

## (20) 兵庫県南部地震におけるRC橋脚の衝撃破壊に関する一考察

## DAMAGE IN RC BRIDGE PIERS DUE TO IMPULSIVE EARTHQUAKE MOTION

喜多龍一郎<sup>\*</sup>, 藤掛一典<sup>\*\*</sup>, 大野友則<sup>\*\*\*</sup>, 上田真稔<sup>\*\*\*\*</sup>, 上林厚志<sup>\*\*\*\*\*</sup>

Ryuichiro KITA, Kazunori FUJIKAKE, Tomonori OHNO, Masatoshi UEDA and Atsushi KAMBAYASHI

<sup>\*</sup>防衛大学校理工学研究科学生 土木工学科(〒239 横須賀市走水1-10-20)<sup>\*\*</sup>工修 防衛大学校助手 土木工学科(〒239 横須賀市走水1-10-20)<sup>\*\*\*</sup>工博 防衛大学校教授 土木工学科(〒239 横須賀市走水1-10-20)<sup>\*\*\*\*</sup>工修 竹中工務店技術研究所 主席研究員(〒270-13 千葉県印旛郡印西町大塚1-5)<sup>\*\*\*\*\*</sup>工修 竹中工務店技術研究所 研究員(〒270-13 千葉県印旛郡印西町大塚1-5)

キーワード: 衝撃地震動, 衝撃実験, RC橋脚

(impulsive earthquake motion, impact test, RC bridge pier)

## 1. はじめに

兵庫県南部地震では、数多くの土木・建築構造物が破壊した。地震発生以後、多くの技術者や研究者によって構造物の被害、地震発生メカニズム等に関する調査・研究が行われているが、構造物の破壊・損傷現象に対する見解が大きく分かれている。特に今回の地震では写真1～5に示すようなRC橋脚などに軸直交断面の全周ひびわれや橋脚天端・下端部の圧縮破壊、あるいは斜めせん断破壊、RC製煙突の頂部破断、鋼製橋脚の局部座屈や脆性破断など軸力が卓越した破断など過去の被害状況とまったく異なる形式のものがある。多くの被災者による共通的な経験である「ゴーという地鳴りとともに突き上げられるような大きな衝撃がドカンという大音響とともにゴンゴンと2～3回襲ってきた。畳が浮き上がった。トラックが飛び込んできたような衝撃だった。床に叩きつけられた。その後横揺れを感じた。」といった証言から、強い横揺れの地震動の前に衝撃的な地震動が存在した可能性があり、これが衝撃破壊をもたらしたと指摘する技術者・研究者も少なくない。<sup>1)~2)</sup>しかし、得られた強震記録には衝撃的な地震動を裏付ける記録は残されていない。一般に衝撃力の作用時間は数十 msec のオーダーであり、このような現象は現在使用されている地震計の特性を考えると計測できないと指摘している。<sup>2),4)</sup>

「構造物は、衝撃的な地震動によって破壊したに違いない。」と推定することはできる。しかしこれは、推定であって何らかの方法で確認または実証することが必要である。実際、数値解析により衝撃地震動の可能性について検討されているが<sup>1),3),5)</sup>、数値解析による方法では入力値の設定が問題となるから、やはり実験的手法によるのが最善であろう。

そこで、本研究では、RC橋脚に生じた全周ひびわれ、橋脚の天端における圧縮破壊などに着目し、このような被害が発生するのに必要な地震動入力の特徴を把握することを目的としている。実験では、RC橋脚をイメージしたRC柱模型を作成し、柱部分の長さ、軸方向鉄筋の有無および柱基部と頂部の重量の相違をパラメーターとしている。すなわち、どのような入力があればRC柱部材に全周ひびわれのような被害が生じるか、を特定するものである。

