

I-12

重錘落下衝撃荷重を受ける RC 梁の弾塑性応答解析

室蘭工業大学 正員 岸 徳光
 三井建設(株) フェロー 三 上 浩
 室蘭工業大学 正員 安 藤 智 啓
 室蘭工業大学 ○学生員 小 林 竜 太

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート(RC)構造物の衝撃挙動を把握するための数値解析手法に関する研究が各機関で盛んに行われており、その成果として幾つかの衝撃応答解析手法が開発され公表されている¹⁾。しかしながら、衝撃的な外力を受ける RC 構造物の動的挙動解析には、応力波の波動伝播問題や大変形問題、接触処理問題、構成材料特性に及ぼす歪速度効果の影響等、解明すべき幾つかの課題が残されており耐衝撃設計に反映可能な汎用性のある数値解析手法が未だ十分に確立されていないのが現状である。著者等は、これまで RC 構造物の基本構成部材である RC 梁を対象とし、特に補強筋の材質、鉄筋比および断面寸法が異なる RC 梁に対して、汎用コードに組み込まれている簡易な材料構成則を用いた数値解析を行い、その解析手法の適用性について検討を行ってきた²⁾。その結果、提案している解析手法を用いることにより、変位挙動やコンクリートのひび割れ性状等、実験結果を精度良く再現可能であることが明らかになっている。しかしながら、これまでの研究は特定のスパン長に関するものであり、スパン長の異なる RC 梁に関してはその適用性が必ずしも保証されたものになっていない。本研究では、このような観点から、純スパン長および断面寸法の異なる RC 梁模型を対象とし、重錘落下衝撃実験結果と比較する形で著者等の提案している数値解析手法の妥当性を検討することとした。なお、本数値解析には陽解法非線形動的構造解析コード LS-DYNA を適用している。

2. 実験概要

本研究において数値解析の対象とした RC 梁模型は、図-1に示すような純スパン長および断面寸法が異なる複鉄筋矩形 RC 梁である。試験体は断面寸法が 25×25cm、20×20cm の正方形断面で、各断面タイプとも純スパン長が L=200, 300cm の計4体である。なお、上下端鉄筋は梁端部で厚さ 9mm 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重量 300kgf、直径 20cm (載荷点部直径は 15cm) の円柱状の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。支点部境界には重錘衝突時の梁のリバウンドを防止するために、梁の両端面から 20cm 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、ピン支持に近い境界条件となっている。各 RC 梁に対する重錘落下は、初速度、増分速度を 1m/sec とする漸増繰り返し載荷実験を行い、RC 梁が終局状態に至った衝突速度と同一速度で単一に載荷することとした。ここで終局状態の定義は、梁スパン中央部の累積残留変位量が純スパン長の 2% 程度に至った状態としている。なお、本数値解析では単一載荷実験のみを解析の対象として

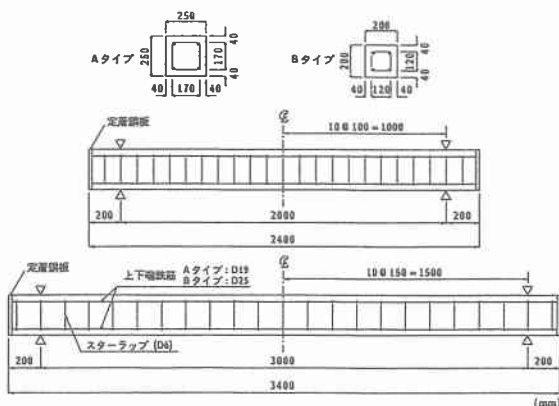


図-1 RC 梁模型の形状寸法および配筋状況

Elasto-Plastic Analysis of RC Beams under Weight Falling Impact Load
 by Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Tomohiro ANDO and Ryuta KOBAYASHI

表－１ 試験体の一覧

試験体名	断面タイプ	純スパン長 L(m)	鉄筋径	主鉄筋比 P _t (%)	載荷速度 V(m/sec)	固有振動周期 T'(msec)
A-L2.0	A	2.0	D19	1.09	6	11.2 (89.3Hz)
A-L3.0	A	3.0	D19	1.09	6	24.0 (41.7Hz)
B-L2.0	B	2.0	D25	3.17	6	12.9 (77.5Hz)
B-L3.0	B	3.0	D25	3.17	6	28.1 (35.6Hz)

