

衝撃突き上げ装置によるRC橋脚模型の 輪切り状ひび割れに関する実験的研究

別府万寿博¹・香月智²・石川信隆³・宮本文穂⁴

¹ 学生会員 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)

² 正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

³ フェロー 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)

⁴ 正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

本研究は、阪神・淡路大震災で発生したRC橋脚の水平輪切り状ひび割れに注目し、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RC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割れ現象を高速ビデオで撮影することにより、その進展過程をビジュアル化して観察した。さらに、本実験より得られた結果をもとに相似則を適用し、水平輪切り状ひび割れが発生したRC橋脚に代入したと考えられる限界速度について考察した。

Key Words : vertical earthquake shock load, push-up impact apparatus, circumferential crack, RC pier model

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。地震後に各機関から発表された最大鉛直速度および加速度の記録¹⁾からみると神戸海洋気象台で最大鉛直速度40kine (kine=cm/s)、最大鉛直加速度332gal (gal=cm/s²)であり、六甲台町にある神戸大学では最大鉛直速度33kine、最大鉛直加速度426galであった。これら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。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ない。また、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報告されており、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(RC)橋脚の水平輪切り状ひび割れ(以下、輪切り状ひび割れ)をはじめ、RC杭の輪切り状ひび割れや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

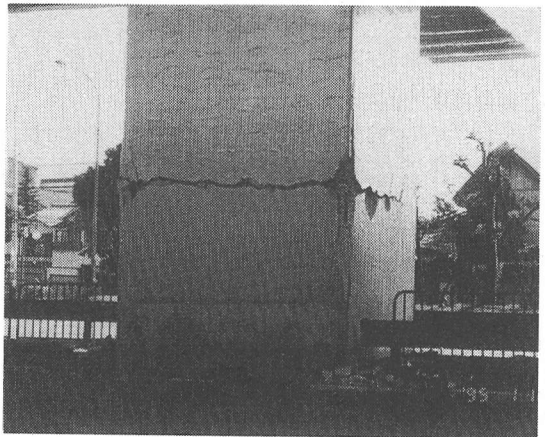


写真-1 RC橋脚の水平輪切り状ひび割れの例

なった説明しづらい事例がある²⁾ことも事実である。ここで輪切り状ひび割れは、曲げによる貫通ひび割れ(ある断面の片側位置から対面位置へひび割れが完全に貫くような現象)とは異なり、断面を貫

通しているか否かは判定できないが、ひび割れが断面円周上に発生している現象である。このようなひび割れ現象は、水平交番載荷実験でも同様のひび割れが発生するため、水平地震動による交番曲げにより発生した損傷とする考え方もある。しかし、交番載荷実験³⁾では最終破壊部に関係なく柱全体にわたりひび割れが分散するのに対して、写真-1の輪切り状ひび割れは、大きく一本のみ発生している。したがって輪切り状ひび割れは、曲げによる破壊とは異なると考えられる。

このような損傷の原因の一つとして衝撃的上下動も考えられる。すなわち、震源で発生した短周期の地震波が、減衰せずに表層地盤に入射し構造物内部で反射、干渉などを繰り返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も考えられる。また、最初に「ドンと突き上げるような揺れ」を感じた後に激しい横揺れを感じたという証言^{4)・5)}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できる周波数領域は30~40Hz以下であることから、地震の極めて初期に生じる高周波の衝撃的な上下動は精度よく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、波動伝播解析を主とした研究が進められている^{6)~15)}が、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、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RC橋脚の輪切り状ひび割れ破壊に注目し、模型実験的に輪切り状ひび割れを再現して、その入力速度を推定しようと試みたものである。その際、供試体を鉛直方向に強制変位させる衝撃突き上げ装置を新たに開発し、従来設置してある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た。また、コンクリート供試体は両端の支持条件の制約からM10ボルトで補強した円柱型とし、それに重錘を onboard して高架橋上部工を現出した。なお、実験パラメーターとしては、供試体の縮尺、補強ボルトの有無および突き上げ速度であり、4つの供試体に対し低速、中速、高速の3つの入力速度を与えて実施した。また、供試体のひび割れ発生状況を観察するために高速ビデオを用いて撮影した。さらに、実際のRC橋脚のひび割れ発生にはどの程度の突き上げ速度が必要であるかを

相似則を用いて推定してみた。

なお、特に断っておくが、本研究の目的は兵庫県南部地震で発生したRC橋脚の被害現象をすべて説明しようとするものではない。むしろ、著者らも水平動が最終的な被害に及ぼした支配的要因であったと考えており、損傷の一つの可能性として衝撃的上下動がひきがねになったと考えているものである。

2. 実験の概要

(1) 実験計画

衝撃的上下動によるRC橋脚の輪切り状ひび割れを模型実験的に再現するために、以下の項目に着目して実験計画を立てた。

- (a) 衝撃突き上げ装置の開発 (突き上げ速度、加速度)
- (b) 供試体寸法 (縮尺、初期圧縮応力) の影響
- (c) 供試体内の補強鋼材量 (補強ボルトの有無、剛性変化断面) の影響
- (d) ひび割れ現象の視覚化

(2) 衝撃突き上げ装置の開発および性能

現在、地震動を模擬するための実験装置としては正負交番水平力を加える動的加振機などがある。しかし橋脚の設計においては、上下動が水平動に比し構造物の破壊に与える影響が小さいとされていること¹⁶⁾もあり、衝撃的模擬上下動を表現する実験装置は国内外には見当たらない。そこで、防衛大学校が所有している図-1(a)のような高速変形負荷装置を活用することで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図-1(b)に示すように「てこの原理」を利用して鉛直上方向へ変換するものである。

a) 衝撃突き上げ装置

図-1(b)および写真-2に衝撃突き上げ装置の概要を示す。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。実験前に装置内をポンプユニットを用いてオイルを充填し、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

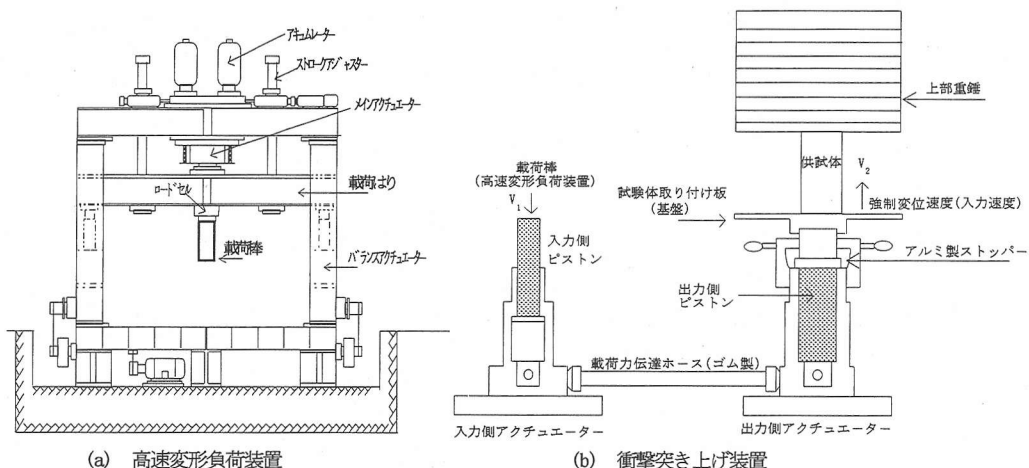


図-1 実験装置の概要

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受けた後、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载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载荷速度を V_1 とし入力速度を 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。したがって、高速変形負荷装置の载荷速度（最大4m/s）を調節することにより入力速度を変化させることができ、最大入力速度は約1.38m/sとなる。

