

(25) 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われ

CIRCUMFERENTIAL CRACK OF CONCRETE COLUMN BY PUSH-UP IMPACT TEST

別府万寿博* , 香月智** , 石川信隆***

Masuiro BEPPU, Satoshi KATSUKI and Nobutaka ISHIKAWA

* 防衛大学校理工学研究科学生(〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 工博 防衛大学校助教 土木工学科(〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 工博 防衛大学校教授 土木工学科(〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: 衝撃的上下動, 衝撃突き上げ実験装置, 輪切り状ひびわれ, コンクリート柱供試体
(vertical earthquake shock, push-up impact apparatus, circumferential crack, concrete column)

1. 緒言

1995年1月に発生した兵庫県南部地震は大都市直下型地震といわれ、短周期の強い上下動に引き続く長周期の水平動がほとんど同時に伝わり阪神地区を襲った。その被災例には写真-1にみられるような輪切り状のひびわれが生じたRC橋脚をはじめ鋼製橋脚の軸対称座屈(ちょうちん座屈)やRC煙突の破断など、曲げ、せん断破壊では説明しづらい現象が確認された。この原因として、衝撃的な上下動地震力の存在が考えられ、主として解析的に研究が進められている^{1),2),3)}。また、現地住民の‘ドンと突き上げるような体感’などの証言からも衝撃的な上下動の存在の可能性は否定できないと考えられ、現象の実験的再現が待たれている状況である。本研究は、衝撃的上下動を実験的にシミュレーションするための衝撃突き上げ装置を開発し、コンクリート円柱供試体を対象として輪切り状ひびわれについて実験的な考察を試みたものである。

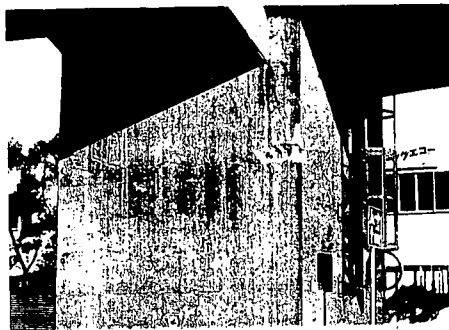


写真-1 RC橋脚の水平輪切りひびわれ

2. 実験の概要

2.1 実験装置の概要

図-1に示す(a)高速変形载荷装置と(b)突き上げ装置を併用することにより、衝撃的な上下動を再現した。突き上げ装置は、高速変形载荷装置から入力される力を油圧によりゴム製ホースを介して伝達し、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。出力速度の制御は入力側の高速変形载荷装置で行い、出力側の最大変位量は突き上げ装置のストロークの絞りで調整できる。実験は突き上げ板の上にM10ボルトを埋め込んだコンクリート供試体を固定し、供試体上部におもりを上載し実験を行った。実験の全体図を写真-2に示す。

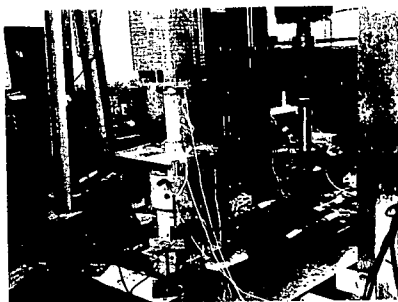


写真-2 実験の全体図

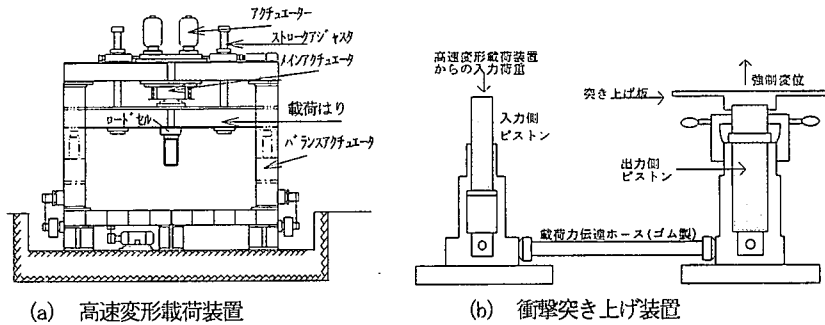


図-1 実験装置の概要

2. 2 実験装置の性能

高速変形載荷装置は、最大載荷速度約 4 m/s の載荷能力を有している。そのため、突き上げ板は最大入力速度の $1/2.9$ 、すなわち約 1.4 m/s の最大速度で供試体を突き上げることができる。また、強制変位量は可変で最大 6 cm まで突き上げ可能である。上部のおもりについては一枚 20 kgf の鋼製円盤を積み重ねて調整し、最大で 500 kgf まで増量できる。

