

論文 重錘落下衝撃荷重載荷時の RC ラーメン模型に関する弾塑性衝撃 応答解析

西 弘明^{*1}・岸 徳光^{*2}・岡田 慎哉^{*3}・千葉 知子^{*4}

要旨：本研究では、RC ラーメン構造形式の衝撃応答解析手法を確立することを目的として、小型 RC ラーメン模型に重錘落下衝撃荷重を作用させた場合の三次元弾塑性有限要素解析を実施し、実験結果との比較によりその妥当性の検討を行った。その結果、1) 重錘衝撃力波形に関しては、解析結果は実験結果を精度良く再現している、2) 応答変位波形に関しては、最大変位および残留変位値に若干の差異がみられるものの、最大変位発生時刻や自由減衰振動の状態等は良く再現されている、3) ひび割れ性状に関しては、解析結果は柱部のひび割れを若干過小評価しているものの、構造全体の損傷状況を良く再現している、ことなどが明らかとなった。

キーワード：落石防護覆道、RC ラーメン、三次元弾塑性有限要素解析、重錘落下衝撃実験

1. はじめに

我が国の国土、特に北海道は急峻な地形を呈していることから、海岸線や山岳部の斜面に沿って交通網が整備されている箇所が多い。このような地理条件の下に道路網を整備する場合には、可能な限り安全となるルートを選定したうえで、斜面災害に対する対策を講じることが必要である。

道路の斜面災害対策の1つとして、写真-1に示すような落石防護覆道が挙げられる。落石防護覆道は、比較的大きな落石エネルギーに対応した落石対策工であり、沿岸道路や山岳道路などに多数設置されている。

落石防護覆道の断面設計は、現在のところ作用衝撃荷重の最大値を設計基準などに示される衝撃力算定式により求め、これを静的荷重として作用させ、部材の断面力を算定し、許容応力度法の下に設計が行われている¹⁾。過去の被災事例等から、許容応力度法により設計された落石防護覆道は、構造物が大変形を起こし終局状態に至らしめる入力エネルギーに対して大きな安全余裕度を有していることが明らかになっている²⁾。

一方、我が国における土木構造物の設計思想は、限界状態設計法を経て、性能照査型設計法に移行しつつある。このような状況下において、土木学会では耐衝撃設計に関しても性能照査型設計の確立に向けた検討を行っている。著者らは、重錘落下衝撃実験を基に小型 RC 梁を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析の適用性³⁾に関する検討や、さらにはその解析手法を踏襲した場合の実規模 RC 桁への適用性⁴⁾に関する検討を行ってきた。ま



写真-1 落石防護覆道の一例

た、三次元弾塑性応答解析法に基づいた実規模 RC 部材に関する簡易で合理的な衝撃挙動解析法の確立を目的に、要素分割数を低減した場合においても工学的に妥当な数値解析結果を得るための方策として、破壊エネルギー等価の概念を導入し、換算引張強度を評価する手法を提案⁵⁾している。

これらのことより、本研究では落石防護覆道の基本構造となる RC ラーメン構造形式の衝撃応答特性や耐衝撃性能を適切に評価可能な数値解析手法を確立することを目的に、小型 RC ラーメン模型に関する重錘落下衝撃実験を実施し、併せて上述の著者らが提案した衝撃応答解析手法⁵⁾による数値解析を行い、実験結果と比較する形で RC ラーメン構造への適用性に関する検討を行った。検証項目は、重錘衝撃力、ラーメン梁部および柱部の応

*1 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

*3 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 修(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学 工学部建設システム工学専攻 (非会員)



写真-2 衝撃実験状況

答変位、ひび割れ分布性状である。

なお、本研究の弾塑性衝撃応答解析には、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.970)⁶⁾を用いている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に用いた小型 RC ラーメン模型の形状寸法および配筋状況を示している。RC ラーメン模型は、衝撃挙動の把握が比較的容易である梁構造とし、実落石防護覆道断面形状の1/4程度の縮尺模型とした。すなわち、梁部の断面寸法は200×200 mmとし、梁部の純スパンを2,000 mm、柱部の高さは1,500 mmとしている。ラーメン模型の軸方向鉄筋には、実落石防護覆道と同程度の主鉄筋比となるようにD13を4本用い、芯かぶりは40 mmとしている。帯鉄筋には異形鉄筋の最小径であるD6を用い、断面有効高さの1/2である80 mm間隔で配筋している。また、フーチング断面は、可能なかぎり剛構造として柱基部の固定条件が保持されるようにするため、覆道断面方向長さ3,000 mm、覆道軸方向幅800 mm、高さ250 mmとする矩形体とした。なお、フーチング断面中には鋼製のアングル材を埋設するとともに、下面には厚さ9 mmの鋼板を配置している。

