

# 論文 衝撃突き上げ実験による RC 橋脚モデルのひび割れ発生メカニズム

原田耕司\*1, 別府万寿博\*2, 石川信隆\*3, 太田俊昭\*4

**要旨:** 本研究は, 兵庫県南部地震でみられた RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れを大型衝撃突き上げ実験で再現するとともに, 実験で得られた応力波の伝播状況や構造全体の振動をばね-質点系モデルを用いてシミュレーション解析を行ったものである. さらに 1 質点系モデルを用いて, 衝撃突き上げ実験による RC 橋脚モデルの輪切り状ひび割れの発生メカニズムについて究明した. その結果, 実験で計測された波動場と振動場をばね-質点系モデルでシミュレートでき, 衝撃突き上げ実験による RC 橋脚モデルの輪切り状ひび割れは, 慣性力による引張破壊であることがわかった.

**キーワード:** 水平輪切り状ひび割れ, RC 橋脚, 衝撃突き上げ実験, ばね-質点系モデル

## 1. 緒言

兵庫県南部地震の被災例には, 写真-1 に示すような RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れがみられた. このような RC 橋脚の輪切り状ひび割れの発生原因として衝撃的な上下動の作用とする見方も多く, これまでに実験および解析的な研究が数多くなされている<sup>1),2)</sup>. 著者らも, 大型の RC 橋脚模型供試体に対して衝撃突き上げ実験<sup>3)</sup>を行い, RC 橋脚模型の輪切り状ひび割れの再現に成功した. また実験の結果, 衝撃力の載荷直後に発生した応力波が供試体内部を伝播する状況や, その後最終的に供試体内部の軸方向のひずみ分布が一定となって振動している様子などが計測できた.

本研究は, 衝撃突き上げ実験で生じた RC 橋脚模型の輪切り状ひび割れの発生メカニズムについて解析的に検討を行ったものである. まず, 実験で観察された波動場と振動場の応答をばね-質点系モデルによりシミュレーション解析を行った. 次に, 輪切り状ひび割れが発生する時間帯は, 供試体の軸方向のひずみ分布が一様となる振動領域であることに着目して, 1

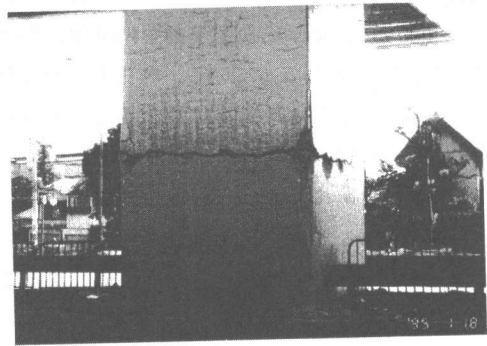


写真-1 RC 橋脚の輪切り状ひび割れの例

質点系モデルにより輪切り状ひび割れの発生メカニズムを検討した. その際, 実験で得られた比較的波形が明瞭な速度の時刻歴データを線形近似したうえで, モデル化した加速度波形を求めた. これを用いて, 線形近似した各時間帯の応答を求め, 輪切り状ひび割れの発生に影響を与えた加速度領域を究明した.

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験装置

図-1 に実験装置の概要を示す. 本実験装置は,

\*1 西松建設(株) 技術研究所 工修(正会員)  
 \*2 防衛大学校助手 土木工学科 工博(正会員)  
 \*3 防衛大学校教授 土木工学科 工博(正会員)  
 \*4 九州大学教授 大学院工学研究科 工博(正会員)

