

# 論文 衝撃荷重を受ける曲げ破壊型 RC はりの全体応答に影響を及ぼす解析要因の把握に関する研究

玉井 宏樹<sup>\*1</sup>・篠崎 誠<sup>\*2</sup>

**要旨**：性能照査型耐衝撃設計法を確立するために、近年、様々な研究活動が遂行されているが、具体的な照査手順や照査方法の明確化には至っていない。このような背景のもと、本研究は、FEM を用いた簡易な照査法の提案を最終的な目的とし、その基礎的検討として、比較的小さいレベルの衝突を受ける RC はりの全体応答に影響を及ぼす解析要因の候補を挙げ、それらの影響評価を実施した。その結果、コンクリートの引張域のモデル化が RC はりの全体応答に大きく影響を及ぼすことが確認できた。さらに、影響評価の結果とともに、性能照査に適用しうる FEM を用いた簡易な解析手法の提案を行い、その適用限界を明らかにした。

**キーワード**：衝撃荷重、RC はり部材、性能照査、有限要素法、影響評価

## 1. はじめに

我が国では 2002 年 10 月に国土交通省から「土木・建築にかかる設計の基本」が示されてから、衝撃荷重が作用する構造物においても、信頼性が高く、安全性が確保される性能照査型耐衝撃設計法を確立することが求められ、そのために、近年、様々な研究活動が遂行され、構造物や構造部材ごとに設計法のあり方について模索している状況にある。土木学会としては、構造工学委員会の衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会により「衝撃実験・解析の基礎と応用」<sup>1)</sup>、構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会により「性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法」<sup>2)</sup>が取り纏められ、性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた基礎資料を提示した段階にあるが、構造物や構造部材の具体的な照査手順や照査方法を明確化できていない。

上述の背景を踏まえ、著者らは、基本的な構造部材である RC はりを対象に、照査方法としての数値解析のあり方について研究を実施している。数値解析を利用した照査では、部材形状や衝突レベルにより照査指標が決定され、適切な解析手法の選定や検証を実施することが必要であると考えられる。つまり、照査方法として数値解析を利用するには、着目点の部材変位や応力やひずみなどの照査指標を適切に評価することが必要になってくる。さらに、解析方法は質点一ばね系、有限要素法、個別要素法や粒子法など様々なものが存在しており、照査レベルに適した解析手法を明確化することも非常に重要であり、これらのこととを照査担当者に示していくことは構造物の衝撃問題に携わる研究者の責務であると考えている。

そこで、著者らは、比較的小さいレベルの衝突を受ける RC はりの全体応答に限定して、照査方法に適用しうる簡易な有限要素モデリングについて検討を実施してき

た。具体的には、FEM 汎用コードである MARC2007r1 により衝撃解析を実施してきたが、解析を実施していく中で、解析モデルの構築や仮定する構成則の選定により応答解が影響を受けることを確認している<sup>3)</sup>。それを踏まえ、衝撃荷重が作用する RC はりの最大変位、残留変位や支点反力などの全体応答に影響を及ぼす解析要因の把握を実施した。解析要因の候補としては、解析対象のモデル化（要素分割数や要素タイプの選定）や材料のモデル化（構成則の選定）や接触のモデル化や直接時間積分法の選定などが挙げられる。本論文では、まず、RC はりの全体応答に影響を及ぼす解析要因の把握に関する基礎的な検討について述べており、その後で、主たる要因として考えられるコンクリート材料のモデル化に着目し、全体応答に及ぼす影響について更なる検討を実施した。さらに、その検討結果を踏まえ、衝撃荷重が作用する RC はりの全体応答の定量的評価が可能である簡易な有限要素モデリングの提案を行い、そのモデリングにより衝突レベルやはり形状の異なる様々な実験をシミュレートすることで、適用限界に関して検討を実施した。

## 2. 影響評価における基礎的取組み

本研究では、RC はりの全体応答へ影響を及ぼす解析要因の把握に関する基礎検討を実施した。検討内容は、形状のモデル化（メッシュ分割数）や直接時間積分法の選定が衝撃作用を受ける RC はりの最低次固有振動数や最大変位値等の弾性衝撃応答に及ぼす影響評価を行った。なお、減衰に関しては考慮していない。

