

有限要素法を用いたRCはりの衝撃応答解析に関する一考察

A study on the analysis of impact behavior of reinforced concrete beam by finite element method

橋紗代子*, 榎谷浩** 中村佐智夫***

Sayoko TACHIBANA, Hiroshi MASUYA, Sachio NKAMURA

*学 修(工) 金沢大学大学院自然科学研究科 博士後期課程 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

**正 工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

***正 日本サミコン株式会社 (〒950-0925 新潟県新潟市弁天橋通り1-8-28)

キーワード：衝撃応答解析, RCはり, ひずみ速度効果, 有限要素法
(Impact behavior analysis, Reinforced concrete beam, Strain rate effect, Finite element method)

1. 序論

衝撃を受ける構造物, 信頼できる高い安全性を確保するために, 性能照査型耐衝撃設計法に関する技術的検討が急務である. 性能照査を行うためには, 標準化された実験方法および解析手法を確立する必要がある.

我が国は, 低速度の衝撃に対する実験手法が発達しているといえる¹⁾⁻⁴⁾. また, 衝撃現象を再現するために, 統一された数値解析手法の確立をめざして多くの研究機関が衝撃解析手法の適用性の検討を行っている⁷⁾. しかし, 衝撃応答解析法が十分に確立されているとは言い難いのが現状である. また, ひずみ速度効果の適用の考え方は, 解析手法毎に異なっている.

本研究では, 数値解析手法の確立を目的として, 汎用ソフト ADINA(Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)を用いてRCはりをモデル化し, 実験との比較により衝撃現象の再現を試み, 衝撃現象が材料のひずみ速度効果に与える影響などについ

て検討し, その使用性と有効性について確認した

2. 実験の実施

2.1 供試体の概要

図-1には, 本研究で使用したRCはりの形状寸法および配筋状況を示している. 軸方向鉄筋はD13-SD345をせん断筋はD6-SD295Aを用いた. 表-1には, 用いた試験体の設計値一覧を示す. せん断余裕度 $\alpha(=V_{usc}/P_{usc})$ が1.0以上であり静的載荷時に曲げ破壊が先行するはりである.

2.2 実験概要

衝撃実験には金沢大学構造工学実験室所有の重錘落下式実験装置を使用した. 重錘落下式実験装置は, 一枚あたり約14kgの鋼板を重ねて, その下にロードセルを固定し, 総重量を300kgとしたものを重錘とし, 先端部の曲率が565mmであり, 半径75mmの円柱上の重錘を所定の高さまで吊り上げ, 自由落下させる衝撃実験を行った.

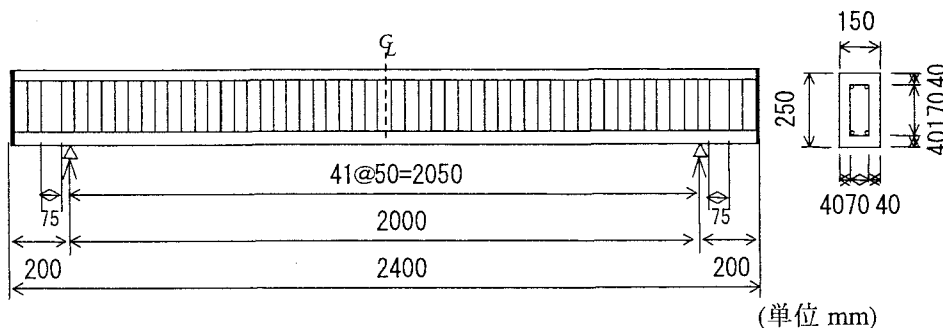


図-1 RCはりの形状寸法

表-1 設計値一覧

せん断スパン比 a/d	2.38
静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	32.77
静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	95.12
せん断余裕度 $\alpha(=V_{usc}/P_{usc})$	2.90

