

重錘落下を受けるせん断補強筋を有するせん断破壊型 RC 梁の衝撃応答解析

IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF SHEAR-FAILURE-TYPE RC BEAMS WITH SHEAR REBARS
DUE TO A STEEL-WEIGHT FALLING

三上 浩*, 岸 徳光**, 安藤智啓***, 松岡健一**

Hiroshi MIKAMI, Norimitsu KISHI, Tomohiro ANDO and Ken-ichi G. Matsuoka

*博(工) 三井建設(株) 主席研究員 技術研究所 (〒270-0132 流山市駒木 518-2)

**工博 室蘭工業大学 教授 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 施設構造研究室 (〒229-0006 相模原市淵野辺 2-9-54)

キーワード: 衝撃応答解析, せん断破壊型 RC 梁, 衝撃挙動, 重錘落下

(impact response analysis, shear-failure-type RC beams, impact behavior, steel-weight falling)

1. はじめに

鉄筋コンクリート梁 (RC 梁) の衝撃挙動に関する数値解析的研究は, 静載荷時の設計概念に基づき主に曲げ破壊型 RC 梁に着目して各研究機関で実施されてきた^{1)~4)}. 著者等もこれまで断面寸法やスパン長が異なる曲げ破壊型 RC 梁に関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, 解析結果の妥当性を実験結果と比較する形で検討してきた. その結果, 曲げ破壊型 RC 梁の衝撃現象を精度良くシミュレート可能な簡易な構成則を用いた数値解析手法を提案するまでに至っている⁵⁾.

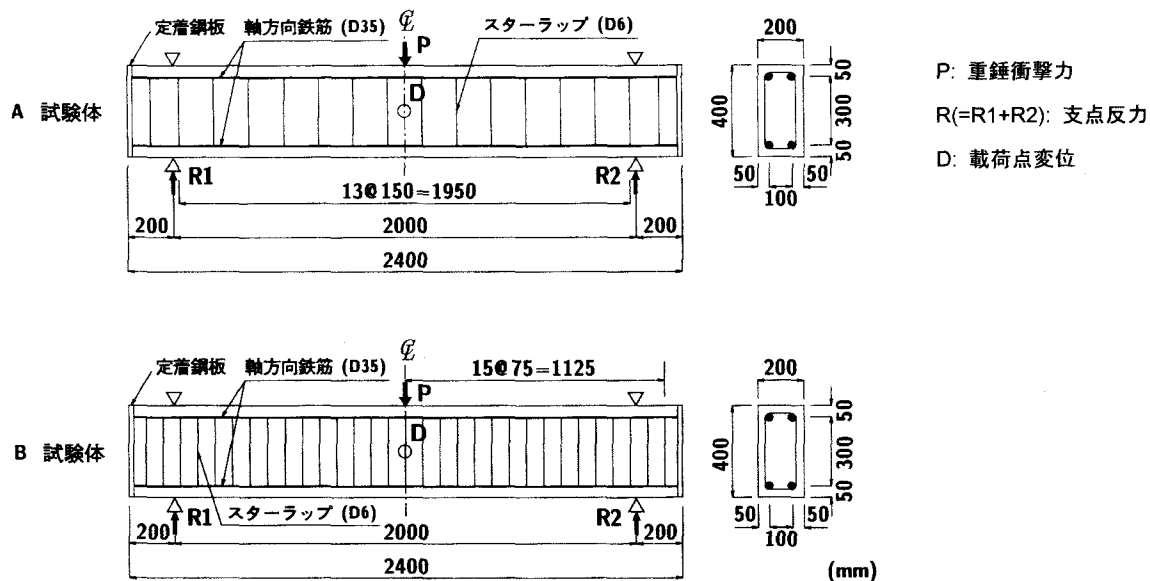
一方, 平成4年に発生した北海道日高支庁様似町での岩塊崩落では, 落石覆道の海側柱部にせん断ひび割れが生じる被害をもたらした. これは, 衝撃荷重載荷時には RC 部材がせん断破壊する危険性を有していること, また, 衝撃荷重載荷時においても RC 部材は常に曲げ耐力以上のせん断耐力を確保しなければならないことを再認識させる災害であった. これより, RC 部材の合理的な耐衝撃設計法を確立するためには, 衝撃荷重載荷時の曲げ耐力のみならずせん断耐力評価法を確立することが肝要であるものと判断される. また, その確立に向けての検討には, 実験的方法は勿論のこと数値解析的方法の援用の下に効率的に実施されなければならない.

