

# 論文 衍拘束を有する RC 橋脚の FRP シートによる曲げ補強効果に関する実験

三田村 浩<sup>\*1</sup>・新山 慎<sup>\*2</sup>・佐藤 昌志<sup>\*3</sup>・伊藤 浩<sup>\*4</sup>

**要旨:** 実地震時挙動に即した合理的な耐震設計補強法を確立するために、橋脚の実地震時挙動と同様に橋脚天端の鉛直方向変位を任意に制御可能な実験装置を開発した。本実験は、衍拘束が最も厳しい状態を設定し、鉛直変位を完全拘束した状態で、炭素繊維シートによる曲げ補強効果について検証した。その結果、載荷初期の段階では、耐力の向上が見受けられるが、段落し部近傍においてピーリング（シートの引き剥がれ）現象が発生し耐力が減少した。このことから、炭素繊維シートによる曲げ補強時には、シート巻き付け等によって剥離を抑制する必要があることが明らかになった。

**キーワード:** 耐震補強, RC 橋脚, 炭素繊維シート, 水平交番載荷, 衍拘束

## 1. はじめに

平成 7 年に発生した阪神・淡路大地震を契機に既設 RC 橋脚や RC 建物の柱部の補強問題に関する実験的研究が盛んに行われている。RC 橋脚の補強問題に限定すれば、通常、耐力や韌性能向上に関する実験研究は上部工の重量を考慮するために断面に 1 MPa 程度の軸方向応力相当分の鉛直荷重を載荷させた状態で水平交番載荷実験等を実施している<sup>1) 2)</sup>。

一方、北海道開発局開発土木研究所では、実橋のピン支承部が上部工と回転自由の条件をもとに緊結されていることより、大偏心状態の場合には必ずしも一定軸力状態にならないものと考え、これらの影響を考慮して評価するために、実規模橋梁模型を製作して実験を行っている<sup>3) 4)</sup>。しかしながら、実挙動に即した合理的な耐震補強設計法を確立するためには、衍の曲げ剛性や上部工重量の影響を定量的に明らかにしなければならない。

本研究では、小型橋脚模型を用いてこれらの影響を検討するために、橋脚天端部に作用する軸力や、軸方向変位を任意に制御可能な試験装置を開

発し、段落し部を有する RC 橋脚模型に関する実験を行ったので報告する。

本装置は、橋脚の実地震時挙動と同様、橋脚天端部を水平方向に固定し、橋脚基部を変位制御することによって加力するものである。実験は、衍拘束が最も厳しい状態を設定し、加力時に橋脚天端の鉛直変位を完全拘束することとし、段落し部が無補強の場合と、炭素繊維シートにより曲げ補強する場合について実施している。

## 2. 実験概要

### 2. 1 実験装置概要

本実験は、図-1 に示すようにリニアウエーに台車を乗せ、その上に RC 橋脚模型を設置し、フーチング部に油圧ジャッキを設置して正負交番載荷する方法を採用した。

RC 橋脚模型天端部はピン接合されており、支点部の回転は拘束されず軸力のみが伝達される構造となっている。なお、本実験は、上部工の曲げ剛性による軸力変動を考慮するために、上部工死荷重に相当する鉛直荷重をスクリュージャッキにて

\* 1 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室 研究員 (正会員)

\* 2 (社) 北海道開発技術センター 顧問 工修

\* 3 北海道開発局 札幌開発建設部 札幌道路事務所長 工博 (正会員)

