

# I-17 コンクリート柱の衝撃突き上げによる 輪切り状ひび割れの数値解析

北見工業大学 学生員 新井田武久 防衛大学校 学生員 別府 万寿博  
防衛大学校 フェロー 石川 信隆 北見工業大学 フェロー 大島 俊之  
北見工業大学 正員 三上 修一 北見工業大学 正員 山崎 智之  
北見工業大学 学生員 久保 和子

## 1. まえがき

1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震では RC 橋脚の輪切り状ひび割れ、鋼製橋脚の軸対称座屈など軸方向に卓越した破壊現象が確認された。これらの現象は曲げによる破壊現象とは異なることから、水平動の他に衝撃的な上下動の存在が考えられている。すなわち、橋脚軸方向に衝撃力が加わった場合、応力波動は橋脚内部を伝播し橋脚天端からの反射の影響などと重なり合うことによって、内部の応力分布は複雑になり、その過程でコンクリートの引張限界応力に達すると、橋脚には円周ひび割れが発生することとなる。

輪切り状ひび割れが見られる橋脚の被害はさほど重大なものとはいえないが、上下動と水平動がほぼ同時に作用した場合、水平動による偏心直後の上下動の突き上げが現実起こった道路橋の倒壊など重大な被害の原因となることは十分考えられる。これらの背景から、衝撃的上下動の実験的な現象の再現が待たれていたが、これを受けて防衛大学校土木工学科振動破壊研究室においてコンクリート柱供試体の衝撃突き上げ実験が行われており、輪切り状ひび割れなど地震で確認された現象の実験的再現がなされ、破壊発生メカニズムが明らかになりつつある。

本研究では、クラックの発生を考慮した衝撃応答解析を行い、この実験結果をシミュレーションすることを目的としている。

## 2. 実験概要

実験では、高速変形載荷装置と突き上げ装置を併用することにより衝撃的上下動を再現しており、RC 橋脚の実物の大きさ（直径 3m、柱高 10m）を意識して作られた縮尺 1/30、1/40 のコンクリート柱にそれぞれ M10 ボルトを上下のみに埋め込んだもの、または全部通したもの計 4 種類の供試体（図 1）に低速、中速、高速の突き上げ速度で衝撃載荷実験を行っている。突き上げ装置は、高速変形載荷装置からの入力を伝達し、出力/入力速度比を 1/2.9 とするように突き上げ板を強制変位させる装置である。高速変形載荷装置は、最大載荷速度約 4m/s の載荷能力を有しており、突き上げ板をその 1/2.9 倍の 1.38m/s の最大速度で突き上げるこ

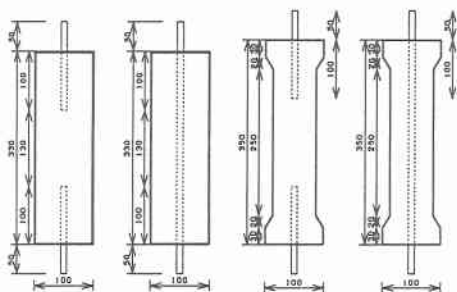


図 1 供試体の種類

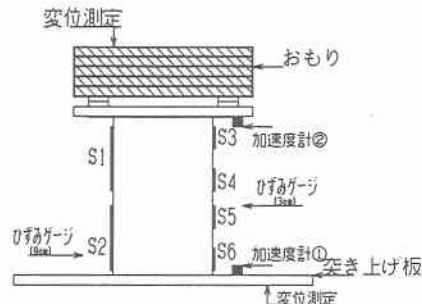


図 2 測定項目

Numerical Analysis of Circumferential Crack on Concrete Column by Push-up Impact Test

by Takehisa NIIDA, Masuhiro BEPPU, Nobutaka ISHIKAWA, Toshiyuki OSHIMA, Syuichi MIKAMI, Tomoyuki YAMAZAKI, Kazuko KUBO

