

## 高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁に関する弾塑性衝撃応答解析

Elasto-plastic impact response analysis of flexural-failure type RC beams with HP-LWC

岸 徳光\* 安藤智啓\*\* 松岡健一\* 竹本 伸一\*\*\*

Norimitsu KISHI, Tomohiro ANDO, Ken-ichi MATSUOKA and Shin-ichi TAKEMOTO

\* 工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\* 博(工) 防衛庁第4研究所研究員 施設構造研究室 (〒229-0006 相模原市淵野辺 2-9-54)

\*\*\* トーピー建設工業(株) 部長 北海道本店設計部 (〒061-0001 札幌市中央区北1条西6丁目)

In this paper, to establish a simple and rational impact response analysis method on flexural-failure-type RC beams with High-Performance and Light-Weight Concrete (HP-LWC), elasto-plastic impact response analysis for pin supported RC beams with HP-LWC were conducted by means of Finite Element Method (FEM). In this study, cross sectional dimensions, mass of weight and impact velocity were taken as variables. To investigate an applicability of a proposed analysis method, these numerical results are compared with the experimental ones obtained from falling-weight impact tests. From this study, it was seen that the impact behavior of the RC beams with HP-LWC can be simulated by using the proposed analysis method with a good accuracy.

**Key Words :** High-Performance and Light-Weight concrete, RC beam, Impact response analysis, Falling-weight impact tests

キーワード：高性能軽量コンクリート，RC 梁，衝撃応答解析，重錘落下衝撃実験

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 部材の耐衝撃挙動に関する数値解析的研究は、主に曲げ破壊型 RC 梁に着目して各研究機関で実施されてきた<sup>1)~4)</sup>。その結果、重錘落下衝撃を受ける曲げ破壊型 RC 梁の衝撃挙動は各研究機関において比較的精度よくシミュレート可能になるまでに至っている<sup>5)</sup>。著者らも既に単純な構成則を用いた三次元有限要素法に基づく簡易かつ合理的な数値解析手法を提案している<sup>6),7)</sup>。

一方、近年道路橋や鉄道橋等の上部構造の軽量化を図る試みの一つとして、粗骨材に高性能軽量骨材を用いたコンクリート (以後、高性能軽量コンクリート) を実橋に適用する方法が考えられ、一部実用化されている。

著者らも、既に不慮の事故による車両衝突に対して安全性の確保が必要とされるコンクリート橋の壁高欄部等、耐衝撃用途構造部材への適用性に着目して、高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施している<sup>8)</sup>。検討結果、その衝撃応答性状は、静的曲げ耐力が同程度である場合には、コンクリートの弾性係数や引張強度が異なる普通コンクリートを用いた RC 梁とほぼ同様な結果となることが明らかになっている。これは、高性能軽量コンクリートを用いる場合の曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃設計が、普通コンクリートを用いる場合と同様の手法に基づいて実施可能であることを示唆している。

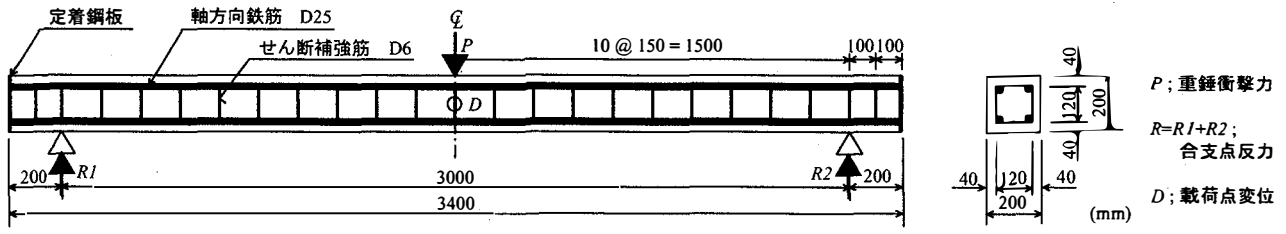
しかしながら、高性能軽量コンクリートを用いる場合に関しても、信頼性の高い耐衝撃設計法の確立に向けた検討には、実験的研究は勿論のこと数値解析的研究の援用の下に効率的に実施されなければならないものと判断される。

このような観点より、本研究では、普通コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁の衝撃応答解析に適用した解析手法を高性能軽量コンクリートを用いた場合への適用性を検討することを目的に、設計的に静載荷時に曲げ破壊で終局に至る高性能軽量コンクリート RC 梁に対して三次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を試み、本数値解析手法の妥当性について検討を行った。妥当性検討は、数値解析結果を別途実施した重錘落下衝撃実験の結果<sup>8),9)</sup>と比較することにより行った。なお、本数値解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA (ver. 960)<sup>10)</sup>を用いている。

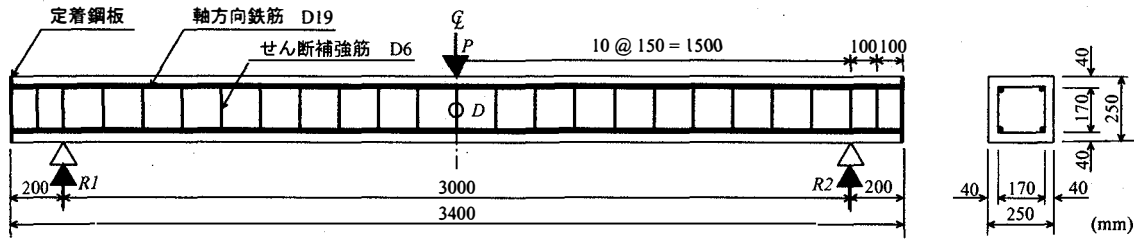
## 2. 実験概要

## 2.1 試験体の概要

図-1には、本数値解析で対象とした高性能軽量コンクリート (High-Performance and Light-Weight Concrete) RC 梁の形状寸法および配筋状況を測定項目と合わせて示している。図に示すように、対象とした RC 梁は断面形状の異なる2種類の試験体である。各試験体の断面形状 (梁幅×梁高) は、それぞれ 200×200 mm, 250



(a) Type-A



(b) Type-B

図-1 試験体の形状寸法

表-1 試験体の静的設計値一覧

試験体名	主鉄筋比 $P_t$	せん断スパン比 $a/d$	静的せん断耐力 $V_{usc}$ (kN)	静的曲げ耐力 $P_{usc}$ (kN)	せん断余裕度 $\alpha$
Type-A	0.032	9.38	107.5	69.7	1.54
Type-B	0.011	7.14	129.7	59.2	2.19

表-2 コンクリートの力学的特性

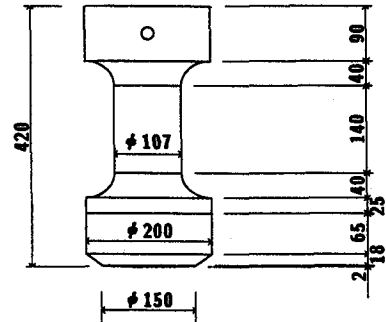
実験時材令	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	引張強度 $f_t$ (MPa)	弾性係数 $E_c$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$
16日	17.7	37.6	2.37	21.9	0.21

