

斜角を有する鉄筋コンクリート壁式橋脚の耐荷性状に関する基礎的実験

An experimental study on load carrying capacity of reinforced concrete wall-type skewed pier.

京田英宏*, 佐藤昌志**, 熊谷健一***, 三上隆****, 石川博之*****

Hidehiro Kyoda, Masashi Sato, Kenichi Kumagai, Takashi Mikami and Hiroyuki Ishikawa

*修(工) (株) 構研エンジニアリング 橋梁部 (〒065-8510 北海道札幌市東区北18条東17丁目1-1)

**工博 国土交通省北海道開発局 建設部道路維持課 (〒060-8510 札幌市北区北8条西2丁目札幌第一合同庁舎)

***工修 いであ(株) 札幌支店 (〒060-0062 札幌市中央区南2条西9丁目1-2 サンケン札幌ビル)

****工博 北海道大学大学院教授 工学研究科北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

***** (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 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

Wall-type reinforced concrete piers have been broadly constructed for river crossing so far because it has various advantages for designers to comply with requirements from geological restriction and river management. If the longitudinal axis of a bridge with this type of pier intersects to the direction of river flow with some skewed angle, however, the load carrying capacity against earthquake should be evaluated appropriately as a function of the skewed angle. This paper aims to study a rational procedure of experiment as well as seismic design and reinforcement method through monotonic and cyclic loading tests for wall-type piers with skewed angle. As a result, several important findings are obtained such as; the skewed angle makes the pier rigid but no improvement in energy absorption is found, the skewed angle may cause upward reaction force at the supports and the rigidity of super structure is likely to have the influence on the load carrying capacity of the pier.

Key Words : wall-type pier, skewed bridge, load carrying capacity

キーワード : 壁式橋脚, 斜橋, 耐荷性状

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、多くの鉄筋コンクリート橋脚(以下、RC橋脚と略す)に甚大な被害が発生したことから、それ以降、RC橋脚の耐震設計法や耐震補強法に関する検討が盛んに行われてきた。その結果、矩形断面ならびに円形断面のRC橋脚についてはすでに様々な成果が上げられている。

しかしながら、河川橋では、河川管理上の制約から幅厚比3以上のRC橋脚(以下、RC壁式橋脚と称す)が数多く建設されている状況にある。また、河川橋ならびに高架橋には、架橋地点における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。このような斜橋を支持する橋脚を本論文では斜角を有する橋脚と呼ぶこととする。

吉田・佐藤ら¹⁾は、昭和55年および平成8年の道路

橋示方書に準拠した実規模RC壁式橋脚を製作して加振実験を実施し、昭和55年の道路橋示方書に基づく主鉄筋の段落しを有するRC壁式橋脚は急激なせん断破壊を呈す傾向にあることを確認している。また、RC壁式橋脚の主鉄筋段落し部の耐震補強法について、川島・運上ら²⁾は鋼板巻立て、佐藤・三上ら³⁾はAFRPシート巻立てによる補強効果に関して検討しており、段落しを有するRC壁式橋脚の耐震補強法についても解明されつつある。

一方、斜角を有するRC壁式橋脚については、橋軸方向および橋軸直角方向と橋脚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挙動が直橋の場合とは異なることが予想される。佐藤・岡田ら⁴⁾は、斜角のみをパラメータとする小型RC壁式橋脚模型を制作して橋軸方向に対する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、この他の検討例は皆無に等しいのが実情である。このことは、

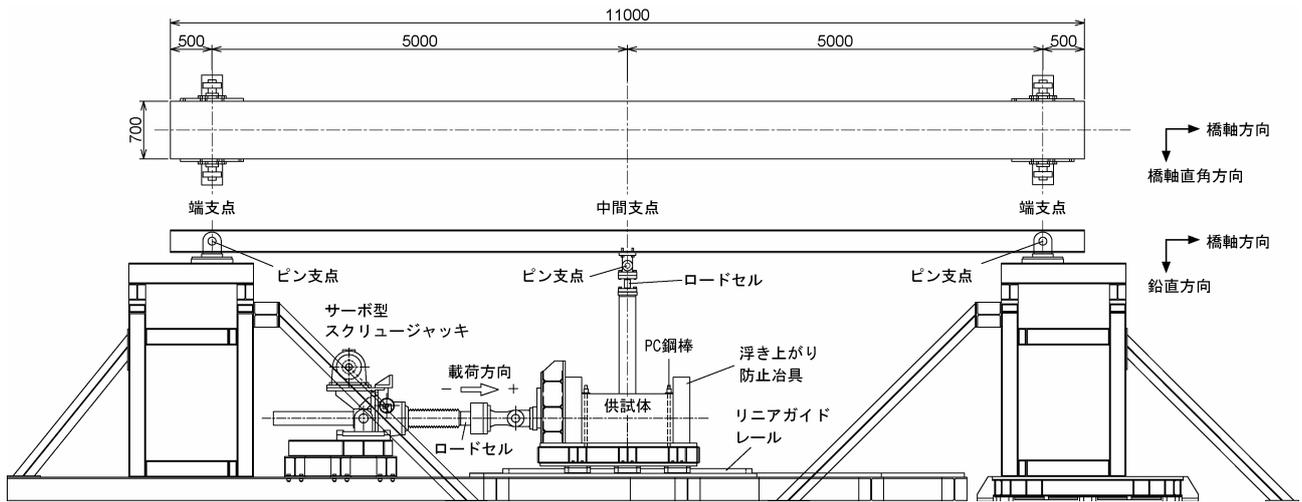


図-1 実験装置の概要図

斜角を有する RC 壁式橋脚の挙動に対して上部構造の剛性や支承条件などが複雑に影響を与えることが想定されるため、その実験方法自体がまだ確立されていないことも一因であると思われる。

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方法、耐震設計法および耐震補強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、上部構造を含めた構造系における斜角を有する RC 壁式橋脚の橋軸方向に対する耐荷性状に着目し、静的単調载荷および正負交番载荷実験を実施し検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験装置

通常の载荷実験では、橋脚模型頭部に対して直接载荷しているが、斜角を有する RC 壁式橋脚の場合には上部構造および支承の影響を適切に反映した状態で橋脚頭部に载荷することは困難が予想される。そこで、本実験では上部構造を模擬した桁に支点を介して橋脚模型を設置し、橋脚模型のフーチング部に対して载荷する実験装置を製作することとした。

図-1 には、実験装置の概要図を示している。本装置は、長さ 11.0m、総重量 22.5kN の上部構造を模擬した桁とそれを中間支点で支持する橋脚模型で構成され、そのフーチング部の中心部分に橋軸方向に対して強制変位を与えることにより载荷を行っている。なお、载荷には変位制御を適切に行うため、サーボ型スクリ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、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。

端支点および橋脚模型が支持する中間支点の支点条件はすべてピン支持とし、面内回りの回転のみを許容している。ここで、面内とは橋軸方向と鉛直方向で定まる平面を表している。

上部構造を模擬した桁は、中間支点に 2 基の支承を設置可能とする桁幅 700mm、桁高 274mm の箱桁構造としている。また、各支点部および支点間中央部の桁内空には、局部座屈や断面変形を防止する目的でダイアフラムを設置している。なお、本実験は RC 壁式橋脚の耐荷性状の把握を目的としていることから、桁およびピン支点には橋脚模型に比して十分な耐力を与えている。

2.2 供試体

図-2 には、実験供試体の形状図および配筋図を、主鉄筋、帯鉄筋および桁のひずみの計測位置と併せて示している。表-1 には、供試体の諸元を材料試験結果と併せて示している。また、図-3 には中間支点の支点配置図を示している。

道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説⁵⁾によれば、橋脚の耐震設計は、直橋（斜角 90°）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° 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° 以上）の場合には、計算の簡便さを考えて直橋（斜角 90°）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° 以上の RC 壁式橋脚の耐震設計を考える場合に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、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いることから、上部構造の拘束下における橋脚の耐荷性状に関する検討が必要と考えられる。そこで、本研究では斜角を有する RC 壁式橋脚に対して橋軸方向に载荷し、その耐荷性状について実験的に検討することとした。

実験供試体は、斜角の有無のみをパラメーターとしており、直橋である斜角 90° および直橋と見なして設計が行われる下限値である斜角 60° の 2 種類である。供試体

