

論文 衝撃的上下動を受ける RC 柱の繊維補強効果とその動的水平耐力について

原田 耕司*¹・石川 信隆*²・太田 俊昭*³・日野 伸一*⁴

要旨: 本研究は、衝撃的上下動を受ける RC 柱の繊維補強効果について実験的に検討を行ったものである。すなわち、連続繊維巻立て補強を施した RC 柱供試体に対して衝撃的上下動実験と水平高速載荷実験の 2 種類の動的実験を行い、その動的水平耐力および変形性能について検討を加えた。実験の結果、連続繊維巻立て補強した RC 柱供試体は、衝撃的上下動後の水平動に対する補強効果を有することを確認できた。

キーワード: 衝撃的上下動, 水平輪切り状ひび割れ, RC 柱, 連続繊維巻立て補強

1. はじめに

都市直下型の兵庫県南部地震あるいは台湾集集大地震では、多数の構造物が壊滅的な被害を受け、多くの機関からその被害報告が発表されている¹⁾。その中には、写真-1 に示すような鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC 橋脚と呼ぶ）の水平輪切り状ひび割れが報告されている。この被災例の原因は、水平動であるとも考えられているが、その一方で被災者の証言等から、短周期の上下動（以下、衝撃的上下動と呼ぶ）による損傷の可能性について、実験あるいは解析による検討が行われ、衝撃的上下動の可能性も示唆されている^{2),3)}。著者らも大型 RC 柱を用いた衝撃的上下動実験により、水平輪切り状ひび割れの再現に成功しており、衝撃的上下動の可能性もあり得ることを示した⁴⁾。

一方、兵庫県南部地震以降盛んに行われている RC 橋脚の耐震補強には、コンクリート巻立て補強、鋼板巻立て補強および連続繊維巻立て補強がある。特に連続繊維巻立て補強は、我が国が世界の先端を進んでおり、コスト的な課題をクリアすれば将来有望な技術である。しかし、この技術は水平方向の荷重に対する検討に基づいており⁵⁾、衝撃的上下動への検討はなされて

いない。

そこで本研究は、連続繊維巻立て補強した RC 柱にまず衝撃的上下動を作用させ、その後水平高速載荷実験を行い RC 柱の連続繊維巻立て補強の効果について検討したものである。すなわち、まず高さ 30cm、一辺 10cm の段落しを有する角型断面の RC 柱供試体を準備し、これを連続繊維によって部分的に補強するもの、全長に渡って補強するものおよび無補強の 3 種類のケースに設定した。続いてこれらの供試体に対して衝撃的上下動実験を行い事前に損傷を与え、さらに水平高速載荷実験を行い、その動的水平耐力および変形性能について比較検討を行った。

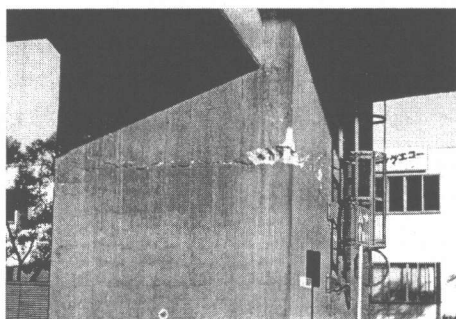


写真-1 RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れ

*1 西松建設(株)九州支店土木部土木課係長 工博(正会員)

*2 防衛大学校教授 建設環境工学 工博(正会員)

*3 九州大学教授 大学院工学研究院 工博(正会員)

*4 九州大学助教授 大学院工学研究院 工博(正会員)

