

## 論文 斜角を有する RC 壁式橋脚の静的挙動に関する基礎的実験

京田 英宏<sup>\*1</sup>・佐藤 昌志<sup>\*2</sup>・熊谷 健一<sup>\*3</sup>・石川 博之<sup>\*4</sup>

**要旨**：斜角を有する RC 壁式橋脚の合理的な実験法および耐震設計法を確立するための有用な知見を得ることを目的として、橋梁上部構造を含めた構造系における斜角を有する RC 壁式橋脚の静的挙動に着目し、橋軸方向に対して静的単調および正負交番載荷実験を実施した。その結果、i) 斜角を有する場合、橋脚に対して面外荷重と桁の拘束による面内荷重が同時に作用すること、ii) 斜角を有する場合、橋軸および橋軸直角方向の 2 方向の耐力が失われること、iii) 斜角を有する場合、桁のねじり剛性についても考慮する必要があること、などが明らかとなった。

**キーワード**：RC 壁式橋脚，斜橋，耐荷性状

## 1. はじめに

河川橋では、河川管理上の制約から幅厚比が 3 以上の RC 壁式橋脚が数多く建設されている。また、河川橋および高架橋には、架橋地点の交差条件により下部構造を橋軸方向に対して斜めに配置するいわゆる斜橋となる場合が少なくない。本論文では、このような斜橋を支持する橋脚を、斜角を有する橋脚と呼ぶこととする。

斜角を有する RC 壁式橋脚は、橋軸方向および橋軸直角方向と断面の主軸方向が異なるため、橋梁全体系における橋脚の地震時挙動が直橋とは異なることが予想される。佐藤・岡田ら<sup>1)</sup>は、斜角をパラメーターとする小型 RC 壁式橋脚模型を製作して静的単調載荷実験を実施し斜角の有無による破壊モードの違いについて指摘しているが、この他の検討例は見られない。

そこで、本研究では斜角を有する RC 壁式橋脚を対象とした合理的な実験法および耐震設計法を確立するための有用な知見を得ることを目的として、橋梁上部構造を含めた構造系における斜角を有する RC 壁式橋脚の静的挙動に着目し、静的単調および正負交番載荷実験を実施した。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験方法

道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説<sup>2)</sup>には、橋脚の耐震設計は、直橋 (斜角  $90^\circ$ ) の場合には橋軸方向と橋軸直角方向に対して行い、斜橋 (斜角  $60^\circ$  未満) の場合には土圧の水平成分の作用方向とその直角方向に対して行う。なお、斜角が大きい斜橋 (斜角  $60^\circ$  以上) の場合には計算の簡便さを考えて直橋 (斜角  $90^\circ$ ) と見なして橋軸方向および橋軸直角方向の慣性力を求め、これをそれぞれ土圧の水平成分の作用方向およびこれに直角方向の慣性力とみなしてもよいとされている。したがって、斜角  $60^\circ$  以上の RC 壁式橋脚の耐震設計は橋軸方向慣性力が基本となっている。また、実橋脚においては橋梁上部構造に作用する地震時慣性力と同時に上部構造の剛性による拘束も受けており、特に斜角を有する場合にはこの拘束による影響は無視できないものと推察される。そこで、本研究では橋梁上部構造の拘束下にある斜角を有する RC 壁式橋脚に対して橋軸方向に載荷し、その静的挙動について検討することとした。

\*1 (株) 構研エンジニアリング 橋梁部 修 (工) (正会員)

\*2 国土交通省北海道開発局 建設部道路維持課長 工博 (正会員)

\*3 いであ (株) 札幌支店長 工修 (正会員)

\*4 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ (正会員)

