

論文 RC 橋脚の中間部で損傷を制御するために内巻きスパイラル筋を用いた基礎的研究

鷹野 秀明*1・小林 薫*2

要旨: 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。筆者らは橋脚中間部に塑性ヒンジを設けて損傷を制御する研究¹⁾を進めているが、橋脚く体基部と中間部の曲げ性能と発生曲げモーメントを比較した曲げ性能比0.75程度で確実に橋脚中間部に塑性ヒンジを設けることができ、塑性ヒンジ部の変形性能を高めるためには大変形領域において内巻きスパイラルが有効であることを確認してきた。今回は、その内巻きスパイラル筋のピッチ、コア面積、軸力が変形性能に影響するのか実験を行った。

キーワード: 損傷制御, 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、基部で軸方向の鉄筋量が決定され、上部にいくほど発生曲げモーメントが減少するので段落し部で鉄筋量を減らした配筋構造が採用されている。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たので、現在は段落し部で損傷させない設計が検討されている。しかし、河川や地中の橋脚基部で損傷した場合、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 (左側) のように、仮締切り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。

そこで、橋脚く体中間部に損傷を誘導することによる損傷の確認の容易さ、短期復旧の合理化等を目的として、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、渡部らの研究²⁾から、橋脚上部から塑性ヒンジまでの距離が短くなることで、降伏震度の値が大きくなり、応答塑性率を大きくする必要がありとしている。また、小林らの研究³⁾から、曲げ性能比の違い

により橋脚く体の損傷モードが変わり損傷箇所を特定させる研究がなされている。これらの研究結果を基に橋脚く体中間部の特定箇所ですみ損傷を制御させる方法を考えた場合、帯鉄筋を多く配置した構造でく体中間部のエネルギー吸収を図ることになる。しかし、この帯鉄筋を多く配置した工法で塑性ヒンジとなる位置での回転性能等を大きく設定すると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。橋脚く体中間部で損傷を制御させることは、図-1 (右側) に示す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、内巻きスパイラル筋のピッチ、コア面積、軸力をパラメータに損傷状況を確認したので報告する。

2. 実験の概要

2.1 試験体諸元



写真-1 地震による橋脚カットオフ点損傷例

*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)

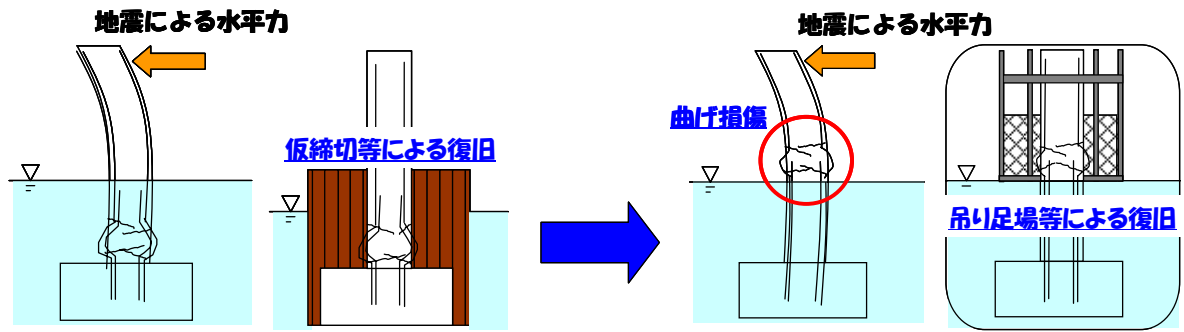


図-1 基部損傷の復旧例

実験に用いた RC 橋脚模型の試験体諸元を表-1 に、試験体概要を図-2 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、橋脚断面の形状を 1050mm×350mm とした。軸方向鉄筋はカットオフ点を有している、鉄筋径は D10 でかぶりコンクリートを 35mm としている。内巻きスパイラル筋は周径 180mm とし、写真-2 に示すようにカットオフ点を中心に 1D (350mm) 上下+100mm の 550mm の長さとしている。本実験は、内巻きスパイラル筋の効果をより明確にするために、カットオフ部では D6 の帯鉄

