

## RC橋脚の中間部での 損傷制御に関する基礎的研究



鷹野 秀明\*



小林 薫\*

震災時の早期復旧と復旧コスト低減を目的に、橋脚く体中間部に損傷を誘導することを研究<sup>1) 2) 3)</sup>している。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。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、軸力が変形性能にどのように影響するか実験を行ったので報告する。

●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図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。カットオフ点で損傷させない設計をすると基部で損傷するので、河川や地中の橋脚は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2（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<sup>2)</sup>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

要があるとしている。また、小林らの研究<sup>3)</sup>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が変化する研究がなされている。これらの研究結果から橋脚く体中間部に塑性ヒンジを設けるためには、損傷箇所を特定させて、さらに変形性能を向上させることが求められる。これを満足させるには、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箇所での変形性能を向上させる設定は高コストとな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2（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、内巻きスパイラル筋の形状や配置が橋脚中間部での変形性能向上に与える影響を見るために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ものである。



図1 地震時橋脚く体中間部カットオフ点損傷例

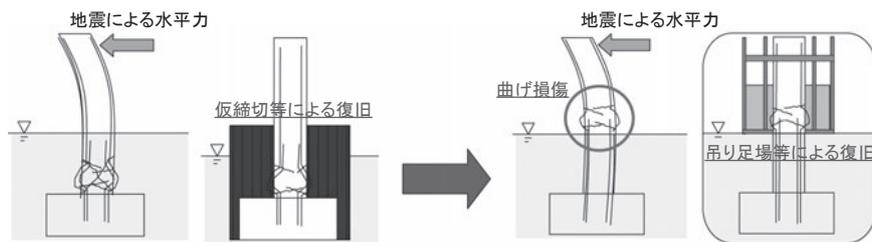


図2 橋脚く体損傷の復旧例

## 2. 実験の概要

### 2.1 試験体諸元

実験に用いたRC橋脚模型の試験体諸元を表1に、試験体概要を図3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て、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、図4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が

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。

く体中間部で損傷を制御するための定量的な数値として、曲げ性能比を設定した。曲げ性能比とは、図3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 ( $M_{yc}$ ) をカットオフ点に発生するモーメント ( $M_{xyc}$ ) で除した値としている。実験を行った試験体は7体で、曲げ性能比を0.75とするために引張鉄筋比をカットオフ点で0.0019、基