いる。実験における測定項目は、図－２に示すように RC 梁側面中央部における応答変位 (D-1～D-5)、上下端鉄筋歪 (U-1～U-5, L-1～L-5)、重錘衝撃力 (P)、支点反力 (R) の４項目である。ここで、変位の測定には容量 200mm の非接触式レーザ変位計を用いており、重錘衝撃力および支点反力の測定には著者等の研究グループによって独自に開発された起歪柱型ロードセルを重錘、支点治具に組み込んで測定を行っている。本数値解析で対象とした試験体の一覧を表－１に示す。表中の試験体名は、第１項が断面タイプ、第２項が純スパン長を表している。また、表中には鉄筋径、主鉄筋比、載荷速度および固有値解析で得られた最低次固有振動周期も併せて示している。なお、コンクリートと上下端鉄筋の力学的特性値を表－２、３に示している。

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 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
36	354	2.75×10^5	0.25

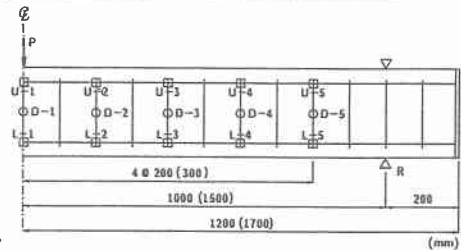
表－３ 上下端鉄筋の力学的特性値

主鉄筋径	材質	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比	降伏強度 (kgf/cm ²)
D19	SD345	2.1×10^6	0.3	3500
D25	SD295			3000

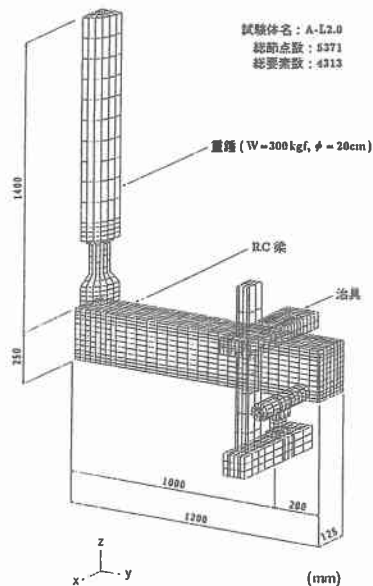
３．数値解析条件および仮定

３.１ 数値解析モデル

図－３は、本数値解析に用いた RC 梁、重錘および支点治具の有限要素モデルの一例 (A-L2.0) である。対象とした解析モデルは、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。支点部のモデル化は、材料構成則以外の影響を出来る限り排除するためリバウンド防止用の治具を忠実に再現するよう配慮した。重錘は全長を 140cm、直径を 20cm の円柱近似の多角柱にモデル化している。RC 梁に作用する衝撃荷重は、この重錘要素の全節点に対して所定の載荷速度を付加する形で入力している。なお、上下端鉄筋は断面積が等価な矩形断面に簡略化してモデル化を行った。有限要素モデルの総節点数・総要素数は、各ケースで多少異なるが、図－３に示す試験体 A-L2.0 の場合でそれぞれ 5371、4313 である。本数値解析で適用した要素タイプは、コンクリート、上下端鉄筋、重錘、支点治具および定着鋼板の要素に対しては、６節点あるいは８節点の３次元固体要素を用いている。しかしながら、スターラップ (D6) 要素に関しては、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でモデル化を行った。



図－２ 測点名および測定位置



図－３ 有限要素モデルの一例 (A-L2.0)

境界条件は、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成分および対称軸に関する回転成分を拘束している。また、支点治具底部に関しては x 軸に関する回転を拘束しないように梁軸方向中心線上の節点のみをピン支持としている。なお、上下端鉄筋要素を除いた全ての要素は解析時間を短縮するため 1 点積分としているが、上下端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の確保を考慮して完全積分法を採用することとした。要素間の接触に関しては、コンクリートと重錘、支点治具の要素間に面一面間の接触・剝離を伴う滑りを考慮した接触面を定義することで処理している。また、コンクリートと上下端鉄筋およびスターラップの要素間は完全付着を仮定し、付着破壊による鉄筋の滑り等は考慮しないものとした。全数値解析時間は重錘が RC 梁に衝突した時刻から梁の応答変位が十分定常状態に至るまでの 160 msec 間とした。1 ケース当たりの解析所要時間は HP9000/C240 使用で約 5 時間である。なお、数値解析の時間刻みは約 $0.7 \mu\text{sec}$ であった。