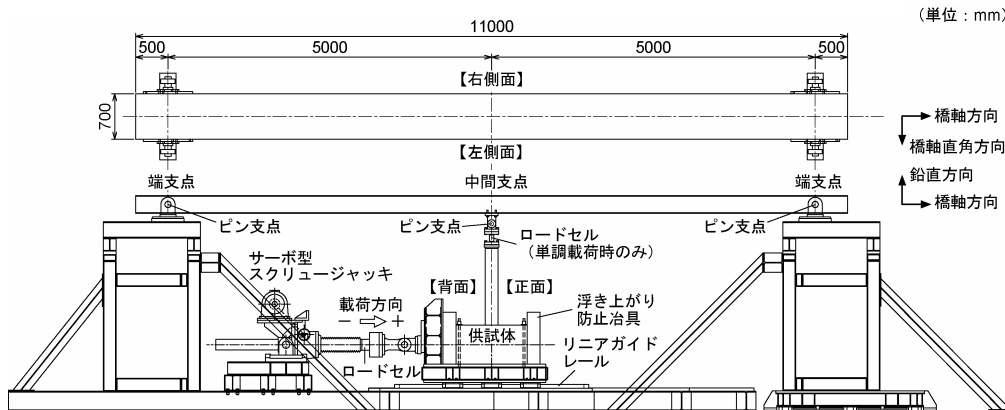


図-1 実験装置の概要図

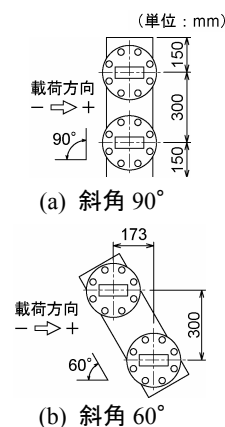


図-2 支点配置図

図-1には、実験装置の概要図を示している。本装置は、橋梁上部構造を模擬した桁を中間支点で支持する橋脚模型のフーチング部に対して橋軸方向に強制変位を与えることにより载荷するものである。载荷時の変位制御を適切に行うためサーボ型スクリュージャッキを使用している。また、载荷方向を橋軸方向に限定するため、橋脚模型のフーチングをリニアガイドレール上（摩擦係数；1/1000）に設置している。

橋梁上部構造を模擬した桁は、長さ11.0m、桁幅700mm、桁高274mmの箱桁構造（総重量22.5kN）としている。各支点および支点間中央の桁内空にはダイアフラムを設置し、局部座屈や断面変形を防止している。図-2には、橋脚が支持する支点の配置図を示している。支点には全てピン支点を使用し、橋軸直角方向軸回りの回転のみを許容している。中間支点には斜角の有無に関わらず2基のピン支点を中心間隔300mmで橋軸方向に正対させて設置している。なお、桁および支点には橋脚に比して十分な耐力を与えている。

## 2.2 実験供試体

図-3には、実験供試体の概要図を示している。また、表-1には、供試体の諸元を示している。供試体は斜角の有無のみをパラメータとし、直橋である斜角90°および直橋と見なして設計を行う下限値に当たる斜角60°の2種類である。供試体名のS90は斜角90°を、S60は斜角60°を表している。また、-M、-Cは载荷方法を表し

ており、それぞれ単調载荷、正負交番载荷を意味している。供試体の形状および配筋は既往の研究<sup>1),3)</sup>を踏襲して、壁幅600mm、壁厚200mm、脚高1,200mmの壁式橋脚（幅厚比3）とした。支点高1,558mm、せん断支間比9.7である。橋脚が支持する橋梁上部構造重量は13.6kNであり、軸圧縮応力度は $0.11\text{N/mm}^2$ である。また、粗骨材最大寸法は20mmである。

本実験では、载荷荷重、载荷点の水平変位量、橋脚基部の主鉄筋ひずみ、図-3に示している中間支点の前後625mmの断面Fおよび断面Rにおける桁の鉛直および橋軸直角方向変位について計測している。また、単調载荷時には中間支点にロードセルを設置し鉛直反力を計測している。