表-3 鉄筋の力学的特性

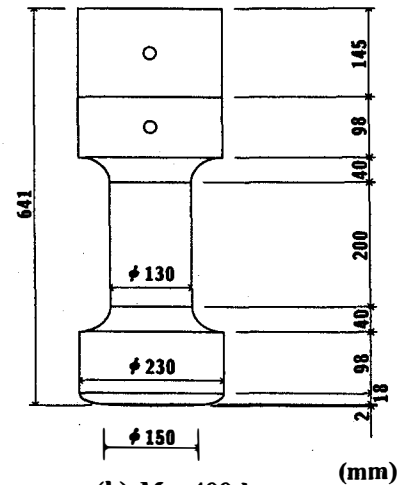
鉄筋名称	材質	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_s$
D25	SD345	383	206	0.3
D19	SD345	392		
D6	SD295A	376		

表-4 高性能軽量コンクリート配合設計

示方配合 (1m <sup>3</sup> )						
水セメント比 W/C (%)	セメント C (kg)	水 W (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)	混和剤	
					減水剤 (cc)	AE剤 (cc)
35.0	371	130	848	451	1486	260



(a)  $M = 300$  kg



(b)  $M = 400$  kg

図-2 使用重錘の形状寸法

× 250 mm であり、純スパン長は 3,000 mm となっている。軸方向鉄筋は A 試験体が D25-SD345, B 試験体が D19-SD345 を、せん断補強筋はいずれの試験体も D6-SD295A を用いている。また、軸方向鉄筋は梁端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接し、その定着長を節

約している。

表-1 には、荷重をスパン中央部に作用させた場合の試験体の静的設計値を一覧にして示している。表中には、主鉄筋比  $P_t$ 、せん断スパン比  $a/d$  の他、コンクリート標準示方書<sup>11)</sup> (以後、示方書) に準拠して算出

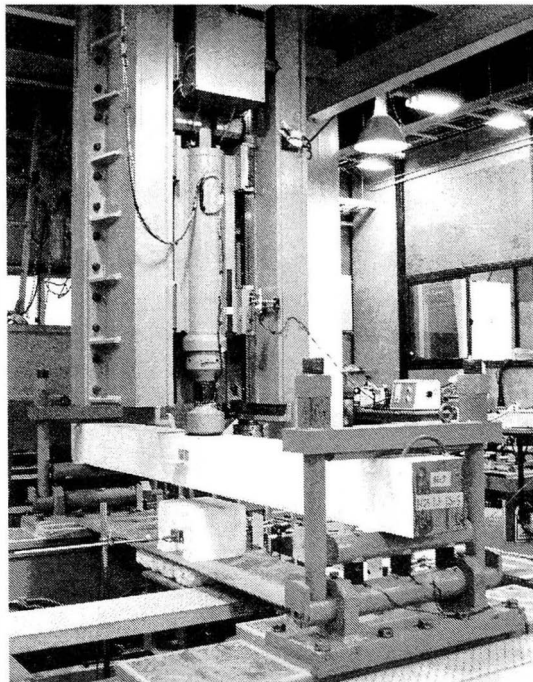


写真-1 重錘落下衝撃実験の状況 (Type - B)

した静的せん断耐力  $V_{usc}$ 、静的曲げ耐力  $P_{usc}$  および静的せん断余裕度  $\alpha$  を示している。表中の  $V_{usc}$  値は、高性能軽量コンクリートを用いていることより、示方書<sup>1)</sup>に準拠して示方書式から算出される値を70%に低減している。また、せん断余裕度  $\alpha$  は、 $V_{usc}$  を  $P_{usc}$  で除した値である。いずれの梁も  $\alpha > 1.0$  であることから、本研究で用いた RC 梁は、静載荷時には設計的に曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。

なお、各耐力は表-2および表-3に示しているコンクリートおよび鉄筋の力学的特性を用いて算出している。また、高性能軽量コンクリートには、粗骨材として寸法5~15 mmの高性能軽量骨材（比重1.20）を用いている。表-4にはコンクリートの配合設計を一覧にして示している。

## 2.2 重錘落下衝撃実験の概要

写真-1には、本重錘落下衝撃実験の状況を示している。写真に示すように、試験体は反力測定用のロードセルおよび跳ね上がり防止用治具が取り付けられている支点治具上に設置している。治具全体は、RC梁の回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。実験はこのような設置状態の下、重錘を所定の高さからRC梁のスパン中央部に一度だけ自由落下させることにより実施している。図-2には本実験で用いた重錘を示している。図に示すように、重錘は質量300 kgと400 kgの2種類で、各直径は  $\phi = 200$  mm, 230 mm（载荷点部直径はいずれも150 mm）の円柱状鋼製重錘である。なお、重錘底部は衝突時の片当たりを防止するために、半径1,407 mm、高さ2 mmのテーパを有する球形状となっている。

表-5 解析ケース一覧

試験体名	断面形状 (cm)	重錘質量 $M$ (kg)	衝突速度 $V$ (m/s)
A3-5	Type - A	300	5
A3-6	(20 × 20)		6
B3-5			5
B3-6			6
B4-3.75	Type - B	400	3.75
B4-4.33	(25 × 25)		4.33
B4-4.50			4.50
B4-5.20			5.20

実験における測定項目は、図-1に示すように、重錘衝撃力  $P$ 、合支点反力  $R$ （以後、単に支点反力）および梁側面における载荷点変位  $D$ （以後、変位）に関する各応答波形である。ここで、 $P$ の測定には起歪柱型ロードセルを用いている。このロードセルの容量および応答周波数は、重錘質量300 kgの場合には、容量1,470 kN、応答周波数DC~4.0 kHz、重錘質量400 kgの場合には、容量2,080 kN 応答周波数DC~4.0 kHzとなっている。 $R$ の測定には容量1,000 kN、応答周波数DC~2.4 kHzである重錘衝撃力測定用と同型のロードセルを用いている。また、 $D$ の測定には容量200 mm、応答周波数DC~915 Hzの非接触式レーザー変位計を用いている。なお、重錘衝撃力波形  $P$  および支点反力波形  $R$  に関しては、各センサからの出力波形を直流アンプを用いて増幅し、また、レーザー式変位計からの出力はアンプユニットを介してデータレコーダ（DC~40 kHz）に一括収録している。各波形データは100  $\mu$ s/wordのサンプリング間隔でA/D変換を施し、数値解析結果との比較検討に用いている。

## 3. 数値解析の概要

### 3.1 数値解析ケース

表-5には、本解析ケースの一覧を示している。表中には、試験体名、梁の断面形状タイプ、重錘質量および重錘の衝突速度  $V$  (m/s)を示している。試験体名に関しては、第一項目は断面形状 (Type-A: 20 × 20 cm, -B: 25 × 25 cm) と重錘質量 (3:  $M = 300$  kg, 4:  $M = 400$  kg) を組み合わせ、第二項目は衝突速度  $V$  を示している。試験体タイプは、図-1に示すように断面寸法の異なる場合と使用重錘質量の異なる場合で、計3種類を設定している。