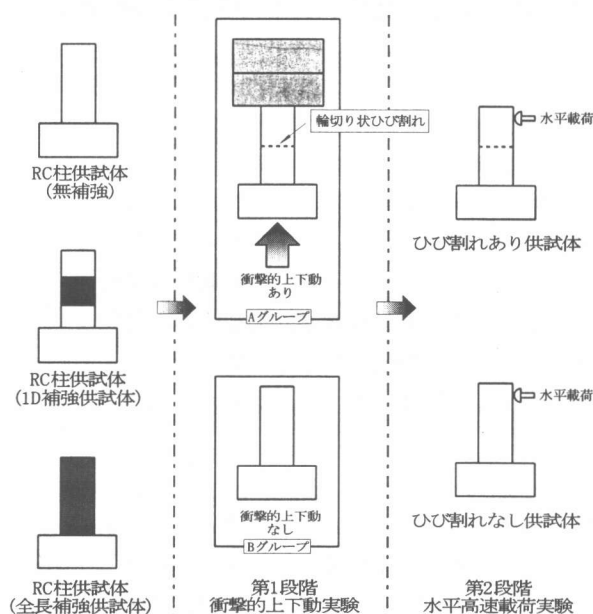


図-1 実験過程

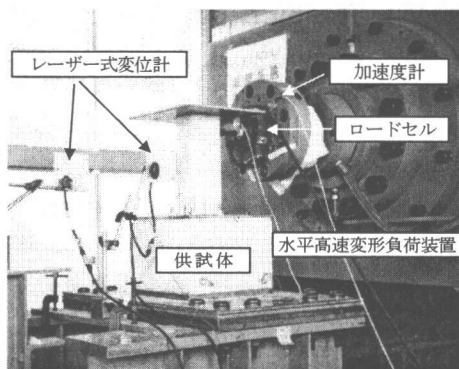


写真-2 水平高速荷重実験状況

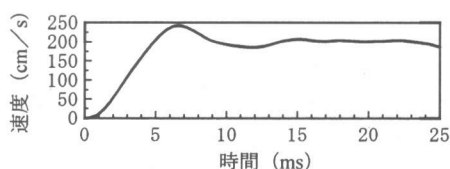


図-2 水平高速変形荷重装置の荷重速度の時刻歴

2. 実験概要

2.1 実験方法および補強方法

本研究では、図-1に示すように無補強供試体を含めて3種類の補強条件の異なる供試体に対し2段階の実験を行った。すなわち、まず第1段階として準備した3種類の供試体をAおよびBグループの2グループに分け、Aグループに対しては衝撃的上下動実験を実施し、供試体に水平輪切り状ひび割れを生起させる。もう一方のBグループは、衝撃的上下動実験を行わず健全な状態のままとする。その後、第2段階として両方のグループの供試体に水平方向の高速荷重を行い、その動的水平耐力、破壊形態および変形性能を調べた。

なお、1D補強供試体とは、段落しを有するRC柱供試体の段落し上側および下側に0.5D(D:断面幅, 100mm)ずつ合計1Dの範囲を連続繊維により巻立て補強したものであり、全長補強供試体とは、全長に渡って巻立て補強したものである。補強量は、保証耐力588kN/mのアラミド繊維シートを帯鉄筋方向および主鉄筋方向にそれぞれ1層貼り付けた。なお、連続

繊維の貼付け方法は、実施工に準じて行った。

2.2 水平高速荷重実験

水平高速荷重実験は、写真-2に示す水平高速変形荷重装置を使用した。水平高速変形荷重装置は、最大荷重980kN、最大荷重速度3m/s、最大ストローク150mmの能力を有する。今回の実験では図-2に示すように、水平荷重速度を兵庫県南部地震で記録された最大速度をやや上回る約2m/sに設定した⁶⁾。ここでは、高速での交番荷重は困難であるため、一方向単一荷重による評価とした。実験終了条件は、実験装置の構造上から荷重制御ができないため、停止ストロークを50mmに設定した。

2.3 供試体

2.3.1 供試体の形状および配筋

供試体の柱部は、図-3に示すように断面100mm×100mm、高さ300mmである。これは、断面3m×3m、高さ10mのRC橋脚の約1/30程度の縮尺となる。

供試体柱部の配筋は、図-4に示すように全長に渡ってD6鉄筋を4本、下半分については加えてD6鉄筋を4本(計8本)配し、いわゆ

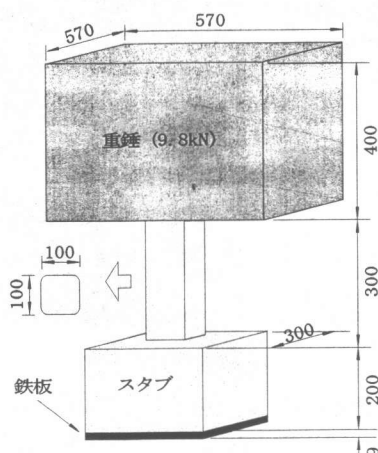


図-3 供試体寸法 (mm)

る柱中央部で段落しに相当する配筋状態となっている。また、主鉄筋の端部は定着を確保するため上下端の鋼板に溶着している。主鉄筋比は段落し下部が約 2.3%，上部が約 1.1% となり、実橋脚で使用されている鉄筋比 (0.8～6%) と同じ範囲としている。また帯鉄筋比は、実橋脚で採用されている範囲の 0.24% に設定した⁷⁾。