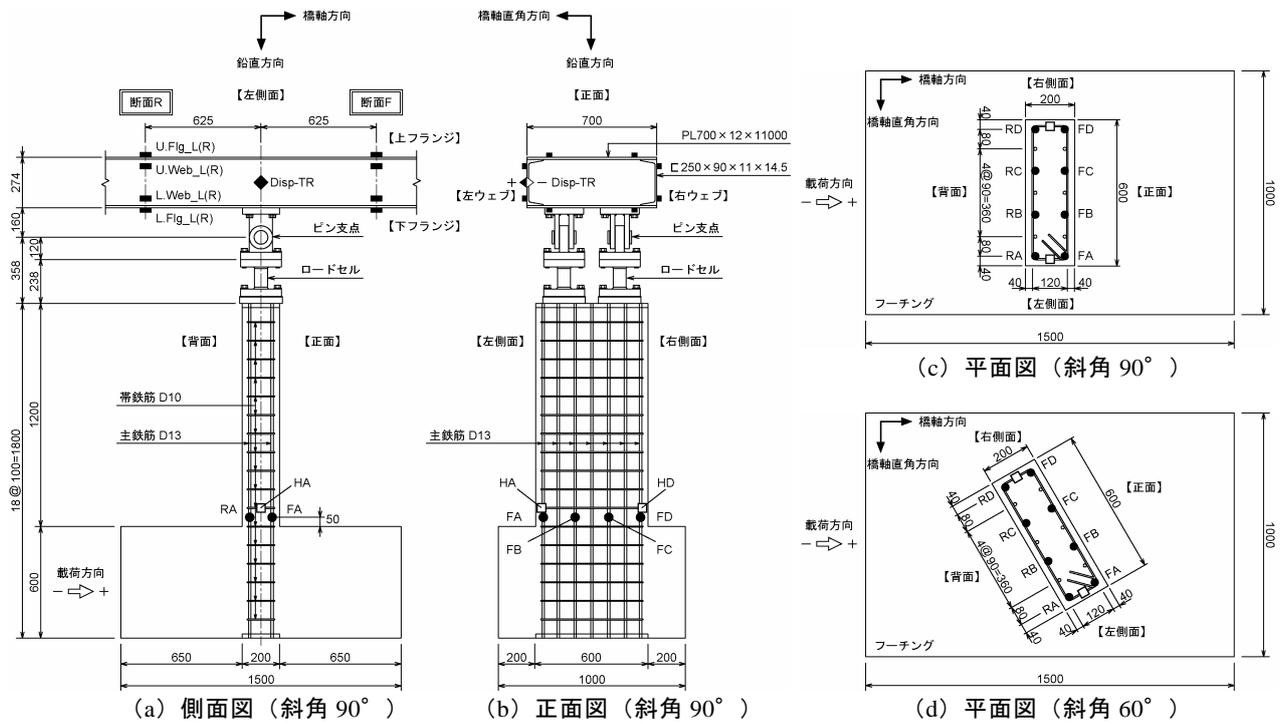


図-2 供試体の形状図および配筋図

表-1 供試体の諸元

供試体名	斜角	断面 (mm×mm)	主鉄筋			帯鉄筋			コンクリート 圧縮強度 (MPa)
			種類 径	降伏点 (MPa)	鉄筋比 (%)	種類 径	降伏点 (MPa)	鉄筋比 (%)	
S90-M	90°	200×600	SD345	401	1.48	SD295	375	0.24	26.5
S90-C				391			398		28.4
S60-M	60°		D13	401		D10	375		25.1
S60-C				391			398		29.0

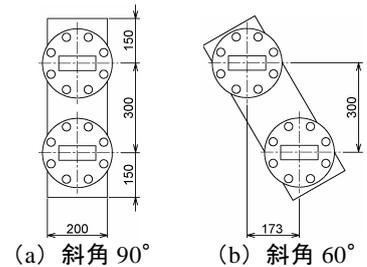


図-3 支点配置図

名の S90 は斜角 90° を、S60 は斜角 60° を表している。また、-M、-C は荷重方法を表しており、それぞれ単調荷重、正負交番荷重を意味している。

橋脚模型の形状および配筋については既往の研究^{4), 6)}を踏襲し、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。なお、支点を介して橋脚模型が支持している模擬桁重量は 13.6kN と実橋よりも橋脚模型に作用する軸応力 (0.11N/mm²) は小さいが、上載重量の調整は特に行っていない。

橋脚天端の支点部に関しては、2 基のピン支点を中心間隔 300mm で設置している。なお、斜角 60° の場合のピン支点についても斜角 90° の場合と同様に橋軸方向に正対させて設置している。また、単調荷重実験時には、中間支点のピン支点直下にロードセルを設置し中間支点の鉛直反力を計測している。

本実験では、荷重荷重、橋脚模型が支持する中間支点の鉛直反力、荷重点の水平変位量、中間支点上における桁の橋軸直角方向水平変位量、橋脚模型基部の断面における主鉄筋および帯鉄筋のひずみ、中間支点の前後

625mm に位置する断面 F および断面 R における桁のひずみについて計測を行っている。

2.3 荷重方法

実験は、直橋および斜橋の RC 壁式橋脚模型に対して、それぞれ単調荷重および正負交番荷重の 2 ケースを実施している。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荷重点変位量を降伏変位量 δ_y と定義し、 δ_y までを荷重速度 0.1mm/s、 δ_y 以降を荷重速度 0.3mm/s に設定して荷重している。ここで、斜角 60° の場合には、最外縁に当る引張側主鉄筋は隅角部の 1 本のみであるが、本実験ではこの隅角部の主鉄筋の降伏時を斜角 60° における供試体の降伏と定義している。正負交番荷重では、第 1 サイクルの降伏変位量 δ_y を基準変位量とし、この整数倍の変位量 $n \times \delta_y$ ($n=1,2,3,\dots$) で順次変位振幅を増加させながら繰返し荷重している。また、同一変位振幅における繰返し回数を 3 回としている。