とができる。この速度を高速とし、中速(0.69m/s)、低速(0.35m/s)の3種類の载荷速度で強制変位量は0.5cmの衝撃力を供試体に与える。なお、供試体には 500kgf の重錘が载荷されており、縮尺 1/30 モデルで約 6.4kgf/cm<sup>2</sup>、縮尺 1/40 モデルで約 11kgf/cm<sup>2</sup> の初期圧縮応力が与えられている。

実験における測定項目は基盤、上部重錘の加速度、供試体各部位のひずみなどである(図2)。供試体のひずみについては、コンクリート粗骨材の最大粒径が2.5cm であることから9cm および3cm のひずみゲージを用いて計6カ所測定している。

### 3. 実験結果

表1に実験ケースを示す。各供試体名は縮尺及びボルトの配筋タイプを示しており、'UD'は上下のみ埋め込みタイプ、'TH'は通しボルトタイプの場合である。'L,M,H'は突き上げ速度の低速、中速、高速を表す。また、それに続く数字は実験ケース番号を示している。

表1 実験ケース(図中の添字 ×: 計測不良、○: 予備供試体)

| 突き上げ速度  | 縮尺 1/30                 |                           | 縮尺 1/40                 |            |
|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|------------|
|         | 上下のみボルト                 | 通しボルト                     | 上下のみボルト                 | 通しボルト      |
| 0.35m/s | 30UD-L-1,2              | 30TH-L-1,2 <sup>×</sup>   | 40UD-L-1,2 <sup>×</sup> | 40TH-L-1,2 |
| 0.69m/s | 30UD-M-1,2 <sup>×</sup> | 30TH-M-1,2                | 40UD-M-1,2              | 40TH-M-1,2 |
| 1.38m/s | 30UD-H-1,2              | 30TH-H-1,2,3 <sup>○</sup> | 40UD-H-1,2              | 40TH-H-1,2 |

ここでは縮尺 1/30 の通しボルト供試体に高速で突き上げたときの実験結果について示す。すなわち供試体番号 30TH-H-2 についてである。図3は、基盤入力加速度である。これより、8ms までは正の加速度、その後は基盤がストッパーによって急停止し、停止時の加速度が非常に高周期で発生していることがわかる。図4に図3の加速度データを時間積分して得られた入力速度の時刻歴応答、図5にさらに積分して得られた変位応答を示す。図4の速度応答から10ms において100cm/s から25cm/s まで速度が急激に減少し30ms でほぼ速度がゼロとなり停止していることがわかる。図5の変位応答からは、停止加速度の生じた8ms 付近で丘状の変化が見られ、同じく30ms で停止する挙動が確認された。

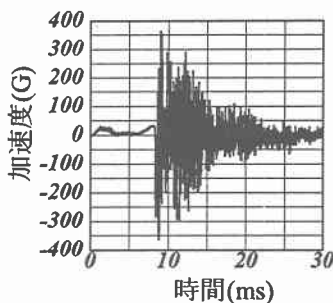


図3 基盤入力加速度  
(生データ)

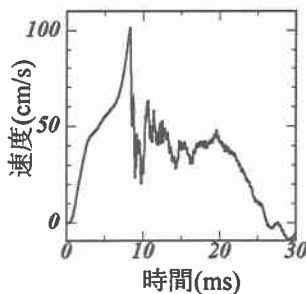


図4 基盤入力速度  
(加速度データの時間積分)

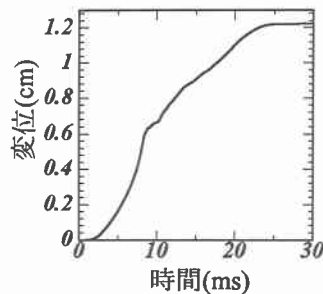


図5 基盤入力変位  
(基盤入力速度の時間積分)

次に、ひずみゲージ S1、S2 で得られた応答値を図6に示す。

両方とも最初の8ms は突き上げによる圧縮ひずみが生じ、S1 では13ms においてひび割れによるデータの発散が見られる。また、ひずみ波形がS1、S2 においてひび割れが生じるまで顕著な差異が見られないこと

