

論文 鉄筋端部の不連続面が応力波の伝播に及ぼす影響

石川 達也^{*1}・余 国雄^{*2}・田辺 忠顧^{*3}

要旨：本論文では、鉄筋段落とし部に着目し、単純化された鉄筋端部の不連続面を有するモデルを用いて応力波がどのように伝播するかを、非線形有限要素法によって解析した。その結果、端部周辺に応力波が継続して集中し、水平方向にひび割れが進展していくことを再現した。また、上下方向に強い衝撃力が作用するRC橋脚の解析を行うには、鉄筋要素とコンクリート要素に区別して不連続面を考慮したモデルを検討する必要があることが分かった。

キーワード：衝撃破壊、段落とし部、RC橋脚、阪神大震災

1. はじめに

阪神大震災による強い鉛直方向と水平方向の地震動は、コンクリート構造物に多大な被害を与えた。その後の調査結果から、RC橋脚の鉄筋段落とし部での応力伝達が、大きな解明事項として注目されている。しかも、そこは、断面の急変点でもあり、衝撃波としての観点からの解説も不可欠であると考えられるようになってきた。

鉄筋段落とし部を有するRC橋脚の衝撃挙動に関する研究例は、きわめて少なく、ひび割れが段落とし部で発生するにしても、衝撃波が鉄筋段落としを通過する際に、どのような応力状態を発生させるかについての解析は未だ行われていない。

著者らは、上下方向に衝撃力が作用した場合、鉄筋段落とし部を有するRC橋脚では、どのように応力波が伝播し、どのようにひび割れが発生・進展するかを2次元非線形FEM解析を適用するによって、解析的に再現しようと試みている。

本論文では、解析に用いた有限要素プログラムが、波動伝播問題に適用できることを最初に明らかにする。

次に、不連続面を単純化したモデルを解析することにより鉄筋端部の不連続面が、衝撃的地震動によって生じる応力波の伝播にどのような影響を及ぼし、どの程度の衝撃力でひび割れが発生するかについて、検討を行う。

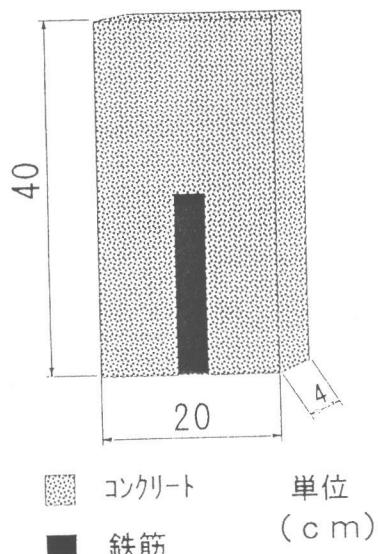


図-1 鉄筋不連続面を単純化したモデル

^{*1} 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学科専攻 (正会員)

^{*2} 名古屋大学助手 工学部 土木工学科、工博 (正会員)

^{*3} 名古屋大学教授 工学部 土木工学科、工博 (正会員)

2. 解析手法の概要

2.1 有限要素法の概要

一般に、衝撃問題も含めて、運動方程式を次のように表すことができる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

x は、場合によって、相対座標であったり、絶対座標であったりする。

解析には、非線形有限要素法を用いた。材料の非線形性については2.4で述べる。1要素は、四辺形4節点要素として、剛性マトリクス $[K]$ を平面応力問題として定式化した。質量マトリクス $[M]$ には、形状関数により導かれる整合質量マトリクスを用いた。また、減衰マトリクス $[C]$ は、本解析には用いていない。

2.2 時刻歴応答解析

応答の数値解析を行うにあたり、Newmarkの β 法($\beta=1/4$:平均加速度法)を用いている。なお、時間ステップは、衝撃時間や解析モデルの大きさを考慮し、決めるところにするが、およそ 10^{-7} (sec)のオーダーである。

