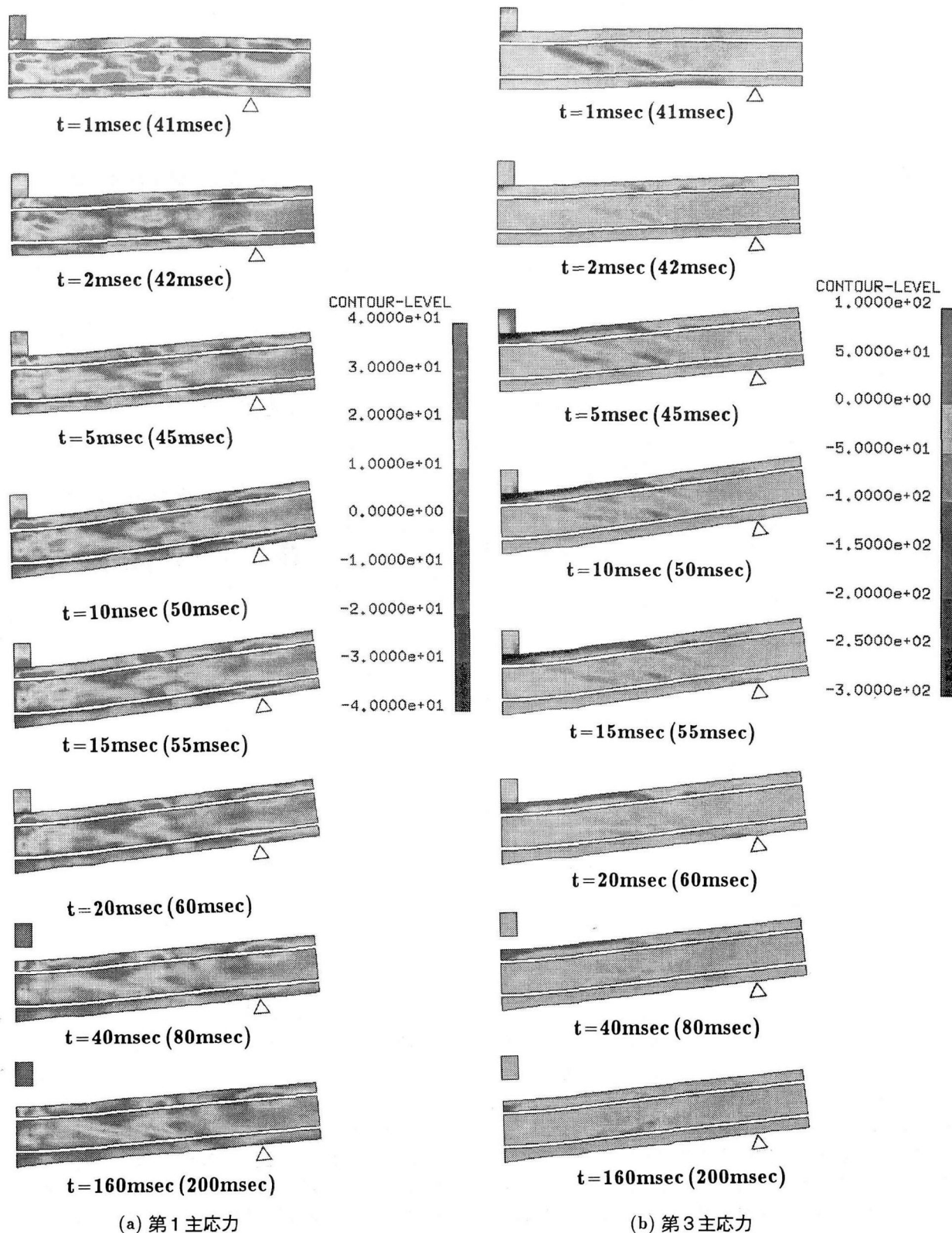


図-10 D16-2 梁の場合の軸方向応力の伝播状況および変形の時間的な推移状況

衝撃初期($t=1\text{msec}$)時の応答分布より、第1主応力分布において、荷重端から梁の下端に向かって斜め方向にひびわれが発生する程度の引張応力が発生している。その領域における第3主応力分布は $150\sim 200\text{ kgf/cm}^2$ 程

