

(2) 有限要素法を用いた鉄筋コンクリートはりの衝撃解析に関する一考察

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

橘 紗代子*, 梶谷 浩**
Sayoko Tachibana, Hiroshi Masuya

*工修 金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

**工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

キーワード: 鉄筋コンクリートはり, ドラッカープラガーモデル, 有限要素法
(Reinforced concrete beam, Drucker-Prager model, Finite element method,)

1. 序論

平成14年に10月に国土交通省からだされた「土木・建築にかかわる設計の基本」は、信頼性設計の考え方を基礎とするとされている。信頼設計の考え方に基礎を置く過程において、信頼できる基礎データが参照されることや基礎データの蓄積とその公開が重要とされている。

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信頼性の高い実験手法が発達してきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。一方、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、様々な解析手法も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⁵⁾。

本研究では最も基本的な部材であるRCはりに対し衝撃実験を行い、実験結果との比較よりADINA(Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)を用いた鉄筋コンクリートはり(以後本論文ではRCはりとして表記)の衝撃挙動解析について検討した。また、RCはりの衝撃現象を精度よく再現するための具体的な解析方法を提案し、その使用性と有効性について示している。

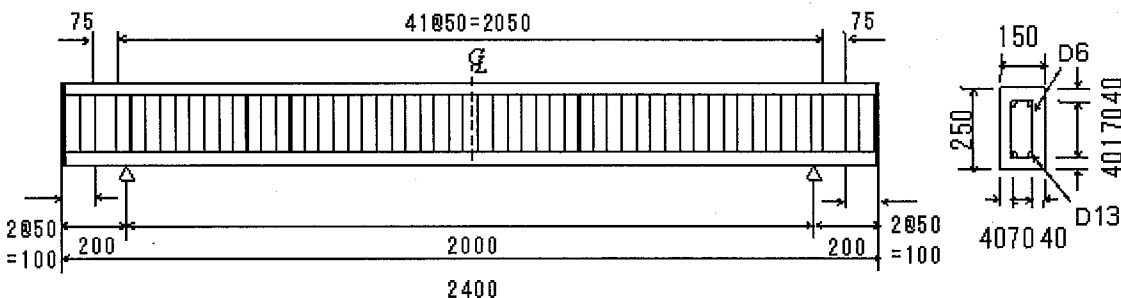
2. 実験の実施

2.1 供試体概要

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。試験体の断面形状は梁幅×梁高が、150mm×250mmであり、純スパン長は2000mmである。軸方向鉄筋はD13-SD345をせん断補強筋はD6-SD295Aを用いている。供試体端部に厚さ12mmの鉄版を用いて軸方向鉄筋を溶接で定着している。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。細骨材には最大粒径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。試験体の設計曲げ耐力(P_{usc})は32.8kN、せん断耐力(V_{usc})は95.1kNである。せん断余裕度 $\alpha(V_{usc}/P_{usc})$ は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。本試験体では、各耐力算定時の部材係数は $\gamma_b=1.0$ とした。

2.2 実験の概要

図-2に、金沢大学構造工学研究室所有の自由落下式衝撃実験装置の概要を示す。用いた重錘は、鋼製の重錘の下にロードセルと曲率半径が565mmの先端部を取り付けたものであり、総質量は300kgで、衝突速度5m/s



単位 (mm)

