

施工性向上を図った端部定着構造および 楕円インターロッキング式配筋構造に関する実験的検討

塩島亮彦¹・星隈順一²・運上茂樹³

¹正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ（〒305-8516茨城県つくば市南原1-6）

²正会員 工博 国土交通省 総合政策局建設施工企画課（〒100-8918東京都千代田区霞が関2-1-3）

³正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ（〒305-8516茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚構造においては、平成7年の兵庫県南部地震による甚大な被害の経験を踏まえて、地震時における塑性変形性能の向上が不可欠となった。このために、帯鉄筋や中間帯鉄筋が非常に多く配筋されるとともに、これらの定着や継手についても十分な性能を確保することが必要とされた。これに伴って現場における帯鉄筋や中間帯鉄筋の施工作業が非常に煩雑になるとともに、コンクリートの確実な充填性についても注意が必要となっている。

本研究では、施工の容易な帯鉄筋や中間帯鉄筋の端部定着構造^{1)~3)}、及び、帯鉄筋の加工形状を楕円インターロッキング配筋の提案を行い、これらの構造について橋脚模型を用いた正負交番載荷実験により性能の検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 施工性の向上を図った横拘束筋の端部定着構造

(1) 帯鉄筋と中間帯鉄筋に求められる性能と従来の配筋方法

地震時に塑性化することを考慮する鉄筋コンクリート橋脚においては、帯鉄筋は内部コンクリートを拘束する役割、軸方向鉄筋の座屈を抑制する役割ならびにせん断耐力を高める役割があり、中間帯鉄筋は帯鉄筋を補完してこれらの効果を高める役割がある。地震時に橋脚に塑性化が生じるような変形が生じて、これらの役割を確実に果たすためには、帯

鉄筋と中間帯鉄筋の端部の定着に十分配慮する必要がある^{4),5)}。例えば、道路橋示方書V耐震設計編では、中間帯鉄筋の端部を半円形フックもしくは鋭角フックとし、そのフックを帯鉄筋にかけた上で内部のコンクリートに定着させることとなっている。中間帯鉄筋の端部を帯鉄筋にかけるのは、大きな塑性変形が生じてても帯鉄筋が外側にはらみだしにくくすることにより軸方向鉄筋の座屈を抑制し、内部コンクリートの拘束効果を高めるためである。

中間帯鉄筋の両端を帯鉄筋にかける場合、端部のフック形状として半円形フックや鋭角フックを用いるとその施工が困難であり、直角フックの方が施工しやすい。しかし、中間帯鉄筋の端部を直角フックとした鉄筋コンクリート柱に対する正負交番載荷実験によると、かぶりコンクリートが剥離すると、帯鉄筋のはらみだしに対して直角フックが十分に抵抗できず、直角に曲げられていたフックがまっすぐに伸びようとする挙動を示し、これによって内部コンクリートが拘束できなくなることがわかっている⁴⁾。このような点を踏まえ、実際の施工では、一端に半円形フックを有する2本の鉄筋を断面内部で継いだ中間帯鉄筋とすることが多くなっている。

(2) 施工性の向上を図った端部定着構造の概念

帯鉄筋や中間帯鉄筋の施工性の向上を図った定着構造については既に幾つかの提案があるが^{6),7)}、著者らは、端部のフックとして施工性のよい直角フックを使いながらも、かぶりコンクリートが剥落するような損傷が生じてても帯鉄筋との定着を確保し得る単純で簡単な機構の定着構造を考案し⁸⁾、中間帯鉄筋の引抜試験によりその定着性能について検討を行ってきた^{1)~3)}。図-1は、定着構造の概念図を示した

