

衝撃を受けるRC橋脚の弾塑性波動応答解析

北見工業大学 学生員 新井田 武 久  
 北見工業大学 正 員 山 崎 智 之  
 北見工業大学 正 員 三 上 修 一  
 北見工業大学 正 員 大 島 俊 之  
 島田建設 正 員 斉 藤 隆 行

1. はじめに

1995年1月17日の阪神大震災においては鉄筋コンクリート橋脚や鉄筋コンクリート構造物の柱に多くの被害が発生した。これらの破壊モードを観察すると、一般に曲げとせん断が連成した破壊形式となっているとともに、地震荷重の入力初期に応力波動の集中の影響によって衝撃的に破壊したモードが見られる。

鉄筋コンクリートばりが鉛直荷重を受けて破壊する場合の破壊モードとして、通常の曲げ破壊及びせん断破壊のほかに押し抜きせん断(Punching Shear)モードによる破壊が知られている。したがって鉄筋コンクリートばりが衝撃荷重を受けて破壊する場合、はりの深さと長さ、材料特性、衝撃荷重の時刻歴特性、鉄筋の配置などによって様々に変形モードが異なり、それに応じた非線形応答挙動を示すこととなる。

本報告ではこれらの非線形挙動を解析するため、鉄筋コンクリートばりの曲げ変形に着目して検討を行う。すなわち、鉄筋コンクリート橋脚を想定して片持ちばり先端に衝撃荷重が作用する場合を対象として、数パターンの衝撃荷重の履歴を用いて有限要素法による非線形解析を行い、波動伝播も考慮しつつ破壊をシミュレーションすることを目的としている。

2. 動的応答解析

2. 1. 衝撃荷重

本研究では橋梁上部構造から橋脚に入射される衝撃荷重をFig. 1に示すような台形モデル化する。鉄筋コンクリートなどの構造体の衝撃力を評価する場合、衝撃力を与える材料の特性を考慮してモデル化を行う必要がある。ここでは落石の衝撃力評価に用いられるFig. 1に示すような時間分布をとることにし、入射継続時間は30~35(msec)とした。

用意した3つの荷重履歴をFig. 2に示す。LOAD CASE-Aは曲げ破壊と押し抜きせん断破壊の両方を同時に解析するという目的で作成した。すなわち、0~20(msec)の荷重では根本部における曲げ破壊が生じ、その後の反転荷重では荷重速度が速いため押し抜きせん断破壊が起きると予想される。LOAD CASE-B, LOAD CASE-Cは総合的には衝撃荷重の力積が同じであるが、初期段階での荷重速度の相違による破壊モードの変化を予測して比較を行うために用意されている。

2. 2. 解析モデル

橋脚の破壊を現実の挙動として理論解析する際、計算機のコストを減ずるため、橋脚構造を2次元問題に置き換え、Fig. 3のモデルを作成した。

このモデルは曲げ特性を精度よく解析できるように8節点四辺形平面ひずみ要素が用いられている。

Stress Wave Analysis of RC Pier with Elastic-Plastic Deformation under Impulsive Wave  
 by Takehisa NIIDA, Tomoyuki YAMAZAKI, Shuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA, Takayuki SAITO

