論文 く体中間部に塑性ヒンジを有する RC 橋脚構造の変形挙動に関す る基礎的研究

鷹野 秀明^{*1}·小林 薫^{*2}

要旨:河川内や地中深く埋設される橋脚において,地震時の損傷を水上部や地上部に誘導すれば,復旧時の仮 設設備が軽減でき,早期復旧が期待できる。しかしながら,橋脚く体中間部に損傷を誘導し,耐震性能を満 足した橋脚構造とするためには,橋脚く体中間部での塑性ヒンジの回転性能をより大きくする必要がある。 本検討は,橋脚く体中間部に内巻きスパイラルを配置した橋脚構造の地震時における変形挙動に着目し,模 型試験体による交番載荷実験を行った。その結果,内巻きスパイラルが有効に機能することを確認した。 キーワード:RC橋脚,内巻きスパイラル,交番載荷試験

1.はじめに

RC 橋脚の設計では,基部で鉄筋量が決定され,上部 にいくほど断面力が減少するので鉄筋量を減らした配筋 構造が採用されてきた。このような橋脚では,近年の大 地震時において鉄筋量が不連続となるカットオフ点で写 真-1のようにかぶりコンクリートが剥落し,損傷する場 合が見られる。もし,河川や地中の橋脚基部で損傷した 場合に,損傷の確認が難しく RC 橋脚の河川での復旧状 況を想定すると,図-1 に示すような仮締切や施工時期の 制約等による工期や費用の増大が懸念される。



写真-1 地震によるRC橋脚損傷例



図-1 基部損傷の復旧例

そこで,橋脚体中間部に損傷を誘導することによる復 旧の合理化を目的として,カットオフ点に曲げ損傷を誘 導してエネルギーを吸収させる構造を検討している。橋 脚く体中間部でのエネルギー吸収に関しては,せん断ス パンが短くなることにより,橋脚基部でのエネルギー吸 収より不利となる可能性がある。帯鉄筋を多く配置する 既存の構造で,く体中間部でエネルギー吸収を図る場合, 曲げ耐力等を大きく設定する必要があることから経済性 を損ねることも想定される。そこで,大変形領域におい て経済性を損ねないことに着目して,スパイラル筋を入 れることを検討している。そうすれば,図-2のように, カットオフ点付近で損傷させ,比較的簡易な仮設設備に よる復旧で橋脚の早期復旧が期待できる。

本論は,橋脚中間部での変形性能向上を目指した模型 試験体の交番載荷実験を行い,詳細なカットオフ点での 損傷状況について検討したので報告する。



図-2 段落し部損傷の復旧例

2.実験の概要

2.1 試験体諸元

実験に用いた RC 橋脚模型の試験体概要を図-3 に,試 験体諸元を表-1 に示す。試験体は,一般的な鉄道構造物 の RC 橋脚を想定しており,断面寸法は約 1/3 の縮尺模 型とし,主鉄筋がカットオフ点を有している。

試験体の交番載荷点を基部から 2200mm とし,1D(D: 載荷方向の試験体寸法 350mm)以上の定着長は,十分な 定着長を想定し基部からカットオフ点までを SS-2 と D-12は1D+93 (930mm :鉄筋径)とし,SS-3と

*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主席 (正会員) *2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 課長 博士(工学) (正会員)



図-3 試験体概要

| 表-1 訪 | 、験体緒元 |
|-------|-------|
|-------|-------|

| 試験体 | カットオフ点高さ | 内巻きスパイラル筋 | | | 軸方向鉄筋配置 | | 曲げ性能比 | 軸方向応力度 |
|-------------|----------|-----------|---------|-------|---------|----------------|----------|--------|
| 番号 | (mm) | () | ピッチ(mm) | 種類 | 段落し部 | 基部 | Myc/Mxyc | (MPa) |
| SS-2 | 1280 | 9.0 | 20.0 | SR235 | D10×10本 | D10×18本 ×2段 | 1.05 | 0.6 |
| SS-3 | 1000 | 9.0 | 20.0 | SR235 | D10×13本 | D10×24本 ×2段 | 0.75 | 0.6 |
| SS-10 | 1000 | 9.0 | 60.0 | SR235 | D10×13本 | D10×24本 ×2段 | 0.75 | 0.6 |
| D-12 比較用 | 1280 | - | - | - | D10×10本 | D10×18本 ×2段 | 1.05 | 0.6 |



写真-2 試験体の配筋



S-10 は 1D +85 (850mm)に 設定した。軸方向鉄筋径は D10 とし,主鉄筋の芯かぶり は 35mm とした。曲げ性能比 は,基部が曲げ降伏耐力に達 したとき,段落し部の曲げ降 伏耐力(Myc)をカットオフ点 に発生するモーメント (Mxyc)で除した値としてい