2.2 衝撃実験概要

写真-2には、衝撃実験状況を示している。衝撃実験は、RC ラーメン模型のフーチング部を跳ね上がり防

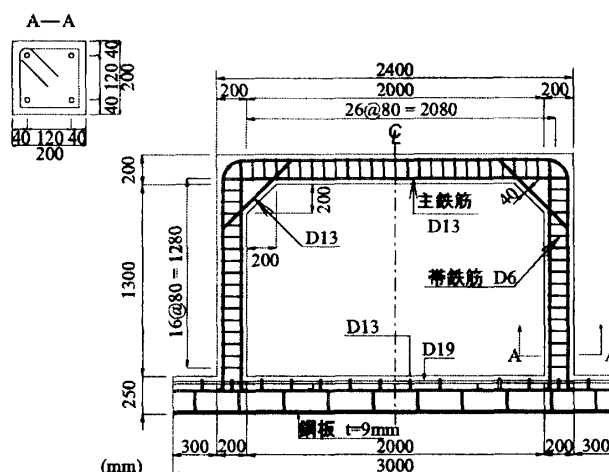


図-1 形状寸法および配筋状況

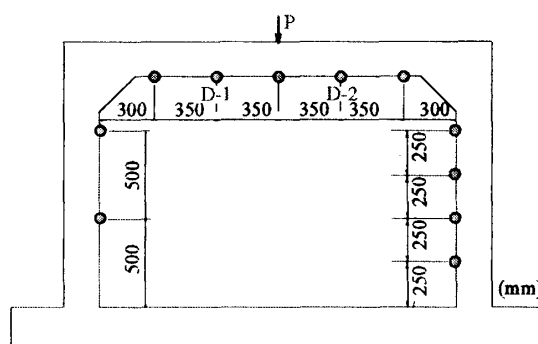


図-2 変位計測位置

止のためにボルトにより固定し、梁部中央位置に所定の高さから鋼製重錘を自由落下させることにより行っている。衝撃荷重載荷方法は、所定の衝突速度で一度だけ載荷する単一載荷とした。本実験では、重錘衝突速度 $V = 4 \text{ m/s}$, 5 m/s , 6 m/s の3ケースについて検討を行った。本論文では、これらの実験ケース名をそれぞれIS-4, IS-5, IS-6と表記する。なお、実験に用いた重錘は、質量が300 kg、衝突部直径が150 mmの円柱状鋼製重錘で、その底部には衝突時の片当たりを防止するために高さ2 mmのテーパーを施している。

計測項目は、重錘衝撃力およびラーメン模型の内側の面における法線方向の変位である。これらの計測にはそれぞれ起歪柱型ロードセルおよび非接触式レーザ変位計を用いた。図-2には、変位計測位置を示している。また、衝撃実験終了後には試験体側面のひび割れをトレースし、ひび割れ分布図を作成している。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル

図-3には、本数値解析で用いた要素分割モデルおよび配筋モデルを示している。

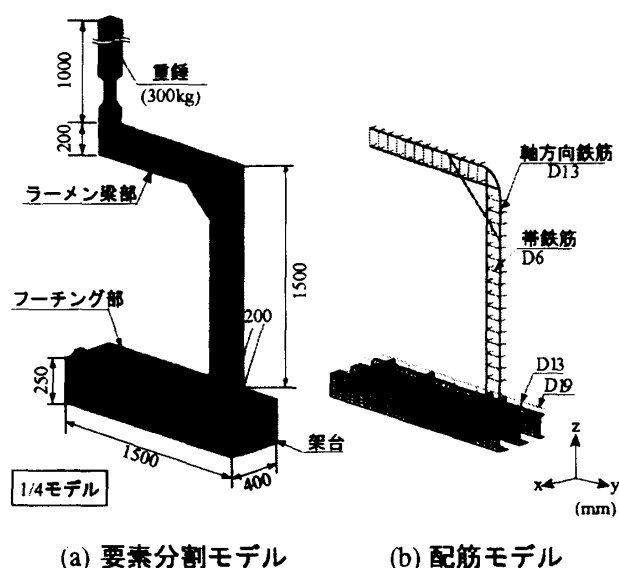


図-3 要素分割モデルおよび配筋モデル

各部材要素において、コンクリート、重錘およびフーチング部には8節点の三次元固体要素を、鉄筋には梁要素を用いてモデル化している。積分点に関しては、三次元固体要素には1点積分を、鉄筋要素には4点積分を用いている。

解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮してスパン方向および断面幅方向にそれぞれ2等分した1/4モデルとした。解析モデルの総節点数、総要素数は、それぞれ34,127、30,784である。境界条件として、架台底面は完全固定、モデルの対称境界面は全て面対称を考慮している。コンクリートと鉄筋の要素間には、完全付着を仮定し、重錘とコンクリート、フーチングと架台、フーチング固定用ボルト穴とボルトの要素間には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。

減衰定数は、質量比例項のみを考慮するものとし、既往の研究³⁾と同様に、鉛直方向最低次固有振動数に対して0.5%と設定している。なお、衝撃力は載荷位置に配置した質量300kgの重錘に初速度を入力することにより与えている。

3.2 材料物性モデル

図-4(a)には、本数値解析で用いたコンクリートに関する相当応力-ひずみ関係を示している。圧縮側に対しては折線近似による相当応力-ひずみ関係、引張側に対しては線形の相当応力-ひずみ関係を仮定し、破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとするモデルを適用している。圧縮側に関しては、ひずみが1,500 μ に達した状態で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。本研究では、圧縮強度試験から得られた圧縮強度 f'_c を圧縮側の降伏応力とした。ま

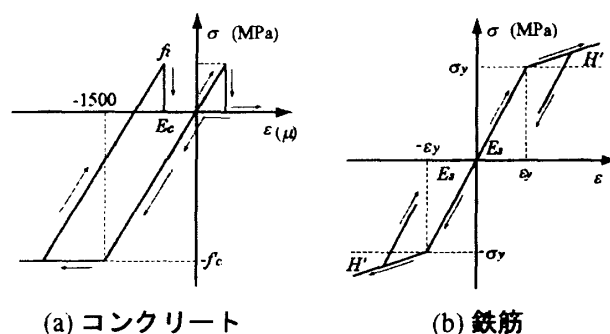


図-4 各材料の応力-ひずみ関係

た、軸方向要素長は試験体寸法や配筋状況等を考慮し、20mmとしてモデル化することとした。ここで、本解析では既往の数値解析結果⁵⁾を参考に、引張強度 f_t に関しては一要素に一本の曲げひび割れが発生するものと仮定し、軸方向基準要素長35mmの場合と等しい破壊エネルギーでひび割れが発生するように要素長に対応した換算引張強度を設定することとした。なお、換算引張強度を用いない解析では既往の検討結果と同様に応答性状が過大になることを確認している。コンクリート要素の物性値は、単位体積質量 $\rho = 2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu = 0.167$ 、圧縮強度 $f'_c = 24 \text{ MPa}$ を仮定し、換算引張強度は $f_{t20} = 3.17 \text{ MPa}$ と設定している。なお、降伏の判定にはDrucker-Pragerの降伏条件式を採用している。

図-4(b)には、鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している。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。塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の1%と仮定している。なお、降伏の判定は、von Misesの降伏条件に従うこととした。鉄筋要素の弾性係数 $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、単位体積質量 $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、降伏応力 $\sigma_y = 380 \text{ MPa}$ を仮定している。なお、フーチング内部の鉄筋に関しては、応答値が弾性範囲内であるものと推察されることより、弾性体として解析を行っている。また、本実験の衝突速度の範囲内では、解析結果の応答性状に与えるひずみ速度効果の影響はないものと判断し、本解析ではこれを考慮していない。