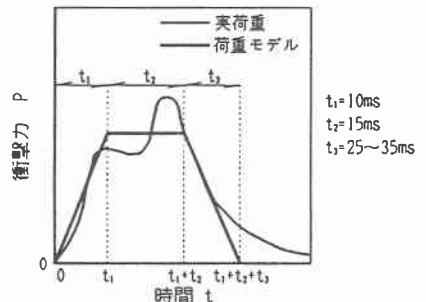


Fig.1 衝撃荷重モデル

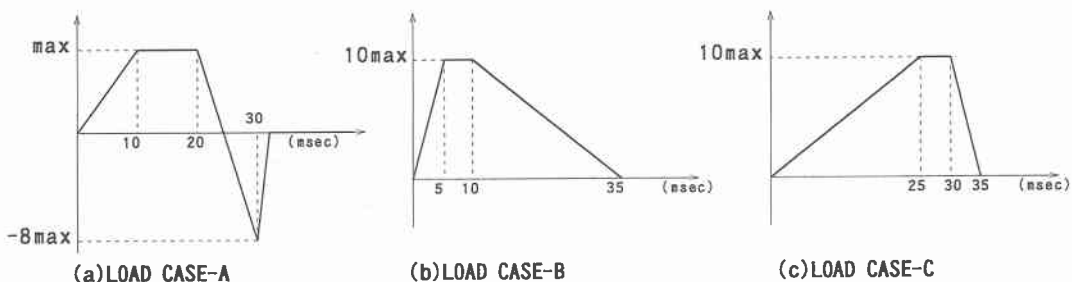


Fig.2 入力荷重モデル

また、補強鉄筋を表現するため、主鉄筋、スタールップの存在する部位の剛性を高めている。

計算の手順は、静的荷重に対してモデルが最初に弾性限界となる荷重を基本荷重として得た後（この荷重をmaxとする）、これを整数倍し、モデルの右肩48(cm), 24(cm)の2パターンの載荷幅に増分荷重として入力する。ここでFig.2に用意した荷重履歴を用い、Newmark  $\beta$ 法を用いた解析時間ステップ幅1.0(msec)の時刻歴応答解析で各パターンの応答の比較を試みる。

### 2.3. 材料特性定義

本研究では非線形構造解析プログラム「MARC」によって理論解析を行っている。このプログラムではユーザが任意の構成則を指定でき、コンクリートのような低引張材料を定義できる。Fig.3の解析モデルには引張応力に対するクラックが考慮されており、Table.1の限界引張応力に達したとき、ソフトニング係数に比例して要素の応力伝達機能が低下してゆき剛性が失われてゆく。また、クラック発生以後、荷重の反転が起るとクラックは閉鎖する。クラックが閉鎖すると剛性は部分的に回復し、クラック発生後のせん断力保持率にしたがってクラック面を介してせん断力が伝達され、圧縮力の伝達機能が再生する。

圧縮応力に対しては、塑性域に入った後の応力-ひずみ関係を直線で近似することにより、塑性後の挙動をコントロールしている(Fig.4)。さらに圧縮力が大きくなり、ひずみが圧壊発生ひずみに達すると、材料は圧壊し要素の剛性は失われる。

### 3. 解析結果

本報告では荷重載荷幅 48(cm)における解析結果を報告する。

Fig.2(a)のLOAD CASE-Aを使用した解析では、初期

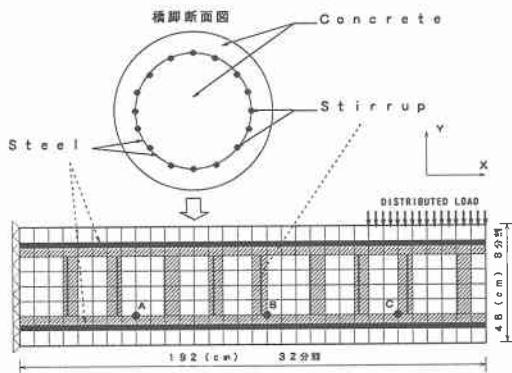


Fig.3 解析モデル

ELEMENT(Steel:180,Concrete:256),NODE:849

Table.1 材料定数

	Concrete	Steel
ヤング率(tf/m <sup>2</sup> )	3.0E+06	21E+06
ポアソン比	0.17	0.3
質量密度(tf/m <sup>3</sup> )	2.35	7.85
降伏応力(tf/m <sup>2</sup> )	1500	49980
限界引張応力(tf/m <sup>2</sup> )	250	
ソフトニング係数	210000	
圧壊発生ひずみ	0.0035	
せん断力保持率	0.5	

