

有限要素法(ADINA)による RC はり衝撃挙動解析に関する研究

橘紗代子*, 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)

High safety is generally required for a reinforced concrete structure from impact force under various situations. While many research organizations have proposed the analytical technique, it is hard to say that the general-purpose analyzing method for impact behavior is fully established. In this research, various examinations are performed about the analysis model and the dynamic constitutive relation using one of general-purpose finite element method software ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis). The applicability and its validity to impact analysis have been shown.

Key Words : Impact response analysis, RC-beam, Strain rate effect, Finite element method

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

1. 諸言

衝撃を受ける構造物の力学的挙動は構造物の種類, 構造物を構成する材料特性に密接に関連している. 特に土木構造物は鋼・コンクリートから成る複合構造であるため問題を一層複雑なものとしている¹⁾.

また, 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物に発生するひびわれ, 付着・せん断破壊, 裏面剥離などの現象はコンクリートの引張および圧縮特性が重要な因子となっている. ひずみ速度効果はかなり明らかにされてきているが, 高速の場合, 実験条件の設定や測定上の問題点または, 寸法効果の影響などより広く設計や解析に用いられるレベルまで十分には明らかにされていないのが現状である^{1), 2)}. 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.

飛来物・落下物はあるいは移動物体の衝突による衝撃荷重を受けることが予想される構造物としては, 落石防護工, 砂防ダム, 原子力発電関連施設そしてガードフェンスなどがある. これらの耐衝撃設計は, 現在基本的には最大衝撃荷重を静的荷重に置き換えて許容応力度法に基づいて行われている. しかし, 今後は上記構造物を対象とする衝撃荷重および構造物の機能・目的・形式などが

異なるため, 構造物個々の特性を考慮した設計法の確立が望まれている.

そのためには, 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, 落石災害が多く発生しており, 衝撃分野の研究が昔から盛んに行われている. 衝撃実験が多くの研究機関で行われており, 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³⁾⁻⁶⁾.

近年のコンピューター技術の発展により, 衝撃現象を再現するために, 様々な解析手法が提案されてきており, 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, 現在広く衝撃解析に使用されている数値解析手法は限定的であり, 汎用性のある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.

本解析で使用した汎用ソフト ADINA(Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)とは, 線形/非線形構造解析モジュール, 熱伝導解析モジュール, 流体解析モジュールおよびプリポストモジュールから構成されている. 材料非線形, 大変形, 接触, 摩擦など, 非線形を考慮しており, 各解析モジュールを組み合わせることで, 熱・構造連成解析を行うことが可能である.