図-1 RCはりの形状寸法および配筋状況

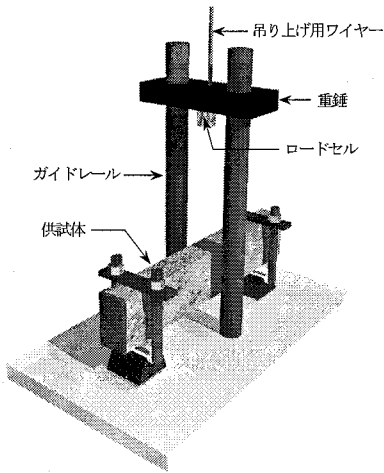


図-2 自由落下式衝撃実験装置

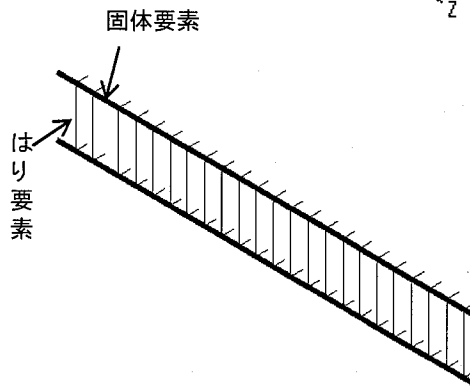


図-3 主鉄筋およびせん断補強筋モデル

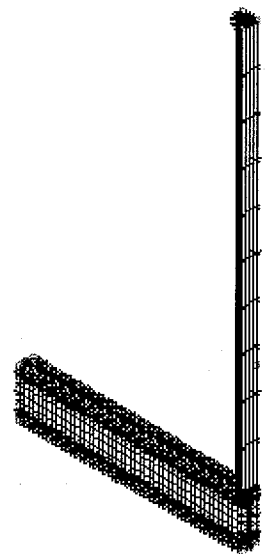


図-4 数値解析モデル

で落下させた。

3. 数値解析の概要

3.1 数値解析モデル

RCはりは、鉄筋およびコンクリートから構成される。図-3に使用した主鉄筋およびせん断補強筋のモデルを示す。図-4にRCはりおよび重錘を含めた数値解析モデルを示す。RCはりの対称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等分した全体の1/4を用いた。解析モデルの要素分割は、表-1に示すようにZ方向に48分割、X方向に4分割、Y方向に16分割とした。用いた要素数は3973、節点数は7484である。各構成要素はコンクリートには8節点要素、軸方向鉄筋には27節点要素、せん断補強筋には2節点要素を用いた。せん断補強筋は計算の効率化のためにはり要素としている。重錘は先端部の曲率半径を565mmとした球欠部の上に円柱として簡略的にモデル化し、総質量が300kgとなるようにした。支点治具および定着用の鋼板などは、本研究では簡単のため考慮せず、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。本数値解析は、時間積分法は陰解法を、数値積分法はNewmarkのβ法(β=1/2)を用いた。

3.2 材料物性

(1) コンクリート

コンクリートにはDrucker-Pragerモデルを使用した。図-5にDrucker-Pragerモデルの形状を示す。式(1)にDrucker-Pragerの破壊包絡面の式を示した。ここで J_1 は応力テンソルの静水圧成分であり、第1主応力を示している。 α と κ は条件によって異なるが、Mohr-Coulomb基準の摩擦角 ϕ と粘着力 c に関する材料定数である。Drucker-Pragerの円錐が引張子午線上で六角錐に外接す

表-1 解析モデル要素の種類と分割数

要素の種類	重錘	固体要素
	コンクリート	固体要素
	軸方向鉄筋	固体要素
	せん断補強筋	はり要素
コンクリートはりの要素分割数	X方向	4
	Y方向	16
	Z方向	48
全要素数		3973
全節点数		7484

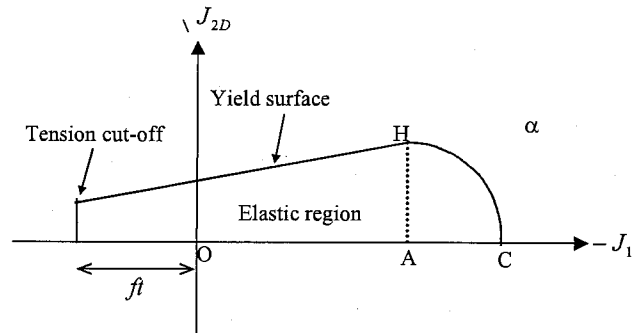


図-5 Drucker-Prager モデル

る材料定数 α 、 κ と ϕ 、 c は、式(2)、(3)に示す関係を持つ。粘着係数 c はコンクリートの1軸引張強度 f_t と1軸圧縮試験強度 f_c より式(4)で求められる⁹⁾。摩擦角 ϕ は上田ら⁷⁾が提案する $\phi=37^\circ$ とした。表-2に解析に用いたコンクリートの物性値を示す。

$$F_{DP} = \alpha J_1 + \sqrt{J_{2D}} - \kappa \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (3)$$

$$c = \frac{f_c \cdot f_t}{f_c - f_t} \tan \phi \quad (4)$$

(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を考慮した等方バイリニアモデルである。降伏応力、弾性係数およびポアソン比は、表-2に示す値を用いた。降伏は von Mises の降伏条件に従うこととした。塑性硬化係数は、初期弾性係数の0.4%と仮定した。

