

(2) RC はり部材の衝撃応答の定量的精度に関する基礎的研究

Fundamental study on the quantitative accuracy of impact response of RC beam

宗本理*, 園田佳巨**

Satoru Munemoto, Yoshimi Sonoda

*九州大学大学院修士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 774)

** 工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 774)

Key Words: FEM, RC beam, Tensile softening, Erosion function

キーワード: 有限要素法, RC はり, 引張軟化, 無効化機能

1. 緒言

近年, 土木工学の分野においても構造設計は性能照査型への移行が検討されており, 自然災害や人為的な事故による衝撃力の作用が想定される防護構造物について, 耐衝撃性能を明確にする必要に迫られている. 土木構造物の衝撃挙動に関しては, これまでロックシェッドなどの落石防護工を主な対象として, 構造全体系の弾塑性応答を正確に評価できる解析手法の確立を目的とした実験および解析による研究が行われてきた. しかし, 衝撃現象が複雑なため, 設計衝撃荷重, 構造物の材料特性, 部材の挙動, さらに解析手法などに関して, 必ずしも共通の見解が得られているわけではない. RC 梁部材の性能照査において, 部材の変位応答は限界状態を知る基本的かつ重要な照査項目であるが, 部材の材料特性モデルが変位応答に及ぼす影響について, 検討の余地が残されているものと考えられる.

そこで, 本研究では最初に, RC 梁部材を簡易な 1 質点系モデルに置換し, 部材の全体剛性に関する基本的な仮定が変位応答に与える影響について考察した. 次に, RC 梁の衝撃荷重による破壊性状などの質点モデルでは

評価できない局所的な応答を把握するため, 汎用有限要素解析ソフト MARC に著者らが作成したユーザーサブルーチンを導入した衝撃挙動解析を行い, 材料特性のモデル化が RC 梁の衝撃挙動に与える影響について検討した. なお, 上記の目的に基づく考察を行うにあたり, 解析手法および結果の定量的な妥当性を把握するために, 既往の衝撃実験結果(ラウンドロビンアナリシス)を用いた比較・検討を行っており, できるだけ簡易なモデルで RC 梁の精度良い衝撃応答を得るための留意点について考察した.

2. 簡易 1 質点系モデルによる弾塑性応答解析

2.1 解析手法

1 質点系モデルでは梁全体を 1 つの質点とし, 梁が 1 次モードの振動をすると仮定した計算を行うため, 1 次変位モードに基づく等価質量 $\frac{17}{35}qL$ を用いた. ここで, q は単位長さ当たりの質量である.

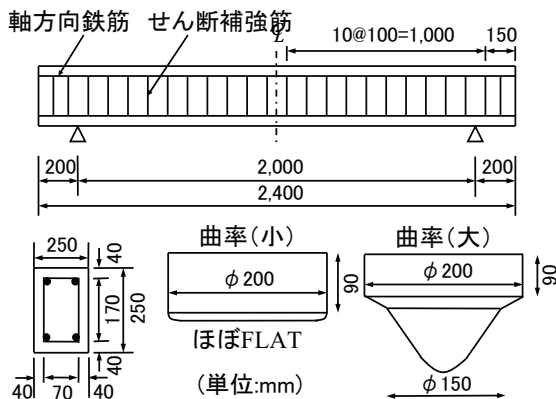


図-1 解析対象および重錘先端形状

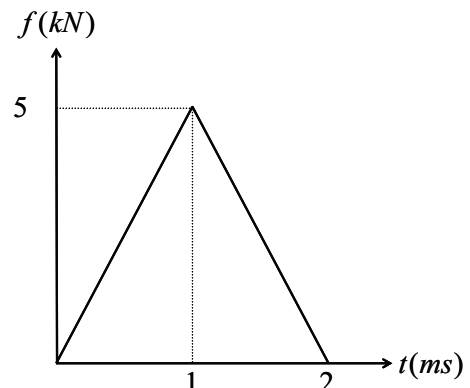


図-2 二等辺三角形パルス荷重

表-1 コンクリートと鉄筋の材料定数

	鉄筋	コンクリート
弾性係数 E (GPa)	206	20.9
ポアソン比 ν_s	0.30	0.17
密度 ρ (g/cm ³)	7.85	2.35
降伏強度 σ_y (MPa)	366	-
圧縮強度 f' (MPa)	-	32.3
引張強度 f (Mpa)	-	3