## 2. 軸方向衝撃載荷実験の概要

## 2.1 試験体の諸元と実験パラメータ

実験に用いた試験体の形状・寸法・諸元を図-1に示す。試験体は10×10cmの正方形断面を有する柱部に相当する

部分と15×30×10cmのフーチングおよび橋脚上部のT型はり部分に相当する矩形部分からできている。実験のパラメータは、柱部分の長さの相違(30cmと50cm)、鉄筋の有無、鉄筋量の大小および上部重量の相違である。同一諸元の試験体に3種類の速度で衝突させ、損傷の程度の相違を調べるために、3×8=24体の試験体を作製した。実験のケースは表-1に示す24ケースである。

## 2.2 載荷装置および試験体の設置

実際の橋脚軸方向に作用する外力は鉛直方向であるが、装置の制約から試験体を横に設置して水平方向から軸方向衝撃力を作用させるようにした。また、橋脚上部の重量による軸応力や重力の影響は、本実験では考慮しないことにした。横に設置した試験体重量および付加する重錘の重力を取り除くために、装置上部に取り付けた鋼製フレームに8本の鋼棒を介して吊り下げた(図-2参照)。吊り鋼棒はローラーベアリングを有する摩擦の小さい支持部に固定し、試験体の変位に対応してスムーズに移動できる機構とした。試験体の下部(衝突部で、橋脚のフーチング部に相当する)および上部(橋脚上部に相当)は、鋼製の重錘にそれぞれボルト8本で固定した。さらに、衝撃力の作用が軸方向に対して偏心載荷とならないように、吊り用鋼棒の中間に配置したターンバックルで軸心と水平を保つように調整をして実験を行った。

衝撃力を作用させるために用いた装置は、水平衝撃荷重載荷装置である。本装置は、直径10cm、長さ1.5mの8本のゴム棒を伸長して、その弾性エネルギーを利用して重量100kgfの衝突体を加速させるものである。衝突体は、上下左右4本のガイドレールに添って走行し試験体に衝突する。ゴムの伸長量により、任意の衝突速度を設定することができる。本実験では、衝突速度が1.5~8m/sであり、このときゴムの伸長量は30~60cmである。衝突体の衝突部は直径10cm、長さ30cmの特殊鋼でできており、衝突による変形はほとんど無い。衝突部の先端の形状は、試験体に取り付けた鋼製重錘面に対し偏当りを防ぐために半球状とした。

## 2.3 計測

実験における計測項目は、衝突体の加速度、速度、衝突体の先端のひずみ、試験体の上下部の変位および試験体柱部のコンクリートひずみ、鉄筋ひずみである。計測位置および種類を図-3に示す。衝突体の衝突速度の測定は、ガイドレールに間隔25cmで設置された2組のレーザー光線を衝突体の前輪が横切る時間を計測して速度を

