

## R C橋脚の地震時輪切り状ひびわれ発生 に関する実験的考察

防衛大学校 別府万寿博\*  
同上 香月 智\*\*  
同上 石川信隆\*\*  
山口大学 宮本文穂\*\*\*

本研究は、阪神・淡路大震災で発生したR C橋脚の水平輪切り状ひびわれに注目し、この損傷が衝撃的上下動によるものと考えて実験的に再現しようと試みたものである。まず新たに衝撃突き上げ装置を開発し、既存の高速変形負荷装置と併用することにより衝撃的上下動を現出した。供試体は、ボルトで補強したコンクリート円柱でR C橋脚柱部を模擬し、鋼製の重錘を上載して高架橋上部工を表した。また、衝撃的上下動載荷時に発生する水平輪切り状ひびわれ現象を高速ビデオで撮影して観察した。さらに相似則を適用し、水平輪切り状ひびわれが発生したR C橋脚に入力したと考えられる限界速度について考察した。

### 1. 緒言

1995年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震は直下型地震とよばれ土木、建築構造物に大きな被害をもたらした。地震後に発表された地震記録よりこの地震による上下動は、水平動の約1/2程度の大きさであり、卓越周期は上下、水平動ともに1秒前後であることがわかった。すなわち、上下動と水平動の振動特性に大きな違いは認められず、記録波形を用いた地震応答解析結果からも地震による上下動が構造物の損傷、破壊に与えた影響は小さいと考えられることにより、水平動が構造物の損傷、破壊を支配したとの認識が強い。

しかしその被災例には、例えば写真-1にみられるような鉄筋コンクリート(R C)橋脚の水平輪切り状ひびわれをはじめ、煙突の引張破断など一般に考えられる曲げやせん断による破壊とは異なった説明しづらい事例がある<sup>1)</sup>ことも事実である。このような損傷の原因の一つとして衝撃的上下動が考えられ、震源で発生した応力波が構造物に入射しその内部で反射、干渉したことや縦振動による軸方向力の発生がそのような損傷、破壊を引き起こしたことが考えられる。また、最初に「ドンと突き上げるような揺れ」を感じたという証言なども衝撃的上下動の存在を裏付けていると思われる。さらに、一般に使われている地震計が感知

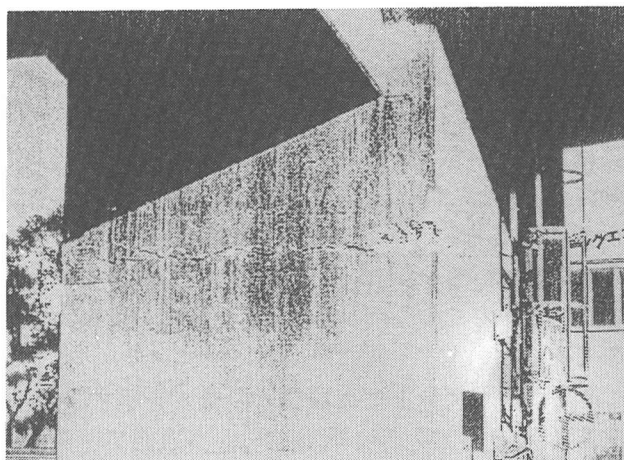


写真-1 R C橋脚の水平輪切り状ひびわれの例

できる周波数領域は30~40Hz以下であることから、衝撃的な上下動は記録できていない可能性も指摘されている。

以上の背景のなか、解析を主とした研究が進められているが<sup>2)</sup>、数値解析においては入力値の設定などが極めて重要であり、衝撃的地震動と思われる記録がないため今後の検討事項も多い。また、解析的研究とともに実験的研究も待たれている状況であるが、衝撃的上下動の発生メカニズムが未解明であり、またその大きさも不明なため、衝撃的上下動の実験的再現などが困難な状況にある。