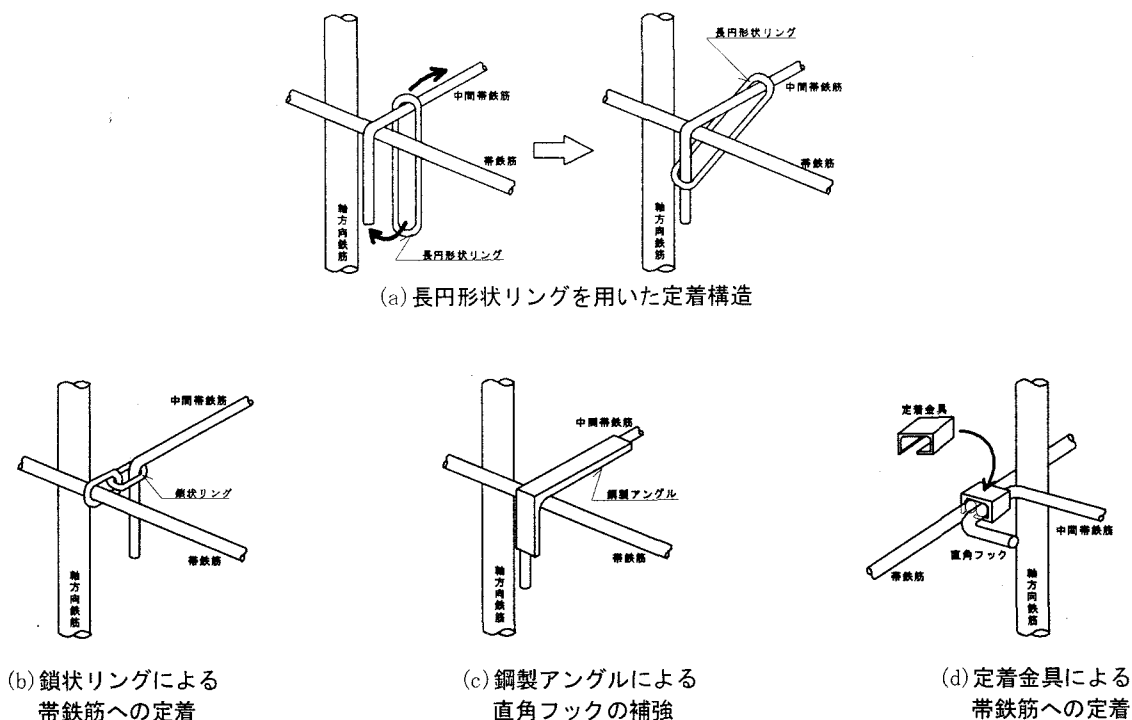


図-1 施工性を考慮した予稿拘束筋端部の定着構造の概念図

ものである。

本研究では、これまでの検討結果を踏まえ、考案した定着構造の一つであるリング式定着構造について、橋脚模型を用いた正負交番載荷試験による定着性能の確認を行った。

(3) 正負交番載荷実験の概要

a) 模型供試体

本実験に用いた模型供試体の諸元を、図-2に示す。本研究では、中間帯鉄筋の定着構造形式をパラメータとした2体の供試体について検討を行った。一体は柱部全断面において中間帯鉄筋の端部定着に従来から用いられている半円形フックを用いた供試体(比較供試体)、もう一体は、基本的に比較供試体と同様の構造としつつ、塑性ヒンジ領域にのみ著者らの提案するリング式定着構造を用いた供試体である。なお、リング式定着構造は載荷時に圧縮面及び引張面となる面の片面(加振機の反対側の面)にのみ配置し、それ以外の面については半円形フックを使用している。定着部の詳細を、図-3に示す。

b) 載荷方法

載荷は、降伏変位 δ_y の整数倍毎に正負交番を行い、各載荷ステップにおける繰返し回数は3回とした。また、死荷重反力による軸応力として 1N/mm^2 を与えた。

