# 論文 RC橋脚のく体中間部に内巻きスパイラルを配置した構造の変形性能 評価に関する基礎的検討

小林 寿子\*1·小林 薫\*2·鷹野 秀明\*3

要旨:著者らは、カットオフ部に損傷を誘導する橋脚構造とすることで大地震時に河川部等での早期復旧を 目指し、曲げせん断耐力比の高い RC 橋脚を対象とした実験および解析を実施している。く体中間部に形成 される塑性ヒンジ部の軸方向鉄筋内側にスパイラル筋を配置した交番載荷試験を行い、簡易な変形性能評価 手法を提案した。実験の損傷状況に対応した簡易な曲率分布モデルを設定し、変形量を求めたところ、算定 結果は概ね実験値を評価できることが分かった。

キーワード:定着鉄筋,段落し,カットオフ鉄筋,交番載荷試験,変形性能

#### 1. はじめに

RC 橋脚では,断面力に合わせて配筋量を減らしたカ ットオフ鉄筋を橋脚く体中間部まで配置する場合がある。 一般的にカットオフ部を有する橋脚では,段落し部で損 傷させず,基部で損傷するよう設計される。<sup>1)</sup>

カットオフ鉄筋はコンクリートの引張領域での定着 となるため、地震の作用により交番載荷などの影響を受 けるとカットオフ鉄筋の付着力が低下する要因となる。 これは、過去の地震で橋脚く体中間部が損傷した事例な どから推測できる。

著者らは、カットオフ部に損傷を誘導する橋脚構造と することで大地震時に河川部等での早期復旧を目指し, 曲げせん断耐力比の高い RC 橋脚を対象とした実験およ び解析を実施している。既往の報告では、「基部で降伏し、 カットオフ部が塑性ヒンジとなる RC 橋脚を簡易な変形 性能評価手法で概ね評価できること」2),「図-1に示す曲 げ性能比 Muc/Mxuc が 1.07 未満の試験体はカットオフ部 で曲げ破壊したこと」<sup>3)</sup>「図-1 に示す曲げ性能比 Myc/Mxyc を 1.04~1.09 とした試験体はカットオフ部で 曲げ破壊したこと」<sup>4)</sup>「1Dから上のカットオフ鉄筋定着 長を鉄筋径の21倍とした試験体は、基部とカットオフ点 の破壊が複合する損傷形態となったこと」5)等を明らか にし、カットオフ部で曲げ破壊する曲げ性能比の目安や, 損傷形態について報告した。また,既往の文献<sup>の7)</sup>では, 内巻きスパイラルのコア面積やピッチによる耐力や変形 性能の違いについて報告されている。

本論文では、既往の報告を基にカットオフ点で降伏後、 カットオフ部で塑性ヒンジができる曲げ性能比を設定し、 カットオフ点近傍の軸方向鉄筋内側に内巻きスパイラル を配置した RC 橋脚モデルについて、変形性状を考慮し た簡易な変形性能算定手法を提案する。塑性ヒンジ部の 回転による変位は、内巻きスパイラルを配置した RC 柱



の変位の算定方法を提案している既往の文献<sup>8)</sup>を参考に, 計算した。

### 2. 実験概要

### 2.1 試験体諸元

実験を行った RC 橋脚模型の試験体諸元を表-1 に, 試 験体配筋例を図-2 に, 試験体断面の配筋イメージを図-3 に示す。試験体は一般的な鉄道構造物の RC 橋脚を想定 した軸力と断面寸法を設定し,約 1/5 の縮尺模型とした。 また, カットオフ点を境とした曲げせん断耐力比は既往 の研究<sup>5)</sup>を参考に 1.8 以上とし, 曲げ破壊モードとなる よう既往の鉄道構造物設計基準<sup>1)</sup>に準拠し耐力算定した。

本実験では、中間ヒンジの十分な変形性能を期待し、 カットオフ点を中心に 1D(350mm)+上下端 10 φ (100mm) の高さ 550mm に内巻きスパイラルを配置した。また、内 巻きスパイラルの上下端 10 φ には外巻きの矩形スパイ

\*1 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所新潟工事区(長岡派出)副区長 (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)
\*3 東日本旅客鉄道(株) ジェイアール東日本コンサルタンツ(株)施工技術部 (正会員)

