

# 論文 衝撃的上下動を受ける RC 橋脚の輪切り状ひび割れの再現と 鋼板巻立て補強効果に関する一考察

別府万寿博\*1・香月智\*2・石川信隆\*3・佐野正\*4

**要旨:**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。また、現在行われているRC橋脚段落し部への鋼板巻立て補強の衝撃的上下動に対する有効性に関する検証実験も行った。この際、新たに衝撃突き上げ装置を開発し、既存の高速変形荷重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、実際の段落しを有する円型断面のRC橋脚を想定し縮尺を1/30として作製し、供試体上部に約500kgfの重錘をのせ上部工を模擬した。

**キーワード:** 衝撃的上下動, 水平輪切り状ひび割れ, 衝撃突き上げ装置, 鋼板巻立て補強

## 1. 緒言

1995年1月に発生した兵庫県南部地震は土木、建築構造物に甚大な被害を与えた。その被災例の中には、写真-1に示すRC橋脚の水平輪切り状ひび割れなどのように曲げやせん断では説明しづらい現象もみられた。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、干渉を繰り返したことや縦振動による軸方向の力の発生が考えられる。また、最初に「ドンと突き上げるような揺れ」を感じた後に激しい横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

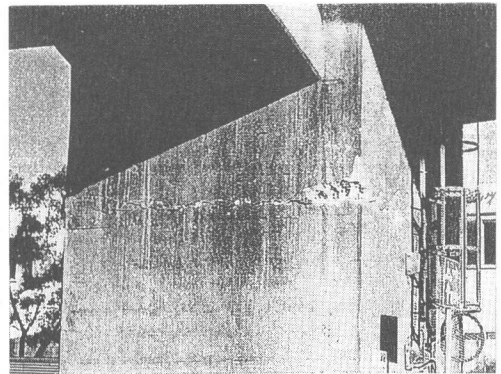


写真-1 RC橋脚の水平輪切り状ひび割れの例

て初期に生じる高周波の衝撃的な上下動が精度よく記録できていない可能性も指摘されている。

そこで本研究は、特にRC橋脚の水平輪切り状ひび割れ破壊に注目し、模型実験的に水平輪切り状ひび割れを再現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実験装置を新たに開発し、従来設置してある高速変形荷重装置と併用することにより衝撃的上下動を現出した。また、兵庫県南部地震においてRC橋脚の段落し部に被害が集中したことから全国的にRC橋脚段落し部の鋼板巻立て補強が実施されており、鋼板巻立て補強が衝撃的上下動に対して果たして有効であるか否かも実験的に検証しようと試みたものである。

*1 防衛大学校	理工学研究科,	正会員
*2 防衛大学校助教授	土木工学科,	工博
*3 防衛大学校教授	土木工学科,	工博(正会員)
*4 ショーボンド建設(株)	補修工学研究所,	工博(正会員)

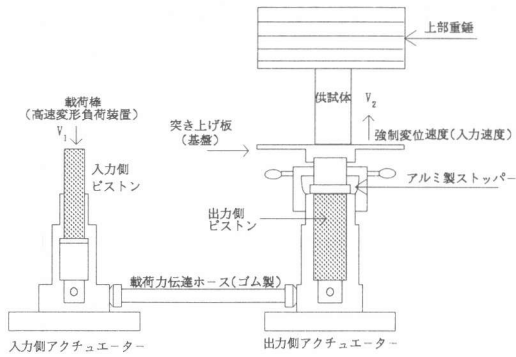


図-1 実験装置の概要

## 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。衝撃突き上げシステムは大きく高速変形負荷装置と図-1 の突き上げ装置で構成されている。高速変形負荷装置は最大約 4.0m/s の速度で載荷する能力を有しており、突き上げ装置は高速変形負荷装置からの力を「てこの原理」により上方向へと変換するものである。すなわち、高速変形負荷装置の力を突き上げ装置の入力側アクチュエーターで受け、載荷力伝達ホースを介して油圧で出力側アクチュエーターに伝達し、突き上げ板(以下、基盤という)上の供試体を衝撃的に突き上げるものである。ここで、入力側アクチュエーターと出力側アクチュエーターのピストンの断面積比より最大突き上げ速度は高速変形負荷装置の最大速度の 1/2.9 倍、すなわち約 1.38m/s となる。また、供試体の突き上げ変位量は 0.5cm とした。