## 2.3 载荷方法

载荷は、斜角90°および斜角60°の各供試体に対してそれぞれ単調载荷および正負交番载荷を実施した。本実験では橋脚基部における引張側主鉄筋の初降伏時の载荷点変位量を降伏変位 $\delta_y$ と定義し、 $\delta_y$ までを载荷速度0.1mm/s、 $\delta_y$ 以降を载荷速度0.3mm/sとして载荷した。なお、斜角60°の場合は引張側隅角部主鉄筋の初降伏時を降伏と定義している。また、正負交番载荷では第1サイクルの降伏変位 $\delta_y$ を基準として、この整数倍の変位振幅 $n \times \delta_y$  ( $n=1,2,3,\dots$ )で順次増加させながら繰り返し繰り返し载荷している。また、同一振幅における繰り返し回数を3回とした。なお、本論文における終局とは、耐力が顕著に減少する直前の载荷サイクルと定義している。

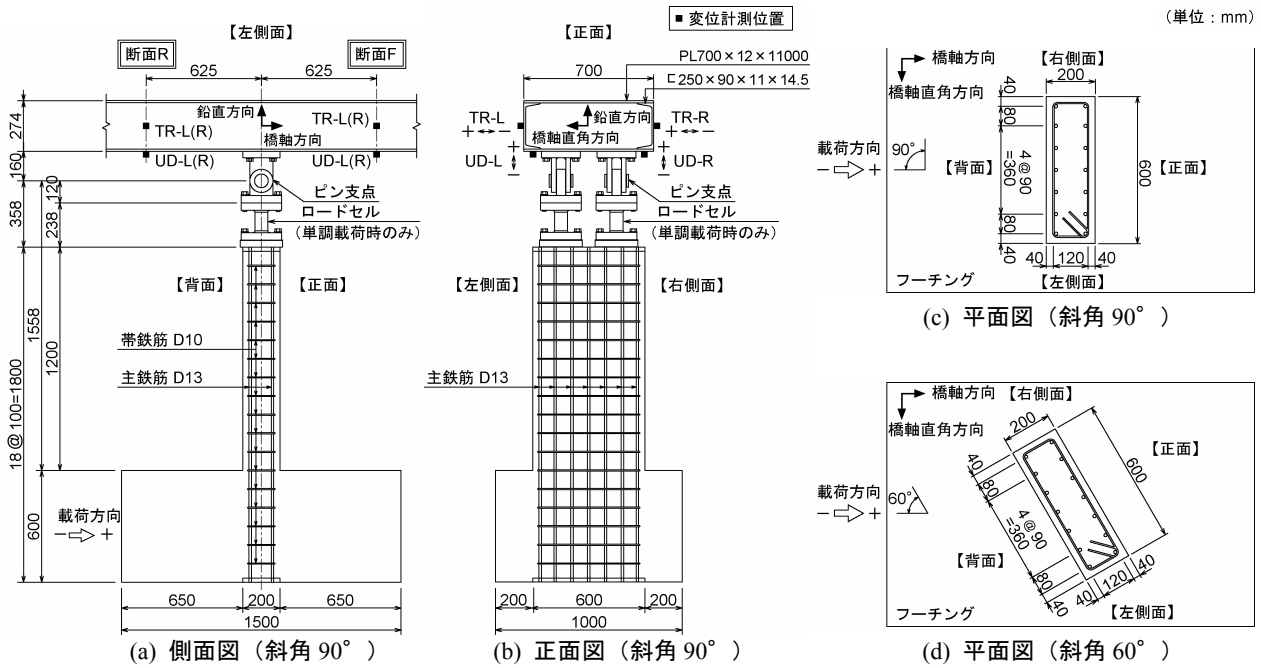


図-3 実験供試体の概要図

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重荷重—水平変位関係, 最終損傷状況

図-4には, 単調荷重および正負交番荷重時の荷重荷重—水平変位関係について, 単調荷重時の中間支点鉛直反力と併せて示している。ここで, 荷重荷重はサーボ型スクリージャッキに設置したロードセルによる計測値を示している。また, 鉛直反力は引張を正として表示している。図-5には, 各供試体の最終損傷状況を, 交番荷重時のみ終局前の損傷状況と併せて示している。なお, 図中の破線は100mm×100mmのメッシュを表している。