そこで本研究は、特にR C橋脚の水平輪切り状ひびわれ破壊に注目し、模型実験的に水平輪切り状ひびわれ

キーワード：衝撃的上下動、水平輪切り状ひびわれ、  
衝撃突き上げ装置

\* 防衛大学校理工学研究所, 0468-41-3810

\*\* 防衛大学校土木工学科, 0468-41-3810

\*\*\* 山口大学工学部知能情報システム工学科, 0836-35-9951

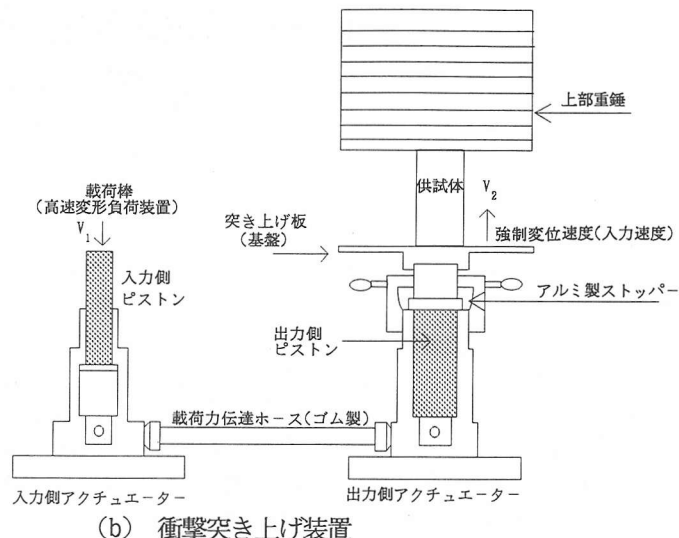
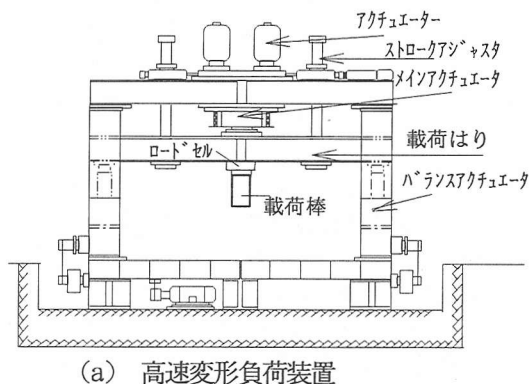


図-1 実験装置の概要

れを再現して、その入力速度を推定しようと試みたものである。

## 2 実験の概要

### (1) 突き上げ装置の開発および性能

現在、地震による上下動を模擬する実験装置は国内外には見当たらない。そこで、図-1(b)の衝撃突き上げ実験装置を新たに開発し、図-1(a)の高速変形負荷装置と併用することにより衝撃的上下動を表現しようと試みた。すなわち、高速変形負荷装置の鉛直下方向への載荷力を「てこの原理」的に鉛直上方向へ変換するものである。

写真-2に衝撃突き上げ実験装置の概要を示す。装置は大きく入力側アクチュエーターと出力側アクチュエーターで構成されており、各アクチュエーターはゴム製の油圧伝達ホース(以下、伝達ホース)で結合されている。高速変形負荷装置からの荷重を入力側アクチュエーターのピストンで受け、伝達ホースを介して出力側アクチュエーターに伝えるシステムになっている。出力側アクチュエーターに伝達された油圧は、出力側ピストン先端に取り付けてある試験体取り付け板(以下、基盤)を突き上げ、出力側ピストンに内蔵されているアルミ製ストッパーにより停止する。したがって、基盤上の供試体は強制変位をうけた後、急停止することになる。

以上の突き上げシステムから、基盤の強制変位速度(以下、入力速度)は高速変形負荷装置の載荷速度を制御することにより決定される。ここで、入力側と出力側のピストン断面積比が約1:2.9であることから高速変形負荷装置の載荷速度を $V_1$ とし基盤速度を $V_2$ とすると、 $V_2$ は $V_1$ の1/2.9倍、すなわち $V_2 = 0.35 V_1$ と概算される。