4. 数値解析結果

4.1 重錘衝撃力波形

図-5には、重錘衝撃力波形を実験結果と解析結果を比較する形で示している。縦軸には重錘衝撃力値を、横軸には時間を重錘衝突時点を零として整理している。図中、実線および破線はそれぞれ実験結果および数値解析結果を示している。

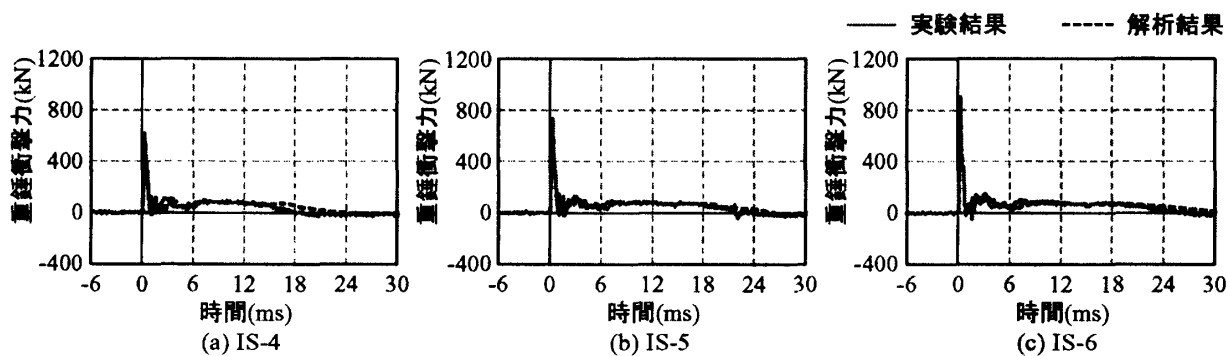


図-5 重錘衝撃力波形

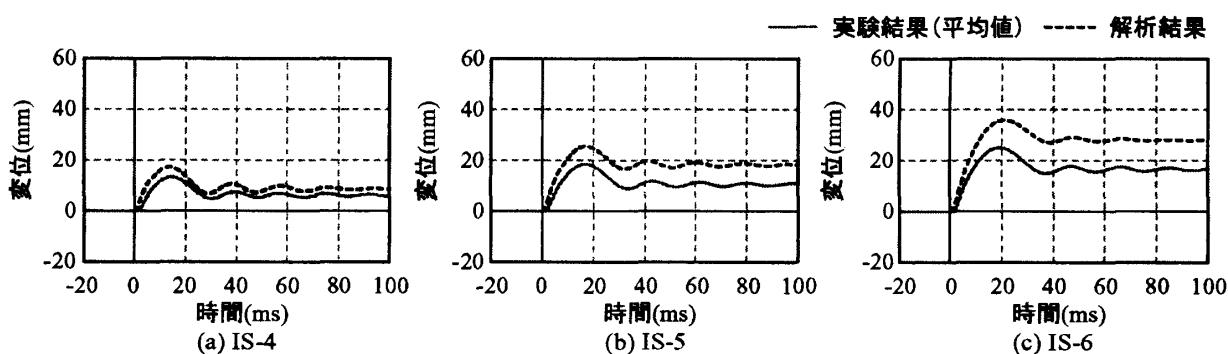


図-6 応答変位波形

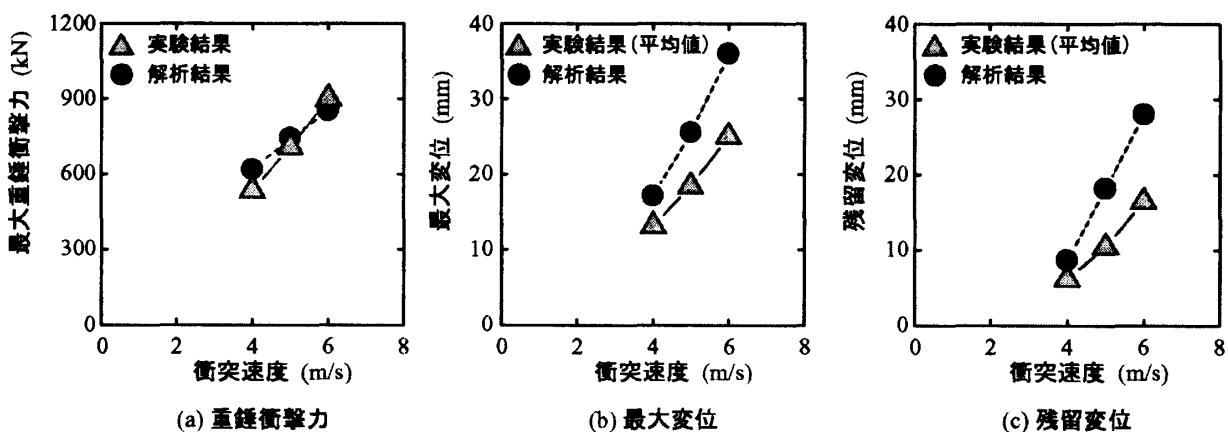


図-7 各最大応答値-衝突速度関係図

図より、重錘衝撃力波形は衝突速度にかかわらず、衝突直後に発生する振幅が大きく周期の短い正弦半波状の第1波と、振幅が一定で波動継続時間が長い第2波より構成されていることが分かる。第2波の波動継続時間は、重錘の衝突速度の増加に従い増大していることが分かる。解析結果は最大値に若干の差異があるものの、これらの傾向をよく再現している。

図-7(a)には、最大重錘衝撃力と衝突速度との関係を示している。図より、最大重錘衝撃力は重錘衝突速度とほぼ線形の関係にあり、高い相関があることが分かる。また、解析結果は実験結果と良く対応している。

4.2 変位波形

図-6には、載荷点近傍における応答変位波形に関する実験結果を解析結果と比較して示している。なお、本実験では、載荷点直下の変位を測定していたものの、一部の実験結果において載荷点部下面に著しい損傷が発生したため、変位の計測が不能となった。そのため、本検討では、載荷点変位を検討項目から除外し、その近傍の計測点D-1およびD-2における応答変位の平均値を用いて検討することとした。