筋を 150mm ピッチの直角フックとして外れやすくしている。

SS-3 の試験体で内巻きスパイラル筋のピッチ 20mm、内巻きスパイラル筋の箇所が 4 箇所、軸力が 234kN を基本とし、SS-7 は内巻きスパイラル筋ピッチが 40mm、SS-10 は内巻きスパイラル筋ピッチ 60mm、SS-11 は内巻きスパイラル筋が 2 箇所、SS-12 は軸力が 702kN、SS-13 は内巻きスパイラル筋が 3 箇所、SS-14 は内巻きスパイラル筋が 5 箇所（重ね合わせ配置）となっている。

く体中間部で損傷制御するための定量的な数値とし

表-1 試験体諸元

試験体 番号	カットオフ点高さ (mm)	内巻きスパイラル筋					軸方向鉄筋配置		曲げ性能比 Myc/Mxyc	鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	軸力 (kN)
		(Φ)	ピッチ(mm)	種類	個数	面積比(%)	カットオフ部	基部				
SS-3	1000	9.0	20.0	SR235	4	27.7	D10×13本	D10×24本× 2段	0.76	387	27.2	234
SS-7	1000	9.0	40.0	SR235	4	27.7	D10×13本	D10×24本× 2段	0.74	414	21.8	234
SS-10	1000	9.0	60.0	SR235	4	27.7	D10×13本	D10×24本× 2段	0.75	387	20.9	234
SS-11	1000	9.0	20.0	SR235	2	13.8	D10×13本	D10×24本× 2段	0.75	376	27.3	234
SS-12	1000	9.0	20.0	SR235	4	27.7	D10×13本	D10×24本× 2段	0.76	377	25.1	702
SS-13	1000	9.0	20.0	SR235	3	20.8	D10×13本	D10×24本× 2段	0.75	376	21.4	234
SS-14	1000	9.0	20.0	SR235	5	34.6	D10×13本	D10×24本× 2段	0.75	379	26.8	234