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。ここで、入力側ピストンの最大ストローク15.0cmは基盤の最大変位量すなわち出力側ピストンのストローク5.0cmと1:1で対応しており、常に入力側ピストンは最大ストロークで押し下げるため、基盤の変位量が5.0cm未満である場合には装置内のオイルが逃げ場を失ってしまう。この場合の余剰オイルは、入力側アクチュエーターから漏出するようにしている。

b) 装置の性能試験

突き上げ装置の性能を確認するため、基盤上に供試体を設置せずに入力速度と基盤変位量をパラメーターとして衝撃突き上げ性能試験（以下、性能試験）を行った。入力速度は、高速変形負荷装置の载荷速度を約1.0、2.0、4.0m/sとなるように速度を調節し、以下、各速度をそれぞれ低速、中速、高速と定義する。したがって、先に述べたように入力速

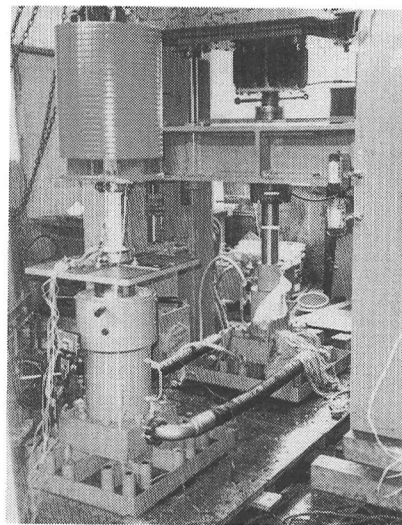


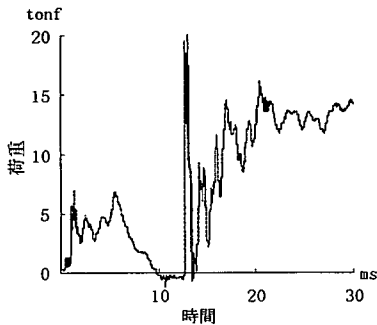
写真-2 実験装置の概要

度は高速変形負荷装置の载荷速度の約0.35倍となるため、入力速度は理論上約0.35、0.69、1.38m/sとなる。また、基盤変位量は0.5、3.0、5.0cmの3通りとした。性能試験ケースと最大入力速度を表-1に示す。

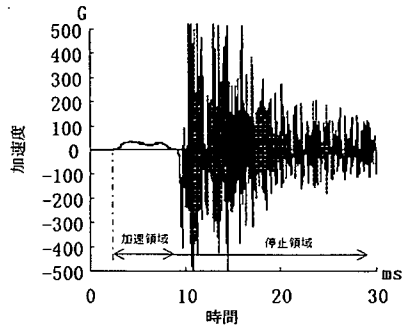
試験ケース名の第1項は基盤変位量を表し（単位：cm）、2項は入力速度の種類（L:低速、M:中速、H:高速）を表している。計測項目は、基盤の加速度（以下、入力加速度）と基盤変位をそれぞれ加速度計（PCB社製、計測範囲500G、応答周波数10kHz、固有振動数30kHz）とレーザー式変位計（KEYENCE社製、計測範囲300mm～100mm、応答周波数915Hz）で測定した。また、高速変形負荷装置の荷重、すなわち突き上げ装置内の油圧をロードセル（共和電業

表-1 性能試験ケースと最大入力速度

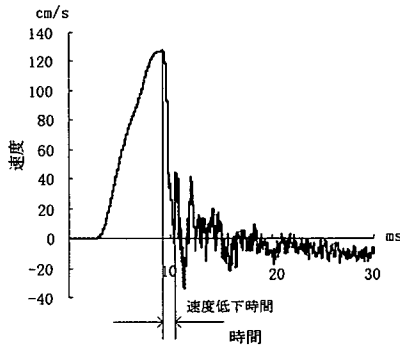
基盤変位量 (cm)	突き上げ速度 (cm/s)	試験ケース	最大入力速度の平均 (cm/s)
0.5	低速(35)	0.5-L-1, 2	88.53
	中速(69)	0.5-M-1, 2	129.67
	高速(138)	0.5-H-1, 2	134.48
3.0	低速(35)	3.0-L-1, 2	85.58
	中速(69)	3.0-M-1, 2	131.99
	高速(138)	3.0-H-1, 2	127.76
5.0	低速(35)	5.0-L-1, 2	88.09
	中速(69)	5.0-M-1, 2	124.57
	高速(138)	5.0-H-1, 2	169.55



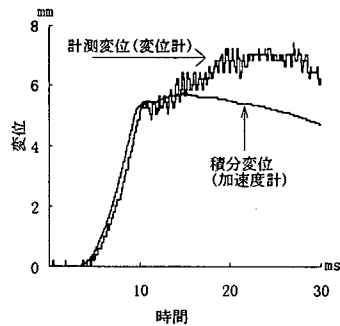
(a) 荷重～時間関係(ロードセル)



(b) 入力加速度～時間関係



(c) 入力速度～時間関係



(d) 基盤変位～時間関係

図-2 試験ケース '0.5-H-2' の計測結果

社製、計測範囲 50tonf (490kN)、固有振動数 10 kHz) で計測した。ここで、計測システムの始動トリガーはレーザー式変位計に比べて応答周波数の高い加速度計とした。

一例として試験ケース '0.5-H-2 (基盤変位量: 0.5cm, 入力速度: 高速)' の試験結果を図-2 に示す。図-2(a)の荷重～時間関係より、高速変形負荷装置が载荷を始めた後 5ms で荷重約 7tonf (68.6kN) となり、以後徐々に低下し 10ms で一度荷重がゼロになっている。しかしその後、一旦は 20tonf (196.0kN) を越えるが 20ms 以降は約 15tonf

(147.0kN) に収束している。これは、高速変形負荷装置が 10ms まで载荷を続けて急に停止し、その後突き上げ装置出力側アクチュエーターから余剰オイルが逆流し排出され、装置内に圧縮されたオイルの反力を受けたためと思われる。

図-2(b)の入力加速度～時間関係より、高速変形負荷装置が载荷を始めてから約 3ms 後に基盤が動きはじめていることがわかる。また、8ms まで最大加速度約 30 G (G:重力加速度) をとりながら山なりの曲線を描き、10ms 以降は高周波成分を多く含む波が見られることがわかる。このことから、8ms

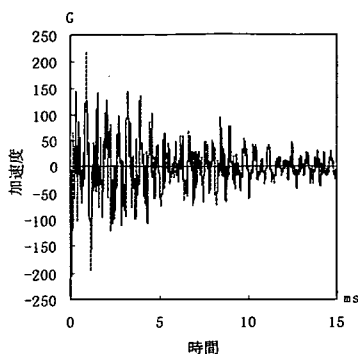


図-3 鋼球(4kgf)を高さ50cmから落としたときの
加速度～時間関係

まで基盤は上昇を続け(以下、加速領域)、10msにおいて急停止しそれ以降(以下、停止領域)は非常に短周期の振動をしており、停止後の加速度が約500Gと非常に大きい値が観測される。

図-2(c)は、入力加速度を時間積分した入力速度～時間関係である。加速領域(8msまで)ではほぼ一定に増加し最大値約130cm/sとなっている。その後10msで瞬時(約1ms)に速度はゼロまで低下し、以後停止領域で徐々に速度は増減していることがわかる。ここで、速度が最大値を迎えた後に瞬時にゼロまで低下する時間(約1ms)を速度低下時間と定義する。また別途の試験結果(基盤変位3.0, 5.0cm)より、速度の最大値を迎えた直後の低減は基盤変位量が大きいほど緩やかである傾向が認められた。

さらに図-2(d)は、速度を時間積分して求めた基盤変位(積分変位)～時間関係とレーザー式変位計で計測した基盤変位(計測変位)～時間関係の比較を示したものである。積分変位は速度と同様に、加速領域ではほぼ一定に増加し最大値約6mmとなり、その後なだらかに基盤変位設定値である5mmに収束していることがわかる。一方計測変位は、加速領域においては加速度を時間積分した基盤変位と同じ挙動を示すが、それ以降はやや増加した後7mmに収束しているようにみえる。すなわち、加速領域ではどちらもほとんど同じであるが、停止領域では挙動に差異がみられる。この傾向は、他の試験ケースでも確認されており、また試験ケースによっては停止領域において全く異なる挙動を示す場合もあった。この原因は、加速度計の設置位置とレーザー式変位計の設置位置が異なることと、加速度計のセンサー内部の電気的問題により時間軸のゼロ基線