##### (1) 斜角 90°

まず, 単調荷重 (S90-M) について考察する。荷重 31kN, 変位 13.8mm で降伏し,  $4\delta_y$  で最大荷重に達している。 $4\delta_y$  から  $6\delta_y$  にかけて橋脚基部引張側のひび割れの開口に伴い荷重が若干低下する。 $6\delta_y$  以降, 橋脚基部圧縮側のかぶりコンクリートの圧縮破壊が進行するものの,  $14\delta_y$  まで横這いで推移している。また, 中間支点の鉛直反力は水平変位の増加につれて上昇しているが, これは桁の曲げ剛性に起因して橋脚に軸圧縮力が作用しているものと推察される。

次に, 交番荷重 (S90-C) について考察する。

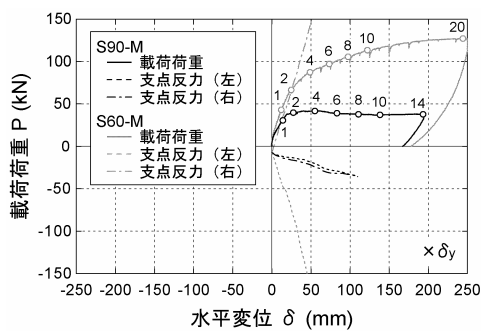
表-1 実験供試体の諸元

供試体名	斜角	荷重方法	主鉄筋		帯鉄筋		コンクリート 圧縮強度 (MPa)
			鉄筋比 (%)	降伏点 (MPa)	鉄筋比 (%)	降伏点 (MPa)	
S90-M	90°	単調	1.48	401	0.24	375	26.5
S90-C		交番		391		398	28.4
S60-M	60°	単調		401		375	25.1
S60-C		交番		391		398	29.0

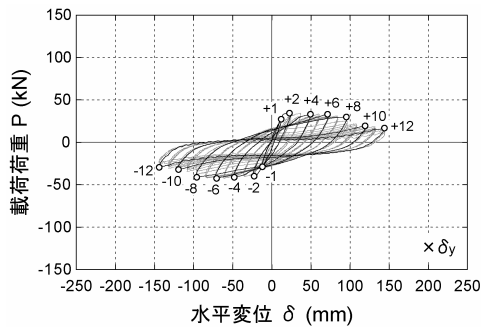
荷重 27kN, 変位 11.9mm で降伏した後,  $2\delta_y$  で最大荷重に達している。 $4\delta_y$  以降は橋脚基部のひび割れの開口が進行し,  $7\delta_y$  から基部のかぶりコンクリートが剥離し始める。その後,  $8\delta_y$  のサイクル中に基部前背面のかぶりコンクリートの剥落および主鉄筋の座屈が発生し終局に至っている。また, 単調荷重と比較すると荷重方法の違いによるじん性能の差が確認できる。

##### (2) 斜角 60°

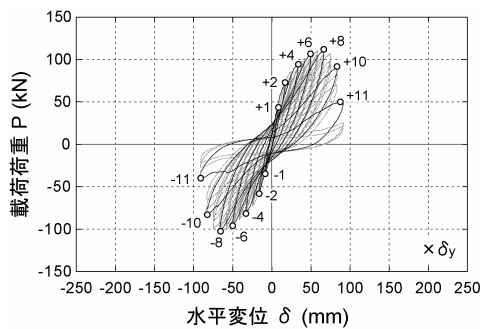
まず, 単調荷重 (S60-M) について考察する。荷重 43kN, 変位 12.2mm で引張側隅角部の主鉄筋が降伏し, 左側面から正面に亘って水平ひび割れが発生する。また, 初期勾配より, 斜角 60° では斜角 90° に比して橋脚方向に対する剛性が高いことが確認できる。 $2\delta_y$  から  $4\delta_y$  にかけて圧縮側隅角部のかぶりコンクリートの圧縮破壊に伴い接線勾配が減少を開始し,  $4\delta_y$  以降は隅