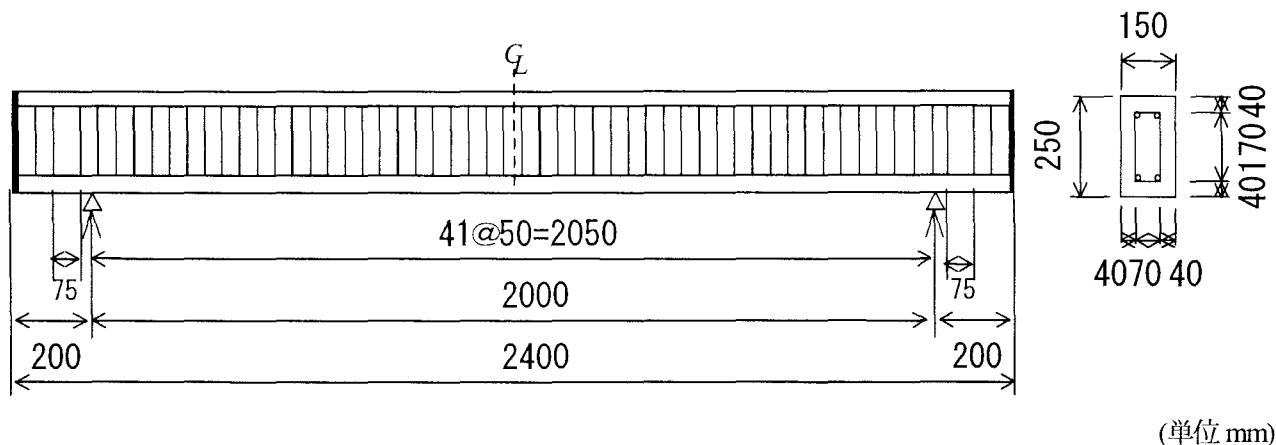


図-1 RC はりの形状寸法および測定項目

表-1 供試体の静的設計値一覧

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

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と測定項目を併せて示している。試験体の断面形状は梁幅×梁高が、150×250mm であり、純スパン長は 2000mm である。軸方向鉄筋は D13-SD345 をせん断筋は D6-SD295A を用いている。供試体端部に厚さ 12mm の鉄の定着版を用いて軸方向鉄筋は鉄板と溶接している。コンクリートは、普通セメントを使用し、粗骨材には最大寸法 25mm、実積率 65.0%、表乾状態における密度 2.62 と 2.73g/cm³ の砂利を用いた。細骨材には粒径 2.5mm、粗粒率 2.40、表乾状態における密度 2.60g/cm³ の砂を用いた。表-1 には、用いた試験体の設計値一覧を示す。これは、表-3 に記述した値に基づいて計算した。本試験体は実構造を想定していないことから、各耐力算定時の部材係数 $\gamma_b=1.0$ とした。本試験体はせん断余裕度 $\alpha (= V_{usc}/P_{usc})$ 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。

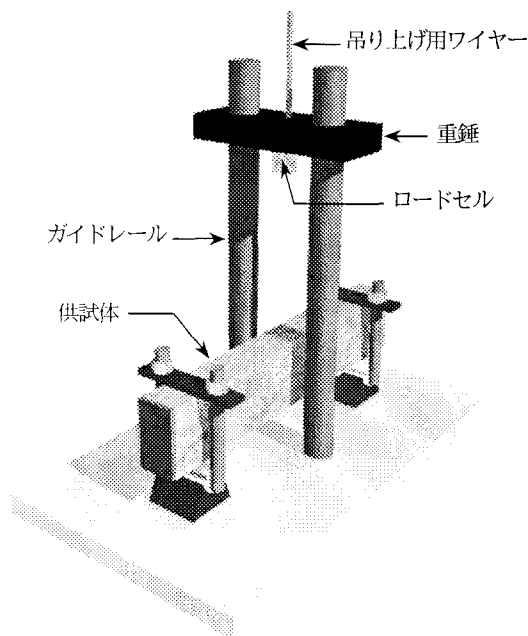


図-2 重錘落下式実験装置

2.2 実験概要

実験装置として、静的載荷実験には油圧式圧縮試験機 (島津圧縮試験機 UH-C500A) を使用し、供試体のスパン中央に線荷重として載荷した。

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。図-2 に重錘式衝撃実験落下装置の概要図を示す。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。重錘は 2 本のガイドレールに沿って落下し、試験体の支点部は鋼治具により、リバウンドが防止されている。なお、衝撃時には衝撃力、左右支点反力、変位および鉄筋のひ