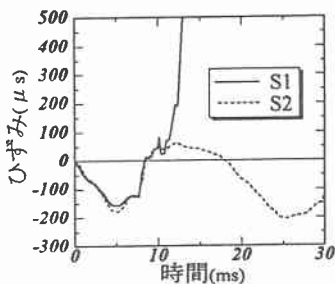


図6 ひずみゲージS1、S2の  
ひずみ応答

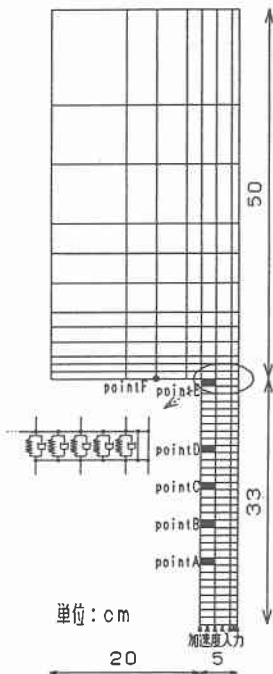


図7 解析モデル  
(nodes:216、elements:661)

軟化に入ったときの残留ひずみをひび割れのひずみとしている。本報告中の解析モデルの破壊状況はこのひび割れひずみ（クラックひずみ）の大きさをパラメータとして評価する。荷重は、下部の全節点に加速度を入力する。ここで用いられる加速度履歴は図3のものである。プログラムは加速度を積分して変位を計算し、これを強制変位として節点に与える。時間積分法はニューマークβ法( $\gamma=1/2$ 、 $\beta=1/4$ )である。次に、境界条件の設定であるが、まず、初期に供試体に加わる圧縮力を得るため上載重錘の質量( $0.52\text{t/m}^3$ )に重力加速度( $9.8\text{m/s}^2$ )を与えた。これを与えないと、図7で示される初期の圧縮ひずみが得られない。なお、上載重錘の質量は円周方向に体積を持ったとき  $500\text{kgf}$  となるように決定されている。また、供試体と上載重錘の接合部であるが、これは実験の状況から、完全剛結ではないので上載重錘の節点と供試体の持つ節点をダッシュポットとバネで接続している。但しボルトと重錘はほぼ剛結なのでこの部位は同じ節点を共有する(図8)。このとき2節点間のバネの力は次式で表される。

から、変形の伝播速度は非常に速いものと考えられる。

以上、本実験においてコンクリート柱供試体の輪切り状ひび割れの再現に成功すると共に、以下のような成果が得られている。

- (1)コンクリート柱供試体の破壊形態に、輪切り状ひび割れの他に、破断、破断落下後圧壊など計5種類を観察できた。
- (2)全般的に突き上げ速度の増加に伴って破壊の程度が大きくなるが、ビデオ観察の結果では落下衝突の破壊なども含まれていることが判り、実験終了時のひび割れ観察では推定不可能な、内部まで到達した大きな破壊が生じていることが判った。

表1 材料定数

|                               | コンクリート | 鉄筋      |
|-------------------------------|--------|---------|
| ヤング率( $\text{kgf/cm}^2$ )     | 300000 | 2100000 |
| ポアソン比                         | 0.17   | 0.3     |
| 質量密度( $\text{t/m}^3$ )        | 0.24   | 0.8     |
| 降伏応力( $\text{kgf/cm}^2$ )     | 175    | 3500    |
| 限界引張応力( $\text{kgf/cm}^2$ )   | 24.8   |         |
| ソフトニング係数( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 300000 |         |
| 圧壊発生ひずみ                       | 0.0035 |         |
| せん断力保持率                       | 0.5    |         |

#### 4. 数値解析

今回、解析対象とした実験は3.で紹介した実験ケース30-TH-Hである。図8に解析モデルを示すが、供試体形状、衝撃载荷による変形共々軸対称であるため、軸対称解析用の要素が使用されている。ボルトの存在する部位は剛性を高くしており、軸方向にのみ剛性を持っている。