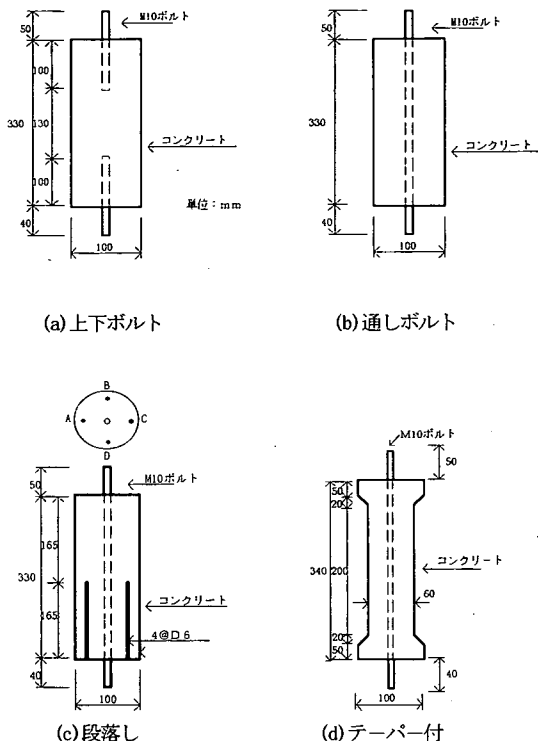


図-4 供試体の概要

がずれるためと考えられる¹⁷⁾。

以上のことから、本実験装置は加速領域において最大加速度が数10G、最大速度が約80～170cm/sのオーダーであることがわかる。また、最大速度後に約1ms程度の速度低下時間で速度がゼロになる入力速度現象が、衝撃的上下動の特色を表すものといえる。

c) 基盤への鋼球の落下試験

突き上げ装置の性能試験結果より、基盤が急停止する際に非常に大きな短周期の加速度応答を伴うことがわかった。これは、基盤の剛性が大きいと思われるが、試みに基盤中央に重量約4kgf(39.2N)の鋼球を自由落下させたときの基盤加速度を計測した。落下高は約5cm, 10cm, 15cm, 30cm, 50cmの5通りとし、各落下高につき2回ずつ試験を実施した。一例として落下高50cmのときの基盤の加速度～時間関係を図-3に示す。これより、正負の最大加速度は約200G程度にも大きくなることがわかる。したがって、性能試験において基盤急停止後の加速度データには、基盤の特性が大きな影響を与えていることが検証できたと思われる。

(3) 供試体

供試体柱部分の概要を図-4に示す。実際のRC橋

表-2 コンクリートの示方配合

圧縮強度	34.3N/cm ²	水	174kg/m ³
スランプ	10cm	セメント	305kg/m ³
空気量	1.0%	膨張材	15kg/m ³
水セメント比	54%	細骨材	1021kg/m ³
細骨材率	55%	粗骨材	852kg/m ³

表-3 鉄筋の材料試験結果

鋼材の種類	引張強度 (平均値, N/mm ²)	伸び (平均値, %)
M10 ボルト	536.7	12.7
D6 異形棒鋼	558	3.2

[注]：降伏点確認できず

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製し、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ものと思われる。

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タイプを作製した。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製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)。

実際のRC橋脚の主鉄筋比は、0.数%～数%といわれており¹⁸⁾、供試体タイプ(a)上下ボルト、(b)通しボルトでともに約1.0%、(c)段落しで約2.4%、(d)テーパ付で約2.8%であることから、供試体内の鋼材量はばらつきはあるものの妥当であるといえる。表-2に供試体作製に用いたコンクリートの配合条件を、表-3にはM10ボルトと鉄筋の材料試験結果を示す。試験の結果、降伏点が確認できなかったため、0.2%の残留ひずみを残す応力を耐力とした。また図-5には、コンクリートの材料試験における応力～ひずみ関係の例を示す。供試体製作を5回に分けて実施したので、各々について3本の円柱供試体(φ10×20cm)を作製し、材令28日で圧縮試験を行った結果である。高架橋上部工のモデル化については、直径40cm、板厚2cmの重量20kgf(196.0N)の鋼製円盤を積載することで表現した(以下、重錘)。

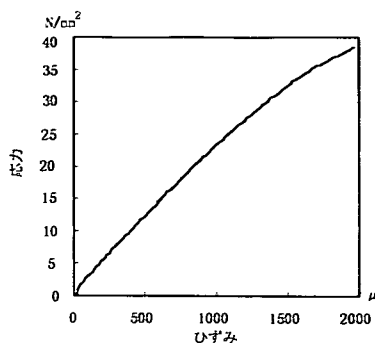
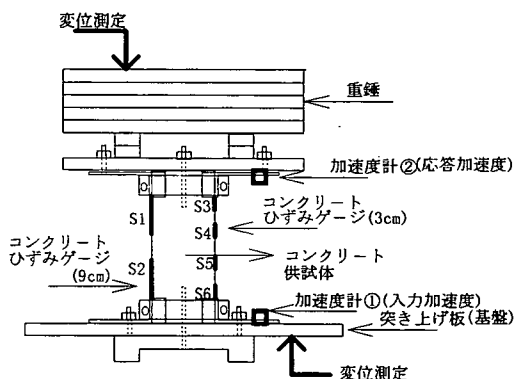
図-5 コンクリートの応力～ひずみ関係
(材令28日)

図-6 測定項目

鋼製円盤は合計25枚、総重量500kgf(4.9kN)になるまで積載できるが、重錘はコンクリート供試体の縮尺に関わらず500kgf(4.9kN)とした。したがって、縮尺1/30モデル(断面積:78.5cm²)には初期圧縮応力として約6.4kgf/cm²(0.6N/mm²)を、縮尺1/50モデル(断面積:28.3cm²)には固定部以外の柱部に約17.7kgf/cm²(1.7N/mm²)が作用していることになる。

実際のRC橋脚には上部工により5～20kgf/cm²(0.5～2.0N/mm²)の圧縮応力が作用していると言われており³⁾、本実験供試体の初期圧縮応力の値は妥当と思われる。

(4) 測定項目

図-6に測定項目の概要を示す。基盤と重錘の加速度を加速度計(PCB社製、計測範囲500G、応答周波数10kHz、固有振動数30kHz)で、基盤と重錘の変位量をレーザー式変位計(KEYENCE社製、計測範囲300mm～100mm、応答周波数915Hz)により測定した。加速度計の設置位置は基盤中央および重錘中央か

表-4 実験ケースの一覧

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	テーパー付
低速	30UD-L-1	30TH-L-1	30CU-L-1	50TH-L-1
	30UD-L-2	30TH-L-2	30CU-L-2	50TH-L-2
中速	30UD-M-1	30TH-M-1	30CU-M-1	50TH-M-1
	30UD-M-2	30TH-M-2	30CU-M-2	50TH-M-2
高速	30UD-H-1	30TH-H-1	30CU-H-1	50TH-H-1
	30UD-H-2	30TH-H-2	30CU-H-2	50TH-H-2