300 kg 重錘を用いる場合の衝突速度  $V$  は、別途実施した漸増繰り返し載荷実験結果の破壊に至る衝突速度およびその+1 m/sを設定している。本研究では、RC梁の破壊基準を著者らの過去の研究に基づき、累積残留変位が、純スパン長の2% (6 cm) に達した時点として

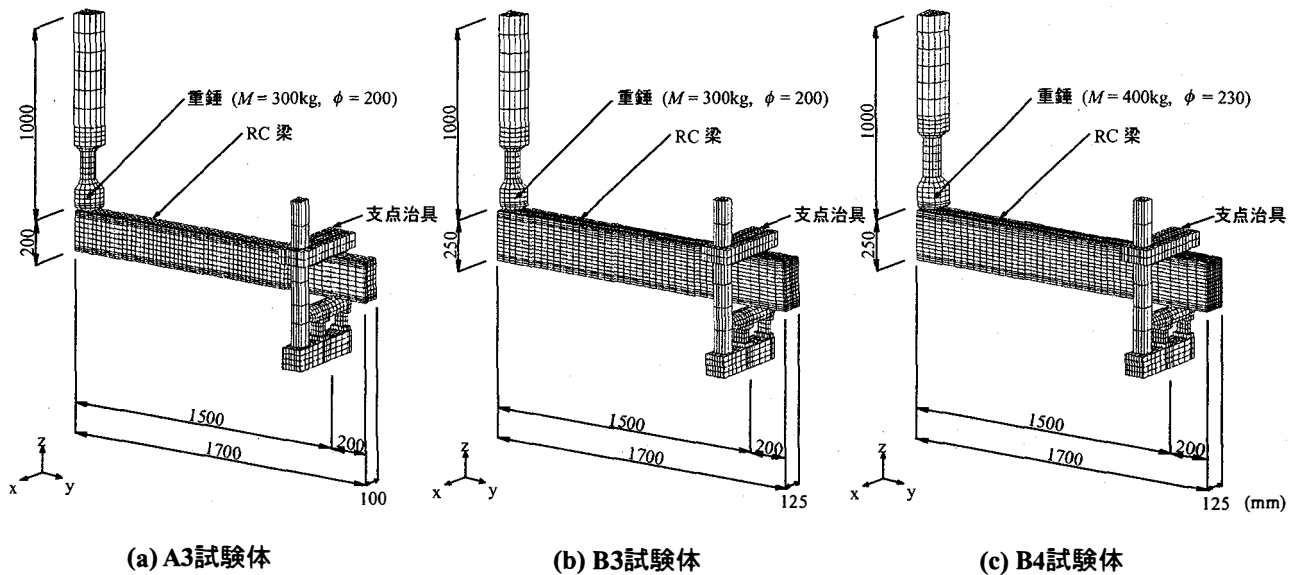


図-3 有限要素モデルの一例

いる。

さらに、400 kg 重錘を用いる場合に関しては 300 kg 重錘を用いる場合と入力エネルギーが等価な場合および入力運動量が等価な場合の 4 ケースに着目することとした。すなわち、 $V = 4.33 \text{ m/s}$ 、 $5.20 \text{ m/s}$  の場合には 300 kg を用いる場合の  $V = 5 \text{ m/s}$ 、 $6 \text{ m/s}$  時と入力エネルギーが等価であり、 $V = 3.75 \text{ m/s}$ 、 $4.50 \text{ m/s}$  の場合は同様に入力運動量が等価な場合である。従って、本数値解析では高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁の弾塑性領域から破壊領域までの衝撃挙動を適切にシミュレート可能な解析手法を確立することを目的に、表-5 に示す全 8 ケースについて検討を行うこととした。

### 3.2 数値解析モデル

図-3 には、A3、B3 および B4 試験体に関する有限要素モデルを示している。解析対象は、RC 梁の対称性を考慮して断面方向 ( $x$  方向) およびスパン方向 ( $y$  方向) に 2 等分した 1/4 モデルである。また、各構成要素は、8 節点あるいは 6 節点の三次元固体要素でモデル化している。スターラップに関しては、要素サイズが他の要素と比較して小さく、解析時間に大きな影響を与えることが予想されるため、剛性、断面積、重量が等価な梁要素を適用することとした。総節点数および総要素数は、A3 モデルの場合で、それぞれ 7,851 および 5,934、B3 モデルの場合で 9,822、7,992、B4 モデルで 9,997、8,136 である。

ここで、各構成要素に関するモデル化の詳細を述べると、RC 梁部は、実験に用いた梁の形状寸法に基づき忠実にモデル化している。ただし、軸方向鉄筋は公称断面積と等価な正方形要素として簡略化した。重錘部は、実形状に即し、全長 1.0 m でかつ重錘質量が 300 kg の場合は直径 200 mm、400 kg の場合は 230 mm の円柱

○：ピン支持

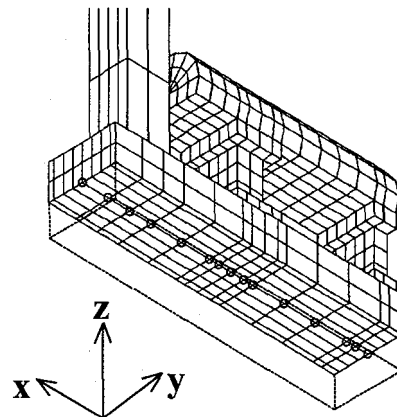


図-4 支点治具底部における境界条件

状を基本としてロードセル部を実際の重錘と同様な直径 (300 kg の場合は 107 mm、400 kg の場合は 130 mm) に絞り込んでモデル化し、底部形状を高さ 2 mm の球形状から扁平状に簡略化してモデル化している。支点治具部は、ロードセルやリバウンド防止用治具も含め、実構造に即してモデル化することとした。なお、支点の底部には、実験時と同様に治具全体の  $x$  軸回りの回転のみを許容するように境界条件を設定している (図-4)。

要素の積分点数は、いずれの要素に対しても 1 点積分を基本としているが、主鉄筋要素に関しては断面方向に 1 要素でモデル化していることより、解析精度を考慮して 8 点積分としている。RC 梁と重錘および RC 梁と支点治具の要素間には、それぞれ面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリート要素と軸方向鉄筋およびスターラップの要素間は、完全付着を仮定している。衝撃力は、図-3 に示されているように重錘が RC 梁に接触した状態で、

重錘要素の全節点に実験時と同様の衝突速度を付加する形で与えている。

なお、全数値解析時間は、重錘が RC 梁に衝突した時間から RC 梁の応答変位がほぼ定常状態に至るまでの 160 ms 間としている。

1 ケース当たりの解析所要時間は、図-3 に示されている程度の要素分割に対して約 2 時間半 (alpha / xp 1000 使用時) である。

### 3.3 材料物性モデル

図-5 には、本数値解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-歪特性を示している。これらの材料物性モデルは、コンクリートの物性モデルにおける引張強度  $f_t$  の値を除いて普通コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁の場合<sup>6)</sup>と同様である。以下に、コンクリートと鉄筋等に関する材料物性モデルの概要を述べる。