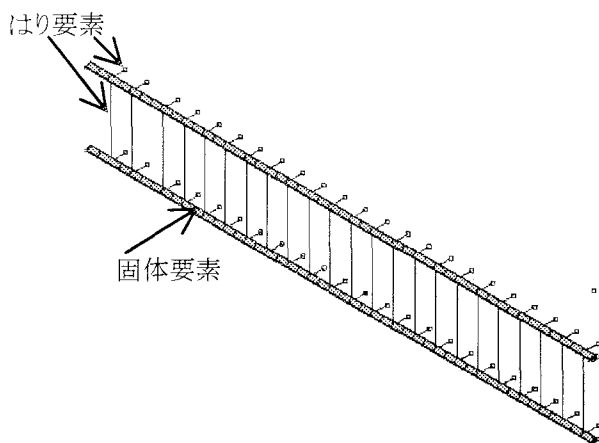


図-3 鉄筋-せん断補強筋モデル

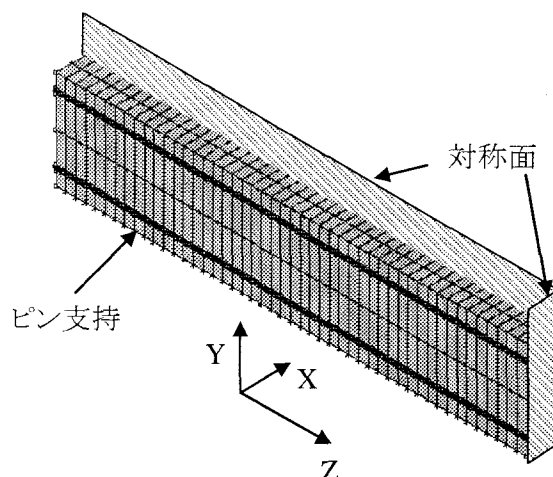


図-4 コンクリートモデル

ずみを測定している。

3. 数値解析の概要

3.1 数値解析モデル

RC はりは、鉄筋、コンクリートより構成されるが、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。RC はりの対象性を考慮して断面方向(x方向)およびスパン方向(z方向)に2等分したこれらを重ね合わせた全体の1/4モデルとした。各構成要素はコンクリート要素を8節点、軸方向鉄筋を27節点、せん断補強筋を2節点とした。表-2に示すように、要素分割はZ方向に48分割、Y方向に2分割、X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。

重錘と支点治具および定着板などは、本研究では考慮せず、支点拘束はピン支持とした。なお、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。

全数値解析時間は、衝撃実験で得られた重錘の荷重曲線より、荷重波形の第一波目が終了し、第2波目が発生する前の100msまでとした。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)本数値解析は、時間積分法は陰解法、数値積分法はNewmarkの β 法($\beta=1/4$)を用いた。

3.2 材料物性

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	12
	Y	2
	Z	48

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(a)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(a)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_{wp} は仮定値を用いた。要素の引張ひびわれ発生後の挙動の例を図-5(b)に示す。この場合、経路上の点2~5、11~12はひびわれが開いた状態であり、6~10、13~20はひびわれが閉じている状態である。点20以上は最大圧縮応力後の軟化領域である。ひび割れモデルには固定ひび割れモデルを使用した。破壊局面はkuper⁸⁾の破壊局面を採用している。2軸の破壊局面を用いて、複数の面の3軸の破壊局面として表現している。

(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' を考慮した等方バイリニアモデルである。降伏応力 σ_y^0 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、表-3(b)に示す値を用いた。降伏はvon Misesの降伏条件に従う

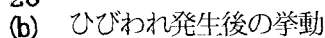
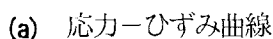


図-5 コンクリートモデル

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

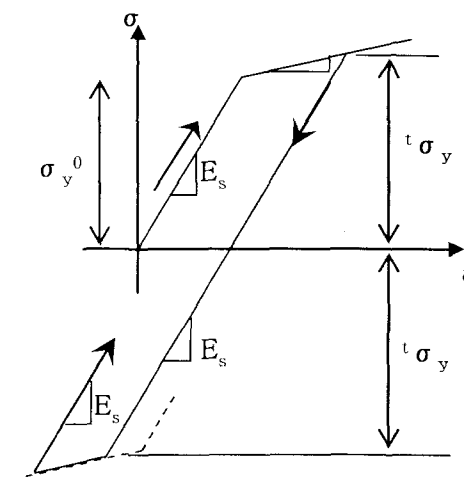


図-6 鉄筋モデル

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

こととした。塑性硬化係数 H' は、初期弾性係数 E_s の0.4% 慮した。¹⁰⁾と仮定した。

(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_{σ} 、圧縮強度増加率 DIF_{σ_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

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

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。 $\dot{\epsilon}^p$ は解析ステップでの累積塑性ひずみ速度である。

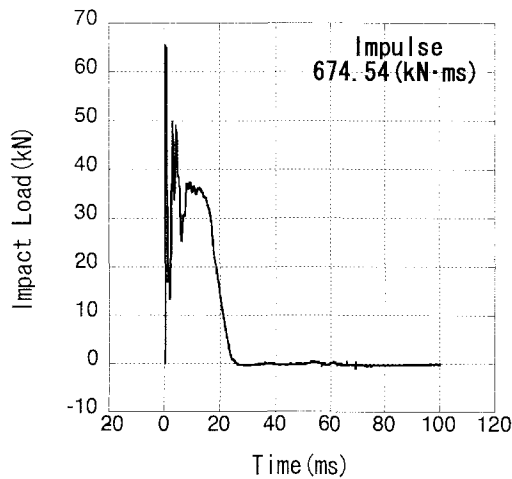


図-7 荷重波形

表-4 解析ケース

case	鉄筋強度増加率	引張強度増加率	圧縮強度増加率
	DIF_s	DIF_{ct}	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

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荷重する。

(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荷重させ、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)では、ひずみ速度効果係数は、スパ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、 $b=8$ とした。