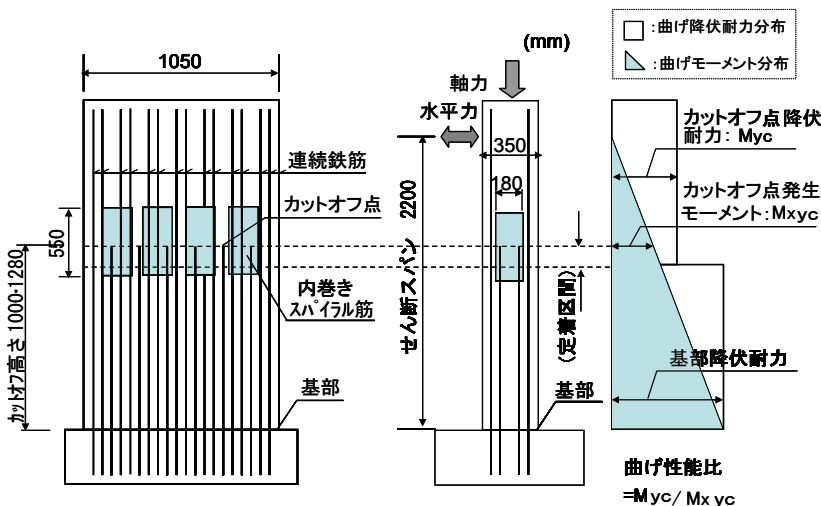


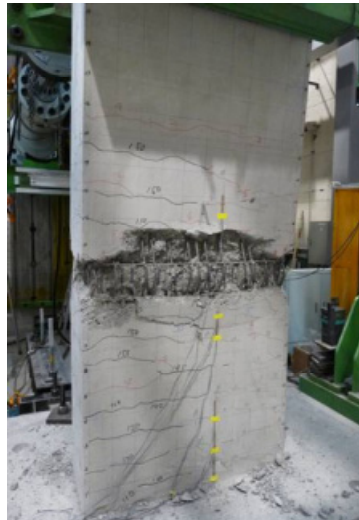
図-2 試験体概要



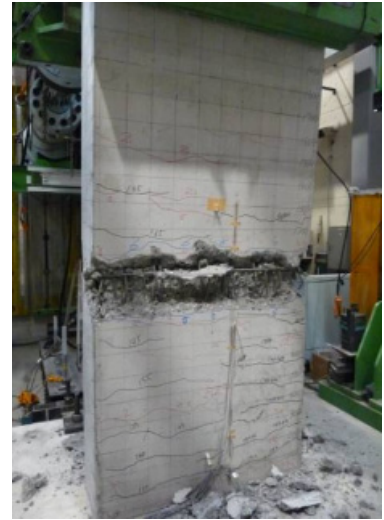
写真-2 試験体の配筋



(a) :SS-3



(b) :SS-7



(c) :SS-10

写真-3 10 δ 時のピッチによるひび割れ比較

て、曲げ性能比を設定した。曲げ性能比とは、図-2に示すように基部が曲げ降伏耐力に達した時のカットオフ点の曲げ降伏耐力(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。実験を行った試験体は7体で、曲げ性能比は0.75とするために引張鉄筋比をカットオフ点で0.0019、基部で0.0070として、全ての試験体で最初にカットオフ点で確実に降伏させるようにした。試験体のパラメータは、内巻きスパイラル筋のピッチ、コア面積、軸力としている。

2.2 荷重方法

実験は図-2に示すように、試験体の交番荷点を基部から2200mmとし、軸力234kN(SS-12は702kN)を作用させた状態で正負1回ずつ交番荷重し、段落し部で荷重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荷重位置に生じる変位を δy と定義し、この整数倍の変位 $n \times \delta y$ (1,2,3...10 δy 以降は、12,14,16 δy)で順次変位振幅を増加させながら荷重した。しかし、10 δy 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。そこで、低サイクル疲労での破断を避けるためSS-3以外は、始めから2倍の整数倍変位 $n \times \delta y$ (1,2,4...16 δy)とした。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

(1) 内巻きスパイラル筋のピッチによるひび割れの比較

内巻きスパイラル筋のピッチが違うSS-3(20mm)、SS-7(40mm)、SS-10(60mm)のひび割れの発生を比較してみる。

SS-3のひび割れは、最初90kNで高さ350mm付近に入り、120kNでカットオフ点付近に発生した。ひび割れは

その後、基部からカットオフ点までは約150mmで間隔入り、荷重が159kNに達した時にカットオフ点の連続軸方向鉄筋が降伏に至った。カットオフ点で降伏後は写真-3(a)の10 δ の時で見ると、2 δ ~3 δ でカットオフ点から荷重側に入り、3 δ で基部の軸方向鉄筋も降伏に至っている。最大荷重は192kNで、最終的にはカットオフ点が塑性ヒンジとなり曲げ破壊に至っている。実験終了後内巻きスパイラル筋内のコアコンクリートの健全度を確認したが、圧壊していなかった。

これに対してSS-7のひび割れは、最初90kNで高さ1000mmのカットオフ点に入り、105kNで基部から400mm付近に発生した。ひび割れはその後、110kNでカットオフ点から上の1200mm付近に発生した。基部からカットオフ点までは110kN~150kNの間に約100mm間隔でひび割れが入り、荷重が164kNに達した時にカットオフ点の連続軸方向鉄筋が降伏に至った。カットオフ点で降伏後は写真-3(b)の10 δ の時で見ると、2 δ ~4 δ でカットオフ点から荷重側に入り、2 δ で基部の軸方向鉄筋も降伏に至っている。最大荷重は192kNで、最終的に

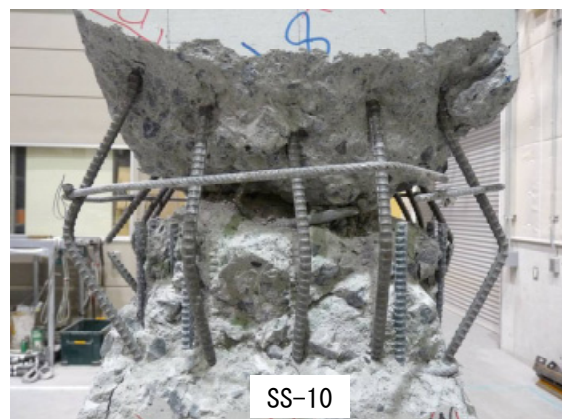
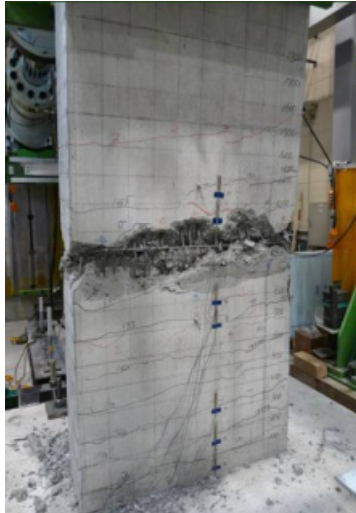
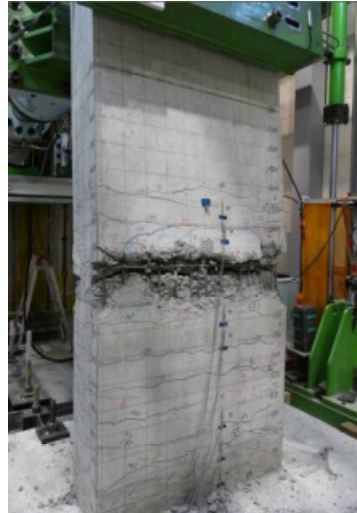