試験体	かトオフ 高さ	有効高 さ d	軸方向	鉄筋(SD34	5-D10)	曲げせA 比 V	o断耐力 /yd/Vmu	曲げ性能比	曲げ性能比	帯鉄筋(S	D345-D6)	橋脚コンクリート	フーチングコンク	軸力
	(mm)	(mm)	降伏強度	カットオフ部	基部	カットオフ部	基部	Myc/Mxyc	Muc/Mxuc	降伏強度	間隔mm	·強度 (Mpa)	リート <sub>強</sub> 度(Mpa)	MPa
SS-3	1000	315	388MPa	13本	24本×2段	2.7	2.7	0.76	0.75	409MPa	120	26.9	31.7	0.6
SS-4	1000	315	388MPa	13本	24本×2段	2.6	2.6	0.76	0.75	409MPa	120	23.5	26.7	0.6
SS-5	1000	315	388MPa	13本	24本×2段	2.6	2.6	0.76	0.75	409MPa	120	26.9	27.1	0.6

表-1 試験体諸元



図-2 試験体配筋例 (SS-3)

ラルをフック定着にて配置した。表-2に、内巻きスパイ ラルと外巻き矩形スパイラルの材料諸元を示す。内巻き スパイラルはコアコンクリートの拘束効果の違い、外巻 き矩形スパイラルはカットオフ点近傍の初期の拘束効果 の違いによる影響を想定し設定した。

#### 2.2 試験体載荷方法·実験結果

実験は、図-1のように軸力を作用させた状態で正負1 回ずつ交番載荷し、軸方向鉄筋が低サイクル疲労で破断 しないようにした。載荷方向最外縁の軸方向鉄筋ひずみ 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δy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。 変形性能評価における変位段階は既往の論文<sup>9)</sup>を参考

に、損傷レベル1、損傷レベル2、損傷レベル3の3点を 設定し、それぞれをY点、M点、N点とした。損傷レベ ル1(Y点)の限界は「軸方向鉄筋のいずれかが引張降 伏するとき」、損傷レベル2(M点)の限界は「部材の耐 荷性能が損なわれず、早期修復が可能な状態であり、繰 返し載荷により耐力低下が顕著とならない最大変位で、 コンクリートの圧壊が生じていない段階」、損傷レベル3 (N点)の限界は「軸方向鉄筋のはらみ出しや座屈が生 じるが、降伏荷重を維持できる範囲」とした。(図-4)



図−3 試験体断面配筋イメージ

表-2 材料諸元

試験体	内巻きスパイラル						
<b>武均</b> 火144	種類	ピッチ	降伏強度	高さ	個数		
SS-3	SR235-φ 9	20mm	337MPa	550mm	4		
SS-4	SW-C-φ 10	10mm	1467MPa	550mm	4		
SS-5	SW-C-φ 10	20mm	1467MPa	550mm	4		

=+=€/+	外巻き矩形スパイラル(直角フック)					
<b>武尚</b> 史 144	降伏強度	ピッチ	高さ	配置		
SS-3	381MPa	20mm	100mm	2箇所		
SS-4	381MPa	20mm	100mm	2箇所		
SS-5	381MPa	20mm	100mm	3箇所		

試験体は、いずれもカットオフ点で降伏し、カットオフ点で破壊した。主な試験体の損傷状況について、M点を図-5に、N点を図-6に示す。

いずれの試験体も M 点まではカットオフ点の曲げひ び割れが顕著に拡大し,斜め下方へ伸展した。M 点を示 した後はカットオフ点近傍で圧壊が生じ,カットオフ点 近傍の損傷が伸展,破壊した。

図-7 に損傷レベル1(Y点),図-8 に損傷レベル2(M 点)の引張鉄筋の軸方向ひずみ分布を,材料試験に基づ くひずみ硬化域の開始点を ɛsh として示す。Y点はカッ トオフ点と基部のひずみが顕著で,M点はカットオフ点 近傍のひずみが大きく ɛsh を超過する測点が確認できた 一方基部のひずみは小さく,カットオフ点に損傷が集中 した。なお,ひずみゲージは鉄筋表面に直接貼り付けた。

### 3. 変形性能の算定

## 3.1 損傷レベル1(Y点)の簡易な変形性能評価手法

Y 点のく体変形の算定 9 は、一般的な RC 橋脚では、 柱基部の曲率が最大となり載荷点に近い箇所では全断面 有効として各断面の曲率を求めるため,図-9のような曲 率分布<sup>1)</sup>が用いられる。 *δy*は,部材接合部からの軸方向 鉄筋の抜出しによる変位 δy1 とく体変形による変位 δy0 の和で算定する。表-3に、各試験体のカットオフ点と基 部断面でδyを算定し、2断面のδyの和を計算値とし、 実験から得られた降伏時の変位(実験値)と比較したも のを示す。今回はカットオフ点のひずみが最大となった ためカットオフ点を境に上下2本の橋脚と考え計算した。