3.2 材料物性モデル

本数値解析では、コンクリートや上下端鉄筋に対する弾塑性体モデルとして LS-DYNA に予め組み込まれている簡易な材料

構成則モデルを用いることとした。従って、コンクリートおよび鉄筋の歪速度効果や歪軟化現象等は考慮していない。コンクリート要素に用いた物性モデルは、圧縮側に対してはバイリニア近似による応力-歪関係、引張側に対してはカットオフ圧力に達した段階で引張力を伝達しないとする引張破壊を考慮した弾塑性体モデルである。ここでは、表-2 に示す力学的特性値に基づき 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完全弾塑性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を仮定し、引張側の破壊圧力は降伏応力の $1/10$ とした。降伏の判定は von Mises の降伏条件に従うこととしている。一方、上下端鉄筋要素に用いた物性モデルは、降伏後の塑性硬化係数を考慮した等方弾塑性体モデルであり、降伏後の挙動には等方硬化則を適用しバウシinger 効果は考慮しないものとしている。降伏の判定は前述のコンクリートモデルと同様 von Mises の降伏条件に従うこととし、塑性硬化係数は弾性係数 E_s の 1% と仮定した。その他の要素（重錘、支点治具、定着鋼板およびスターラップ）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 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.3$ を入力している。図-4 に本数値解析に用いたコンクリートおよび上下端鉄筋の応力-歪特性を图示している。粘性減衰の影響は、過去の研究成果を参考にして、最低次の固有振動周期に対する減衰定数を 5% と仮定し考慮することとした。

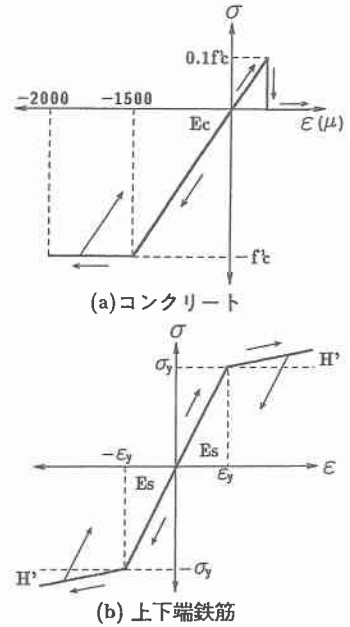


図-4 数値解析に用いた応力-歪特性

4. 各種応答性状に関する数値解析結果と実験結果の比較

4.1 応答変位波形に関する比較

図-5 には、RC 梁の各測定位置における応答変位波形について数値解析結果と実験結果を比較して示している。図より、最大応答変位に着目すると、いずれの試験体においても数値解析結果が実験結果より若干小さく示されている。しかしながら、その差は最大でも試験体 A-L2.0 の測定点 D-2 で 7mm 程度であり、数値解析結果は実験結果と比較的良好く一致しているものと判断される。残留変位に着目すると、試験体 B-L3.0 の測定点 D-1 で最大 6mm 程度の差が生じているものの、その他の試験体に関しては数値解析結果と実験結果は精度良く対応していることがわかる。一方、応答波形の分布性状に関しても、波動の立ち上がりの勾配

や除荷後の自由振動性状ともに数値解析結果は実験結果を比較的良好にシミュレートしていることがわかる。これより、本数値解析手法はスパン長が異なる RC 梁に対しても耐衝撃設計において重要な指標となる最大変位量および残留変位量を精度良く推定可能であることが明らかとなった。

4.2 上下端鉄筋歪波形に関する比較

図-6 は、上下端鉄筋に関する応答歪波形について数値解析結果と実験結果を比較して示している。ここでは紙面の都合により、試験体 B-L3.0 にのみ着目して考察を行うこととする。なお、応答歪波形には衝撃初期において実験値、解析値ともに高周波成分が含まれるため、いずれの応答波形に対しても 2.5 msec の矩形移動平均法による数値的なフィルター処理を行い比較検討を行うこととした。