### 2.1 弹性解析における離散化レベルの影響

まず、基礎的な取り組みとして、有限要素離散化レベルがはりの弾性衝撃応答に及ぼす影響を評価するために、図-1 に示す支間長 2000mm、はり高さ 250mm、はり幅

\*1 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助教 博士（工学）（正会員）

\*2 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 修士課程（正会員）

150mmの単純ばかりを対象とした検討を行った。材料定数には、弾性係数 20.6GPa, ポアソン比 0.17, 質量密度  $2.4\text{g/cm}^3$  を仮定した。メッシュ分割数をパラメータとした離散化モデルとしては、支間長 2~250 分割、はり高さ 2~50 分割、はり幅 2~50 分割の計 225 ケースの解析を実施した。なお、時間積分法はシングルステップフーボルト法とし、時間刻みは  $1 \times 10^{-4}(\text{s})$  とした。

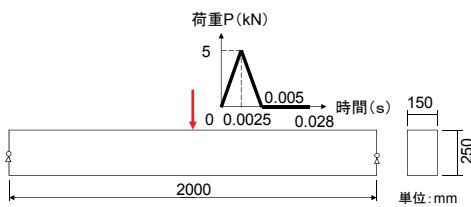


図-1 解析対象および入力荷重

検討結果の一例として、図-2に支間とはり高さの分割数と最低次固有振動周期の関係を示し、図-3にはり高さとはり幅の分割数と最大変位値の関係を示す。ここで、最低次固有振動周期は、解析結果として得られた変位応答から算出したものである。これらの図から、支間が 40 分割、はり高さが 8 分割でアスペクト比が極端に小さく無い場合、最低次固有振動周期は一定の値に収束し、はり高さ、はり幅の分割数が 8 分割程度で最大変位値の値が収束することが確認でき、その値がはり理論値と同程度であったことから、今回の解析対象において、支間 40 分割、はり高さ 8 分割、はり幅 8 分割程度あれば解析精度は保証されると言える。

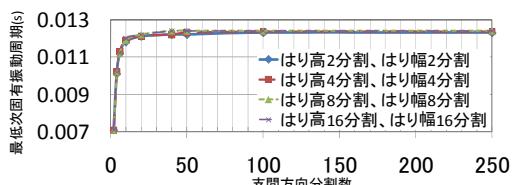


図-2 分割数が最低次固有振動周期に及ぼす影響

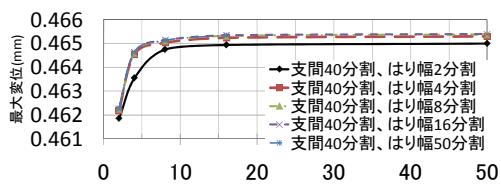


図-3 分割数が最大変位値に及ぼす影響

## 2.2 直接時間積分法の影響

衝撃応答解析を実施するには、時間に関する離散化を考えなくてはならない。一般的には直接時間積分法が用いられており、フーバルト法、Newmark 法、中央差分法

などがある。そこで、2.1 で得られた結果を踏まえて要素サイズを決定し、直接時間積分法が弹性衝撃応答に及ぼす影響を考察した。解析ケースとしては、フーバルト法と Newmark 法 ( $\beta=0$ ,  $\beta=0.25$ ,  $\beta=0.5$ ) と中央差分法の計 5 ケースとした。なお、時間刻みは全ケース  $1 \times 10^{-4}(\text{s})$  とした。解析結果として、図-4 に結果を示す。この図より、最大変位や振動周期、支点反力を違いが見られないため、直接時間積分法が弹性衝撃応答に及ぼす影響は小さいと言える。ただし、破壊を伴うような衝撃解析を実施する際には、時間積分法の選択は重要になると言われているため、別途検討が必要であると考えられる。