表-2 解析に用いた鉄筋の物性値

	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	

(3) ひずみ速度効果

衝撃を受けるコンクリート構造物のひずみ速度効果については徐々に明らかにされており、個別要素法を用いた著者らの既往の研究⁸⁾において、ひずみ速度効果として強度増加率を考慮すると再現性が向上することを示した。解析手法や要素分割数が程度の差は異なるもののひずみ速度効果に影響すると考えられる。したがって、本研究においてもコンクリートのひずみ速度効果を考慮することとした。鉄筋のひずみ速度効果は式(5)を用いた⁸⁾。

DIF_s はひずみ速度効果による強度増加率、 ε_s は鉄筋のひずみ速度である。

$$DIF_s = 1.202 + 0.04 \log \varepsilon_s \quad (5)$$

4. 数値解析

4.1 解析諸条件

衝突速度 5m/sを重錘の鉛直方向初速度として入力し、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、リバウンドによる2度目の衝突が発生する前の100msまでとした。表-3に解析ケースを示す。ケースaは静的解析を行った際に用いた材料特性を使用した。ケースb~fに鉄筋のひずみ速度効果を考慮し、実験で得られたはりの中央で下側の鉄筋において、衝突時から最大ひずみまで平均ひずみ速度である21.7/sより、鉄筋の強度増加率 $DIF_s=1.2$ を得た。コンクリートのひずみ速度効果として、ケースbは摩擦角 ϕ を1.2倍させ、降伏関数 α と κ を増加させた。ケースcは引張強度 f_t の強度増加率を1.2倍として、降伏関数 α は変化せず、 κ のみが増加させた。ケースdは式(4)に關係なく粘着係数 c のみを増加させ、降伏関数 κ を増加させた。ケースeは摩擦角 ϕ のみの増加により、降伏関数 α が増加し、 κ が減少している。ケースfは引張強度 f_t のみを増加させた。解析の時間間隔は計算が安定し、かつ解析に要する時間が最も短くなる時間間隔を選択した。解析に要する時間は、1ケースあたり約8時間(Pentium4 使用)であった。

4.2 解析結果

図-7, 8, 9はケースごとの変位波形、荷重波形、反力波形での解析結果と実験の比較を示したものである。表-4にそれぞれの特性値を示す。ここで示す力積とは、荷重時間を積分したものである。

図-7に示す変位波形において、ケースaの最大変位は実験値より12%大きく、100ms時の変位は実験値より17%程度大きくなっている。ケースb, c, d, fの最大変位、100ms時の変位ともに実験値とほぼ同じ値である。ケースeの最大変位は実験より6%程度大きい値である。

図-8に示す荷重波形では、初期の立ち上がりが急激

表-3 解析条件

		ケースa	ケースb	ケースc	ケースd	ケースe	ケースf
引張強度 (Mpa)	f_t	2.79	2.79	3.35	2.79	2.79	4.46
圧縮強度 (Mpa)	f_c	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
摩擦角 (°)	ϕ	37	44.4	37	37	55.5	37
粘着係数	c	2.3	3.0	2.8	3.5	2.3	2.3
降伏関数	α	0.193	0.218	0.193	0.193	0.249	0.193
	κ	1.775	2.009	2.172	2.650	1.180	1.775
鉄筋強度増加率	DIF_s	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

表-4 特性値

	実験	ケースa	ケースb	ケースc	ケースd	ケースe	ケースf
最大変位(mm)	60.7	68.0	59.4	58.9	58.4	64.2	58.4
最大荷重(kN)	424.4	288.8	334.2	318.1	353.5	308.8	294.6
荷重作用時間(ms)	42.8	47.2	42.6	41.8	41.5	43.0	39.6
力積(kN・ms)	1930.5	1724.2	1763.4	1770.3	1769.6	1712.5	1714.6
最大反力(kN)	51.4	65.2	68.3	72.3	81.6	44.4	57.8