まず、(a) 図の上端鉄筋歪波形に着目すると、いずれの測定点においても継続時間が 40~50 msec の主波動が励起されており、その後は主として引張領域において 20 Hz 程度の正弦波的な減衰自由振動を示している。これは、前述の応答変位波形における除荷後の自由振動性状にほぼ対応している。定量的には載荷点直下近傍の測定点 U-1, U-2 で最大 600 μ 程度の差が生じているものの、その他の測定点における数値解析結果は実験結果と比較的良好に対応している。

一方、(b) 図の下端鉄筋歪波形に着目すると、載荷点近傍の測定点 L-1, L-2 で 2000 μ 程度の差が生じているが、上端鉄筋歪波形と同様その他の測定点では除荷後の自由振動性状も含め、数値解析結果と実験結果は比較的良好に一致していることがわかる。

以上より、弾塑性状態における上下端鉄筋の歪挙動は、コンクリートのひび割れ位置の影響を大きく受けるため、定量的に算定評価することは困難であるが、本解析手法を用いることにより、動的応答に関する定性的な挙動を把握することは十分可能であることが明らかとなった。

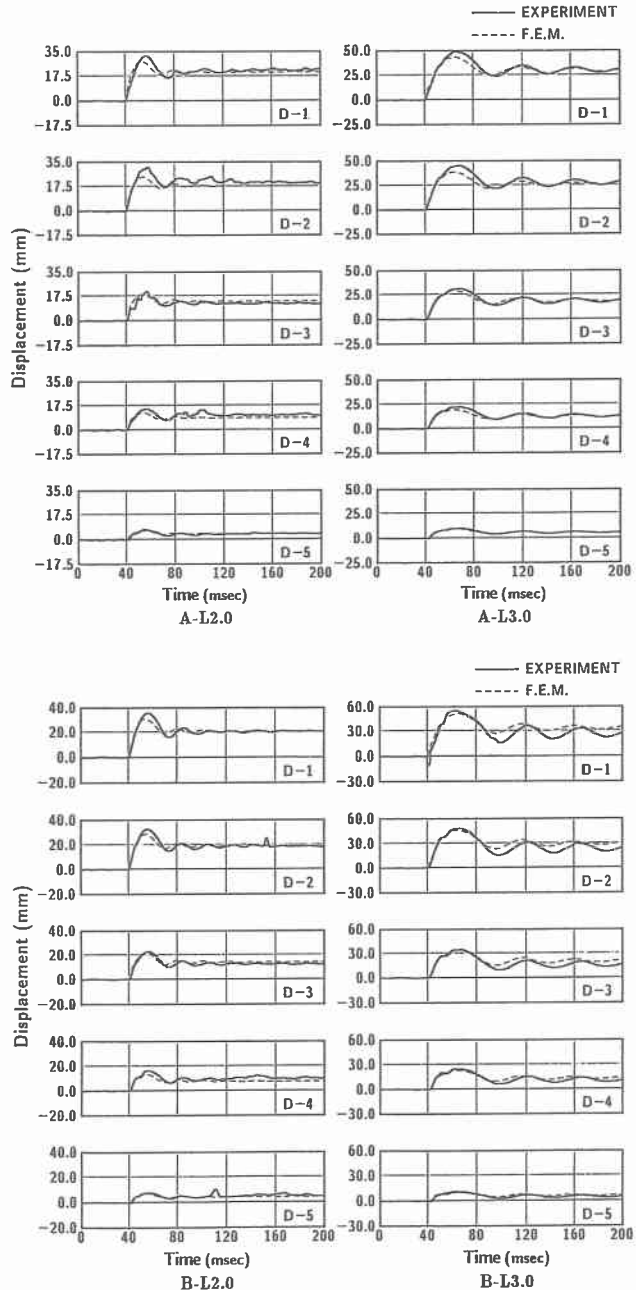


図-5 応答変位波形に関する数値解析結果と実験結果の比較

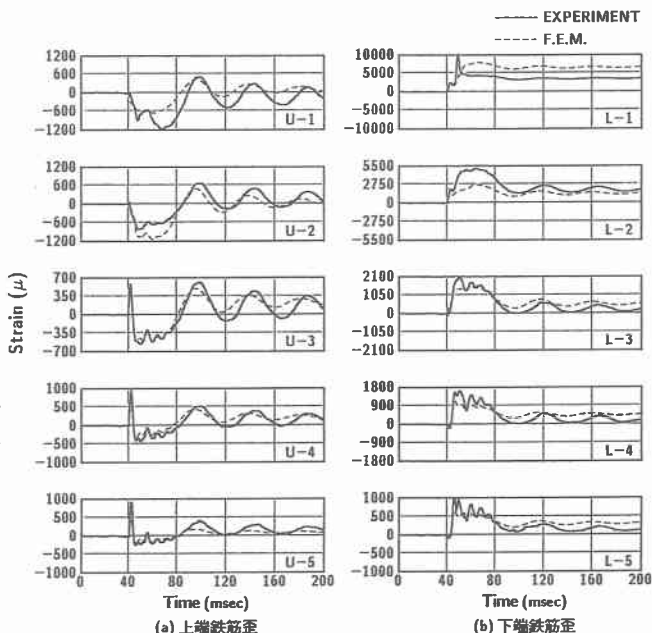
4.3 重錘衝撃力および片側支点反力波形に関する比較