#### (1) コンクリート

コンクリート要素に用いた物性モデルは、圧縮側に対しては折線近似による相当応力-相当歪関係、引張側に対しては破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとする弾塑性体モデルである。ここでは、図-5(a) に示されているように、相当歪が  $1,500 \mu$  に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。引張側の破壊圧力に関しては、普通コンクリートの場合には降伏強度の 1/10 と仮定してきた。しかしながら、本実験で用いている高性能軽量コンクリートの引張強度  $f_t$  は表-2 に示されているとおり圧縮強度の 1/10 よりも小さい。ここでは、コンクリートの引張強度がひび割れの発生や各応答性状に大きく影響するものと判断し、試験結果の引張強度を用いることとした。なお、降伏の判定は von Mises の降伏条件を採用している。

#### (2) 鉄筋

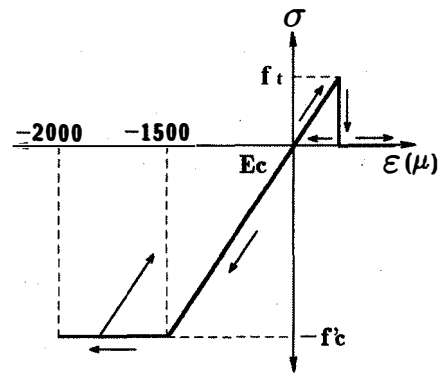
図-5(b) には、軸方向鉄筋の応力-歪特性を示している。軸方向鉄筋要素に用いた物性モデルは、降伏後の塑性硬化係数  $H'$  を考慮した等方弾塑性体モデルである。降伏応力  $\sigma_y$ 、弾性係数  $E_s$  およびポアソン比  $\nu_s$  には、表-3 に示されている値を採用している。降伏の判定はここでも von Mises の降伏条件に従うこととした。また、塑性硬化係数  $H'$  は、弾性係数  $E_s$  の 1% と仮定した。

#### (3) 重錘、支点治具および定着鋼板

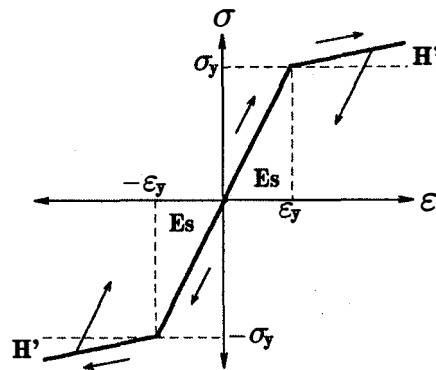
重錘、支点治具、スターラップおよび定着鋼板の要素に関しては弾性体モデルを適用している。これらの要素の弾性係数  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  は、それぞれ  $E = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.3$  と仮定している。

#### (4) 歪速度効果および粘性減衰定数

本研究では、市販の汎用コードに組み込まれている程度の単純な構成則を用いた RC 梁の弾塑性衝撃応答解析手法の確立を目的としていることより、コンクリートお



(a) コンクリート



(b) 軸方向鉄筋

図-5 応力-歪特性

よび鉄筋の歪速度効果やコンクリートの歪軟化現象は考慮していない。また、質量に比例する粘性減衰定数は、予備解析を行い RC 梁の最低次固有振動数に対して 0.5% と仮定している。

## 4. 数値解析結果と実験結果の比較

### 4.1 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図-6 には、A3、B3 および B4 試験体の重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  および変位  $D$  の各応答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。なお、各波形は原波形を用いて整理している。また、数値解析における重錘衝撃力および支点反力波形は、重錘および支点治具とコンクリートとの要素間に定義した接触面に生じる鉛直方向接触反力を集積することにより算定している。

最初に、図-6(a) の重錘衝撃力波形  $P$  について見ると、数値解析結果と実験結果は、いずれの試験体に関しても波形の立ち上がりから減衰に至るまで両者で非常によく対応していることが分かる。すなわち、両波形は衝撃初期における振幅が大きく継続時間の短い波形成分