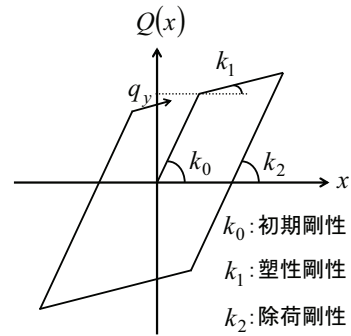
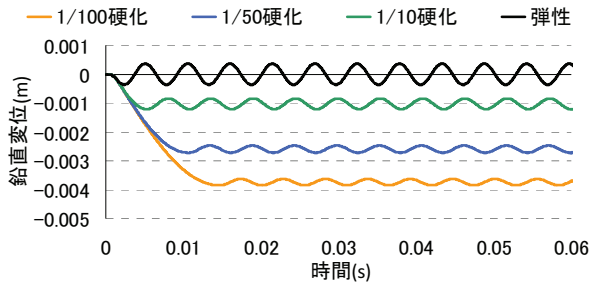
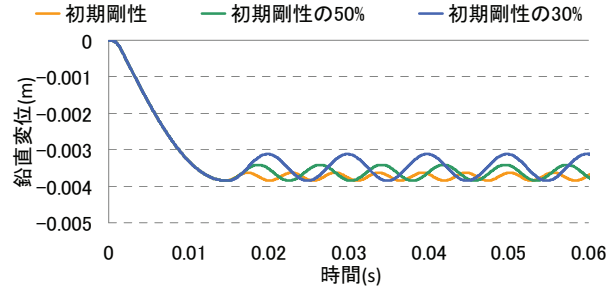


図-3 材料特性



(a) 塑性剛性の設定



(b) 除荷剛性の設定

図-4 鉛直変位応答波形

質点を支えるバネ定数は、両端単純支持梁の支間中央に集中荷重が作用した場合の静的荷重によるたわみの式(1)から求めた等価バネ定数 k を用いた。ここで、 ν はたわみ、 EI は曲げ剛性を表す。

$$k = f / \nu = 48EI / L^3 \quad (1)$$

2.2 解析対象および解析条件

解析対象には、次章以降に示す有限要素解析による結果との相互比較および定量的な精度を検証するため、岸らを中心に土木学会の委員会活動として行われたラウンドロビン実験で用いられた RC 梁²⁾を参考に、図-1 に示す断面寸法を有する両端単純支持形式の梁を用いた。質点系モデルによる解析では、衝突物のモデル化は行わず、衝撃荷重を直接与えることにした。具体的には、図-2 に示すような二等辺三角形パルス荷重を入力している。なお、衝撃荷重の各パラメータは簡易に設定している。本解析で用いた具体的なコンクリートと鉄筋の材料定数は表-1 に示す。

2.3 材料特性

1 質点系モデルでは、図-3 に示すような復元力特性を設定した。剛性について降伏荷重 q_y に達した後の塑性剛性を初期剛性の 1/100、1/50、1/10 の 3 種類を簡易に設定し、バイリニア型を仮定した。さらに、除荷剛性の応答変位への影響も検討するために、除荷剛性を初期剛性、初期剛性の 50%、30% の 3 種類の値を入力した。

2.4 解析結果

図-4 は 1 質点系構造モデルにおいてそれぞれ 3 種類の塑性剛性と除荷剛性の仮定のもとで行った解析で得られた鉛直変位応答波形を示している。なお、図-4(a)では全ケースにおいて除荷剛性を初期剛性とし、(b)では塑性剛性を初期剛性の 1/100 としている。まず、塑性剛性の影響について図-4(a)の鉛直変位応答波形で比較すると、塑性剛性が小さくなるにつれて最大鉛直方向変位が大きくなることが顕著に確認できた。次に、除荷剛性の影響について図-4(b)より、最大鉛直変位に達した後の自由振動の中心を残留変位とすると、除荷剛性が小さくなるにつれて残留変位が小さくなっていることが認められた。また、1 質点構造モデルでは質点をバネに置換し計算しているため、除荷剛性が小さくなるのに比例して自由振動の振幅が大きくなっていることがわかる。

3. RC はりの重錘落下衝突実験のシミュレーション

3.1 解析対象および解析条件

解析対象は 2 節と同様で、実験は、跳ね上がり防止装置付きの支点治具によって固定された矩形断面 RC はりのスパン中央部に、質量 300kg の先端形状の異なる 2 種類の重錘を衝突速度 4m/s で自由落下させた重錘落下式衝撃実験である。