2.3 入力波形

衝撃力の入力には、速度による入力や応力による入力もあるが、今回の一連の解析は、相対座標で全体の運動方程式を導き、底面への加速度を矩形パルスで入力した。この入力方法は、境界(底面)が、ある一定の時間後は、絶対座標系に対して等速運動をする速度境界を与えたことになっている。これは、等価な衝撃的外力そのものではないが、ある程度実構造物の挙動に近く、基礎的知見を得るには適当と考えられる。すなわち、図-2のような矩形パルスの加速度を下部拘束点に鉛直下向きに与え、衝撃引張力として作用させる。

2.4 解析に用いた材料定数

コンクリート材料に対しては、軟化領域を有するDrucker-Prager則を用いている。コンクリートの一軸引張・圧縮挙動は、図-3のようになる。一方、鉄筋については、Von-Mises則に従うものとする。また、コンクリート及び、鉄筋の材料定数をそれぞれ表-1、表-2に示す。

表-1 コンクリートの材料定数

ヤング率 $E_c(kgf/cm^2)$	ポアソン比 ν	密度 $\rho(g/cm^3)$	軟化勾配 $E_1(kgf/cm^2)$	圧縮強度 $f'_c(kgf/cm^2)$	引張強度 $f_t(kgf/cm^2)$
2.0×10^5	0.2	2.5	-2.0×10^5	287.92	28.62

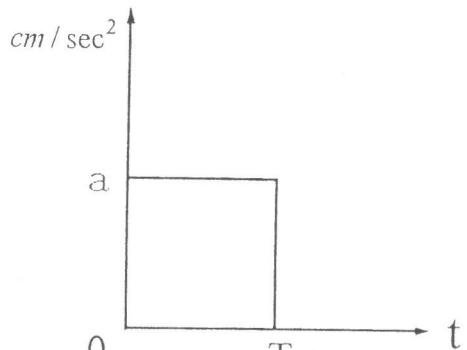


図-2 入力波

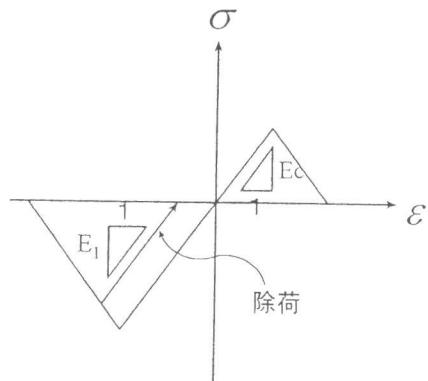


図-3 コンクリートの引張繰り返し挙動

表-2 鉄筋の材料定数

ヤング率 $E_s(kgf/cm^2)$	ボアソン比 ν	密度 $\rho(g/cm^3)$	降伏強度 $f_y(kgf/cm^2)$
2.1×10^6	0.2	7.8	4000

3. 要素分割と加速度入力時間に関する検討

3.1 解析手順

この章では、波動伝播問題に対する有限要素法の適用性に関する基礎的な知見を得る。具体的には、波の伝播速度、波の反射についての有限要素分割による影響を検討する。

要素分割による影響は様々な角度からの検討が必要であるが、本論文の中では、要素分割による応力波の伝播の違いについての検討を掲載する。

各要素は、すべてコンクリート要素で、表-1に示した材料定数を用いている。解析に用いたモデルは、図-4のようにF-2、F-4、F-8の3種類である。y方向の要素間隔はそれぞれ2cm、4cm、8cmとしている。境界条件は、解析モデル下面のy方向のみを拘束している。拘束点に与えた加速度は、

$a = 3.0 \times 10^5 (cm/sec^2)$ で、加速度継続時間は $T = 1.41 \times 10^{-5} (sec)$ である。

3.2 要素分割による影響

図-5(1)から図-5(3)までは、要素分割の間隔を2cm、4cm、8cmにしたときの固定端、中央部付近、自由端付近での時間-応力を表している。応力は理論的にはステップ状になるが若干振動している。また、要素間隔が長いほど、波の伝達時間が早くなる傾向が見られる。しかしながら、下部拘束点に加速度を与えた衝撃力の入力方法では、要素分割による影響はそれほど大きくないといえる。