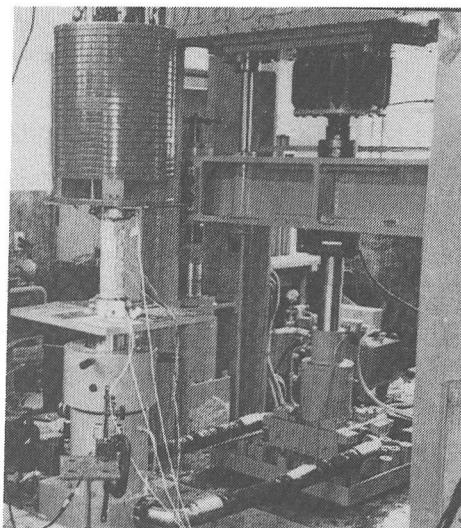


写真-2 実験装置の概要

また、基盤の強制変位量は出力側アクチュエーターの変位調整用絞りで調節可能で、0.5cm刻みで最大5.0cmまで強制変位を与えることができる。

### (2) 供試体

供試体柱部分の概要を図-2に示す。実際のRC橋脚を柱高10m、直径3mの円柱型と想定して円柱コンクリート供試体を作成し、その縮尺を1/30、1/50の2通りとした。基盤および上部の重錘と供試体との固定条件の制約から、供試体の補強鋼材としてM10ボルトを用いたが、鉄筋補強されたコンクリートとしての特性は失っていないと思われる。

すなわち、各縮尺モデルに対して次の配筋を施した。縮尺1/30モデルについては(a)供試体の上下部のみにボルトを埋め込んだもの(以下、上下ボルト)、(b)供試体内に連続してボルトを通してあるもの(以下、通しボルト)、(c)RC橋脚の段落しを意識したもので、通しボルトタイプで供試体軸方向高さ半分までD6の

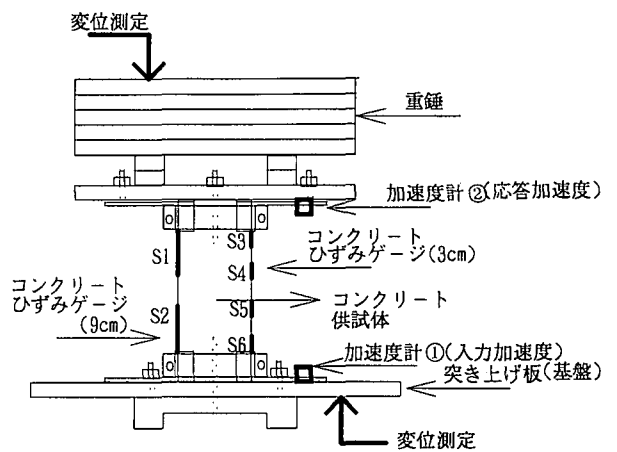
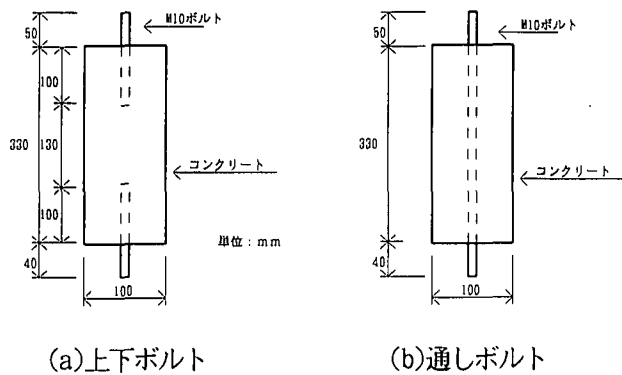


図-3 測定項目

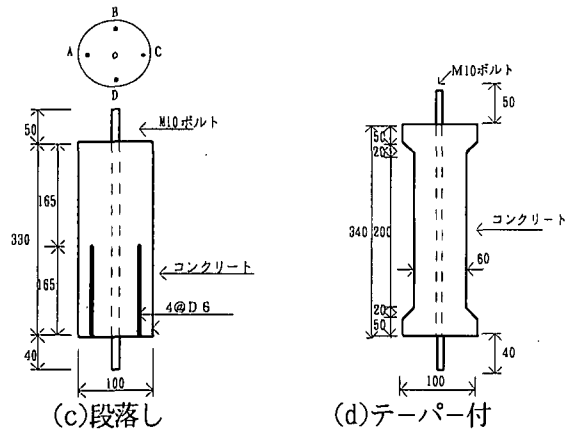


図-2 供試体の概要

異形棒鋼を挿入し供試体軸方向に剛性変化点を設けたもの(以下、段落し), 以上の3タイプを作成した. また(d)縮尺1/50モデルについては, 通しボルトタイプを作成し柱部からテーパをつけて固定部を設けた(以下、テーパ付).