図-5 に解析モデルを示すが、計算時間短縮のために、はり軸方向と断面方向の対称性を考慮した 1/4 モデルとした。なお、解析に用いた要素タイプは、コンクリート

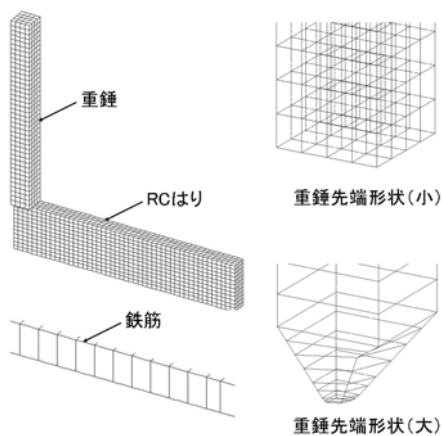


図-5 解析モデル

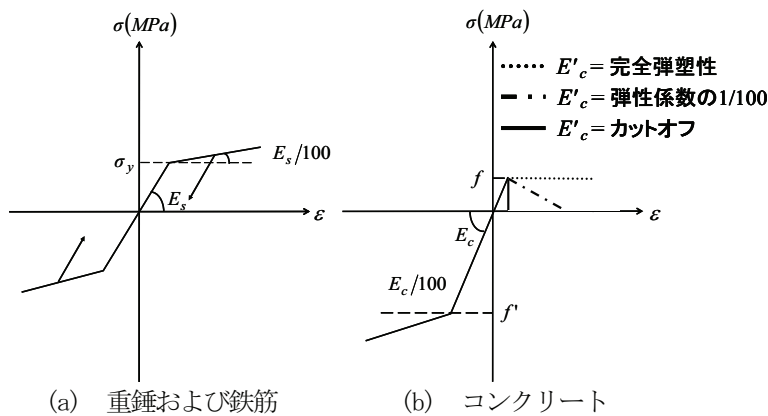


図-6 応力-ひずみ関係

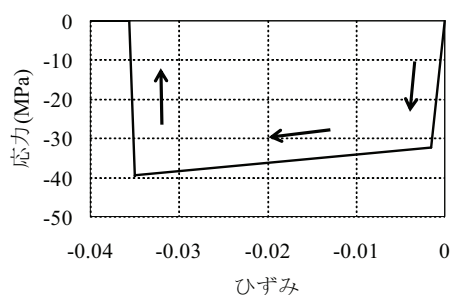


図-7 コンクリート要素の圧縮域のモデル化

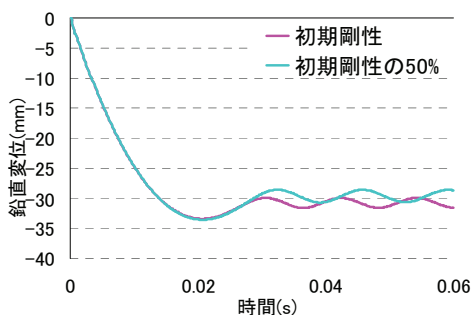


図-8 鉛直変位応答波形

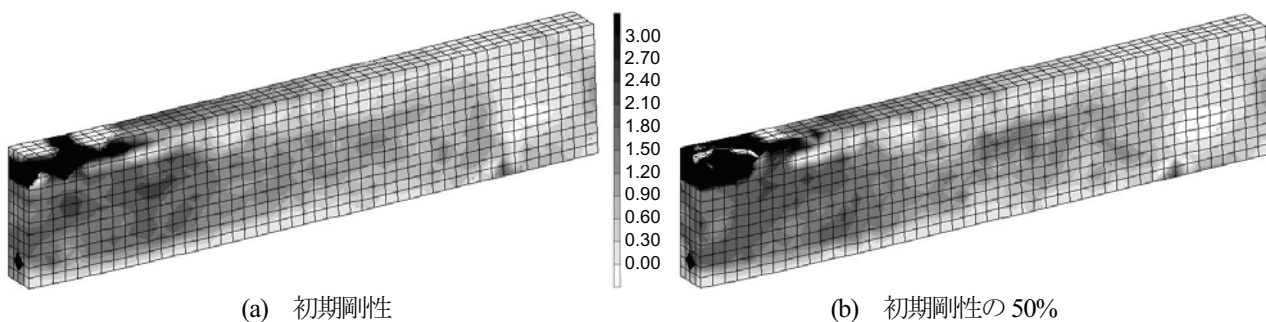


図-9 最大変位発生時の最大主応力分布

は8積分点を有するアイソパラメトリックソリッド要素を、主鉄筋およびせん断補強筋には1積分点を有するトラス要素をそれぞれ適用した。なお、2次元トラス要素で離散化された鉄筋要素とコンクリート要素の境界には節点を共有する完全付着条件を仮定した。