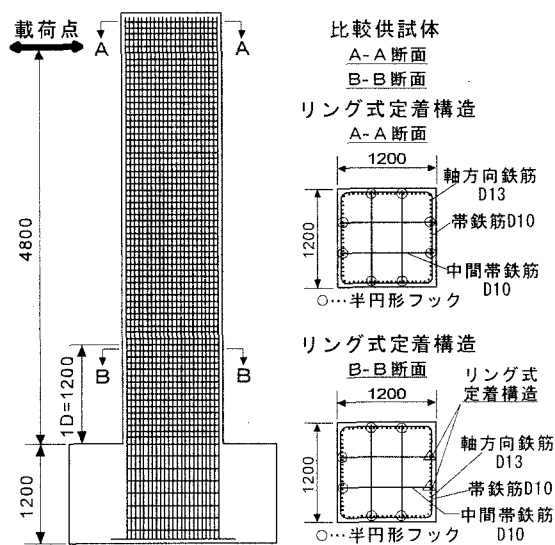


図-2 端部定着構造用供試体の諸元

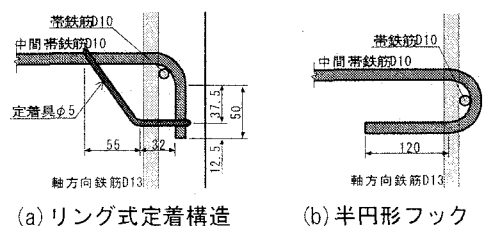


図-3 定着部の詳細

(4) 実験結果

a) 水平力-水平変位の関係と損傷の進展

図-4は、実験により得られた各供試体の載荷点における水平力-水平変位関係の履歴曲線である。比較供試体では、 $5\delta_y$ の載荷までは水平ひびわれが生じる程度の損傷であり、 $6\delta_y$ の載荷でかぶりコンクリートの剥離、 $7\delta_y$ の載荷でかぶりコンクリートの剥落が生じ始めた。そして、 $8\delta_y$ の載荷で基部から高さ400mmの範囲で軸方向鉄筋が大きく座屈するのに伴いかぶりコンクリートが剥落し、損傷が内部に進展した。一方、リング式定着構造を用いた供試体では、 $5\delta_y$ の変形までは水平ひびわれ程度の損傷であり、 $6\delta_y$ の載荷でかぶりコンクリートの剥離が生じ始めた。そして、 $8\delta_y$ の載荷で軸方向鉄筋の座屈に伴うかぶりコンクリートの剥落が生じ始め、 $9\delta_y$ の載荷で損傷が内部にまで進展した。また、このとき基部から300mm及び375mmの位置において、中間帯鉄筋の直角フックがリングから外れた。

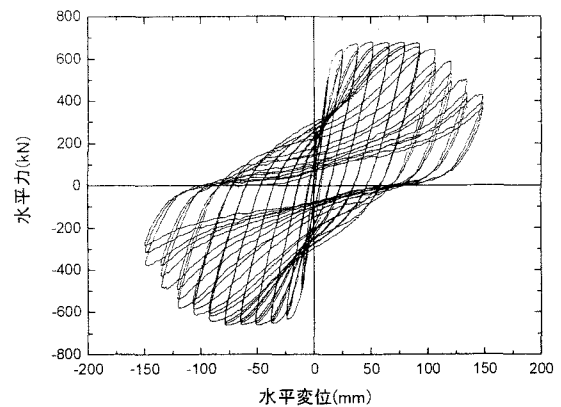
b) 包絡線の比較

上述のように、どちらの供試体もほぼ同じような損傷の進展状況であった。両者の水平力-水平変位履歴曲線の包絡線を比較すると、図-5のようになる。半円形フックとリング式定着構造の効果を比較する上では図の第1象限に着目する必要があるが、図-5によれば荷重の低下域を含めてほとんど同じ履歴曲線となっており、今回実験で用いた諸元に関しては、中間帯鉄筋の端部定着にリング式定着構造を用いた橋脚は従来から用いられている半円形フックによる定着とした橋脚と同等の変形性能を有しているといえることができる。

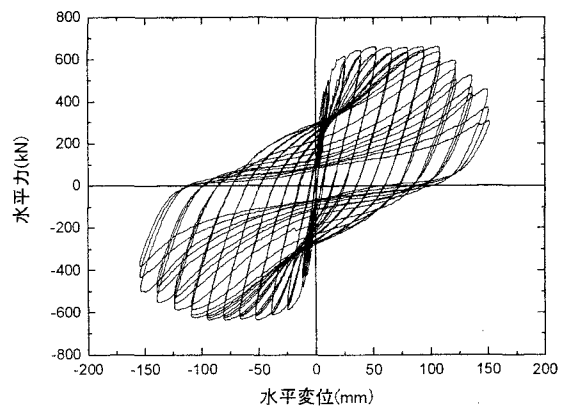
3. 楕円インターロッキング式配筋構造

(1) 楕円状に曲げた帯鉄筋を用いたインターロッキング式配筋構造の概念

インターロッキング式橋脚は、我が国でも近年実橋への適用が始められたところであるが⁹⁾、今後さらに適用範囲を広めていくためには、我が国で多用されている幅広な長方形断面にも適用できるように発展させていく必要がある。そこで、著者らは、帯鉄筋の加工形状を楕円としてインターロッキング配筋とした新しい配筋方法（以下「楕円インターロッキング式配筋」という）を提案する。楕円インターロッキング式配筋を採用すれば、2連の楕円帯鉄筋を重ね合わせるだけで従来よりも幅広な長方形断面とすることができ、3連の円形帯鉄筋によるインタ