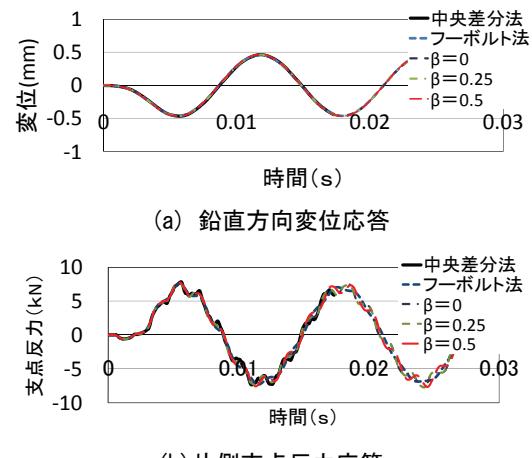


図-4 直接時間積分法の影響

## 3. コンクリートの構成則が衝撃応答へ及ぼす影響

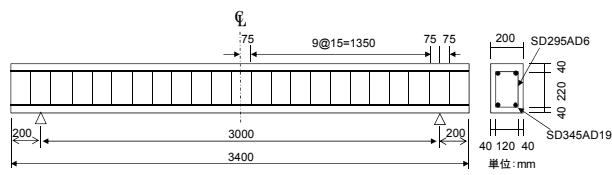
2 章までの結果を踏まえて本研究では仮定するコンクリートの構成則が弾塑性衝撃応答へ及ぼす影響に関しての検討を実施した。

FEM で衝撃応答解析をする場合、コンクリートの構成則としては一般的に、圧縮域には圧縮強度に達したあと圧縮応力が徐々に増加する弾塑性モデル、引張域には引張強度に達したあと引張応力が徐々に減少する軟化モデルを用いた構成則（応力 - ひずみ関係）が用いられている。本研究でも同様な構成則を基本とし、コンクリート材料のモデル化が RC はりの弾塑性衝撃応答に与える影響を把握する目的で、コンクリートの引張域に仮定する軟化モデルやクラック発生後のせん断保持率、圧縮域に仮定する硬化勾配をパラメータとした複数の解析を実施した。なお、その際に、解析結果の一般性を確保する目的で 2 種類の重錐衝撃実験を対象とすることにした。

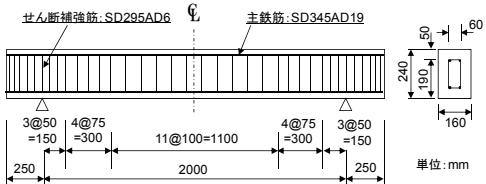
### 3.1 解析概要

解析対象とした 2 種類の重錐衝突実験について説明する。まず、1 つ目は図-5(a)に示す複鉄筋矩形 RC 単純ばかりのスパン中央部に、質量 400kg、衝突部の直径 150mm

の重錐が初速度 7m/s で衝突するものである。また、2つ目は図-5(b)に示す複鉄筋矩形 RC 単純ばかりのスパン中央部に、質量 200kg、衝突部の直径 150mm の重錐が初速度 6m/s で衝突するものである。どちらの実験も室蘭工業大学により実施されたものである<sup>1),4)</sup>。本論文では、後述の説明の便宜上、図-5(a)の RC はりを「RC はり A」、図-5(b)の RC はりを「RC はり B」と呼ぶこととする。ちなみに、RC はり A のせん断余裕度は 2.40 であり、RC はり B のせん断余裕度は 1.96 である。本研究では、解析モデルを図-6 に示すように力学的な対称性を考慮した 1/4 モデルとして衝突解析を実施した。また、材料定数として RC はり A はコンクリートの弾性係数 28.3GPa、ポアソン比 0.19、質量密度 2.4g/cm<sup>3</sup>、圧縮強度 39.2MPa、引張強度 3.92MPa とし、RC はり B はコンクリートの弾性係数 19.3GPa、ポアソン比 0.19、質量密度 2.4g/cm<sup>3</sup>、圧縮強度 27.9MPa、引張強度 2.79MPa とした。なお、鉄筋はどちらも弾性係数 206GPa、ポアソン比 0.3、質量密度 7.8g/cm<sup>3</sup>、降伏強度 345MPa としてある。