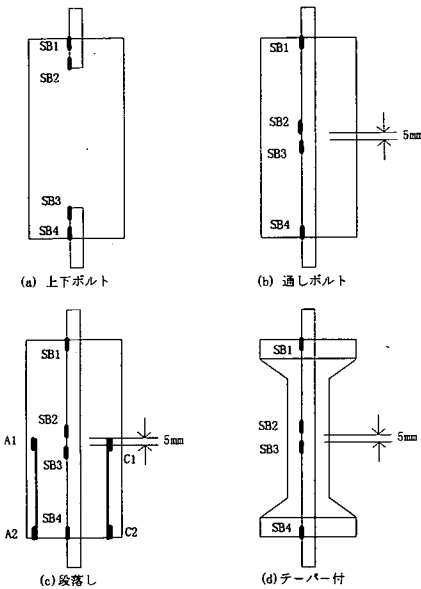


図-7 鋼材ひずみ測定位置

ら約10cmの位置とし、変位計は基盤の端から約3cmにレーザーが照射するように設置した。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（東京測器社製，PL90-11-5LT）を2枚、他面は3cmゲージ（東京測器社製，PL30-11-5LT）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（東京測器社製，FLA5-11-5LT）で測定した。図-7に各供試体タイプの鋼材のひずみ測定位置を示す。

(5) 実験ケース

各供試体タイプに対して、突き上げ装置の性能試験と同様に入力速度を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。これは、性能試験結果より入力速度～時間関係において、強制変位量が小さいほど最大速度直後の低減勾配が大きく、これが供試体の損傷に大きな影響を与えると考えたためである。実験ケースの一覧を表-4

に示す。実験ケース名の第1項は縮尺および配筋の種類（UD:上下ボルト，TH:通しボルト，CU:段落し），2項は入力速度の種類（L:低速，M:中速，H:高速）を表している。

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。また、低速、中速および高速の突き上げ速度に対してそれぞれ50 μ s、20 μ s、10 μ sのサンプリングタイムで測定を実施したが、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。

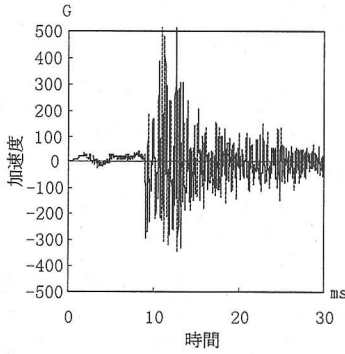
3. 実験結果および考察

(1) 時刻歴応答

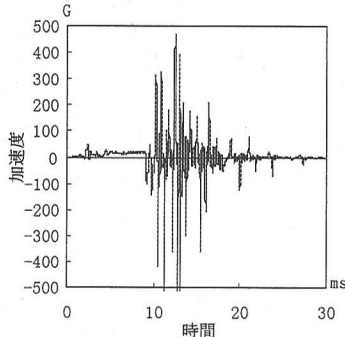
各供試体タイプについて、入力加速度（加速度計①）、応答加速度（加速度計②）、コンクリートのひずみおよび鋼材のひずみについて考察する。また、高速ビデオの映像からその破壊進展過程を確認する。

a) 上下ボルトタイプ

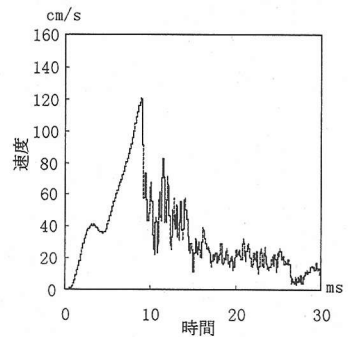
図-8に実験ケース‘30UD-H-2（高速，2体目）’の結果を示す。図-8(a)の入力加速度～時間関係から、加速領域は約8msであることがわかる。その後、停止領域において高周波成分がみられ性能試験と同様の傾向にある。性能試験においては加速領域は一つの山なりの曲線であったのに対し、今回は二つの山なりの曲線が観察される。これは、本実験で基盤上に約500kgfの重錘が载荷されており、一度の圧力では突き上げることができなかったためと思われる。図-8(b)の応答加速度～時間関係より、停止領域における高周波成分の低減が認められ、基盤の振動の影響が小さいことがわかる。図-8(c)，(d)は、それぞれ入力加速度と応答加速度を時間積分した速度～時間関係である。これより入力速度の最大値は、8msにおいて約120cm/sとなり停止領域で瞬時に約40cm/sまで急減している。30msではほぼゼロに収束しており、性能試験と同じ傾向が認められた。また、応答速度より供試体は、一旦約13msで



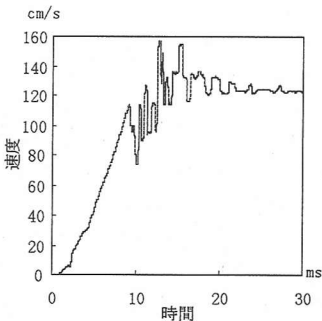
(a) 入力加速度～時間関係



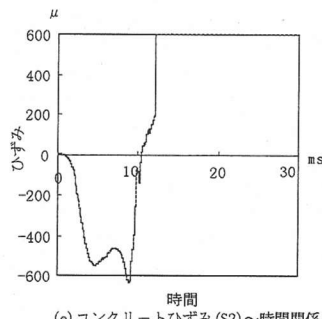
(b) 応答加速度～時間関係



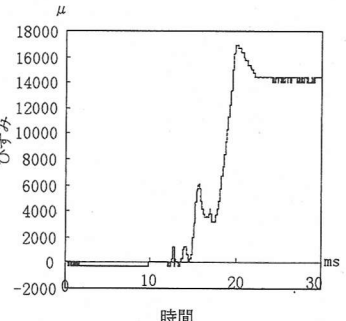
(c) 入力速度～時間関係



(d) 応答速度～時間関係



(e) コンクリートひずみ (S2)～時間関係



(f) ボルトひずみ (SB3)～時間関係

図-8 上下ボルトタイプ 30UD-H-2 の計測データ

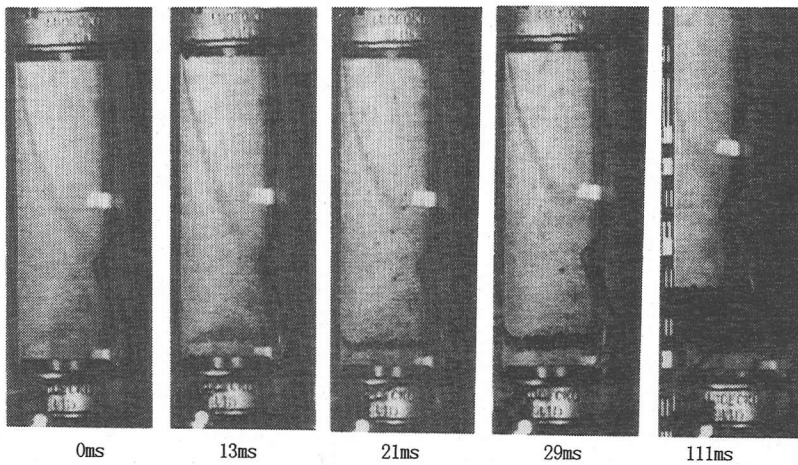


写真-3 上下ボルトタイプ 30UD-H-2 の破壊進展過程

(ひび割れは下部付近で発生し、最終的に破断している。なお、斜めの線はコードの線が映っているものでありひび割れではない。)

約 150cm/s まで上昇するが、破断した後ほぼ約 130 cm/s と一定になることがわかる。これは、後に説明するように約 13ms でひび割れが発生し、その後下部ボルトの先端部付近で供試体が切断したため、速度が一定になったものと考えられる。図-8(e)は、コンクリートひずみ (S2) の時刻歴応答である。加速領域で最大圧縮ひずみ約 600 μ を生じ、停止領域に入ると引張り側へと移行し約 13ms でひび割れが生じ、その後瞬時に破断して発散している。図-8(f)にボルトひずみ (SB3) の時刻歴応答を示す。ひび割れが生じるまではコンクリートとほとんど同じ挙動を示している。しかしひび割れ発生後には、上昇するコンクリート部と基盤に固定されているコンクリート部に埋め込まれているボルトの付着破壊が進行していると考えられる。したがって、上昇するコンクリート部にひきずられるようにボルトは約 19ms において約 1.7%程度の大きな引張りひずみを生じ、最終的に約 1.5%の残留ひずみを残している。