(a) 比較供試体



(b) リング式定着構造

図-4 水平力-水平変位関係の履歴曲線

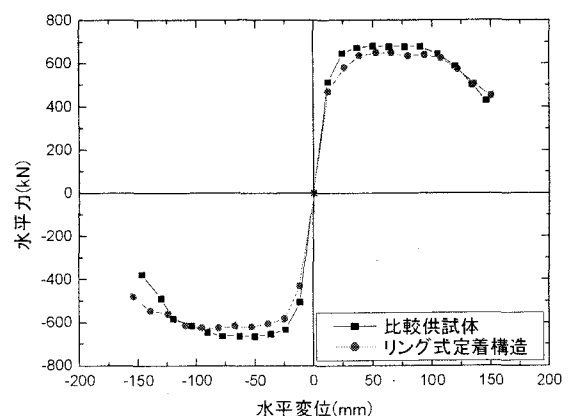


図-5 包絡線の比較

ーロッキング式配筋と比較しても、帯鉄筋量を減らすことができ、かつ、施工性も向上することが期待される。その一方で、帯鉄筋の形状を楕円とすることで円形帯鉄筋よりも拘束効果が低下することも懸念される。そこで、本研究では、楕円インターロッキング式配筋をした橋脚の塑性変形特性を正負交番

