

◆ 特集：動の実験施設を活用した研究開発 ◆

高性能鉄筋コンクリート橋脚の载荷実験

星隈順一* 塩島亮彦** 運上茂樹***

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、鉄筋コンクリート橋脚においては、修復性を考慮した耐震設計の重要性が認識されるようになってきている。このような耐震性能を高めるための方策として、塑性変形性能を向上させ、修復を行い得る限界変形を大きくするというのが一般的な考え方であり、塑性ヒンジ領域には拘束効果を高めるために、帯鉄筋や中間帯鉄筋を密に配置することが多くなっている。

しかしながら、このようにしてコンクリートの拘束効果を高めるほど損傷は限定された範囲にのみ生じるようになる。また、帯鉄筋や中間帯鉄筋の配筋が非常に煩雑となり、コンクリートの充填にも注意を要するなど、施工性の観点からも問題が生じてくる。したがって、横拘束補強以外の手法で耐震性能を向上させる新しい考え方が必要となっている。

本文は、軸方向鉄筋の座屈発生をできる限り抑制できるような軸方向鉄筋の配置方法に関する検討、及び新しい配筋方法による橋脚構造の塑性変形性能を模型供試体を用いた実験により確認した結果を報告する。

2. 座屈の抑制を図った軸方向鉄筋の配筋方法

鉄筋コンクリート橋脚模型に対する従来の研究成果等^{1),2)}を踏まえると、軸方向鉄筋の座屈抑制効果を高めるための一つの方策として、軸方向鉄筋径に対するかぶりコンクリートの厚さの比を大きくすることにより、塑性ヒンジ長を長くすることが考えられる。

そこで、本研究では上記の方策を基本とし、塑性変形性能を高めることに着眼した合理的な軸方向鉄筋の配置方法について検討を行った。

図-1は、軸方向鉄筋を2段に配置し、鉄筋を塑性ヒンジとなる断面領域においてX字状にクロスするように折り曲げて軸方向鉄筋とした橋脚構造を示したものである。本構造のポイントとその

ねらいを整理すると、以下のようになる。

- (1) 塑性ヒンジとなる断面領域において、予め軸方向鉄筋を内側に折り込むことで幾何学的に外側にはらみ出しにくくし、さらに内部のコンクリートへと定着させることにより、座屈抑制に対する効果を高めている。
- (2) クリティカルとなる断面(最初に終局曲げモーメントに達する断面)を軸方向鉄筋がX字状に交差している断面としている。
- (3) 軸方向鉄筋がX字状に交差している断面に、それらの軸方向鉄筋を取り囲むように帯鉄筋を配置する。

本構造では、塑性ヒンジの中心を軸方向鉄筋がX字状に交差している断面に誘導するようにしている。これは、通常の鉄筋コンクリート構造であれば軸方向鉄筋の座屈の腹は塑性ヒンジの概ね中心付近に生じるが、本構造ではその断面において軸方向鉄筋を斜めに内側に向けて配置することで

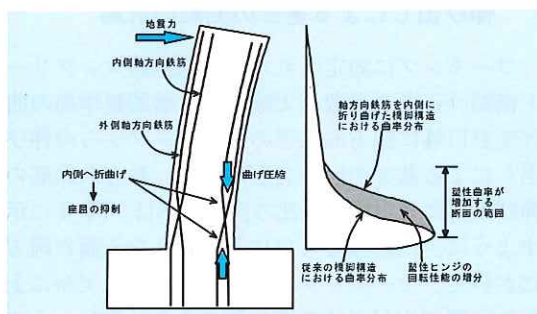


図-1 軸方向鉄筋を塑性ヒンジ領域でX字状にクロスさせた橋脚構造

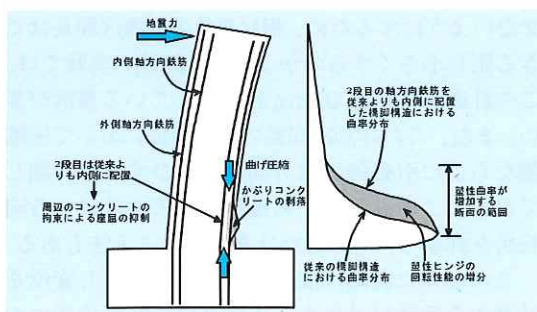


図-2 2段目の軸方向鉄筋を断面内部に配置した橋脚構造

外側への座屈が生じにくくなる効果を期待したためである。

一方、図-2は、軸方向鉄筋を2段に配置した鉄筋コンクリート橋脚構造であるが、2段目に配置される軸方向鉄筋を断面の内部の方に配置している点が従来構造と異なる。軸方向鉄筋は断面の外側に配置する方が曲げ耐力を大きく確保することができるため、2段配筋の場合でも、通常は断面の外側に近い位置に配筋される。しかしながら、軸方向鉄筋の座屈抑制という観点からは、かぶりコンクリートが厚い方が効果が高いものと考えられる。ただし、すべての軸方向鉄筋を従来よりも内側に配置すると、有効高さが小さくなるため、その分曲げ耐力が低下してしまう。そこで、本構造では、軸方向鉄筋の一部を断面の内部の方に配筋することにした。本構造のポイントとそのねらいを整理すると、以下ようになる。