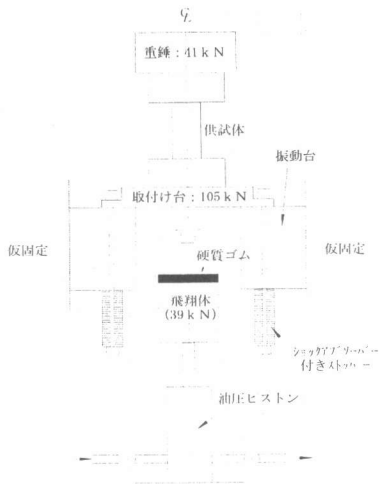


図-1 実験装置

39kN の飛翔体を下方向から供試体の取付け台へ衝突させて、衝撃的な上下動を供試体に作用させるシステムになっている。飛翔体の衝突を受けた取付け台は、ある変位量を超えると自動的にショックアブソーバー付ストッパーが作動し停止する。したがって、取付け台に設置された供試体は、瞬間的に上方向に突き上げられた後、ストッパーの作用により原位置に戻るようになる。

飛翔体の衝突速度は、1~10m/s まで調整できる。また、飛翔体と取付け台の衝突は、金属同士の衝突なので、高周波成分を低減させる目的で飛翔体の衝突面に厚さ 30mm の硬質ゴムを設置した。

## 2.2 供試体

供試体の概要を図-2 に示す。実際の RC 橋脚を高さ 10m、直径 3m の円形断面のものと想定して、縮尺 1/10 のコンクリート円柱供試体を作製した。この柱の上下部には、高さ 500mm、断面 800×800mm のスタブを設けて、RC 橋脚の張出し梁部およびフーチング部をモデル化した。

配筋は、図-3 に示すように供試体の高さ半分に段落しを有するものとした。すなわち、柱全長に渡って D13 の鉄筋を 6 本配筋し、下半分についてはさらに 6 本の鉄筋を配筋して柱中央

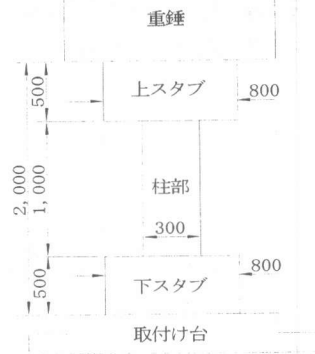


図-2 供試体の概要

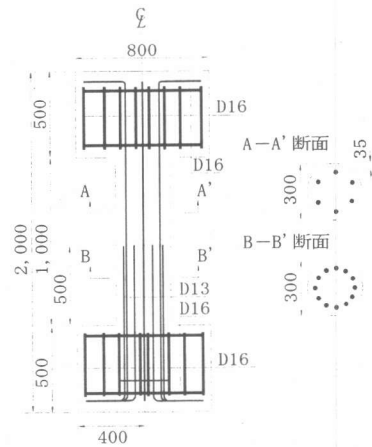


図-3 供試体の配筋

部に段落しに相当する配筋状態を設けた。本供試体の場合、鉄筋比は供試体下部で約 2%、上部で 1% となり、実際の配筋状態とほぼ等しくなっている。なお本実験では、①衝撃的な軸力のみを外力としており、水平力は対象としないこと、②縮尺モデルでは帯鉄筋の間隔や寸法をモデル化するのは困難であり、帯鉄筋を配筋するとコンクリート表面にひび割れが発生しやすく、研究の対象としている輪切り状ひび割れとの判別が難しいため帯鉄筋は配筋していない。供試体作製には、圧縮強度約 25N/mm<sup>2</sup> 最大骨材寸法 20mm のコンクリートを用いた。

また上部工のモデル化は、供試体の上に 41kN の重錘を載せて模擬した。したがって、上スタブと重錘の合計重量により供試体の柱部には 0.69N/mm<sup>2</sup> の初期圧縮応力が作用する

表-1 解析定数

項目	定数
コンクリートの弾性係数	$2.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
鉄筋の弾性係数	$2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
計算の時間刻み	$1.0 \times 10^{-6} \text{ sec}$