高架橋上部工は, 重量20kgfの鋼製円盤を積載することで表現し(以下、重錘), 重錘は供試体の縮尺に関わらず500kgfとした. したがって, 縮尺1/30モデル(断面積: 78.5cm<sup>2</sup>)には初期圧縮応力として約6.4kgf/cm<sup>2</sup>を, 縮尺1/50モデル(断面積: 28.3cm<sup>2</sup>)には固定部以外の柱部に約17.7kgf/cm<sup>2</sup>が作用していることになる.

### (3)測定項目

図-3に測定項目の概要を示す. 基板と重錘の加速度を加速度計で, 基板と重錘の変位量をレーザー式変位計により測定した. コンクリート供試体のひずみについては, 供試体軸方向に片面は9cmゲージを2枚, 他面は3cmゲージを4枚, すなわち計6カ所測定した. また, 供試体内の鋼材(ボルト, 鉄筋)についても鋼材用ゲージで測定した. 図-4に各供試体タイプの鋼材のひずみ測定位置を示す. また, 実験は極めて短時間で現象が終わってしまうので高速ビデオによる撮影も実施した.

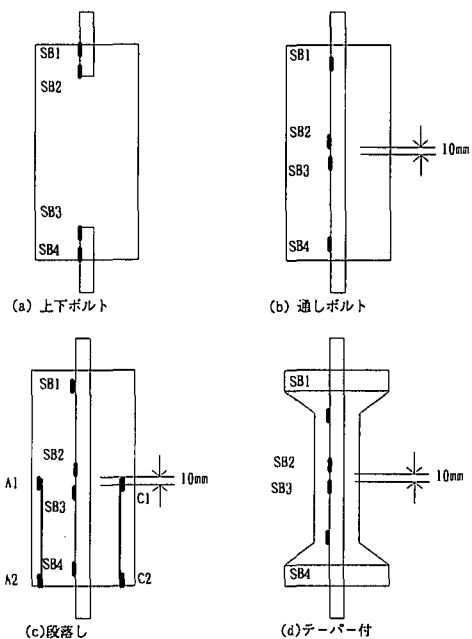


図-4 鋼材ひずみ測定位置

### (4)実験ケース

図-2に示す4つの供試体タイプに対して, 突き上げ速度(以下, 入力速度)を低速(0.35m/s), 中速(0.69m/s), 高速(0.38m/s)の3種類に変化させて実験を行った. また, 基盤の強制変位量は, 0.5cmと一定とした. 各実験ケースにつき2回, すなわち計24体の供試体に対して実験を行った.

## 3 実験結果および考察

### (1)時刻歴応答

図-5~図-10に実験ケース '30CU-H-2(段落しタイプ 高速, 2体目)' の実験結果を示す. 入力加速度(加速度計①), 応答加速度(加速度計②), コンクリートのひずみおよび鋼材のひずみについて考察する. また, 高速ビデオの映像からその破壊進展過程を確認する.