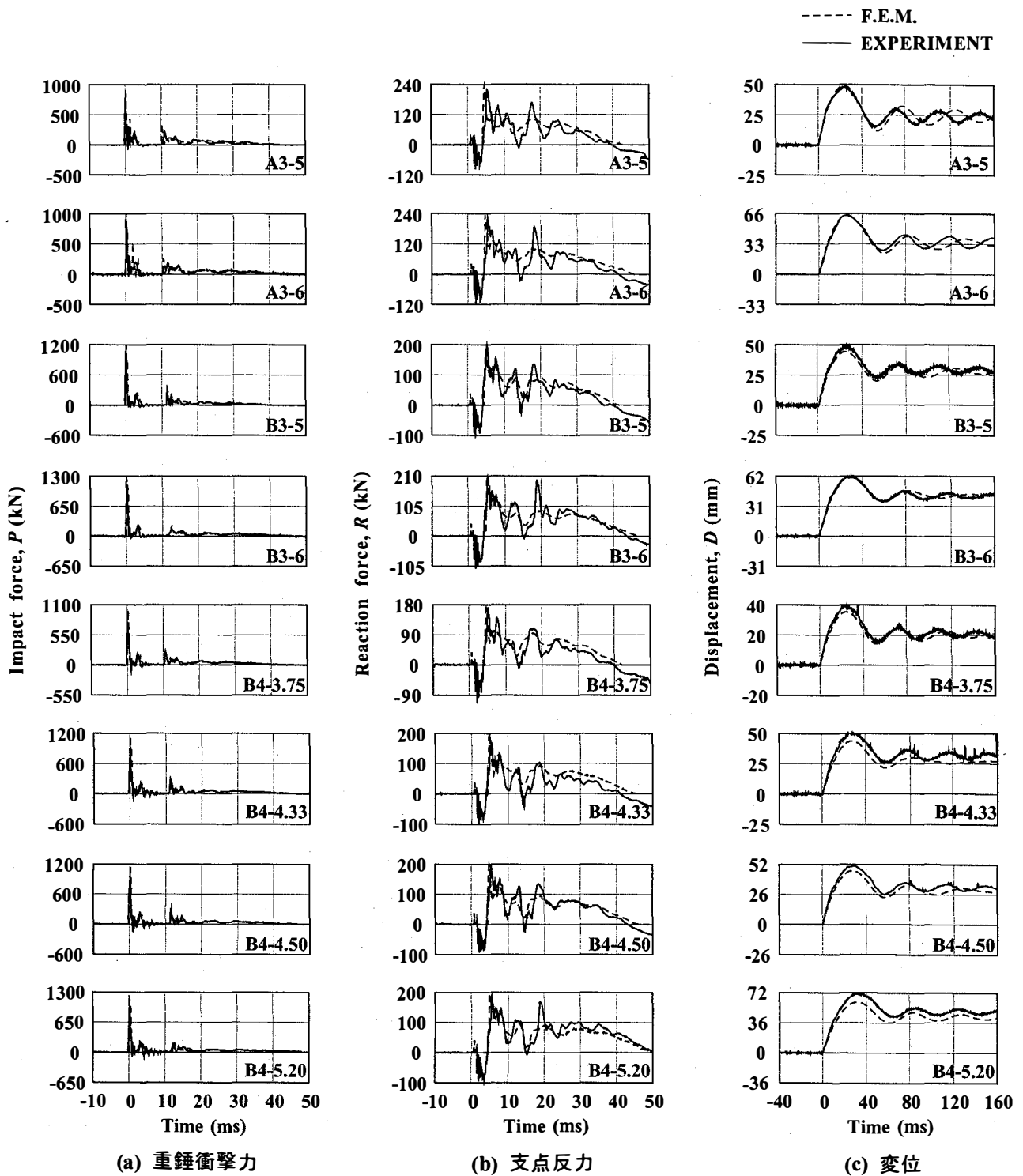


図-6 重錘衝撃力, 支点反力, 変位に関する各応答波形の比較

と、その後励起される振幅が小さく継続時間の比較的長い波形成分の2波から成る分布性状を示している。

次に、図-6(b)の支点反力波形 $R$ について見ると、重錘衝撃力波形と同様に、数値解析結果と実験結果は負反力成分を除き両者で比較的良好に対応していることが分かる。すなわち、数値解析結果は波動の立ち上がりから10 ms経過程度までは負反力が励起される波形成分

を除き高周波成分も含め実験結果とよく対応している。その後、実験結果は、継続時間が30 ms ~ 50 ms程度の正弦半波の波形成分に波頭が鋭角な高周波成分が合成されている。一方、数値解析結果は高周波成分の波頭が鈍化している点を除き、大略実験結果と類似している。なお、衝撃初期の負反力成分に関しては、実験の場合には、支点道具に初期力を導入して締め付けているこ

とにより、負反力波形も測定可能となっている。一方、数値解析においては、梁底面と支点治具間の接触力を用いて評価していることより、負反力の評価が不可能となっていることによるものである。

最後に、図-6(c)の変位波形Dに関して見ると、300 kg 重錘を用いる A3, B3 試験体に関する数値解析結果は、波形の立ち上がり勾配から最大応答値までの数値解析結果は実験結果と非常によく対応していることが分かる。最大応答値発生以降に関しては、数値解析結果が得られる波形はその周期が若干長く示されているものの実験結果とよく対応していることが分かる。また、400 kg 重錘を用いた B4 試験体に関しては、数値解析結果の最大応答値および残留変位が実験結果に比べて若干小さく示されている。しかしながら、除荷後の減衰自由振動状態における振動周期も類似しており、両結果はよく対応しているものと判断される。

以上より、本数値解析手法を用いることにより、重錘落下衝撃を受ける高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁の重錘衝撃力波形および支点反力波形は精度よく推定できることが明らかになった。また、変位波形に関しても、400 kg 重錘を用いる場合に残留変位を若干過小評価する傾向にあるが、除荷後の減衰自由振動状態における振動周期も類似しており、比較的良好に実験結果をシミュレート可能であることが明らかになった。

#### 4.2 各応答波形の最大値

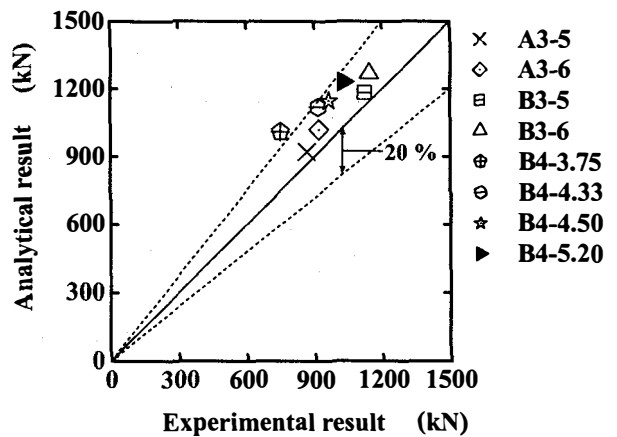
図-7には、全試験体の重錘衝撃力、支点反力および変位に関する最大値を数値解析結果と実験結果で比較して示している。図中の45°勾配を有する実線は、数値解析と実験結果が一致していることを意味している。また、破線は両結果に対する誤差幅を表している。すなわち、この実線より下側の領域は実験結果が大きいことを、上側の領域は数値解析結果が大きいことを表している。

図-7(a)の最大重錘衝撃力について見ると、いずれの試験体も数値解析結果が実験結果に比べて大きく示されている。しかしながら、その差はいずれの試験体の場合においてもほぼ20%以下と比較的小さく、かつ解析結果は安全側の評価を与えていることが分かる。

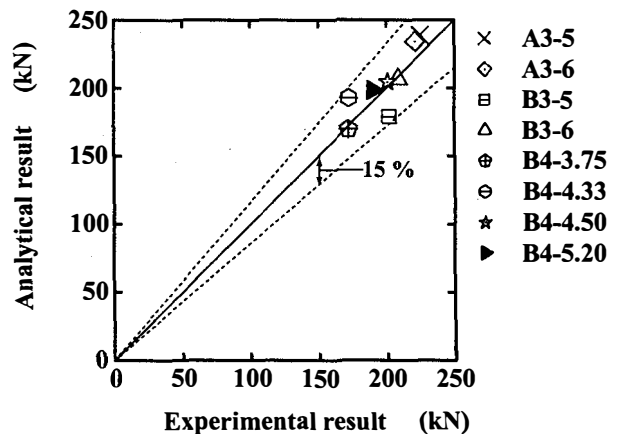
図-7(b)の最大支点反力に関しては、B3-5とB4-4.33試験体の場合で差異が若干大きく示されているもののその差は15%以下と小さく、数値解析結果は比較的精度よく評価しているものと判断される。

図-7(c)の最大応答変位に関しては、解析結果と実験結果の差が15%以下となっており、両結果の差はここでも小さく示されている。

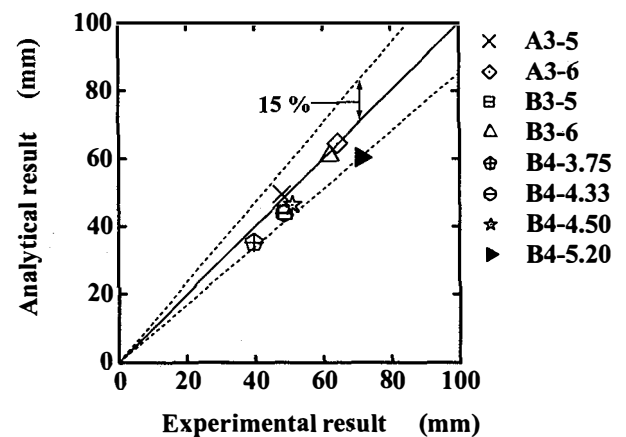
以上より、本数値解析手法を用いることにより、最大重錘衝撃力は20%程度以下の誤差幅で設計的に安全側で評価可能であり、最大支点反力および最大応答変位は15%程度以下の誤差幅で評価可能であることが明らかとなった。