実際には、反射波等についても同様の検討を行った。その結果、加速度を下部拘束点に与える衝撃力の入力方法では、加速度の継続時間に相当する時間に波が進む距離の2倍程度まで要素分割の間隔を広げても、解析上問題ないといえる。

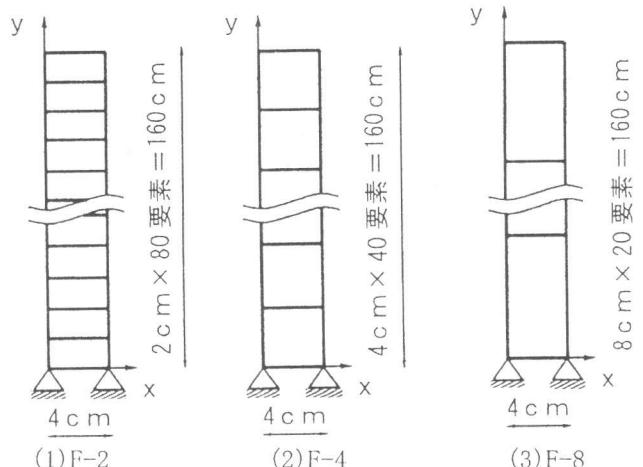


図-4 解析モデル

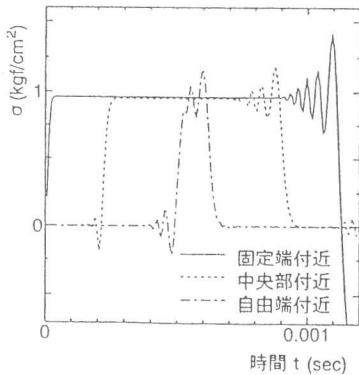


図-5(1) 2cm間隔 (F-2)

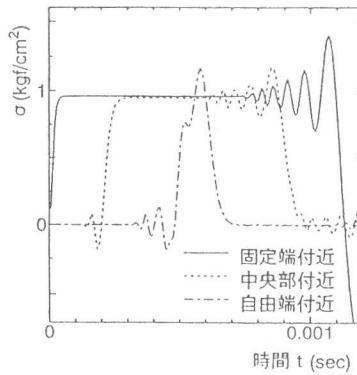


図-5(2) 4cm間隔 (F-4)

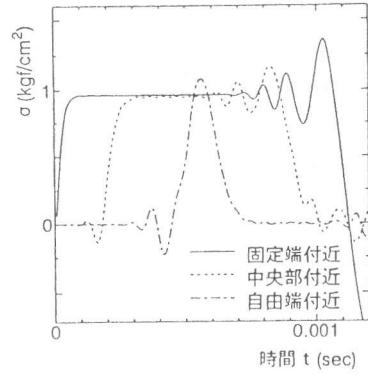


図-5(3) 8cm間隔 (F-8)

4. 鉄筋端部の不連続を有するRC部材の波動解析

まず、段落とし部周辺の一部を取り出したようなモデルを解析する。

4.1 弹性解析

図-6に示すモデルの弾性解析を行う。このモデルでは、各要素は鉄筋かコンクリートのどちらかの性質しか持っていない。斜線部の要素は鉄筋要素で、それ以外の要素はコンクリート要素である。また、応力集中度合いを把握するため、端部周辺では細かく要素分割している。入力加速度は、 $a = 1.9 \times 10^6 (\text{cm/sec}^2)$ で、加速度継続時間は

$$T = 2.83 \times 10^{-5} (\text{sec})$$

4.2 弹性解析による検討

(1) 主応力波の流れ

主応力波の流れを表したのが図-7である。(a)、(b)はそれぞれ、 $t_1 = 2.83 \times 10^{-5} (\text{sec})$ 、 $t_2 = 1.13 \times 10^{-4} (\text{sec})$ のときの様子を示している。(a)では応力波がコンクリート3要素目に達したときの時間である。鉄筋を伝わる応力波は、コンクリート中を伝わる応力波の約2倍の速さで伝わっていることが確認できる。また、(b)ではコンクリート中を伝わる応力波が鉄筋端部付近に到達した時間であり、鉄筋端部周辺に応力集中が生じていることが分かる。