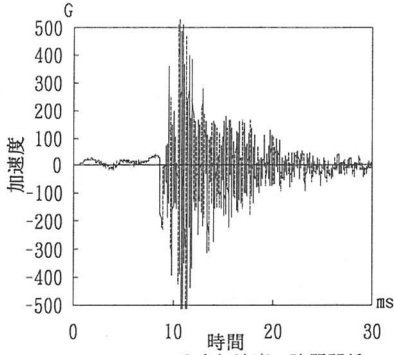


図-5 入力加速度～時間関係

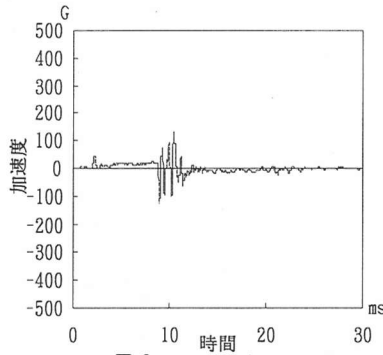


図-6 応答加速度～時間関係

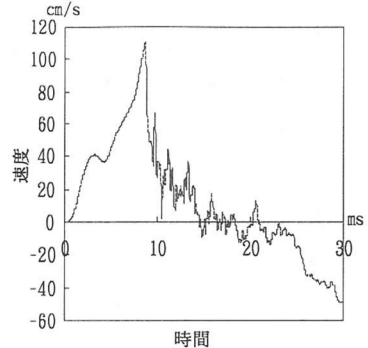


図-7 入力速度～時間関係

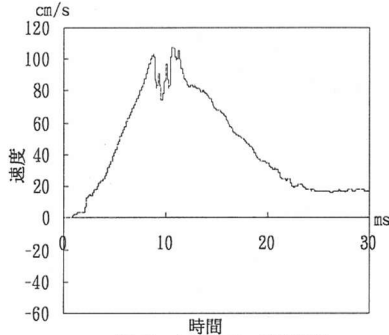


図-8 応答速度～時間関係

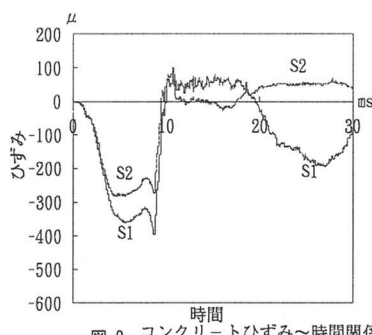


図-9 コンクリートひずみ～時間関係 (S1, S2)

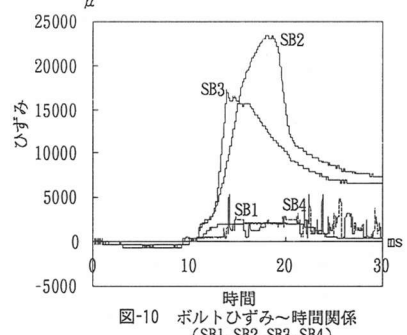


図-10 ボルトひずみ～時間関係 (SB1, SB2, SB3, SB4)

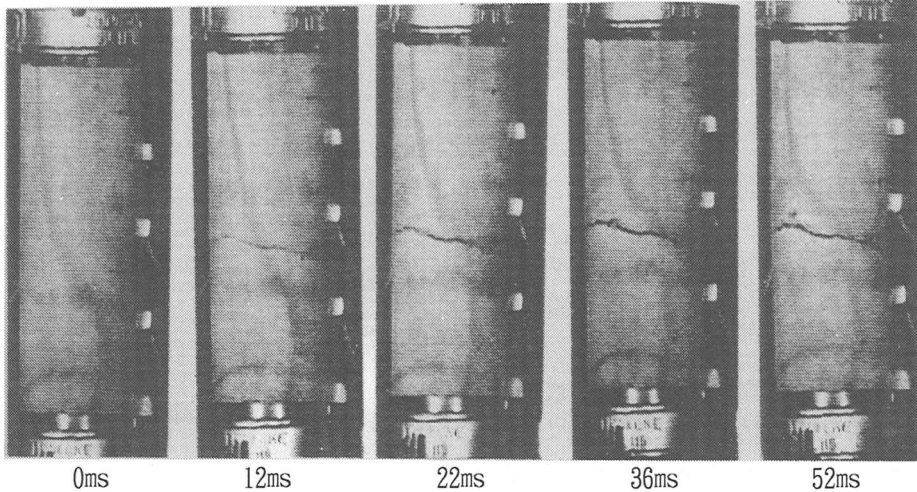


写真-3 段落タイプ30CU-H-2の破壊進展過程

図-5に入力加速度～時間関係を示す。これより加速度は、突き上げ開始から約7msまでは最大加速度約30Gで山なりの曲線を描き、それ以降は高周波成分を伴う波形となっていることがわかる。これは、約7msまで基盤が上昇した後に急停止し、その後は基盤の剛性により振動していることを意味していると思われる。図-6の応答加速度～時間関係より、最大加速度は約40Gであり、入力加速度に比べ基盤停止後の高周波成分の影響が小さいことがわかる。図-7, 8は入力加速度および応答加速度を時間積分した入力速度～時間関係と応答速度～時間関係である。これより、最大入力速度と最大応答速度は約110cm/sでありあまり差がないことがわかる。図-9にはコンクリートひずみ(S1, S2)の時刻歴応答を示す。後述する写真-3からもわかるように約12msで供試体中央部(段落し部)に輪切り状ひびわれ