表1 試験体諸元

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

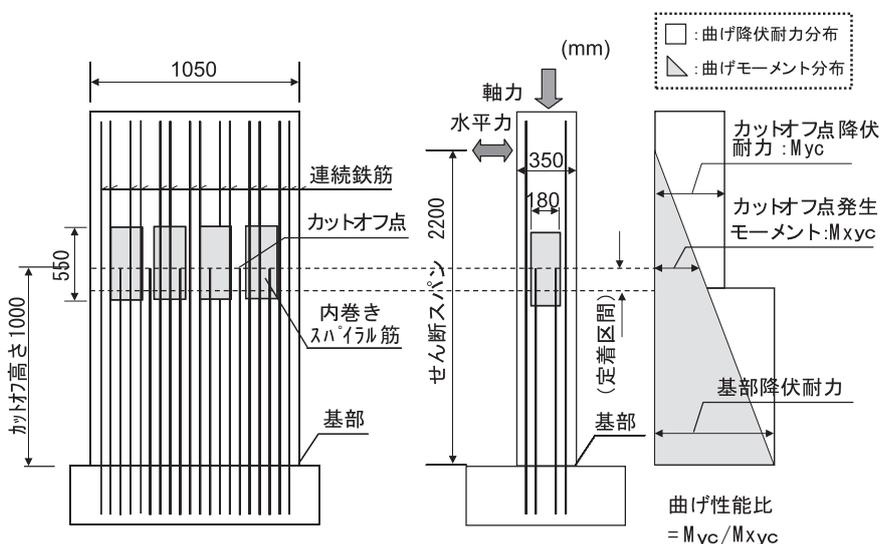


図3 試験体概要

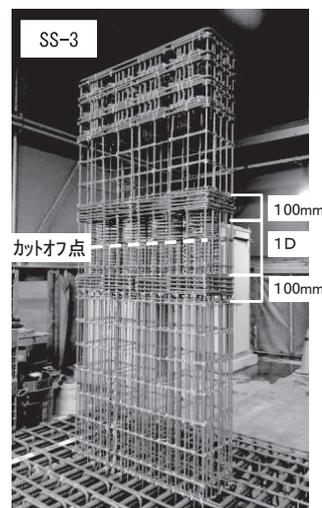


図4 試験体配筋

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3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回ずつ交番荷し、カットオフ点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 $\delta y$ と定義し、この整数倍の変位 $n \times \delta y$  (1、2、3...10 $\delta y$ 以降は、12、14、16 $\delta y$ ) で順次変位振幅を増加させながら荷重した。しかし、10 $\delta y$ 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 $\delta y$ ) 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た。なお、ここでの数値は $P \sim \delta$  効果を考慮していない。

SS-3のひび割れは、最初90kNで基部から高さ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間隔で入り、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。図5 (a) はカットオフ点での降伏後10 $\delta y$  (変位153.0mm) の時の写真であるが、2 $\delta y \sim 3\delta y$ でカットオフ点から上の荷重までにひび割れが入り、3 $\delta y$  (変位45.9mm) 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でカットオフ点より上の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。図5 (b) はカットオフ点での降伏後10 $\delta y$  (変位165.0mm) 時の写真であるが、2 $\delta y \sim 4\delta y$ でカットオフ点から上の荷重までにひび割れが入り、2 $\delta y$  (変位33.0mm) で基部の軸方向鉄筋も降伏に至っている。最大荷重は187kN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、図5 (c) はその後のカットオフ点での降伏後10 $\delta y$  (変位166.0mm) の写真であるが、SS-3と同様の曲げ破壊であった。基部は、2 $\delta y$  (変位33.2mm) 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、図6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。

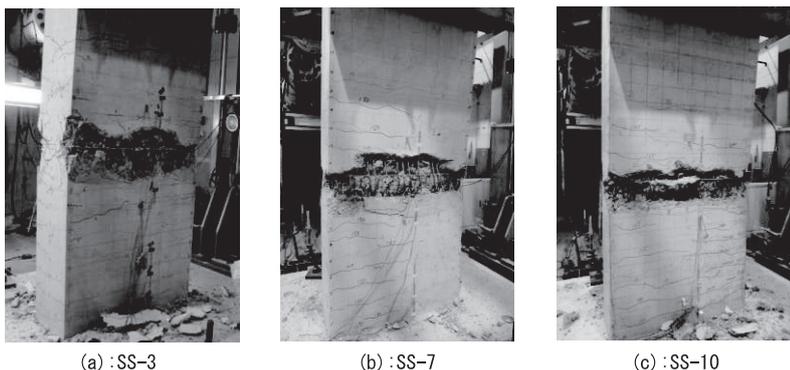


図5 10 $\delta y$  (変位160mm程度) 時のピッチによるひび割れ比較

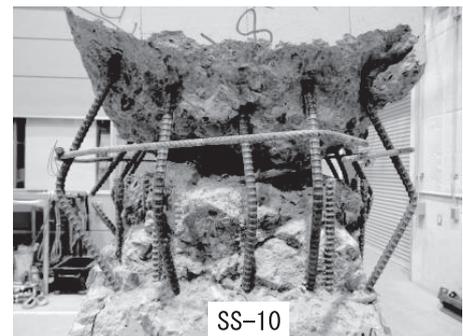


図6 試験体SS-10のコンクリート

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、コンクリートの剥落の幅は図5 (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所的な剥落であった。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)を比較した。

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。図7(a)はカットオフ点での降伏後 $10\delta_y$ (変位138.0mm)時の写真である。カットオフ点から上の載荷点まではあまりひび割れが入りっていないが、カットオフ点には4層程度のひび割れが集中的に入り、 $2\delta$ (変位27.6mm)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個とコア面積が中間の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。図7(b)はカットオフ点での降伏後 $10\delta$ 時(変位147.0mm)の写真であるが、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、 $2\delta$ (変位29.4mm)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。