### 2.2 供試体

実際の RC 橋脚が高さ 10m、直径 3m の円形断面をもち、橋脚高さ半分に段落しを有するものを想定して縮尺を 1/30 のコンクリート円柱供試体を作製した。表-1 に供試体作製に用いたコンクリートの示方配合を、図-2 にコンクリートの材料試験結果を示す。基盤および上部の重錘と供試体を固定する必要から供試体の中心を M 10 ボルトで補強したが、その断面積比は約 1.0%~2.4%と実際の

RC 橋脚の鉄筋比とほぼ対応しており、鉄筋補強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。表-2 に M 10 ボルトおよび鉄筋の材料試験結果を示す。試験の結果、降伏点が明確でなかったため 0.2% の残留ひずみを残す応力を引張強度とした。また、実際の RC 橋脚には帯鉄筋(せん断補強筋)が配筋されているが、本研究では柱軸方向の載荷であるため、ここでは第 1 段階として帯鉄筋は考慮していない。供試体には約 500kgf の重錘を上載して高架橋上部工を模擬した。すなわち、供試体の初期圧縮応力は約 6.4kgf/cm<sup>2</sup> となる。供試体の概要を図-3 に示す。現在実施されている鋼板の補強長さ(円柱橋脚の場合直径を d とすると、段落し部を中心として最低、下方向に 0.5 d、上方向に d 区間の補強が原則<sup>1)</sup>)を参考にして、図-3 のように A タイプ:

表-1 コンクリートの示方配合

圧縮強度	34.3N/mm <sup>2</sup>	水	1705N/m <sup>3</sup>
スランブ	10cm	セメント	2989 N/m <sup>3</sup>
空気量	1.0%	膨張材	147N/m <sup>3</sup>
水セメント比	54%	細骨材	10006N/m <sup>3</sup>
細骨材率	55%	粗骨材	8350N/m <sup>3</sup>

表-2 鋼材の材料試験結果

鋼材の種類	引張強度 (平均値, N/mm <sup>2</sup> )	伸び (平均値, %)
M10 ボルト	5 3 7	1 3
D6 異形棒鋼	5 5 8	3 2

[注]:降伏点確認できず

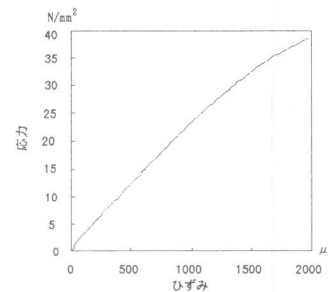


図-2 コンクリートの応力～ひずみ関係  
(材令 28 日)

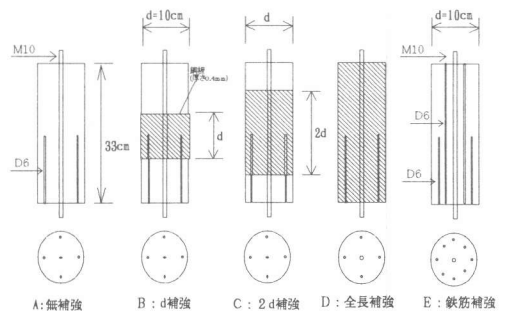


図-3 供試体の概要

表-3 実験ケースの一覧

速度	無補強	D補強	2D補強	全長補強	鉄筋補強
高速	NO-H-1	無	無	無	無
	NO-H-2	無	無	無	無
低速	NO-L-1	10D-L-1	20D-L-1	ALL-L-1	RC-L-1
	NO-L-2	10D-L-2	20D-L-2	ALL-L-2	RC-L-2