Case4～7 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(1)より荷重速度 1m/s なら $10^1 \sim 10^1$ 1/sec と推測され、文献(2)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。

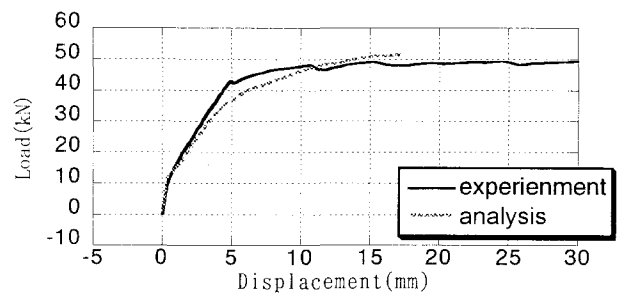


図-8 静的荷重による荷重－変位関係

4. 実験結果と解析結果の比較

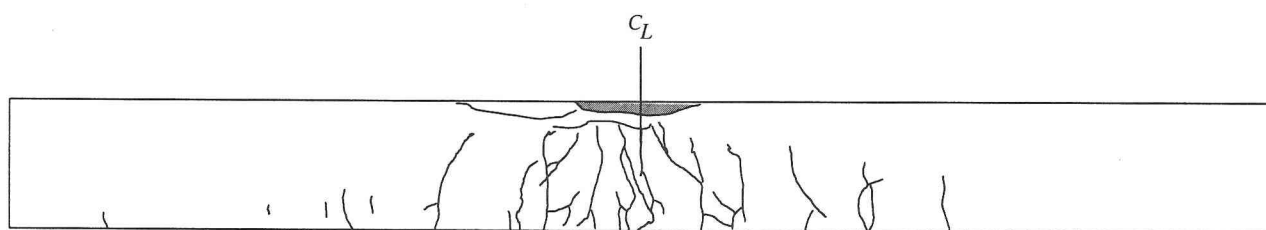
4.1 静的解析

図-8 は静的荷重の実験と解析における荷重－変位関係を示したものである。本解析では、荷重を単調増加させて行ったが、実験で見られるように剛性が低下し、荷重の増加がほとんどなく変位が増大する現象は再現できないが、実験値と解析値は非常に一致しており、本解析の妥当性を示している。なお、図-9 は実験と解析におけるひびわれ状況を示したものである。実験、解析ともに RC はりの静的曲げ荷重時に見られる典型的な曲げひびわれが発生している。ひびわれ発生範囲も同程度であり、本解析によりひびわれ発生を再現できることがわかる。

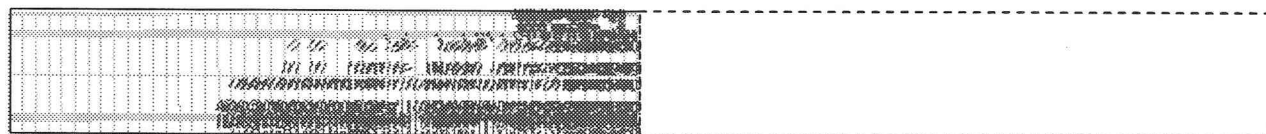
4.2 衝撃解析

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



(a) 実験



(b) 解析

図-9 ひびわれ状況

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 20%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 1.6mm~0.8mm の間で振動しており、0.76mm~-0.3mm の間で振動している実験値よりかな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 20%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~0.3mm 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 に比べ減少しており、鉄筋のひずみ速度効果は残留変位に大きく影響を与え、結果として実験結果との差異が小さくなることがわかった。これは载荷している間、つまり 20ms 未満の短い時間での鉄筋のひずみ速度効果により鉄筋の降伏強度が増加し case1 では case2 より大きく鉄筋が塑性化しており、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 1mm~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、1.2mm~-0.6mm 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_c 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 11%小さいことがわかる。残留変位は 1mm~-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、解析値は実験値に比べ約 10%小さいことがわかる。残留変位は case6 と同程度の 1mm~-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_c を変化させると、最大値がわずかながら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 を比較して見ると最大値と残留変位はほとんど同じ値を示し、有意な差異は見られない。緒言でも述べたように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、この载荷速度では DIF_c 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 の範囲では解析値において波形の中間値から約 40%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が 15ms 以降では解析値には高周波成分が認められる。また 20ms での解析値は実験値に比べ約 45%小さい値である。60ms 以降では、それほど変動していない。このことにより、

