

# (1) 衝撃荷重を受ける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

A study on FE modeling of quantitatively estimating overall response of RC beams under impact loading

篠崎誠\*, 玉井宏樹\*\*

Makoto SHINOZAKI\*, Hiroki TAMAI\*\*

\*福岡大学大学院修士課程学生, 建設工学専攻 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

\*\* 博士(工学), 福岡大学助教, 社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

キーワード: RC はり部材, 性能照査, 有限要素法, 影響評価  
(RC beam, performance check, Finite Element Method, influence evaluation)

### 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, 土木構造物の設計法が性能照査型設計法へと移行することが要望されてきた。衝撃荷重が作用する防護構造物においても, 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ために技術的な検討が必要とされており, 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と言える。土木学会の取り組みとしては, 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おらず, 更なる取り組みが必要である。

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, 数値解析の方法は質点-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, 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(メッシュ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ついて著者らの既往の研究で得られた成果<sup>3)</sup>を述べており, 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な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. 既往の研究から得られたこと

既往の研究で, RCはりの全体応答へ影響を及ぼす解析要因の把握の基礎検討を実施した。検討内容は, 形状のモデル化(メッシュ分割数や要素タイプの選定)や直接時間積分法の選定が衝撃作用を受けるRCはりの最低固有振動数や最大変位値などの弾性衝撃応答に及ぼす影

響把握を実施した。その際、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、要素タイプは鉄筋をトラス要素化ソリッド要素でモデル化する場合の2ケース、直接時間積分法としてはフーボルト法、ニューマーク法、中央差分法の3ケースを設定し、解析を実施した。その結果、メッシュ分割数は最大変位に与える影響が大きく、特にはり高さ方向とはり軸方向の分割には注意が必要であることが確認できた。一方、要素タイプや直接時間積分法は弾性衝撃応答にほとんど影響を及ぼさないことが確認できた。上述の成果を表-1 に示す。

表-1 RCはりの衝撃応答へ影響を及ぼす解析要因

		変位応答(mm)	
		最大変位	最低固有振動周期
弾性解析	メッシュ分割数	△	△
	要素タイプ	×	×
	直接時間積分法	×	×

○・・・影響大 △・・・影響中 ×・・・影響小

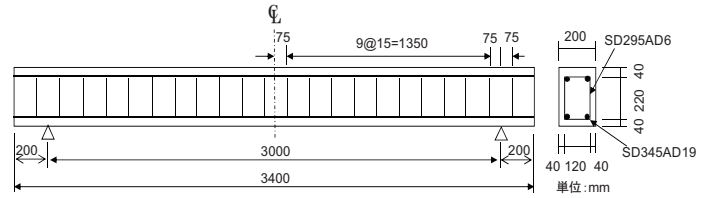
### 3. 仮定するコンクリートの構成則が衝撃応答へ及ぼす影響

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（構成則の選定）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・除荷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種類の重錘衝撃実験を対象とすることにした。

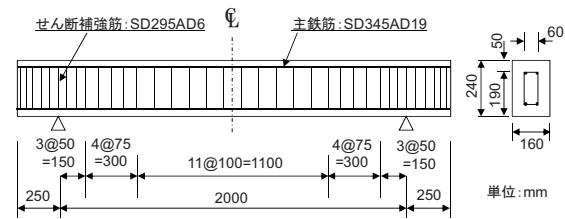
#### 3.1 解析概要

解析対象とした2種類の重錘衝突実験に関して説明する。まず、1つ目は図-1(a)に示す複鉄筋矩形RC単純ばりのスパン中央部に、質量400kg、衝突部の直径150mmの重錘が初速度7m/sで衝突するものである。また、2つ目は図-1(b)に示す複鉄筋矩形RC単純ばりのスパン中央部に、質量200kg、衝突部の直径150mmの重錘が初速度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-1(a)のRCはりを「RCはりA」、図-1(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のせん断スパン比は5.77、せん断余裕度は2.40であり、RCはりBのせん断スパン比は

5.26、せん断余裕度は1.96である。次に、図-2(a), (b)にそれぞれのRCはりの解析モデルを示す。本研究では、力学的な対称性を考慮した1/4モデルとし、コンクリートおよび重錘を8節点ソリッド要素、鉄筋を2節点トラス要素でモデル化している。また、表-2(a), (b)にそれぞれのRCはりの材料定数を示す。