表-2 用いた有限要素の一覧

全要素数	1605	
全節点数	5002	
コンクリート	固体要素	
軸方向鉄筋	固体要素	
せん断筋	はり要素	
要素分割	X	2
	Y	12
	Z	48

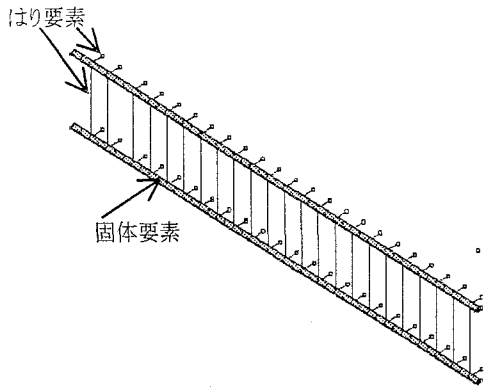


図-3 鉄筋-せん断補強筋モデル

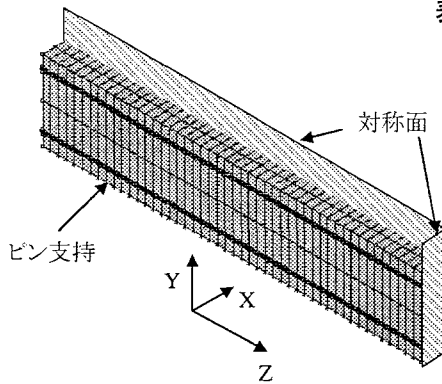


図-4 コンクリートモデル

3. 数値解析の概要

3.1 数値解析モデル

有限要素解析に使用した、鉄筋-せん断補強筋モデルを図-3に、コンクリート要素を図-4に示す。対象性を考慮して全体の1/4モデルとした。表-2に示すように、要素分割はZ方向に48分割、X方向に2分割、Y方向に12分割とし、用いた全要素数は1605、全節点数は5002である。

以下に、有限要素モデルの概要を記述する。RCはりには実験に用いたはりの形状寸法等をできるだけ、忠実に再現した。軸方向鉄筋は実際の鉄筋と同じように円柱固体要素として作成し、せん断補強筋は計算の簡略化のためにはり要素とした。コンクリート要素と軸方向鉄筋およびせん断筋の要素間は、完全付着を仮定している。

時間間隔 Δt は荷重の変化に合わせ、5つの時間間隔を用いた。(具体的には $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{sec}$ の範囲の値を使用)1ケース当たりの解析所要時間は約20分程度である。(pentium4使用)

3.2 材料物性

以下にコンクリートと鉄筋等の材料物性モデルの概要について記述する。

(1) コンクリート

図-5にはコンクリートに対して使用した等価1軸応力-ひずみ曲線を示している。コンクリートはひびわれおよび圧壊を考慮した弾塑性体である。徐荷時の剛性は図-5に示す応力-ひずみ曲線の経路に従う。表-3(a)に解析に基準値として用いた応力、ひずみ等の特性値一覧を示す。弾性係数 E_c 、最大引張強度 σ_t 、最大圧縮強度 σ_c 、ポアソン比 ν_c は実験時に測定した材料試験の結果を用いた。極限ひずみに対応する強度 σ_u とひびわれ後引張強度 σ_{ip} は仮定値を用いた。

(2) 鉄筋

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' を初期弾性係数 E_s の0.4%と仮定した等方バイリニアモデルである。表-3(b)に解析で私用した特性値を示す。降伏後は von Mises の降伏条件に従うこととした。

(3) ひずみ速度効果

個別要素法を用いた著者らの既往の研究⁶⁾においてはひずみ速度効果として強度増加率を考慮したが本研究においてもコンクリートのひずみ速度効果を必要に応じて、引張強度増加率 DIF_s 、圧縮強度増加率 DIF_c 、として仮定し考慮した。また、鉄筋のひずみ速度効果は次式で考慮した¹⁰⁾。

$$DIF_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_y^0} = \left[1 + b \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}_s^p}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、 σ_y^0 は静的降伏応力、 $\dot{\epsilon}_s$ はひずみ速度、 b はひずみ速度効果係数である。 $\dot{\epsilon}_s^p$ は解析ステップでの累積塑性ひずみ速度を示し、ひずみ速度効果を適用した降伏応力は解析ステップ毎に変化する。

