

論文 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

小林 寿子*1・小林 薫*2

要旨：河川内等の橋脚において、大規模地震時に段落し部に曲げ損傷を誘導することが復旧性向上に有効な場合がある。本論では、基部で降伏した後、段落し部で破壊する RC 橋脚試験体を基に、変形性能の簡易な算定手法を検討した。実験では、基部は比較的大きなひび割れが生じたが塑性ヒンジは形成されず、段落し部は明確な塑性ヒンジが形成された。そのため、損傷レベルに応じて、段落し部の損傷発生領域を塑性ヒンジ部、基部近傍は塑性ヒンジ部以外の大きな変形とし、実験結果に基づく簡易な曲率分布モデルを設定し、変形量を求めた。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途中まで配置する場合がある。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、図-1 のように地震時に橋脚く体中間部で損傷した事例などから推測できる。

著者らは、段落し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、段落し部の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^{1) 2) 3)}では、「図-2 に示す曲げ性能比 M_{uc}/M_{xuc} を 1.13 以上とした試験体は基部で、1.07 未満の試験体は段落し部で曲げ破壊したこと」「図-2 に示す曲げ性能比 M_{yc}/M_{xyc} を 1.04～1.09 とした試験体は段落し部で曲げ破壊したこと」「ID



図-1 地震時に損傷した RC 橋脚事例

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付近の破壊が複合する損傷形態となったこと」等を明らかにし、段落し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ている。

一般的に段落し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に設計される。参考として、以下に、鉄道設計標準⁴⁾で定められている段落し部の構造ディテールを示す。

- ・鉄筋切断点から計算上不要となる断面までの区間において、設計せん断耐力が設計せん断力の 1.5 倍以上ある。
- ・鉄筋切断点における連続鉄筋による設計曲げ耐力が設計曲げモーメントの 2 倍以上あり、かつ切断点から計算上不要となる断面までの区間において、設計せん断耐力が設計せん断力の 4/3 倍以上ある。

本論文では、基部で降伏後、段落し部で塑性ヒンジができる橋脚について、既発表の試験体^{1) 2) 3)}の試験結果を基に、基部と段落し部の両方の変形性状を考慮した簡易な変形性能算定手法を示す。