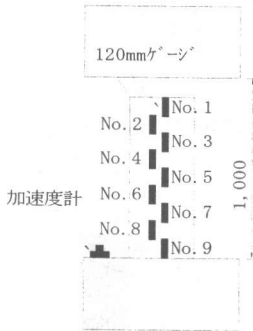


図-4 測定項目

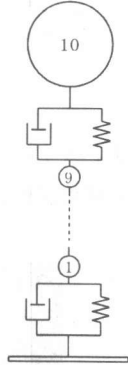


図-5 解析モデル

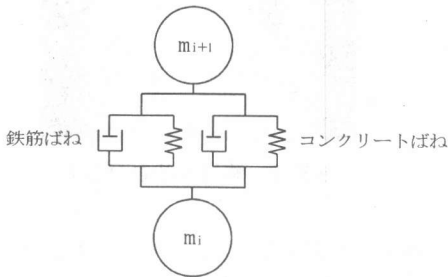


図-6 質点間の連結ばね

ことになる。供試体と重錘は、PC 鋼棒により上スタブを貫通して緊張連結し、また取付け台と下スタブも PC 鋼棒で緊張連結している。よって、取付け台から重錘までは構造的に一体化されている。

### 2.3 測定項目

図-4 に測定項目の概要を示す。ひび割れ発生位置と発生時刻を確認するため、またひずみ分布の時刻歴の推移を把握するためコンクリートの表面に 9 枚のひずみゲージ (120mm) を全長に渡って隙間がないように貼付した。また取付け台から入力される加速度は、下スタブ上に加速度計を設置して測定した。

## 3. ばね-質点系モデルによる実験のシミュレーション

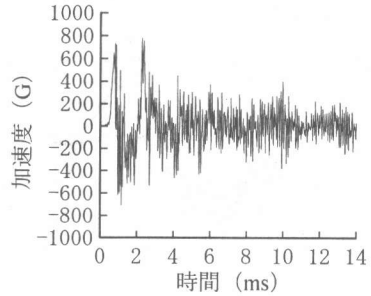


図-7 加速度～時間関係

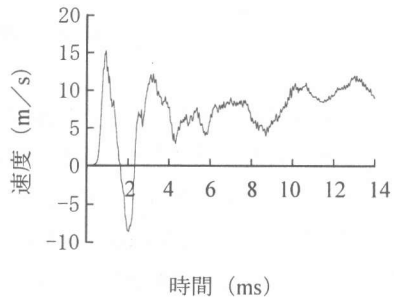


図-8 速度～時間関係

### 3.1 解析モデル

解析モデルは、供試体を図-5 に示す 10 質点系モデルで離散化した。各質点間は、供試体主鉄筋の段落しを考慮できるように供試体の断面配筋にしたがって図-6 のようにコンクリートばねと鉄筋ばねを並列させて結合した。ここで、コンクリートおよび鉄筋の応力～ひずみ関係はいずれも弾性とし、表-1 に示す解析定数を用いた。

### 3.2 実験結果との比較

図-5 の 10 質点系モデルに対し図-7 に示す実験で得られた加速度を入力して弾性応答解析を行った。また図-8 に加速度を積分した速度～時間関係を示す。なお、解析では減衰無しと減衰を 1% 考慮した場合の比較も行った。

#### (1) 数値解析結果

図-9 にひずみ測定位置 No1, 5, 9 のひずみ～時間関係を実験結果と解析結果を比較して示す。これより、減衰を考慮しない場合は載荷当初に入力された応力波の影響が大きく、減衰を考慮した場合のひずみ値を中心にした等振幅の振動が確認できる。この振幅は最大で約  $500 \mu$