\* 4 (株) 土木技術コンサルタント

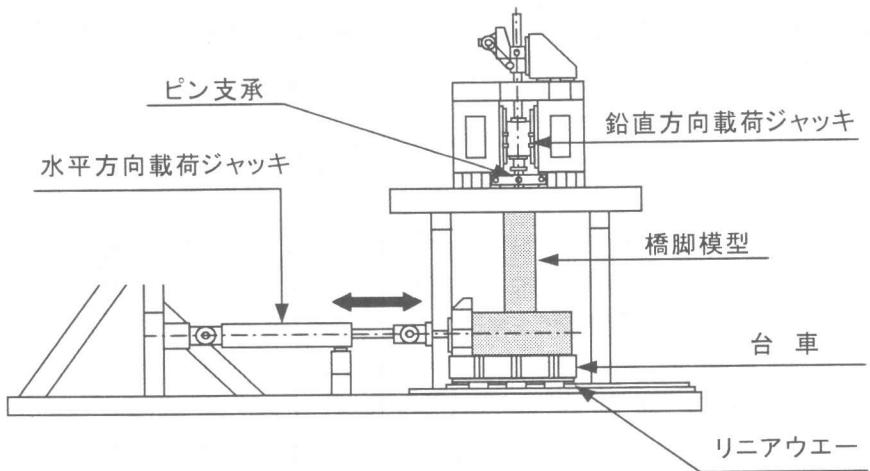


図-1 実験装置概要図

載荷できる構造となっている。また、スクリュー ジャッキは変位制御によって柱天端部への軸力載荷が可能である。本実験では、88.2kN の鉛直荷重載荷後、ジャッキのストロークを固定し、かつ鉛直方向変位を完全拘束することとした。載荷荷重はロードセルで計測し、水平方向及び鉛直方向変位はワイヤー式変位計にて計測を行った。交番載荷は、段落とし部の主鉄筋歪が  $1700 \mu$  に達した時を降伏状態と設定し、その時点での載荷点変位を降伏変位  $\delta_y$ 、水平荷重  $P_y$  として  $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、 $\dots$  と変位振幅を漸増させて繰り返し載荷する方法により実施した。

各変位振幅における繰り返し回数は 3 回とし、正、負いずれかの載荷荷重が  $P_y$  を下回った時点を終局と定義している。

## 2. 2 実験試験体

実験に用いた試験体は、実構造物の  $1/4$  程度の規模とし、軸体高 200 cm、断面寸法  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$  の正方形断面で、基部より 90 cm の位置で主鉄筋の段落しを行っている。鉄筋径は、主鉄筋を D13、帶鉄筋を D10 とし、引張主鉄筋比を  $p_t = 0.8\%$ 、横拘束筋の体積比を  $\rho_s = 0.36\%$  とした。無補強の試験体は、断面分割法による計算結果から、静的荷重に対して段落し部の曲げ破壊が先行することが明らかになっている。断面分割法による計算結果は、基部および段落し部の曲げ耐力が 129 kN、

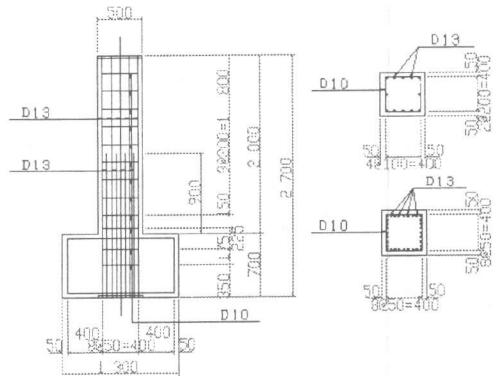


図-2 試験体の形状寸法と配筋状況

86.9 kN である。また、土木学会コンクリート標準示方書に基づいたせん断耐力は 158 kN であり、せん断余裕度は 1.81 となっている。

試験体に用いたコンクリートの設計基準強度は  $f_{ck}=20.6 \text{ MPa}$  であり、実験時の材令における平均圧縮強度は  $f_c=27.9 \text{ MPa}$  である。また、試験体の主鉄筋と帶鉄筋はいずれも SD295 で、降伏点強度は 351 MPa である。試験体の形状寸法と配筋状況を図-2 に示している。

本実験は、無補強試験体（以下 P-N）と段落し部を炭素繊維シート（以下 CFRP シート）で補強した試験体（以下 P-C）に対して行った。P-C では段落し部を曲げ補強により、破壊を基部先行型に移行するように設計を行った。

図-3に補強の概要図を示す。CFRPシートは、目付量 $300\text{ g/m}^2$ 、厚さ $0.167\text{ mm}$ 、弾性係数 $230\text{ GPa}$ 、引張強度 $4.07\text{ GPa}$ 、破断歪 $1.77\%$ のものを1層橋脚の両面に縦貼りすることとした。補強範囲は、基部より $38.5\sim200\text{ cm}$ の区間とした<sup>5)</sup>。