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。図7(c)はカットオフ点での降伏後 $10\delta$ (変位170.0mm)時の写真であるが、カットオフ点から上の載荷点までは $2\delta$ ～ $4\delta$ で1200mm～1600mmの間に入り、 $4\delta$ (変位68.0mm)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、コンクリート剥落の幅は写真7(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所的な剥落であった。基部の軸方向鉄筋の降伏は、SS-14だけが $4\delta$ で他は $2\delta$ であった。

## (3) 軸力による比較

軸力が違うSS-3、SS-12を比較した。SS-3と比べて軸力が3倍のSS-12は、最初145kNで高さ1000mmのカットオフ点にひび割れが入り、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。図8はカットオフ点での降伏後の $10\delta$ (変位160.0mm)の時の状態であるが、カットオフ点から上の載荷点までは180kNでひび割れが1300mm付近に入り、 $2\delta$ (変位32.0mm)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

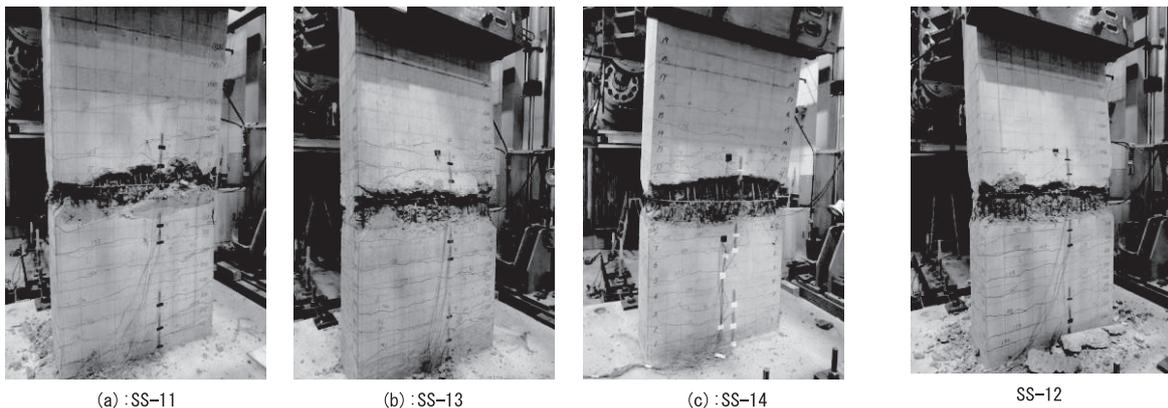


図7 コアコンクリート面積によるひび割れ比較

図8 試験体SS-12の $10\delta_y$ (変位160mm)のひび割れ

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。

### 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、 $P\sim\delta$  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9、図10、図11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12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がるほど荷重が大きくなり $6\delta$ （変位100mm）程度まで最大荷重を維持するが、大変形領域 $10\delta$ （変位160mm）程度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13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、 $10\delta$ （変位160mm）程度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14に、軸力の違うSS-3とSS-12の包絡線を示す。配筋が同じで軸力が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の方が大きいですが、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 $6\delta$ （変位100mm）程度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。