- (1) 軸方向鉄筋の一部を座屈しにくくするため、従来よりも断面の内側に配置している。
- (2) 外側に配置する軸方向鉄筋の本数を減らし、軸方向鉄筋がかぶりコンクリートを押し出す力を小さくしている。
- (3) レベル1地震動に対しては全ての軸方向鉄筋を考慮し、レベル2地震動に対しては内側の軸方向鉄筋とそれを取り囲む帯鉄筋により、じん性設計を行うことを想定している。

3. 模型供試体の設計と載荷方法

3.1 模型供試体の設計

実験に用いた模型供試体は、図-3に示すNo.0～

No.2の3体である。断面は一辺が600mmの正方形であり、基部から載荷点までの高さは3,010mm、フーチング厚さは700mmである。

No.0 供試体は基準となる供試体であり、軸方向鉄筋としてD10が48本配筋されている。

No.1 供試体は、軸方向鉄筋を2段に配筋し、基部から1D (D:断面寸法) の高さの範囲において、軸方向鉄筋をX字状に交差させている。軸方向鉄筋として、最外縁から40mm内側にD10を12本、最外縁から120mm内側にD13を24本配置した。帯鉄筋は基部からの高さ900mmまでの範囲では75mm間隔で配置し、軸方向鉄筋がX字状に交差している断面領域では、軸方向鉄筋の形状に沿って帯鉄筋の形状寸法を変化させている。また、高さ900mm以上の断面では塑性化が生じないと考え、外側の軸方向鉄筋を取り囲む帯鉄筋の間隔は150mm、内側の軸方向鉄筋を取り囲む帯鉄筋の間隔は300mmとした。

No.2 供試体でも、軸方向鉄筋を2段に配置しているが、曲げ加工することなくまっすぐにフーチングに定着させている。軸方向鉄筋として、最外縁から40mm内側にD10を24本、最外縁から120mm内側にD13を20本配置している。外側の軸方向鉄筋を取り囲む帯鉄筋は全高にわたって150mm間隔で配置し、内側の帯鉄筋は基部から高さ900mmの範囲では75mm間隔、それ以上の断面では300mm間隔で配置した。これは、降伏後の塑性変形性能を主として内側の軸方向鉄筋と帯鉄筋ならびにそれらで取り囲まれたコンクリートによって発揮させることとしており、

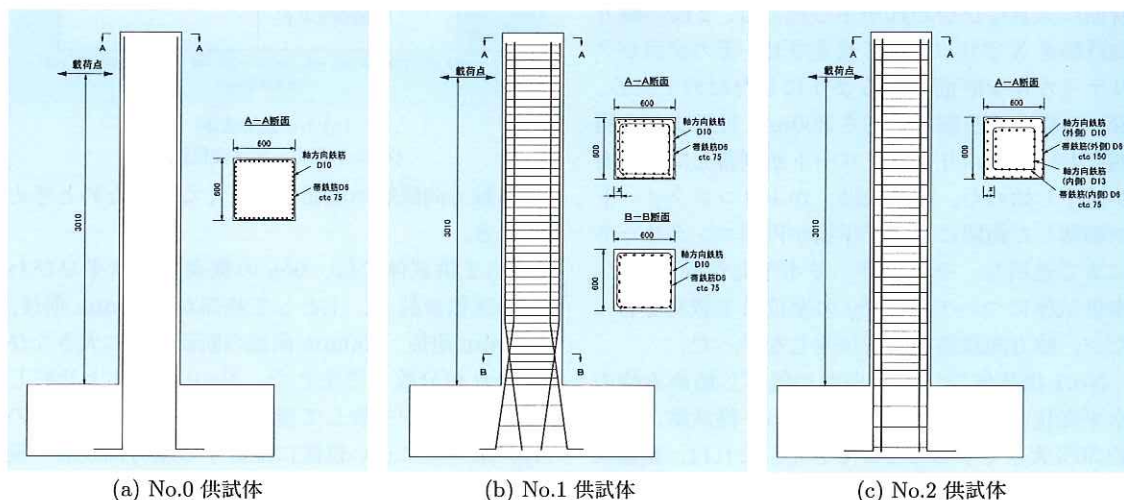


図-3 模型供試体の諸元

外側の軸方向鉄筋は、大きな塑性変形が繰り返し作用した場合に生じる低サイクル疲労の影響を小さくするべく、帯鉄筋による拘束を弱め、広い範囲にひずみが分散するように配慮したためである。