2. 3 供試体

RC橋脚の実物の大きさ(直径 3 m 、柱高 10 m)を意識し、縮尺寸法およびボルトの埋込み深さをパラメーターにして図-2に示すような(a)縮尺 $1/30$ 、上下のみボルト埋込み(b)縮尺 $1/30$ 、通しボルト(c)縮尺 $1/40$ 、上下のみボルト埋込み(d)縮尺 $1/40$ 、通しボルトの計4種類の供試体を作成した。コンクリートは、28日強度が約 350 kgf/cm^2 で粗骨材の最大粒径が約 2.5 cm のものを使用した。また、M10ボルトは市販のものを用い供試体を作成した。

2. 4 実験ケース

突き上げ速度は低速(0.35 m/s)、中速(0.69 m/s)および高速(1.38 m/s)の3種類で行った。また、強制変位量は 0.5 cm 、おもりの重量は 500 kgf として実験を行った。すなわち、供試体には縮尺 $1/30$ タイプで約 6.4 kgf/cm^2 、縮尺 $1/40$ タイプには約 11 kgf/cm^2 の初期圧縮力を与えた。表-1に実験ケースを示す。

2. 5 測定項目

突き上げ板とおもりの加速度を加速度計で、突き上げ板とおもり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、コンクリート粗骨材の最大粒径が 2.5 cm であることから 9 cm および 3 cm のひずみゲージを用いて計6カ所測定した。図-3に測定項目の概要を示す。

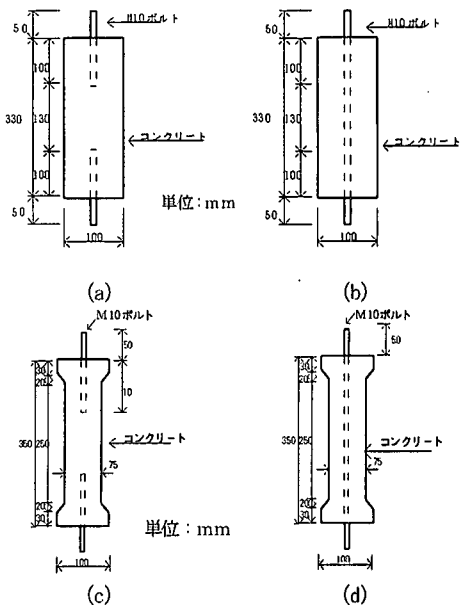


図-2 供試体の種類

表-1 実験ケース

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
0.35 m/s	CV30UD-1	CV30TH-1	CV40UD-1	CV40TH-1
0.69 m/s	CV30UD-2	CV30TH-2	CV40UD-2	CV40TH-2
1.38 m/s	CV30UD-3	CV30TH-3	CV40UD-3	CV40TH-3

3. 実験結果と考察

3.1 基盤入力

図-4に、高速載荷装置の入力速度を4.0m/sで載荷した場合の基盤入力加速度(加速度計①)の時刻歴応答を示す。これより、8msまでは正の加速度、すなわち基盤の上昇が続いた後に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。この急停止時の高周波は、基盤面の鋼板のもつ固有周期の影響が大きいが事前の試験でわかっているので、これを移動平均法を用いて500Hzのローパスフィルターにかけて整理すると図-5のようになる。これより、この場合の突き上げ時の最大加速度は約16Gであり、停止時の最大加速度は約30Gであることがわかる。試みに、通常地震計のサンプリング限度といわれる50Hzのローパスフィルターをかけたものを図-6に示す。これより、50Hz程度のローパスフィルターをかけた加速度データによると最大停止加速度が2G程度に小さくなり、500Hzのローパスフィルターのデータに対して約93%に低下していることがわかる。500Hzでフィルタリングされたデータから読みとった入力速度と突き上げ最大加速度および停止最大加速度の関係を表-2に示す。