写真-4 試験体SS-10のコアコンクリート



(a) :SS-11



(b) :SS-13



(c) :SS-14

写真-5 コア面積によるひび割れの比較

はカットオフ点が塑性ヒンジとなり曲げ破壊に至っている。実験終了後 SS-7 も内巻きスパイラル筋内のコアコンクリートの健全度を確認したが、圧壊していなかった。

SS-10 のひび割れは、最初 120kN で基部から高さ 1000mm の位置にある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 の高さまで発生したが、900mm 付近には発生しなかった。173kN でカットオフ点の連続軸方向鉄筋が降伏に至り、その後は写真-3 (c) にみるように SS-3 と同様の曲げ破壊であった。基部は、 $2\delta y$ で降伏に至っている。最大荷重は 210kN で、最終的にはカットオフ点が塑性ヒンジとなり破壊に至っている。実験終了後 SS-10 も内巻きスパイラル筋内のコアコンクリートの健全度を確認したが、写真-4 に見るように圧壊はしていなかった。3 試験体とも $6\delta y \sim 8\delta y$ の間にコンクリートの剥落が発生した。

以上のことから、内巻きスパイラル筋のピッチが 20mm~60mm 程度では、内巻きスパイラル筋内のコアコンクリートの拘束効果に違いは見られなかった。また、コンクリートは剥落の幅は写真-3 (a), (b), (c) の比較から、ピッチが広いほど試験体横方向のひび割れ幅が狭く局部的な剥落を把握できる。基部の軸方向鉄筋が降伏する変位量に大きな違いは見られなかった。

(2) 内巻きスパイラル筋のコア面積によるひび割れの比較

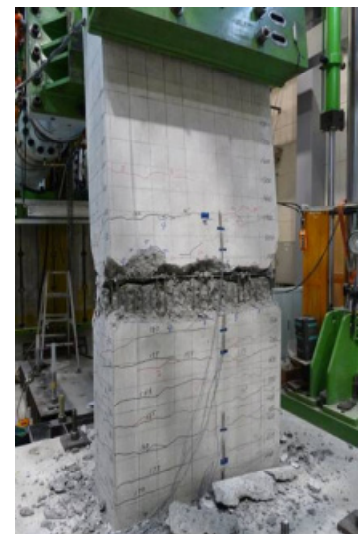
内巻きスパイラル筋のコア面積が違う SS-11 (2 箇所), SS-13 (3 箇所), SS-14 (5 箇所) を比較してみる。

内巻きスパイラル筋が 2 箇所とコア面積の小さい SS-11 のひび割れは、最初 110kN で高さ 1000mm のカットオフ点に入り、次に 120kN で基部から 450mm 付近に

発生した。ひび割れはその後、基部からカットオフ点までは約 150mm 間隔で入り、荷重が 149kN に達した時にカットオフ点の連続軸方向鉄筋が降伏に至った。カットオフ点で降伏後は写真-5 (a) の 10δ の時で見ると、カットオフ点から上の載荷点まではあまり入っていないが、カットオフ点には 4 層程度のひび割れが集中的に入り、 2δ で基部の軸方向鉄筋も降伏に至っている。最大荷重は 188kN で、最終的にはカットオフ点が塑性ヒンジとなり曲げ破壊に至っている。