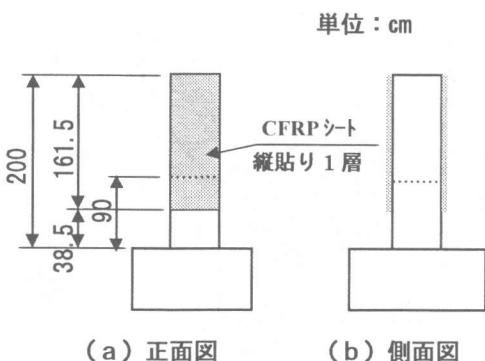


図-3 補強概要図

### 3. 実験結果および考察

### 3. 1 破壊性状

図-4は各供試体の $1\delta_y$ 載荷時と実験終了後の破壊性状を示している。P-N試験体は、 $1\delta_y$ 載荷時に段落し部近傍で壁厚方向に斜め $45^\circ$ のせん断ひび割れが発生し、橋脚基部付近では高さ方向によよそ $20\text{ cm}$ ピッチで曲げひび割れが発生している。ここで、曲げ破壊型で天端部の上下方向の変位を拘束しない場合のひび割れ性状は、載荷初期に段落し部において曲げひび割れが柱断面中央部まで進展し、その後斜め下方へのせん断ひび割れが発生する。上述の $1\delta_y$ 載荷時に発生する $45^\circ$ 方向のせん断ひび割れの発生は、天端部を上下方向に拘束したことによるものと推察される。

その後の載荷状態における損傷は段落し部近傍に集中している。終局時には、段落し部近傍で天端まで配筋されている鉄筋が全て座屈し、かぶり

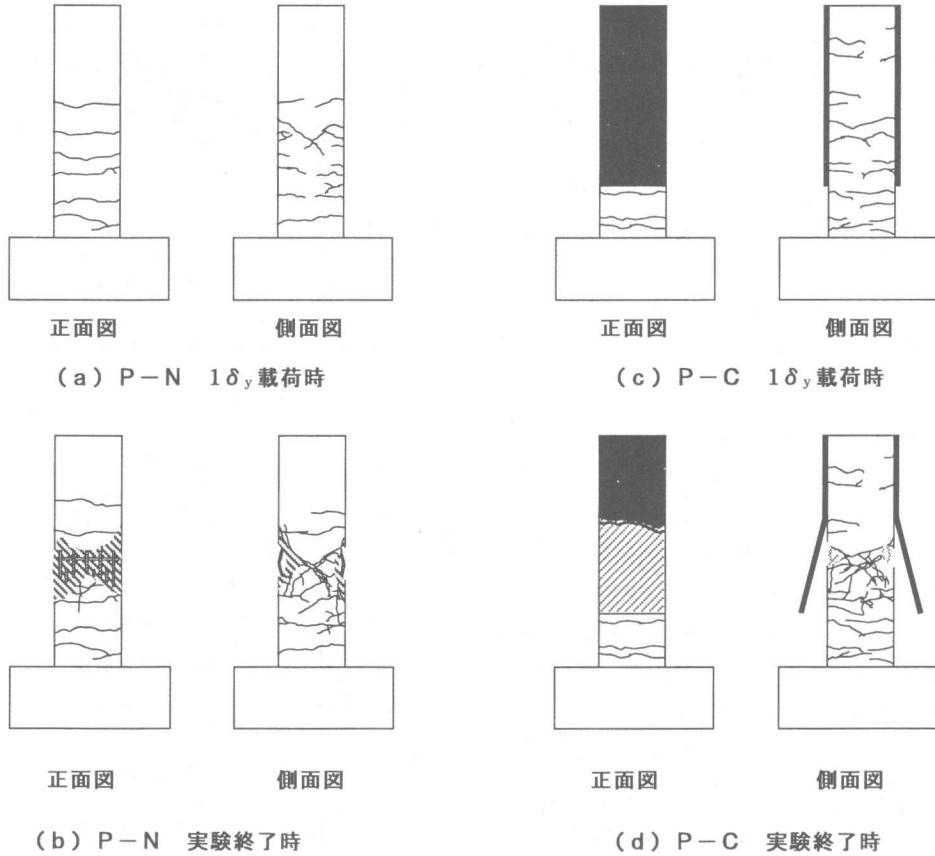


図-4  $1\delta_y$  および実験終了後の破壊性状

表-1 実験結果一覧

試験体	変位 (mm)		荷重 (kN)			終局時
	$\delta_y$	$\delta_u$	$P_y$	$P_u$	$P_{max}$	
P-N	21.8	86.8	104.1	67.1	132.3	$4\delta_y$
P-C	28.0	84.3	115.5	110.8	155.7	$3\delta_y$