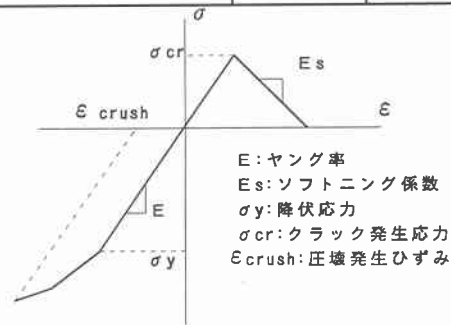


Fig.4 コンクリートの単軸応力-ひずみ関係

の破壊モードとして根本部でのクラック発生に伴う曲げ破壊が見られる。また、荷重反転後には曲げにより発生したクラックは閉鎖し、今度は、中央下部に破壊を見ることが出来る。最初の荷重に比べて反転荷重は速度が速く荷重値も大きいので押し抜きせん断モードが発生したと言える。Fig. 5は要素中央部でのクラック発生の有無をモデル上にプロットしたものである。1要素中にこの判定ポイント（積分点）は9個ありその中から中央のみを出力している。これにより、おおよそのクラックの進展を知ることができる。なお、初期にクラックが生じた部位には荷重反転後、圧縮応力による塑性が確認された。

Fig. 6に、Fig. 3中のポイントA, B, CにおけるY方向応答変位を示す。荷重のかかっていない31(msec)以後は減衰しながら振動していることがわかる。

次にLOAD CASE-Aの経験を元に、LOAD CASE-B、LOAD CASE-Cそれぞれを使用した解析を行った。LOAD CASE-Aでは初期の段階で反転荷重の反対方向に荷重がかかっていたので $8 \times \max$ の反転荷重値で押し抜きせん断が起こったが、LOAD CASE-B, Cでは初期の荷重から押し抜きせん断モードを得るという目的で $10 \times \max$ の荷重を最大とした。

初期の破壊モードを比較すると、LOAD CASE-Bでは6(msec)で中央部にクラックが発生する押し抜きせん断が見られ、LOAD CASE-Cでは11(msec)で通常の曲げ破壊となっている(Fig. 7)。予想通り速度の速い荷重になると曲げよりせん断が先に現れている。次にモデル内部の応力波動伝播を可視化し検討してみた。Fig. 8は、LOAD CASE-B, Cを使用して解析したときの各節点の変位の時刻歴を出力し、 $(u^2+v^2)^{0.5}$ の合成変位をシミュレーションしたものである。それぞれの荷重ケースで最初にクラックが発生したときの時間における伝播状況を示している。

2つの伝播状況を比較すると、LOAD CASE-Cの方が変位の進行がやや多いことがわかる。ここでFig. 2

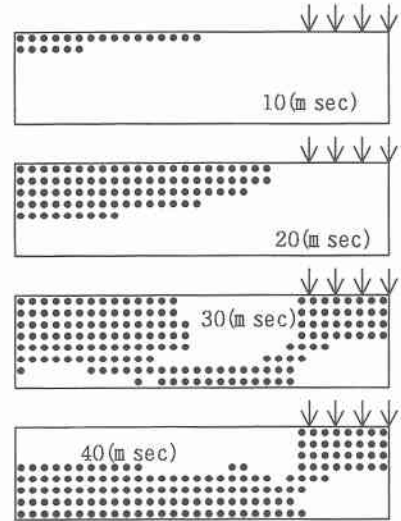


Fig.5 クラック発生分布(LOAD CASE-A)

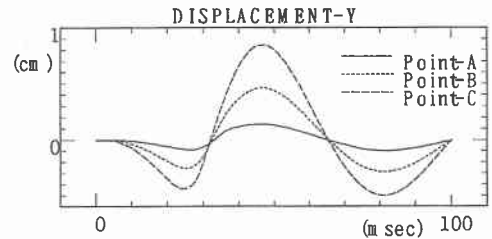
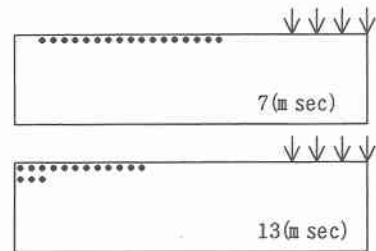
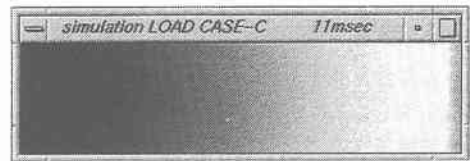
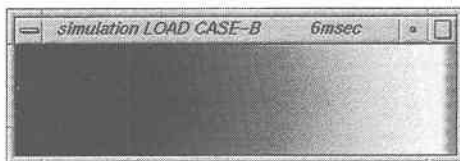