3.2 材料特性モデル

重錘および鉄筋の応力-ひずみ関係には、ミーゼスの降伏条件を前提に簡易なバイリニア型の等方硬化則（硬化係数は初期剛性の1/100）の弾塑性材料特性を仮定した。一方、コンクリートの応力-ひずみ関係について、本研究では除荷剛性の影響、さらに引張軟化および圧縮破壊の取り扱いについて検討しているため、2ケースの材料特性モデルを適用している。まず、圧縮側では圧縮強度を降伏強度とし、硬化係数を初期剛性の1/100とするバイリニア型を適用し、引張側では引張強度に達した

後の軟化勾配 E'_c をカットオフとした。除荷剛性について初期剛性、初期剛性の50%の2種類の値を設定し、2節の1質点系弾塑性解析との比較を行った。

次に、圧縮側では前述と同様に硬化係数を初期剛性の1/100と設定し、引張側について、最大引張強度に達した後の軟化勾配 E'_c に完全弾塑性、弾性係数の1/100、カットオフの3種類の異なる値を設定した。これら各材料の応力-ひずみ関係を図-6に示す。また、コンクリートが圧縮破壊（応力がゼロに低下）した後のモデル化が、RCはりの全体挙動に与える影響を把握するために、本解析では図-7に示すように圧縮域で抵抗力を失った要素に無効化機能を用いた場合の衝撃応答も考察した。具体的には、無効化機能を用いることで、ある閾値を超えて破壊したと判定された要素の剛性は全体剛性マトリックスの中に組み込まず、さらに要素内に蓄積されたひずみエネルギーを消去させる形で逸散されるように設定した。本解析では、相当応力が閾値である圧縮強度