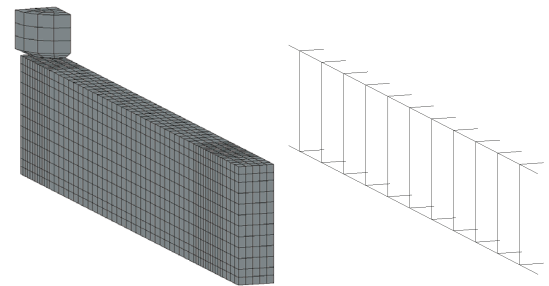


(a) RCはりA配筋図

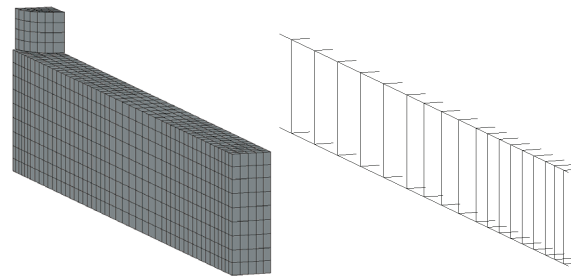


(b) RCはりB配筋図

図-1 解析対象図



(a) RCはりA



(b) RCはりB

図-2 解析モデル図

表-2(a) RCはりAの材料モデル

	コンクリート	鉄筋	
		D19	D6
弾性係数(GPa)	28.3	206	
ポアソン比	0.19	0.3	
圧縮強度(MPa)	39.2	392	343
引張強度(MPa)	3.92		

表-2(b) RCはりBの材料モデル

	コンクリート	鉄筋	
		D19	D6
弾性係数(GPa)	19.3	206	
ポアソン比	0.19	0.3	
圧縮強度(MPa)	27.9	440	295
引張強度(MPa)	2.79		

### 3.2 本研究で仮定したコンクリートの構成則

#### (1) コンクリートの引張域に仮定した材料モデル

まず、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、引張軟化勾配やクラック発生後のせん断保持率に着目した。引張軟化勾配のモデル化としては、図-3(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增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、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に関しては、軟化勾配が要素サイズにより決定されるため、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ることで軟化勾配を決定している<sup>9)</sup>。

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

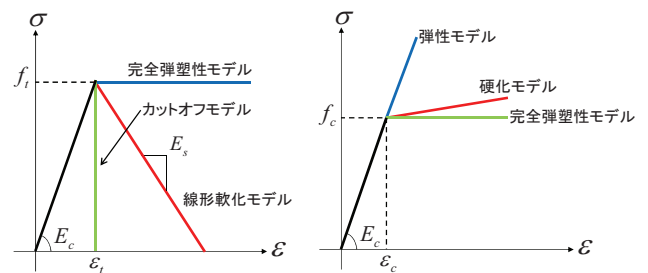
ここで、 $G_f$ は引張破壊エネルギー、 $f_t$ は引張強度、 $h$ は要素最小長さ、 $E_c$ はコンクリート要素の弾性係数を示している。なお、本研究では仮想ひび割れ幅を0.02mmと仮定し<sup>9)</sup>、引張強度以降の軟化曲線より下の面積を破壊エネルギーと考えている。なお、引張軟化勾配のモデル化の影響を把握するために、軟化勾配のモデル化以外は全て一定とした。具体的には、せん断保持率は12.5%、圧縮域の硬化勾配は1/100硬化モデルで一定として解析を実施することとした。

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ため<sup>7)</sup>、本研究ではクラック発生後のせん断剛性を表すパラメータとしてせん断保持率を用いている。せん断保持率とは、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である。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た。具体的には、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。

#### (2) 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、圧縮軟化勾配や除荷勾配に着目した。ただし、本論文においては、紙面の関係上、除荷勾配に関する記述は割愛させていただく。圧縮硬化勾配のモデル化としては、図-3(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、圧縮強度以降その応力を保持したままひずみだけが增大する完全弾塑性モデルの3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た。なお、圧縮硬化勾配の影響のみを把握する目的で、この際の引張軟化勾配は終局ひずみから算定した軟化モデル、せん断保持率は12.5%で一定とした。



(a) 引張域 (b) 圧縮域

図-3 材料モデル図

### 3.3 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-4(a)、図-5(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を確認できた。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。

次に、図-4(b)、図-5(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、せん断保持率の影響に関しては、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を確認でき、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といえる。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-4(c)、図-5(c)に圧縮硬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、圧縮硬化しない弾性モデルでは当たり前であるが、非常