高速ビデオによる破壊進展過程を写真-3に示す。ひび割れは約 13ms で下部付近に発生し、最終的に下部ボルトの先端部付近で破断している。なお、斜めの線はコードの影であり、ひび割れではない。

b) 通しボルトタイプ

図-9に実験ケース '30TH-H-2 (高速, 2体目)' の実験結果を示す。図-9(a), (b), (c), (d)は上下ボルトと同じ関係を示し、以後同様である。これから、本ケースでは加速領域は約 7ms, 最大入力速度は約 100cm/s, 最大応答速度は約 116cm/s であり、速度の最大値に大きな差はみられない。これは、通しボルトの場合の損傷が切断ではなく、上部にひび割れ一本程度であったためと思われる。また、図-9(d)の応答速度は停止領域に入った後ならかに低減している。これは、ひび割れが発生すると上部の重錘へと力を伝える有効断面積が減少するので供試体柱部の剛性が低減し重錘を停止させる力が弱まったためと思われる。後述する段落しおよびテーパ付タイプにも同じ傾向を示しており、ボルトが供試体内に連続して通っているものに共通の特性であることがわかる。図-9(e)にはコンクリートひずみ (S1) の時刻歴応答を示す。これより、加速領域で最大圧縮ひずみ約 700 μ となり、停止領域に入り約 10ms でひび割れが生じていることがわかる。

図-9(f)はボルトひずみ (SB1, SB2, SB3, SB4) の時刻歴応答である。これより、ひび割れ発生後の力伝達は、有効断面積の減少にともないボルトに力の負担が移行しボルトが引張られている様子を確認

できる。また、ボルトのひずみ分布はSB1すなわちひび割れ発生位置の上部で最も大きく(約2.7%), ひび割れ発生位置から離れるに従い小さくなる傾向を示している。これは、ひび割れの発生に引き続き発生位置からボルトとコンクリートの付着がなくなり、コンクリートとボルトとの一体化が損なわれることに帰因しているものと思われる。

高速ビデオによる破壊進展過程を写真-4に示す。これよりひび割れは、約 10ms で上方から約 5cm の位置に発生していることがわかる。これは、図-9(f)のボルトひずみSB1の大きなひずみ(約2.7%)とも対応している。

c) 段落しタイプ

図-10に実験ケース '30CU-H-2 (高速, 2体目)' の実験結果を示す。図-10(a), (b), (c), (d)から加速領域は約 7ms までで、最大入力速度は約 111 cm/s, 最大応答速度は約 107cm/s であり差がないことがわかる。図-10(e)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-5からもわかるように約 12ms で供試体中央部(段落し部)に輪切り状ひび割れが生じている。まず図-10(e)より、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。またひび割れ発生後は、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。一方の下側コンクリート部のひずみS2はひび割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。これは、ひび割れ発生までに供試体内に蓄えられたひずみエネルギーが、ひび割れ発生により一挙に解放されたため、ひび割れ発生位置より上部のS1は、ひび割れ発生後も重錘が急停止せず緩やかに振動するので引張り側にあり、下部のS2は基盤の上昇が重錘に比べて十分小さいので、ひずみは瞬間的にゼロに近づいたためと思われる。さらに、上下に分離した後の約 20ms 以後は上、下部分のコンクリートがそれぞれ重錘および基盤の振動とのインタラクションやボルトとコンクリートとの付着による影響を受け、S1は圧縮にS2は引張りに変化したものと考えられる。

図-10(f)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割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。また、ボルトの軸方向最下部と最上部のひずみ (SB1, SB4) はひ

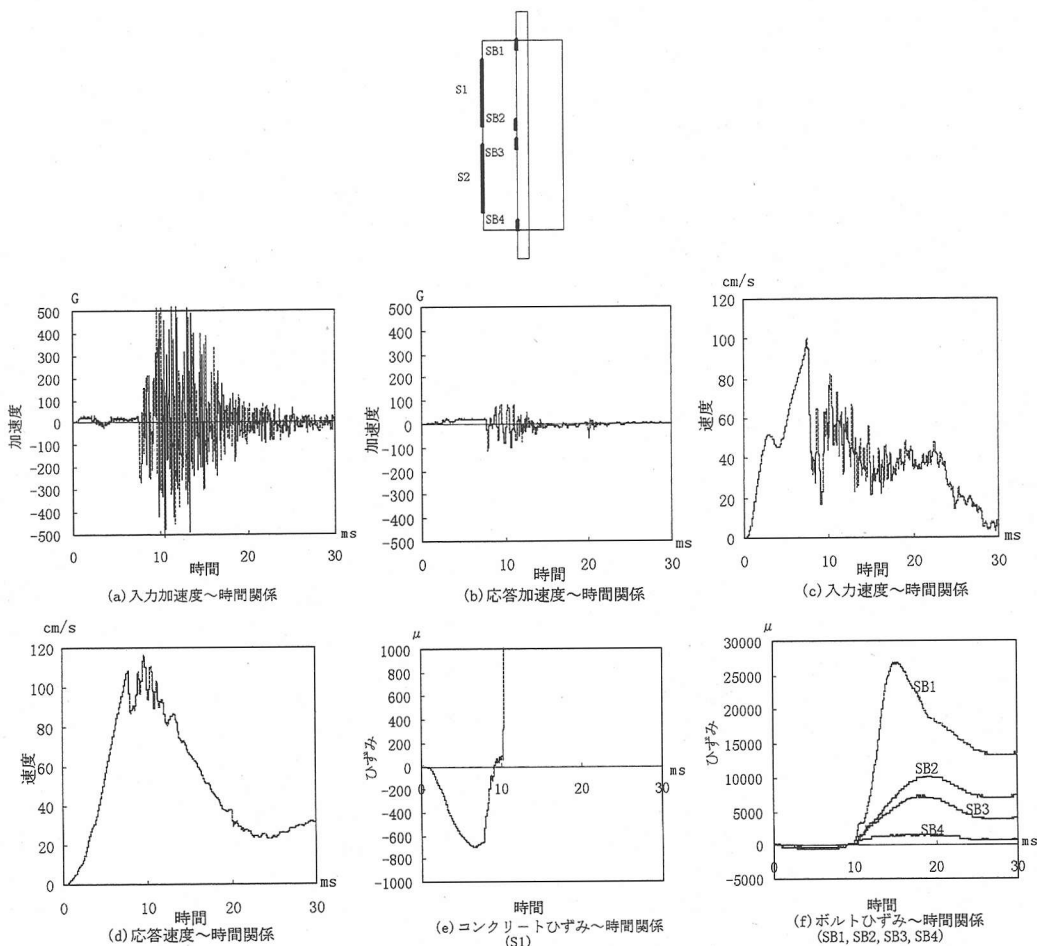


図-9 通しボルトタイプ 30TH-H-2 の計測データ

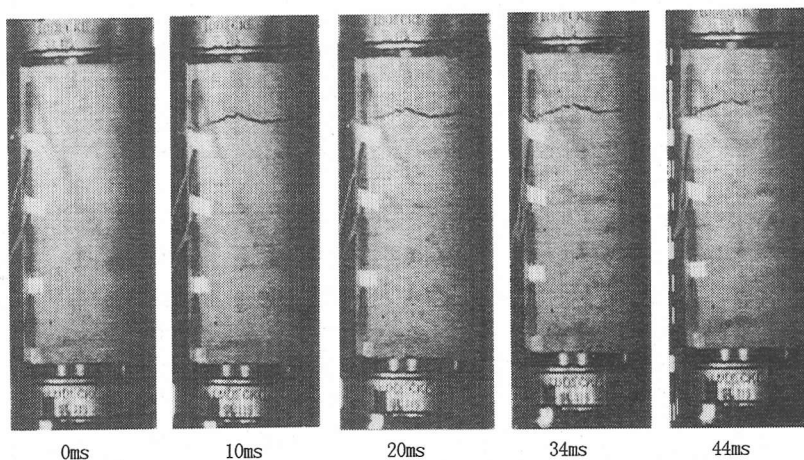


写真-4 通しボルトタイプ 30TH-H-2 の破壊進展過程

(斜めの線はコードの影である。ひび割れは10ms で上方に発生している.)