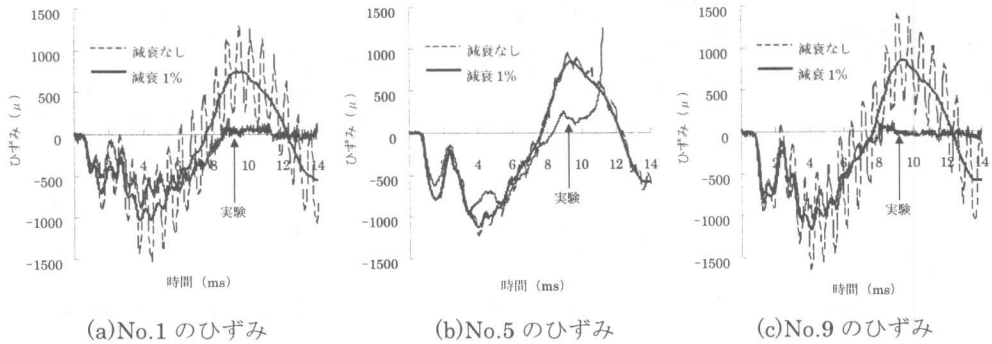


図-9 実験と解析のひずみ～時間関係の比較

となり応力に換算すると約  $10\text{N/mm}^2$  となる。これより応力波の算定式  $\sigma = \rho cV$  を用いて衝撃速度を求めると  $13\text{m/s}$  となり実験の最大速度とほぼ等しいことがわかる(図-8 参照)。一方、減衰を考慮した場合には载荷当初に応力波は減衰し、実験をよくシミュレートしていることがわかる。また実験では、ひずみゲージ No.5 が約  $11\text{ms}$  で大きく振り切れており、柱中央部に発生したひび割れと対応している(写真-2 参照)。しかし、解析結果をみると、約  $8\text{ms}$  でコンクリートの限界引張ひずみ  $200\mu$  に達しており、また実験でも約  $9\text{ms}$  時には限界引張ひずみを超えていることから、この時点で柱内部は大きく損傷を受けたものと思われる。

## (2) ひずみ分布の比較

図-10 は減衰 1% の場合の柱高さ方向のひずみ分布を実験と比較して示したものである。まず、図-10(a) は飛翔体の衝突直後  $t=0.3\text{ms}$  のひずみ分布を示している。この時刻は、応力波が供試体を伝播する時間約  $0.3\text{ms}$  (コンクリートの波動伝播速度は  $c = \sqrt{E/\rho}$ ,  $E = 2.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ,  $\rho = 2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  より、 $c = 3300\text{m/s}$  となり、 $t = \ell/c$ ,  $\ell = 1\text{m}$  より応力波が柱を伝播する時間は約  $0.3\text{ms}$  となる。) とほぼ等しく、载荷直後に発生した応力波が上方向に伝播している様子をよくシミュレートしている。次に、図-10(b) は応力波が供試体を 1 往復した時刻約  $0.74\text{ms}$  のひずみ分布を示している。この時刻では载荷直後に入射された圧縮応力波が柱上部で反射、

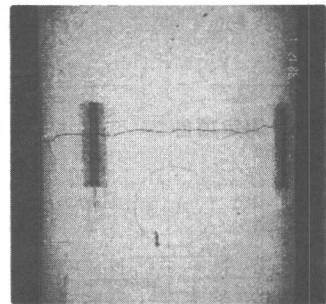


写真-2 輪切り状ひび割れ

干渉した影響を受け、柱下部よりも上部のひずみが大きくなっており、実験と解析はよく一致している。図-10(c) は载荷後  $4\text{ms}$  の状況であり、解析値は実験値に比べやや大きい、この時刻になると柱内部のひずみ分布はほぼ一様となって振動している様子が確認できる。また図-10(d) は、 $8.3\text{ms}$  の引張ひずみの分布を示したものである。段落し部近傍のひずみは、実験、解析ともに図中丸印で示したように、他の部分に比べ若干急変しており、この部分でひび割れが発生したことが伺える。

## 4. 1 質点系モデルによる輪切り状ひび割れの発生メカニズムの解明

前章の検討より、载荷直後には応力波の影響がみられるものの、次第にその影響は小さくなり、供試体内のひずみ分布は一定となって振動していることがわかった。すなわち、引張破壊が生じる時間帯では 1 質点系モデルに近い状態