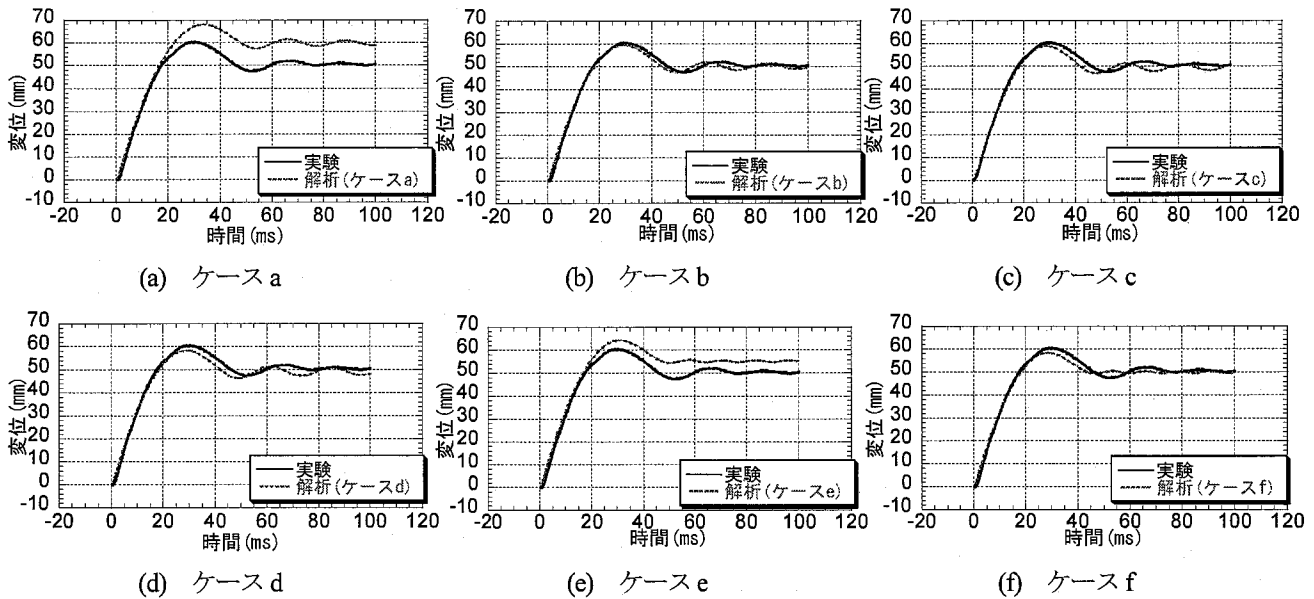


図-7 変位波形

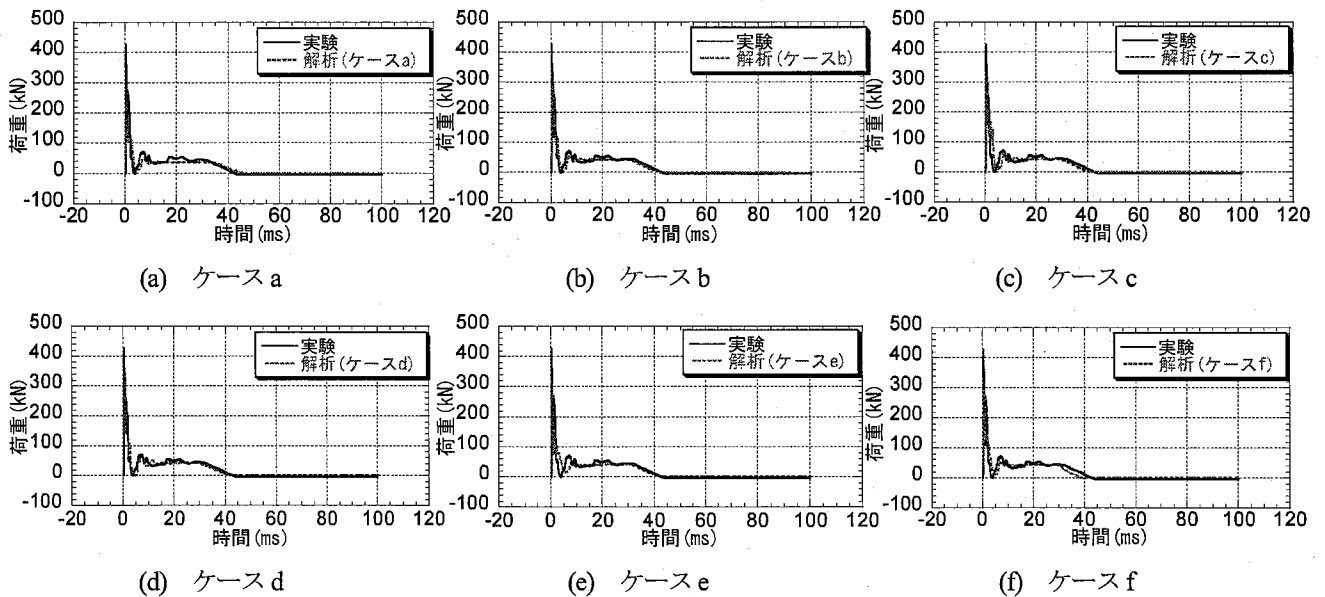


図-8 荷重波形

で、その後急激な減少の後、再度立ち上がり数回のピークを示した後緩やかに減少しており、解析はほぼ実験と類似した波形を示しているといえる。ケースaの最大荷重は実験値より約32%小さく、荷重作用時間は約4ms大きい。ケースbの最大荷重は約21%小さく、荷重作用時間はほぼ同じ値である。ケースcの最大荷重は25%小さく、荷重作用時間はほぼ同じ値である。ケースdの最大荷重は353.5kNと一番大きい値である。荷重作用時間は41.5msと実験よりわずかに小さい。ケースeの最大荷重は308.8kNと実験値より約30%小さく、荷重作用時間は実験とほぼ同じ値である。ケースfの最大荷重が294.6kNとケースaとほとんど変化していない。荷重作用時間は39.6msと実験より小さい。ケースd~fを比較すると第1波目の荷重作用時間が、ケースdの時は3.6ms、ケースeは5.9ms、ケースfは5.1msとケースeの時が一番長い値で

ある。 κ が小さいほど長い傾向にある。これはDrucker-Pragerモデルでは降伏曲面 $F_{DP}=\kappa$ であり、 κ の減少により降伏曲面が小さくなり、重錘が接触する部分のコンクリートが弱くなったことで重錘の跳ね上がりが遅くなったと考えられる。力積はいずれのケースも実験値より8~11%程度小さい値である。これは、支点をモデル化していないことや、実験において支点部でのRCはりのずれに原因があると考えている。

図-9で示す反力波形では、ケースaの反力波形は実験値に概ね類似した波形を示している。最大反力は実験より30%程度大きいが、その発生時刻は実験値において6.5msで発生し、解析値においては4.8msで発生しており、両者にあまり差は認められない。時刻5~30msにおいて8~46kNの範囲で振動している。40ms時以降の位相は概ね一致している。ケースbの最大反力は実験より