3.3 解析条件

(1) 荷重方法

実験で得られた衝突速度1m/sの荷重波形を図-7に示す。この曲線を図-4に示す解析モデルのスパン中央75mm×75mmの領域に等分布荷重として載荷する。

(2) 解析ケース

表-4に数値解析ケースを示す。case1は静的解析で用いた材料特性を用いて荷重を載荷させ、動的応答解析を行った。case2~7は鉄筋とコンクリートのひずみ速度効果を考慮に加えた解析ケースである。コンクリートのひずみ速度効果は寸法効果などの影響が大きく関わってくるため、先に鉄筋のひずみ速度を適用することとした。式(1)において、ひずみ速度は実験より0.8(1/sec)、ひずみ速度効果係数はスパ

表-3 解析に用いた物性値一覧

(a) コンクリート

弾性係数	E_c	25900 Pa
ポアソン比	ν_c	0.18
最大引張強度	σ_t	2.79 Pa
ひびわれ後引張強度	σ_{tp}	1.52 Pa
最大圧縮強度	σ_c	31.9 Pa
最大圧縮強度に対応するひずみ	ϵ_c	0.002
極限ひずみに対応する強度	σ_u	22 Pa
極限ひずみ	ϵ_u	0.0035

(b) 鉄筋

	弾性係数(GPa)	降伏強度(MPa)	ポアソン比
	E_s	σ_y^0	ν_s
軸方向鉄筋	210	383	0.3
せん断筋	210	338	

表-4 解析ケース

case	鉄筋強度増加率 DIF_s	引張強度増加率 DIF_{ct}	圧縮強度増加率 DIF_{cc}
1	-	-	-
2	式(1)	-	-
3	式(1)	1.8	-
4	式(1)	2.2	-
5	式(1)	2.6	-
6	式(1)	2.2	1.2
7	式(1)	2.2	1.4

ン中央の下鉄筋の応答初期ひずみの実験と解析の比較により、 $b=1$ とした。Case3~7は鉄筋強度増加率に加えてコンクリートの強度増加率を変化させたものである。コンクリートの材料特性に及ぼすひずみ速度効果は、一般的に引張の場合最大で圧縮が最小、曲げはその中間であると報告されている。また、コンクリートの増加率は鋼材に比べ一般的に大きいとされている¹⁾。よって、コンクリートの強度増加率に関しては、引張強度増加率に関して先に検討を行い、その後圧縮強度増加率を加えた。引張側のコンクリートの応力ひずみ曲線は、弾性係数を変えず最大引張強度を DIF_{ct} 倍した。圧縮側の応力ひずみ曲線は強度を DIF_{cc} 倍して、それに対応するひずみはそのままである。強度増加率の設定に関しては、文献(5)より載荷速度 1m/s なら $10^{-1} \sim 10^1$ /sec と推測され、文献(6)より引張強度は 2~3 倍程度と推測されると考えている。圧縮強度は引張強度の 6~10 倍程度と推測される。

4. 実験結果と解析結果の比較

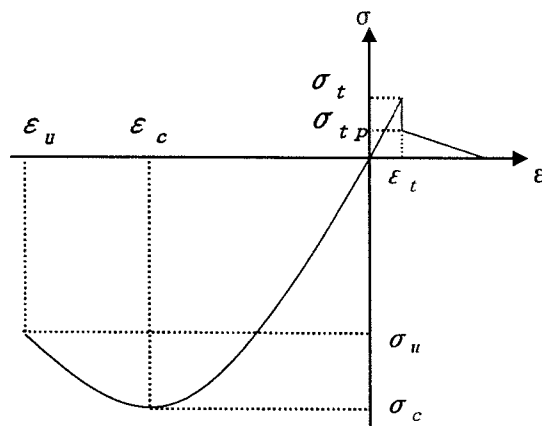


図-5 コンクリートモデル

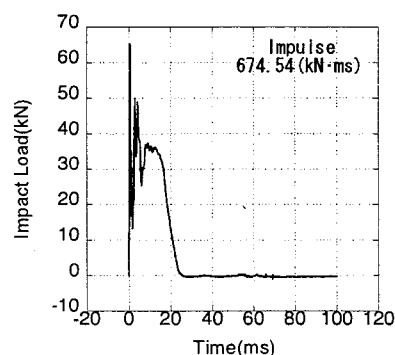


図-7 荷重波形

図-10は、実験と解析によるスパン中央の変位の時間応答曲線を示したものである。図-11は実験と解析における反力の時間応答曲線を示したものである。なおここで示した実験の反力は左右の合支点反力の平均値である。