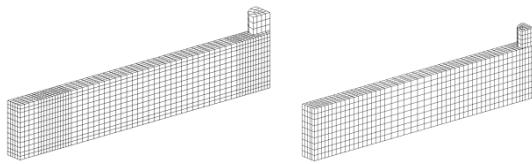


(a) RC はり A 配筋図



(b) RC はり B 配筋図

図-5 解析対象図



(a) RC はり A

(b) RC はり B

図-6 解析モデル図

### 3.2 コンクリート引張域に仮定した構成則

引張域のモデル化が衝撃応答へ与える影響の把握を行うために、引張軟化勾配およびクラック発生後のせん断保持率に着目した。

#### (1) 引張軟化勾配のモデル化

本研究では、引張軟化勾配として、図-7(a)に示すような引張強度以降その応力を保持したままひずみだけが

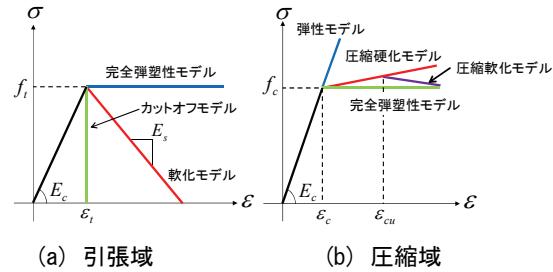
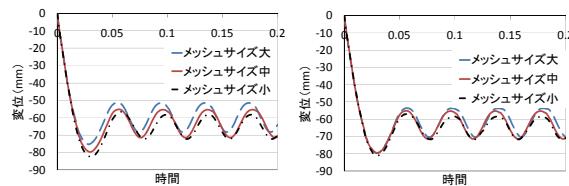


図-7 材料モデル図

増大する完全弾塑性モデル、引張強度以降徐々に応力が低下していく線形軟化モデル、引張強度に達したあとすぐに応力が開放されるカットオフモデルの 3 つを仮定した。なお、コンクリートの引張軟化勾配は要素サイズに依存するため、まずは引張軟化勾配の要素サイズ依存性について、RC はり A を用いて検討した。具体的には、2.1 で得られた結果を踏まえて、要素 1 辺あたりの長さが 10mm, 20mm, 30mm の 3 つの解析モデルに関して、引張軟化勾配を一定として要素サイズを変化させた場合の鉛直変位応答と式(1)に示すように破壊エネルギーと要素サイズから終局ひずみを求めて引張軟化勾配を変化<sup>5)</sup>させた場合の鉛直変位応答の比較を行った。

$$\varepsilon_{tu} = 5 \left( \frac{G_f}{f_t h} - \frac{f_t}{2E_c} \right) \quad (1)$$

ここで、 $G_f$  は引張破壊エネルギー、 $f_t$  は引張強度、 $h$  は要素最小長さ、 $E_c$  はコンクリート要素の弾性係数を示している。なお、本研究では仮想ひび割れ幅を 0.02mm と仮定し<sup>6)</sup>、引張強度以降の軟化曲線より下の面積を破壊エネルギーとし  $G_f = 3.92 \times 10^{-5}$  (kN/mm) と設定した。



(a) 引張軟化勾配一定

(b) 引張軟化勾配変化

図-8 引張軟化勾配の要素サイズ依存性

解析結果を図-8 に示す。これらの図より、要素サイズに関係なく引張軟化勾配を一定とした場合は最大変位やそれ以降の振動周期、残留変位（本研究では、最大変位発生時以降の波形の山と谷の中間値を残留変位と定義）に違いが確認でき、式(1)を用いて要素サイズにより引張軟化勾配を変化させた場合は最大変位やそれ以降の振動周期、残留変位に違いはさほど確認できないことが確認できた。つまり、本研究で対象とするような規模のり形状に対しては、コンクリートの引張軟化勾配は破壊

エネルギーと要素サイズから終局ひずみを求ることで決定することが望ましいと考えられる。

そのため、線形軟化モデルに関しては、式(1)を用いて破壊エネルギーと要素サイズから終局ひずみを求ることで引張軟化勾配を決定した。また、引張軟化勾配のモデル化による影響を把握するために、軟化勾配のモデル化以外は全て一定とし、せん断保持率は12.5%、圧縮域の硬化勾配は1/100硬化モデルで一定とした。