が生じている。まず図-9より、最大圧縮ひずみは約7msで約400 $\mu$ であり、その後瞬時に引張り側に転じているが、ひずみゲージ(S1, S2)は切断されていないことがわかる。また、鉄筋で補強されている供試体下部は、上部に比べ軸方向の剛性が大きいので、加速領域の圧縮ひずみは下部の方(S2)がやや小さいことがわかる。またひびわれ発生後は、上側コンクリート部のひずみS1は約19msまで引張りひずみを保ちそれ以降圧縮側に転じているが、一方の下側コンクリート部のひずみS2はひびわれ発生後ただちにゼロになり、一度圧縮側に入った後約19msで再度引張り側に転じている。図-10は、ボルトひずみ(SB1, SB2, SB3, SB4)の時刻歴応答である。通しボルトの場合と同様にひびわれ発生後はその中央近傍(SB2)に最大2.4%もの大きな引張りひずみを確認できる。高速ビデオによる破壊進展過

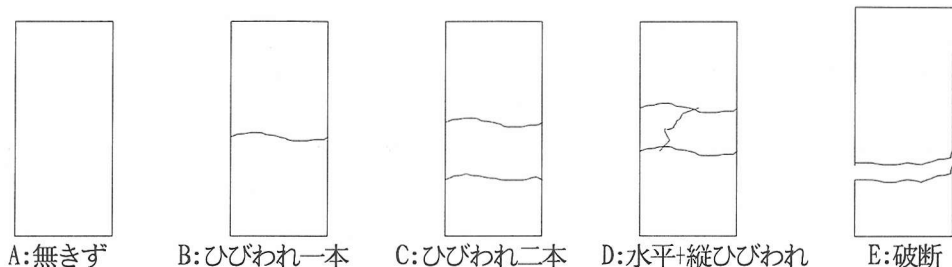
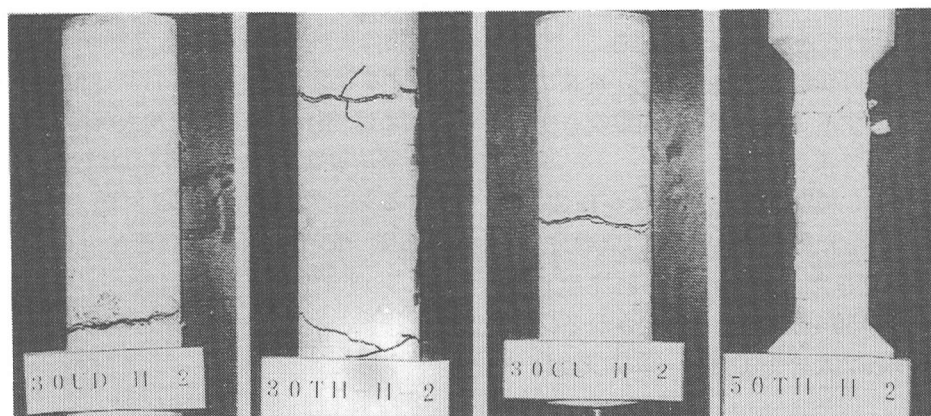


図-11 破壊形態

表-1 破壊形態による分類

入力速度の種類	縮尺 1/30			縮尺 1/50
	上下ボルト	通しボルト	段落し	テーパ付
低速	30UD-L-1:E	30TH-L-1:B	30CU-L-1:A	50TH-L-1:A
	30UD-L-2:A	30TH-L-2:A	30CU-L-2:A	50TH-L-2:C
中速	30UD-M-1:E	30TH-M-1:C	30CU-M-1:B	50TH-M-1:D
	30UD-M-2:E	30TH-M-2:B	30CU-M-2:B	50TH-M-2:D
高速	30UD-H-1:E	30TH-H-1:C	30CU-H-1:B	50TH-H-1:D
	30UD-H-2:E	30TH-H-2:C	30CU-H-2:B	50TH-H-2:D



(a)上下ボルト  
(30UD-H-2)

(b)通しボルト  
(30TH-H-2)

(c)段落し  
(30CU-H-2)

(d)テーパ付  
(50TH-H-2)

写真-4 供試体の破壊例

程を写真-3に示す。これより、輪切り状ひびわれが約12msで発生し、進展している様子がわかる。

## (2) 破壊形態

実験結果より得られたすべての破壊形態の模式図を図-11に、各実験ケースの破壊形態による分類を表-1に示す。また、破壊状況の例を写真-4に示す。実験結果から供試体の破壊形態は、実験後の供試体の観察とひずみデータにより大きく①無傷、②水平輪切り状ひびわれ(以下、水平ひびわれ)一本、③水平ひびわれ二本、④水平ひびわれ+軸方向ひびわれ、⑤破断の5種類に分類された。また、実験結果より約50~60cm/s程度でひびわれが発生する可能性があることがわか