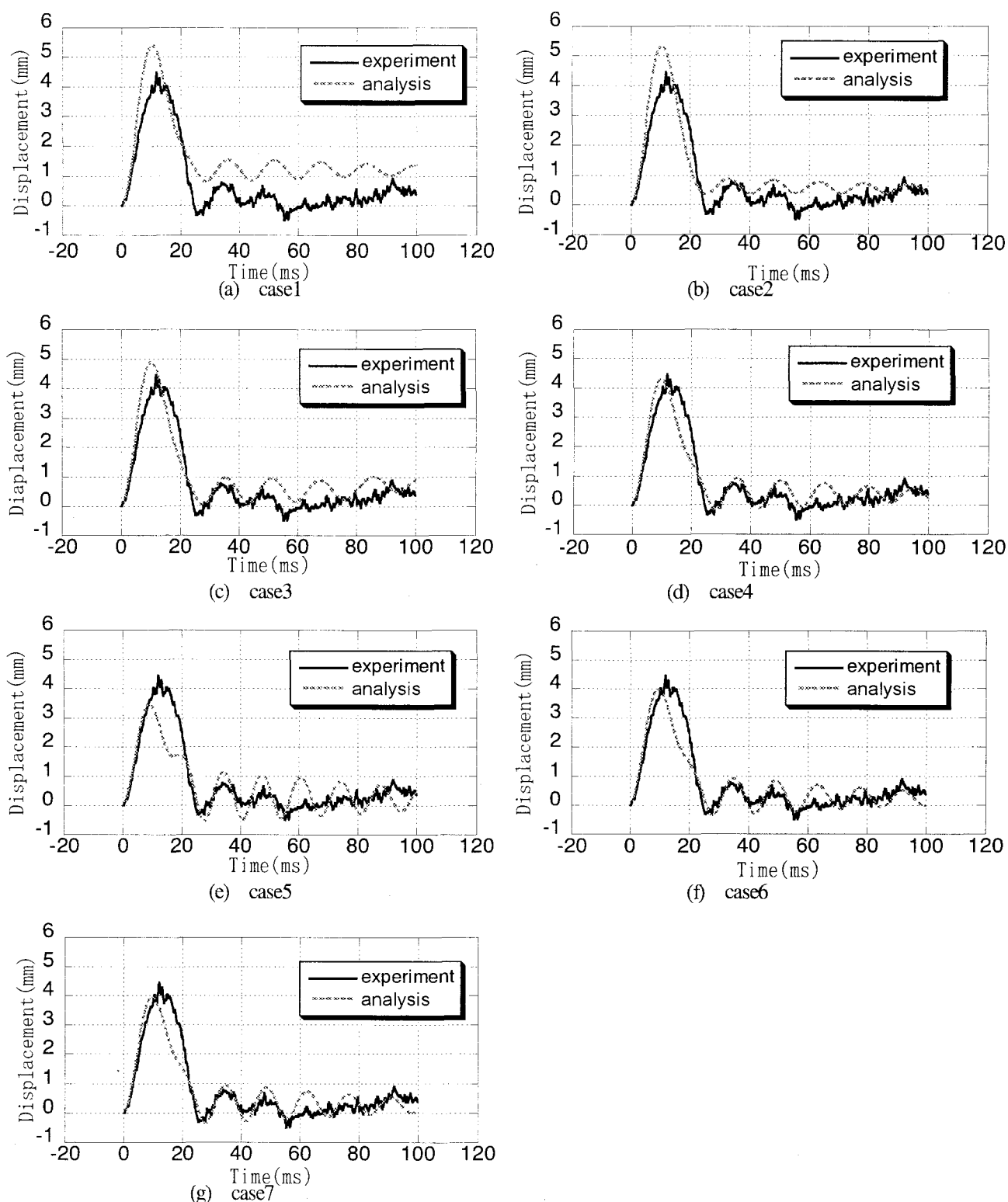


図-10 実験と解析におけるスパン中央変位の応答曲線

式(1)の鉄筋のひずみ速度効果を適用することによって、反力波形は0~20msの範囲で解析値がより実験値に一致することがわかる。ただし20ms以降には高周波成分が認められる。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。衝撃波により高周波成分が発生すると考えられる。