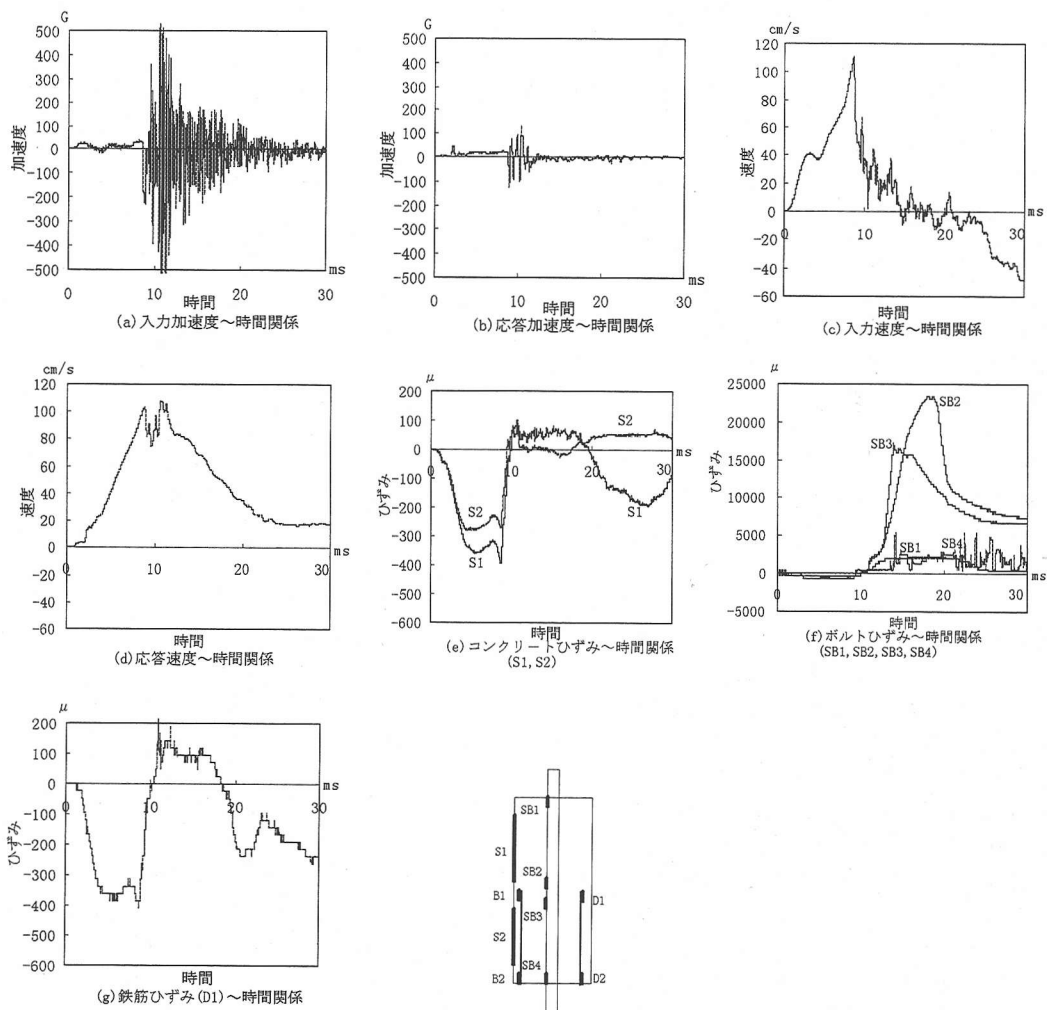


図-10 段落シタイプ30CU-H-2 の計測データ

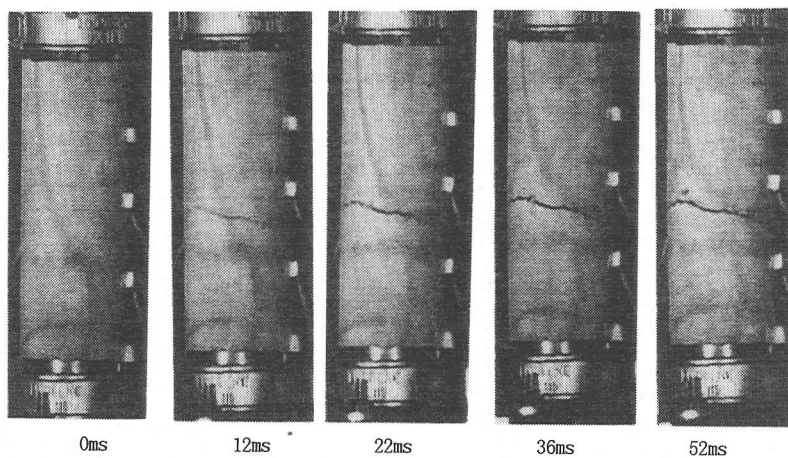


写真-5 段落シタイプ30CU-H-2 の破壊進展過程
(輪切り状ひび割れが中央に発生している)

び割れ位置近傍のひずみ (SB2, SB3) の約10~14%程度であることがわかる。図-10(g)には鉄筋ひずみ(D1)すなわち供試体中央部の鉄筋ひずみの時刻歴応答を示す。これより鉄筋ひずみは、ほぼコンクリートと同じ挙動を示している。すなわち、鉄筋とコンクリートの付着は有効に作用しており、コンクリートと鉄筋は一体化されていることがわかる。

高速ビデオによる破壊進展過程を写真-5に示す。これより、輪切り状ひび割れが約12msで発生し、進展している様子がわかる。

d) テーパー付タイプ

図-11にテーパー付タイプ‘50TH-H-2 (高速, 2体目)’の実験結果を示す。図-11(a), (b), (c), (d)から加速領域は約7ms, 最大入力速度は約86cm/s, 最大応答速度は約99cm/sであることがわかる。図-11(e)にはコンクリートひずみ (S1, S2) の時刻歴応答を示す。加速領域においては約2000~2500 μ の圧縮ひずみを生じ、停止領域の約12msでまずS1が、次いで約14msでS2に引張りひび割れが発生していることがわかる。加速領域でこのように大きな圧縮ひずみが生じたのは、断面積が他の3タイプに比べ約36%しかないためであり、入力速度がさらに大きくなった場合には圧壊の可能性もあると思われる。

図-11(f)にボルトひずみ (SB2, SB3, SB4) の時刻歴応答を示す。これより、供試体中央 (SB2, SB3) ではほぼ同じひずみ応答であり、加速領域で圧縮ひずみ約3000 μ , 停止領域では最大引張りひずみ約17000 μ を生じている。ボルト最下端のひずみ (SB4) は、加速領域では中央部ひずみに比べやや小さく約2000 μ の圧縮ひずみで、停止領域では中央部を上回り、15msにおいて2.0%を振り切っていることがわかる。高速ビデオによる破壊進展過程を写真-6に示す。また、後述する写真-7からもわかるように、停止領域で生じた二本のひび割れは重錘の偏心载荷によると思われる停止後の横揺れで、軸方向ひび割れ (以下、縦ひび割れ) により連結されていることもわかる。

(2) 最大入力速度

時刻歴応答から、ひび割れは基盤が急停止した直後に発生していると考えられる。この時間は、非常に大きな加速度が発生しているが、高周波成分を多く含んでいるためひび割れ発生時の正確な加速度の値がわからない。そこで、最大値が明確である入力速度に着目して考察を行う。実験結果より得られた各実験ケースの最大入力速度を表-5に示す。実験前には低速、中速、高速としてそれぞれ約0.35,