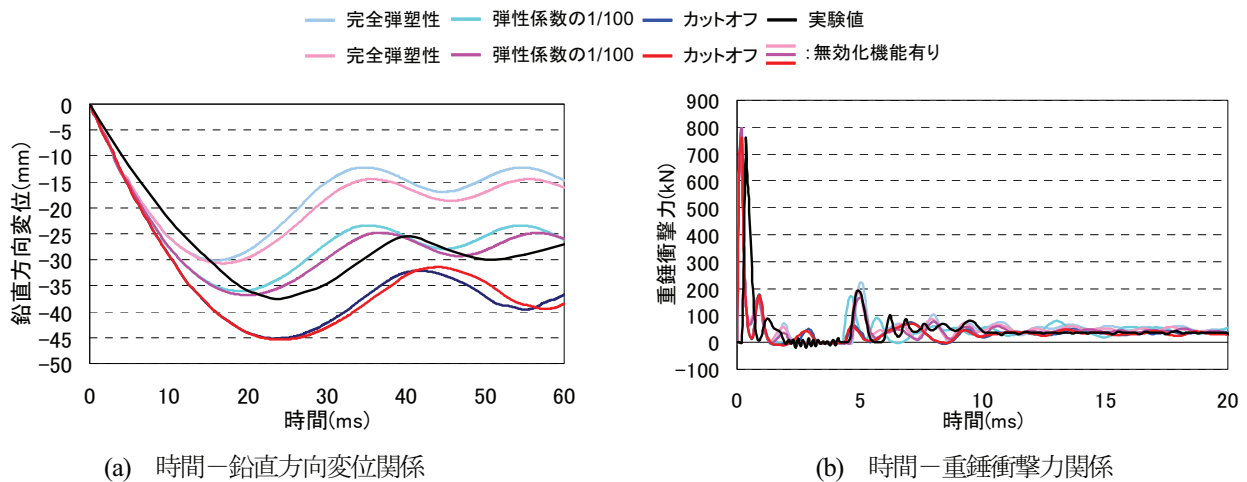


図-10 衝撃応答波形

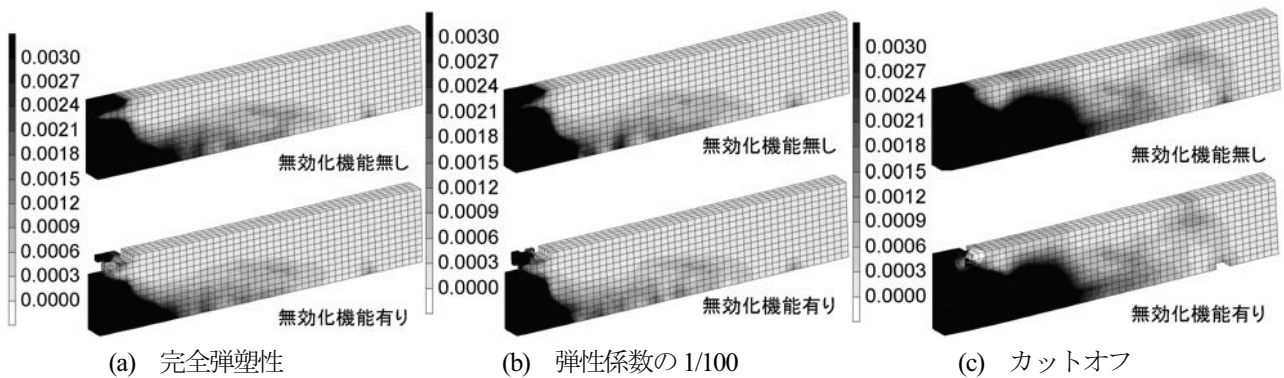


図-11 ひび割れ発生領域

39.615MPa を超えた場合に無効化した結果を比較した。なお、デフォルトの無効化機能は、破壊を生じた要素の応力解放と同時にひずみ値もゼロにリセットされるため、本解析では引張破壊時に該当要素の応力のみを解放するように修正し、コンクリート要素に適用した。

4. 解析結果

4.1 コンクリートの材料特性モデルの影響

ここでは1質点系モデルに適用した3種類のうち2種類の除荷剛性の影響について、鉛直変位応答波形を図-8に示す。さらに、図-9は2種類の除荷勾配別に最大変位発生時の最大主応力分布を比較したものを示す。なお、黒色で表示されている箇所は、最大主応力が引張強度である3MPaを超える要素を表示している。

(1) 除荷剛性による影響

(a) 鉛直変位応答波形の比較

図-8より、1質点系弾塑性解析と同様に除荷剛性が小さくなるにつれて残留変位が小さくなっていることが確認できる。また、1質点系弾塑性解析では除荷剛性が小さくなるのに比例して自由振動の振幅が大きくなっていたが、3次元FEM解析を用いた本解析では除荷剛性による振幅の影響は見られない結果となった。

(b) ひび割れ発生領域の比較

次に、図-8より最大鉛直変位について初期剛性と初期剛性の50%のケースではほとんど相違が見られなかったのに対し、図-9から初期剛性の50%のケースでは重錘衝突付近近傍において、初期剛性の場合に比べて引張強度を超えている要素数が明らかに異なることが確認できる。

(2) 引張軟化および圧縮破壊のモデル化

(a) 鉛直変位応答および重錘衝撃力波形の比較

ここでは、コンクリートの引張軟化勾配および圧縮域の無効化機能が、RCはりの弾塑性衝撃挙動に与える影響を確認するために、軟化勾配 E_c に完全弾塑性、弾性係数の1/100、カットオフの3種類の値、さらに無効化機能の有無による解析を行った。なお、重錘モデルは図-5に示す先端曲率が小さい解析モデルを使用した。鉛直変位応答波形と重錘衝撃力波形を図-10に示す。

図-10(a)より、引張軟化勾配 E_c が大きくなるにつれて、最大鉛直変位や残留変位が大きくなる傾向が明瞭に認められた。これは、軟化勾配を大きくするほど、コンクリートが引張破壊(応力がゼロまで低下)するために消費されるひずみエネルギー量が小さくなるためである。また、圧縮側のコンクリート要素の無効化機能の有無別に比較すると、無効化機能を使用したケースの方が無いケースに比べ、最大鉛直変位や残留変位が多少大き