図より、応答変位波形は衝突速度にかかわらず、重錘衝突とほぼ同時に励起し、15ms～20ms程度で最大

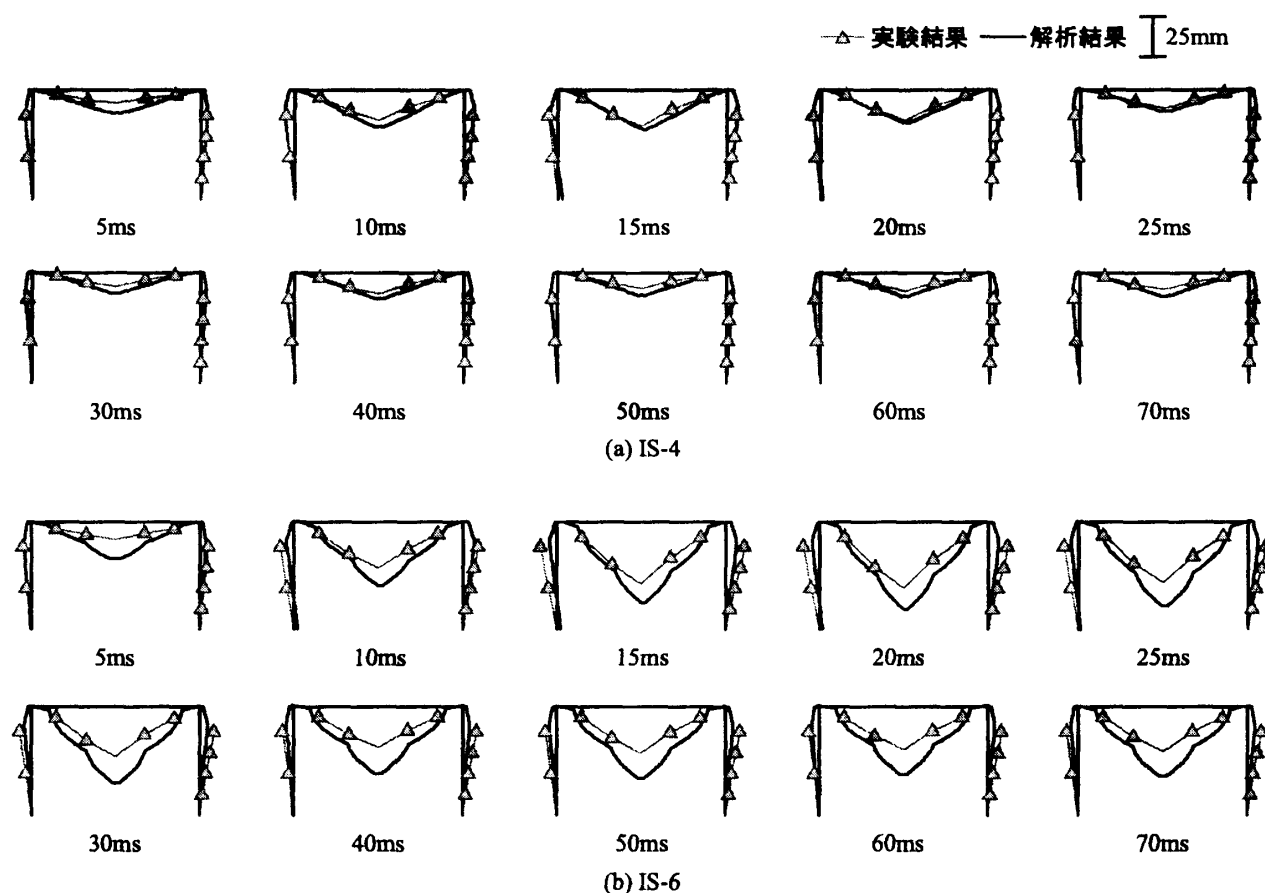


図-8 変形状

値となることから分かる。その後は、残留変位成分を含む自由減衰振動に移行している。残留変位は、重錘の衝突速度の増加に対応して増大していることが分かる。解析結果は、最大変位発生時刻、自由減衰振動の推移状況等の性状をよく再現しているものの、最大変位および残留変位成分については過大評価する傾向を示している。

図-7(b),(c)には、最大変位および残留変位と衝突速度の関係を示している。なお、各変位値は計測点 D-1/D-2 における平均値である。図より、解析結果は実験結果を過大評価する傾向にあるものの、両結果ともに最大変位および残留変位が衝突速度とほぼ線形の関係にあり、高い相関があることが分かる。

4.3 変形状

図-8には、IS-4 および IS-6 における各経過時間毎の変位分布性状を示している。図には、重錘衝突から 5 ms ごとの変位分布を示した。ここで、載荷点直下の変位計測値については、前節と同様に本検討から除外しており、左右それぞれの 2 点の計測値から直線補完して算出した載荷点直下位置の変位量を平均して図示している。