## 図-4 荷重-変位関係における損傷レベル











主な試験体の損傷状況(M点) 図-5



図-6 主な試験体の損傷状況(N点)

2000

1500

1000

500

0

0

SS-5 Y点





図-7 軸方向鉄筋ひずみ(Y点)





1000 2000 3000

軸方向鉄筋ひずみ(μ)



この仮定は、「載荷点〜カットオフ点」「カットオフ点 〜基部」をそれぞれ計算して足し合わせる方法とし、既 往の算定式に基づき算定したところ、実験値に対する計 算値の比率は0.53~0.61倍とかなり小さくなった。実験値 は、降伏変位の正負平均値とした。

既往の報告<sup>2)</sup>を参考に、実験で得られたひずみ分布を 基に、簡易なひずみ分布モデルと曲率分布モデルを設定 し、曲率を2階積分して曲げ変形を求めδyを算定する評 価手法を検討した。簡易な曲率分布モデルの設定内容を 以下に述べる。

・実験で得られたひずみ分布を概ね包絡できるよう,基部とカットオフ点のひずみが突出した簡易モデルを検討した。基部を φ1、カットオフ点の下でひずみが変化する高さを φ2、カットオフ点を φ3、カットオフ点の上でひずみが変化する高さを φ4、載荷点を φ5 として折れ線状にした簡易な曲率分布モデルを仮定する。(図-10)

Y点の変位は、各区間の曲率を積分して各区間ごとのたわみ角を集計し、A1~A4の重心高さ~載荷点までのla(1)~la(4)を乗じたものの総和として算定した。(図-10)
・図-7のひずみ分布の緑色破線は内巻きスパイラルを配置した範囲の上下端を示し、黄色のラインは簡易なひずみ分布モデルを示している。緑色破線は、連続鉄筋ひずみの変化点と、カットオフ鉄筋と連続鉄筋のひずみが接近する点に概ねよく対応している。

・カットオフ鉄筋と連続鉄筋のひずみが接近する点はカットオフ鉄筋の付着劣化領域の下端に近いと考えられることから、内巻きスパイラル設置下端(緑色破線下側)より上方を、カットオフ鉄筋を除いた連続鉄筋で断面構



図-9 既往のY点く体変形算定における曲率分布

表-3 既	1.11111111111111111111111111111111111	で計算したる	δy Ł	この比較
-------	---------------------------------------	--------	------	------

試験体	計算値 (mm)	実験値 (mm)	計算値 /実験値	
SS-3	8.07	15.28	0.53	
SS-4	8.67	16.20	0.54	
SS-5	8.74	14.25	0.61	

成されるRC橋脚として考える。

・図-3のように、内巻きスパイラルは、重なり合っていないことから、内巻きスパイラルの個数で橋脚断面を除した断面の RC 橋脚として考える。

・曲率 $\phi$ 1~ $\phi$ 4 は、Y 点の計測ひずみ  $\epsilon$ s に一致するように断面解析から中立軸位置を評価して求めた。 $\phi$ 5 は、 載荷点のため曲率 0 とする。

・本来は曲線状の分布となる曲率分布を、今回は設定した各点間を直線状に簡素化し、基部とカットオフ点近傍で曲率が卓越するようにした。

表-4に,設定した簡易な曲率分布モデルに基づく降伏 変位の計算結果と実験値との比を示す。計算値は実験値 の0.86~0.95倍となり,概ね実験値と対応した。

### 3.2 損傷レベル2(M点)の簡易な変形性能評価手法

M 点ではカットオフ点の損傷が顕著になり, 図-8 のように軸方向鉄筋ひずみはカットオフ点近傍で  $\epsilon$ sh を超過する数値を示した。既往の算定手法 <sup>6)</sup> における M 点の変位は、図-11 のように定義されている <sup>1)</sup>。今回は実験での損傷状況に基づき、カットオフ点で塑性ヒンジ部の回転変形  $\delta$ mp が生じ、塑性ヒンジ部以外はく体の曲げ変形  $\delta$ mb が,基部では伸出しによる変形  $\delta$ m1 が生じるものとして変位を推定した。カットオフ点の塑性ヒンジ部の範囲は、実験で得られた連続鉄筋ひずみが  $\epsilon$  sh を超過して突出しひずみが変化している区間が内巻きスパイラルの設置範囲とほぼ一致することから、内巻きスパイラルの設置範囲とした。この塑性ヒンジ区間の設定を基にスパンは図-12 の la(1)~la(4)に示すように設定し、く体の