### (2)せん断保持率のモデル化

コンクリートのひび割れ面でのせん断剛性に関しては様々な研究が行われており、ひび割れ発生後のせん断剛性はひび割れ幅が増加すると急激に低下する傾向にある<sup>7)</sup>、そのため本研究では、クラック発生後に残存するせん断方向の剛性を示すものとしてせん断保持率を仮定している。本研究では、初期のせん断剛性に対する比の形で定義しており、12.5%と50%の2つを仮定した。なお、せん断保持率の影響のみを把握するために、せん断保持率以外の解析パラメータは全て一定とし、引張軟化勾配は終局ひずみから算定した線形軟化モデルを用い、圧縮域の硬化勾配は1/100硬化モデルで一定とした。

### 3.3 コンクリートの圧縮域に仮定した材料モデル

次に、圧縮域のモデル化が衝撃応答へ与える影響の把握を行うために、圧縮軟化勾配に着目した。圧縮硬化勾配のモデル化としては、図7(b)に示すようなコンクリートの圧縮域のみを弾性体と仮定したモデル、圧縮強度以降徐々に応力が増加していく硬化モデル、終局ひずみに達した後徐々に応力が低下していく軟化モデル、圧縮強度以降その応力を保持したままひずみだけが増大する完全弾塑性モデルの4ケースを仮定した。なお、圧縮強度

以降徐々に硬化するモデルに関しては、一般的に広く用いられている1/100硬化モデルを仮定し、軟化モデルは終局ひずみを0.35%とし、それ以降初期剛性の1/10で軟化するモデルを仮定した。また、圧縮域のモデル化の影響のみを把握する目的で、この際の引張軟化勾配は線形軟化モデル、せん断保持率は12.5%で一定とした。

### 3.4 解析結果～全体応答への影響評価～

#### (1)変位応答への影響

まず、図9(a)、図10(a)に引張軟化勾配をパラメータとして実施した解析結果として、RCはりA、RCはりBの鉛直方向変位応答の比較図を示す。これらの図より、軟化勾配が急になるほど、最大変位やその発生時間が大きくなり、最大変位発生以降の振動周期も大きくなる傾向にあり、残留変位も大きくなることが確認できた。また、実験値との比較では終局ひずみから軟化勾配を決定した線形軟化モデルが比較的精度良く実験値の応答を再現できていることが確認できた。ただし、RCはりAに比べ、RCはりBは最大変位発生以降の振動周期に関し、やや誤差が大きいが、残留変位の定量的評価には影響はないと考えられる。

次に、図9(b)、図10(b)にクラック発生後のせん断保持率をパラメータとして実施した解析結果として、RCはりA、RCはりBの鉛直方向変位応答の比較図を示す。これらの図より、せん断保持率の小さい方が最大変位とその発生時間が大きくなることが確認でき、実験値との比較ではせん断保持率を12.5%と仮定したモデルが精度よく実験値を再現できている。なお、せん断保持率を0%として解析を実施した場合、引張破壊に達する要素が生じた際に解析が不安定になることも確認している。