図より、IS-4/6 の実験結果から、梁部は載荷点部で、柱部は隅角部近傍で最大応答を示し、ほぼ左右対称の変形状を示していることが分かる。また、各点における

変形は、15～20 ms で最大変位に至り、35～40 ms で残留変位成分を含んだ自由振動状態へと移行している。

図-8(a) より、IS-4 に関して実験結果と数値解析結果を比較すると、衝突初期においては若干の差異があるものの、いずれの時点においても数値解析結果は実験結果とよく対応していることがわかる。一方 図-8(b) の、IS-6 の解析結果の場合には、衝撃荷重載荷初期より載荷点近傍の変形が大きく示されている。これに関しては、載荷点近傍の損傷が著しく、ひび割れによる開口が顕在化したことによることを確認している。これらの結果より、解析結果は、衝突速度が大きい場合に実験結果を過大評価する傾向にあるものの、本実験の範囲内では工学的に安全側で評価可能であるものと推察される。

また、柱部の水平変位に関しては解析結果が実験結果を若干過小に評価する傾向がみられる。これは、後述するように解析結果の損傷性状が実挙動を十分に再現していないことに起因しているものと推察される。

4.4 ひび割れ分布性状

図-9には、実験終了時のひび割れ分布図に各解析ケースの載荷点最大変位時における第一主応力分布図を重ねて示している。なお、図-4(a) に示したコンクリートの応力-ひずみ関係に従うと、図中の白色で示