補強の無いもの(無補強),Bタイプ:段落しを中心として直径dの長さを補強,Cタイプ:2d長さを補強およびDタイプ:全長補強を鋼板巻立て補強として作製した。ここで,鋼板の巻立て方法は鋼板(材質:ブリキ,厚さ 0.4mm)をエポキシ樹脂により接着した。また,外側補強と内側補強の補強方法の違いを比較するために全長補強と同じ鉄筋量の鉄筋(D6×4本)で内部を補強したもの(Eタイプ)も作製した。

### 2.3 測定項目

図-4 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(PCB社製,計測範囲500G,応答周波数10kHz,固有振動数30kHz)で,基板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。供試体内の鋼材(ボルト,鉄筋)については鋼材用ゲージ(東京測器社製,FLA5-11-5LT)で測定した。図-5 に鋼材のひずみ測定位置を示す。

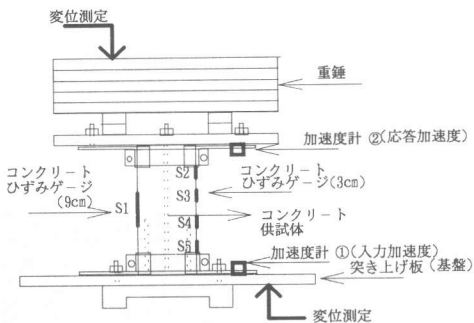


図-4 測定項目

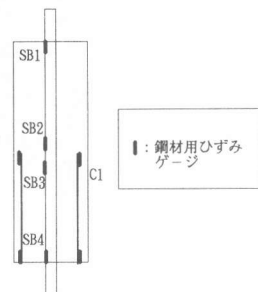


図-5 鋼材ひずみ測定位置

### 2.4 実験ケース

A(無補強)タイプに対し,突き上げ速度を高速(約140cm/s),低速(約70cm/s)で突き上げ実験を行った。また,先に行った衝撃突き上げ実験<sup>2)</sup>より,ひび割れが発生する限界の最大基盤速度は約50~60cm/s程度であることがわかっているので,補強した供試体については低速のみの実験を行った。実験ケースを表-3に示す。また,高速および低速の突き上げ速度に対して10 $\mu$ 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. 実験結果と考察

#### 3.1 水平輪切り状ひび割れの再現

図-6 に実験ケース'NO-H-1(A(無補強)タイプ,高速)'の結果を示す。図-6(a)の入力加速度~時間関係から約8msまでは最大加速度が約40Gの山なりの曲線で,その後非常に大きな高周波成分が観察される。これは,約8msまで基盤が供試体を突き上げて,その後は基盤が急停止するので基盤の高剛性の影響によるものと思われる。図-6(b)は入力加速度を時間積分した入力速度~時間関係である。これより,約8msにおいて最大速度約110cm/sとなり,その後瞬時(約2ms)に約40cm/sまで低下してなだらかな増減をしており,衝撃突き上げシステムが基盤の最大速度から瞬時に速度を低減させる入力特性をもつことがわかる。図-6(c)はボルトのひずみ~時間関係(SB1,SB2,SB3,SB4)である。実験結果の観察から供試体中央部に水平輪切り状ひび割れが生じたが,図-6(c)において全てのひずみ(SB1,SB2,SB3,SB4)は約12msまではほぼ同じ応答を示しており,その後ひび割れ部のSB2,SB3のひずみ応答が卓越している。これより,約12msでひび割れが発生したと思われる,ひび割れ発生後には供試体のボルト中央部は約2.4%もの大きなひずみになり,約0.8%の残留ひず