このような観点より, 本研究ではせん断破壊型 RC 梁の衝撃挙動を適切に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, せん断補強筋量の異なる2種類のせん断破壊型 RC 梁に着目し, 三次元有限要素法に基づいた弾塑性衝撃応答解析を試み, その妥当性について検討を行った. 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形で行うこととした. また, 本数値解析には, 基本的に著者等が曲げ破壊型 RC 梁の場合に提案した数値解析手法と同様の手法を採用している. なお, 解析には一般に市販されている衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA (Ver.950) を用いている.

2. 実験概要

図-1には本数値解析の対象とした RC 梁模型の形状寸法を測定項目と合わせて示している. 試験体は, いずれも断面寸法 200×400 mm, 純スパン長 $L=2.0$ m 複鉄筋矩形 RC 梁である. A, B 試験体はスターラップ間隔をそれぞれ 150 mm および 75 mm に配置したものである. なお, 軸方向鉄筋は梁端面で厚さ 22 mm の定着鋼板に溶接・定着されている. 実験は, RC 梁のスパン中央部に質量 400 kg, 直径 200 mm (載荷点部直径は 150 mm) の円柱状鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行っている. 支点部には, 重錘衝突時の梁の跳ね上がりを防止するために鋼製治具を用いて梁の上下を固定している. また治具全体は, RC 梁の回転のみを許容するピン支持に近い支持状態となっている.



図－１ RC 梁の形状寸法および配筋状況

表－１ 試験体の一覧

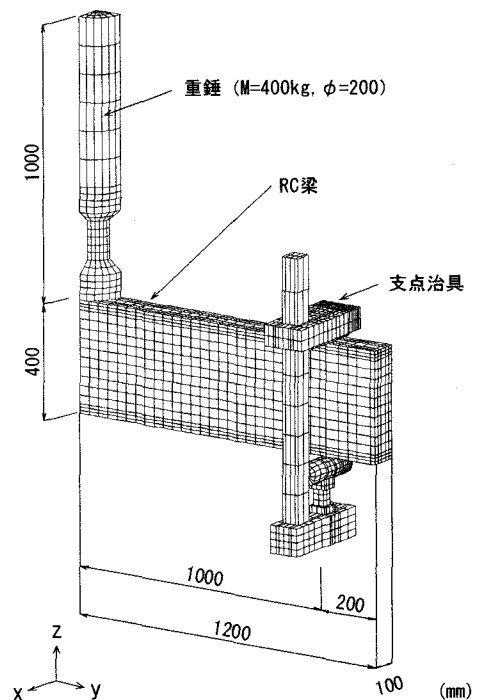
試験体名	せん断補強筋比 p_s	静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	衝突速度 V (m/s)
A37－A84	0.0021	254	3.7, 4.6, 5.6 6.5, 7.4, 8.4
B37－B93	0.0042	343	3.7, 4.6, 6.5 7.4, 8.4, 9.3

表－２ コンクリートの力学的特性値

実験時材令 (日)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
37	41.2	25.7	0.19

表－３ 鉄筋の力学的特性

名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D35	SD345	373	206	0.3
D6	SD295A	365		



図－２ 有限要素モデルの一例（B 試験体）

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 、支点反力 R ($R1$ と $R2$ 合算値) および梁側面中央部における載荷点変位 D (以後、単に変位) に関する各応答波形である。ここで、 P および R の測定には起歪柱型ロードセル (それぞれ容量 1,960 kN, 1,470 kN) を、 D の測定には非接触式レーザ変位計 (容量 200 mm) を用いている。

表－１には、本数値解析で対象とした試験体の一覧を示している。表中、試験体名は梁タイプと衝突速度を組み合わせで示している。なお、実験時におけるコンクリートおよび鉄筋 (軸方向鉄筋, スター

ラップ) の力学的特性値は、表－２, ３に示すとおりである。

３. 解析条件および仮定

３.１ 数値解析モデル

図－２には、B 試験体に関する全体の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スパン方向および断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。適用した要素タイプは、8 節点あるいは 6 節点の三次元固体要素である。しかしな