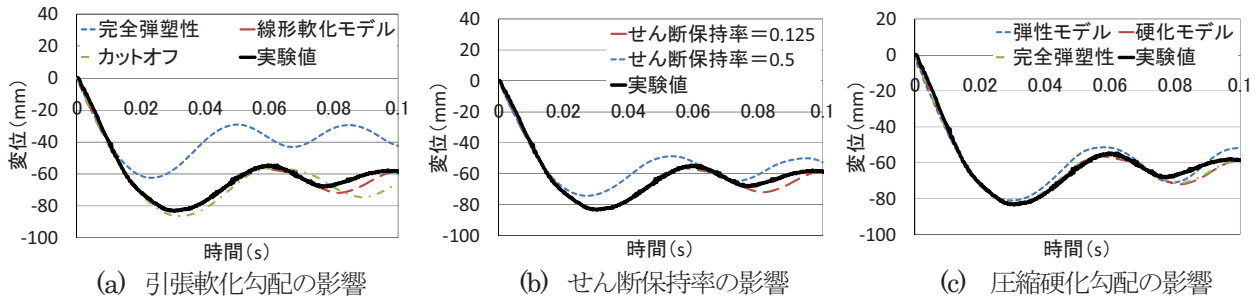


図-4 RCはり A の変位応答波形

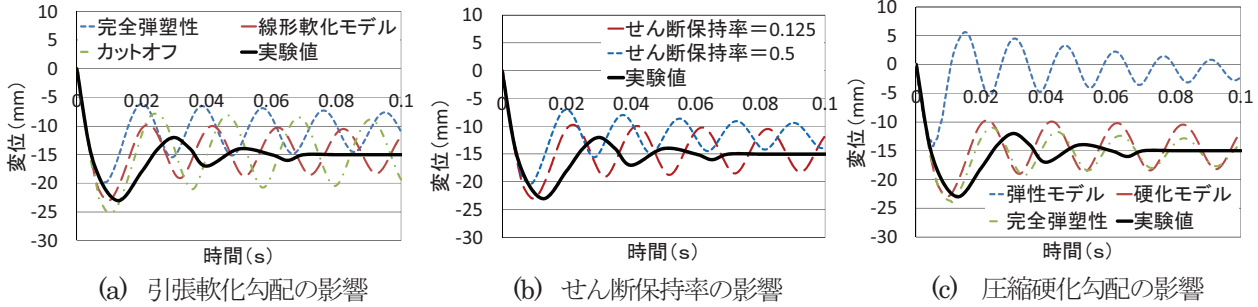


図-5 RCはり B の変位応答波形

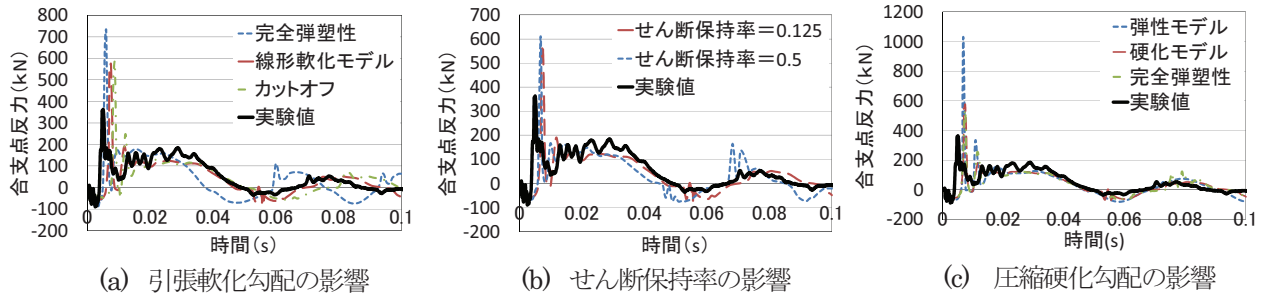


図-6 RCはり A の支点反力応答波形

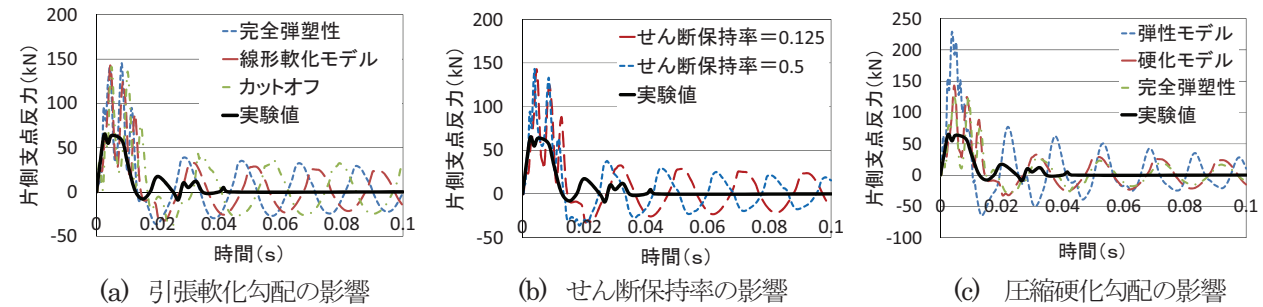


図-7 RCはり B の支点反力応答波形

に剛な応答を示しているが、1/100 硬化モデルと完全弾塑性モデルではさほど違いは見られず、硬化勾配の違い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-6、図-7 に本研究で着目したそれぞれのパラメータが2種類のRCはりの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、硬化しない弾性モデルの場合では、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、1/100 硬化モデルと完全弾塑性モデルではさほど違いは見られなかった。

表-3 本研究で提案する簡易な解析手法

直接時間積分法		陰解法: 時間刻み0.000001~0.001	
解析のモデル化	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