2. 実験概要

2.1 試験体諸元

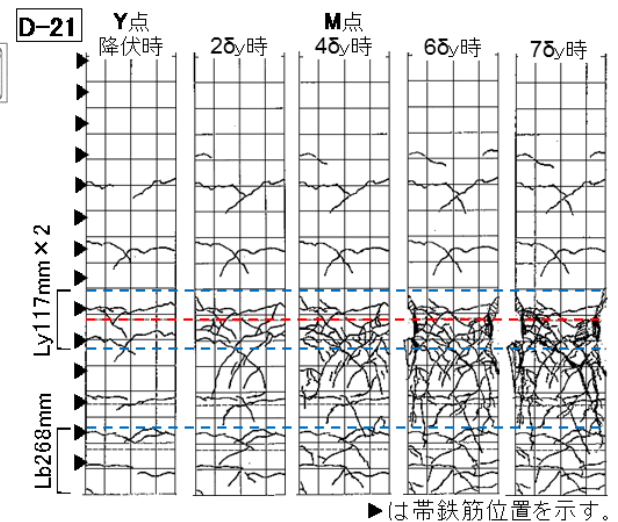
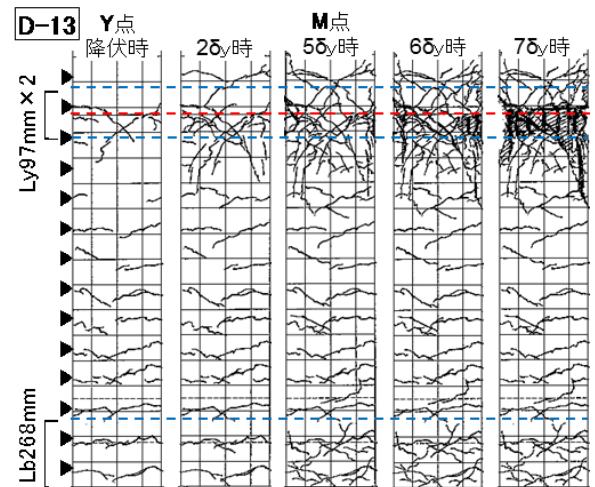
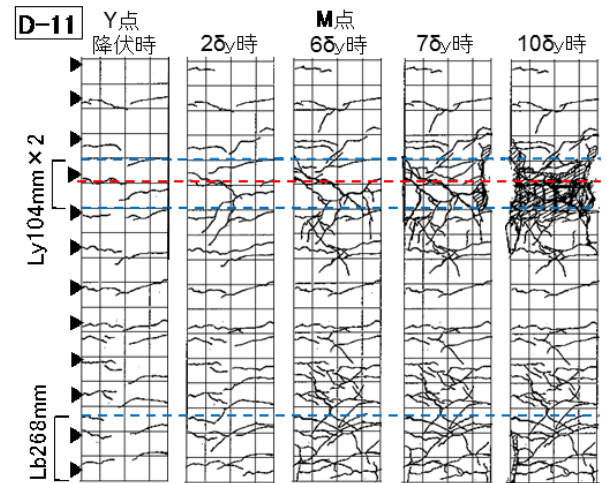
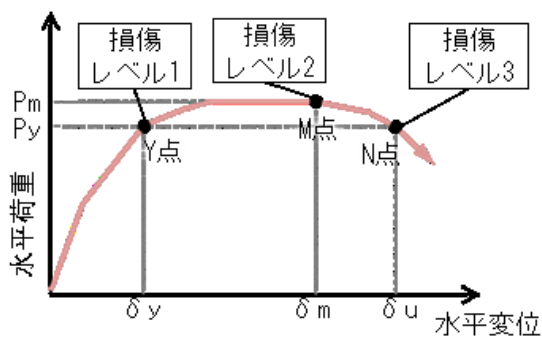
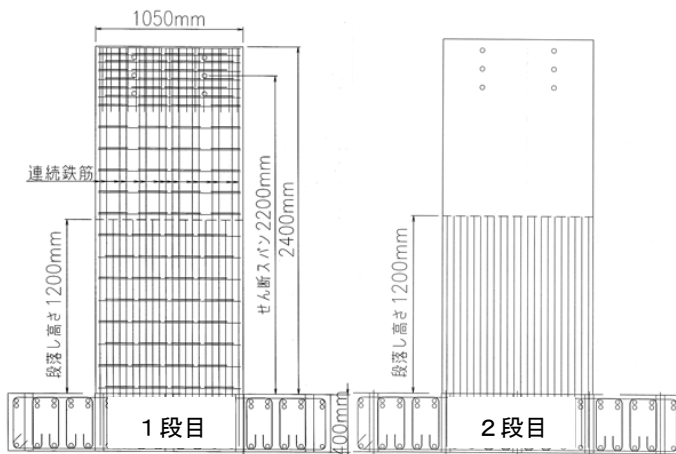
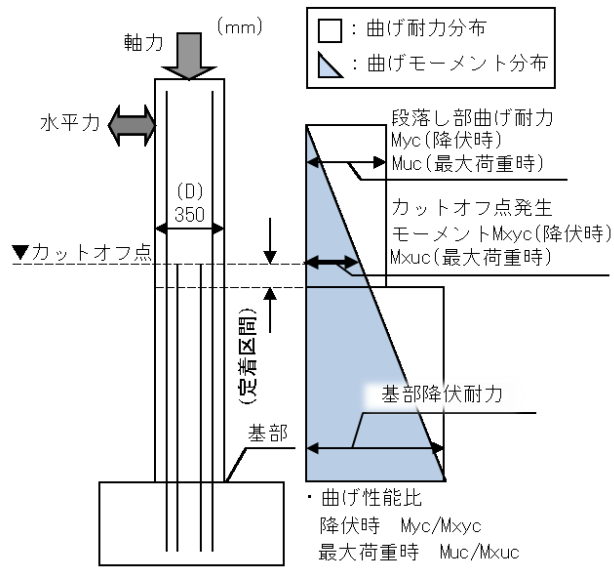
実験を行った^{1) 2) 3)} RC 橋脚模型の試験体配筋例を図-3 に、試験体諸元を表-1 に示す。試験体は一般的な鉄道