度の圧縮応力状態となっており、衝撃力が支点に向かって伝達される状態が示されている。このような斜め方向の応力分布はRC梁の斜めせん断ひびわれに対応するものと考えられ、衝撃荷重荷重とともに大きな衝撃力が瞬

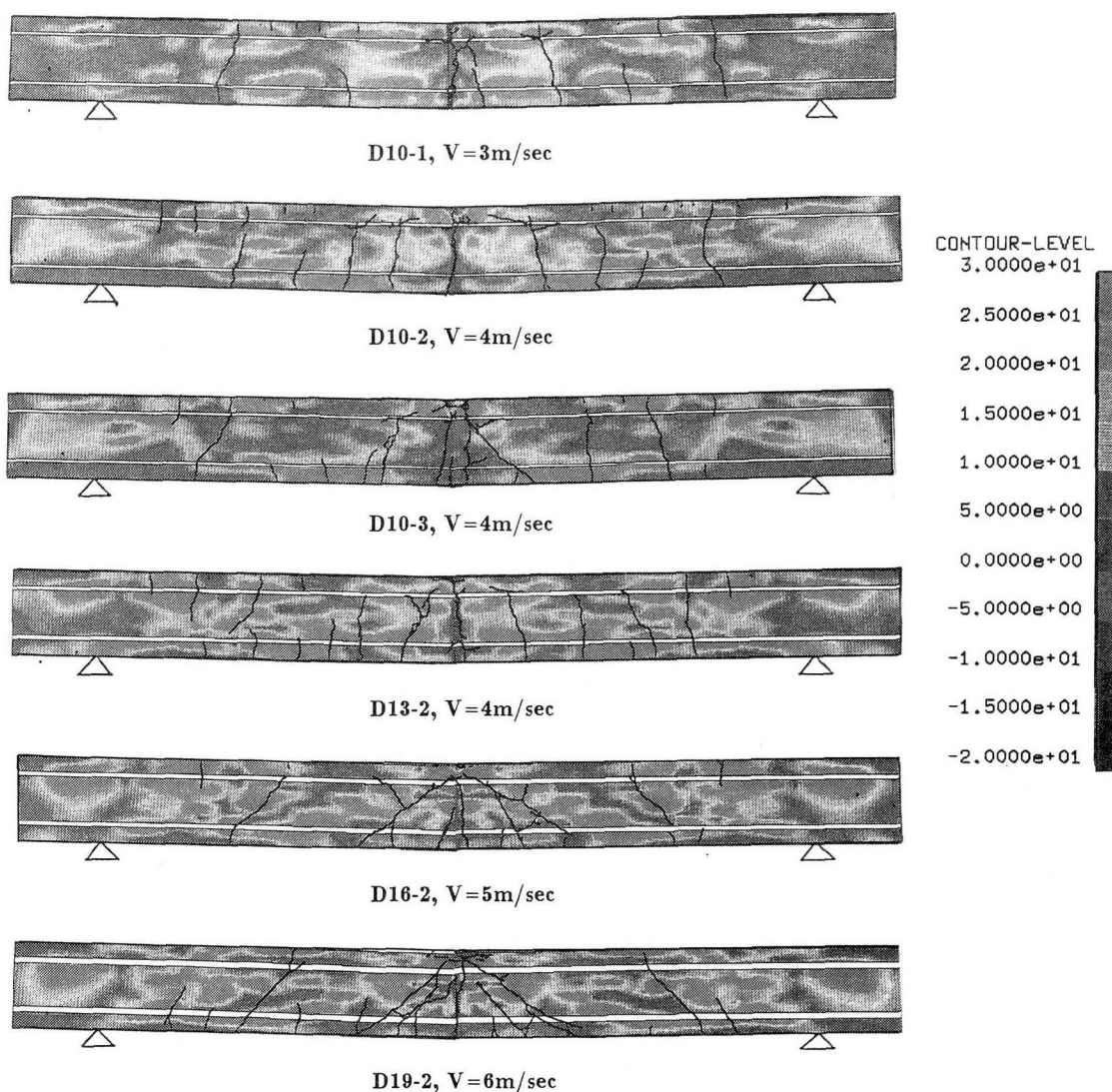


図-1 1 実験終了時のひびわれ図とコンクリートの最大第1主応力発生時の等色図

時に作用し、発生することがわかる。また $l/8 \sim l/4$ (l : 純スパン、本研究の場合は $l = 200\text{ cm}$ である) 上縁部において、ひびわれが発生する程度の第1主応力が発生し、下縁では $150 \sim 200\text{ kgf/cm}^2$ 程度の圧縮応力となる第3主応力が発生している。これは、上述のように主衝撃力が載荷点から斜め下方に伝達されるものの、支点部には未だ伝達されず、 $l/8 \sim l/4$ 部の領域が固定に近い状態となり、その結果負の曲げが発生したものと考えられる。