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荷重サイクルと定めている。

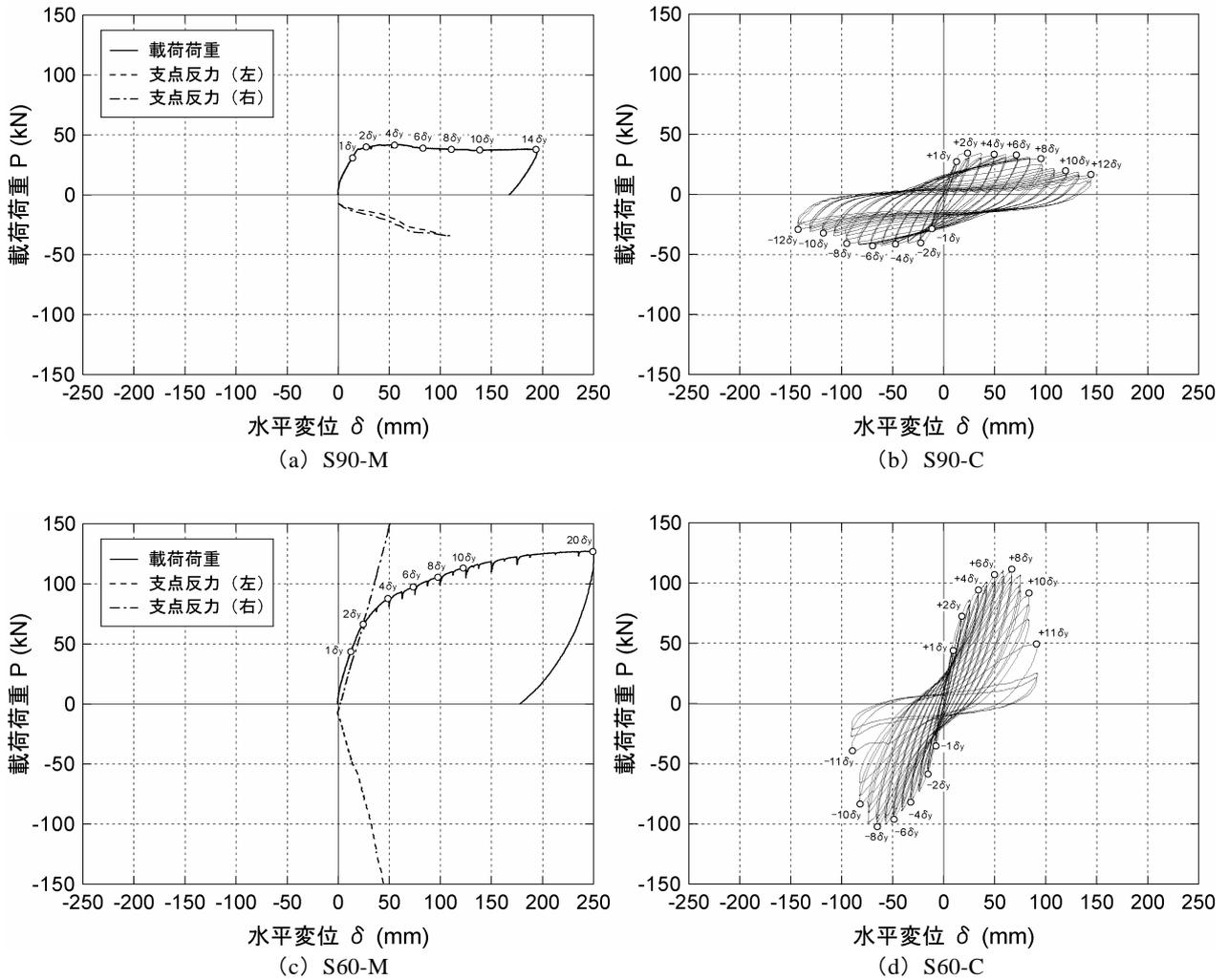


図-4 載荷荷重－水平変位関係

3. 実験結果および考察

3.1 載荷荷重－水平変位関係，損傷状況

図-4には，各供試体の載荷荷重－水平変位関係を，単調載荷の場合のみ中間支点的鉛直反力と併せて示している．ここで，載荷荷重については処女載荷方向，鉛直反力については引張を正として示している．また，図-5には，各供試体の損傷状況を示している．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，斜角 90° 単調載荷(S90-M)について考察する．荷重31kN，変位13.8mmで主鉄筋が降伏に達している． $2\delta_y$ から接線勾配が大きく減少し始め， $4\delta_y$ 前後で最大荷重42kNに達している． $4\delta_y$ から $6\delta_y$ にかけて引張側である正面基部1/2～1D(D：壁厚)におけるひび割れの開口にともない荷重が降下している．その後， $6\delta_y$ から $8\delta_y$ にかけて圧縮側である背面基部1Dの範囲でかぶりコンクリートの圧縮破壊が進行し荷重が緩やかに低下しているが， $8\delta_y$ 以降は明確な耐力低下が見られないまま $14\delta_y$ まで横這いで推移している．最終損傷状況には，

橋脚基部1Dの範囲に塑性ヒンジが形成されていることが確認できる．また，橋脚模型が支持する中間支点鉛直反力については，水平変位量の増加に連れて鉛直反力も上昇していることから，橋脚には桁の面内曲げ剛性に起因した軸圧縮力が作用しているものと推察される．

次に，斜角 90° 正負交番載荷(S90-C)について考察する．荷重27kN，変位11.9mmで主鉄筋が降伏に達している． $2\delta_y$ の第1サイクルで単調載荷よりも低い34kNで最大荷重に達している． $4\delta_y$ から $7\delta_y$ にかけて橋脚の基部1/2D付近のひび割れの開口が進行し， $7\delta_y$ からはかぶりコンクリートが剥離し始める．その後， $8\delta_y$ の第2サイクル中にかぶりコンクリートの剥落および主鉄筋の座屈の発生にともない耐力が急激に低下し終局に至っている．最終損傷状況には，単調載荷(S90-M)と同様に橋脚の基部1Dの範囲に塑性ヒンジの形成が確認できる．また，既往の橋脚頭部に載荷する実験と同様に，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．履歴曲線についても，処女載荷方向である正載荷側から負載荷側へループがシフトしており，非対称なループを描いていることが確認できる．

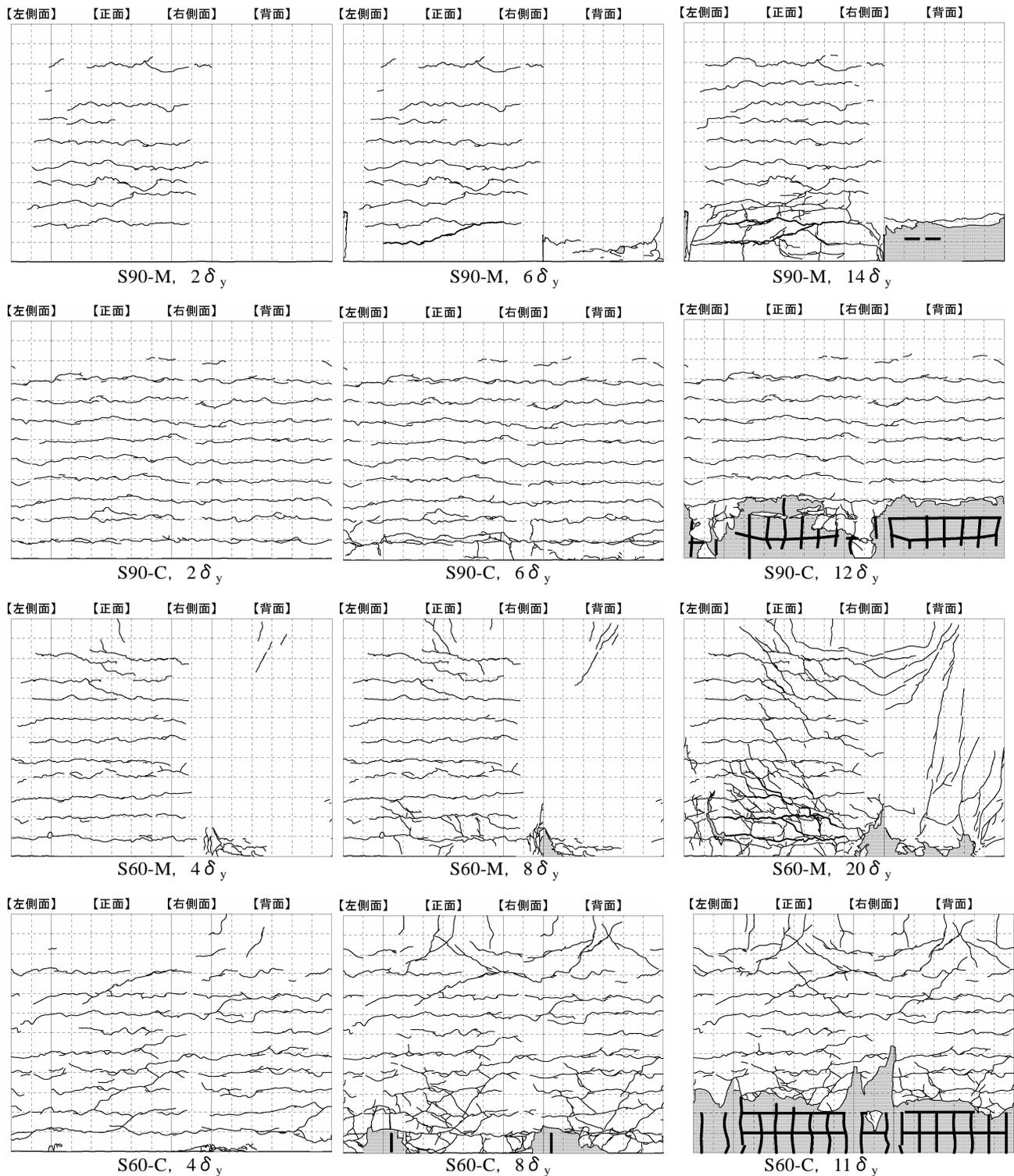


図-5 損傷状況図

(2) 斜角 60°

まず、斜角 60° 単調載荷 (S60-M) について考察する。荷重 43kN、変位 12.2mm で最外縁の隅角部主鉄筋 (FA) が降伏に達している。2 δ_y まで引張側である左側面から正面に渡って 100mm 間隔で水平ひび割れが増加するものの、荷重はほぼ一様に上昇している。2 δ_y から 4 δ_y にかけて、右側面と背面の隅角部の基部にはかぶりコンクリートの圧縮破壊が発生し接線勾配が減少を開始し、4

δ_y 以降も隅角部の基部におけるかぶりコンクリートの圧縮破壊が進行している。その後、8 δ_y から背面の上方に発生した斜めひび割れが徐々に下方へ進展し、正面にも斜めひび割れが増加するが、20 δ_y まで明確な荷重低下が見られないまま推移している。なお、最終損傷状況においても明確な塑性ヒンジの形成は確認できない。また、橋脚が支持する中間支点の鉛直反力については、左側支点には圧縮力、右側支点には引張力が発生し、何れ