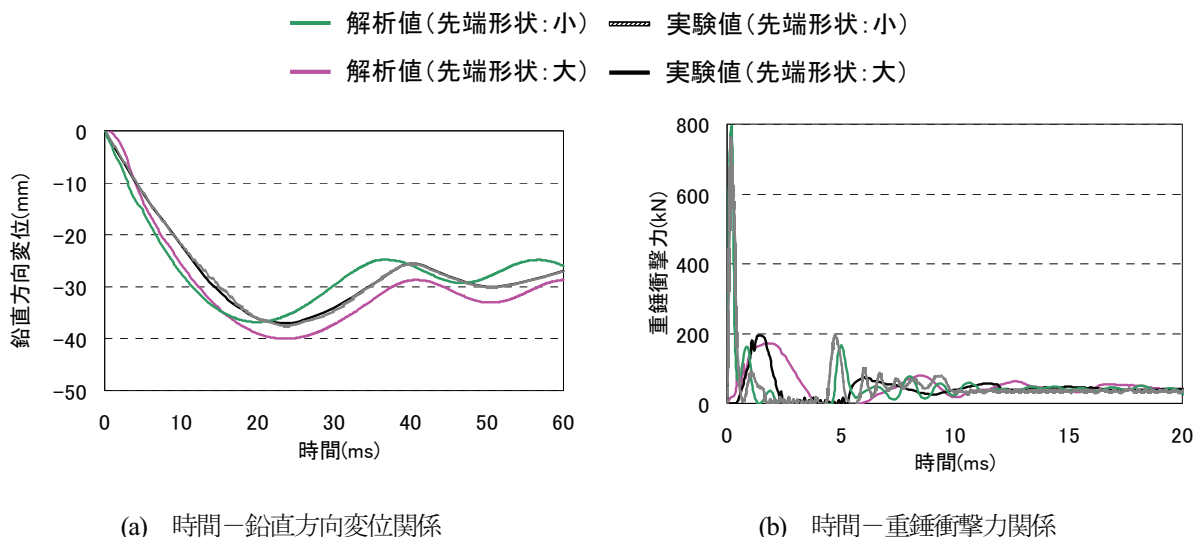


図-12 衝撃応答波形

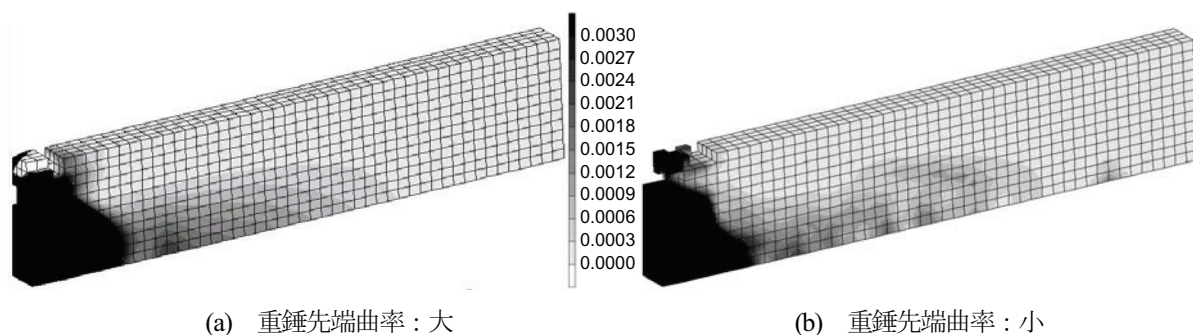


図-13 ひび割れ発生領域

くなっていることが確認できる。また、実験と解析で比較すると、軟化勾配が弾性係数の 1/100 のケースにおいて、無効化機能を使用しているケースの方が無いケースに比べ、実験の鉛直変位応答波形を良好に再現されていることが認められた。

次に、図-10(b)から重錘衝突直後の最大重錘衝撃力には軟化勾配及び圧縮側のコンクリート要素の無効化機能の有無による明確な相違は見られなかった。実験と解析で比較すると、重錘衝突直後の最大重錘衝撃力は概ね等しく、2 波目以降の重錘衝撃力の解析精度は必ずしも高くないが、全体的な波形性状は再現されていることが認められた。

(b) ひび割れ発生領域の比較

コンクリートの引張軟化勾配の仮定がひび割れ発生領域に与える影響を把握するため、3 種類の軟化勾配別に最大変位発生時の最大主ひずみ分布を比較し、さらに無効化機能を使用し最大変位発生時に閾値を超えて破壊したと判定された要素を除去したものを図-11 に示す。黒色で表示されている箇所は、最大主ひずみが引張強度に達したときのひずみの約 2 倍である 0.003 を超える要素で、ひび割れの発生が予想される領域である。これらの図から、一般的な有限要素解析が分散ひび割れに