がら、スターラップ要素には、要素サイズが他の要素と比較して小さく解析所要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した。なお、要素の積分点数は1点積分を基本としているが、軸方向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ため、解析精度を考慮して8点積分としている。

コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面一面間の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリートと軸方向鉄筋およびスターラップの要素間には、完全付着を仮定している。RC 梁に作用する衝撃荷重は、重錘要素の全節点に実験と対応した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 梁に衝突した時点から RC 梁がほぼ定常状態に至るまでの 80 ms 間とした。

3.2 材料物性モデル

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、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と仮定して、完全弾塑性のバイリニア型にモデル化した。なお、降伏応力には圧縮強度 f_c を、また引張側の破壊圧力には降伏応力の $1/10$ を仮定した。降伏の判定には von Mises の降伏条件を採用している。

一方、軸方向鉄筋およびスターラップ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 σ_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、材料試験結果に基づき表-3 に示す値を採用している。降伏の判定は、前述のコンクリートモデルと同様に von Mises の降伏条件に従うこととし、塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の 1% と仮定した。その他の要素(重錘、支点治具および定着鋼板)に関しては弾性体モデルを適用し、弾性係数、ポアソン比にはそれぞれ $E = 206\text{ GPa}$, $\nu = 0.3$ を用いている。

4. 解析結果と実験結果の比較

4.1 重錘衝撃力、支点反力、変位波形の比較

図-3 には、A, B 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。これらの応答波形に関する検討は、紙面の都合により、A, B 試験体各3体ずつに着目して行うこととする。なお、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-3(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方で非常に良く対応していることがわかる。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-3(b) の支点反力波形 R について見ると、ここでも、数値解析結果と実験結果は両方で比較的良く対応していることがわかる。すなわち、実験結果では半周期が 10 ms 前後の波形成分と、周期が約 3 ms の波形成分が合成されたような分布性状を示している。図より、数値解析結果は約 3 ms 周期を有する波形成分の振幅には若干の差異が見られるものの、波形の立ち上がりから減衰に至るまで実験結果と大略類似の分布性状を示していることがわかる。

図-3(c) の変位波形 D に関して見ると、最大応答値に至る状態までは、波形の立ち上がり勾配や最大応答値が数値解析結果と実験結果で比較的良く対応していることがわかる。一方、最大応答値発生時以降に関しては、実験結果の波形の振動振幅は解析結果よりも大きく示されている。解析結果においても振動傾向が示されているもののその振幅は小さい。特に衝突速度の大きい場合の解析結果は、著しい減衰傾向を示した後、正方向にドリフトした状態ではほぼ直流成分のみの状態となっている。この状態は、RC 梁に残留変位が生じていることを意味している。なお、解析結果において振動振幅がそれほど大きく示されない理由は、コンクリートと軸方向鉄筋間を完全付着として仮定していることや、ひび割れを離散化した形で評価していないこと等の原因が考えられるが、この点に関しては今後さらに検討を加え明らかにしていきたいと考えている。一方、残留変位値に関しては、A46, B46 試験体を除き両者でほぼ対応していることがわかる。