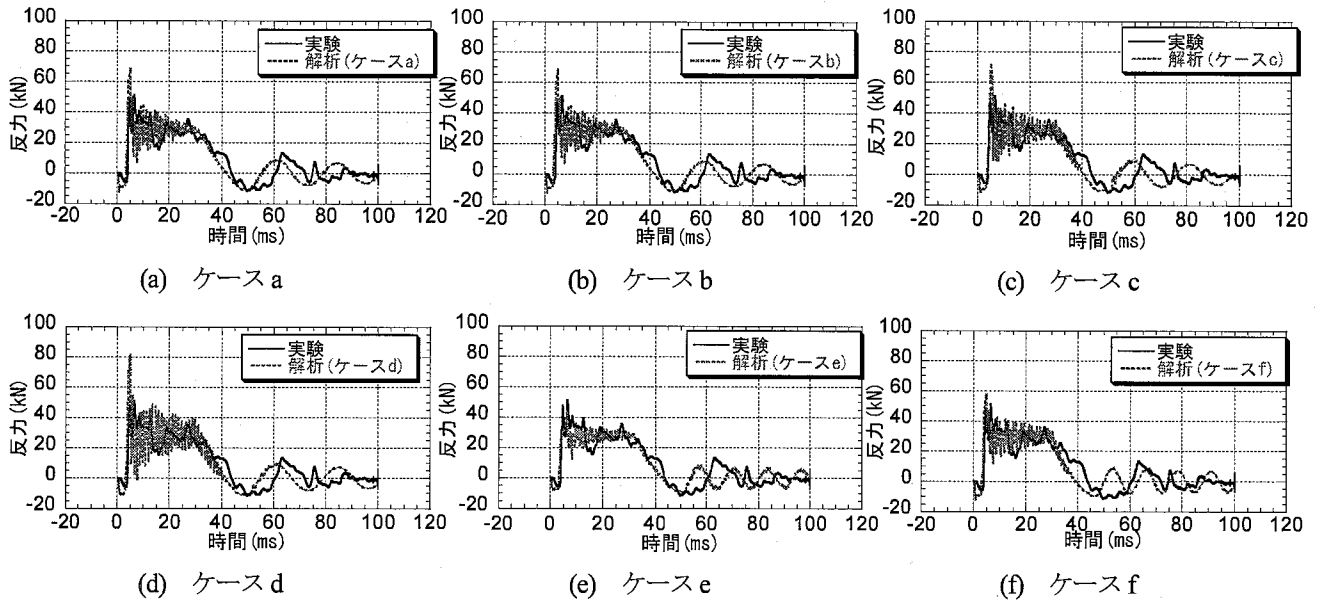


図-9 反力波形

33%大きい値である。時刻5~30msにおいて8~46kNの範囲で振動している。ケースcの反力は時刻5~30msにおいて9~62kNの範囲で激しく振動している。最大値自体は実験より41%大きい値である。ケースdの最大反力は81.6kNとケースaより30kN程度大きく、時刻5~30msの振動振幅も激しく振動している。40ms時以降の周期は実験及びケースaの周期とそれ程差異はなかった。ケースeの最大反力は44.4kNと実験より約14%小さく、またケースaより32%小さい。時刻5~30msでの振動振幅も12~40kNとケースaより小さかった。これは κ の減少による降伏曲面 F_{DP} の縮小に起因していると考えられる。また40ms時以降の周期が実験よりも小さい。これは α の増大により図-5での弾性域が広がり、コンクリートの弾性的挙動が卓越したと考えられる。ケースfの最大反力は57.8kNとケースaより約11%減少し、実験より12%大きい。また、時刻5~30msの振動振幅がケースaより小さくなっている。なお、40ms時以降の周期が実験よりも小さくなっている。これは引張強度の増加により、図-5での弾性域が広がりコンクリートの弾性的挙動が卓越し、40ms時以降の周期が小さくなったと考えられる。全体的に κ が減少するほど、最大反力が減少する傾向にあるといえる。

数値解析において、第1主応力が零になり、応力が解放されコンクリート要素にひび割れが発生するとみなされる。従って最大変位発生時刻でのコンクリート要素の第1主応力が零及び零に近い状態をひび割れが発生している可能性があることを意味している。図-10にこのように予測されるひび割れ分布予測と実験結果より得られたひび割れ分布の比較を示した。ここでは零応力を強調し、ひび割れ発生領域が明瞭に示されるように等色レベルを設定した。白色分布が第1主応力での零応力を示し、黒色の実線は実験結果で観測されたひび割れを示してい

る。

ケースaのひび割れは全般的に曲げひび割れの発生が見られるが、やや不明瞭であり、特にはり中央下面においてひび割れが発生しておらず、実験のひび割れを再現しているとは言えない。ケースbのひび割れは、全体的に下から上に発生する曲げひび割れが多く見られ、ケースaよりは、はり中央にひび割れが発生しているが、支点と重錘衝突中央位置の間でのひび割れ間隔が不明瞭である。ケースcのひび割れは下から発生する曲げひび割れに加え斜め引張ひび割れが発生しており、また、ひび割れ間隔が明瞭に発生している。ケースdでは下から上に発生する曲げひび割れがあり、ひび割れ間隔が明瞭に示されている。ケースaと比較し α が変化せず、 κ が増加したケースbとdについてのみひび割れ間隔が明瞭である。ケースeのひび割れはコンクリートはり上面と下面にひび割れが認められるが、ひび割れ発生方向が実験とまったく一致していない。これは、降伏関数 α の増大により、図-5での弾性域が広がってことによると考えている。ケースfのひび割れもケースeと同様な傾向があるが、ケースfの方がひび割れは少ない。これも引張強度 f_t の増加によりコンクリートの弾性的挙動が卓越していることによると考えられる。反力波形にもその影響が顕著である。

ケースb, cではケースaにコンクリートと鉄筋のひずみ速度効果を考慮して実験と比較した。ケースd, e, fでは鉄筋のひずみ速度効果を考慮し、また、コンクリートで使用したDrucker-Pragerモデルの材料特性の影響を比較検討するために、ケースdでは粘着係数 c のみ、ケースeでは摩擦角 ϕ のみを、ケースfでは引張強度 f_t のみを増加させその影響を比較検討した。ケースb, cともに変位波形、荷重波形、反力波形共に実験値に類似した波形を示しているが、ひび割れ図には違いが見られた。