その後、第1主応力分布図において $t = 2 \sim 15\text{ msec}$ 時には、 $t = 1\text{ msec}$ 時に示された赤色の引張応力状態は、黄緑色の方向に変色する傾向を示しており、ひびわれが発生している可能性のあることを示している。さらに、支点より $l/8 \sim l/4$ 下縁部は、第1主応力分布図において $t = 1\text{ msec}$ 時の零応力状態 (黄緑色) から、 $t = 2\text{ msec}$ 時には 30 kgf/cm^2 以上の引張応力 (赤色) を示している。その後、 $t = 5 \sim 15\text{ msec}$ 時には載荷状態で

あるにもかかわらず、再度黄緑色の応力状態に変色していることより、この領域にもひびわれが発生しているものと推察される。また、第3主応力分布図において、 $l/4$ 点近傍の領域に数本の斜め下方に向かって分布する圧縮応力 (第3主応力) が発生しており、中央部が曲げ応力状態になっているとともに、衝撃力が支点に伝達される状態が示されている。梁中央部は、ほぼ一様な変形状態となっていることより、梁中央部が剛体的に挙動し、支点より $l/8 \sim l/4$ 下縁部にひびわれを伴いながら、支点方向に衝撃力を伝達しているものと考えられる。 $t = 20 \sim 40\text{ msec}$ 時には第1主応力、第3主応力とも僅かに減少傾向を示し、載荷状態からリバウンドへの状態に移行していることがわかる。 $t = 160\text{ msec}$ 時は除荷状態より十分時間が経過していることより、残留変形時の応力変形状態を示しているものと考えられる。

以上より、本数値解析によるRC梁には、主に衝撃初期の載荷点部に発生する斜めひびわれ、 $l/8 \sim l/4$ 上縁部

に発生する曲げひびわれおよび $t=5\sim 15\text{ msec}$ 時に支点より $l/8\sim l/4$ 下縁部に発生するひびわれの存在が推察される。これは後述の図-11とよく対応している。なお、スパン中央部下縁に曲げひびわれが発生するものと推察される(図-11では発生している)が、本数値解析による第1主応力分布からはその特性を確認することができない。

4.6 ひびわれ分布と第1主応力分布の関係

図-11には実験終了時のRC梁側面に発生したひびわれ図と、コンクリート要素の最大第1主応力発生時(2~3 msec 経過時)における等色図を比較して示している。なお、第1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。前項で述べているように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、最大応答時の第1主応力分布とは必ずしも対応しないと考えられる。しかしながら、鉄筋比が小さく曲げひびわれが卓越する梁(D10-1, D10-2)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(D16-2, D19-2)の場合は、載荷点部および支点より $l/4$ 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

本研究では、RC部材のより単純な構成則を用いて弾塑性衝撃応答解析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鉄筋比の異なる6種類のRC梁に関する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。

本解析では、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、コンクリートおよび鉄筋の歪速度効果は無視している。鉄筋の構成則に等方硬化を考慮した等方弾塑性体モデルを採用した。その硬化係数は、数値解析結果と実験結果を比較することにより決定した。検討結果、本研究では硬化係数を弾性係数の $1/12$ に決定した。6種類のRC梁に対する数値解析結果、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詳細に検討を行い、より信頼性の高い解析手法にしたいと考えている。

謝辞 本論文をまとめるに当たり室蘭工業大学建設システム工学科大学院の山内昌昭君をはじめとする同研究室の諸君に多大の協力を戴いた。ここに記して謝意を表する次第である。

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梁、および鋼柱・コンクリート合成梁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) 三上 浩・岸 徳光・松岡健一・田村富雄：低速度衝撃を受けるRC梁の耐衝撃設計法の一提案、構造工学論文集、Vol. 42A, 1255-1260, 1996.
- 5) Hallquist, J.O. : LS-DYNA3D User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1993.9.
- 6) 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.

(1996年9月6日受付)