表-1 試験体諸元

試験体	カットオフ高さ(mm)	有効高さ d (mm)	軸方向鉄筋(SD345)・配筋			曲げせん断耐力比 V_{yd}/V_{mu}		曲げ性能比		常鉄筋(SD345-d6)		橋脚コンクリート強度 (Mpa)	フーチングコンクリート強度(Mpa)	軸力 MPa
			降伏強度	段落し部	基部	段落し部	基部	M_{yc}/M_{xyc}	M_{uc}/M_{xuc}	降伏強度	間隔mm			
D-11	1200	315	390MPa	d10×16本	d10×22本×2段	2.1	2.6	1.09	1.06	404MPa	150	26.9	31.7	0.5
D-13	1470	315	386MPa	d10×10本	d10×24本×2段	1.8	2.3	1.04	1.05	382MPa	120	23.5	26.7	0.6
D-21	680	315	411MPa	d13×26本	d13×33本 d13×7本	2.2	2.4	1.06	1.04	382MPa	120	26.9	27.1	0.6

*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)



構造物の RC 橋脚を想定し、断面寸法は約 1/5 の縮尺模型とした。軸力も一般的な実鉄道構造物の橋脚に作用する軸方向力の範囲を概ね包絡するように設定した。また、段落し部を境としたせん断耐力と曲げ耐力時のせん断力との比を既往の研究⁵⁾を参考に 1.8 以上とし、曲げ破壊モードとなるように既往の鉄道構造物設計基準⁴⁾に準拠し耐力を算定した。

パラメータは、段落し部の作用曲げモーメントと曲げに対する断面耐力との比（曲げ性能比）とした。

2.2 载荷方法・実験結果

実験は、図-2 のように軸力を作用させた状態で正負 1 回ずつ交番载荷し、軸方向鉄筋が低サイクル疲労で破断しないようにした。柱基部で载荷方向最外縁のいずれかの軸方向鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の载荷位

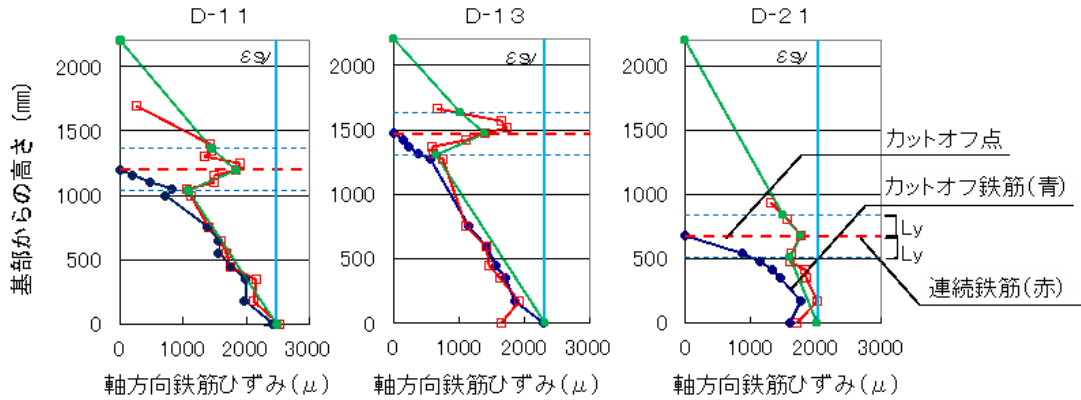


図-6 軸方向鉄筋ひずみ (損傷レベル 1)

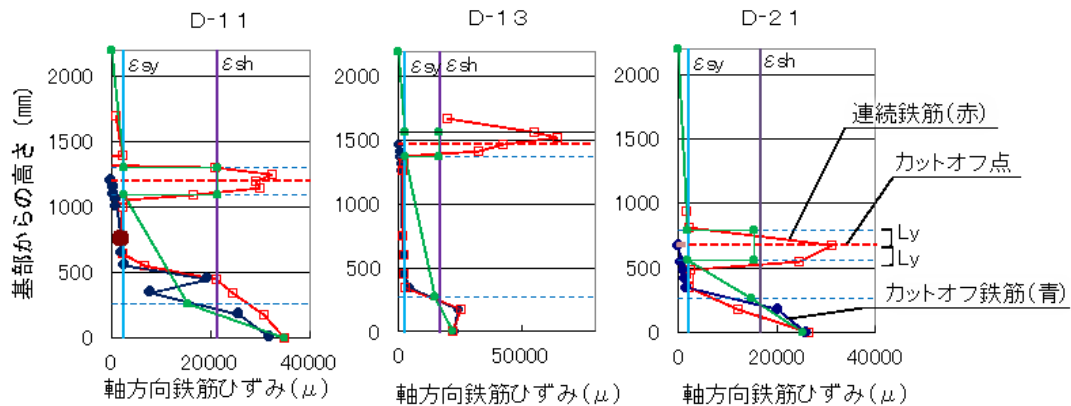


図-7 軸方向鉄筋ひずみ (損傷レベル 2)