図-10の変位波形の比較について、図-10(a)のcase1より、解析で得られた変位は実験より大きな値を示していることがわかる。最大値に関しては、解析値は実験値より約10%程度大きい値を示している。また、30ms時以後に認められる変位(残留変位)については、解析値は1.4~0.3mmの間で振動しており、0.76~-0.3mmの間で振動している実験値より大きくなっている。

図-10(b)のcase2より、最大値については、解析値は実験値に比べの10%程度大きい値を示している。残留変位については、解析値は1mm~0mmの間で振動しており、実験値よりわずかに大きくなっている程度である。このことにより、式(1)の鉄筋のひずみ速度効果を適用することによって、最大値にはさほど影響を与えないが、残留変位はcase1に比べ減

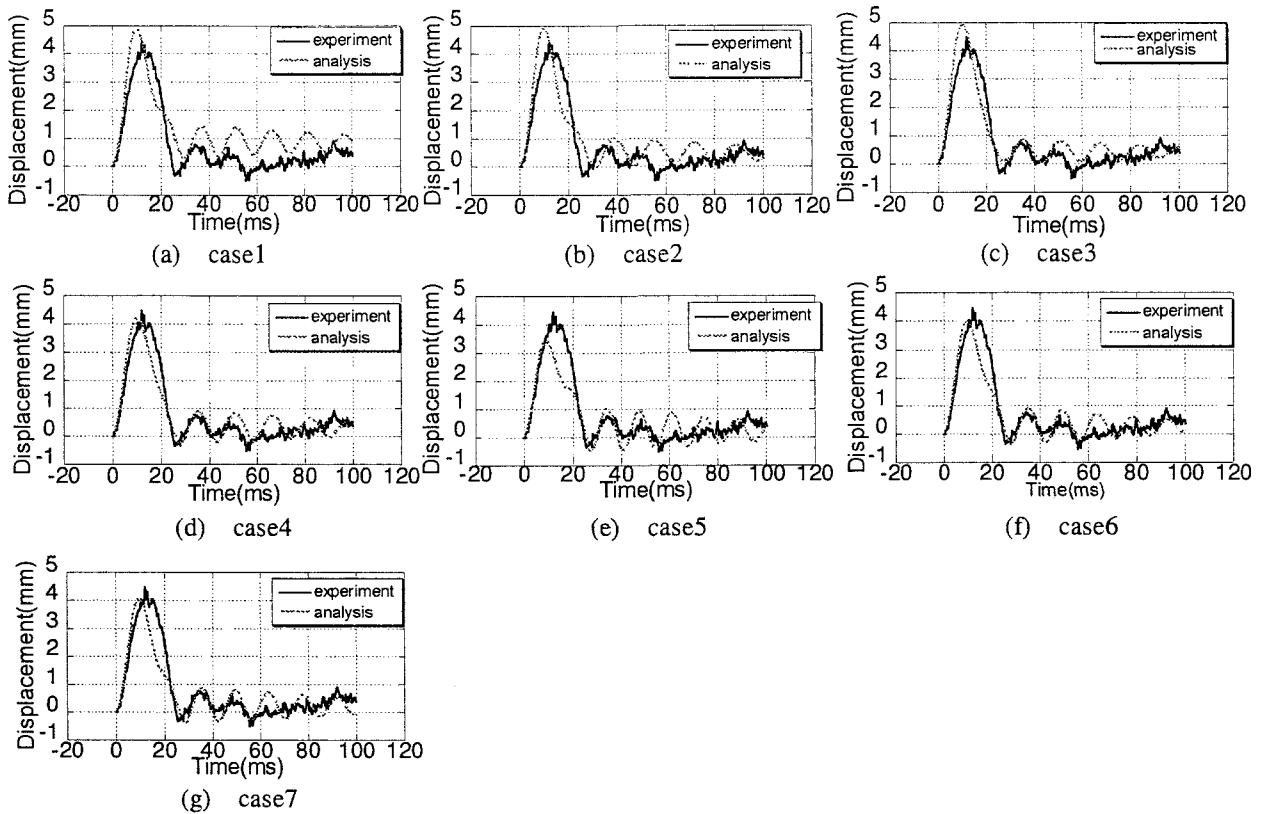


図-10 実験と解析におけるスパン中央変位の応答曲線

少しており、残留変位に大きく影響を与え、実験結果との差異が小さくなることがわかった。これは、載荷している間での鉄筋のひずみ速度効果により、case2の鉄筋の降伏強度が増加し残留変位に現れたと考えられる。