ここでは、鉄筋は弾-完全塑性材料、コンクリートはひび割れの発生を考慮した低引張材料としており、材料定数は表1に示す通りである。引張限界強度に達するとコンクリートにはひび割れが発生し伝達する応力は減退するが、軟化を考慮しているため直ちにゼロとはならない。このとき、ひび割れはひずみの単位で評価される。すなわち、

$$F = K(u_2 - u_1) + C(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \quad \dots\dots(1)$$

( $K$ :バネ剛性、 $C$ :減衰係数、 $u_1, u_2$ :第1、第2節点の変位)

本研究では、実験の再現シミュレーションを目的としているが、解析を一致させるために最も重要なのは供試体の変形挙動を正確に再現することである。実験における供試体の変形挙動は、図6で示されるひずみ応答から判るとおり、

- ①供試体は衝撃荷重初期は圧縮力を受け、10ms 付近で引張側に反転する。
- ②圧縮力を受けているとき、各ひずみ測定点での履歴はほぼ同じである。
- ③ひび割れが発生する部位と発生しない部位があり、発生しない部位では再び圧縮に反転する。

この3点である。解析で変更できる境界条件は、上載重錘と供試体間のバネ剛性とダッシュポットの減衰係数である。これらの境界条件の解析結果への影響を調べるため解析初期の10msに着目して予備解析を行い、減衰係数を一定にしてバネ剛性の影響を調べ、更にバネ剛性を一定にして減衰係数の影響を調べた。

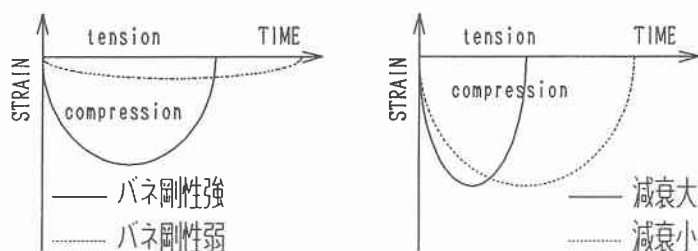


図8 境界条件が解析結果に及ぼす影響

表2

|      |         |
|------|---------|
| バネ剛性 | 400tf/m |
| 減衰係数 | 2.0     |

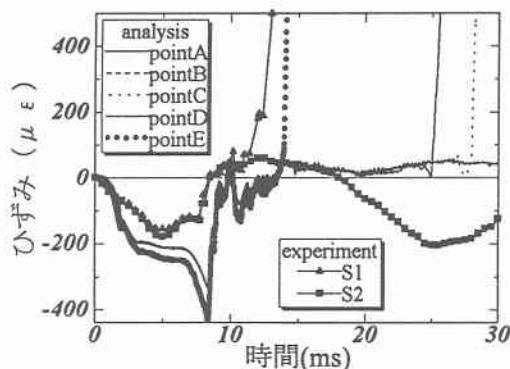


図9 ひずみ応答(数値計算結果)

バネ剛性が強くなると上載重錘からのわずかな変位が大きな力となってコンクリート部に伝わるため、供試体を圧縮する力が大きくなり、ひずみも大きくなる。このことは加速度入力点から伝播する応力波動をも早く伝えることになり、結果としてコンクリート部分の変形を早め、引張側への反転も早くなる。

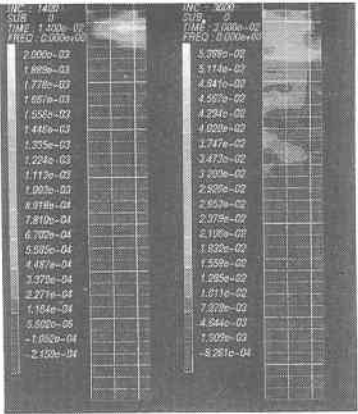
減衰係数が大きくなると式(1)より、速度成分が影響してくるため応答初期において圧縮力が大きく評価されるが、時間が経つにつれ速度が一定になるとダッシュポットの影響が小さくなり、ひずみ履歴は直ちに引張方向に反転を始める。