る。内巻きスパイラル筋は写真-2 に示すように,カット オフ点を中心に1D(350mm)上下+10mmの550mmとし, 直径180mmを4箇所設置している。SS-2・SS-3・SS-10 のカットオフ点の帯鉄筋6mm(丸鋼)は,内巻きスパイ ラル筋の効果をより明確にするために直角フックとして 外れやすくし,D-12はD6を半円フックで150mmピッ チに配置している。なお,実験を行った試験体は3体で あるが,D-12については内巻きスパイラル筋の効果を比 較するために小林ら¹⁾の実験からの結果を用いている。

引張鉄筋比をカットオフ点で 0.0019,基部で 0.0070 として,曲げ性能比を 0.75~1.05 とすることによりカット

オフ点の軸方向鉄筋を降伏しやすくしている。また, く体中間部塑性ヒンジ橋脚の内巻きスパイラル筋で囲 まれるコンクリート断面積がく体断面積比で大きいほ どコンクリートの拘束効果により変形性能が高められ ると考えたが,主鉄筋の配置上く体断面積の27.7%に 留めている。パラメータは,内巻きスパイラル筋の有 無及びピッチとした。

2.2 載荷方法

実験は,図-3 に示す様に軸方向応力度 0.6MPa を作 用させた状態で正負1回ずつ交番載荷し,段落し部で 載荷方向最外縁の主鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した 時点の載荷位置に生じる変位を降伏変位 y と定義し, この整数倍の変位 n ×δy(1,2,3...10δy 以降は,12,14,16δy) で順次変位振幅を増加させながら載荷した。10δy 以上の 大変形領域では軸方向連続鉄筋が低サイクル疲労で破断 して変形性能を支配する現象が生じた。よって,低サイ クル疲労で破断を避けるため SS-10 は,始めから 2 倍の 整数倍変位 n ×δy (1,2,4...16δy)とした。

3. 実験結果

3.1 破壊性状及び耐荷性状

写真-3~6 に, D-12, SS-2, SS-3, SS-10 の載荷方向に 並行な橋脚面のひび割れ状況を示し,図-4~7 にD-12, SS-2, SS-3, SS-10 の載荷点における荷重-変位曲線(横 軸:荷重 kN,縦軸:変位 mm)を示す。なお,本検討に おける荷重は,軸力によるP-δ効果を考慮している。 (1)D-12 の破壊性状

D-12 は内巻きスパイラル筋がなく,カットオフ点高さ 1280mm,曲げ性能比が 1.05 である。カットオフ点の連 続軸方向鉄筋が先行して降伏し,カットオフ点が塑性ヒ ンジとなり破壊に至っている。ひび割れは,80kN で高さ 350mm 付近にひび割れが入り,120kN でカットオフ点付 近にひび割れが発生した。



図-4 D-12 試験体の荷重 - 変位曲線

ひび割れはその後 50mm~400mm で集中的に発生し, 147kN でカットオフ点の連続軸方向鉄筋が降伏に至った と報告²⁾されている。降伏後は写真-3 にみるように,88y でカットオフ点付近の圧縮側コンクリートが剥落し荷重 が低下し,カットオフ点が塑性ヒンジとなり,カットオ フ点のひび割れが降伏時から実験終了まで顕著で,カッ トオフ点で圧壊した後は圧壊した位置から折れ曲がるよ うに変形したと報告¹⁾されている。

(2)SS-2の破壊性状

SS-2 は内巻きスパイラル筋が 9mm で直径 180mm の 20mm ピッチで 4 箇所に入っており,カットオフ点高さ 1280mm,曲げ性能比が 1.05 と D-12 と同じである。最 初 80kN で高さ 350mm 付近にひび割れが入り,85kN ~ 100kN の間で 100mm ~ 400mm に集中的に入り, 120kN でカットオフ点付近にひび割れが発生した。ひび割れは その後 400mm 以上で 100mm ~ 150mm 間隔で順次発生し, 155kN で基部の連続軸方向鉄筋が降伏に至った。降伏後 は写真-4 にみるように,86y で基部付近の圧縮側コンク リートが剥落し荷重が低下していた。



写真-3 D-12 試験体のコンクリート剥落状況



写真-4 SS-2 試験体のコンクリート剥落状況



図-5 SS-2 試験体の荷重 - 変位曲線



(3)SS-3の破壊性状

SS-3 は内巻きスパイラル筋が 9mm で直径 180mm の 20mm ピッチで 4 箇所に入っており,カットオフ点高さ 1000mm,曲げ性能比が 0.75 である。カットオフ点の連 続軸方向鉄筋が先行して降伏し,カットオフ点領域が塑 性ヒンジとなり破壊に至っている。ひび割れは,最初 90kN で高さ 450mm 付近に入り,続いて 105kN でカット オフ点付近にひび割れが発生した。ひび割れはその後カ ットオフから上下に約 150mm 間隔で順次 1500mm の高 さまで発生しが 900mm 付近には発生しなかった。155kN でカットオフ点の連続軸方向鉄筋が降伏に至った。降伏 後は,カットオフオフ付近上下領域の位置でのひび割れ が降伏時から実験終了まで顕著で 66y でコンクリートが 見落し始めた。カットオフ付近のコンクリートが圧壊し た後は,圧壊した位置から折れ曲がるように変形した。