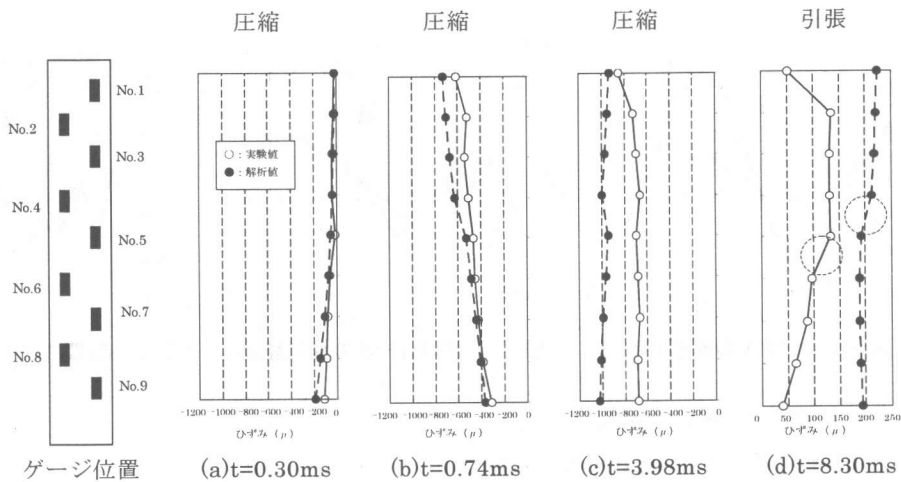


図-10 軸方向のひずみ分布の推移

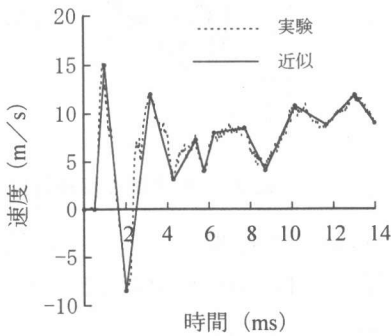


図-11 速度データの線形近似

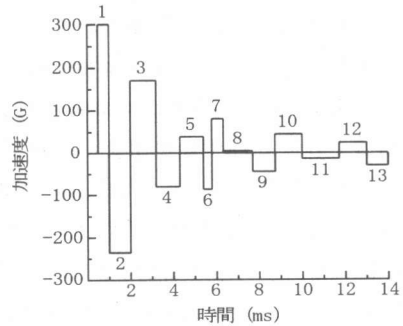


図-12 モデル化した平均加速度～時間関係

になっているものと思われる。そこで、供試体を1質点系でモデル化し、輪切り状ひび割れの発生メカニズムについて検討する。

#### 4.1 入力速度の線形近似

図-7に示す加速度データは、高周波成分を多く含んでいるため、どの時間領域の加速度が供試体の応答に大きな影響を及ぼすかを特定するのは困難である。そこで、試みに図-8の速度データを線形近似したうえで、その勾配から加速度を算出して入力加速度を作成した。図-11および図-12に線形近似化した速度データと平均化した加速度データを示す。速度データは、12の顕著なピークを選び線形近似した。また、線形近似した速度データの勾配より加速度を算出した。したがって、加速度は13個に平均化された正負のデータとなる。

#### 4.2 解析結果と考察

まず、加速度区間1のみを入力した場合のひずみ～時間関係を実験と比較して図-13に示す。ここで実験値は柱中央部のひずみ(No.5)とした。この区間の加速度は、全区間中で最大値を示しており、ひずみの応答も最大2,500 $\mu$ と実験値に比べ約2.5倍もの大きさとなっている。これは、見かけの外力(慣性力)が加速度の関数となっているので、解析モデルに入力される力積が非常に大きくなったためであり、力積が作用した後は大きな自由振動をしている。

以降、各区間でひずみ応答を求め、それぞれを時間軸方向に重ね合わせて近似的な解析を行った。図-14は、加速度区間1～8を重ね合わせたもので、区間8までのひずみ～時間関係をよくシミュレートしている。さらに、区間9の