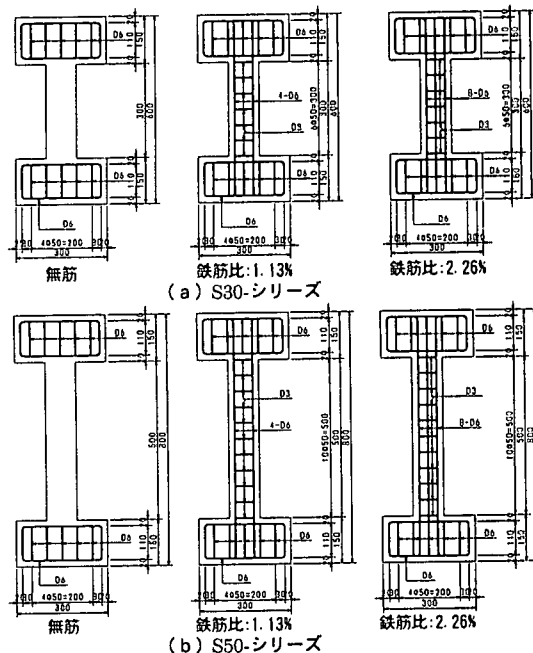


図-1 試験体の形状・寸法および諸元

表-1 実験パラメータ

No.	試験体名	試験体長さ(cm)	下部治具質量(kgf)	上部治具質量(kgf)	配筋(N)
1	S30-0-100-5	30	100	100	0
2	S30-0-100-10				
3	S30-0-100-15				
4	S30-0-200-5				
5	S30-0-200-10				
6	S30-0-200-15	50	100	200	0
7	S50-0-100-5				
8	S50-0-100-10				
9	S50-0-100-15				
10	S50-0-200-5				
11	S50-0-200-10	30	100	200	1.13
12	S50-0-200-15				
13	S30-113-5				
14	S30-113-10				
15	S30-113-15				
16	S30-226-5	50	200	2.26	1.13
17	S30-226-10				
18	S30-226-15				
19	S50-113-5				
20	S50-113-10				
21	S50-113-15	50	200	2.26	2.26
22	S50-226-5				
23	S50-226-10				
24	S50-226-15				

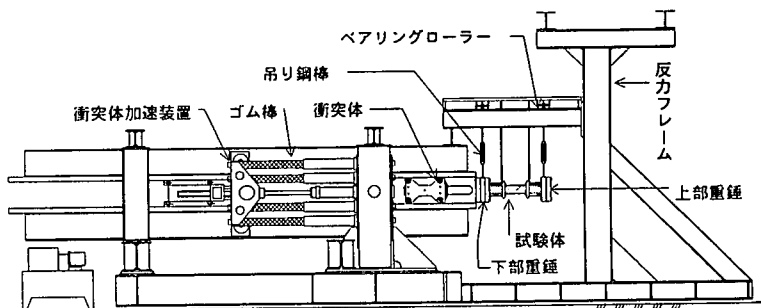


図-2 載荷装置および試験体の設置の概要

検出する光電式速度検出器を用いた。衝突体のひずみは、衝突体と試験体の接触時間(衝撃力作用時間)を計測する目的で測定した。試験体の変位は、渦電流式非接触変位計(応答周波数 50kHz, 分解能 5/1000mm, 計測範囲 60mm)を用いて計測した。試験体の変位速度は、変位時刻歴において変位が発生する時刻での接線勾配とした。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 損傷状況の比較

図-4 および図-5 に、それぞれの柱部の長さが 30cm (鉄筋比 1.13%, 2.26%) と 50cm (鉄筋比 13%, 2.26%) の試験

体の損傷状況を示す。無筋の試験体(S30-0, S50-0 シリーズ)に生じた損傷は、一部を除き柱部の基部および頂部のひびわれ・破断であった。柱部の長さが 30cm の試験体で、衝突速度 4.8m/s の場合には、柱中間部の引張と圧縮の複合した損傷が生じ、無筋のため結果的に破断している。柱部の長さが 50cm の試験体で、衝突速度 3~4m の範囲の場合は柱部中央部付近に破断が生じた。無筋の場合は、いずれも柱基部と頂部あるいは中央部のいずれかに引張ひびわれが生じると破断を生じ、柱部全体にわたって複数のひびわれが生じた試験体は無かった。鉄筋を有する試験体で軸方向鉄筋比の相違を調べると、柱の長さが 30cm で鉄筋比が 1.13% の場合は、圧縮による斜めせん断破壊(S30-113-5, S30-113-15)あるいは頂部付近での圧縮破壊と基部の引張ひびわれ(S30-113-10)であるのに対し、2.26% の試験体では、柱部に引張ひびわれ(S30-226-15, S30-226-10)が生じる場合と、圧縮による軽微な斜めせん断破壊(S30-226-15)が生じた。軸方向鉄筋比が小さいと圧縮破壊モードが発生しやすいと考えられる。柱部の長さが 50cm の場合、衝突速度が 5~6.4m/s に対しては鉄筋比の大小によらず柱部に 4~5 本の引張ひびわれが生じた。ひびわれの数は速度の増加によって増えることが分かる。衝突速度が 7.7m/s を超えると鉄筋比が 1.13% の場合は柱頂部に圧縮破壊と中央部に引張ひびわれ、2.26% の場合は、中央周辺に圧縮と引張の複合破壊が生じた。