(a) 最大重錘衝撃力



(b) 最大支点反力



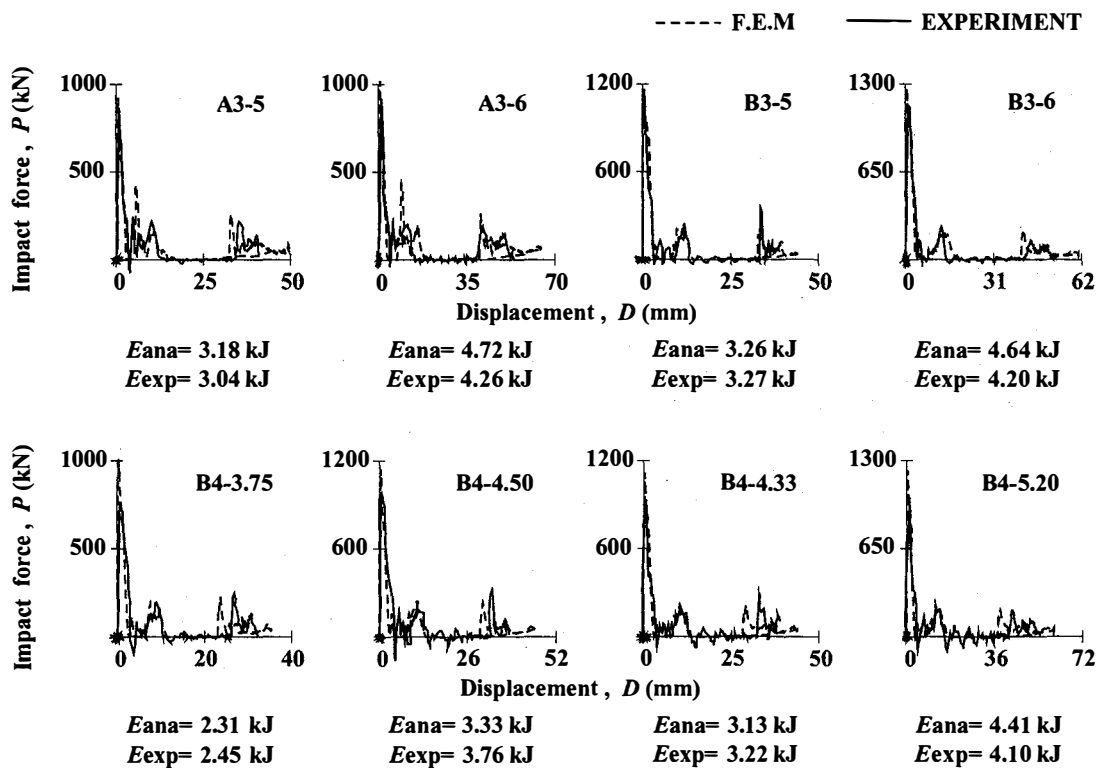
(c) 最大応答変位

図-7 各応答波形の最大値に関する比較

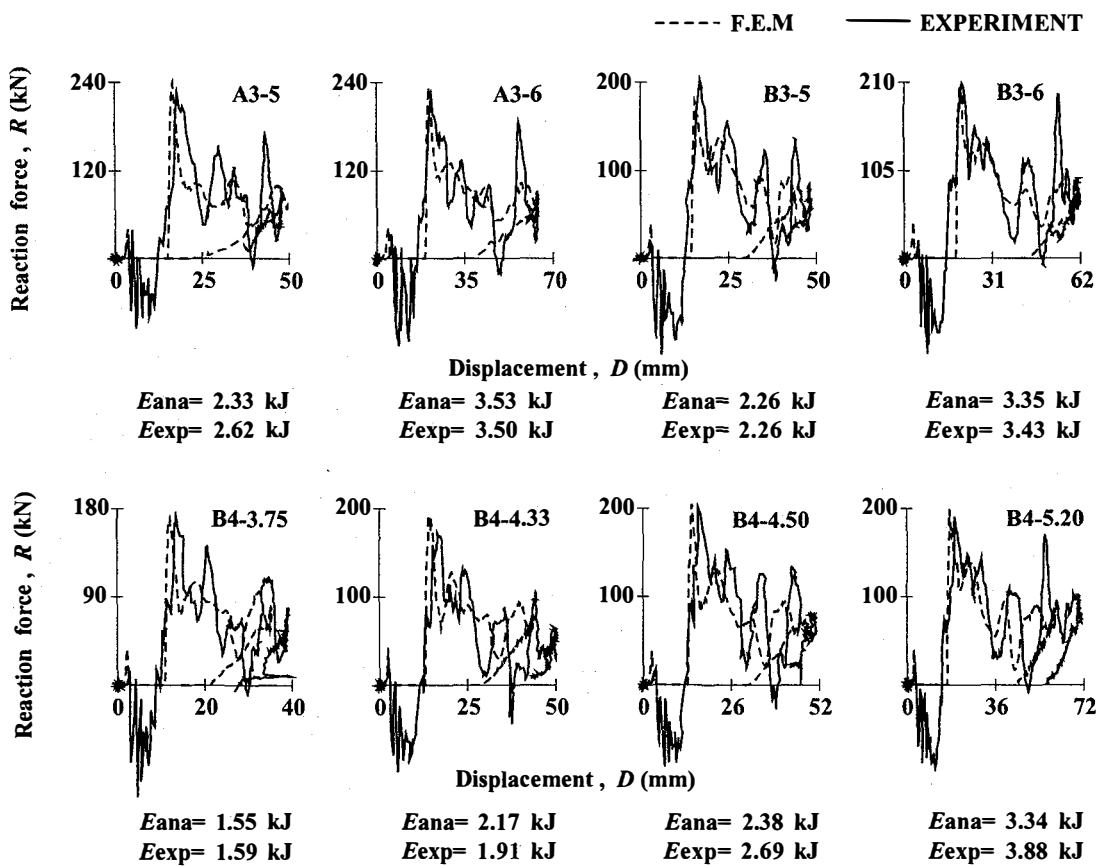
#### 4.3 重錘衝撃力/支点反力と変位に関する履歴曲線

ここでは吸収エネルギー量および重錘衝撃力波形や支点反力波形と変位波形間の位相差を含めた比較が可能な履歴曲線に着目し、比較検討を行うものとする。

図-8には、全試験体の重錘衝撃力-変位履歴曲線 ( $P-\delta$  曲線) および支点反力-変位履歴曲線 ( $R-\delta$  曲線) の数値解析結果と実験結果を比較して示してい