これに対して内巻きスパイラル筋が 3 個とコア面積の中間の SS-13 のひび割れは、最初 125kN で高さ 1000mm のカットオフ点に入り、次に 145kN で基部から 300mm 付近に発生した。ひび割れはその後、基部からカットオフ点までは約 150mm 間隔で入り、荷重が 166kN に達した時にカットオフ点の連続軸方向鉄筋が降伏に至った。

カットオフ点で降伏後は写真-5 (b) の 10δ の時で見ると、カットオフ点から上の載荷点までは 125kN ~ 150kN で 1200mm ~ 1400mm の間に入り、 2δ で基部の軸方向鉄筋も降伏に至っている。最大荷重は 188kN で、最終的にはカットオフ点が塑性ヒンジとなり曲げ破壊に至っている。



SS-12

写真-6 SS-12 の 10δ ひび割れ状況

内巻きスパイラル筋が 5 個とコア面積の最も大きい SS-14 は、最初 100kN で高さ 1000mm のカットオフ点に入り、次に 130kN で基部から 350mm 付近に発生した。ひび割れはその後、基部からカットオフ点までは約 100mm～150mm の間隔で入り、荷重が 180kN に達した時にカットオフ点の連続軸方向鉄筋が降伏に至った。カットオフ点で降伏後は写真-5(c)の 10 δ の時で見ると、カットオフ点から上の載荷点までは 2 δ ～4 δ で 1200mm～1600mm の間に入り、4 δ で基部の軸方向鉄筋も降伏に至っている。最大荷重は 210kN で、最終的にはカットオフ点が塑性ヒンジとなり曲げ破壊に至っている。

以上のことから、SS-3 (4 箇所) も含めて、内巻きスパイラル筋のコア面積が多いほど載荷荷重が大きくなった。また、コンクリートは剥落の幅は写真-5(a), (b), (c) の比較から、コア面積が大きいほど試験体横方向のひび割れ幅が狭く局部的な剥落であった。基部の軸方向鉄筋の降伏は、SS-14 だけが 4 δ で他は 2 δ であった。コア面積が大きいと基部に荷重の負担が移動する傾向にある。

(3) 軸力による比較

軸力が違う SS-3, SS-12 (軸力 3 倍) を比較してみる。SS-3 と比べて軸力が 3 倍の SS-12 は、最初 145kN で高さ 1000mm のカットオフ点に入り、次に 155kN で基部から 700mm 付近に発生した。ひび割れはその後、基部からカットオフ点までは 160kN～180kN で約 150mm の間隔で入り、荷重が 192kN に達した時にカットオフ点の連続軸方向鉄筋が降伏に至った。カットオフ点で降伏後は写真-6 の 10 δ の時で見ると、カットオフ点から上の載荷点までは 180kN で 1300mm 付近に入り、2 δ で基部の軸方向鉄筋も降伏に至っている。最大荷重は 214N で、最終的にはカットオフ点が塑性ヒンジとなり曲げ破壊に至っている。

以上のことから、軸力が大きいほど初期ひび割れが入るのが遅くなり、軸力が大きいほど試験体横方向の剥落幅が狭く局部的な剥落であった。また、軸力が大きいと基部に荷重の負担が移動する傾向がある。

3.2 耐荷性状

実験から得られた以下に示す荷重-変位曲線及び包絡線は、P～ δ 効果を考慮している。

代表的な SS-7, S-12, SS-14 の荷重-変位曲線を図-3, 図-4, 図-5 に示す。SS-7, SS-14 では内巻きスパイラル筋の試験体特有の最大荷重以降に内巻きスパイラル筋の露出が始まり、荷重が降伏荷重程度に低下するまで紡錘型の履歴ループを示すが、それ以降は載荷点変位の増加に伴い、逆 S 字形の履歴ループに移行する形がみられる。しかし、軸力が 3 倍である SS-12 (軸力 702kN) には、この傾向の逆 S 字形の履歴ループが SS-7, S-14 ほど見ら