#### 3.2 衝撃力作用時間と損傷発生時刻

衝撃力作用時間は、衝突体が試験体に衝突して離反するまでの時間とみなし、衝突体先端のひずみが衝突によって発

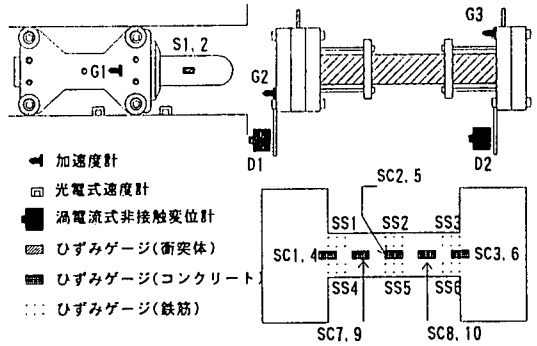


図-3 計測位置および種類

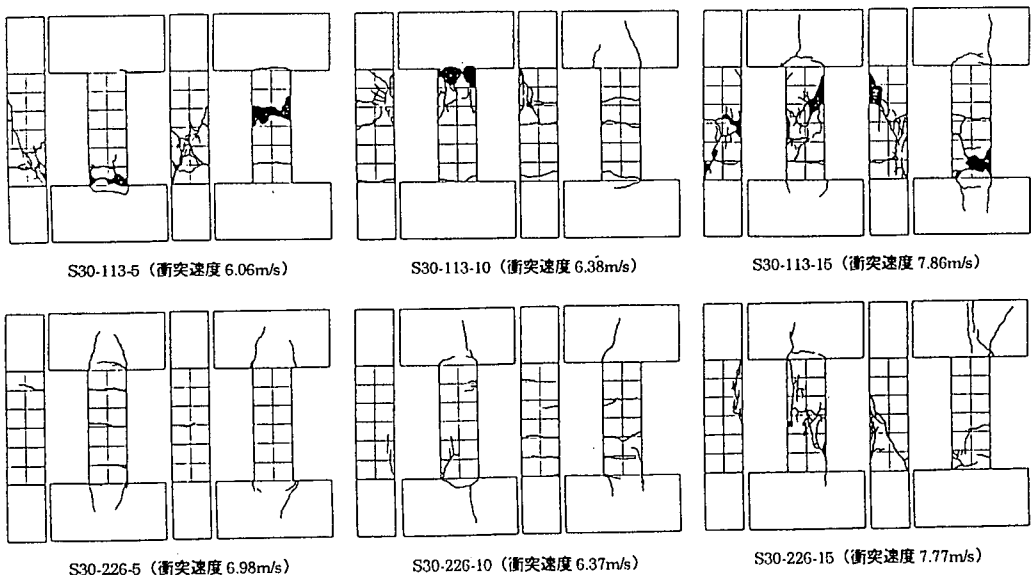


図-4 S30-シリーズ試験体の損傷状況

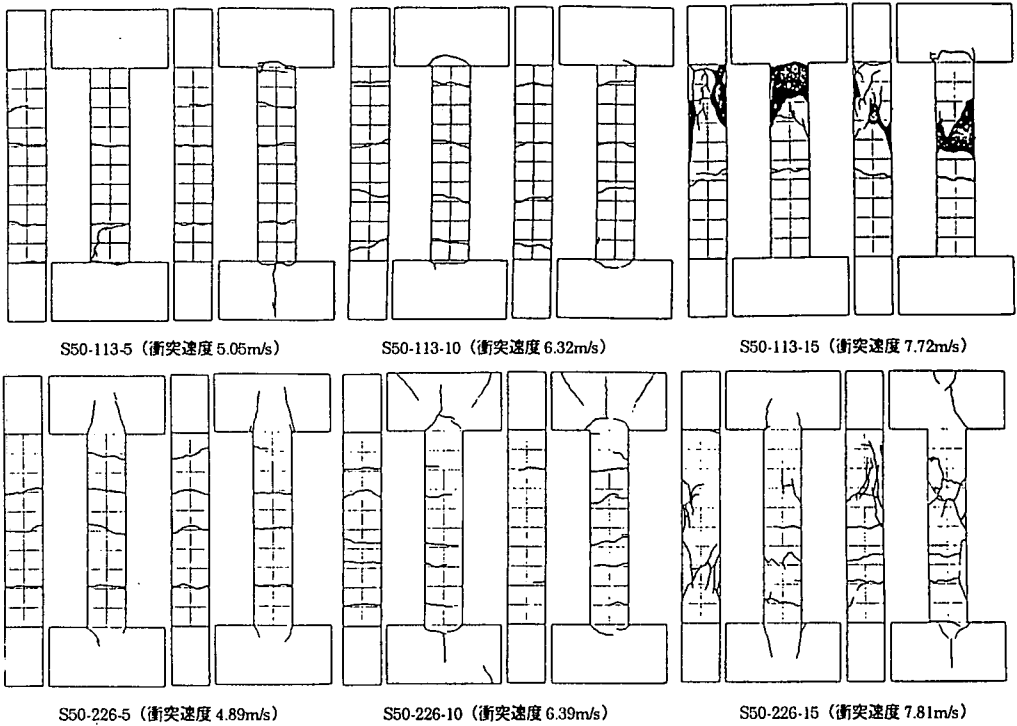


図-5 S50-シリーズ試験体の損傷状況

生し最大値に達した後0になるまでの時間とした。全試験ケースに対する衝撃作用時間を表-2に示す。引張りひわれや圧縮破壊の目安として、コンクリートの終局引張りひずみ  $200 \mu$ 、圧縮限界ひずみ  $2000 \mu$ の値を用いれば、試験体に貼付したひずみゲージの値から損傷の発生時刻を推定することができる。しかしながら、ひびわれや圧壊が生ずる場所とゲージの位置が異なる場合には、その推定が困難である。したがって、厳密に損傷発生時刻を推定することは非常に困難である。ここでは、損傷がゲージ貼付位置に発生した例について損傷発生時刻を調べてみる。

図-6に、S30-0-100-10試験体(無筋、柱部30cm、衝突速度2.07m/s)の変位およびコンクリートひずみの時刻歴を示す。図中、太い実線が柱下部に貼付したひずみの出力である。衝突直後は圧縮で、引張に転じた後ゲージが断線している。  $200 \mu$ を超える引張りひずみの発生時刻は約0.0012s(1.2ms)である。この時

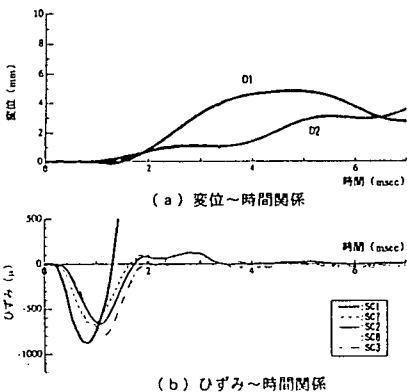


図-6 変位およびコンクリートひずみの時刻歴  
(S30-0-100-10: 無筋、柱部長さ30cm、衝突速度2.07m/s)

表-2 実験結果一覧

試験体名	衝突速度	衝撃作用時間	柱下部の変位		柱上部の変位		破壊の状況		
	(n/sec)	(msec)	速度 (n/sec)	速度 (n/sec)	柱下部	柱中間	柱上部		