0.69, 1.38 m/s程度と予想したが、実験平均値では低速、中速、高速それぞれ0.57, 0.99, 1.10m/sと高速ではやや小さめに、低速、中速ではかなり大きな結果となった。しかし、表-5をみるとひび割れ発生の限界最大速度は、約50~60cm/s程度でひび割れが発生する可能性がある (例えば、表-5の通しボルトの低速では約53cm/sの最大入力速度でBのひび割れタイプが発生している)。

(3) 破壊形態

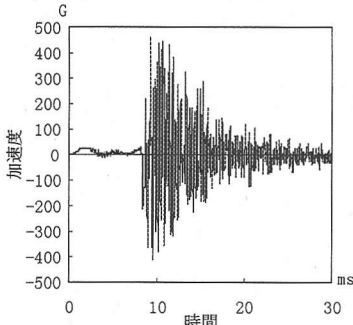
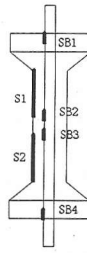
実験結果から供試体の破壊形態は、実験後の供試体の観察とひずみデータにより大きく①無傷, ②ひび割れ一本, ③ひび割れ二本, ④水平+縦ひび割れ, ⑤破断の5種類に分類された。破壊形態の模式図を図-12に、各実験ケースの破壊形態による分類を表-5に示す。また、各供試体の破壊状況を写真-7に示す。

(a) 上下ボルトタイプは、中速および高速ではいずれも破断し、低速では破断が無傷であった。破断発生位置はボルトの埋め込み深さ方向の端部付近によくみられた。この部位は、断面の軸方向剛性変化点でもあり、ボルトの補強効果が失われる位置近傍であることがわかる。

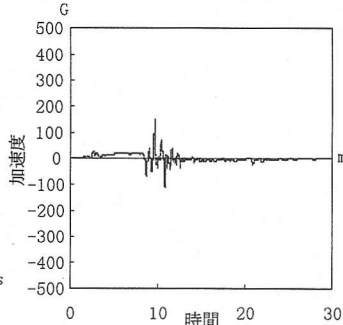
(b) 通しボルトタイプは、中速および高速ではBまたはCタイプのひび割れが一本または二本発生し、低速ではBまたはAタイプのひび割れが無傷であった。ひび割れ一本の場合は、供試体の中央部から約5cm程度上部に発生する傾向があるが、ひび割れ二本では特にそのような傾向は認められなかった。

(c) 段落シタイプは、高速および中速ではBタイプのひび割れ一本、低速ではすべて無傷であった。ひび割れが発生する場合は、全ての実験ケースで一本のみでほぼ供試体中央部に発生する傾向が認められた。これは、供試体中央部が軸方向鉄筋量の変化点すなわち実際のRC橋脚の段落しに相当する部位であり、剛性変化点に応力が集中することと表していると思われる。

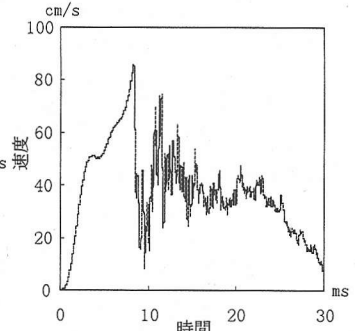
(d) テーパー付タイプは、通しボルトと同じ傾向にあるが、ひび割れは全て二本以上発生しており、中速および高速ではひび割れどうしを軸方向に連結する縦ひび割れもみられた。これは、重錘がわずかに偏心して上載されると供試体柱部分が他の供試体より細いため、突き上げ後 (ひび割れ発生後) に偏心の影響を受け、あたかも水平動を受けたかのように縦ひび割れも発生している。この現象は高速ビデオからの映像からもその挙動を確認できた。



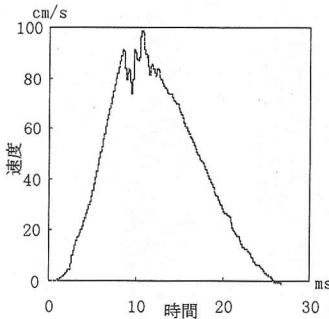
(a) 入力加速度～時間関係



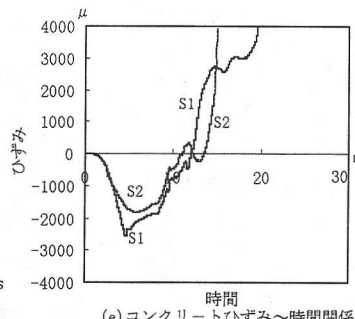
(b) 応答加速度～時間関係



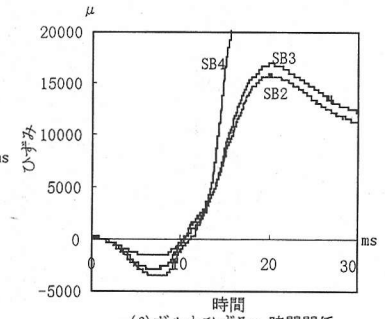
(c) 入力速度～時間関係



(d) 応答速度～時間関係



(e) コンクリートひずみ～時間関係
(S1, S2)



(f) ボルトひずみ～時間関係
(SB2, SB3, SB4)

図-11 テーパー付 50TH-H-2 の計測データ

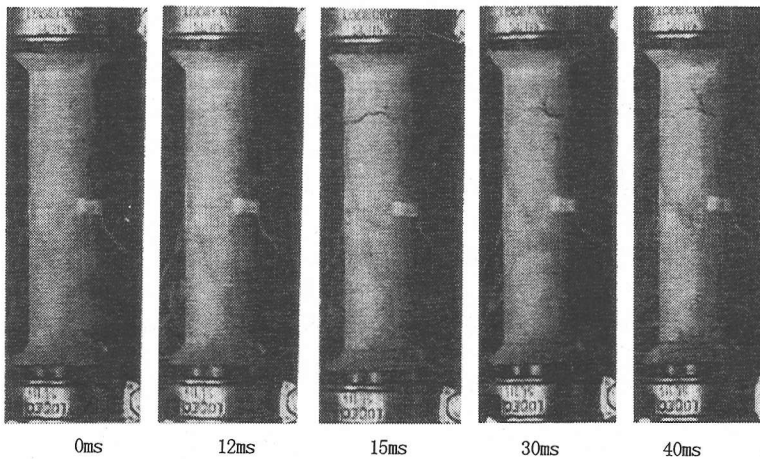


写真-6 テーパー付 50TH-H-2 の破壊進展過程

表-5 最大入力速度(単位: cm/s)と破壊形態との関係

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		テーパー付	
	最大速度	破壊形態	最大速度	破壊形態	最大速度	破壊形態	最大速度	破壊形態
低速	63.0	E	52.9	B	56.6	A	71.5	A
	50.8	A	54.6	A	55.4	A	72.4	C
中速	95.4	E	97.5	C	101.8	B	84.6	D
	105.9	E	102.6	B	107.5	B	95.1	D
高速	120.1	E	124.8	C	112.2	B	102.9	D
	120.3	E	100.0	C	110.6	B	85.7	D