続いて、図9(c)、図10(c)に圧縮域のモデル化をパラメータとして実施した解析結果として、RCはりA、

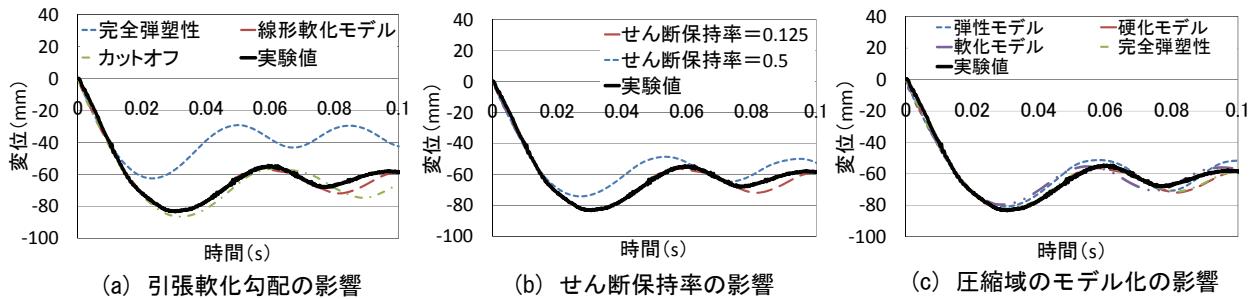


図9 RCはりAの変位応答波形

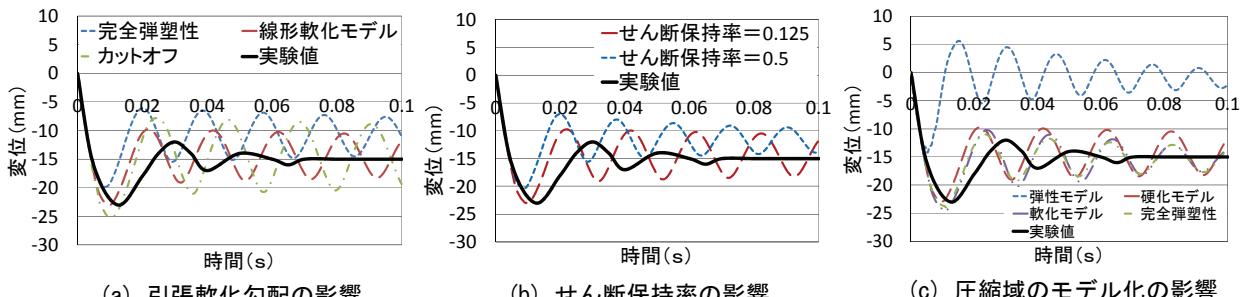


図10 RCはりBの変位応答波形

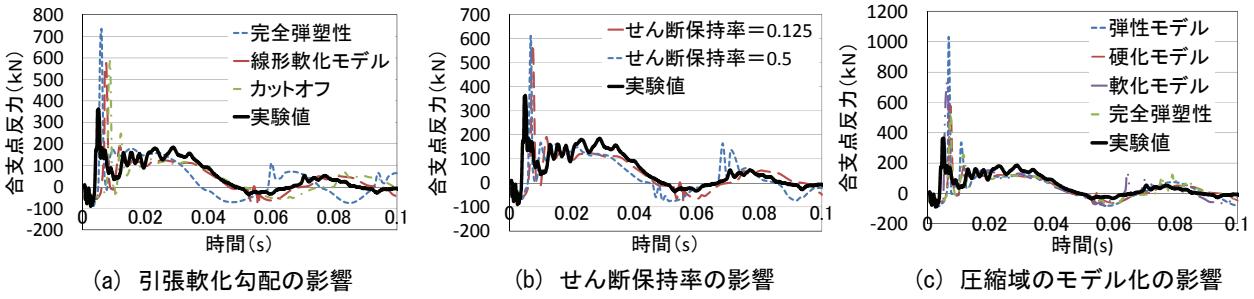


図-11 RC はり A の支点反力応答波形

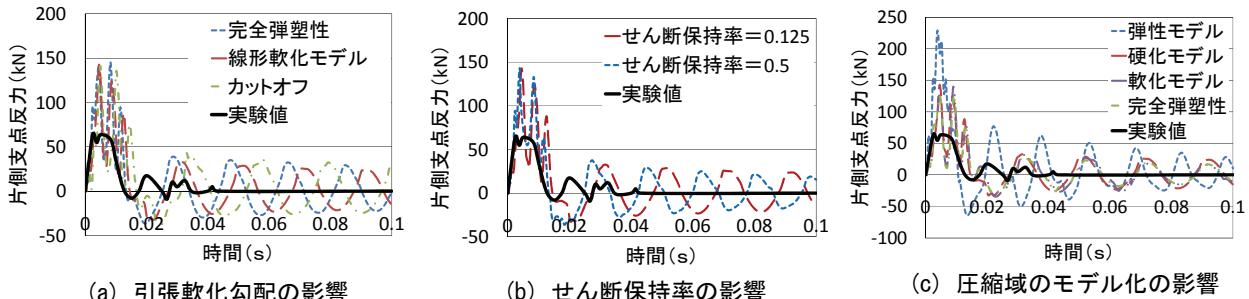


図-12 RC はり B の支点反力応答波形

RC はり B の鉛直方向変位応答の比較図を示す。これらの図より、圧縮硬化しない弾性モデルでは当たり前であるが、非常に剛な応答を示しており、それ以外のモデルではさほど違いは見られず、硬化勾配の違いや圧縮軟化の影響による最大変位や振動周期への影響は比較的小さいことが確認できた。