(2) 各点における応力履歴

図-8は、1~7点における応力履歴を表している。2及び4点は、鉄筋でそれ以外はコンクリートである。また、グラフ中の t_1 、 t_2 は図-7での時間に対応している。6点では引張強度を超えている。

この結果から、実際には、端部周辺にはひび割れが入り、その場所のコンクリートは塑性化すると考えられる。したがって、鉄筋不連続部上部に小さな不連続部を設けることにし、非線形解析を行うことにした。

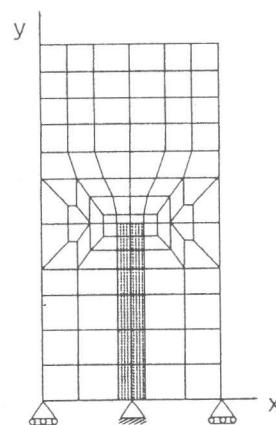


図-6 要素分割図（弾性解析）

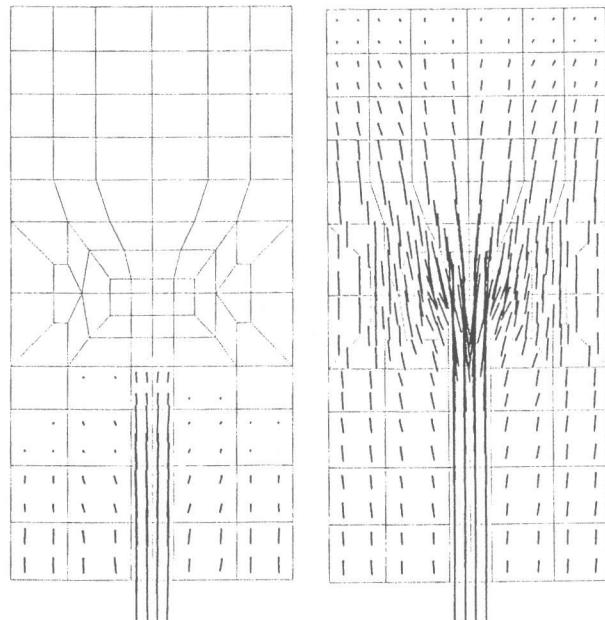


図-7(a) t_1 時の応力波

(b) t_2 時の応力波

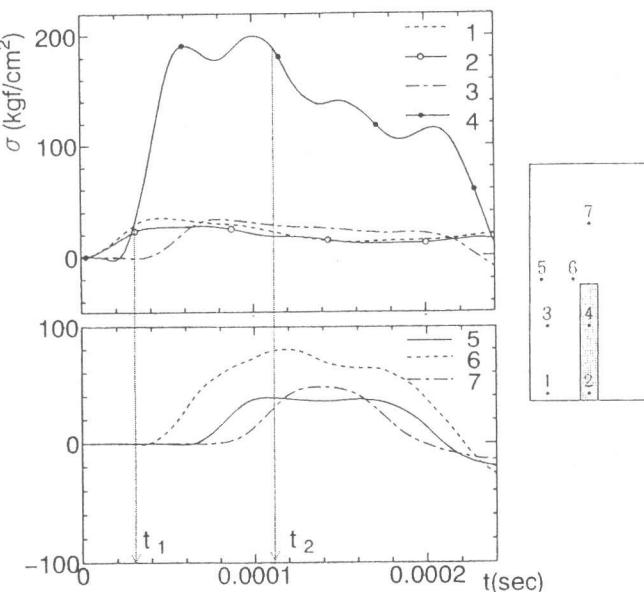


図-8 各点の応力履歴（弾性解析）

4.2 非線形解析による検討

(1) 解析モデルの概要

RC部材の段落とし部では、コンクリートと鉄筋端部における上下方向の引張定着は弱いと考えられる。また、この部分は、施工の際、コンクリートの打ち継ぎ目になることが多いので、強度も他の部分より弱いと考えられる。従ってこのモデル化は妥当といえる。