図-11(c)の case3 より、40ms で解析値に高周波成分

が認められる。だが case2 に比べほとんど皆無と考えられる。

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。60ms 以降から多少の位相のずれが認められるが case3 に比べ実験値に近い波形を示している。

図-11(e)の case5 より、0~20ms の範囲で解析値にお

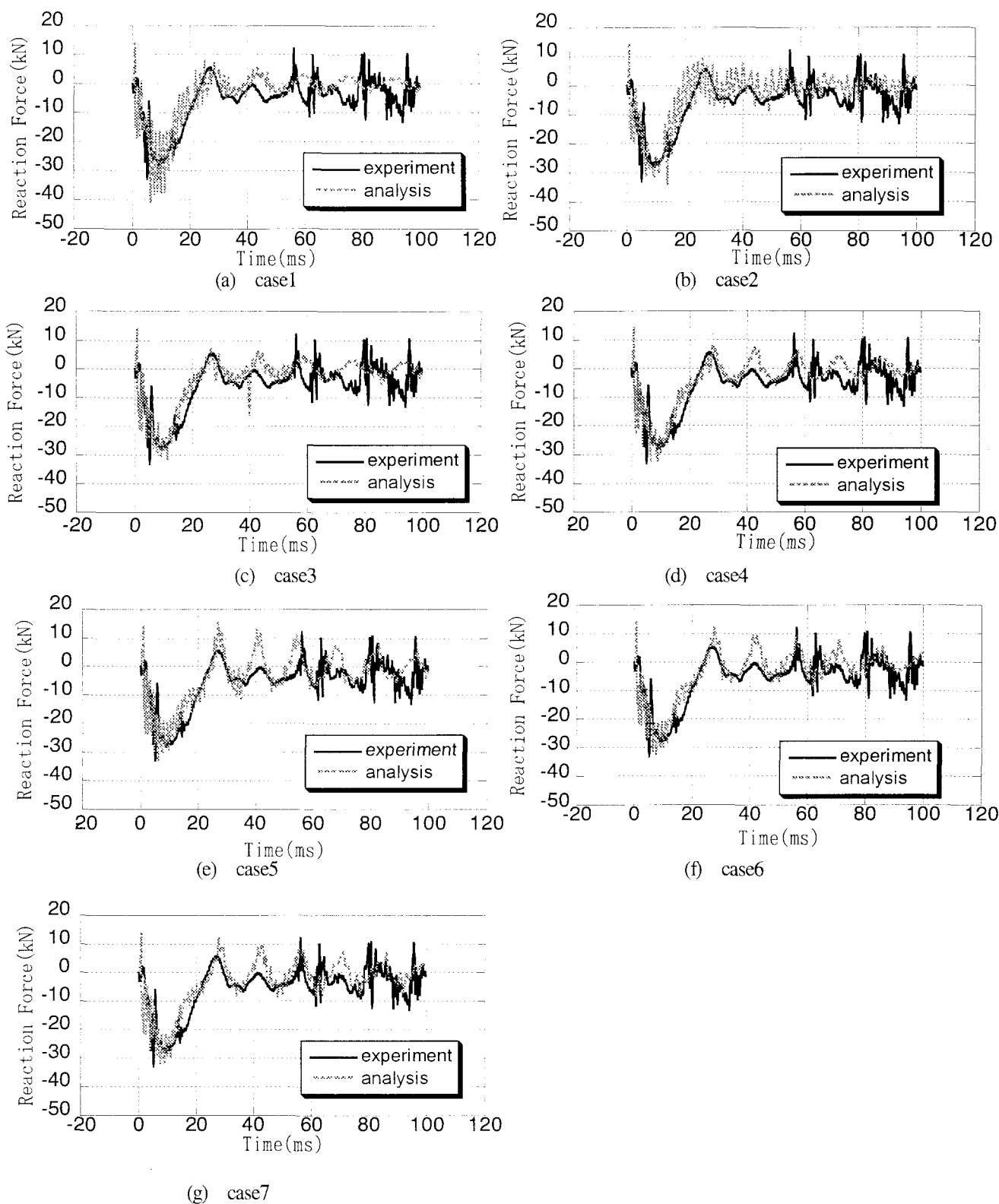


図-11 実験と解析における反力の応答曲線

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 11 kN 大きい。このことによって、引張強度増加率 DIF_d 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。同じ載荷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