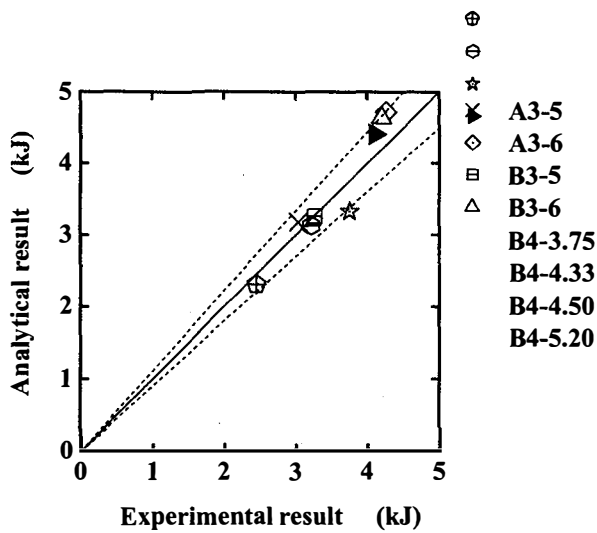
(a) 重錘衝擊力-変位曲線 ( $P-\delta$  曲線)



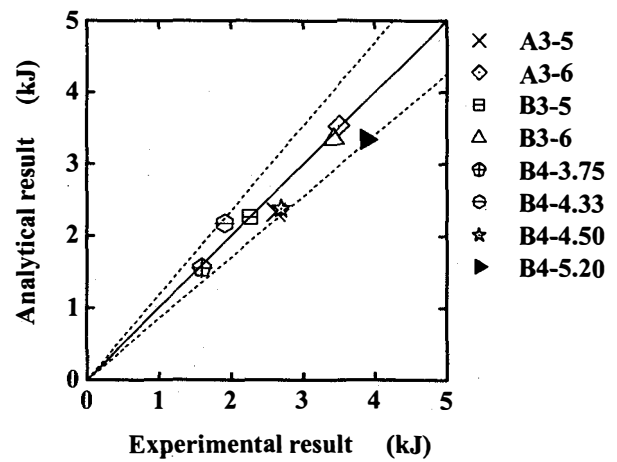
(b) 支点反力-変位曲線 ( $R-\delta$  曲線)

図-8 重錘衝擊力/支点反力-変位履歴曲線の比較





(a) 重錘衝撃力を用いる場合



(b) 支点反力を用いる場合

図-9 吸収エネルギー量に関する比較

る。また、各図の下側には、ループで囲まれる面積として評価される吸収エネルギー量を示している。ここで、 $E_{ana}$  および  $E_{exp}$  は、それぞれ数値解析結果、実験結果に基づいて算出した吸収エネルギー量である。

図-8(a)の  $P-\delta$  曲線について見ると、いずれの試験体も衝撃初期に励起される第1ループとその後出現する第2ループから構成される分布を示しており、数値解析結果と実験結果ではほぼ同様の分布性状を示していることが分かる。すなわち、第1、第2ループの各ピーク値、周期および最大応答変位の大きさまでよく対応した性状を示している。また、両結果の吸収エネルギー量に関してもほぼ同等の値が示されている。

次に、図-8(b)の  $R-\delta$  曲線について見ると、両波形とも、衝撃初期の負反力状態を除き立ち上がり勾配から最大応答値を示す点までの分布性状に関しては、比較的よく対応していることが分かる。また、最大応答値発生以降では周期や振幅の大きさに差異が現れるものの、最大応答変位や吸収エネルギー量は、両者よく対応している。以上より、本数値解析手法を用いることにより、重錘衝撃力-変位曲線および正載荷状態の支点反力-変位曲線に関する分布性状は、重錘衝撃力および支点反力と変位間の位相差も含め実験結果を比較的精度よく再現できることが明らかになった。

#### 4.4 吸収エネルギー量

図-9には、全試験体の  $P-\delta$  曲線および  $R-\delta$  曲線から求まる吸収エネルギー量を、数値解析結果と実験結果と比較して示している。図中の実線は、数値解析結果と実験結果が一致する値を、破線は両者の誤差幅を表している。

図-9(a)より、 $P-\delta$  曲線から評価される吸収エネルギー量は、数値解析結果と実験結果との差が全て10%以下を示しており、両者で非常によく対応している

ことが分かる。

図-9(b)の  $R-\delta$  曲線においても、実験と数値解析での評価されるエネルギー量の差は全て15%以下となっており、支点反力を用いて評価した吸収エネルギー量に関しても、本数値解析手法で十分シミュレート可能であることが明らかとなった。

#### 4.5 RC 梁側面のひび割れ分布特性

数値解析において、コンクリート要素は負圧力がカットオフ値に達すると、要素にひび割れが発生したと見なされ、引張応力が零レベルまで除荷される。従って、コンクリート要素の第1主応力が零応力を示している場合にはその要素にひび割れが発生している可能性のあることを意味している。ここでは、このようにして得られる解析的ひび割れ分布予測と実際の実験により得られたひび割れ分布の比較を試みた。

過去の数値解析的研究<sup>12)</sup>から、実験終了後に観察されるひび割れ分布は、応答変位が最大応答値近傍に達した時点で形成されることが明らかとなっている。図-10には、全試験体における最大変位発生時近傍の第1主応力分布と実験終了後のコンクリートのひび割れ分布を合わせて示している。図中のグレースケールの等色分布図はスパン中心軸に対して左右に展開して示している。ここでは零応力を強調し、ひび割れの発生領域が明瞭に示されるように等色レベルを設定している。白色分布は第1主応力が零応力であることを表しており、大きな応力が発生する領域においてはひび割れが発生している状態を意味している。なお、黒色の実線は実験結果を表しており、斜線部はコンクリートの剥離を表している。

図より、各試験体の実験結果を見ると、いずれの試験体にも載荷点から梁下部に向かって斜めに発生するひび割れとスパン全体にわたって発生している曲げひび割れが確認できる。また、RC梁上部が鉄筋に沿う形でひび