時間経過に伴う応力波の遷移とひび割れの進展を明らかにするため、非線形動的解析を行った。弾性解析との要素分割の違いは、図-10のように鉄筋上端部にあけた空洞だけである。

(2) 各点における応力履歴

図-9の見方は、図-8と同様である。この図から、以下のことが読みとれる。

- ・鉄筋とコンクリートが受け持つ最大時の応力値の比は5:1程度である
- ・2点の鉄筋の応力値は常に高い
- ・5, 6点のコンクリートは、鉄筋中の応力波の影響を受け早い時刻に波が到達し塑性化する
- ・5, 6点のコンクリートは応力値が高い状態が続く
- ・7点では、5, 6点の最大の応力値より低い値を示し、かつ継続時間は短い

(3) ひび割れの進展

図-10の波線を施した要素は、ひび割れが発生した要素である。このように、水平方向のひび割れ発生が再現される。しかも、ひび割れは端部周辺から外側へ進展していくことが分かった。

4.3 解析結果の考察

定性的傾向としては、端部周辺では、高い応力状態が長時間継続する。そのため、このような鉄筋中とコンクリート中を伝わる応力波の伝播速度の違い等の動的影響がひび割れの進展に寄与していると考えられる。

ひび割れの発生は入力加速度だけでなく、モデルの大きさ、解析領域の影響を大きく受けるものと思われる。従ってこれらの影響がどの程度であるか、さらに検討を進め、実構造物にも適用可能にする必要がある。

しかしながら、鉄筋不連続面を実断面に再現して計算することは、現段階で行えなかつたので次の5章でSmeared outした等価な剛性による結果でどうなるか示すことにする。

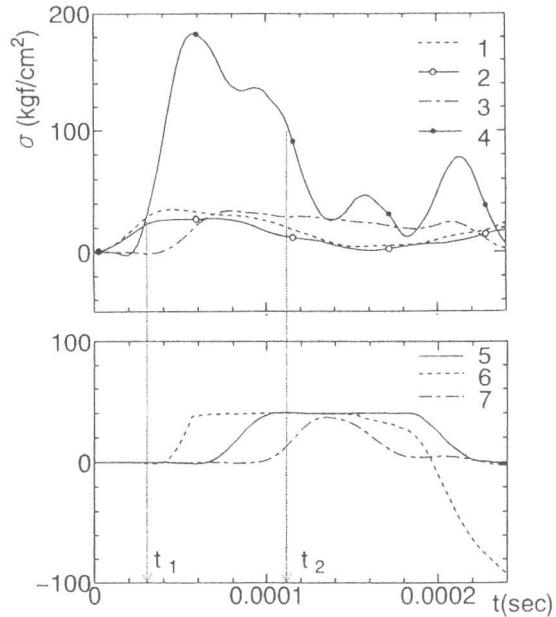


図-9 各点の応力履歴（非線形解析）

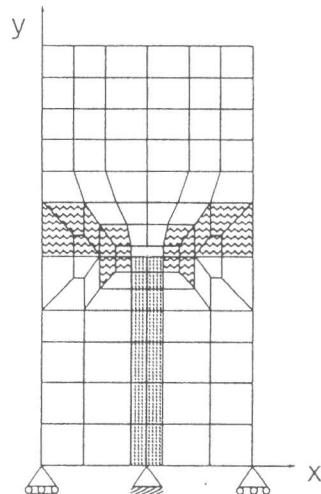


図-10 ひび割れ発生図

5 RC橋脚の段落とし部での破壊について

阪神大震災の地震動によって、どの程度の衝撃的P波が作用したかは定かではないが文献によれば、P波の入力加速度の値は、500G程度で波動の周期は1/1000～1/10000(sec)と推定されている。このような大加速度が、一般性があるものなのか、さらに検討が必要であろうが、一応これに基づいてSmeared outした断面で、いつ破壊が生じるのか検討することにする。