なお、図-3 の供試体上部の重錘は、衝撃的上下動実験時のみにセットし、水平高速載荷実験時には重錘を取り外して実験を行った。

2.3.2 使用材料

供試体に用いたモルタルの圧縮強度は、約 18N/mm^2 であり、鉄筋は、主筋に D6 の SD295A (引張強さ: 613N/mm^2) を、帯鉄筋には付着が期待できる D3 異形鉄筋 (引張強さ: 509N/mm^2) を使用した。

2.4 計測項目

水平高速載荷実験の計測は、写真-2 および図-5 に示すように行った。変位は、載荷点部と供試体中間部の 2 ヶ所についてレーザー式変位計によって計測した。

荷重は、図-5 に示すように載荷部根元にあるロードセルで計測するが、載荷直後では立ち上がりの加速度によって、ロードセルより前方にある治具や供試体自体の慣性力が混在して計測されるので、計測に含まれる慣性力の影響を

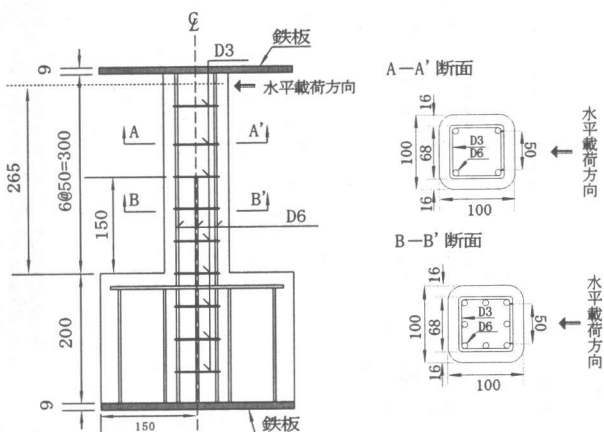


図-4 供試体の配筋 (mm)

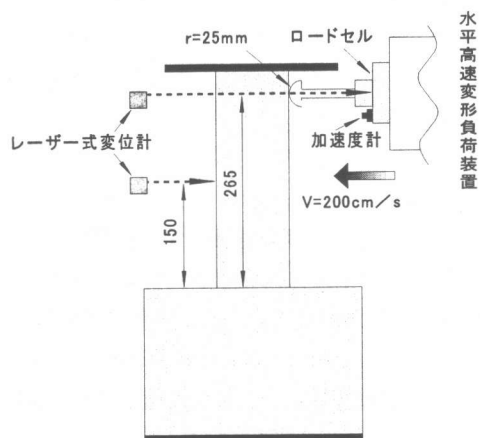


図-5 水平高速載荷実験の計測概要 (mm)

除くため、RC 柱の水平抵抗力 R を式 (1) で修正して整理するものとした。

$$R = P - m\ddot{u} \quad (1)$$

ここで、 R : 水平抵抗力

P : ロードセルの値

m : ロードセルより前方の質量

$\ddot{u}$: 水平加速度

なお、水平高速載荷実験より測定されたデータは、コンピュータにより $20\mu\text{s}$ 間隔のデジタルデータとして記録されるシステムにより保存した。

表－１ 実験ケース

No.	補強方法	衝撃的上下動 有無
1	無補強	有 (A グループ)
2		無 (B グループ)
3	1D 補強	有 (A グループ)
4		無 (B グループ)
5	全長補強	有 (A グループ)
6		無 (B グループ)

2.5 実験ケース

実験ケースは、表－１のように6ケースについて行った。すなわち、補強を施さない無補強供試体、1D 補強供試体、全長補強供試体のそれぞれに対して、衝撃的上下動実験を行うもの (A グループ) と行わないもの (B グループ) を設定し、それぞれについて高速で水平載荷実験を行った。

3. 実験結果

3.1 衝撃的上下動実験 (第一段階)

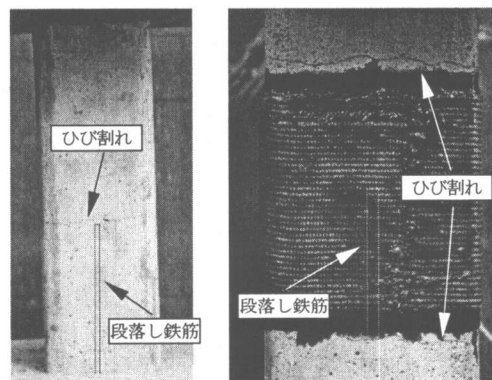
衝撃的上下動実験の最大加速度は、約 45G であった。本実験は 1/30 モデルの供試体を用いているので、これにレプリカ則を適用して実物スケールに換算すると、最大加速度は約 1.5G となる。