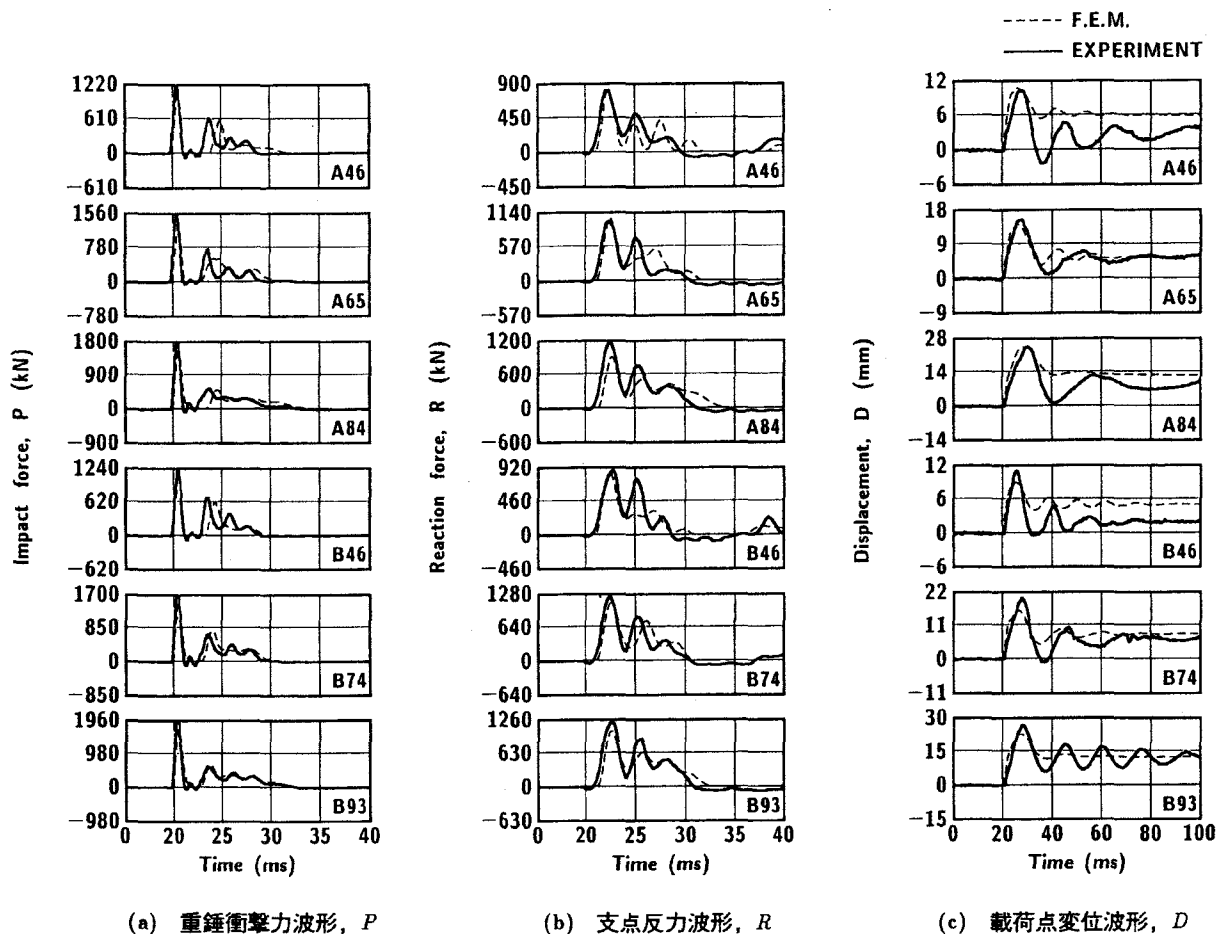


図-3 重錘衝撃力, 支点反力, 載荷点変位に関する各応答波形の比較

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 RC 梁の重錘衝撃力波形および支点反力波形は精度良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, ピーク後の振動状態を除くと, 比較的良く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の比較

図-4には, 全試験体の重錘衝撃力, 支点反力および載荷点変位波形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, 数値解析結果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-4(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も 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わかる。

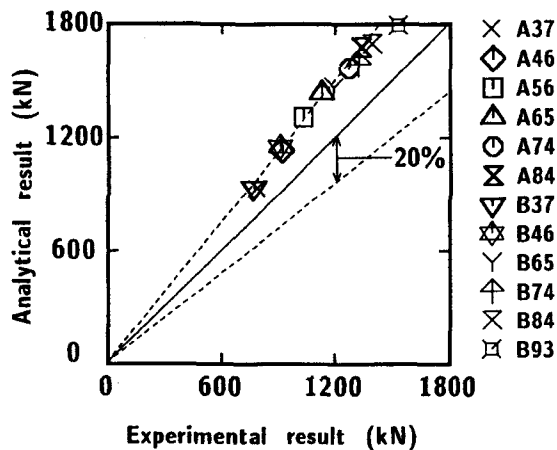
一方, 図-4(b)の最大支点反力に関しては, 衝突速度の大きい A84 および B84 試験体の数値解析結果と実験結果との差が, 他試験体の場合に比べて若干大きく示されている。しかしながら, これらの試験体に関する差は 15 % 程度であることより, 解析結果は実験結果を比較的精度良く評価しているものと判断される。

図-4(c)の最大応答変位に関しては, 解析結果と実験結果との差は, いずれの試験体においても 15 % 程度以下であり, 両結果の差はここでも小さく示されている。