これらの影響を認識したうえで試行錯誤を繰り返し、表2の時、最も図6に近くなるひずみ応答を示した(図9)。この図で示されるひずみ履歴は図7中に示される pointA～E で出力されたものである。10ms 間での圧縮ひずみは各点でほぼ同じであ

り、圧縮時における変形挙動は8msにおいて圧縮ひずみがやや突出し大きく評価されているが概ね実験値との一致を見せている。引張反転後はまず、重錘近くに位置する pointE でひび割れ発生を伴う引張ひずみの増大が見られ、次いで25msでその直下の pointD、Cにおいて同様の挙動が得られた。解析モデル中央に位置する pointA、B ではひずみの増大は見られず、わずかな引張ひずみが作用したまま30msを経過している。ここで、クラックが発生した14msにおけるクラックひずみの分布図を図10(a)に、30msにおけるクラックひずみの分布図を図10(b)に、実験終了時の供試体の写真を写真1に示す。図10(a)を見ると、供試体上

部にクラックひずみが線状に分布しており、この部分にひび割れが発生しやすいことが予想できる。これより、上部にしか円周ひび割れが入っていない写真1との一致が確認できた。

次に、図11に加速時計②(図2)で測定された加速度を積分して得られた変位と、図7中の pointF で得られた変位の比較をしめす。これを見ると30msにおいて数値計算結果は実験値より1mm程変位が小さいが、ほぼ同じ履歴をたどっていることが判る。



(a) 14ms (b) 30ms  
図10 クラックひずみ分布

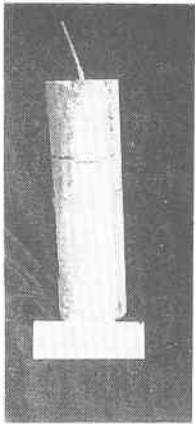


写真1 実験供試体

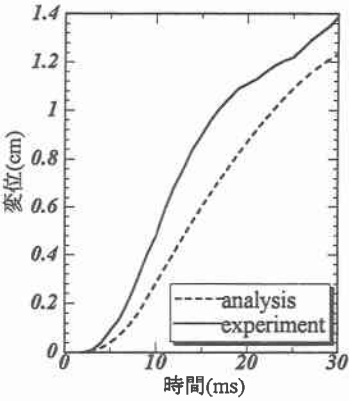


図11 応答変位の比較

これらの結果から、数値解析では10ms間での応答で圧縮ひずみの大きさやその継続時間は実験値と良好な一致を見せるが、引張側反転後の挙動に一致は確認できるものの、良好とはいえない。これはひずみゲージS2(図6)で見られるひずみの引張反転後のさらなる圧縮側への転移が全く得られていないことから、数値解析では、引張反転後の圧縮力が高く評価される傾向があるためといえる。しかしながら、応答変位の一致、クラックひずみの分布図からひび割れの発生部位が予想できることなどから、概ね数値解析によって破壊現象のシミュレーションがなされたと思われる。

## 5. 低速衝撃載荷

次に、設定した境界条件が妥当なものかを確認するため、低速載荷の計算を行った。この実験(30-TH-L)では、供試体にひび割れは発生せず、ひずみ応答から内部応力は常に弾性域にあることが確認されている(図12)。

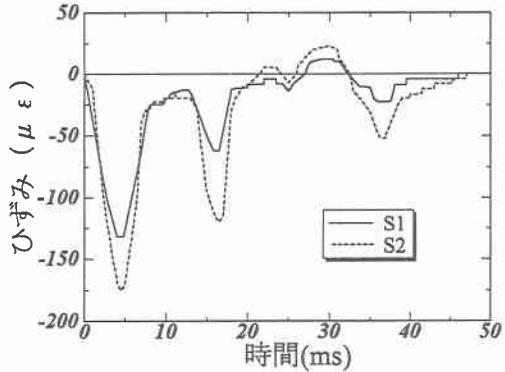


図12 実験値のひずみ応答(低速載荷)