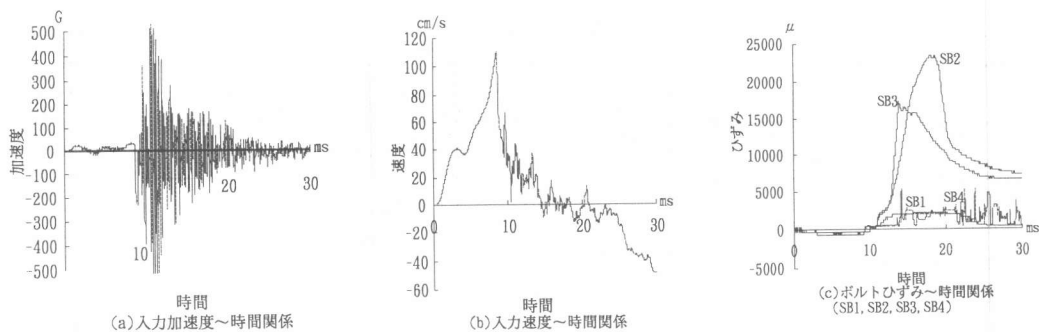


図-6 A(無補強)タイプ NO-H-1 の計測データ

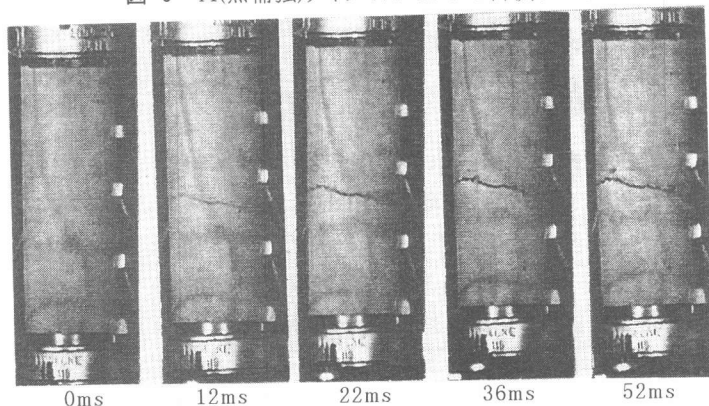


写真-2 A(無補強)タイプ(NO-H-1)の破壊進展過程  
(輪切り状ひび割れが中央に発生している)

みが生じていることがわかる。また、ボルトの軸方向最下部と最上部のひずみ(SB1,SB4)の引張りひずみの最大値はひ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。高速ビデオによる破壊進展過程を写真-2 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り、図-6(c)のボルトひずみ～時間関係の結果と対応している。

以上の実験結果から、ひび割れ発生メカニズムは供試体を一質点系ばねモデルと想定して考察すると次のように考えられる。まず、基盤が供試体を突き上げている間は、重錘に作用する慣性力は下向きであり柱部分は圧縮力を受ける。次に基盤が急停止する間には非常に大きな負の加速度が発生して慣性力は上向きとなる。したがって、柱部分は急激に引張られ断面が変化する段落し部に応力が集中して輪切り状のひび割れが発生するものと考えられる。本実験結果にレプリカ相似則を適用すると実現象と模型実験では速度は同じという結果が得られ、兵庫県南部地震においても本実験と同様の地盤速度が作用すると輪切り状ひび割れが発生すると考えられる。

### 3.2 低速度領域における破壊状況の比較

入力条件がほぼ同じである実験ケースで各供試体の挙動を比較するため、最大突き上げ速度が約 70cm/s における各供試体の破壊状況を観察する。入力値の一例として図-7 に実験ケース‘NO-L-1(A(無補強)タイプ, 1 体目)’の入力加速度～時間関係を、図-8 に入力速度～時間関係を示す。図-7 より約 12ms まで最大加速度約 50G で基盤は上昇し、急停止したと考えられる。また、図-7 より約 12ms で最大速度約 72cm/s となり、約 14ms には 0cm/s となっている。他の供試体の実験ケースもほぼ同様の入力特性のものを選んだ。実験後の供試体観察より図-9 のようにA(無補強)タイプとE(鉄筋補強)タイプにのみ輪切り状ひび割れが発生した。図