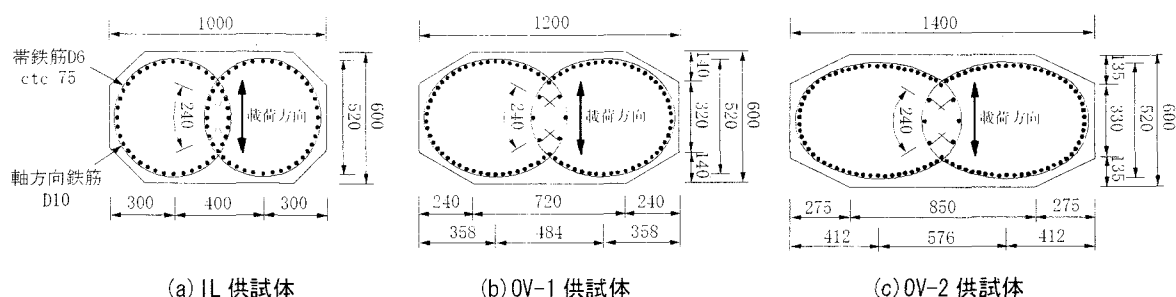


図-6 実験供試体の断面図

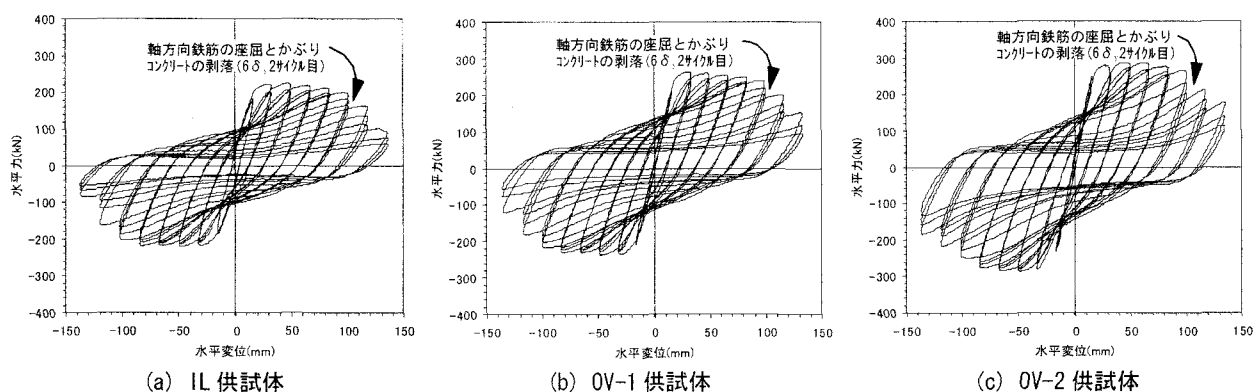


図-7 水平力-水平変位関係の履歴曲線

載荷実験により検証し、従来のインターロッキング式橋脚の塑性変形特性¹⁹⁾との比較検証を行った。

(2) 正負交番載荷実験の概要

a) 模型供試体

本研究の実験に用いた供試体は、フーチング上面から載荷点までの高さが3010mmの単柱式鉄筋コンクリート橋脚模型であり、帯鉄筋の曲げ形状をパラメータとして3体製作した。これらの供試体の断面図を図-6に示す。IL供試体は、曲げ半径268mmで円形に曲げた帯鉄筋を重ね合わせてインターロッキング式配筋とした供試体である。隣り合う帯鉄筋の中心間隔は、帯鉄筋の曲げ半径の約1.5倍に相当する400mmとした。一方、OV-1及びOV-2供試体は、柱幅がそれぞれ1200mm及び1400mmであり、楕円状に曲げた2連の帯鉄筋を重ね合わせた楕円インターロッキング式配筋である。柱幅を変化させ、帯鉄筋の曲げ形状である楕円の長径も変わっており、偏平率はそれぞれ1.21及び1.43である。なお、OV-2供試体の柱幅は、仮にIL供試体にもう1連の帯鉄筋を加えて3連のインターロッキング式配筋とした場合の柱幅に相当している。軸方向鉄筋は、いずれの供試体ともD10の異形鉄筋を用い、軸方向鉄筋比が1.0%となるように本数を決定した。また、帯鉄筋にはD6の異形鉄筋を用い、柱高さ方向に75mm間隔で設置した。

b) 載荷方法

載荷は、降伏変位 δ_y の整数倍毎に正負交番を行い、各載荷ステップにおける繰返し回数は3回とした。また、死荷重反力による軸応力として $1\text{N}/\text{mm}^2$ を与えた。

(3) 実験結果

a) 水平力-水平変位の関係と損傷の進展

実験により得られた各供試体の載荷点における水平力-水平変位関係の履歴曲線を図-7に示す。IL供試体では、 $4\delta_y$ の変形の載荷までは水平ひびわれが生じている程度の損傷であり、 $5\delta_y$ の変形の載荷中に基部から高さ150mmまでの範囲においてかぶりコンクリートの剥離が生じた。そして、 $6\delta_y$ の変形を与えると、同範囲で軸方向鉄筋が座屈しながらかぶりコンクリートが大きく剥落し、損傷が内部へと進展した。ただし、この段階でのかぶりコンクリートの剥落は、圧縮側となる面全体で生じているのではなく、軸方向鉄筋が最外縁近くに配筋され、かぶり厚さが最も小さくなっている2箇所で顕著に生じており、帯鉄筋を重ねた領域では軸方向鉄筋の座屈は生じていなかった。

一方、断面幅が1200mmで楕円インターロッキング式配筋としたOV-1供試体では、水平ひびわれの進展が $5\delta_y$ の変形まで続き、 $6\delta_y$ の変形を載荷中に基部

から230mmの範囲で軸方向鉄筋の座屈に伴ってかぶりコンクリートが剥落した。また、断面幅を1400mmまで広げたOV-2供試体では、 $5\delta_y$ の変形の载荷において柱基部から230mmの高さの範囲でかぶりコンクリートが剥離し始め、次の $6\delta_y$ の変形を载荷中にその範囲で軸方向鉄筋が座屈しかぶりコンクリートが剥落した。両供試体とも、IL供試体と同様に、この段階でのかぶりコンクリートの剥落は圧縮側の面全体で生じているのではなく、軸方向鉄筋のかぶり厚さが最も小さくなっている2箇所が生じた。

b) 帯鉄筋の加工形状が塑性変形性能に及ぼす影響

前述のように、いずれの供試体とも $5\delta_y \sim 6\delta_y$ の変形を繰返し载荷にかぶりコンクリートの剥離が生じ、 $6\delta_y$ の変形を繰返し载荷する段階で、軸方向鉄筋の座屈とそれに伴うかぶりコンクリートの剥落が生じた。水平力-水平変位関係を供試体間で相対的に比較できるようにするために、水平力を $1\delta_y$ の载荷において計測された水平力（降伏耐力）で無次元化した降伏耐力比を用いて比較した結果を図-8に示す。これより、今回実験を行った楕円の扁平の範囲内であれば、楕円インターロッキング式配筋をした橋脚は従来からある円形帯鉄筋によるインターロッキング式橋脚と同等の塑性変形性能を有していると言える。

また、図-9は、各供試体において、柱基部より高さが37mmの断面から357mmの断面の領域で計測した曲率の平均値と塑性率の関係を比較して示したものである。ここで、当該領域は曲げ塑性変形が生じた断面区間に概ね相当している。これより、塑性率と計測領域における平均曲率の関係はほぼ一致しており、塑性ヒンジ領域での挙動も同様であることが確認される。