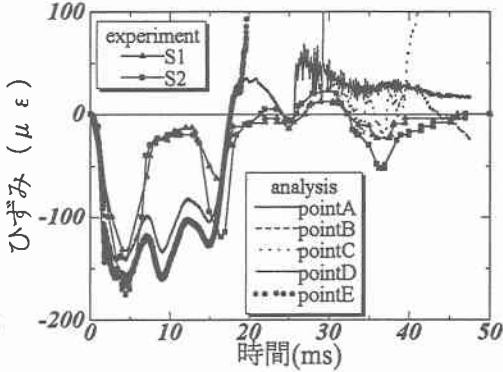


図13 解析結果(低速載荷)



図 14 クラックひずみ分布  
(低速衝撃載荷) 30ms

高速載荷の数値解析では加速度測定のスAMPLINGタイムと同じ時間ステップ幅(10  $\mu$ s)をとったが、低速載荷の実験では 50  $\mu$ s でサンプリングされているため各データ間を線形で補間し、同じく 10  $\mu$ s の時間ステップ幅で計算した。図 7 で示される各 point におけるひずみ応答を図 13 に示す。各 point ではほぼ同様のひずみ履歴となっているが、20ms で引張ひずみに反転した後 point D、E ではクラック発生に伴う引張ひずみの増大が確認された。しかし、それ以外の point ではひずみはすべて弾性域にあり、圧縮ひずみの大きさと履歴が実験値にほぼ一致することが分かる。上部でひび割れが発生した原因として、先も述べたように数値計算上では、引張反転後の圧縮力が低く評価されることが考えられる。しかし、図 10(b)と同じレンジで表示した図 14 のクラックひずみの分布図(30ms 時)を見ると上部にひび割れの発生が認められるが、これらは狭い範囲で分布しておりひずみ自体もそれほど大きくないため、高速衝撃載荷時に比べると小規模の破壊挙動を示しているといえる。

## 6. まとめ

軸方向衝撃載荷実験で得られた輪切り状ひび割れを数値計算で再現するため、FEM による衝撃応答解析を行った。最初に行った予備解析において衝撃突き上げに伴う供試体の変形挙動は上載重錘の圧縮力に大きな影響を受ける事を確認し、数値解析上での重錘－供試体間の境界条件を本報告では高速衝撃載荷実験のシミュレーションを行い、試行錯誤を繰り返すことによって決定している。これにより、下部から入力される荷重が上載重錘の圧縮力を上回って、供試体内部の応力が引張に転移するまでの挙動を再現できた。また、低速衝撃載荷実験のシミュレーションを行うことにより、この境界条件の妥当性を確認した。しかし、今回設定した境界条件では高速衝撃載荷、低速衝撃載荷の場合ともども、クラック発生後の圧縮力がやや低く評価される傾向が見られた。

本来、FEM 解析では明確に境界条件を設定することが前提条件であるが、今回のような下部から突き上げ、上載重錘が可動であるこの衝撃載荷実験のシミュレーションを行う上では、完全固定の境界条件を決定できず、ここで行ったような試行錯誤によるしかなかったと思われる。

上下動による RC 橋脚の破壊シミュレーションを行うためにも、実験で再現された現象を数値解析によって検討することは必要である。今後更に解析方法を改善し、最終的に上下動による橋脚の破壊、または、水平動との連成による破壊をシミュレーションすることを目的として研究を進める。

## 参考文献

- 1) 別府、香月、石川：衝撃突き上げ実験によるコンクリート柱供試体の輪切り状ひび割れ、第 3 回落石などによる衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、1996.5
- 2) 防衛大学校土木工学科振動破壊研究室：第一回衝撃突き上げ実験報告資料集、1996.7
- 3) 大島、三上、青地、新井田：繊維強化複合材料中を伝播する軸方向衝撃波の伝播特性、構造工学論文集、Vol.42A、1996