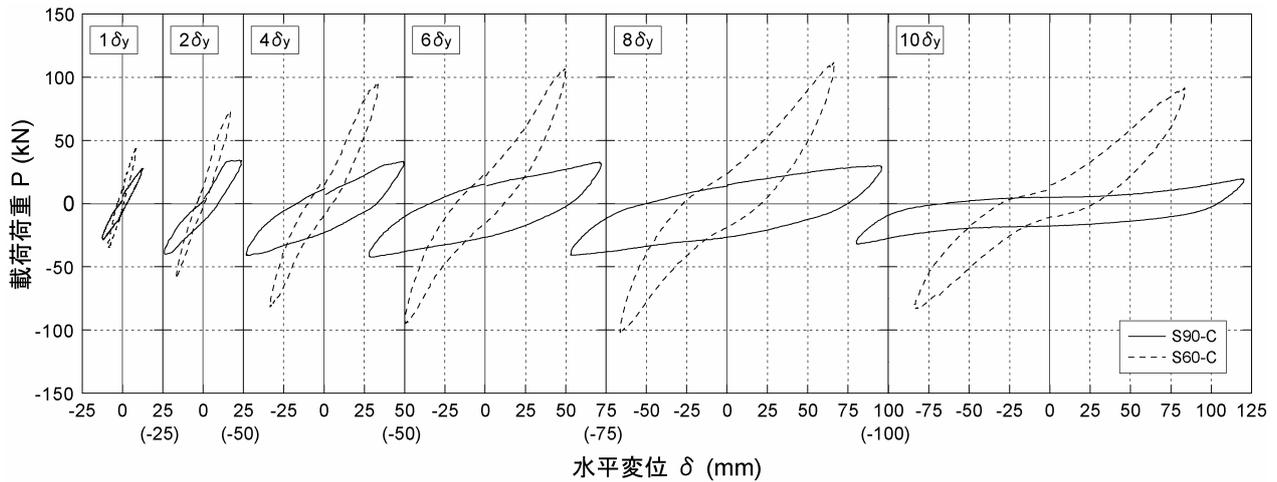


図-6 第1サイクル履歴ループ

も水平変位量の増加にともない反力も増大していることが分かる。これは、橋脚頭部の面内回りの回転を桁が拘束することにより、左右支点に正負異なる支点反力が生じたものと考えられる。また、この支点反力により壁式橋脚には壁面内力が作用することとなり、正面および背面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、橋軸の壁面外の荷重と、桁の拘束の影響による壁面内の荷重が同時に作用し、斜角 90° とは異なる破壊モードを呈すと考えられる。

次に、斜角 60° 正負交番載荷 (S60-C) について考察する。荷重 44kN 、変位 8.4mm で最外縁の隅角部主鉄筋 (FA) が降伏に達している。 $2\delta_y$ まで全面に渡って 100mm 間隔で水平ひび割れが増加するものの、荷重はほぼ一様に上昇している。 $2\delta_y$ 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の基部においてかぶりコンクリートの圧縮破壊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の基部におけるコンクリートの圧縮破壊が進行するとともに、正面および背面の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面の隅角部の基部におけるかぶりコンクリートの剥落および主鉄筋の座屈により荷重が低下する。 $10\delta_y$ のサイクル中には最外縁の主鉄筋が破断し、これにともない耐力が急激に低下して終局に至っている。なお、最終損傷状況には橋脚の基部にコンクリートの剥落や主鉄筋の座屈が確認できるが、損傷過程を鑑みれば塑性ヒンジとは判断し難い。また、履歴曲線については、正負載荷方向に対して概ね対称なループを描いており、斜角 90° のような正載荷側から負載荷側へのループのシフトは見られない。また、斜角 90° の場合と同様に、単調載荷と正負交番載荷によるじん性能の差が確認できる。

3.2 エネルギー吸収性能

図-6には、斜角 90° および斜角 60° の正負交番載荷時の履歴ループを $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $4\delta_y$ 、 $6\delta_y$ 、 $8\delta_y$ 、 $10\delta_y$

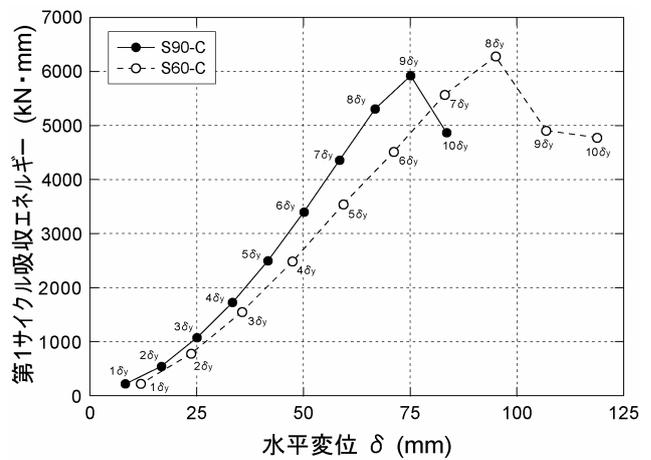


図-7 第1サイクル吸収エネルギー

載荷の第1サイクルに着目して示している。また、図-7には履歴曲線のうち第1サイクルにおける吸収エネルギーについて示している。まず、斜角 90° (S90-C) について考察する。 $1\delta_y$ では、ほぼ弾的な挙動をしている。 $2\delta_y$ 以降、 $1\delta_y$ よりも徐々に剛性が低下し、 $10\delta_y$ では剛性はほぼ0となり、S字型の履歴曲線を呈している。

次に、斜角 60° (S60-C) について考察する。 $1\delta_y$ から $2\delta_y$ ではほぼ弾的に挙動しており、その剛性は斜角 90° よりも大きなことが確認できる。 $4\delta_y$ 以降、徐々に履歴曲線がS字型を呈している。また、履歴ループ面積については、斜角 90° と斜角 60° に有意な差はないものと推察される。しかしながら、斜角を有する場合の $1\delta_y$ の定義の問題もあるため、定量的評価については今後の検討課題と考えられる。

3.3 主鉄筋ひずみ-水平変位関係

図-8および図-9には、それぞれ斜角 90° および斜角 60° の場合の主鉄筋ひずみ-水平変位関係について示している。なお、斜角 90° 正負交番載荷 (S90-C) については正面と背面からそれぞれ一点を抽出して示している。また、斜角 60° 正負交番載荷 (S60-C) について

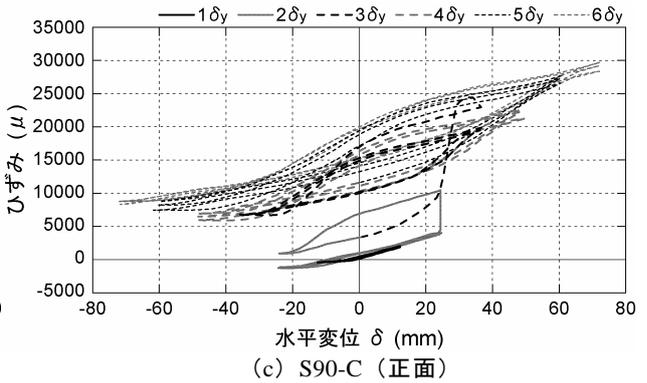
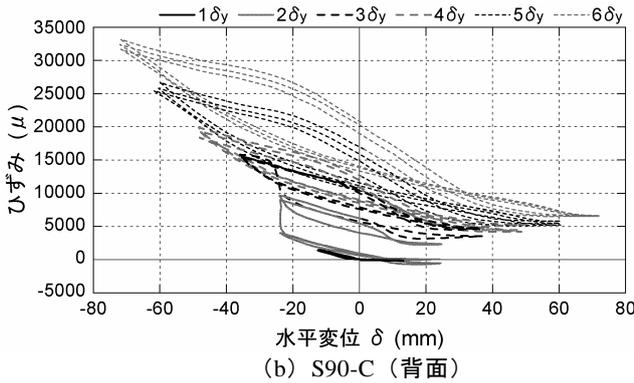
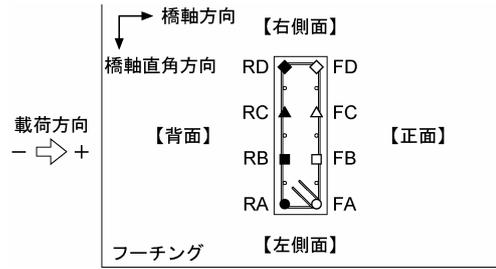
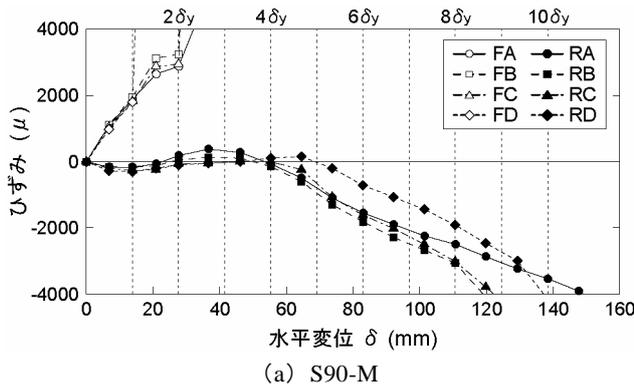