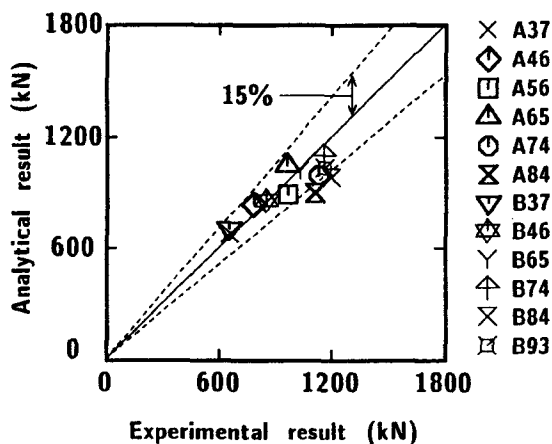
以上より, 本数値解析手法を用いることにより, 最大重錘衝撃力は 20 % 以下の誤差幅で設計的に安全側で評価可能であることが明らかになった。また, 最大支点反力および最大応答変位は, 15 % 以下の誤差幅で評価可能であることが明らかとなった。

4.3 RC梁側面のひび割れ分布特性の比較

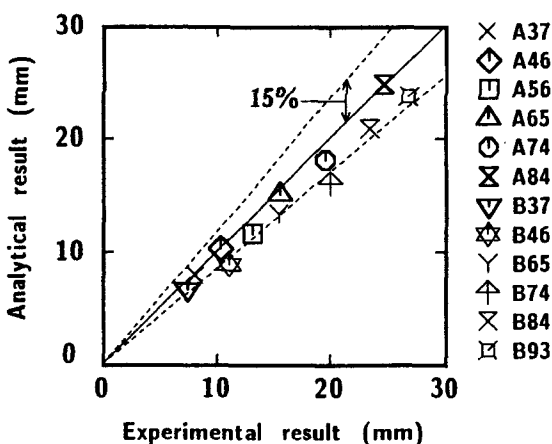
数値解析において, コンクリート要素は前述のように負圧力が破壊圧力値に達すると, 要素にひび割れが発生したと見なされ, 引張応力が零レベルまで



(a) 最大重錘衝撃力



(b) 最大支点反力



(c) 最大応答変位

図-4 各応答波形の最大値の比較

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ひび割れ分布予測と実験より得られるひび割れ分布の比較を試みた。

図-5には、全試験体に関する最大応答変位発生

時における梁側面の第1主応力分布と実験終了後のRC梁側面に発生したひび割れ分布を比較して示している。図中、数値解析結果において、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、大きな応力の発生が予想される領域においては、ひび割れが発生している状態を意味している。一方、実験結果は、ひび割れパターンを黒色の実線を用いて示している。また、実験結果のひび割れ分布に見られる斜線部分は、コンクリートが剥離したことを示している。