写真-5 SS-3 試験体のコンクリート剥落状況

(4)SS-10の破壊性状

SS-10 は内巻きスパイラル筋が 9mm で直径 180mm の 60mm ピッチで 4 箇所に入っており, カットオフ点高 さ 1000mm, 曲げ性能比が 0.75 である。カットオフ点部 の連続軸方向鉄筋が先行して降伏し,カットオフ領域が 塑性ヒンジとなり破壊に至っている。ひび割れは,最初 120kN で基部から 1000mm のカットオフ点付近にひび割 れが入り, 続いて 130kN で基部から 100mm 付近と基部 にもひび割れが発生した。ひび割れはその後約 100mm~ 200mm の間隔で順次 1500mm の高さまで発生しが, 900mm 付近には発生しなかった。これは SS-3 同様高さ 1000mm のカットオフ点のひび割れが卓越しているため と思われる。161kN でカットオフ点の連続軸方向鉄筋が 降伏に至った。2δy 以降はカットオフ点のひび割れが 除々に広がり 2.3mm となり, その他のひび割れは進展し なくなった。6dy 以降はコンクリートの圧壊が観察され 荷重が下がっていった。



写真-6 SS-10 試験体のコンクリート剥落状況



(5)全試験体の破壊性状比較

コンクリートが圧壊後,荷重が低下する時点の 6δy~ 8δy で剥落時の剥落範囲を比較すると,D-12 の内巻きス パイラル筋を有しない場合,載荷方向面の剥落部と健全 部の境界線は直線的ではなかった。内巻きスパイラル筋 を有する SS-3 及び SS-10 で剥落部と健全部の境界線の比 較をすると SS-3 が 25~30 (:鉄筋径),SS-10 が 20 ~25 となり,内巻きスパイラル筋のピッチは狭いほど 剥落範囲は広くなる傾向にある。いずれの試験体も,カ ットオフ部で圧縮縁のコンクリートが圧壊するまで最大 荷重を保持し,その後荷重が低下しているが,その時期 は SS-3 が 6δy なのに対して SS-10 が 4δy とピッチの広 い方がコンクリートの剥落が早く発生した。

鉄筋の破断は, SS-2・SS-3・D-12 において 10δy で隅 角部付近に配置されている連続軸方向鉄筋が 1~2 本, 12δy で 2~4 本破断している。これに対して SS-10 は, 載荷ステップの影響により,14δy で隅角部付近に配置さ れている連続軸方向鉄筋が2本破断した。

(6) SS-2とD-12の耐荷性状の比較

図-8 に, SS-3 と D-12 の荷重 - 変位曲線を示す。配筋 が同じで内巻きスパイラル筋を有する SS-2 と内巻きス パイラル筋を有しない D-12 と比較してみる。荷重 - 変 位曲線に大きな差異はないが,D-12 はカットオフ点で連 続軸方向鉄筋が先行して降伏し,カットオフ点上下領域 が塑性ヒンジとなり破壊に至っているのに対して,SS-2 は基部とカットオフ点の連続軸方向鉄筋におけるひずみ 差は微小であるが,基部が先行して降伏し,基部が塑性 ヒンジとなり破壊に至っている。内巻きスパイラル筋を 有すると曲げ性能比が同じであても 1.05 程度では,カッ トオフ点付近の曲げ性能比が上がり,連続軸方向鉄筋が 基部で先行して降伏するという結果となった。よって, この実験において内巻きスパイラル筋を有した橋脚の損 傷をく体中間部に誘導する場合には,曲げ性能比を 1.05 より小さくしなければならないことがわかった。



(7) SS-3とD-12の耐荷性状の比較

図-9 に,無次元化した SS-3 と D-12 の内巻きスパイ ラル筋の有無を比較した荷重 - 変位曲線を示す。内巻き スパイラル筋を有しないD-12は9 以降荷重が急落して 載荷を中止したが,SS-3 は 10 以降の大変形領域におい て荷重が低下して急落することはなかった。これは,10 以降の大変形領域において,内巻きスパイラル筋内の コア部分がコンクリートの圧壊を防いで荷重の低下を抑