相当する評価しかできないために、一定のひずみの閾値でひび割れを評価すると広範囲にひび割れが分布する結果しか得られないことがわかる。従って、離散的なひび割れの分布を表現するには、要素の分離などの特別な対応が必要であると思われる。今回の解析結果からは定性的な傾向しか論じられないが、コンクリートの引張軟化勾配が大きくなるにつれて、はり全体へひび割れ領域が拡大する様子が確認できる。さらに、無効化機能による圧縮破壊が予想される要素について図-11(a), (b), (c) で比較すると、図-11(a)では、重錘衝突部近傍で圧縮破壊が予想され除去されていた要素が多く存在しているが、コンクリートの引張軟化勾配が大きくなり、図-11(c)のカットオフのケースでは支持治具部分の要素が除去されていることがわかる。

4.2 重錘先端形状の影響

ここでは、図-2 に示す先端曲率の大きい重錘モデルを使った解析を行い、4.1 で行った解析と比較することで衝突物の形状（衝撃荷重の作用条件）が弾塑性衝撃応答に与える影響について検証した。

(a) 鉛直変位応答および重錘衝撃力波形の比較

鉛直変位応答波形と重錘衝撃力波形を図-12 に示す。

最大鉛直変位について図-12(a)と図-10(a)と比較すると、重錘先端形状による相違は力積が等しいため実験値ではほぼ見られないのに対し、解析では差異が生じる結果となった。この要因の一つとして解析において重錘モデルの要素サイズの違いなどが考えられる。次に、図-12(b)と図-10(b)から重錘衝撃力波形を比較すると、先端曲率が大きい重錘のケースでは先端曲率が小さい重錘のケースに比べて最大重錘衝撃力が実験値、解析値ともに約3.5分の1となっていることが確認できる。また、重錘衝撃力波形の第1波目と第2波目について比較すると、先端曲率が大きい重錘のケースの方が緩やかな波形であることがわかる。

(b) ひび割れ発生領域の比較

重錘先端形状別にひび割れ発生領域を比較したものを図-13に示す。図-13の(a)と(b)から、重錘衝突付近傍のひび割れ発生領域を比較すると、衝突面積の広い先端曲率の小さい重錘のケースの方が引張軟化に関係なくひび割れ発生領域が大きいことが認められる。

5. 結言

本研究では、簡易で精度良く耐衝撃性能を評価する手法を確立するための基礎的考察として、RCはり部材を対象にコンクリートの材料特性モデル及び衝撃荷重の作用条件が弾塑性衝撃応答に与える影響について、定量的な検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 1質点系弾塑性解析より、塑性剛性が小さくなるにつれて最大鉛直方向変位が大きくなる。さらに、除荷剛性が小さくなるにつれて残留変位が小さくなることが確認できた。
- (2) 除荷剛性の設定により、重錘衝突付近傍の最大主応力分布に相違が生じる。
- (3) コンクリート材料の想定として引張軟化の設定がRCはりの衝撃応答解析に大きく影響することが認められた。
- (4) コンクリートの引張軟化勾配が増加するにつれて最大応答変位や残留変位が増加することがわかった。
- (5) 一般的にコンクリートの引張軟化モデルの設定による衝撃力の全体応答波形への影響はほとんど見られない。
- (6) 重錘先端曲率の違いによって最大鉛直変位に相違はみられないが、実験・解析ともに最大重錘衝撃力および重錘衝撃力波形に顕著な違いが現れた。
- (7) 2種類の重錘先端曲率による解析において、引張軟化勾配の設定や要素の無効化によるコンクリートの圧縮破壊後の応力解放モデルを導入することで、精度の良い結果を得ることが可能となった。

今後、RCはりの耐衝撃性能照査法の確立に向けて、ひび割れ発生位置・程度・進展経路の推定や部材の残存耐力の推定などが照査方法に要求されるため、次の段階として取り組む予定である。

参考文献

1. 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
2. 土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ15, 2004
3. 園田佳巨, 深澤仁, 曾我部正道: 鉄道車両逸脱防止壁に作用する衝撃力の評価に関する研究, 応用力学論文集, Vol.10, pp.459-466, 2007.8
4. 石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博: 基礎からの衝撃工学, 2008