Fig.6 応答変位(LOAD CASE-A)



(上:LOAD CASE-B,下:LOAD CASE-C)

Fig.7 クラック発生分布



左:LOAD CASE-B(6msec),右:LOAD CASE-C(11msec)

Fig.8 波動伝播状況

(b), (c)からそれぞれ、クラックの発生した時間までの力積を計算すると、ほぼ同じ値となった。つまり、LOAD CASE-B, C使用時における初期のクラック発生時では双方にほぼ同じエネルギーが加わっていることになり、衝撃荷重が急激に作用するLOAD CASE-Bでははりの先端部分にエネルギーが集中するため、押し抜きせん断破壊が発生したと言える。

次にLOAD CASE-B使用時のポイントA, B, Cにおける

Y方向応答変位をFig. 9に示す。押し抜きせん断破壊時の変位をFig. 6と比較すると（つまり、LOAD CASE-AとLOAD CASE-Bを比較すると）、わずかにFig. 9の変位が少なくなっている。なお、クラック発生分布のFig. 5, Fig. 7を比較してもFig. 5の方が押し抜きせん断発生時のクラック分布が中央部に寄っており、押し抜きせん断を起こした荷重値はLOAD CASE-Bより小さいにもかかわらず、破壊部位には少なくともLOAD CASE-B使用時より強い引張荷重がかかっていることがわかる。このことは、LOAD CASE-Aにおける0~20(msec)での荷重が後の反転荷重によるモデルの破壊モードに大きく影響しており、実際に押し抜きせん断を起こした荷重だけを考慮するべきではないということを示している。

#### 4. まとめ

クラック発生を考慮した鉄筋コンクリート橋脚モデルに衝撃荷重を与えた動的応答解析の結果から以下の結論を得た。

- (1) 曲げ破壊と押し抜きせん断破壊の両方を1つの解析で同時に表すことができた。また、閉じたクラックが圧縮力を伝達し、塑性域に入る挙動も考慮できた。
- (2) 衝撃荷重の加わる速度によって、力積は同じでも破壊するモードが違ってくることが確認できた。
- (3) 応力波動伝播と破壊モードとの関連を可視化することができた。
- (4) 静的荷重から衝撃荷重を算出することによって、他の形状のモデルに対しても、その動的耐荷力を知ることができる。

本研究は、橋梁上部構造からの水平衝撃力を受ける橋脚の破壊をシミュレーションすることが目的であり、本報告ではその目的を果たしたと言える。今後は橋脚の形状にも数パターンのモデルを用意し衝撃力に最大限耐えうる橋脚構造を提案することを目的として研究を進める。

最後に、本研究を行う上で、日本マーク株式会社の方々には多大なる御指導、御協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版株式会社，1993
- 2) 日本マーク株式会社：ユーザーズマニュアル A編～E編，1994
- 3) 角田、井藤、藤田：鉄筋コンクリートスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 229, pp. 105-115, 1974. 9
- 4) 岸、能町、松岡、吉田：一方向に補剛された両端単純支持矩形板の衝撃応答特性について，構造工学論文集Vol. 33A, pp. 549-557, 1987. 3
- 5) 小高、中原：弾性棒で衝撃された無限長梁の応力，日本機械学会論文集（第1部）33巻248号，pp. 533-541, 1967. 4
- 6) 岸、松岡、能町：単純支持された多層複合剛性梁の横衝撃について，材料 別冊，第34巻，第387号，pp. 1375-1381, 1985. 12

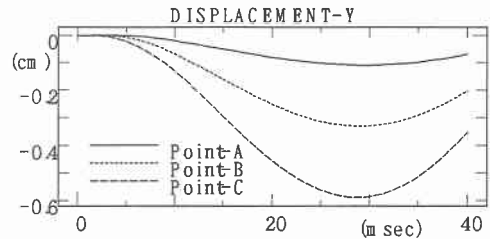


Fig.9 応答変位(LOAD CASE-B)