S30-0-100-5	4.34	1.100	0.86	-	×				
S30-0-100-10	2.07	1.270	0.85	0.42	×			△	
S30-0-100-15	1.55	1.270	0.25	0.24	△			×	
S30-0-200-5	3.63	0.945	0.98	0.35	×				×
S30-0-200-10	4.80	1.060	1.01	0.43		×	▲		
S30-0-200-15	4.35	1.115	1.87	0.38	△				×
S50-0-100-5	1.76	1.485	0.36	0.31					×
S50-0-100-10	3.66	1.120	1.08	0.25	×	×			
S50-0-100-15	3.56	0.995	1.07	0.25			×		×
S50-0-200-5	1.55	1.225	0.18	0.20	×				△
S50-0-200-10	3.33	1.130	0.50	0.22	×	×			
S50-0-200-15	4.94	0.995	1.33	0.29	×				×
S30-113-5	6.68	0.965	2.80	0.25				▲	
S30-113-10	6.38	0.935	2.33	0.13	△	△		△	▲
S30-113-15	7.86	1.010	2.00	0.20	▲	▲			
S30-226-5	6.98	0.895	1.43	0.31				△	
S30-226-10	6.37	0.970	1.75	0.25				△	
S30-226-15	7.77	1.165	2.13	0.25				▲	
S50-113-5	5.05	1.050	2.75	0.13				△	
S50-113-10	6.32	1.160	1.06	0.20				△	
S50-113-15	7.72	0.905	0.59	0.31				△	▲
S50-226-5	4.89	0.850	1.33	0.29				△	
S50-226-10	6.39	0.985	2.40	0.25				△	
S50-226-15	7.80	0.855	3.00	0.33				▲	△