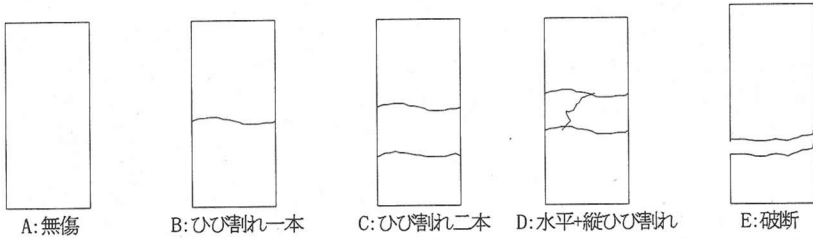


図-12 破壊形態

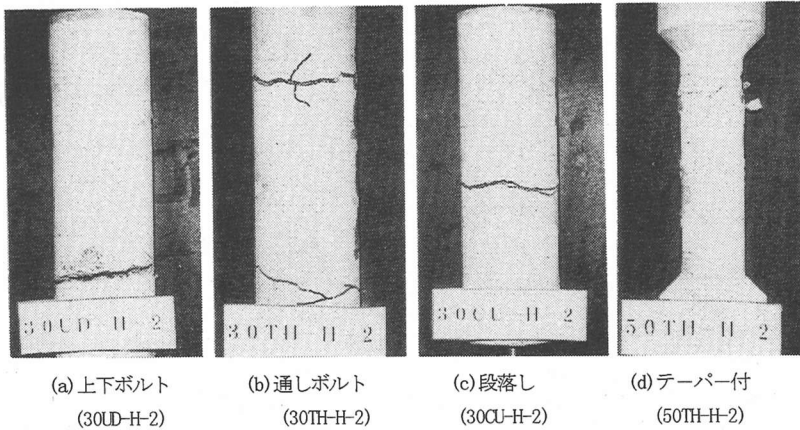


写真-7 各供試体の破壊例

以上の各供試体の破壊形態から、ひび割れ発生は供試体軸方向の剛性変化点に多く発生する傾向があることがわかった。また、コンクリート断面の減少にともなう破壊の増大および鋼材による補強効果を確認できた。

(4) R C 橋脚の輪切り状ひび割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 橋脚の輪切り状ひび割れが衝撃的上下動で生ずるとした場合に必要な入力値を模型実験における相似側¹⁹⁾を用いて推定する。ここでは、前述図-4(b)通しボルト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 6.4 kgf/cm^2 (0.6 N/mm^2) 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 R C 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。よって、原型の重量を $F_g = M \cdot g$ 、橋脚にかかる作用力を $F_s = \sigma \cdot \ell^2$ 、慣性力 $F_i = M \cdot (\ell/t^2) = M \cdot V^2/\ell$ (ただし、 σ : 応力、 ℓ : 長さ、 M : 質量、 t : 時間、 g : 重力加速度、 V : 速度) とすれば、模型が原形と相似になるためには、次式を満足しなければならない。

$$\frac{F_g}{F'_g} = \frac{F_s}{F'_s} = \frac{F_i}{F'_i} \quad (1)$$

ここで、ダッシュは模型を意味する。この関係をパイナンバー $\pi_1 = F_i/F'_s$, $\pi_2 = F_i/F_g$ を用いて書くと、次式を満足することになる。

$$\pi_1 = \pi'_1, \quad \pi_2 = \pi'_2 \quad (2)$$

式 (2) の条件および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、つまり $\sigma = \sigma'$, $\rho = \rho'$ であることを考慮すると次式が得られる。

$$\frac{M}{M'} = \left(\frac{\ell}{\ell'}\right)^3 = s^3$$

$$\frac{A}{A'} = \frac{1}{s}, \quad \frac{V}{V'} = 1, \quad \frac{T}{T'} = s \quad (3)$$

ここで、 M , A , V , T , ℓ : それぞれ質量、加速度、速度、時間、長さでダッシュは模型における各物理量、 s : スケールファクターを表す。先の実験結果より (b) 通しボルトの場合、低速領域でひび割れ発生 (最大入力速度: 52.9cm/s, 速度低下時間: 約 1ms) もしくは無傷 (最大入力速度: 54.6cm/s, 速度低下時間: 約 1ms) であることから、この程度の入力速度がひび割れを生じる限界と考えられる。平均値より約 54cm/s とすると、実際の地震時の最大速度 V は、式 (3) より $V = V' = 54\text{cm/s}$ となる。また、最大速度 V から速度がほぼゼロになる時間 T は、 $T = sT' = 30\text{ms}$ となる。したがって、最大約 54kine 以上の速度が約 30ms でゼロになるような地盤の上下動が RC 橋脚に作用すると、輪切り状ひび割れが生じる可能性がある¹³⁾。また、この場合の平均加速度は -1.84 G となる。

4. 結論

本研究は、兵庫県南部地震で生じた RC 橋脚の輪切り状ひび割れに注目し、これが衝撃的上下動によるものと考え模型実験的に再現しようと試みたものである。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製し、衝撃突き上げ実験を行った結果、輪切り状ひび割れを再現することができた。また、ひび割れを生

じさせる速度の限界値は約 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ひび割れ一本、③ひび割れ二本、④水平+縦ひび割れ⑤破断と5種類に分類されることがわかった。

(4) 供試体タイプ段落しには、ひび割れは軸方向の剛性変化点すなわち段落し部周辺に集中する傾向が認められた。

(5) 通しボルトおよび段落しタイプでは、ひび割れ発生後にはその近傍においてボルトひずみが増大する傾向があることがわかった。したがって、微小ひび割れが生じた場合でも内部の鋼材は降伏している可能性があると思われる。

(6) テーパー付タイプでは、加速領域において限界圧縮ひずみ 3000~4000 μ に近いひずみが発生していることがわかり、入力速度がより大きくなると圧壊する可能性もあると思われる。

(7) 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。

(8) 実験結果に相似則を用いて実際の RC 橋脚への適用を試みた。実現象とは載荷条件が異なるため慎重に検討しなければならないが、上部工による初期圧縮応力が約 6.4kgf/cm²、主鉄筋比約 1% の RC 橋脚に最大約 54kine 以上の速度が約 30ms でゼロになるような地盤の上下動が作用すると、輪切り状ひび割れが生じる可能性があると思われる。

なお、今後供試体の輪切り状ひび割れの発生メカニズムを追求するため、波動と振動の両面^{6)~15)}から解析的に明らかにしていく必要がある。

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い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) 兵庫県南部地震による道路橋の震災に関する調査中間報告書 (案), 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会, 1995年3月。
- 2) 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。
- 3) 川島一彦, 運上茂樹他: 鉄筋コンクリート橋脚主鉄筋段落し部の耐震性判定法及び耐震補強法に関する研究, 土木研究所報告, 第 189 号, 1993 年 9 月。
- 4) 神戸新聞社: 神戸新聞の 1000 日, プレジデント社,

- p. 41, 1995年11月.
- 5) 日火ニュース (No. 392, 1995年7月号) 特集阪神・淡路大震災, 日本火災海上保険 (株), p. 46.
 - 6) 園田恵一郎, 小林治俊: 地震によるRC柱の衝撃破壊についての一考察, 土木学会第50回年次学術講演会, pp. 1118-1119, 1995年9月.
 - 7) 園田恵一郎, 小林治俊: 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.
 - 8) 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.
 - 9) 竹宮宏和, 堀内深: 衝撃的地震動によるRC構造物の引張破壊現象の可能性, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム, pp. 133-138, 1996年5月.
 - 10) 小野紘一, 河西寛: 衝撃的突き上げ地震動のコンクリート橋脚への影響, 日本機械学会講演論文集, No. 964-1, pp. 184-185, 1996年3月.
 - 11) 宮本文穂, 小野紘一他: RC橋脚の損傷に及ぼす衝撃の上下動の影響に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp. 269-274, 1996.
 - 12) 谷村眞治: 阪神大震災における材料・構造物の衝撃的破壊について (定量的検討), 日本機械学会講演論文集, No. 964-1, pp. 174-175, 1996年3月.
 - 13) 谷村眞治, 三村耕司他: 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.
 - 14) 三村耕司, 谷村眞治: 構造物の衝撃的破壊に関する基礎研究, 日本機械学会講演論文集, No. 964-1, pp. 212-213, 1996年3月.
 - 15) 佐藤誠, 田沢栄一他: 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.
 - 16) 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 日本道路協会, 1990年2月.
 - 17) 酒巻勝: 衝撃現象計測における工学的データ処理法に関する基礎的研究, 防衛大学校地球工学修士論文, 1996年2月.
 - 18) 道路橋示方書・同解説, IV下部構造編, 日本道路協会, 1990年2月.
 - 19) 江守一郎: 模型実験の理論と応用第2版, 技報堂出版, 1998年9月.

(1996. 10. 17 受付)

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

Masuhiro 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.