4. まとめ

施工性を考慮した横拘束筋の端部定着構造の一つとしてリング式定着構造を提案し、橋脚模型を用いた正負交替载荷実験により定着性能の検証を行った。また、幅広い長方形断面にも適用できるような楕円インターロッキング式配筋による橋脚構造を提案し、実験によりその塑性変形性能の確認を行った。本検討によりえられた知見は、以下の通りである。

- ①中間帯鉄筋の端部定着にリング式定着構造を用いた橋脚は、従来から用いられている半円形フックを使用した橋脚と同等の塑性変形性能を有することが確認された。今後、構造諸元の設定方法等についてさらに検討を進めていく予定である。

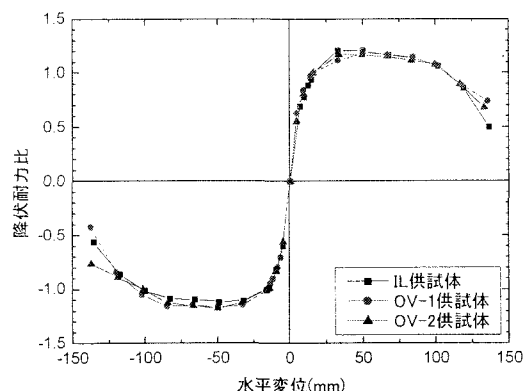


図-8 降伏耐力比-水平変位関係の比較

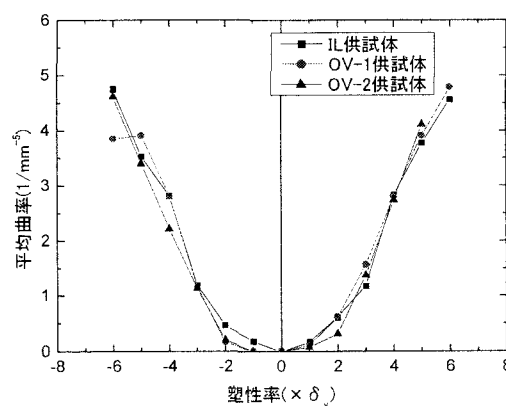


図-9 塑性ヒンジ領域における曲率の比較

- ②帯鉄筋の曲げ加工形状である楕円の扁平率が1.43までの範囲内であれば、楕円インターロッキング式橋脚構造の塑性変形性能は従来からある円形帯鉄筋によるインターロッキング式橋脚と同等であることを実験的に明らかにした。

5. 謝辞：本研究は、土木研究所、(財)土木研究センターならびに民間5社で実施している、「鉄筋コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究」の成果の一部であり、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1)塩島亮彦，運上茂樹，星隈順一：横拘束筋の端部定着構造とその定着性能の検討，第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.89-94，2003年1月
- 2)塩島亮彦，運上茂樹，星隈順一：直角フックを有する横拘束筋の端部定着構造に関する実験的検討，土木学会第58回年次学術講演会，2003年9月
- 3)塩島亮彦，運上茂樹：直角フックを有する横拘束筋の

- 端部定着構造とその定着性能の検討，第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2004年1月
- 4) 寺山徹，運上茂樹：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす中間帯鉄筋の影響，土木技術資料，Vol. 40，No. 3，pp. 56-61，1998年3月
- 5) 立松伸博，大野義照：鉄筋コンクリート柱の曲げ破壊性状に及ぼす帯筋端部形状の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 3，pp. 241-246，2001年
- 6) 鈴木基行，秋山充良，杉田稔，松山英雄，宇田川亮：簡便なせん断補強筋機械式継手の開発およびそのRC部材への適用に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，第11巻，第3号，pp. 49-61，2000年9月
- 7) 澤本武博，辻正哲，舌間孝一郎，西川泰之，加賀谷収：地震荷重によりかぶりが剥離する場合のフープ筋の定着補強に関する研究，土木学会第53回年次学術講演会，第5部，pp. 1146-1147，1998年1
- 8) 運上茂樹，星隈順一，塩島亮彦：施工性の向上を図った横拘束筋端部の定着構造の提案，土木学会第57回年次学術講演会，2002年9月
- 9) 水口和之，紫桃孝一郎，中村元，大橋岳：インターロッキング式橋脚の研究と開発，第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム，土木学会，pp. 35-38，2003年1月
- 10) 長屋和宏，運上茂樹：インターロッキングRC橋脚の動的耐力，変形性能に関する実験的検討，第25回地震工学研究発表会，Vol. 2，pp. 709-712，1999年7月