(a) S90-M, S60-M

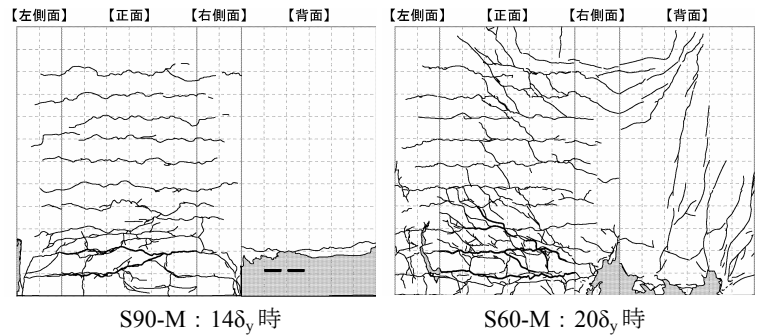


(b) S90-C



(c) S60-C

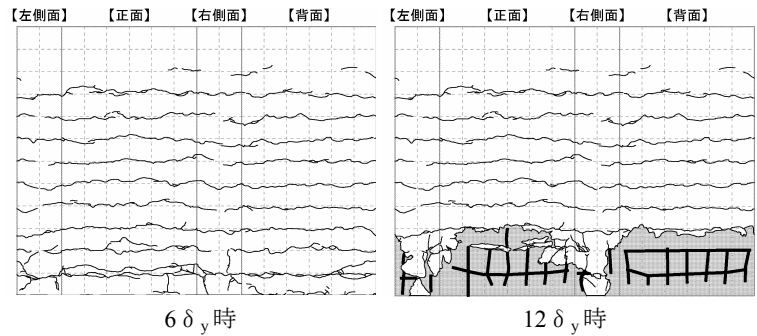
図-4 載荷荷重-水平変位関係



S90-M : 14 $\delta_y$ 時

S60-M : 20 $\delta_y$ 時

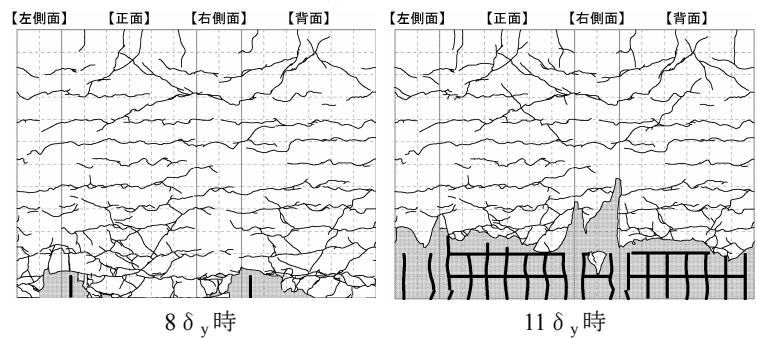
(a) S90-M, S60-M



6 $\delta_y$ 時

12 $\delta_y$ 時

(b) S90-C



8 $\delta_y$ 時

11 $\delta_y$ 時

(c) S60-C

図-5 損傷状況図

角部のかぶりコンクリートの剥離が進行する。その後、 $8\delta_y$ から背面上方に発生した斜めひび割れが徐々に下方へと進展し、正面にも斜めひび割れが増加するものの、 $20\delta_y$ まで荷重低下が見られないまま推移している。最終損傷状況より、基部のかぶりコンクリートの剥落は右側面と背面の隅角部に限定していることが分かる。また、中間支点鉛直反力については、左側支点到に圧縮力、右側支点到に引張力が発生し、何れも水平変位の増加に伴いその反力は上昇している。これは、橋脚天端の橋軸直角方向軸回りの回転を桁が拘束することにより生じると考えられる。この正負異なる支点反力による面内荷重が作用した結果、橋脚に斜めひび割れが生じたものと