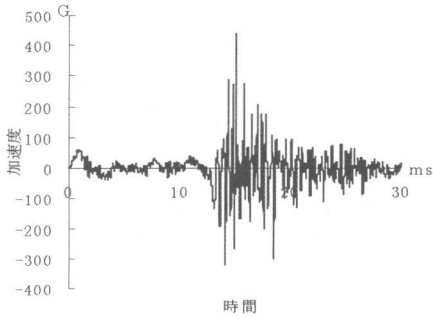


図-7 実験ケースNO-L-1の  
入力加速度～時間関係

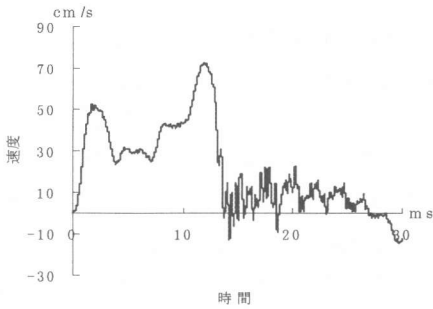


図-8 実験ケースNO-L-1の  
入力速度～時間関係

より両タイプともにひび割れの発生位置が段落し部近傍であることがわかる。またB,C,Dの鋼板補強タイプの供試体には、コンクリートおよび鋼材のひずみ応答からひび割れは発生していないと判定した。

### 3.3 補強効果

#### (1) 鋼板巻立て補強効果の影響

図-10にA(無補強)タイプと鋼板巻立て補強タイプの代表としてC(2d補強)タイプにおける段落し部のボルトのひずみ(SB2)～時間関係を示す。A(無補強)タイプは突き上げ開始後約18ms、すなわち基盤停止後約4msでひび割れが発生したため、ひび割れ発生と同時にボルトが降伏し、最大約4000 $\mu$ の大きな引張りひずみが生じ残留ひずみも残っていることがわかる。一方、C(2d補強)タイプは弾性応答をしており補強の効果が認められる。

#### (2) 鋼板巻立て補強長さの影響

図-11に各鋼板巻立て補強の供試体(B,C,D)の段落し部のボルトのひずみ(SB2)～時間関係を示す。図-11よりB(d補強)タイプがC(2d補強)タイプやD(全長補強)タイプに比べ圧縮、引張りともに最大ひずみがやや大きい弾性応答を示していることがわかる。しかし、全体的に補強長さによる差異はあまり顕著ではないことが認められる。