図一 7, 8 には, 重錘衝撃力および片側支点反力波形に関する数値解析結果と実験結果を比較して示している。ここで, 数値解析における重錘衝撃力および片側支点反力は, それぞれ重錘底部要素, 支点ロードセル中央部要素に発生する全軸方向応力を集積することにより算定している。なお, 重錘衝撃力波形は, 他の応答波形に比較して応答時間が短いことや, より高周波成分が卓越していることより, 時間軸を 2 倍に拡大して示している。また, 両波形に対しては主波動に着目した比較検討を行うため, 応答歪波形と同様 2.5 msec の矩形移動平均法による数値的なフィルタ処理を行っている。

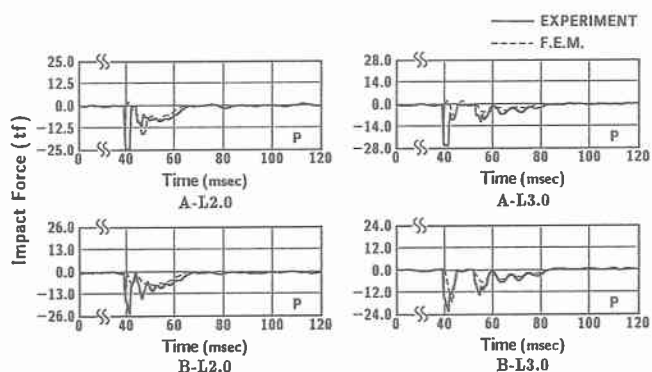
図一 7 の重錘衝撃力波形に着目すると, いずれの試験体に関しても実験結果は初期に立ち上がり急激で継続時間の短い応答を示している。一方, 数値解析結果は試験体 B-L3.0 を除き, そのような応答は再現できていない。しかしながら, 第 2 波目以降の主波動領域に相当する波形性状は比較的良く一致しているものと判断される。特に純スパンの長い試験体 (A-L3.0, B-L3.0) に関する数値解析結果は, 振動性状を含め実験結果を精度良く再現している。

一方, 図一 8 の片側支点反力波形に着目すると, いずれの試験体においても主波動の波形性状, 継続時間および除荷後の振動性状ともに数値解析結果と実験結果は比較的精度良く対応していることがわかる。また, 最大片側支点反力に関しても, 試験体 A-L3.0 で 10% 程度の誤差が生じているが, その他の試験体に関しては良く一致している。

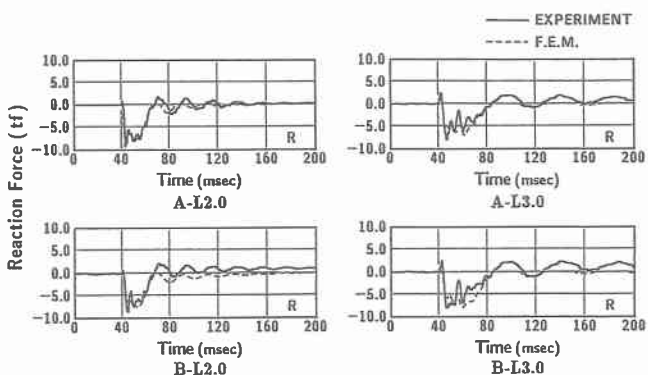
以上より, 本数値解析手法は, 重錘衝撃力波形の高周波領域における波形性状を数値的に精度良く再現することは困難