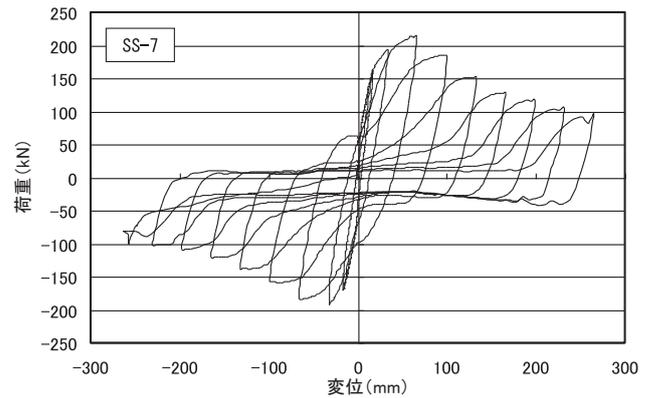


図9 試験体SS-7の荷重変位曲線

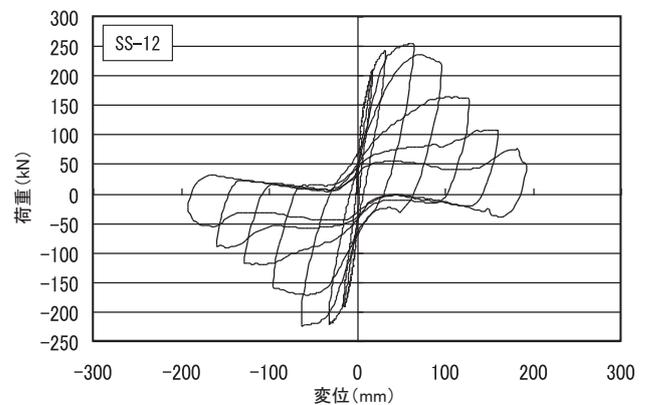


図10 試験体SS-12の荷重変位曲線

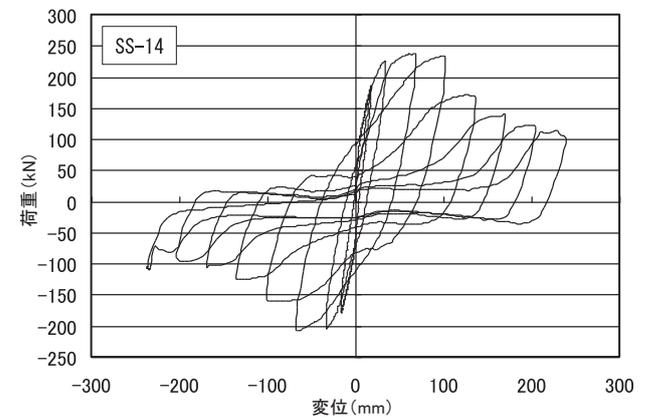


図11 試験体SS-14の荷重変位曲線

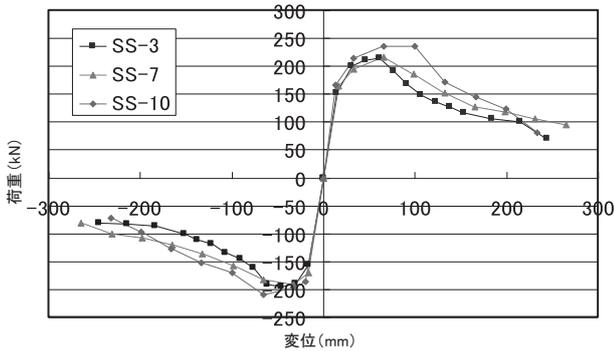


図12 ピッチの比較による包絡線

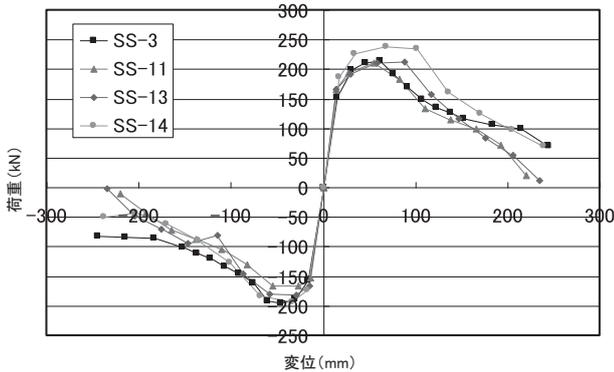


図13 コンクリートコア面積の比較による包絡線

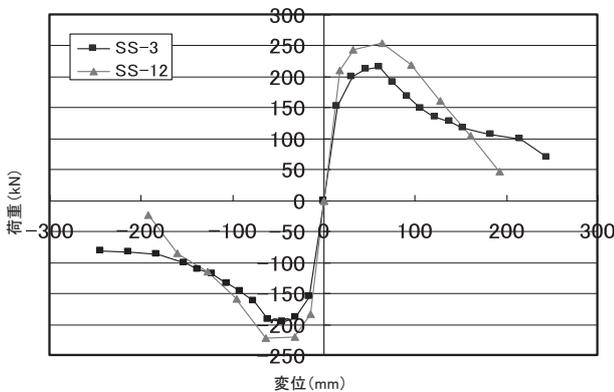


図14 軸力の比較による包絡線

## 4. おわりに

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utoff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、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, 7