メッシュサイズ		一辺20~30mmの要素を用いれば良いが、衝突部付近では衝突物のメッシュサイズより小さくする必要がある	
鉄筋とコンクリートの付着のモデル化		完全付着モデル	
材料のモデル化 に関して(鉄筋、 コンクリート)	ひずみ速度効果		低速度衝突の場合は考慮しなくても良い
	降伏条件		von Misesの降伏条件
	単軸換算の応力-ひずみ関係のモデル化	引張域の軟化モデル	メッシュサイズと破壊エネルギーから終局ひずみを算定することで勾配を決定する
		圧縮域のモデル化(硬化勾配)	低速度の衝突で応答が弾性範囲内に留まる場合、勾配は関係ないが、一般的に用いられる初期剛性の1/100の勾配が望ましい

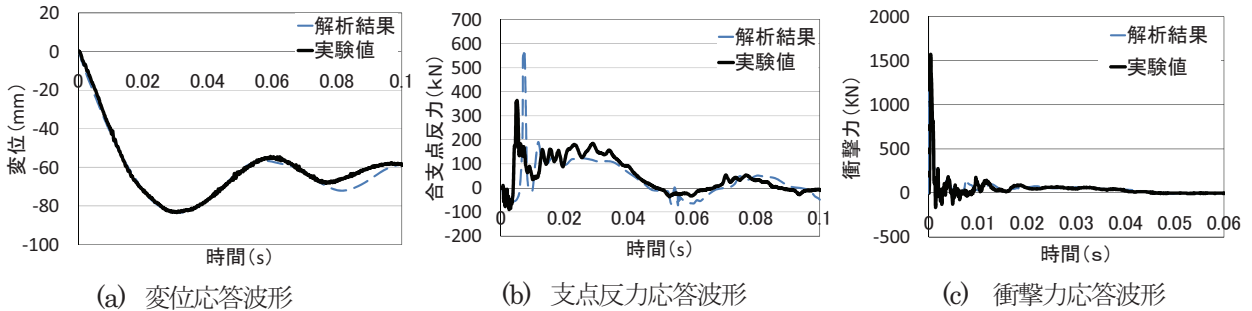


図-8 RCはりAの各種応答波形

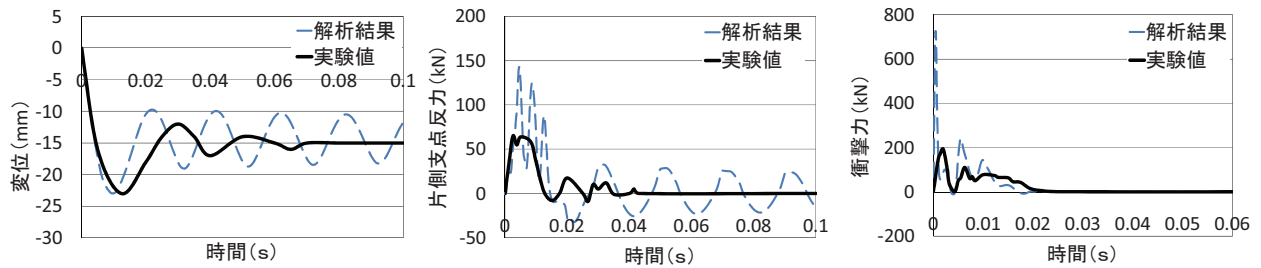


図-9 RCはりBの各種応答波形

4. 性能照査に適用しうるFEMを用いた簡易な解析手法

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

本研究では、比較的小さいレベルの衝撃が作用する曲げ破壊型RCはりのパラメトリックスタディを行うことでRCはりの衝撃応答へ影響を及ぼす解析要因の把握を実施した。既往の研究結果としては2章で述べたような結果が得られており、本研究ではコンクリートの構成則に着目した解析を実施し、その結果として3.3で述べたようなことが得られた。