## (2) 支点反力への影響

変位応答と同様に、図-11、図-12 に本研究で着目したそれぞれのパラメータが支点反力応答に及ぼす影響を示した。これらの図から、引張軟化勾配に関しては、最大支点反力に関してはさほど違いは認められなかったが、勾配を急にするほど、最大支点反力発生以降の振動周期は大きくなる傾向にあることが確認できた。また、実験値との比較では終局ひずみから軟化勾配を決定した線形軟化モデルが比較的精度良く実験値の応答を再現できていることが確認できた。せん断保持率の影響はさほど見られなかったが、せん断保持率を 12.5%とした解析が実験値を比較的精度良く再現できていることが確認できた。

圧縮硬化勾配の影響に関しては、弾性モデルの場合、当たり前であるが、他のケースに比べて剛な応答を示しており、実験値の応答とも異なることが確認できた。また、それ以外のモデルではさほど違いは見られなかった。

## 4. 性能照査に適用しうる簡易な有限要素モデリング

### 4.1 衝撃が作用する RC はりの全体応答を定量的に評価可能な簡易な有限要素モデリングの提案

本研究の成果を踏まえて、比較的小さいレベルの衝撃が作用する曲げ破壊型 RC はりに対する全体応答の性能照査を行う場合、簡易な有限要素モデリングとして、表-1 に示すようなモデリングを提案する。本論文中では検討していないが、要素タイプに関しては鉄筋をソリッド要素やはり要素でモデル化しても適切な応答特性を得ること<sup>1)</sup>、また、本研究で対象とした衝突レベルではひずみ速度効果の影響は大きくないことが確認されているため、表-1 に記した。

表-1 比較的小さいレベルの衝撃が作用する曲げ破壊型 RC はりに対する簡易な有限要素モデリング

項目			モデリング	
直接時間積分法			適切な時間刻みであれば陰解法・陽解法どちらでも良い	
形状のモデル化	要素タイプ	コンクリート	8節点ソリッド要素	
		鉄筋	2節点トラス要素	
離散化レベル			今回の解析対象において、支間40分割、はり高さ8分割、はり幅8分割程度	
鉄筋の付着特性			完全付着モデル	
材料のモデル化	ひずみ速度効果		鉄筋およびコンクリート共に低速度衝突の場合は考慮しない	
	降伏条件		鉄筋およびコンクリート共に von Mises の降伏条件	
	単軸換算の応力-ひずみ関係のモデル化	鉄筋	弾塑性モデル	
			弾塑性モデル、硬化勾配は初期剛性の1/100の勾配	
			・引張強度以降は線形軟化モデル、引張軟化勾配は要素サイズを元に終局ひずみを算定することで勾配を決定 ・せん断保持率は初期せん断剛性の12.5%を保持	

#### 4.2 提案手法の適用限界に関して

本研究で提案した簡易な有限要素モデリングは比較的小さいレベルの衝撃が作用する曲げ破壊型 RC はりに限定したものであるが、その定義が曖昧なため、はり形状（せん断余裕度）や衝突レベル（入力エネルギー）を変化させた RC はりの衝突問題<sup>1),4),8)</sup>を対象とした合計 9 つの解析を実施し、提案した有限要素モデリングの適用限界に関して検討を行った。具体的には、表-2 に示す実験をシミュレートした。その際、比較的な簡易な照査指標な照査指標として考えられる最大変位や残留変位に着目して考察を実施した。検討結果として、図-13(a)に最大変位に関して本研究で提案したモデリングによる解析結果と実験値との誤差が 20%以下か否かを示したものを示す。RC はりの衝撃応答を正確に再現することの困難さを考え、閾値を 20%と設定した。この図より、最大変位に関して、本研究で対象としたような比較的小さなレベルの衝撃を受ける曲げ破壊型の RC はりであれば、提案した簡易な有限要素モデリングで誤差が 20%以下になり、比較的精度良く解析ができることが確認できた。次に、図-13(b)には最大変位と同様に残留変位に関して纏めたものを示す。この図から、ほぼ最大変位と同様ではあるが、最大変位においては誤差 20%以下であったものが残留変位においては 20%以上となるものが確認できた。