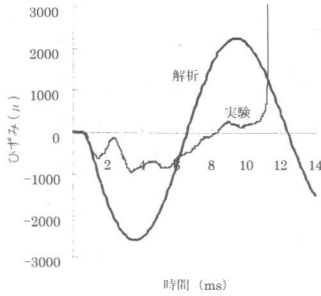


図-13 区間1の解析結果

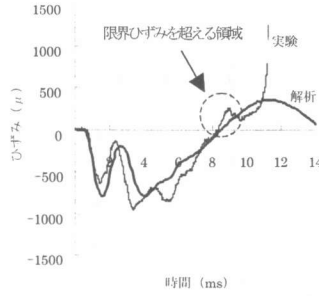


図-14 区間1~8の解析結果

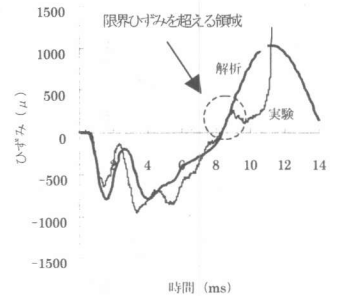


図-15 区間1~9の解析結果

解析結果を重ね合わせると図-15 のようになり、実験で時刻約 9ms において観察される限界引張ひずみを超えるピークとほぼ一致していることがわかる。すなわち本実験では、区間1で入力される大きな正の加速度による負の慣性力の作用で柱内のひずみは当初圧縮の値をとり、区間1~8の入力では加速度入力後の自由振動により圧縮ひずみが引張へと移行する挙動を示す。その次の区間9では、負の加速度が入力されるため、引張慣性力がさらに作用して柱は損傷を受けたものと思われる。ちなみに、近似した加速度の全区間を入力すると、図-16 によりなり、図-9の10質点系モデルの結果とほぼ等しい結果となっている。これは、本近似手法の妥当性を示しており、加速度データに高周波成分を多く含む場合に有効と思われる。

## 5. 結言

本研究の成果をまとめると、次のようになる。

- (1) 大型の衝撃突き上げ実験により、RC橋脚モデルの輪切り状ひび割れを再現できた。
- (2) ばね-質点系モデルにより衝撃突き上げ実験のシミュレーションを行った。その結果、ひずみの時刻歴および柱内のひずみ分布をよくシミュレートできた。
- (3) 入力速度を線形近似したうえで、平均加速度を求め、1質点系モデルによる実験のシミュレーションを行った。その結果、本近似手法で実験をよくシミュレートできた。またひび割れ発生の原因は、ひずみが圧縮から引張へ

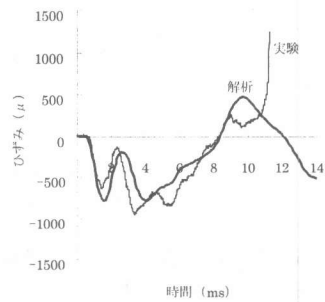


図-16 全区間の解析結果

と移行する時間帯に、さらに負の加速度が作用して引張慣性力が誘起されたことが原因であることがわかった。

## 参考文献

- 1) 大野友則, 喜多龍一郎, 藤掛一典: 軸方向に衝撃力を受ける RC 円柱試験体の圧縮破壊メカニズムに関する実験的研究, 土木学会論文集, No.584/I-42, pp.229-242, 1998年1月。
- 2) 園田恵一郎, 高田直俊, 石丸和宏, 林道廣, 奥田洋一: 水中線爆装置による高架橋RC橋脚モデルの衝撃破壊実験, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.251-256, 1998年6月。
- 3) 原田耕司, 石川信隆, 香月智, 太田俊昭: 衝撃的上下動による大型RC橋脚モデルの水平輪切り状ひび割れに関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1237-1242, 1999年7月。
- 4) 畑野正: 衝撃引張荷重によるコンクリートの挙動, 土木学会論文集, 第73号, pp.28-34, 1961年3月。