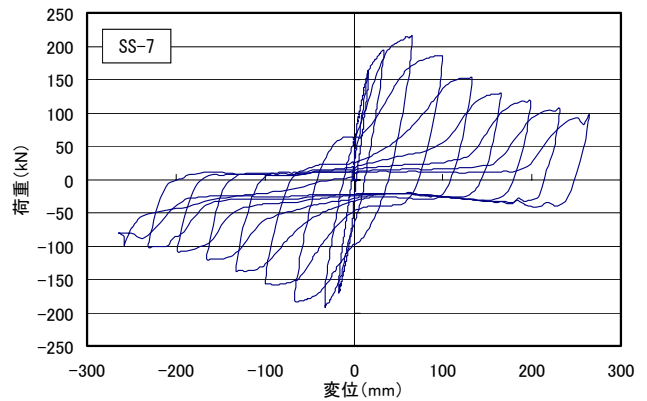


図-3 試験体 SS-7 の荷重変位曲線

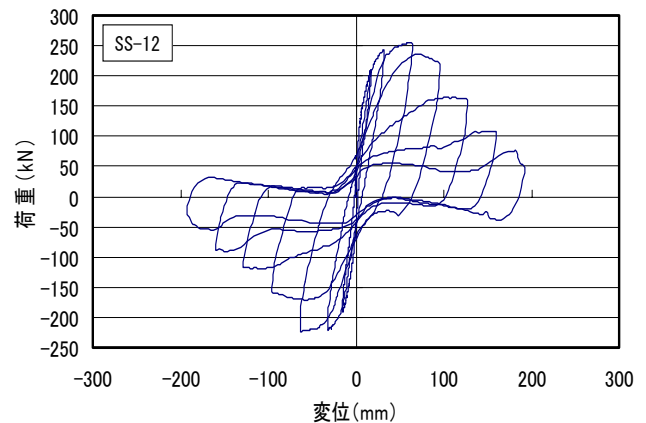


図-4 試験体 SS-12 の荷重変位曲線

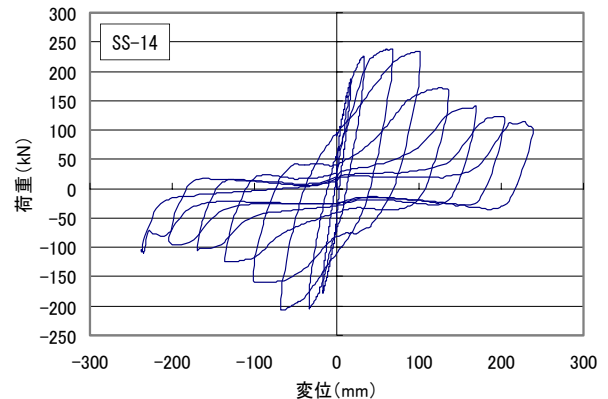


図-5 試験体 SS-14 の荷重変位曲線

れなかった。

(1) 内巻きスパイラル筋のピッチによる比較

図-6 に、内巻きスパイラル筋のピッチの違う SS-3 (20mm), SS-7 (40mm), SS-10 (60mm) の包絡線を示す。包絡線の形状は同じであるが、内巻きスパイラル筋のピッチが広くなるほど荷重が大きくなり 6 δ 程度まで最大荷重を維持し、大変形領域 (10 δ 以降) になると荷重が低下する傾向が見られた。

(2) 内巻きスパイラル筋のコア面積による比較

図-7 に、内巻きスパイラル筋のコア面積の違う SS-3 (4 箇所), SS-11 (2 箇所), SS-13 (3 箇所), SS-14 (5 箇所) の包絡線を示す。包絡線の形状は同じであるが、

内巻きスパイラル筋のコア面積が大きいと荷重が大きくなり、10 δ 以降の大変形領域になるとSS-11とSS-13のコア面積の小さい試験体は荷重が低下する傾向が見られた。

(3) 軸圧縮力による影響

図-8に、軸力の違うSS-3とSS-12の包絡線を示す。配筋が同じで軸力の234kNのSS-7と軸力が3倍で702kNのSS-12では、明らかに包絡線の形状が違う。降伏荷重、最大荷重はSS-12の方が大きい。荷重の低下が緩やかであるSS-3に対して、軸力の大きいSS-12は6 δ 以降で内巻きスパイラル筋の特有の荷重の低下が緩やかな包絡線が現れなかった。

5. まとめ

内巻きスパイラル筋のピッチが20mm～60mmの範囲、コア面積比が13.8%～34.6%の範囲、軸力が234kN～702kN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)内巻きスパイラル筋のピッチの違いによる耐荷力は、内巻きスパイラル筋内のコアコンクリートが圧壊しない限り差異はないが、大変形領域以降はピッチが広い方が耐荷力の低下が大きくなる。