△:ひびわれ、▲:圧壊、×:破断

刻は図-6(a)の変位時刻歴で、上部側の変位が下部側の変位より大きくなりその差が最大となる時刻にほぼ対応している。

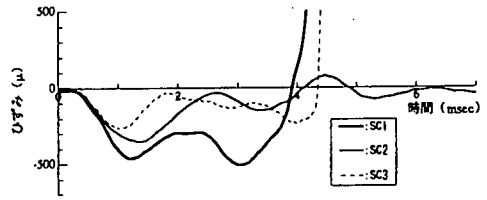
図-7に、S50-0-200-5 試験体(無筋, 柱部 50cm, 衝突速度 1.55m/s)のコンクリートひずみの時刻歴を示す。この場合は、柱部の上下端の2ヶ所に引張破断が生じている。引張りひずみが  $200 \mu$  を超える時刻は下端が 3.9ms、上端が 4.2ms であり、下端部(衝突側)に最初に引張破断が生じていることが分かる。

次に、図-8に S30-113-15 試験体(鉄筋比 1.13%, 柱部 30cm, 衝突速度 7.86m/s)の変位およびコンクリートひずみの時刻歴を示す。この場合は、圧縮による斜めせん断破壊が生じた。圧縮ひずみが最大となる時刻が柱下部、中間部、上部で差が生じているのが分かる。圧縮限界ひずみの  $2000 \mu$  を越える時刻は、どの位置でもほぼ同時で約 0.75ms である。

図-9は、S50-226-5 試験体(鉄筋比 2.26%, 柱部 50cm, 衝突速度 4.89m/s)のひずみ時刻歴である。この場合、柱全体にわたって4本の引張りひびわれが生じた。柱部中央のひずみ(S2)を見ると、引張りひずみを越える時刻は約 2.3ms であることが分かる。以上のように、引張りひびわれあるいは圧縮破壊が生じる時刻は、柱の長さや鉄筋の有無等によって異なるが、概ね衝突後数 msec の時刻であることが分かる。

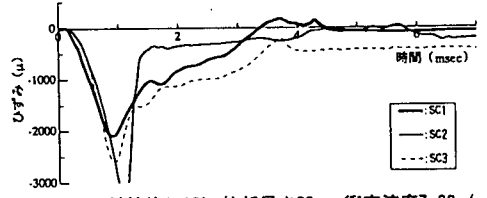
#### 4. 実被害例との比較による破壊現象の説明

写真1~5に、兵庫県南部地震におけるRC橋脚の被害例を示す。これらの破壊について、多くの専門家は水平動による曲げあるいはせん断力による破壊と説明している。一方、同じ被害に対して、鉛直方向の衝撃的入力による破壊ではないかという見解を持つ専門家も少なくない。園田らは、得られた地震動加速度記録を入力として用いた弾塑性応答解析の結果に基づいて、上記の破壊現象を説明できる結果は得られず、破壊現象を十分に説明するには数10~数100kNの入力を極めて短時間に入力させる必要があることを指摘している。<sup>1),6)</sup>本研究は、同様