図-10 簡易な曲率分布モデル(Y点)

表-4 簡易な曲率分布モデルに基づくδyとの比較

試験体	計算値 (mm)	実験値 (mm)	計算値 /実験値	
SS-3	13.19	15.28	0.86	
SS-4	14.82	16.20	0.92	
SS-5	13.55	14.25	0.95	



図-11 既往の M 点, N 点く体変形

曲げ変形を求めた。

既往の評価式による計算値は塑性ヒンジ部がカット オフ点の下で生じることから,内巻きスパイラルの下端 を境に上下2本の橋脚と仮定し,それぞれのδmの和で算 定した。計算値は,実験値を若干過小評価する数値とな った。(**表-5**)

図-12にM点の簡易な曲率分布モデルを示す。M点も, 実験から得られたひずみ分布と,カットオフ点近傍で塑 性ヒンジを形成する損傷状況に基づき設定した。以下に 設定内容を述べる。

・基部を φ1,基部近傍のひずみ変化点を φ2,カットオフ点の塑性ヒンジ下端を φ3,カットオフ点の塑性ヒンジ 上端を φ4,載荷点を φ5 とした簡易な曲率分布モデルと する。

・M 点ではカットオフ点で塑性ヒンジ化した区間が内巻 きスパイラルを配置した範囲とほぼ重なることから、実 験のひずみ分布に基づき塑性ヒンジ部を内巻きスパイラ ル設置範囲として設定する。

図-8に、カットオフ点を中心として設定した塑性ヒン ジ部を緑色点線で示す。連続鉄筋のひずみがεshを超過 している領域と概ねよく対応している。

図-6のN点の剥落範囲を見ると, SS-3で780~1220mm, SS-5で800~1250mmの高さで生じ,設定した塑性ヒンジ 区間725~1275mmと近似した値となった。

・M点ではカットオフ点近傍のひずみが突出しているが、
 基部近傍では概ね1Dの高さで連続鉄筋とカットオフ鉄
 筋のひずみが一致する状況が見られ、1D~基部にかけて
 ひずみがやや大きくなる傾向が確認できた。そのため図
 -12におけるφ2の高さを1D(350mm)に設定した。

=+=€/+	★ 計算値		計算値
司、海史中华	(mm)	(mm)	/実験値
SS-3	53.96	61.12	0.88
SS-4	54.83	61.12	0.90
SS-5	54.72	85.50	0.64

表-5 既往の評価手法を用いたδmとの比較



図-12 簡易な曲率分布モデル(M点)

・図-12の3'と4'は、実験で得られたひずみが降伏ひずみ 前後の数値を示していたことから、φ3とφ4は降伏時の 曲率と仮定した。ここでは、曲率の2階積分による変位の 算定を基本とし、次のように検討した。各点間の曲率を 積分し、各点間ごとのたわみ角を集計し、A1・A2の重心 から塑性ヒンジ部下端までのla(1)、la(2)と、A3の重心か ら載荷点までのla(4)でそれぞれ曲げ変形が生じるものと して求め、総和をδmbとした。

・塑性ヒンジ部の変位は、既往の参考文献<sup>8)</sup>の内巻きスパイラルの影響による回転角の増分を考慮した提案式を基に、la(3)で塑性ヒンジ部の回転による変形 δmp を求めた。

・伸出しによる回転に伴う変形δm1は,M点では橋脚が 基部から伸出しているものと考え,参考文献<sup>9</sup>に従い基 部の伸出しによる変形として求めた。

・M点の変位 $\delta$ mは、塑性ヒンジ部の回転による変 $d\delta$ mp、

表-6 簡易な曲率分布モデルに基づくδmとの比較

試験体	計算値 (mm)	<b>実験値</b> (mm)	計算値 /実験値	
SS-3	55.90	61.12	0.91	
SS-4	71.33	61.12	1.17	
SS-5	63.46	85.50	0.74	

塑性ヒンジ部以外の曲げによる変位  $\delta mb$ , 基部の伸出し による変位  $\delta ml$  の総和とした。計算した M 点の変位と 実験値を表-6 に示す。計算値は実験値の 0.74~1.17 倍と なり、多少のバラつきはあるものの実験値を概ね評価可 能であることを確認した。