った。

## (3) R C橋脚の水平ひびわれ現象を引き起こす限界入力値の推定

本実験で得られた結果をもとに、阪神・淡路大震災の被災例にみられたR C橋脚の水平輪切り状ひびわれを発生させるのに必要な入力値を模型実験における相似側<sup>3)</sup>を用いて推定する。ここでは、実験ケース30TH-H-2(通しボルト、高速、2体目)について相似則の適用を試みる。この場合、上部工による初期圧縮応力は約6.4kgf/cm<sup>2</sup>であり、主鉄筋比については約1%のR C橋脚となる。

いま衝撃的上下動をうけるR C橋脚の損傷におけ

る支配的要因としては、上部工やRC橋脚の重量、衝撃力を受けたときの橋脚にかかる作用力および慣性力と考えられる。原形と模型においても応力レベルと材料(密度)は変わらないという条件を考慮すると次式が得られる。

$$\frac{A'}{A} = \frac{1}{s}, \frac{V'}{V} = 1, \frac{T'}{T} = s \quad (1)$$

ただし、M'、A'、V'、T'、l'：模型における質量、加速度、速度、時間、長さ、s：スケールファクター。

先の実験結果より(b)通しボルトの場合、低速領域でひびわれ発生もしくは無傷であることから、この程度の入力速度がひびわれを生じる限界と考えられ、平均値より約54cm/sとすると、実際の地震入力速度Vは式(1)より  $V = V' = 54\text{cm/s}$  となり、約54kine以上の速度が短時間作用すればRC橋脚に水平ひびわれが生じる可能性がある。

#### 4 結論

本研究の成果をまとめると次のようになる。

(1)新たに衝撃突き上げ実験装置を開発し、従来の高速変形負荷装置と併用することにより、衝撃突き上げ実験を表現することができた。

(2)円型断面をもつRC橋脚の模型供試体を作成し、衝撃突き上げ実験を行った結果、水平輪切り状ひびわれを再現することができた。また、ひびわれを生じさせる速度の最大値は約50~60cm/sと推定される。

(3)供試体の破壊形態は大きく①無傷、②ひびわれ一

本、③ひびわれ二本、④水平ひびわれ+供試体軸方向ひびわれ⑤破断と5種類に分類されることがわかった。

(4)各実験ケースの破壊進展状況を高速ビデオで撮影することにより確認できた。

(5)実験結果を相似則を用いて実際のRC橋脚への適用を試みた。上部工による初期圧縮応力が約6.4kgf/cm<sup>2</sup>、主鉄筋比約1%のRC橋脚に最大速度約54kine程度の速度の上下動が短時間に作用すると水平ひびわれが発生する可能性があると思われる。

謝辞：本実験を行うにあたり、種々のご助言を頂いた大阪市立大学園田恵一郎教授に対し、心から御礼申し上げます。また、供試体を提供して下さった日本ゼニスパイプ(株)塩見昌紀氏に対し、心から感謝の意を表します。

#### 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衝撃的破壊の事例、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム、pp.115~120、1996年5月。
- 2)例えば、園田恵一郎：阪神大震災における土木構造物の衝撃的破壊について、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム、pp.327~336、1996年5月。
- 3)江守一郎：模型実験の理論と応用第2版、技報道出版、1998年9月。

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON CIRCUMFERENTIAL CRACK OF RC PIER MODEL BY PUSH-UP IMPACT TEST

Masuhiko BEPPU, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA and Ayaho MIYAMOTO

This paper presents an experimental approach for the appearance of circumferential crack phenomena of reinforced concrete(RC) pier model by the Hanshin-Awaji Great Earthquake. First, the new push-up apparatus was developed and the vertical motion was applied by using both push-up apparatus and high speed loading machine. Second, in order to examine the failure modes due to circumferential crack, the push-up impact test was performed for reinforced concrete columns and the experimental results were discussed on the accelerations, velocities and strains of concrete and reinforcing bar. Third, the circumferential crack of specimen was recorded by the high-speed video. Finally, the input velocity of the actual RC piers occurred circumferential crack at Hanshin area was estimated by a similar law.