図-7には、図-4の加速度データを時間積分して得られた基盤入力速度の時刻歴応答を示す。これより、時刻8msまでは速度が増大し最大約100cm/sに達した時点で停止加速度により瞬時に速度25cm/sまで低下し、その後徐々に速度が低減して30msにおいてはほぼ停止することがわかる。図-8には、図-7をさらに時間積分して得られた基盤入力変位の時刻歴応答を示す。これより、変位において停止加速度の生じた8msでやや丘状の変化ができるが、ほぼ一定に増加し続けた後30msで停止を完了することがわかる。

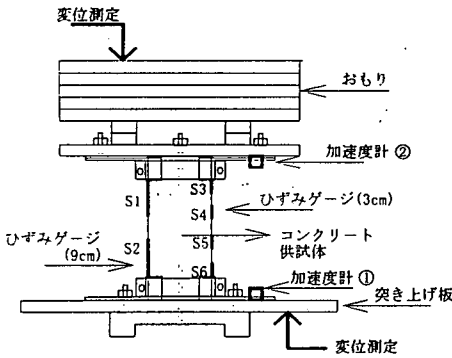


図-3 測定項目

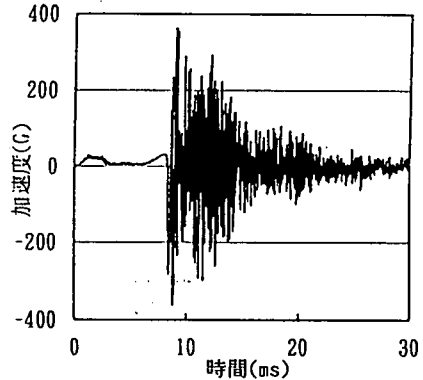


図-4 基盤入力加速度
(入力速度4.0m/s, 出力速度1.4m/s, 生データ)

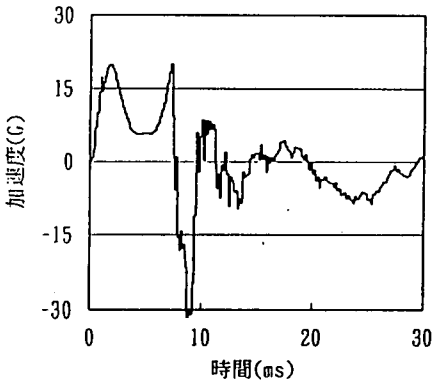


図-5 500Hzでフィルタリングされた
基盤入力加速度

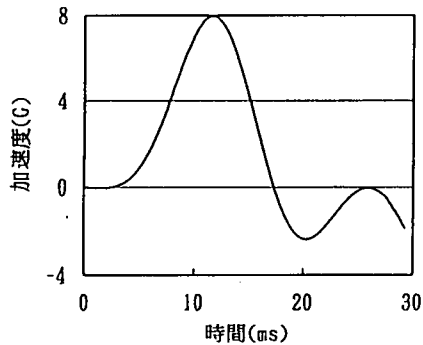


図-6 50Hzでフィルタリングされた
基盤入力加速度

表-2 入力速度と加速度の関係

入力速度	出力速度	最大突き上げ加速度	最大停止加速度
1.0m/s	0.35m/s	1.4 G	2.0 G
2.0m/s	0.69m/s	1.7 G	3.0 G
4.0m/s	1.38m/s	1.6 G	3.0 G

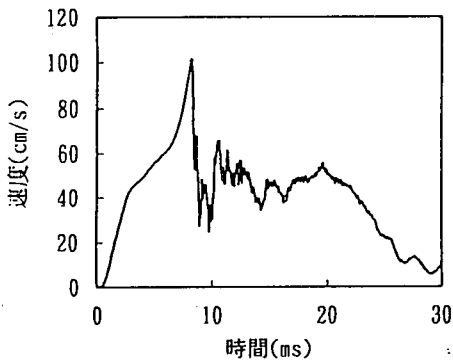


図-7 基盤入力速度の時刻歴応答
(加速度データの時間積分)