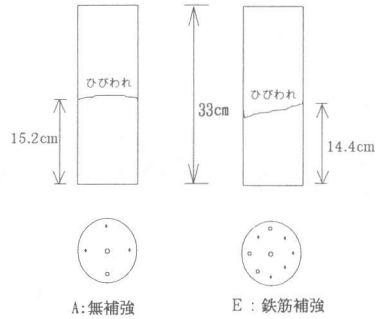


図-9 破壊形態

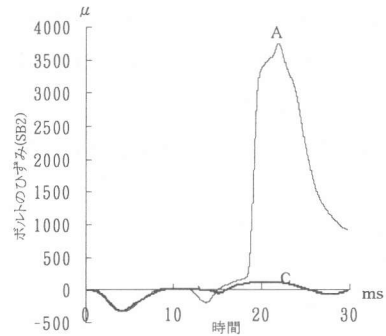


図-10 A(無補強)タイプとC(2d補強)タイプの  
ボルトのひずみ応答(SB2)の比較

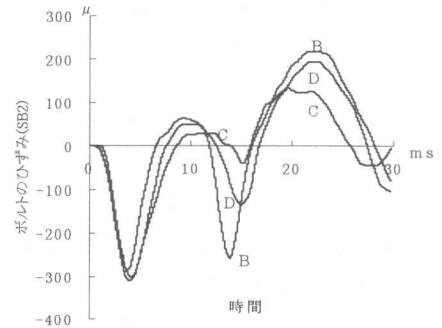


図-11 各鋼板補強タイプ(B,C,D)のボルトのひずみ  
応答(SB2)の比較

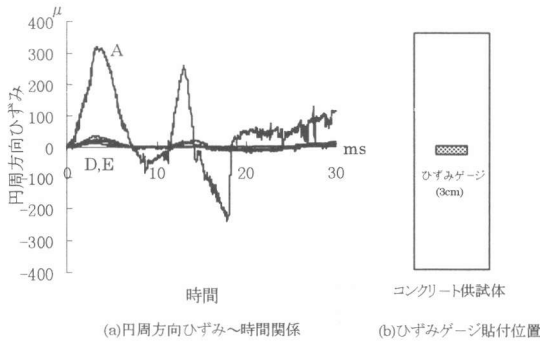


図-12 A(無補強)タイプとD(全長補強)タイプおよびE(鉄筋補強)タイプの円周方向のひずみ応答の比較

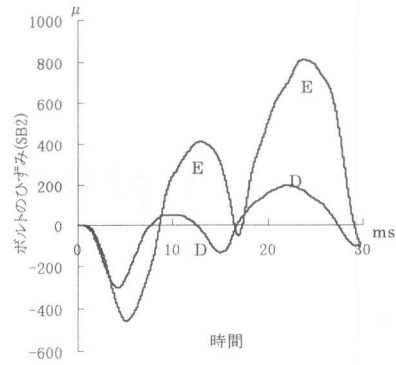


図-13 E(鉄筋補強)タイプとD(全長補強)タイプのボルトのひずみ応答(SB1)の比較

### (3)鉄筋補強の効果

図-12(a)にA(無補強)タイプとD(全長補強)タイプおよびE(鉄筋補強)タイプの円周方向のコンクリートのひずみ～時間関係を示す。ひずみゲージの貼付位置は図-12(b)に示すとおりである。D(全長補強)タイプおよびE(鉄筋補強)タイプの円周方向のひずみは、A(無補強)タイプよりも小さく約 1/10 であり、供試体が引張られるときの断面積の減少に対し鋼板補強と鉄筋補強が有効に作用していると思われる。次に、図-13にE(鉄筋補強)タイプとD(全長補強)タイプの段落し部のボルトのひずみ(SB2)～時間関係を示す。どちらも補強鋼材量は同じであるにも拘わらず、D(全長補強)タイプの方がE(鉄筋補強)タイプよりも圧縮、引張りともに小さい。また、E(鉄筋補強)タイプにはひび割れが発生したことから、Dタイプの鋼板補強の有効性が認められる。これは、補強方法の違いがひび割れ発生メカニズムに関係していると考えられ、鋼板巻立てによる拘束効果や接着に用いたエポキシ樹脂の影響が大きいと思われる。

## 4. 結論

本研究の成果をまとめると以下のようになる。

- (1) 衝撃突き上げ実験により、水平輪切り状ひび割れを再現することができた。
- (2) 鋼板巻立て補強は、無補強に比べ衝撃的上下動に対して有効であることが実験的に検証された。
- (3) 鋼板巻立て補強の長さの効果について、補強長さが大きいほどひずみ応答はやや小さいことがわかった。しかし、補強長さの差異はさほど顕著ではなかった。
- (4) 補強方法の違いは、RC橋脚外部に鋼板巻立て補強する方が内部を鉄筋で補強するよりも有効であると思われる。

## 参考文献

- 1) 道路構造物の補修要領,第2部,コンクリート構造物,阪神高速道路公団,平成2年6月。
- 2) 別府万寿博,香月智,石川信隆: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割れ,第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム,pp.139~144,1996年5月。