コンクリートが段落し部を中心 $40\text{ cm}$ の範囲に渡り剥落している。なお、基部近傍のひび割れはいずれも $1\delta_y$ で発生し、それ以降の進展はみられない。

P-C試験体では、 $1\delta_y$ 載荷時に段落し部近傍から橋脚基部の範囲で、高さ方向におよそ $15\text{ cm}$ ピッチで曲げひび割れが発生しているが、 $2\delta_y$ 載荷時に、段落し部近傍においてかぶりコンクリートの剥離破壊に伴うペーリング（シートの引き剥がれ）現象が発生し、段落し部より下方においてシートが引き剥がれた。その後の載荷状態における損傷は段落し部に移行している。終局時には、段落し部近傍で橋脚天端まで配筋している鉄筋が全て座屈し、かぶりコンクリートが段落し部を中心に $30\text{ cm}$ の範囲に渡り剥落している。また、段落し部近傍で壁厚方向に水平ひび割れから斜め $45^\circ$ のひび割れに移行してヒンジ状態となっているのが分かる。なお、基部近傍のひび割れは、P-N試験体と同様に、いずれも $1\delta_y$ で発生し、それ以降の進展はみられない。

### 3.2 荷重-変位関係

表-1には実験結果の一覧を示している。表中の $\delta_y$ 、 $P_y$ は載荷点位置における降伏変位、降伏荷重を、 $\delta_u$ 、 $P_u$ は終局時の載荷点変位および載荷点荷重を意味している。

図-5には無補強のP-N試験体の荷重-変位関係に関する実験結果および計算結果、図-7に荷重-変位包絡線の比較を示している。図より、P-N試験体は $3\delta_y$ 載荷時に最大荷重 $132\text{ kN}$ を示した後に急激に荷重が低下し、 $4\delta_y$ 載荷時で終局に至った。さらに、断面分割法による計算値と比較すると、降伏荷重および降伏変位はそれぞれ断