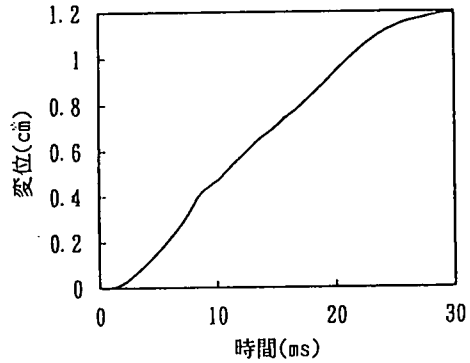


図-8 基盤入力変位の時刻歴応答
(基盤入力速度の時間積分)

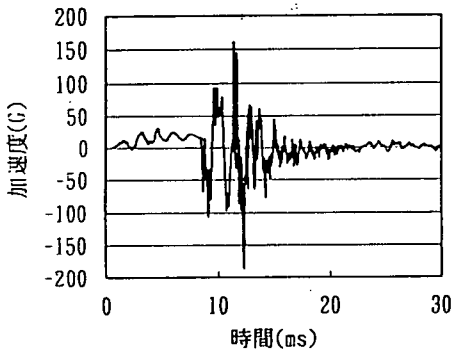


図-9 上載重錘の加速度応答
(生データ)

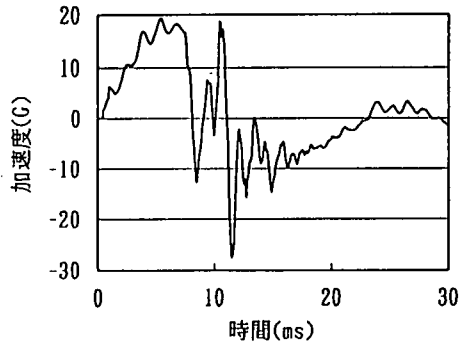


図-10 500Hzでフィルタリングされた上載重錘の
加速度応答

3. 2 上載重錘の加速度

図-9には、上載荷重として用いた重錘の加速度(加速度計②)の時刻歴応答の生データを、図-10には500Hzでフィルタリング処理したデータを示す。図-9より、供試体を伝播後の生データには図-4で示した基盤入力の高周波成分の影響が小さくなっていることがわかる。また、図-5と図-10の比較により突き上げ時および停止時いずれの場合も波形には違いがあることが認められ、入力加速度が供試体の変形となって伝播することによる時間差の影響があるが、最大値にはほとんど大きな差異はないことがわかる。

3. 3 ひずみ応答

図-11には、図-5に示す入力加速度時の縮尺1/30、上下のみボルト埋込みタイプの供試体に生じたひずみ(s1)の時刻歴応答を示す。これより、突き上げ時の0~8msにおいては圧縮ひずみが生じ、停止加速度の生じた8msから引張りひずみに転移して、13msにおいてひびわれによりデータが発散していることがわかる。

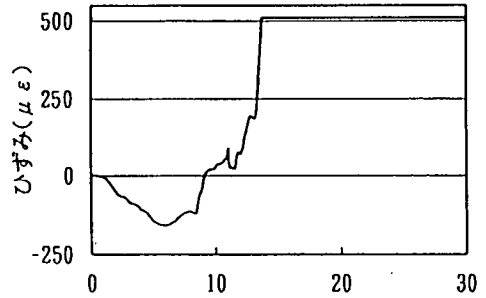


図-11 ひずみ(s1)の時刻歴応答

3. 4 ひびわれ破壊進展過程

実験結果のひびわれ破壊には、後述するように無きずのものを含めて5種類があるが、高速ビデオ撮影の分析より得られた結果を2例示す。

(1) 引張破断-落下圧壊型

この破壊形態は、縮尺1/40、上下のみボルト埋込みタイプの供試体に入力速度4.0m/sで加速した場合に生じたものである。その進展過程を図-12に示す。この場合、停止加速度の生じた後の28msにおいて下部に輪切りひびわれが生じる。この供試体は、ボルトが通っていないため瞬時に供試体は上下に分離される。その後、上部は上昇した後に自由落下を開始し、168msにおいて下部と衝突する。このため、供試体はあたかも圧壊したかのように細かく破砕した。