表-2 解析ケース

ケースNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
速度(m/s)	7	6	6	6	4	5	5	6.68	5
せん断余裕度	2.4	1.96	1.57	2.13	4.36	2.3	3.96	3.59	3.59
入力エネルギー(kJ)	9.8	3.6	3.6	3.6	1.6	2.5	2.5	2.2	2.5

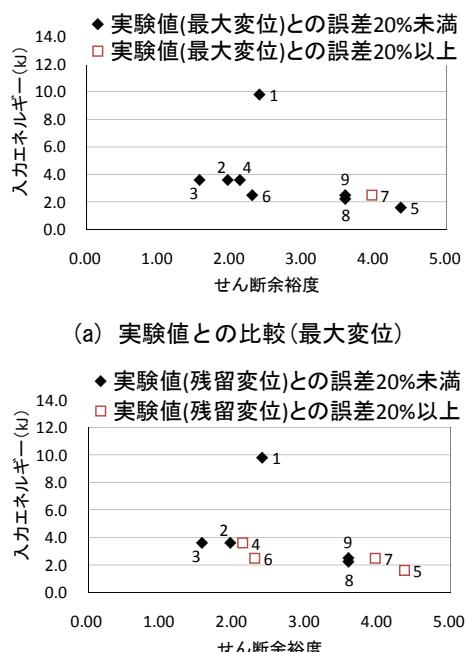


図-13 適用限界の把握

#### 5. 結論

本研究の成果を要約すると以下のようになる。

- (1) 引張軟化勾配が最大変位、残留変位や波形特性に与える影響は大きいことが確認できた。また、クラック発生後のせん断保持率の全体応答への影響は小さいが、せん断保持を少なからず持たせることが安定した解析を提供すると考えられる。
- (2) 本研究の範囲内であれば、圧縮域の硬化勾配が変位応答に与える影響はさほどないことが確認できた。
- (3) 本研究の範囲内で、比較的小さいレベルの衝突作用を受ける RC はりの性能照査に適用しうる FEM を用いた簡易な解析手法の提案を行った。また、その提案手法の適用限界を検討した。

本研究で得られた成果はあくまで「比較的小さいレベルの衝突」や「曲げ破壊型 RC はり」など限定的であるため、今後、提案した性能照査に適用しうる FEM を用いた簡易な解析手法の適用限界をより明確にし、「比較的大きいレベルの衝突」や「せん断破壊型 RC はり」に対する研究を実施することも重要であると認識している。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 土木学会構造工学委員会：性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法、構造工学技術シリーズ No.52, 2007
- 3) 篠崎誠、玉井宏樹、坂田力：RC はりの衝撃応答性状に及ぼす各種解析パラメータの影響評価に関する基礎的研究、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、I-31, 2009, (CD-ROM)
- 4) 安藤智啓：曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃設計手法の開発に関する研究、室蘭工業大学博士（工学）論文、2001
- 5) 玉井宏樹、園田佳巨、後藤恵一、梶田幸秀、濱本朋久：桁端衝突による橋台の損傷度評価および衝突ばね特性に関する基礎的研究、構造工学論文集 vol. 53A, 2007
- 6) 藤掛一典、上林勝敏、大野友則、江守克彦：ひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化、土木学会論文集 No.669/V-50, 125-134, 2001
- 7) 日本計算工学会：鉄筋コンクリート構造の離散化極限解析法、丸善株式会社, 2005
- 8) 山本満明、榎谷浩、音田獎、堀江義徳、熊谷貴秀：鉄筋コンクリートはりに対する重錘落下衝撃実験とその挙動に関する考察、構造工学論文集 vol. 47A, pp.1683-1694, 2001