推察される。したがって、斜角を有する場合には、面外荷重と桁の拘束による面内荷重が作用し直橋とは異なる破壊モードを呈すると考えられる。

次に、交番載荷 (S60-C) について考察する。荷重 44kN、変位 8.4mm で主鉄筋が降伏に達し、全面に亘って水平ひび割れが生じる。 $2\delta_y$ から  $4\delta_y$ にかけて、左側面と正面および右側面と背面の隅角部にかぶりコンクリートの剥離が発生し、接線勾配が減少を開始する。 $4\delta_y$ 以降、左側面と正面および右側面と背面の隅角部ではかぶりコンクリートの圧縮破壊が進行し、正面および背面に斜めひび割れが増加する。その後、 $8\delta_y$ のサイクル中に左側面と正面および右側面と背

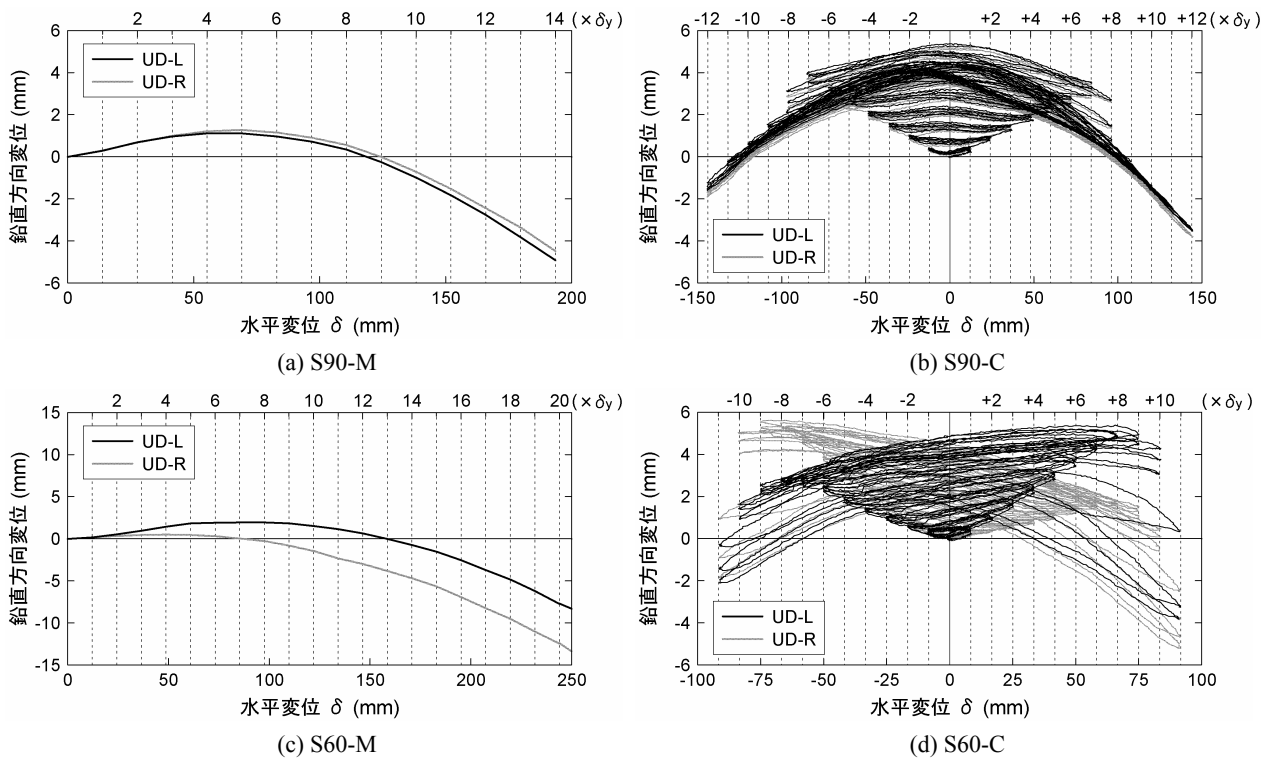


図-6 桁鉛直方向変位－水平変位関係（断面 R）

面の隅角部にかぶりコンクリートの剥落および主鉄筋の座屈が発生し荷重が低下する。10  $\delta_y$  のサイクル中には隅角部の主鉄筋が破断し、これに伴い耐力が急激に低下して終局に至っている。最終損傷状況より、基部のかぶりコンクリートの剥落状況は斜角  $90^\circ$  の場合とは異なり全面に亘っていることが分かる。また、単調載荷と比較すると斜角  $90^\circ$  と同様に載荷方法の違いによるじん性能の差が確認できる。