3.2 載荷方法と計測項目

載荷は、降伏変位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り返し回数は3回とした。また、死荷重反力による軸応力として 1N/mm^2 に相当する軸力を与えた。実験状況は本紙グラビアの写真-9 に示すとおりである。

本実験では、載荷点位置における水平力、軸力、供試体に生じる水平変位、塑性ヒンジ領域とその近傍の断面における曲率、フーチングからの軸方向鉄筋の伸び出し、鉄筋のひずみ等を計測した。

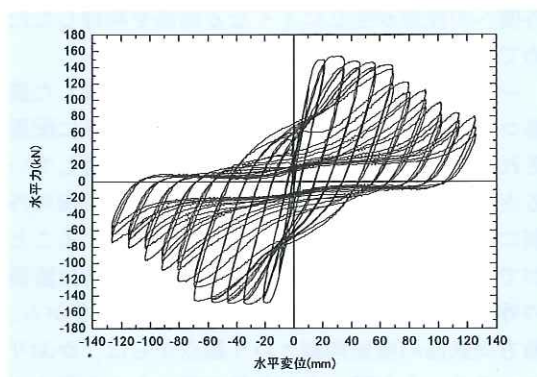
4. 水平力-水平変位の関係と損傷の進展

図-4 は、載荷点における水平力と水平変位の関係の履歴曲線を示したものである。

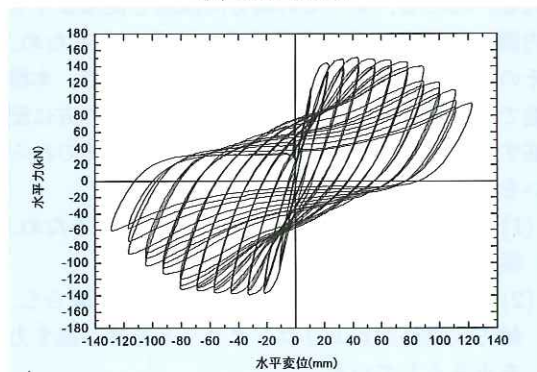
従来タイプの軸方向鉄筋の配置とした No.0 供試体では、 $5\delta_y$ の変形までは水平ひび割れ程度の損傷であったが、 $6\delta_y$ の載荷で基部から高さ約 300mm までの範囲においてかぶりコンクリートのはらみだしが生じ始め、その 3 サイクル目の載荷で水平力の低下が生じた。そして、 $7\delta_y$ の変形で軸方向鉄筋が大きく座屈するとともに、損傷が内部コンクリートにまで進展した。

No.1 供試体では、 $6\delta_y$ の載荷まで水平ひびわれの進展が続き、主として基部から 200~350mm の高さの断面付近に大きなひびわれ幅を有するひびわれが生じた。No.0 供試体に比べて高い位置の断面に大きなひびわれが生じたのは、2 段の軸方向鉄筋を X 字状に曲げて交差させ、その交点がクリティカルな断面になるようにしたためである。 $8\delta_y$ の載荷で基部から高さ 300mm 付近までの範囲においてかぶりコンクリートが剥落して水平力が低下し始めた。その後は、かぶりコンクリートが剥落した範囲において損傷が内部コンクリートにまで進展し、それに伴って水平力が低下した。本供試体については $10\delta_y$ の変位まで載荷を行ったが、軸方向鉄筋の破断は生じなかった。

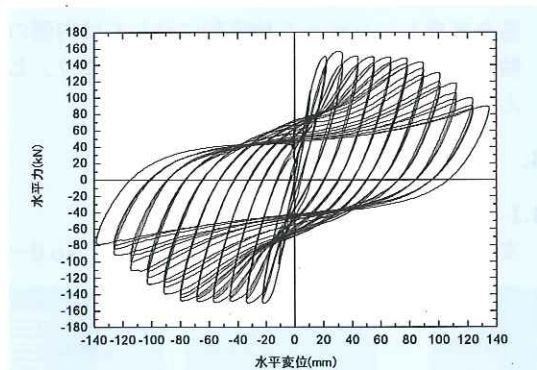
No.1 供試体では、水平力が低下し始める時の水平変位が約 90mm であり、No.0 供試体よりも約 30%大きくすることができた。これは、損傷域において軸方向鉄筋を内側に傾斜させた配筋構造としたことにより、曲げ圧縮力が作用しても圧縮