これらの結果を踏まえて、比較的小さいレベルの衝撃が作用する曲げ破壊型RCはりの性能照査に適用しうるFEMを用いた簡易な解析手法としては、表-3に示すようなモデリングを提案する。この簡易な解析手法を用いてRCはりAおよびBの衝突解析を実施した結果を図-7に示す。図-7より、比較的小さいレベルの衝撃が作用する曲げ破壊型RCはりの全体応答に限定した場合、本研

表-4 解析ケース表

caseNo.	速度 (m/s)	せん断余裕度	a/d	重錘質量 (kg)
1	7	2.40	5.77	400
2	6	1.96	5.26	200
3	6	1.57	5.26	200
4	6	2.13	5.88	200
5	4	4.36	5.88	200
6	5	2.30	8.33	200
7	5	3.96	5.88	200
8	6.68	3.59	4.76	100
9	5	3.59	4.76	200

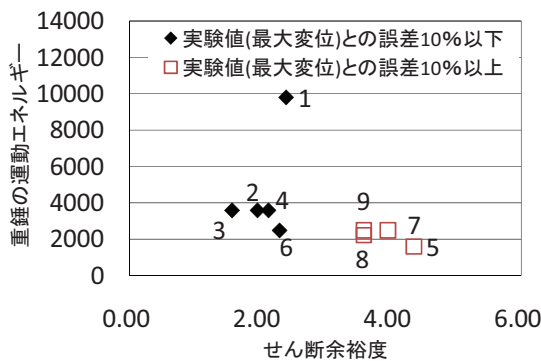
究で提案した簡易な有限要素モデリングを用いた解析手法で十分な精度が得られることが確認できた。

4.2 提案手法の適用限界に関して

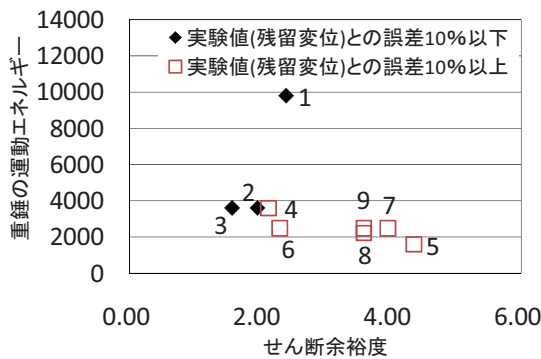
本研究で提案した簡易な解析手法は比較的小さいレベルの衝撃が作用する曲げ破壊型RCはりに限定したものであるが、その定義が曖昧なため、表-4に示すように形状(せん断余裕度)や衝突レベル(入力エネルギー

一) が様々な RC はりの衝突問題<sup>1),4),8)</sup>を対象とした解析を実施し、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。なお、その際、比較的な簡易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、まず、図-10(a)に最大変位に関して本手法による解析結果と実験値との誤差が10%以下か否かを示したものを示す。この図より、最大変位に関して、入力エネルギーが4000 J以上10000 J以下で、RC はりのせん断余裕度が2.0程度であれば、本研究で提案した簡易な解析手法で誤差が10%以下になるため比較的精度良く解析ができることが確認できた。しかし、せん断余裕度が4.0と大きくなると、誤差が10%以上になるため、別途検討が必要であると考えられる。次に、図-10(b)に残留変位に関して本手法による解析結果と実験値との誤差が10%以下か否かを示したものを示す。この図から、ほぼ最大変位と同様に、入力エネルギーが4000 J以上10000 J以下で、RC はりのせん断余裕度が2.0程度であれば、本研究で提案した簡易な解析手法で較的精度良く再現可能である傾向が確認できた。しかし、中には、ケース4と6のように例外もあるため、原因究明する必要があると考えている。



(a) 最大変位



(b) 残留変位

図-10 提案手法の適用限界

## 5. 結論

本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- (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) 圧縮域の硬化勾配が変位応答に与える影響はほとんどないことが確認できたが、除荷勾配は影響を及ぼす可能性があるため、適切にモデル化する必要があると言える。
- (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。
- (4) 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」など限定的なものであるため、今後、更なる取り組みが必要であると考えられる。特に、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」を対象とした同様な研究を実施していく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，音田奨，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。