写真－３には、衝撃的上下動実験後の無補強供試体および 1D 補強供試体のひび割れ発生状況を示す。無補強供試体では、段落し部に 1 本水平輪切り状ひび割れが発生している。一方、1D 補強供試体では、段落し部にひび割れは発生していないが、巻立て繊維の端部に輪切り状ひび割れが発生している。すなわち、部分的に連続繊維で巻立て補強することにより、段落し部のひび割れは防止することは可能であるが、巻立て繊維の端部にひび割れが発生し、ひび割れの位置が変わることがわかった。なお、全長補強供試体では、目視観察の範囲ではひび割れは観察できなかった。

3.2 水平高速載荷実験 (第二段階)

(1) 最終破壊形態

無補強供試体の最終破壊形態は、写真－４に



(a) 無補強供試体 (b) 1D 補強供試体
写真－３ 上下動実験後のひび割れ発生状況

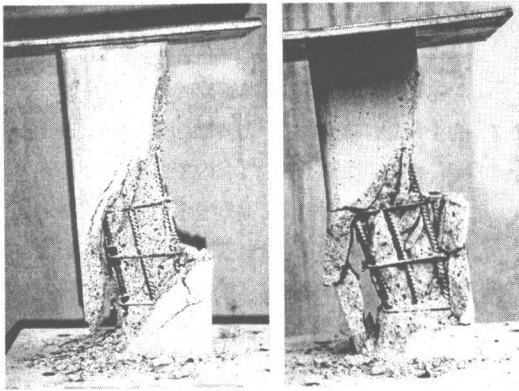
示すように。衝撃的上下動の有無に拘わらず、斜めひび割れが発生しせん断破壊型を呈している。また、衝撃的上下動を受けた供試体は、衝撃的上下動を受けていない供試体に比べ、段落し部の損傷が若干激しいことがわかる。

写真－５および６に示す補強供試体の最終破壊形態は、明らかに無補強供試体と異なり、基部に塑性ヒンジが形成され曲げ破壊型を呈しており、衝撃的上下動の有無による最終破壊形態の差異は観察できなかった。

(2) 荷重～変位関係

図－６には、無補強供試体、1D 補強供試体および全長補強供試体の荷重～変位関係を示す。図－６ (a) に示す無補強供試体の衝撃的上下動を受けた RC 柱供試体は、衝撃的上下動を受けていない健全な RC 柱供試体に比べ、最大耐力で約 10%、終局変位 (荷重が最大耐力より 80% 低下した時点の変位) で約 15% 低下している。このことから、実際の RC 橋脚が、衝撃的上下動を受けた直後に水平動を受けると、脆性的に破壊することが予想される。したがって RC 橋脚には、衝撃的上下動を考慮した補強が必要ではないかと考えられる。

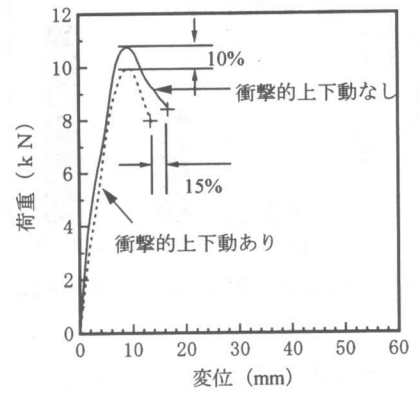
図－６ (b) および (c) に示す 1D 補強と全長補強の衝撃的上下動を受けた供試体は、衝撃的上下動を受けていない補強供試体と同様に、無補強供試体に比べ高い変形性能を示している。