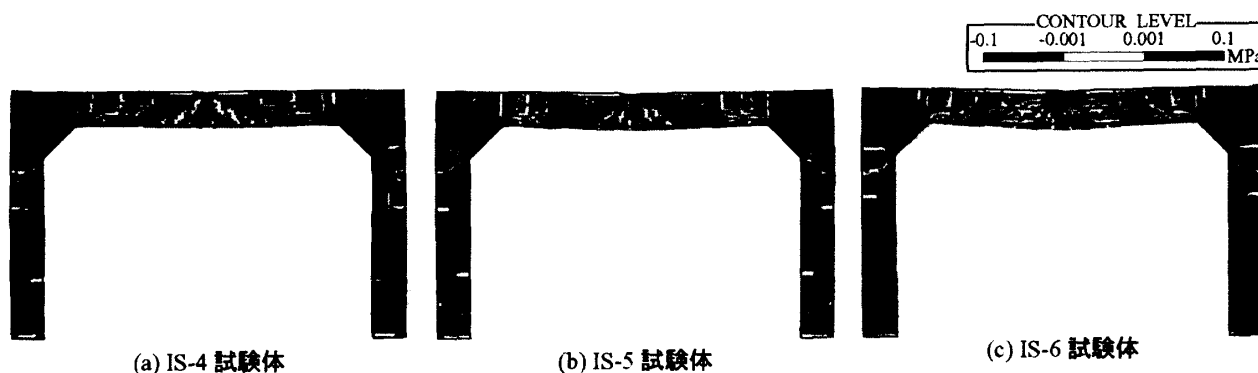


図-9 ひび割れ分布図

された領域（コンクリート要素の第一主応力が $-0.001 \sim 0.001 \text{MPa}$ の範囲）はひび割れが発生しているか、もしくは応力がほとんど作用していない要素であることを示すこととなる。従って、変形が大きく示されている領域ではひび割れが発生しているものとして評価可能である。

図より、梁部には荷点近傍において正曲げによる曲げひび割れが、隅角部近傍において負曲げによる曲げひび割れが発生していることが分かる。衝突速度が大きい場合には、さらに荷点近傍に斜めひび割れが発生しせん断破壊の傾向が強く現れている。一方、柱部においては隅角部近傍では外側に、基部近傍では内側にそれぞれ曲げによるひび割れが発生していることが分かる。また、各部のひび割れ状況を比較すると、荷点近傍およびハンチ下部においてひび割れが集中する傾向を示している。

解析結果は、これらのひび割れ状況についてもよく再現していることが分かる。特に IS-4、IS-5 の場合に関しては、実験結果におけるひび割れ分布性状をよく再現している。しかしながら、IS-6 に関しては、実験結果に比較して柱部のひび割れの発生が少ない。これは、実験結果ではハンチ下部における損傷領域に明瞭な圧壊が確認されているのに対し、数値解析においてはこの柱の圧壊が出現していないことから、実験結果に対応した損傷状況が再現されていないためと推察される。

5. まとめ

本研究では、落石防護覆道の性能照査型設計法の確立に向けて、RC ラーメン構造形式の衝撃応答特性や耐衝撃性能を的確に評価できる数値解析手法を確立することを目的に、小型 RC ラーメン模型に対する重錘落下衝撃実験を実施し、併せて著者らが提案している RC 梁の衝撃応答解析手法による数値解析を行い、その妥当性について検証した。本研究において得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 重錘衝撃力波形に関しては、解析および実験結果

の最大値に若干の差異があるものの、波形形状は精度よく対応している。

- (2) 応答変位波形に関しては、最大変位および残留変位値に差異が見られるものの、最大変位発生時刻や自由減衰振動等の波形形状は良く対応している。
- (3) ひび割れ特性に関しては、解析結果は柱部の損傷状況を若干過小評価しているものの、ラーメン構造全体の損傷状況を良く再現している。

以上のことから、本検討で用いた数値解析手法は、RC ラーメン構造形式の衝撃応答特性や耐衝撃性能を評価可能な手法の一つであることが明らかとなった。今後は、本解析手法のさらなる精度向上に努めるとともに、落石防護覆道の性能照査型設計法の確立に寄与できるよう研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 落石対策便覧, (社) 日本道路協会, 2000.6
- 2) 熊谷守晃: ルランベツ覆道における落石災害に関する報告, 第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.286-290, 1993.6
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静荷重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, 1999.4
- 4) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉: 重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1261-1272, 2006.3
- 5) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 三上 浩, 岡田慎哉: 破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1227-1238, 2007.3
- 6) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6