最後に、履歴曲線について考察する。ループ形状に着目すると、斜角  $90^\circ$  では  $8\delta_y$  まで紡錘型を維持しているのに対し、斜角  $60^\circ$  では  $4\delta_y$  から S 字型を呈していることが分かる。しかしながら、履歴特性を比較する場合には基準変位量  $1\delta_y$  の定義の問題もあるため、その定量評価については今後の研究課題と考えられる。

### 3.2 桁鉛直方向変位－水平変位関係

図-6 には、単調載荷および正負交番載荷時の図-3 の断面 R における桁鉛直方向変位－水平変位関係を示している。なお、断面 F においても断面 R と同様の結果が確認されたため、本論文では断面 R における結果のみ示すこととする。

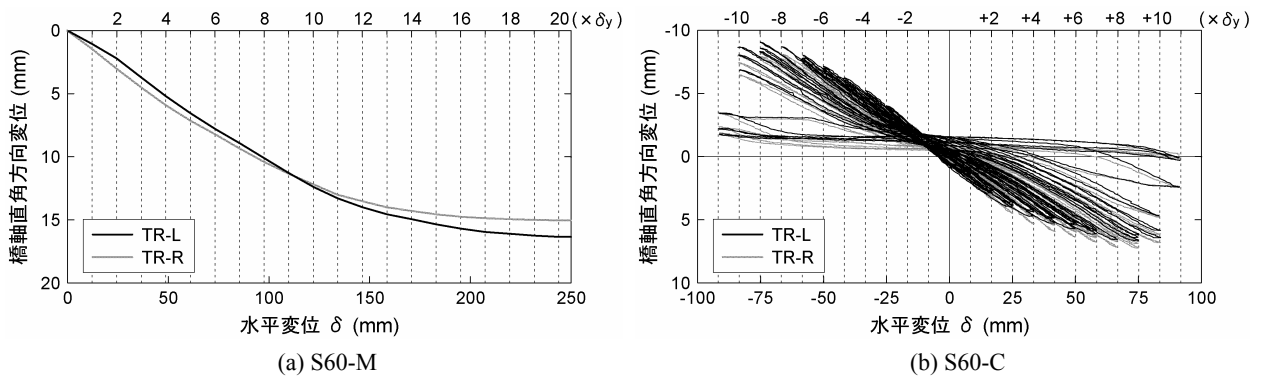
#### (1) 斜角 $90^\circ$

まず、単調載荷 (S90-M) について考察する。水平変位の増加につれて上方へと変位し、載荷荷重が最大に達する  $4\delta_y$  においてピークを示している。その後、鉛直変位は降下を続け、 $9\delta_y$  時に載荷開始時より下方へ変位していることが分かる。したがって、 $9\delta_y$  の時点で既に橋脚は耐力を失っていたものと推察される。