図-10(c)のcase3より、最大値については、解析値は実験値に比べ10%程度大きな値を示していることがわかる。残留変位は1~0mmの間で振動していることがわかる。次に、図-10(d)のcase4より、最大値、100ms時の残留変位ともに実験値と解析値がほとんど同じ値である。残留変位は1mm~-0.2mmの間で振動していることがわかる。また、25ms以降の解析値は実験値とほぼ良好に一致している。

図-10(e)のcase5より、最大値については解析値が実験値に比べ約23%小さいことがわかる。残留変位は、1.5~-0.5mmの間で振動し実験値より振動振幅が大きくなっていることがわかる。このことにより、引張強度増加率 DIF_{cc} を増加させることによって、最大値は減少するが、残留変位はそれほど減少しないが残留変位の振動振幅は増加することが明らかとなった。これは引張強度の増加により弾性的な挙動が卓越し振動振幅が増大したと考えられ。また20ms未満ではひびわれが発生せずコンクリートが強くなり最大値が減少したと考えている。

図-10(f)のcase6より、最大値については、解析値が実験値に比べ約10%小さいことがわかる。残留

変位は1~-0.4mmの間で振動していることがわかる。25ms以降の残留変位の解析値と実験値の波形は、ほぼ類似した曲線を示している。図-10(g)のcase7より、最大値については、実験値に比べ約10%小さいことがわかる。残留変位はcase6と同程度の1~-0.4mmの間で振動している。また、25ms以降の残留変位の解析値と実験値の波形は、ほぼ類似した曲線を示している。圧縮強度増加率 DIF_{cc} を変化させると、最大値がわずかずつ小さくなっていくが、残留変位にそれほど変化は見られない。case6とcase7には有意な差異は見られない。一般的にコンクリートのひずみ速度効果に関して圧縮は最小だと言われているので、この載荷速度では DIF_{cc} を変化させてもひずみ速度効果の影響が現れていないと考えられる。

図-11(a)のcase1より、解析値は実験値に概ね類似した波形を示しているが、時刻が0~20msの範囲では波形の中間値から約50%前後の振幅で振動している事がわかる。40ms以降では解析値にはそれほど高周波成分が認められない。図-11(b)のcase2を見ると、0~15msの範囲ではそれほど変動せず、実験値とほぼ一致している。60ms以降から多少の位相のずれが認められるものの全体的に良好に一致している。