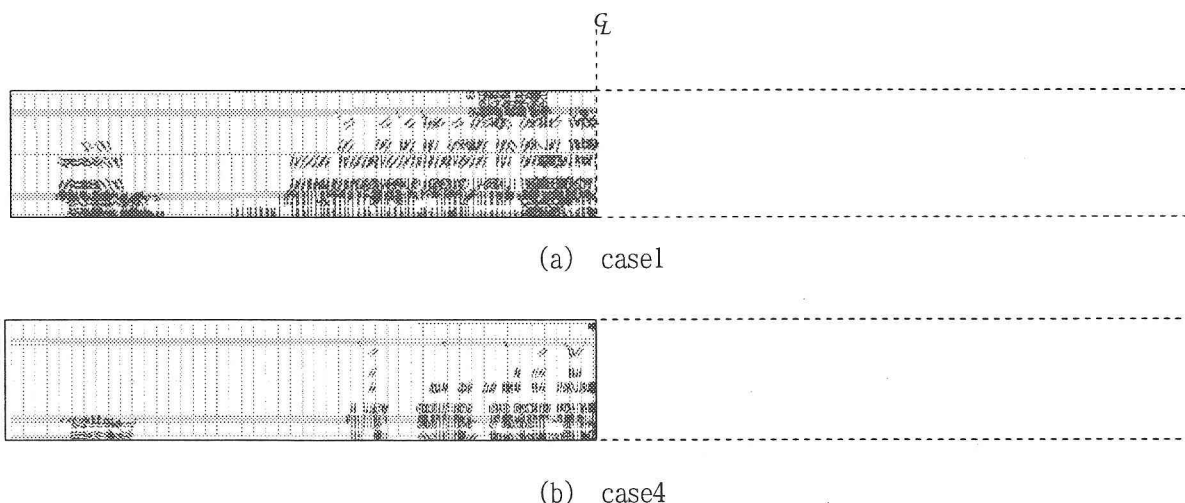


図-12 ひびわれ状況

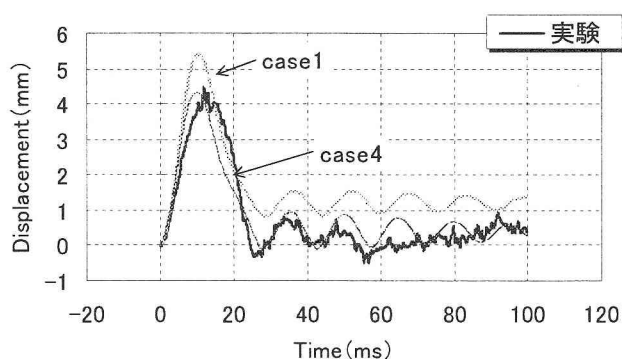


図-13 変位波形(case1 と case4)

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 7kN 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 6kN 大きくなっている。case6 と case7 はほぼ同様の波形である。すなわち圧縮強度増加率 DIF_c 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、この載荷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。

図-12 は case1 と case4 のひびわれ状況を示したものである。支点部は支点拘束部をモデル化せず、直接 RC はり下部をピン支持しているため、支点部に若干のひびわれの発生が認められるが実際の実験では支点部にひびわれは認められなかった。ひずみ速度効果を適用することによって、ひびわれが減少した。コンクリートの引張強度の増加により、ひびわれ発生が遅くなったためである。図-13 は、case1 と case4 の変位波形の比較を示したものである。ひずみ速度効果を適用した材料特性におい

て、衝突速度 1m/s の衝撃荷重を載荷すると変位波形の最大値が静的載荷のときの材料特性より約 20% 減少し、残留変位は約 38% 程度減少していることがわかる。

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 $DIF_t=2.2$ 、コンクリートの圧縮強度増加率は $DIF_c=1.0$ の case4 が最も良く実験値を再現している。引張強度増加率 $DIF_t=2.2$ 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 $DIF_c=1.0$ 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 $DIF_t=2.2$ 、圧縮強度増加率 $DIF_c=1.0$ 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 $DIF_{\sigma}=2.2$ が実験に即した値であることがわかった。

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、耐衝撃設計に役立てたい。

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) 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.
- 2) 江田智，別府万寿博，大野友則，佐藤紘志：異なる急速载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.
- 3) 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.
- 4) 岸 徳光，三上 浩，松岡健一，安藤智啓：静的载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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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シス，構造工学論文集 Vol. 49A，pp1299-1310，2003.
- 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.

(2004年4月16日)