図-8 主鉄筋ひずみ-水平変位関係 (斜角 90°)

は隅角部の 4 点を抽出して示している。

また、図-10 には、正負交番载荷 (S90-C, S60-C) における橋脚基部の帯鉄筋ひずみ-水平変位関係について示している。

(1) 斜角 90°

まず、斜角 90° 単調载荷 (S90-M) について考察する。1 δ_y までは引張側である正面の主鉄筋 (FA~FD) は一様な引張ひずみを、圧縮側である背面の主鉄筋 (RA~RD) は一様な圧縮ひずみを示している。2 δ_y 前後で正面の主鉄筋 (FA~FD) は引張ひずみが急激に増大しているが、背面の主鉄筋 (RA~RD) ひずみは概ね 0 を示している。したがって、中立軸が圧縮側である背面の主鉄筋付近にあるものと考えられる。2 δ_y から 4 δ_y では主鉄筋ひずみがすべて引張を示していることから、中立軸が背面のかぶりコンクリート内に位置しているものと推察される。また、最大荷重に達する 4 δ_y 以降は背面の主鉄筋ひずみが再度圧縮へ転じており、背面のかぶりコンクリートの損傷の進行により中立軸がコアコンクリート内へと移行したことを示唆していると考えられる。

次に、斜角 90° 正負交番载荷 (S90-C) について考察する。弾性域では、正面の主鉄筋は正载荷と負载荷に対してそれぞれ引張ひずみおよび圧縮ひずみを呈し、同様に背面の主鉄筋は圧縮ひずみおよび引張ひずみを呈しており、概ね弾性的に挙動している。2 δ_y から 3 δ_y のサイクル中に、正面および背面の主鉄筋ひずみが引張側へと急激に上昇して引張側に偏して履歴曲線を描いており、

変位量が 0 の状態においても大きな残留ひずみが生じている。また、载荷履歴の進行にともない履歴曲線の面積も増大している。帯鉄筋ひずみについては、4 δ_y までは正荷重および負荷重の何れも引張ひずみとして挙動しているが、5 δ_y 以降、引張と圧縮の両方に渡って挙動しており、かぶりコンクリートの損傷が進行し帯鉄筋との付着切れを起こしているものと推察される。

(2) 斜角 60°

斜角 60° 単調载荷 (S60-M) について考察する。弾性域では、正面の主鉄筋 (FA~FD) には引張ひずみが発生しているが、左側面 (FA) から右側面 (FD) に向かうにつれてそのひずみレベルは減少している。また、背面の主鉄筋には左側面 (RA) から右側面 (RD) に向かってひずみは減少しているが、RA は引張ひずみ、RB は 0、RC および RD は圧縮ひずみを呈している。したがって、中立軸は RB と FD~RD 間を結ぶ直線上に位置しているものと推察される。その後、1 δ_y から 4 δ_y において、RB には引張ひずみが発生し徐々に上昇するが、RC は弾性域の圧縮ひずみのレベルを保持しており、中立軸が RB 上から RC 側へ推移しているものと推察される。

次に、斜角 60° 正負交番载荷 (S60-C) について考察する。2 δ_y まで、正面最外縁の FA は正载荷と負载荷に対してそれぞれ引張ひずみおよび圧縮ひずみを呈し、同様に背面最外縁の RD は圧縮ひずみおよび引張ひずみを呈しており、弾性的に挙動している。一方、FD および RA は正負载荷に対して引張ひずみを呈しており、常に

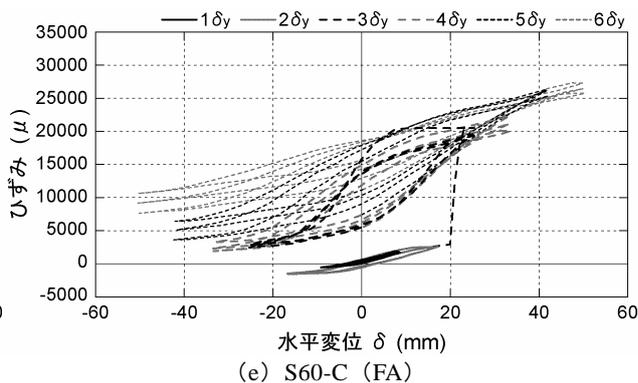
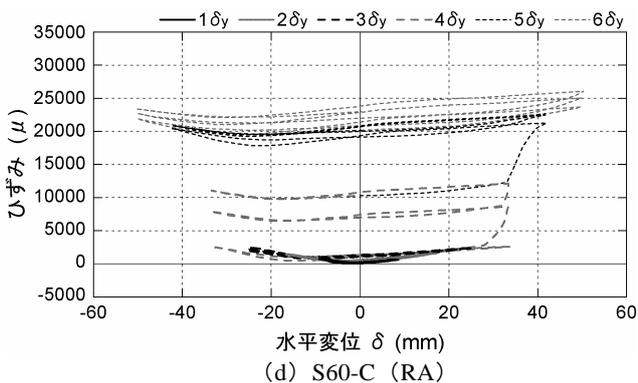
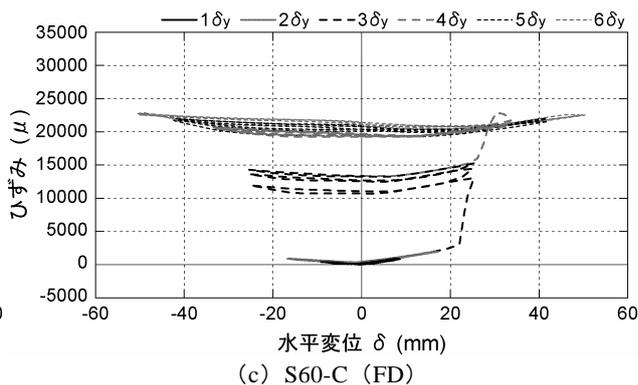
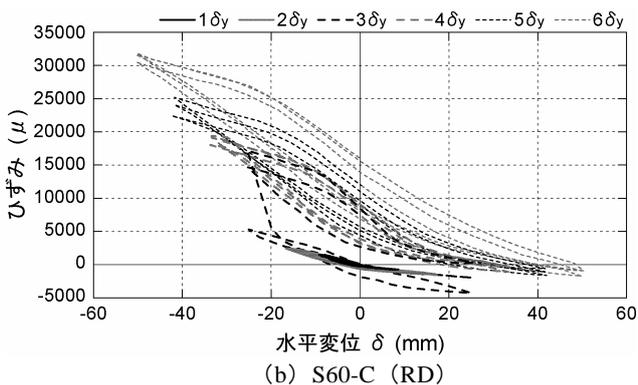
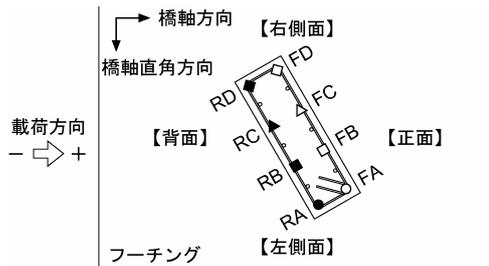
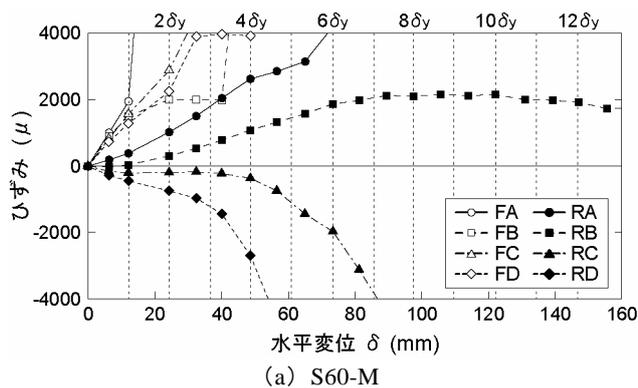