図-11(c)のcase3より、25msで解析値に高周波成分が認められる。解析値と実験地に全体的に良好

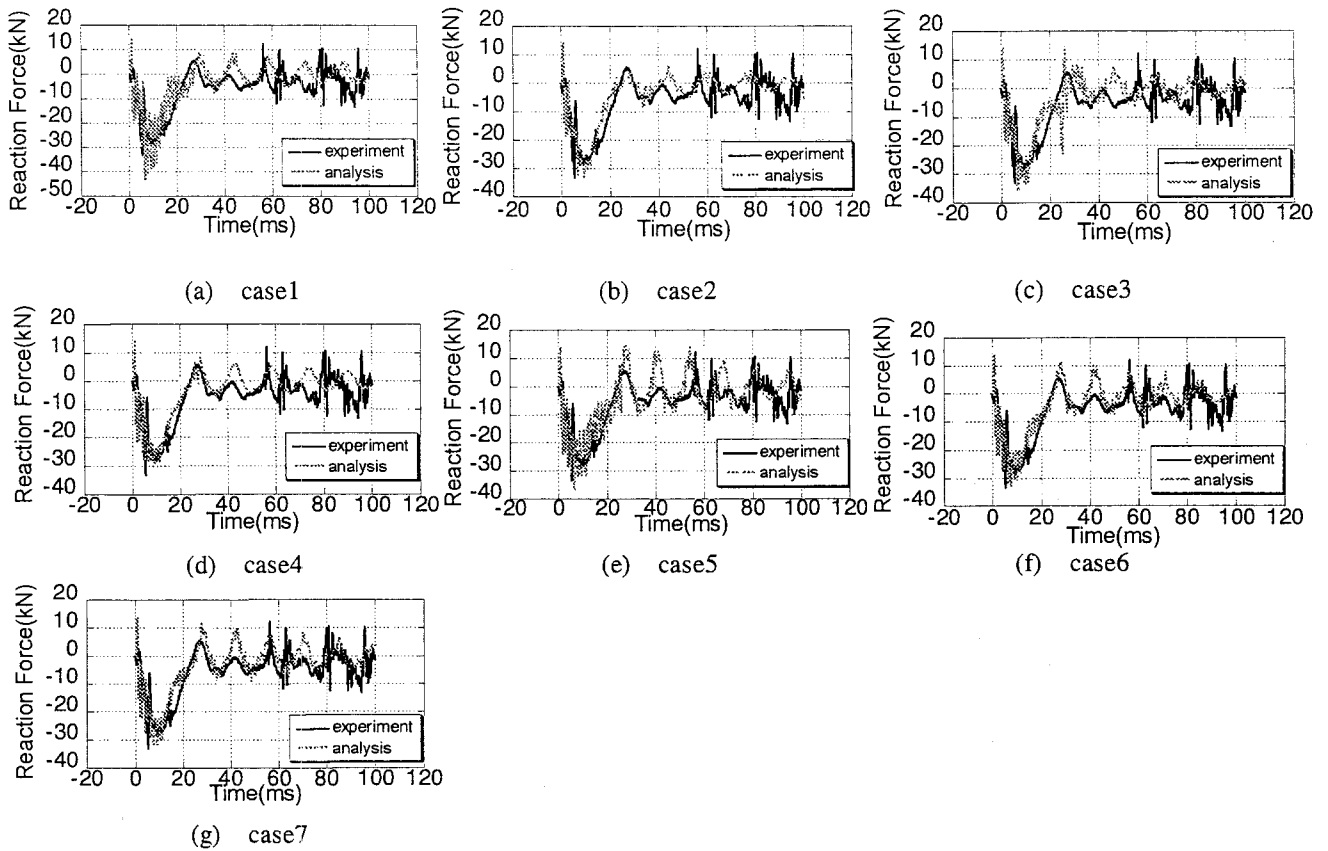


図-11 実験と解析における反力の応答曲線

に一致している。図-11 (d) の case4 においても、実験値と非常に類似した波形が確認できる。40ms 以降から多少の位相のずれが認められるが、全体的に良好に一致している。図-11 (e) の case5 より、0~20ms の範囲で解析値において中間値の値から約 20% 前後の振幅を有しながら振動していることがわかる。25ms 以降の波形に認められる振動の振幅は実験値より大きく、例えば 42ms 時の値を見ると解析値は実験値に比べ約 9 kN 大きい。このことにより、引張強度増加率 DIF_{ct} を増加させることによって波形の振動の振幅が大きくなっていく傾向にあるといえる。同じ荷重でもコンクリート引張強度の増加により弾性的な挙動が卓越し、結果としてより振動の振幅が大きくなったと考えられる。

図-11 (f) の case6 より、0~20ms の範囲で解析値において中間値の値から約 10% の振幅を有しながら振動している。この場合も、20ms 以降の波形に認められる振動波形は、case5 より小さいが、実験値に比べ大きく、42ms 時の値を見ると解析値は実験値より約 7 kN 大きくなっている。図-11 (g) の case7 より、0~20ms の範囲で解析値は中間値の値から約 10% 前後振幅を有しながら振動している。この場合も、20ms 以降の波形に認められる振動波形は、case5 より小さいが、実験値に比べ大きく、42ms 時の値を見ると解析値は実験値より約 6 kN 大きくなっている。

case6 と case7 ほぼ同様の波形である。すなわち圧縮強度増加率 DIF_{cc} は反力にはほとんど影響を与えないことがわかる。これも、この荷重速度では圧縮側のひずみ速度効果が現れていないと考えている。