### 3.3 損傷レベル3(N点)の変形性能算定評価手法

損傷レベル3(N点)の変形性能評価は、図-11のよう に変位の構成はM点と同じである。そのため、基本となるM点で設定した簡易な曲率分布モデルを利用し、以下 に示す設定内容を踏まえ、N点の変位を求めた。

・既往の参考文献<sup>8)</sup>を基に,段落し部近傍の塑性ヒンジ
 部における,M点からN点への曲率の増分を加味し,δnp
 を求める。

•N 点の変位  $\delta n$  は、塑性ヒンジ部の回転による変位  $\delta n p$ , 塑性ヒンジ部以外の曲げによる変位  $\delta m b$ ,基部の伸出し による変位  $\delta n l$ の和とした。M 点以降の塑性ヒンジ部以 外での損傷状況から、塑性ヒンジ部以外の曲げによる変 位の伸展は無視するものとした。

**表-7**に計算結果と実験値を示す。計算値は実験値の 0.81~1.04 倍となり,最大変形時の変位も概ね評価でき ることが分かった。

試験体	計算値 (mm)	実験値 (mm)	計算値 ⁄実験値
SS-3	78.93	91.68	0.86
SS-4	94.95	91.68	1.04
SS-5	92.03	114.00	0.81

表-7 簡易な曲率分布モデルに基づくδnとの比較

# 4. まとめ

く体中間部に内巻きスパイラルを配置した RC 橋脚に 関して,実験に基づく簡易な曲率分布モデルを設定し, 変形性能評価の検討を行った。検討結果を以下に示す。

- (1) Y 点の降伏変位 δy は,実験からカットオフ点と 基部で曲率が大きくなることを考慮し、5 点を 直線状に結ぶ簡易な曲率分布モデルを設定した。 各点の曲率は,実験で得られた軸方向鉄筋ひず みから算定し,δy はその曲率に基づくく体の変 形による変位 δy0 と,基部からの軸方向鉄筋抜 出しによる変位 δy1 の和とし,概ね実験値を推 定できた。
- (2) M 点の変位 δm は、実験結果に基づき、カット オフ点に塑性ヒンジを設定し、基部近傍の曲率 の大きさも考慮した簡易な曲率分布モデルを設 定した。簡易な曲率分布モデルは7点を直線状 に結ぶ線で構成し、カットオフ点を中心とした

等価塑性ヒンジ長を内巻きスパイラル高さで設 定,その他の点の曲率は、実験で得られた軸方 向鉄筋ひずみから算定した。δmは、その曲率分 布モデルに基づく塑性ヒンジ部以外の曲げ変形 による変位 δmb と、内巻きスパイラルの影響を 考慮した塑性ヒンジ部の回転による変位 δmp, 基部の伸出しによる変位 δm1 の総和とし、多少 のバラつきはあるが概ね実験値を評価できた。

 (3) N の変位 δn は、M 点と同じ簡易な曲率分布モデルを基に、M 点の変位 δm に既往の参考文献
 <sup>8)</sup>を基に塑性ヒンジ部の回転による変位 δnp を 算定し、基部の伸出しによる変位 δn1 の増分を 付加することで概ね推定することができた。

### 参考文献

- 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同 解説 コンクリート構造物 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編,丸善,2004
- 小林寿子,小林薫:基部降伏後,段落し部が塑性ヒンジとなる RC 橋脚の変形性能評価に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.19-24, 2016.7
- 小林寿子,斉藤成彦,太田浩一郎,小林薫:RC 橋 脚段落し部の曲げ損傷メカニズムに関する基礎的検 討,コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.19-24, 2010.7
- 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
- 5) 小林寿子,小林薫:カットオフ鉄筋長を変化させた RC 橋脚の損傷形態について,コンクリート工学年次 論文集, Vol.37, No.2, pp.487-492, 2015.7
- 7) 鷹野秀明,小林薫: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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.817-822, 2013
- 8) 杉田清隆,井口重信,大澤章吾,築嶋大輔:軸方向 鉄筋の内側に円形帯鉄筋を配置した鉄筋コンクリー ト柱の変形性能に関する一考察,コンクリート工学年 次論文集, Vol.37, No.2, pp.127-132, 2015
- 渡邉忠朋,谷村幸裕,瀧口将志,佐藤勉:鉄筋コン クリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手 法,土木学会論文集,No.683/V-52,31-45,2001.8