図-9 主鉄筋ひずみ-水平変位関係 (斜角 60°)

引張域であることが分かる。3 δ_y から4 δ_y において、何れの主鉄筋ひずみも引張側に急激に上昇して引張側に偏して履歴曲線を描いており、変位量が0の状態においても大きな残留ひずみが生じている。その後、最外縁のFAおよびRDは、FDおよびRAに対して大きな履歴曲線を描いている。また、FDおよびRAは正負荷荷に対して概ね対称な履歴曲線を呈している。帯鉄筋ひずみについては、正負荷荷に対して引張ひずみとして挙動している。また、2 δ_y 以降、100~200 μ 程度の残留ひずみを維持したまま挙動し、载荷サイクルの進行にともない徐々に履歴曲線の面積が増大している。

3.4 桁ひずみ-水平変位関係

本論文では、上部構造を模擬した桁に作用する断面力を軸力、面内曲げモーメント、面外曲げモーメントの3

成分と仮定し、この断面力により生じるひずみをそれぞれ軸ひずみ、面内曲げひずみ、面外曲げひずみと定義している。ここで、面内とは橋軸方向と鉛直方向により定まる平面を、面外とは橋軸方向と橋軸直角方向により定まる平面を表している。桁のひずみについては、図-2に示している断面Fおよび断面Rの各8点において、桁の橋軸方向成分を計測している。この計測した桁ひずみから上述の断面力とひずみの定義に基づいて、軸ひずみ、面内曲げひずみおよび面外曲げひずみを算出した。

図-11 および図-12 にはそれぞれ、斜角 90° および斜角 60° の軸ひずみ、面内曲げひずみおよび面外曲げひずみ成分の桁ひずみ-水平変位関係を示している。

(1) 斜角 90°

まず、斜角 90° 単調载荷 (S90-M) について考察する。軸ひずみについては、面内曲げひずみに比してそのひずみ

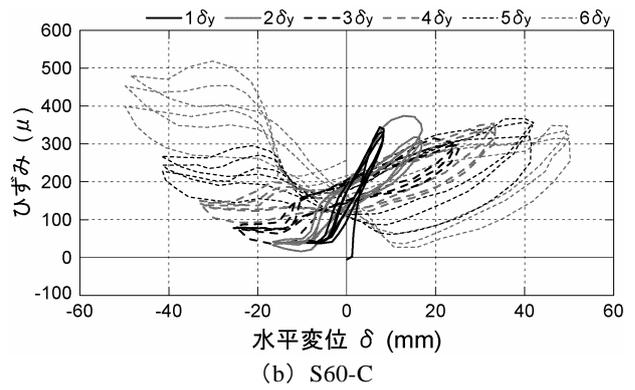
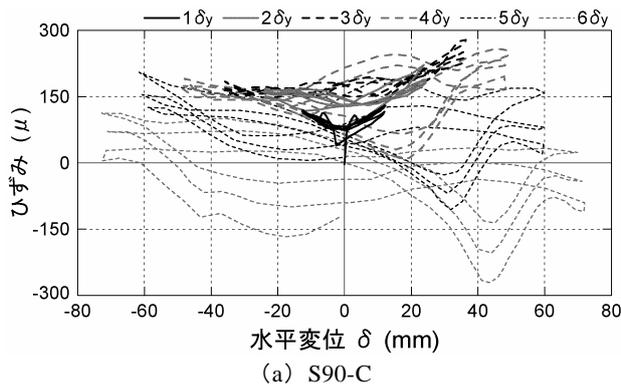
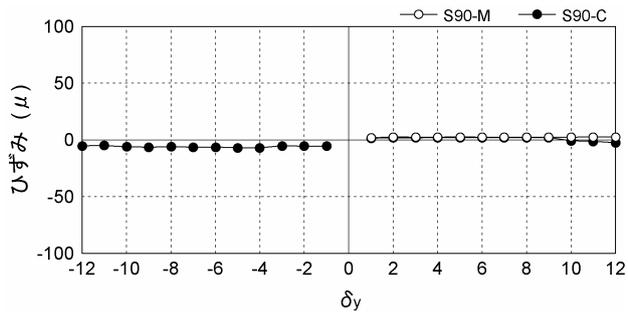
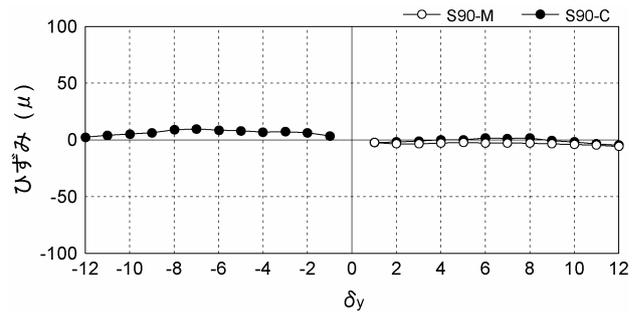


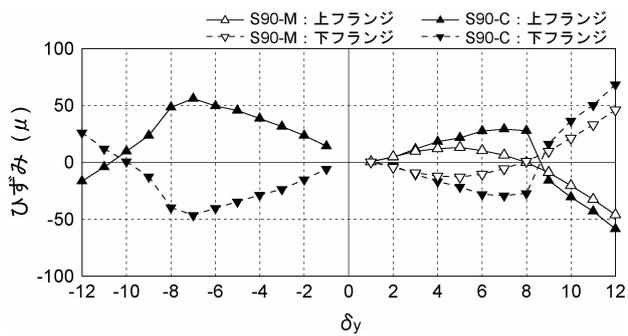
図-10 帯鉄筋ひずみ-水平変位関係



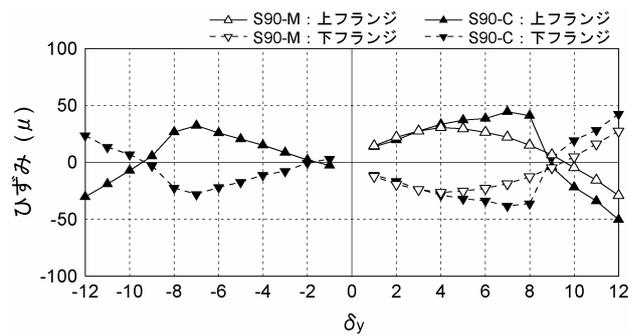
(a) 断面 R (軸ひずみ)



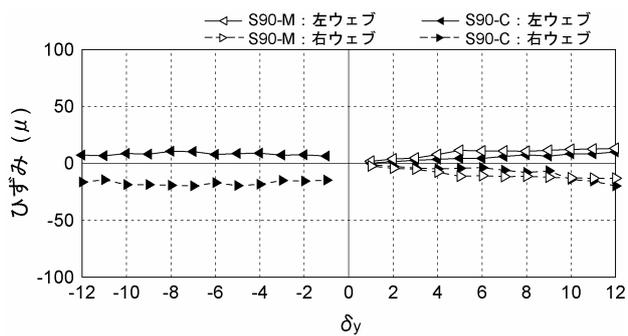
(b) 断面 F (軸ひずみ)



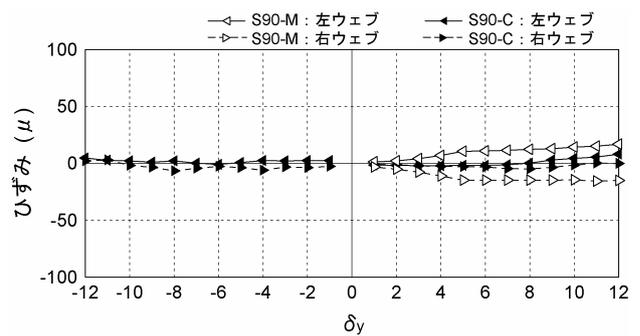
(c) 断面 R (面内曲げひずみ)



(d) 断面 F (面内曲げひずみ)



(e) 断面 R (面外曲げひずみ)



(f) 断面 F (面外曲げひずみ)

図-11 桁ひずみ-水平変位関係 (斜角 90°)