以上の比較検討により、本研究で示した RC はりの衝撃実験結果をよりよく再現するには鉄筋およびコンクリートの強度増加率を使用することが望ましい。具体的には表-4 に示した解析ケースの case4、すなわち鉄筋の強度増加率に(1)の式をコンクリートの引張強度増加率は $DIF_{ct}=2.2$ 、コンクリートの圧縮強度増加率は $DIF_{cc}=1.0$ の case4 が最も良く実験値を再現している。引張強度増加率 $DIF_{ct}=2.2$ は文献から推測される範囲内であり、妥当な値だと考えている。また、圧縮強度増加率 $DIF_{cc}=1.0$ を適用すると圧縮強度は引張強度の約 5 倍になり、推測される範囲では妥当とは言えない。

5. 結言

本研究では、数値解析手法の確立を目的として、汎用ソフト ADINA を用いて RC はりをモデル化し、実験と解析の比較により衝撃現象の再現を試み、衝撃現象が材料のひずみ速度効果に与える影響などについて検討し、その使用性と有効性について検討した。以下に本研究で得られた結果を示す。

- 1) 静的載荷での実験と解析の比較を行い、変位波形およびひびわれ状況の比較により本解析で作成した解析モデルの妥当性を示した。
 - 2) 本解析で RC はりの衝撃解析を行う場合の鉄筋とコンクリートにおけるひずみ速度効果の影響について具体的な検討結果を示した。
 - 3) 衝突速度 1m/s の実験結果との詳細な比較検討により、コンクリートのひずみ速度効果は引張強度増加率 $DIF_{ct}=2.2$ 、圧縮強度増加率 $DIF_{cc}=1.0$ を使用し、鉄筋に式(1)の DIF_s を使用した場合に本解析が非常によく実験結果を再現することを示した。
 - 4) 文献より引張強度増加率 $DIF_{ct}=2.2$ が実験に即した値であることがわかった。
- 8) P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro : コンクリート工学, 微視構造と材料特性, pp73, 1998. 技報堂出版
 - 9) Klaus-J Bathe : Finite Element Procedure, Prentice-Hall, Inc., 1996.
 - 10) Klaus-J Bathe : ADINA Theory and Modeling Guide Volume1 ADINA R&D, Inc, pp259-320, 2003.
 - 11) 江田 智, 別府万寿博, 大野友則, 藤掛一典, 佐藤紘志 : 引張試験法および試験体寸法の相違がコンクリートの動的引張強度に及ぼす影響, 構造工学論文集 Vol. 49A, pp1279-1288, 2003.

今後、さらに各種の実証衝撃実験を行い、本研究の結果を応用し一般的な衝撃解析手法を提案していきたい、耐衝撃設計に役立てたいと考えている。

謝辞

本研究の実験遂行およびデータ整理にあたり、大菅崇之氏(株式会社ホクコン, 研究当時研究室4年生)には多大な協力を頂きました。ここに心より感謝いたします。

6.参考文献

- 1) 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会 : 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ 15, 2004.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓 : 静的載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp177-190, 2000.
- 3) 藤井 学, 宮本文穂, 森川英典 : 衝撃を受ける鉄筋コンクリートはりの力学的挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.360/V-3, pp51-68, 1985.
- 4) 中田吉彦, 榎谷 浩, 梶川康男, 熊谷貴秀 : 重錘衝突による鉄筋コンクリートはりの衝撃特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.46A, pp1831-1842, 2000.
- 5) 土木学会構造工学委員会 : 構造物の衝撃挙動と設計法, 構造工学シリーズ 6, pp79-87 1994.
- 6) 江田智, 別府万寿博, 大野友則, 佐藤紘志 : 異なる急速載荷引張試験法によるコンクリートの動的引張強度特性の評価, 構造工学論文集 Vol. 50A pp1305-1315 2004.
- 7) 岸 徳光, 安藤智啓, 井元勝慶, 河野良幸, 香月 智, 上林厚志, 榎谷 浩 : 矩形 RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関するラウンドロビンアナリ