えていることを示していると考えられる。 1.5 SS-3 1 D-12 꿍 0.5 yの荷重l 0 -0.5 -1 -1.5 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 y 図-9 SS-3とD-12 試験体の

荷重 - 変位曲線無次元化比較



(8) SS-3とSS-10の耐荷性状の比較

図-10 に, SS-3 と SS-10 の荷重 - 変位曲線を示す。 配筋が同じで内巻きスパイラル筋のピッチの差 20mm と 60mm では,載荷重方法の違いにより SS-10 の方が荷重 は上回っているが,10 以降の大変形領域での大きな変 化は見られなかった。

(9)降伏耐力と最大耐力での計算値と実験値の比較

表-2 に,基部で破壊に至った試験体 SS-2 とカットオ フ部で破壊に至った試験体 SS-3,SS-10,D-12の降伏耐 力と最大耐力での計算値と実験値の比較を示す。内巻き スパイラル筋を有する SS-3,SS-10 では,実験値が計算 値を降伏耐力で 1.28~1.44 倍,最大耐力で 1.40~1.53 倍であった。これに対して内巻きスパイラル筋を有し ない D-12 では,降伏耐力で 1.10 倍,最大耐力で 1.09 倍と内巻きスパイラル筋を有する方が高い値を示した。 これは,内巻きスパイラル筋を耐力の計算に考慮して いないためで,内巻きスパイラル筋の有無による差が 表れたように見うけられる。よって,内巻きスパイラ ル筋が曲げ耐力を負担していると考えられる。

表-2 降伏耐力と最大耐力の計算値と実験値の比較

| 試験体 | 降伏耐力(kN⋅m) | | 宝驗値/計算値 | 最大耐力(kN·m) | | 宝驗値/計算値 | |
|-------------|------------|-------|---------|------------|-------|---------|--|
| 番号 | 計算値 | 実験値 | | 計算値 | 実験値 | | |
| SS-2 | 280.7 | 341.0 | 1.21 | 328.5 | 379.5 | 1.16 | |
| SS-3 | 149.2 | 190.8 | 1.28 | 166.6 | 234.0 | 1.40 | |
| SS-10 | 143.6 | 207.1 | 1.44 | 164.5 | 252.6 | 1.53 | |
| D-12 比較用 | 121.8 | 133.5 | 1.10 | 142.1 | 155.5 | 1.09 | |

3.2 内巻きスパイラル筋のひずみ

図-11 に, SS-3 と SS-10 のカットオフ点でのスパイル 筋のひずみによる比較を示す。SS-3 の内巻きスパイラル 筋ピッチ 20mm は,変形量が増えればひずみは大きくな っていく傾向にあり 12δy 以降は 1400 μ を超えているが, SS-10 の内巻きスパイラル筋ピッチ 60mm では値に規則 性がなく最大で 12δy の 508 μ となっているのがわかる。



図-11 SS-3とSS-10試験体の内巻きスパイラル筋ひずみ比較

このことにから,内巻きスパイラル筋ピッチ 60mm 程 度では,内巻きスパイラル筋の拘束効果が有効に作用し ていないと考えられる。

3.3 荷重 - 変位曲線の包絡線比較

図-12 に、1δy の荷重を1とした時の荷重-変位曲線の 包絡線を示す。内巻きスパイラル筋を有している試験体 SS-3, SS-10 は9 δy 以降も荷重が急落することはなかっ た。7δy 以降 SS-3 の方が SS-10 より荷重比で高い値を示 しているのは、微少ではあるが内巻きスパイラル筋のピ ッチの差によるものと考えられる。



4.まとめ

内巻きスパイラル筋のピッチと連続鉄筋をパラメー タとした RC 橋脚模型試験体の交番載荷実験から,得ら れたカットオフ部の損傷制御に関するまとめは,以下の とおりである。

(1)カットオフ部の内巻きスパイラル筋は 108 以降の 大変形領域において,変形性能が向上する。

(2)く体中間部に塑性ヒンジを設けた場合の内巻きス パイラル筋は,曲げ耐力を負担している。

(3)内巻きスパイラル筋の 20mm ピッチと 60mm ピッチの相違による内巻きスパイラル筋のひずみでは、
20mm ピッチで効果の確認ができたが、60mmピッチでは効果の確認ができなかった。

(4)1δyの荷重を1とした時の荷重 - 変位曲線の包絡 線では、内巻きスパイラル筋20mm ピッチが10δ以降の 大変形領域において最も変形性能が高い。

(5)通常の静的な設計において橋脚く体の2箇所に塑 性化を許容する場合,曲げ性能比0.75~1.05を検証する 必要がある。

参考文献

 小林寿子,斉藤成彦,小林薫:段落し部で曲げ破壊 する RC 橋脚の損傷状況に関する検討,コンクリー ト工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.13-18, 2011.