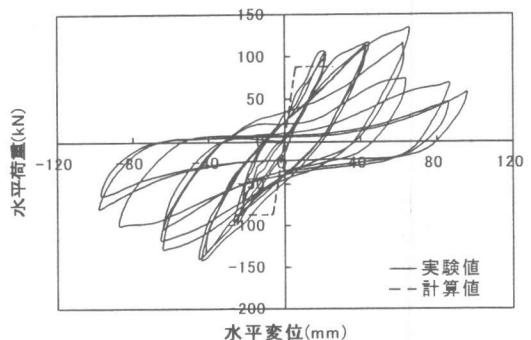


図-5 P-N試験体の荷重-変位曲線

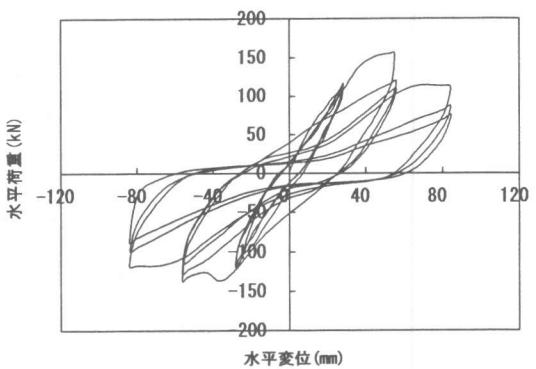


図-6 P-C試験体の荷重-変位曲線

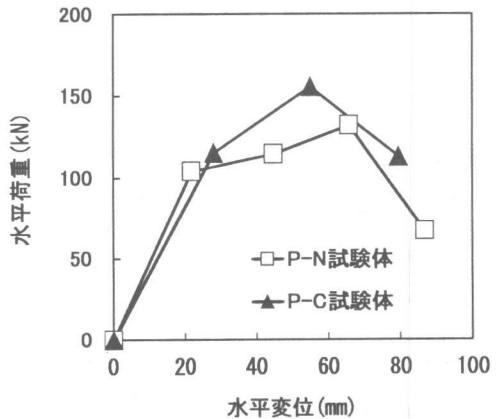


図-7 荷重-変位包絡線

面分割法による計算値の1.2倍、3倍程度の値を示している。

図-6には段落し部を曲げ補強したP-C試験体の荷重-変位関係を示している。なお、本試験体は段落し部を曲げ補強することにより、基部先行型で終局に至る構造に移行させている。P-C試験体では $2\delta_y$ 載荷時に最大荷重156 kNを示した後、ピーリング現象が発生し、急激な荷重低下が見られた。その後の載荷状態における損傷は段落し部に集中し、 $3\delta_y$ 載荷時で終局を迎えた。

P-Cの降伏変位は、P-Nのそれを30%程度向上するが、終局変位については約3%程度とほとんど大差のないことが分かる。

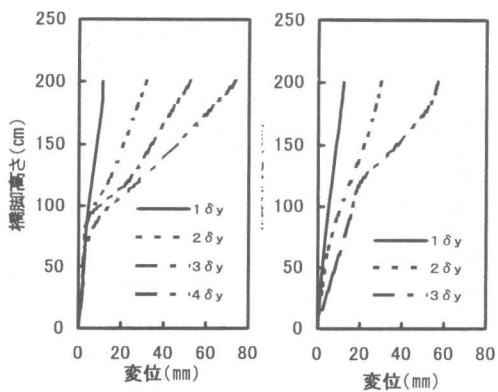
### 3.3 変形性能

図-8には各試験体の各載荷振幅における橋脚高さ方向の変位分布(変形モード)を示している。なお、変位は正載荷の1回目における値である。P-N試験体は、 $2\delta_y$ において段落し部を起点とする曲げによる角折れ型の変形モードが現れている。P-C試験体では、 $2\delta_y$ までは補強効果より比較的なめらかな変形状態を示しているが、その後の載荷状態によってCFRPシートのピーリング現象が発生し、 $3\delta_y$ において段落し部の斜めひび割れによる変形モードが現れている。

図-9にエネルギー吸収量と変位振幅の関係を示す。エネルギー吸収量は、各変位振幅における1回目の載荷変位関係より算出している。

P-N試験体では、 $3\delta_y$ までは線形に増加しているものの、 $4\delta_y$ でエネルギー吸収量の伸びが横ばいとなっている。P-C試験体では、 $2\delta_y$ までは増加しているものの、 $3\delta_y$ でエネルギー吸収量の伸びが減少している。また、吸収エネルギーと変位振幅のなす勾配を比較すると、明らかにP-C試験体が大きいことが分かる。終局時の吸収エネルギー量はP-N試験体で約10.0 kNm、P-C試験体で約11.7 kNmであり、補強することにより吸収エネルギーが10%以上増加していることが分かる。

図-10には等価剛性と変位振幅の関係を示し



(a) P-N (b) P-C

図-8 変形分布(変形モード)