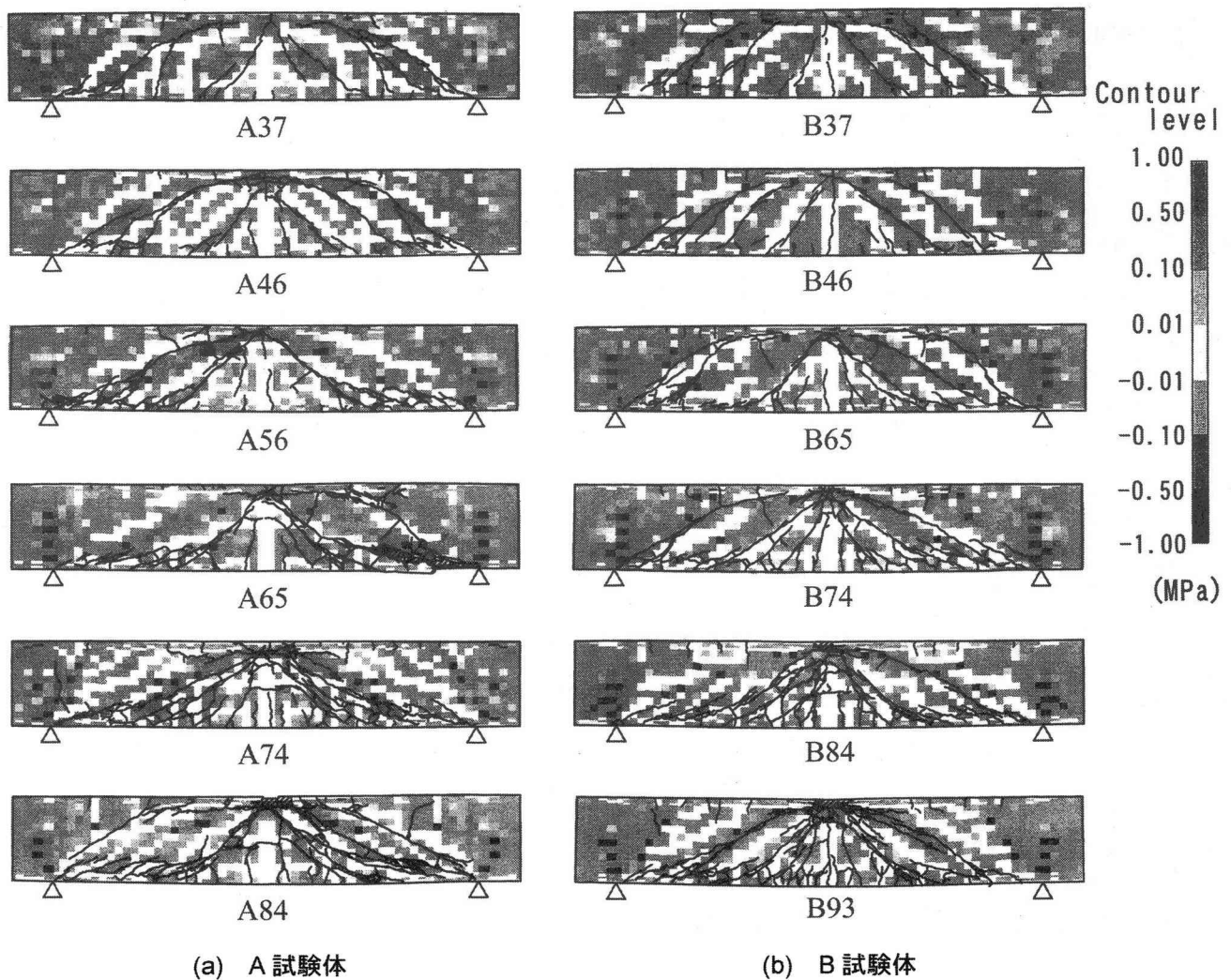
図より、各試験体の実験結果を見ると、いずれの試験体も荷重点部から両支点部に向かい明瞭な斜めひび割れの発生していることがわかる。また、 45° 程度の角度で荷重点部と梁下縁を貫通する斜めひび割れも見られる。さらに、このような斜めひび割れの発生位置から、下端鉄筋に沿った形で進展する割裂ひび割れも発生している。これは、コンクリート内に斜めひび割れが発生し、かつせん断補強筋の塑性化が進行する段階で、斜めひび割れ発生位置近傍における下端鉄筋のだぼ作用が顕在するためと推察される。なお、梁スパン中央部には曲げひび割れも励起されている。数値解析より予測されるひび割れ分布は、このような実験終了後のひび割れ分布を非常に良く再現していることがわかる。

以上より、ひび割れ分布に関する本評価方法は、RC梁が斜めひび割れに伴う脆性的なせん断破壊を生じる場合に対しても、比較的精度良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、せん断破壊型RC梁の衝撃挙動を適切に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、三次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を試み、実験結果と比較する形で本解析結果の妥当性について検討した。本研究結果を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 重錘落下を受けるRC梁の重錘衝撃力波形および支点反力波形は、本数値解析手法により精度良く推定可能である。また、荷重点変位波形も、ピーク後の振動状態を除くと比較的良い精度で推定できる。



図－5 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

- 2) 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 % 以下の誤差幅で，また最大支点反力および最大載荷点変位は，15 % 以下の誤差幅で評価可能である。
- 3) 実験終了後に観察される RC 梁のひび割れ分布は，最大応答変位発生時近傍における RC 梁の第1主応力分布を算定することにより，最終的に発生するせん断ひび割れ分布が推定可能である。
- 1) ～ 3) より，せん断補強筋を有する場合に関しても，基本的に著者らが曲げ破壊型 RC 梁の場合に提案した数値解析手法を用いることにより，その衝撃挙動が十分評価可能である。

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) 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。