(a) No.0 供試体



(b) No.1 供試体



(c) No.2 供試体

図-4 水平力-水平変位関係

側の軸方向鉄筋が座屈しにくくなったためと考えられる。

No.2 供試体では、 $6\delta_y$ の載荷まで水平ひびわれの進展が続き、主として基部から 70mm 前後、150mm 前後、300mm 前後の断面付近に大きなひびわれが分散して生じた。No.0 供試体と比較してひびわれが分散して塑性変形性能が向上したのは、最外縁に近い位置に配置する軸方向鉄筋の量を減らしたことによって、軸方向鉄筋の座屈により生じるかぶりコンクリートを押し出す力が小さ

くなったためと考えられる。 $8\delta y$ の載荷では、基部から高さ150mm付近までの範囲において、外側に配置した軸方向鉄筋が座屈した。このとき、内側の軸方向鉄筋は露出していない状況であった。ここでは、外側の軸方向鉄筋に座屈が生じたにもかかわらず、水平力-水平変位関係の履歴曲線が比較的安定した履歴ループを維持している点に注目できる。一般に、軸方向鉄筋が座屈してかぶりコンクリートが剥落するような損傷が生じると、水平力-水平変位関係の履歴曲線の形状が紡錘形から逆S字形へと変化する。これは、座屈した軸方向鉄筋に引張変形を与えても、鉄筋がまっすぐになるまでは引張抵抗力が十分に発揮できないためである。しかしながら、本供試体では、内側の軸方向鉄筋が座屈せずに有効に引張抵抗力を発揮し、外側の軸方向鉄筋が座屈しても直ちには水平力の低下に至らなかったものと考えられる。 $10\delta y$ の載荷で、外側の軸方向鉄筋が合計5本破断したが、内側の軸方向鉄筋の座屈は生じず、安定した復元力特性が確保されている状態であった。

このように、座屈する軸方向鉄筋の割合を少なくすることにより、水平力が低下し始めるときの水平変位をNo.0供試体よりも40%程度大きい、約100mmにまで向上させることができた。

5. まとめ

本研究では、座屈の抑制を図った軸方向鉄筋の配筋方法を提案し、その有用性を模型供試体による正負交番載荷実験により検証した。本検討より得られた知見をまとめると以下のとおりである。

(1) 軸方向鉄筋を2段に配置し、塑性ヒンジとなる断面領域においてX字状にクロスするように配筋して座屈しにくくした橋脚構造、2段に配置した軸方向鉄筋のうち、内側の軸方向

鉄筋を従来よりも断面の内部の方に配置し、座屈する軸方向鉄筋の本数を低減させた橋脚構造ともに、従来の橋脚構造よりも塑性変形性能を30~40%程度向上させることができた。

(2) 軸方向鉄筋を塑性ヒンジとなる断面領域でX字状にクロスするように配筋した橋脚構造では、軸方向鉄筋が外側にはらみ出しにくい配置となっていることによって座屈の発生が抑制された。本構造において塑性変形性能が向上したのは、軸方向鉄筋の座屈の抑制により、引張りずみの塑性化が広い範囲に生じ、塑性ヒンジの長さが長く確保されたためである。

(3) 2段に配置した軸方向鉄筋のうち、内側の軸方向鉄筋を従来よりも断面の内部の方に配置した配筋とすることにより、内側の軸方向鉄筋の座屈を防ぐことができる。今回の実験では、鉄筋量にして約3/5の軸方向鉄筋の座屈を防ぐことにより、水平力-水平変位関係の履歴曲線にピンチングの影響が現れず、水平力が低下し始めても、安定したエネルギー吸収性能が得られた。また、外側に配置した軸方向鉄筋についても、従来の配筋とした場合と比較すると座屈の発生を遅らせることができた。

参考文献

- 1) 星隈順一、長屋和宏、運上茂樹：鉄筋コンクリート橋脚の塑性曲率分布と塑性ヒンジ長、構造工学論文集, Vol.46A, pp.1461-1468, 2000年3月
- 2) 浅津直樹、運上茂樹、星隈順一、近藤益夫：軸方向鉄筋の座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する研究、土木学会論文集, No.682, I-56, pp.177-194, 2001年7月

星隈順一*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ耐震チーム主任研究員、工博
Dr.Jun-ichi HOSHIKUMA

塩島亮彦**



同 耐震チーム
Akihiko SHIOJIMA

運上茂樹***



同 耐震チーム上席研究員、工博
Dr.Shigeki UNJOH