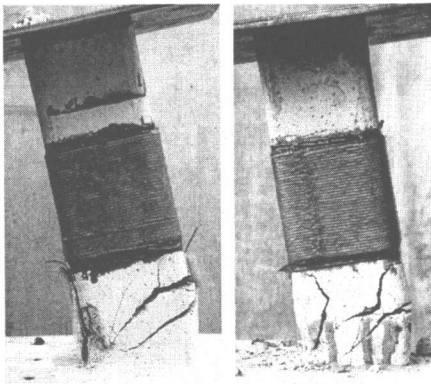
(a) 上下動なし

(b) 上下動あり

写真-4 無補強供試体の最終破壊形態



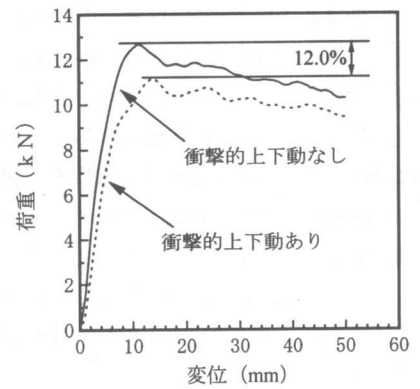
(a) 無補強供試体



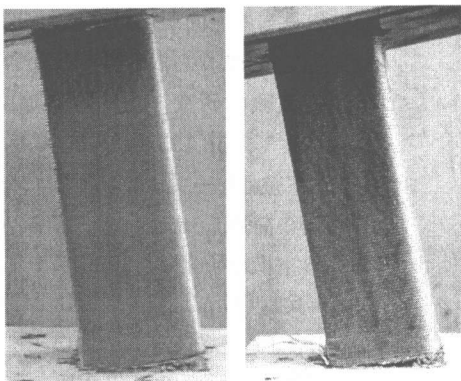
(a) 上下動なし

(b) 上下動あり

写真-5 1D 補強供試体の最終破壊形態



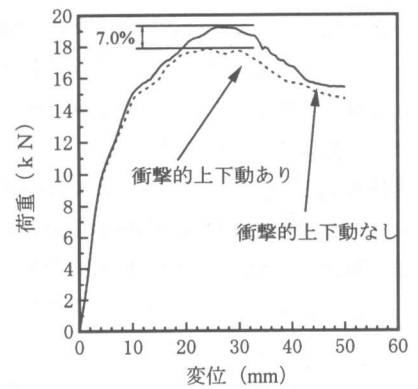
(b) 1D 補強供試体



(a) 上下動なし

(b) 上下動あり

写真-6 全長補強供試体の最終破壊形態



(c) 全長補強供試体

図-6 荷重～変位関係

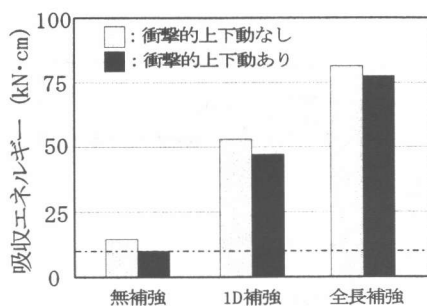


図-7 吸収エネルギーの比較

(3) 吸収エネルギー

図-7には、図-6のP- δ 関係より求めた吸収エネルギーの比較を示す。無補強供試体では、衝撃的上下動により吸収エネルギーが約30%低下しているが、1D補強供試体および全長補強供試体の吸収エネルギーの低下は、それぞれ約12%および約5%である。また、衝撃的上下動を受けた1D補強供試体および全長補強供試体の吸収エネルギーは、衝撃的上下動を受けた無補強供試体の吸収エネルギー(図中一点鎖線)に比べ、5倍以上向上している。

以上より1D補強供試体および全長補強供試体は、衝撃的上下動後の水平動に対する補強効果を有することを確認できた。

4. まとめ

本研究は、RC柱供試体に対して、衝撃的上下動実験と水平高速載荷実験の2段階動的実験を行い、その動的水平耐力および変形性能に関して検討したものである。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- ①衝撃的上下動による水平輪切り状ひび割れが発生した無補強供試体の動的水平耐力および終局変位は、それぞれ約10%および約15%低下し、またその吸収エネルギーは、約30%ほど低下することが認められた。
- ②アラミド繊維により部分的に巻立て補強を施すと(1D補強)、段落し部のひび割れは防止できるが、巻立て繊維の端部にひび割れが発生することが注目された。

③1D補強供試体および全長補強供試体は、衝撃的上下動後の水平動に対する補強効果を有することを確認できた。

本研究は、連続繊維巻立て補強供試体の衝撃的上下動の影響を、最終破壊形態およびP- δ 関係から考察を加えたものであり、今後メカニズム等のより詳細な検討を行う予定である。

謝辞：本実験を実施するに当たり、防衛大学の園林研究員(当時)、別府助手、西本研究科学生、政枝研究科学生、竹本研究科学生にご協力頂き、さらに本研究は文部省科学研究費の補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

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講演論文集, 1995年5月
- 2) 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講演論文集, pp.133-138, 1996年6月
- 3) 別府万寿博, 香月智, 石川信隆, 宮本文穂：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, 土木学会論文集, No.577/I, pp.165-180, 1997年10月
- 4) 原田耕司, 石川信隆, 香月智, 太田俊昭, 日野伸一：下方向からの衝撃力を受けるRC柱の波動場から振動場への移行状態に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.662/V, pp.135-148, 2000年11月
- 5) アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案), アラミド繊維研究会, 1998年1月
- 6) 1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析II, JR地震情報No.23d, (財)鉄道総合技術研究所, 1996年3月
- 7) 幸左賢二, 鈴木直人：耐力比を用いたRC橋脚のじん性率評価の検討, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1383-1390, 1998年3月