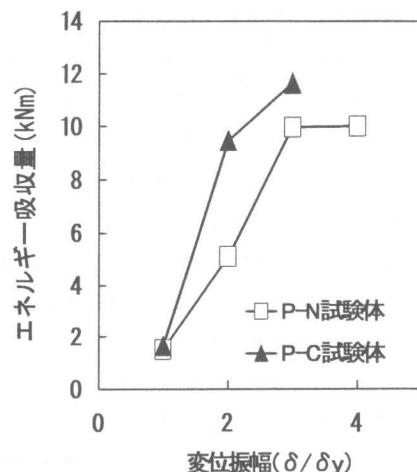


図-9 エネルギー吸収量の比較

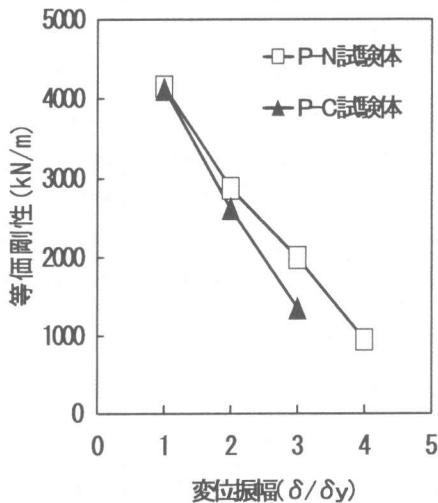


図-10 等価剛性の比較

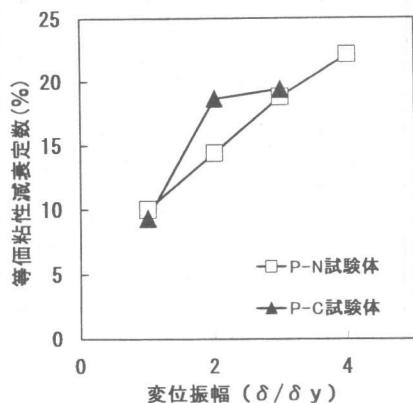


図-11 等価粘性減衰定数

ている。等価剛性は、エネルギー吸収量と同様に各変位振幅における1回目の荷重変位関係より算出している。これより、等価剛性は各試験体ともに載荷振幅の増加に伴いほぼ直線的に減少していることが分かる。また、各試験体の剛性は終局時には1/3程度に減少していることが分かる。

図-11には等価粘性減衰定数と変位振幅の関係を示している。ここでは等価粘性減衰定数の変位振幅による定性的な推移を検討するために、各変異振幅における最初の正負1ループについての値を整理した。従って、等価粘性減衰定数は、各変位振幅の正負1ループ当たりのエネルギー吸収能力（履歴ループによって囲まれた面積） $\Delta W$ を載荷時に弾性的に部材に蓄積されるエネルギー（正負の平均）Wで除した値で、

$$h_{eq} = \Delta W / (4\pi W)$$

で表されるものである。

P-N試験体は、終局時まで線形に増加する傾向を示している。これに対し、P-C試験体では $2\delta_y$ までは増加しているものの、ピーリング現象が発生したため、 $3\delta_y$ で伸びが減少していることが分かる。

#### 4. まとめ

実RC橋脚の上部工による桁拘束を想定し、橋脚天端の上下方向変位を完全拘束した状態で、リニアウエーレル上に設置したRC橋脚模型のフ

ーチング部に水平荷重を載荷させる方法で水平交番載荷試験を行い、連続繊維シートによる段落し部の曲げ補強効果について検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、以下のように示される。

- (1) 脚天端部変位を拘束しない場合と異なり、せん断余裕度が1.8程度であるにも関わらず、段落し部には比較的初期の変位振幅の段階でせん断ひび割れが発生し、その後の載荷状態においてせん断破壊が卓越することが確認された。
- (2) FRPシートによる曲げ補強時には、 $2\delta_y$ の1ループまでは耐力の向上が見受けられたが、段落し部の剥離破壊時に発生したピーリング現象により耐力が急激に減少した。
- (3) CFRPシートによる曲げ補強時には、十分な定着長あるいはシート巻き付けによって剥離を抑制することが必要である。

#### 参考文献

- 1) 谷本俊充, 佐藤昌志, 三上 浩, 岸 徳光: 縦横比の異なるRC橋脚模型の耐荷性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.845 - 850, 1996
- 2) 谷本俊充, 吉田紘一, 今野久志, 岸 徳光: 交番載荷試験による壁式橋脚のせん断補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1659 - 1664, 1997
- 3) 吉田紘一, 佐藤昌志, 谷口直弘, 岸 徳光: 急速加振を受ける実規模二径間連続桁RC橋脚の動的応答性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1195 - 1200, 1999
- 4) 三田村浩, 吉田紘一, 佐藤昌志, 岸 徳光: 実規模二径間連続桁模型を用いたRC橋脚の荷重-変位特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1207 - 1212, 1999
- 5) 財団法人 鉄道総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, pp.37-39 1996.7