5.1 従来の解析手法の問題点

1. で述べたように、従来の鉄筋コンクリート要素を用いた解析では、段落とし部に水平方向のひび割れを発生させるのは困難である。この解析では鉄筋コンクリート材料という複合材料に対して、コンクリートと鉄筋のひずみが一致するという仮定に基づいて $[D] = [D_s] + [D_c]$ の構成則を与えていた。この構成則で鉄筋比が低い場合を考えると、段落とし部上下での実質的な断面剛性は、ほとんど変わらないといえる。従って、この構成則を用いた鉄筋コンクリート要素を使って解析しても段落とし部での引張破壊は表現できない可能性がある。例えば、図-12のような実構造物を解析対象にして計算を行った結果が、図-13である。このように段落とし部では、引張応力の最大値は、段落とし部周辺の2, 3点ではなく、4点である。この計算結果から見る限りは、段落とし部の上部で水平方向のひび割れ発生は認められないと言つてよいであろう。

6. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) 解析に用いた有限要素プログラムが要素分割の影響を考慮することにより、十分な精度で波動伝播問題に適用できる。

(2) 鉄筋不連続面を考慮したモデルを解析することで、衝撃力が作用すると鉄筋端部に応力集中が発生し、水平方向にひび割れが進展することが再現でき、段落とし部が弱点になる可能性がある。

(3) 上下方向の強い衝撃力を受ける構造物を解析する際に、従来の鉄筋コンクリート要素を用いた解析では、段落とし部周辺での水平方向のひび割れ発生を再現するのは困難である。従って、本論文で示したような、鉄筋要素とコンクリート要素に区別した不連続面を考慮したモデルの検討が必要であろう。

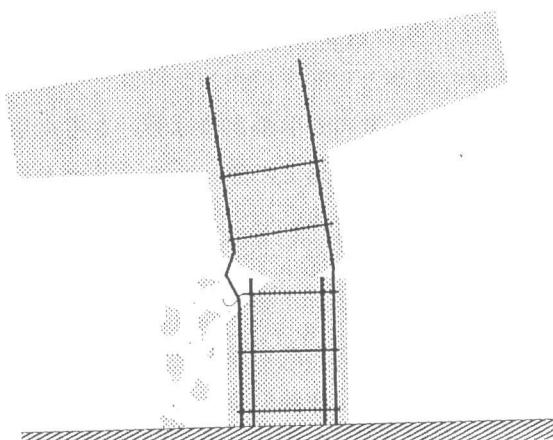


図-11 段落とし部での破壊

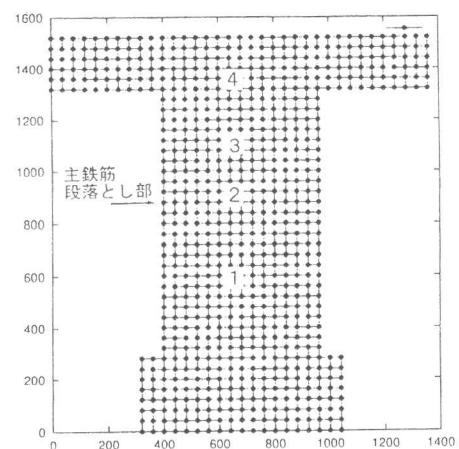


図-12 要素分割と応力履歴の出力点

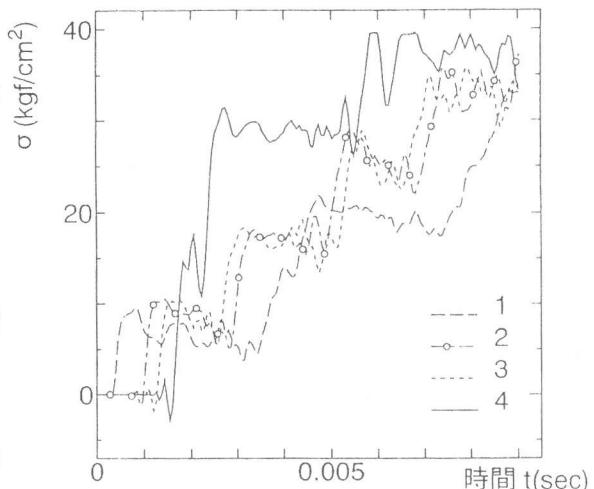


図-13 各点の応力履歴