レベルが非常に低いことが確認できる。一方、面内曲げひずみについては、断面 F および断面 R において上下フランジのひずみに明瞭な対称性が見られる。上フランジには引張ひずみ、下フランジには圧縮ひずみが発生している。橋脚の耐力が低下し始めた $4\delta_y$ 以降、ひずみレベルが低下し、橋脚の耐力低下が収束した $8\delta_y$ で 0 を示し

ている。

次に、斜角 90° 正負交番荷重 (S90-C) について考察する。軸ひずみについては、単調荷重 (S90-M) と同様にそのひずみレベルは面内曲げひずみに比して非常に低いことが確認できる。一方、面内曲げひずみについては、断面 F および断面 R において上下フランジのひずみには

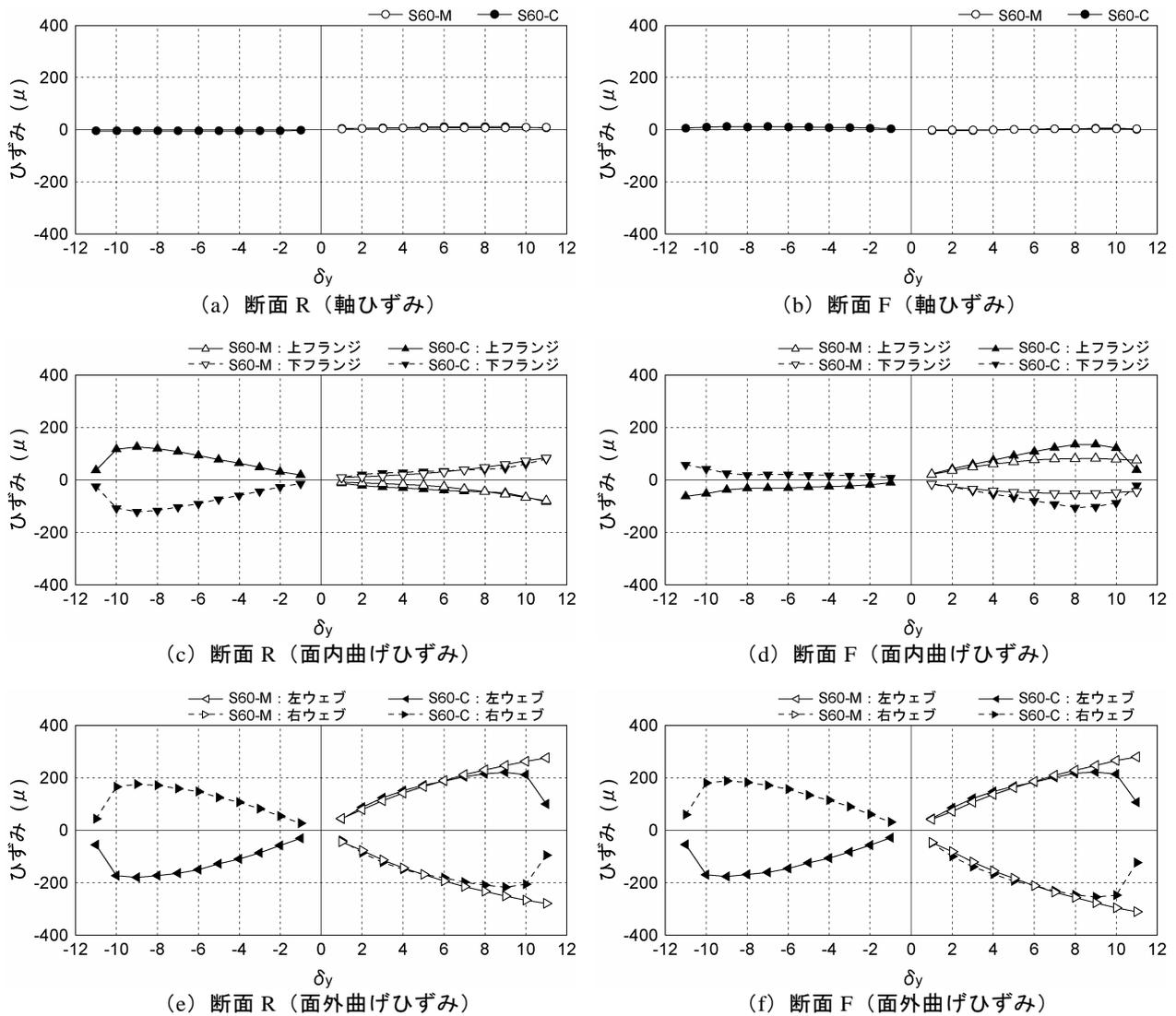


図-12 桁ひずみ-水平変位関係(斜角60°)

明瞭な対称性が見られる。正負荷荷の何れも桁の上フランジには引張ひずみ、下フランジには圧縮ひずみが発生している。また、橋脚が終局を迎えた $8\delta_y$ 以降、桁のひずみレベルも大きく低下している。このことから、単調荷荷および正負交番荷荷の何れも荷荷重-水平変位関係と類似の挙動を示していることが分かる。したがって、橋脚の保有耐力との関係については不明確であるが、桁の面内曲げ剛性が橋脚の耐荷性状に影響を及ぼしていることを示唆している。

最後に、直橋においても面外曲げひずみの発生が確認できる。これは、桁の橋軸方向に対して軸圧縮力が作用することにより、桁の断面の初期不整などに起因した面外方向の変形が助長されたことによるものと推察される。

(2) 斜角60°

まず、斜角60°単調荷荷(S60-M)について考察する。軸ひずみについては、斜角90°と同様に曲げひずみに比してひずみレベルが非常に低いことが確認できる。一方、面内曲げひずみについては、断面Fおよび断面Rにお

て上下フランジのひずみに明瞭な対称性が見られる。また、断面Fにおいて上フランジには引張ひずみ、下フランジには圧縮ひずみが発生し、同様に、断面Rにおいて上フランジには圧縮ひずみ、下フランジには引張ひずみが発生している。これは、桁の中間支点部には、支承を介して面内回りの曲げモーメントが作用していることを示唆している。

面外曲げひずみについては、断面Fおよび断面Rにおいて左右ウェブのひずみに明瞭な対称性が見られる。何れの断面も左ウェブには引張ひずみ、右ウェブには圧縮ひずみが発生している。また、荷荷サイクルの進行にともない、ひずみレベルが上昇している。したがって、桁の中間支点部には、支承を介して橋軸直角方向に荷重が作用しているものと推察される。

次に、斜角60°正負交番荷荷(S60-M)について考察する。軸ひずみについては、単調荷荷(S60-M)と同様にそのひずみレベルは曲げひずみに比して低いことが確認できる。一方、面内曲げひずみについては、断面Fお