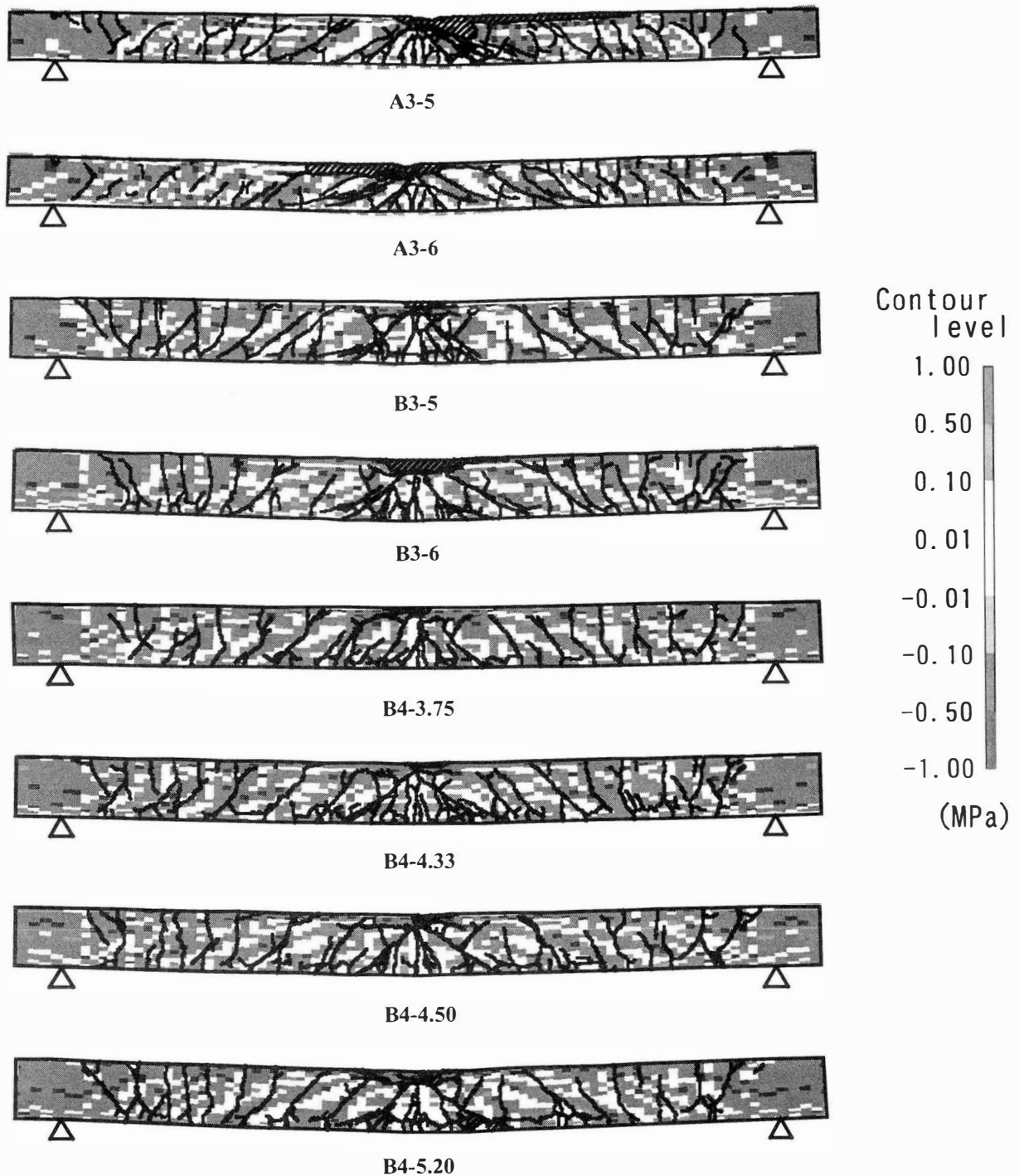


図-10 最大変位発生時近傍の第1主応力分布と実験終了後のコンクリートのひび割れ分布

割れが発生し剥離する傾向も見うけられる。

本数値解析より予測されるひび割れ分布は、各条件に対するRC梁の実験終了後のひび割れ分布に対して、曲げひび割れの本数、発生箇所および発生範囲において比較的類似しており、ひび割れ分布に関する実現象をほぼ再現できることが明らかになった。

以上より、ひび割れ分布に関する本評価手法は、軽量コンクリート製の曲げ破壊型RC梁に対しても、比較的精度よく推定できることが明らかとなった。

## 5. まとめ

本研究では、高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型RC梁の耐衝撃挙動を精度よく評価可能な簡易かつ合理的な数値解析手法の確立を目的として、高性能軽量コンクリート製曲げ破壊型RC梁に対する三次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を試みた。本解析手法の妥当性検討は、別途実施した重錘落下衝撃実験の結果と比較することにより行った。本研究より得られた結果を

要約すると、以下のとおりである。

- 1) 重錘落下衝撃を受ける RC 梁の重錘衝撃力波形および正載荷状態における支点反力波形は、本数値解析手法により精度よく推定可能である。また、変位波形も、残留変位成分を若干過小評価する場合もあるが、除荷後の減衰自由振動状態における振動周期を含め比較的良好な精度で推定できる。
- 2) 本数値解析を用いることにより、最大重錘衝撃力は 20 % 程度の誤差幅で、また最大支点反力および最大応答変位は 15 % 程度以下の誤差幅で評価可能である。
- 3) 重錘衝撃力-変位履歴曲線、正載荷状態における支点反力-変位履歴曲線の分布性状は、重錘衝撃力および支点反力と変位間の位相差も含め本数値解析結果と実験結果で比較的良好に対応している。
- 4) 本数値解析手法を用いることにより、吸収エネルギー量は、重錘衝撃力を用いる場合には 10 % 以下の誤差幅で、支点反力を用いる場合には 15 % 以下の誤差幅で評価可能である。
- 5) 1)~4) より、普通コンクリート製曲げ破壊型 RC 梁の衝撃応答解析のために提案した数値解析手法を用い、かつ適切な要素分割を施し、コンクリートの実測引張強度を考慮することで、高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃挙動が大略評価可能である。

**謝辞**：本研究を行うにあたり、室蘭工業大学大学院構造力学研究室の小坂剛君、千葉潤一君に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 井元勝慶，大野友則，佐々木晃，小暮幹太：重錘落下衝突を受ける RC はり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性，構造工学論文集，Vol.41A，pp.1201-1212，1995。
- 2) 岸 徳光，三上 浩，小室雅人，松岡健一：弾塑性衝撃応答解析法の RC 梁への適用性，構造工学論文集，Vol.43A，pp.1579-1588，1997。

- 3) 中田吉彦，榎谷 浩，梶川康男，森嶋芳大：個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1761-1722，1998。
- 4) 柴田俊文，三上 隆，須藤敦史，村井伸康：衝撃力が作用する RC 梁の一次元弾性応答特性，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.13-16，2000。
- 5) 土木学会構造工学委員会，衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会：第 II 編委員会経過報告，5. ラウンドロビン・プレナリスの実施要領および経過報告，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.82-111，2000。
- 6) 岸 徳光，三上 浩，松岡健一，安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析，土木学会論文集，No.619/I-47，pp.215-233，1999。
- 7) 岸 徳光，三上 浩，安藤智啓，小林竜太：重錘落下衝撃荷重を受ける RC 梁の弾塑性応答解析，土木学会北海道支部論文報告集，第 55 号 (A)，pp.30-35，1999。
- 8) 竹本伸一，岸 徳光，田口史雄，安藤智啓：高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁に関するエネルギー一定則の検証実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp. 1483-1488，2002。
- 9) 岸 徳光，安藤智啓，竹本伸一，松岡健一：断面寸法の違いが高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃性状に与える影響，土木学会北海道支部論文報告集，第 58 号 (A)，pp.284-287，2002。
- 10) John O Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Livermore Software Technology Corporation，2001。
- 11) コンクリート標準示方書（平成 8 年制定）設計編，土木学会，1996。
- 12) 岸 徳光，三上 浩，安藤智啓，松岡健一：せん断補強筋を有するせん断破壊型 RC 梁の衝撃挙動に関する数値シミュレーション，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1555-1565，2002。

(2002年9月13日受付)