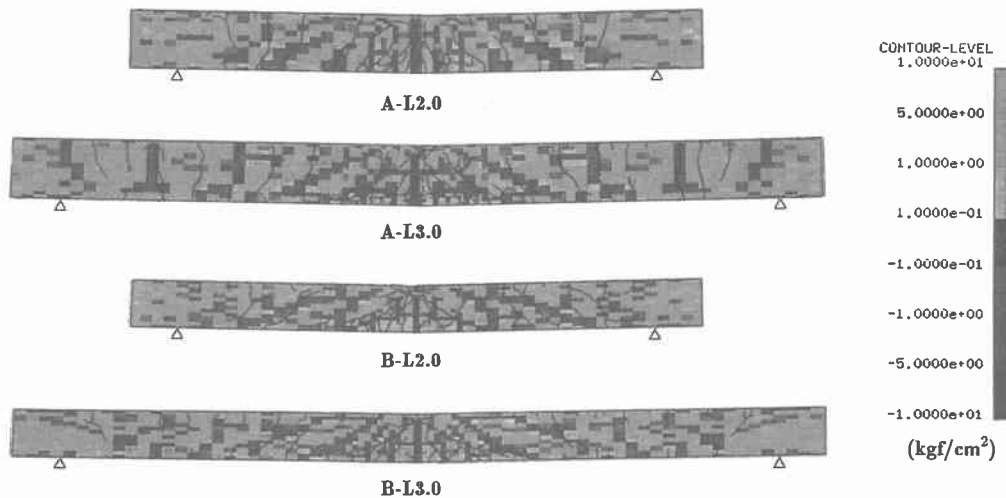
図一 6 鉄筋歪波形に関する数値解析結果と実験結果の比較 (B-L3.0)



図一 7 重錘衝撃力波形に関する数値解析結果と実験結果の比較



図一 8 片側支点反力波形に関する数値解析結果と実験結果の比較



図一 実験終了後のコンクリートのひび割れ分布と最大変位発生時近傍の第1主応力分布

であるが、主波動領域に関しては重錘衝撃力、片側支点反力波形とともに実験結果を比較的精度良く再現することが明らかとなった。

4.4 実験終了後のコンクリートのひび割れ分布と第1主応力分布の関係

図一 9には、RC 梁の最大変位発生時近傍における梁側面の第1主応力分布を実験終了後の RC 梁側面に発生したひび割れ分布と重ねて示している。図は、コンクリート要素の応力を重心点応力で代表させ、かつ零応力（ひび割れが発生しコンクリート要素の応力が解放された状態）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。ここでは、緑色の領域がひび割れの発生箇所を表している。なお、数値解析結果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。図より、いずれの試験体においても、数値解析結果の載荷点直下近傍の曲げひび割れや、梁上端部から斜め下方へ向かうせん断ひび割れの分布は実験結果と比較的良好に対応していることがわかる。また、純スパンの長い試験体 (A-L3.0, B-L3.0) に関する数値解析結果では、実験でみられた支座位近傍における負載荷状態の曲げひび割れ分布も精度良く再現している。以上より、本数値解析手法を用いることにより、正確なひび割れ箇所を特定することは困難であるものの、ひび割れの分布性状等 RC 梁の定性的な特性は十分推定可能であるものと判断される。

5. まとめ

本研究では、重錘落下衝撃を受ける RC 梁のより信頼性の高い衝撃応答解析手法を確立することを目的として、純スパン長および断面寸法が異なる計 4 体の RC 梁模型に対して、従来より提案している数値解析手法を適用した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りその適用性について検討を行った。検討結果、本数値解析手法は実験結果の各種応答性状を比較的精度良く再現可能であり、スパン長が異なる RC 梁に対しても十分適用可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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.
- 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.