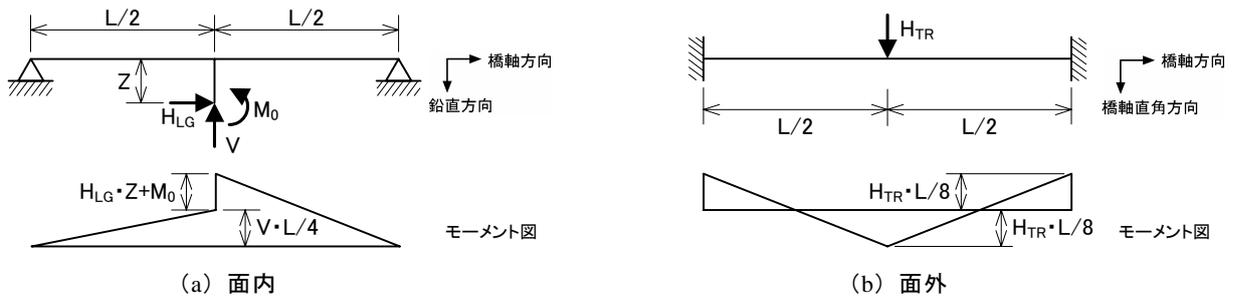


図-13 はりモデル

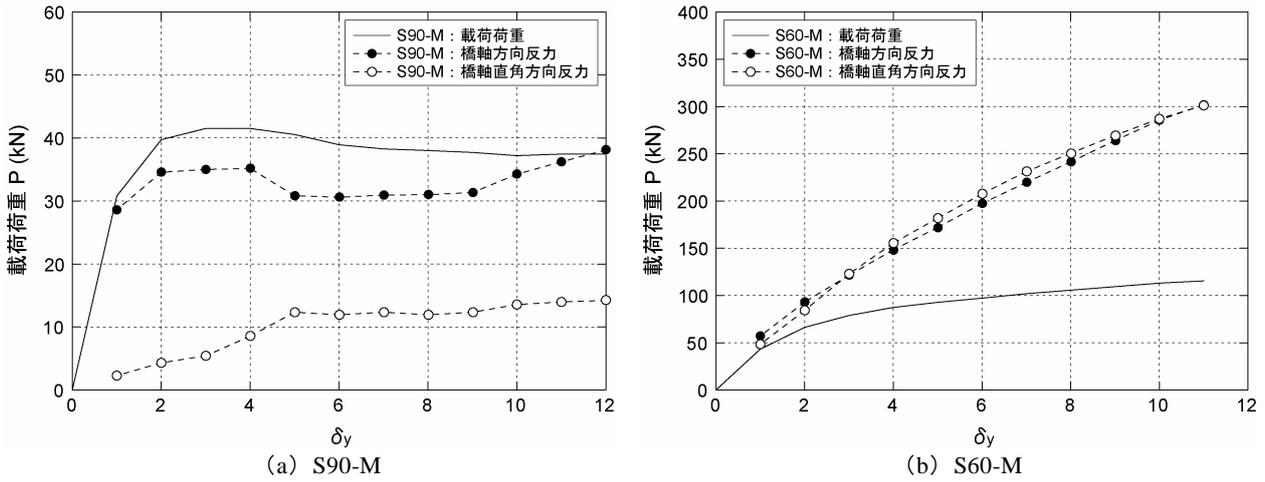


図-14 中間支点水平反力

よび断面 R において上下フランジのひずみには明瞭な対称性が確認できる。また、正載荷時には断面 F の上フランジに引張ひずみ、断面 R の上フランジに圧縮ひずみが発生し、負載荷時には断面 F の上フランジに圧縮ひずみ、断面 R の上フランジには引張ひずみが発生している。これは、単調載荷 (S60-M) と同様に、桁の中間支点部に面内回りの曲げモーメントが作用していることを示唆している。

面外曲げひずみについては、断面 F および断面 R において左右ウェブのひずみに明瞭な対称性が確認できる。正載荷時には左ウェブに引張ひずみ、右ウェブに圧縮ひずみが発生し、負載荷時には左ウェブは圧縮ひずみ、右ウェブに引張ひずみが発生している。橋脚耐力の降下する $8\delta_y$ 以降、ひずみレベルが低下している。したがって、単調載荷 (S60-M) と同様に、桁の中間支点部には橋軸直角方向に荷重が作用しているものと推察される。また、面外曲げひずみは載荷荷重-水平変位関係と同様の性状を示しており、桁の面外曲げ剛性が橋脚の耐荷性状に影響を及ぼしていることを示唆している。

(3) 中間支点水平反力

本論文では、上部構造を模擬した桁をはりでモデル化し、桁の面内および面外曲げひずみ成分から中間支点到作用する橋軸および橋軸直角方向反力を算出している。橋軸方向反力については、軸ひずみ成分からも算出可能であるが、そのひずみレベルが低いことを考慮して面内

曲げひずみ成分から求めることとした。

図-13 には、面内、面外のはりモデルを示している。面内については、両端回転支持はりに対してピン支点中心位置に橋軸方向反力 H_{LG} 、鉛直反力 V が作用するものと仮定している。ここで、モーメント反力 M_0 については支点条件を考慮し 0 としている。また、面外については、両端固定はりに対して橋軸直角方向反力 H_{TR} が作用するものと仮定している。

図-14 には、単調載荷の場合の中間支点反力を載荷荷重と併せて示している。斜角 90° (S90-M) については、面内ひずみから算出した橋軸方向反力が載荷荷重と概ね整合が取れていることが確認できる。一方、斜角 60° (S60-M) については、橋軸方向反力と載荷荷重に大きな開きがあることが分かる。これは、斜角を有する場合には中間支点部が面内変形に対してピンとして機能しないためモーメント反力 M_0 が発生することによるものと考えられる。また、橋軸直角方向反力については、載荷荷重を上回る結果となっている。

3.5 桁の水平面軌跡

図-15 には、正負交番載荷における桁の中間支点部における橋軸直角方向変位と水平変位との関係について示している。斜角 90° (S90-C) においては、当然ながら橋軸方向に対して水平に挙動していることが確認できる。一方、斜角 60° (S60-C) においては、橋軸直角方向変

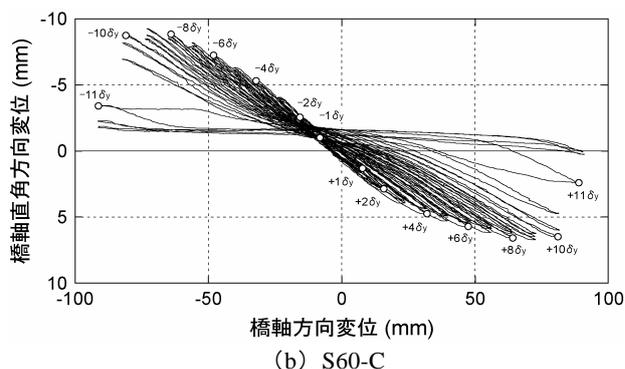
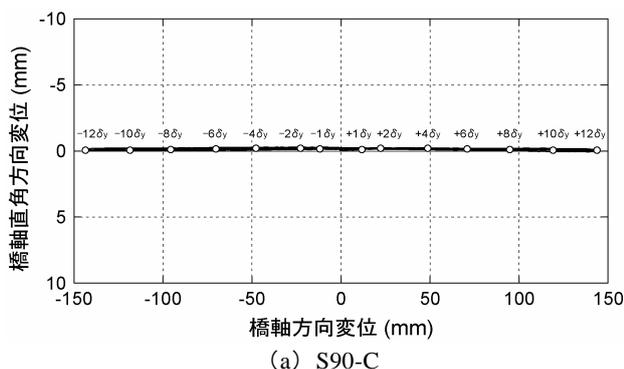


図-15 桁の水平面軌跡

位の挙動は、載荷荷重-水平変位関係と同様の性状を示している。これは、橋脚の橋軸直角方向の耐力が低下していることを示していると考えられる。したがって、斜橋を有する壁式橋脚の場合には、橋軸方向載荷時においても、橋軸方向と橋軸直角方向の二方向の耐力が同時に失われるものと推察される。

4. まとめ

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方法、耐震設計法および耐震補強法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、上部構造を含めた構造系における斜角を有する RC 壁式橋脚の橋軸方向に対する耐荷性状に着目し、静的単調載荷および正負交番載荷実験を実施し検討を行った。本研究により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 斜角 90° に関する実験より、
 - i) 単調載荷実験において、最大荷重に達する $4\delta_y$ 後、若干の荷重低下は見られるものの明確な低下が見られない。
 - ii) 既往の橋脚頭部に載荷する実験と同様に、本実験においても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。
 - iii) 既往の橋脚頭部に載荷する実験と同様に、本実験においても履歴曲線には正載荷側から負載荷側へシフトした非対称なループを描いている。
 - iv) 橋脚には、支点を介して支持する桁の面内曲げ剛性に起因する軸圧縮力が作用する。
- 2) 斜角 60° に関する実験より、
 - i) 単調載荷実験において、 $20\delta_y$ に達しても荷重低下は見られない。
 - ii) 斜角を有する場合には、橋脚に対して壁面外の荷重と桁の拘束の影響による壁面内の荷重が同時に作用する。
 - iii) 斜角 90° の場合と同様に、本実験においても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。

- iv) 斜角を有する場合には、斜角 90° の場合とは異なり履歴曲線は対称なループを描いている。
- v) 橋脚には、支点を介して支持する桁の面内および面外剛性に起因する正負異なる支点鉛直反力が生じる。
- vi) 斜角を有する場合には、斜角 90° に比して橋脚の剛性が上がるが、エネルギー吸収性能について有意な差はないものと推察される。

謝辞

本実験の検討にあたり、(株) 構研エンジニアリングの加藤剛氏には多大なるご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 川島一彦, 運上茂樹, 飯田寛之: 壁式コンクリート橋脚の鋼板巻立てによる耐震補強効果, 土木技術資料, 34-1, pp.35-41, 1992.
- 3) 佐藤昌志, 三上 浩, 三田村浩, 木下昌樹: 実規模壁式 RC 橋脚の AFRP シート巻き付けによる靱性能向上効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1369-1374, 1999.
- 4) 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.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説, 2002.
- 6) 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.

(2006年9月11日受付)