(2)内巻きスパイラル筋のコア面積の違いによる耐荷力は、コア面積が広いほど耐荷力は上がり、最大耐荷力を維持する能力が高まる。

(3)軸力の違いによる耐荷力は、軸力が高いと最大耐荷力は上がるが、その後は内巻きスパイラル筋の効力を発揮することなく、耐荷力が降下する。

参考文献

1)鷹野秀明, 小林薫: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1-6, 2012.7
 2) 渡部太郎, 小林薫: 橋脚く体の塑性ヒンジを変化させた地震応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.32,

No.3, pp.967-972, 2008.7
 3) 小林寿子, 齊藤成彦, 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, 2011.7

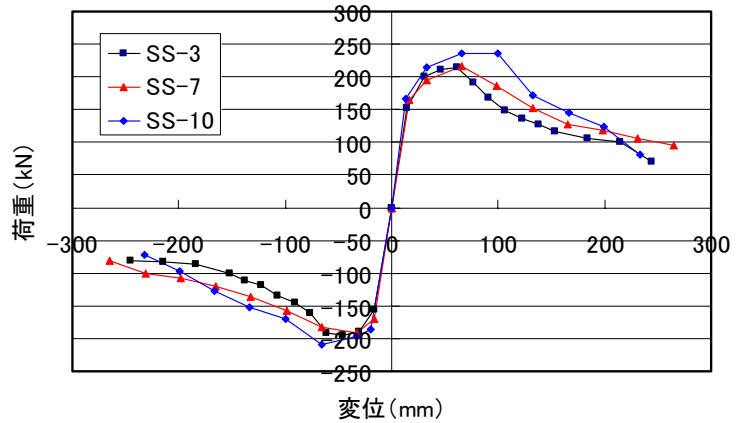


図-6 ピッチの比較による包絡線

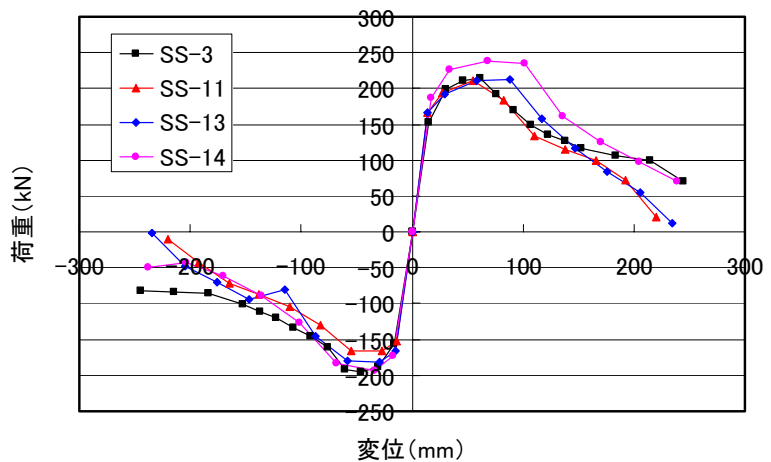


図-7 コア面積の比較による包絡線

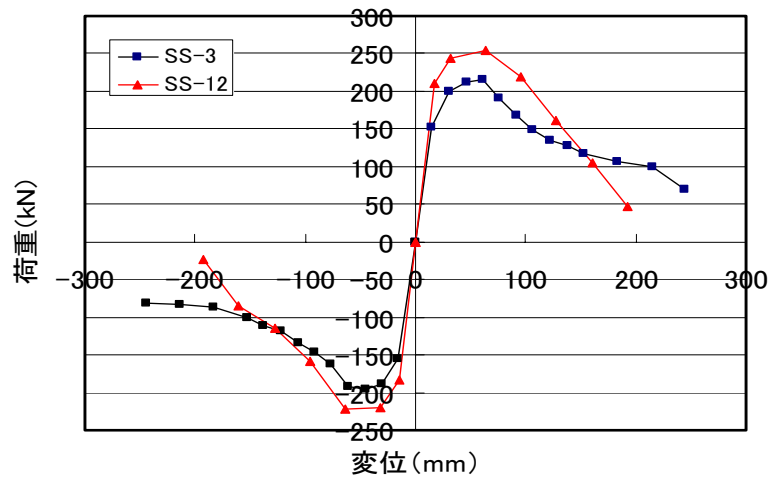


図-8 軸力の比較による包絡線