(2) 柱中央ひびわれ型

この破壊形態は、縮尺1/40、通しボルトタイプの供試体に入力速度2.0m/sで加速した場合に生じたものである。その進展過程を写真-3に示す。この場合には、14msにおいて柱中央に一本の輪切りひびわれが生じる。その開口幅は、一度2~3mm程度まで拡大しその後22msにおいて通しボルトの抵抗でひびわれは閉口する挙動を示している。

3. 5 入力速度と破壊形態

実験結果から供試体の破壊形態を分類すると無きずのものを含めて図-14に示す5種類の形態が観察された。これを実験ケースごとに分類すると表-3のようになる。当然のことであるが、突き上げ速度が大きくなるにつれて、また、上下のみにボルトを埋め込んだ供試体の方が破壊が激しく、ボルトによる補強効果およびコンクリート断面積の増大による被害の軽減が認められる。

4. 結言

本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 新たに開発した衝撃突き上げ実験装置を用いてコンクリート柱供試体の輪切り状ひびわれ破壊を現出することができた。
- (2) コンクリート柱供試体の破壊形態には、無きずのものを含めて5種類が観察された。
- (3) 全般的に突き上げ速度の増加にともなってひびわれ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ることがわかり、実験終了時の外面的ひびわれ観察では推定不可能な、内部にまで到達した大きな破壊が生じていることがわかった。

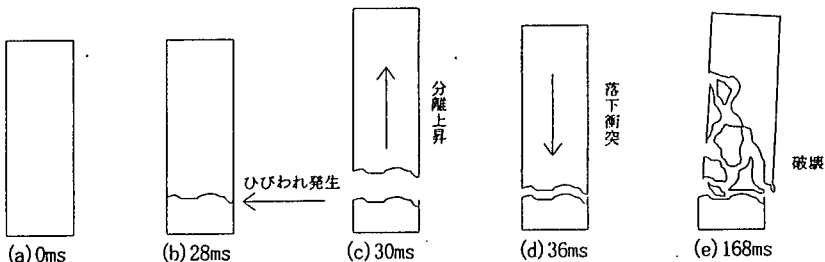


図-12 引張破断-落下圧壊型の破壊進展過程

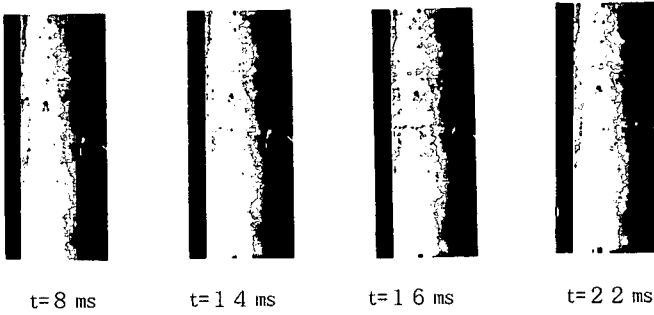


写真-3 柱中央ひびわれ型の破壊進展過程

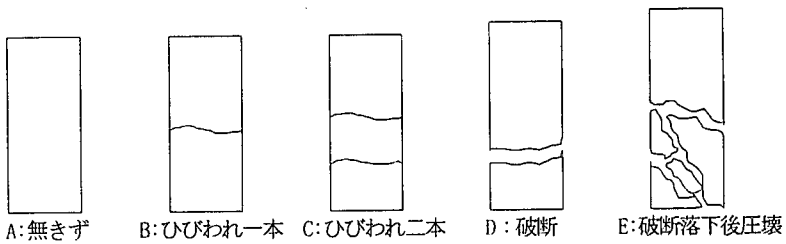


図-14 破壊形式

表-3 破壊形式による分類

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
0.33m/s	D	A	D	A
0.67m/s	D	B	E	C
1.33m/s	E	B	E	C

- 参考文献：1) 園田恵一郎他；阪神大震災における土木構造物の衝撃的破壊について，日本機械学会講演論文集 NO. 964-1，pp. 178～179，1996年3月
- 2) 谷村真治他；橋脚の衝撃的破壊挙動に関する一考察，日本機械学会講演論文集 NO. 964-1，pp. 176～177，1996年3月
- 3) 佐藤誠他；鉄筋コンクリート煙突の崩壊メカニズムと地震力について，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 347～354，1996年1月