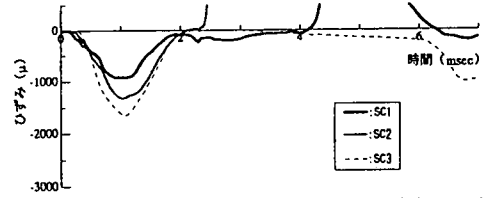
(S50-0-200-5: 無筋, 柱部長さ50cm, 衝突速度1.55m/s)

図-7 コンクリートひずみの時刻歴



(S30-113-15: 鉄筋比1.13%, 柱部長さ30cm, 衝突速度7.86m/s)

図-8 コンクリートひずみの時刻歴



(S50-226-5: 鉄筋比2.26%, 柱部長さ50cm, 衝突速度4.89m/s)

図-9 コンクリートひずみの時刻歴



写真-1

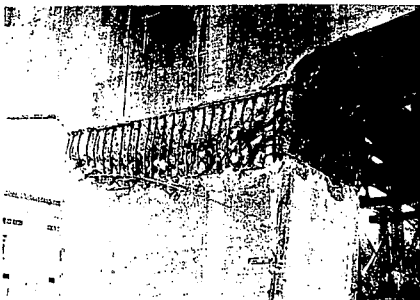


写真-2



写真-3



写真-4



写真-5

に衝撃的な入力による破壊との観点から、これを実験的に検証することを試みたものである。実験の結果、柱全体にわたる無数の軸引張によるひび割れ、引張圧縮複合破壊、柱下部あるいは上部付近の圧壊など実際の破壊現象と類似した破壊モードをシミュレーションすることができた。今回用いた試験体の柱部の断面積は、 $10 \times 10 \text{cm}$  ( $100 \text{cm}^2$ ) であり、これが1軸圧縮により斜めせん断破壊するためには、静的にも30ton以上の力が必要である。衝撃力の作用によって瞬間的に極めて大きな破壊力が生じたことを示している。実験では、100kgの重錘を約7m/sで衝突させたとき、試験体の初期変位速度は約200㎧で、圧縮破壊を生じている。同じ諸元の試験体に対して、約6.4m/sで衝突させたときは試験体の初期変位速度が約105㎧で、柱上部の圧壊と柱下部の引張ひびわれが生じた。すなわち、上述の数10～数100㎧の入力を極めて短時間に入力させれば、実構造物に生じた破壊現象を説明できるという解析結果と対応している。

## 5. 結論

本実験は、衝撃的な入力による引張あるいは圧縮破壊現象の出現の可能性の検討や入力の特定に関する基礎的データの収集を目的として行ったものである。実際のRC橋脚を縮尺したモデル試験体ではないが、実被害例に極めて類似した破壊モードを得ることができた。その結果、軸方向衝撃入力により引張ひびわれまたは圧縮による局部的圧壊や斜めせん断破壊が生じる可能性があることが判明した。入力の特定、破壊のメカニズムなどについては得られたデータを更に詳細に検討することにより明らかにすることができると考える。

## 参考文献

- 1) 園田恵一郎・小林治俊：兵庫県南部地震における土木構造物の地震衝撃破壊について、土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会資料，1995.4
- 2) 泉博允：衝撃的地震動についての考察，土木学会第50回年次学術講演概観，1-B，pp.1118-1119，1995.9
- 3) 小野紘一：衝撃的突き上げのRC橋脚への影響，土木学会誌，Vol.80，pp.37-38，1995.11
- 4) 藤掛・大野・井元・上田：直下型地震でRC橋脚に生じた衝撃引張破壊のメカニズムに関する一考察，土木学会第50回年次学術講演概要集，1-B，pp.950-951，1995.9
- 5) 佐藤誠・田沢栄一・川上直也：鉄筋コンクリート煙突の崩壊メカニズムと地震力につて，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.347-354，1996.1
- 6) K.Sonoda and H.kobayashi：On The Impulsive Failure of Bridge Piers by Hanshin-Awaji Earthquake (Kobe,1995), Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Load on Structures, 1996.1
- 7) 高田直俊：「突き上げるような上下動」はどこへ行った，土と基礎，44-3(458)，pp.13-15，1996.3