次に、交番載荷 (S90-C) について考察する。 $1\delta_y$  のサイクルでは弾性的に挙動しており、V 字型のループを描いている。 $2\delta_y$  以降は水平なループを描いており、水平変位の増加と共に鉛直変位も上昇を続けている。その後、かぶりコンクリートの剥落および主鉄筋の座屈が発生する  $8\delta_y$  で鉛直変位は頭打ちとなり、円弧状のループを呈していることが確認できる。

#### (2) 斜角 $60^\circ$

まず、単調載荷 (S60-M) について考察する。水平変位の増加に伴い左右の鉛直変位の差が徐々に広がっていることが分かる。右側は  $4\delta_y$  でピークに達した後、右側面と背面の隅角部のかぶりコンクリートの圧縮破壊につれて下方へ



図一七 桁橋軸直角方向変位—水平変位関係（断面 R）

変位を始めている。一方、左側は  $5\delta_y$  から  $9\delta_y$  まで一定の変位を保ちながら推移し、 $10\delta_y$  以降は左右がほぼ平行に推移している。この左右の変位差は、左右の反力が正負異なることと符合しており、桁には橋軸方向軸回りのねじりが作用しているものと推察される。このことは、斜角を有する橋脚の耐荷性状を考える上で、桁のねじり剛性を考慮する必要性を示唆している。

次に、交番載荷（S60-C）について考察する。 $1\delta_y$  のサイクルではほぼ水平なループを描いている。 $2\delta_y$  以降は傾斜したループを呈しており、左右には明瞭な対称性が確認できる。これは、斜角を有することにより桁に対して橋軸方向軸回りのねじりが発生することによるものと推察される。また、終局後の  $11\delta_y$  においては、斜角  $90^\circ$  と同様の円弧状のループを呈している。

### 3.3 桁橋軸直角方向変位—水平変位関係

図一七には、斜角  $60^\circ$  の単調載荷および正負交番載荷時の、図一三の断面 R における桁橋軸直角方向変位—水平変位関係を示している。なお、断面 F においても断面 R と同様の結果が確認されているため、本論文では断面 R における結果のみを示すこととする。

単調載荷時（S60-M）には、載荷荷重と同様に橋軸直角方向変位の低下は見られない。一方、交番載荷時（S60-C）には、 $10\delta_y$  から橋軸方向変位が増加しているにもかかわらず橋軸直角方向変位は減少している。したがって、斜角を有する場合には橋軸方向載荷時においても、橋軸および橋軸直角方向の 2 方向の耐力が失われるも

のと推察される。なお、斜角を有する RC 壁式橋脚の保有耐力の評価については今後の研究課題としたい。

## 4. まとめ

本研究では、橋梁上部構造を含めた構造系における斜角を有する RC 壁式橋脚の静的挙動に着目し、橋軸方向に対して静的単調および正負交番載荷実験を実施した。本実験における知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 斜角の有無に関わらず、単調載荷と正負交番載荷によるじん性能の差が見られる。
- 2) 斜角を有する場合、橋脚に対して面外荷重と桁の拘束による面内荷重が同時に作用する。
- 3) 斜角を有する場合、橋軸および橋軸直角方向の 2 方向の耐力が失われる。
- 4) 斜角を有する場合、桁のねじり剛性について考慮する必要がある。

## 参考文献

- 1) 佐藤 京，岡田慎哉，張 広鋒，岸 徳光：斜角を有する壁式 RC 橋脚模型の静的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集，Vol.25，No.2，pp.343-348，2003
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書（V 耐震設計編）・同解説，2002
- 3) 京田英宏，佐藤昌志，熊谷健一，三上 隆：二径間連続桁橋における RC 壁式橋脚の耐荷性状に関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1027-1032，2006