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 $n \times \delta y$ ($1, 2, 3 \dots 10 \delta y$ 以降は, 12, 14, 16 δy) で順次変位振幅を増加させながら载荷した。

変形性能評価における変位段階は既往の論文⁶⁾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、繰返し载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)

試験体は、基部で降伏し、段落し部で破壊した。主な载荷サイクル毎のひび割れ図を図-5 に示す。いずれの試験体も M 点を示した後に段落し部近傍で圧壊が生じ、段落し部近傍の損傷が伸展、破壊した。M 点までは、基部でも曲げひび割れが斜め下方へ伸展している。

図-6 に損傷レベル 1 (Y 点)、図-7 に損傷レベル 2 (M 点) のひずみ分布を、材料試験に基づく軸方向鉄筋の降伏ひずみを ϵ_{sy} 、ひずみ硬化域の開始点を ϵ_{sh} として示す。M 点では、基部近傍でも ϵ_{sh} を超過する測点があり、基

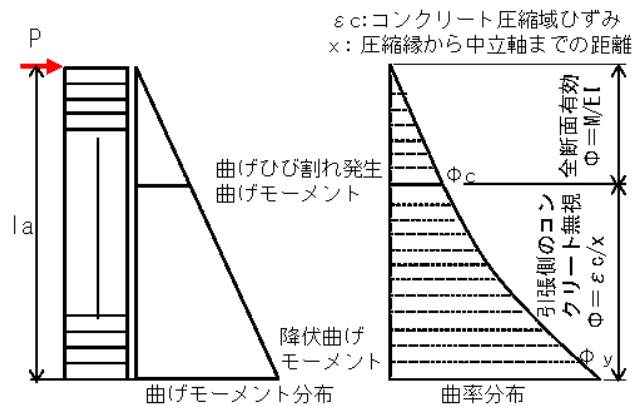


図-8 既往の Y 点く体変形算定における曲率分布

表-2 基部断面で計算した δy との比較

試験体	計算値 (mm)	実験値 (mm)	計算値 / 実験値
D-11	16.30	22.00	0.74
D-13	17.17	17.92	0.96
D-21	16.84	18.64	0.90

部近傍と段落し部近傍の両方で損傷が大きいことが分かる。また、M 点後に塑性ヒンジが形成されたのは段落し部近傍のみで、基部近傍でのかぶりの剥落等はなかった。

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

損傷レベル1のく体変形の算定⁶⁾は、一般的なRC橋脚では、柱基部の曲率が最大となり载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-8のような曲率分布⁴⁾が用いられる。引張鉄筋降伏時の変位 δy は、部材接合部からの軸方向鉄筋の拔出しによる変位 δy_1 とく体変形による変位 δy_0 の和で算定する。表-2に、D-11、D-13、D-21の基部断面で δy を計算し、実験から得られた引張鉄筋降伏時の変位と比較したものを示す。実験値は、初降伏時の変位とした。

降伏変位は、基部断面で計算しても実験値との大きな差はなかった。しかし実験の連続鉄筋ひずみ(図-6)を

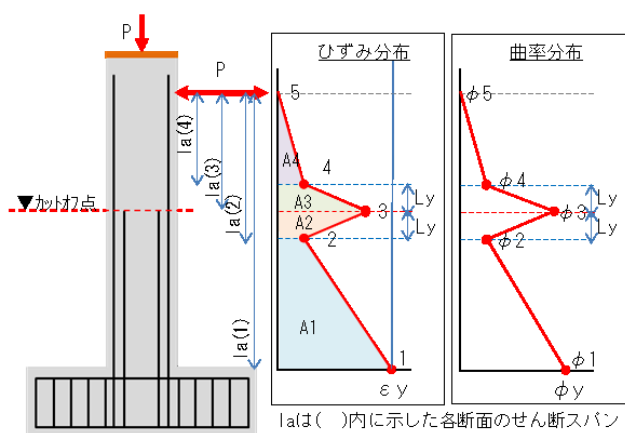


図-9 簡易な曲率分布モデル (損傷レベル 1)

表-3 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
D-11	17.99	22.00	0.82
D-13	18.25	17.92	1.02
D-21	19.67	18.64	1.06

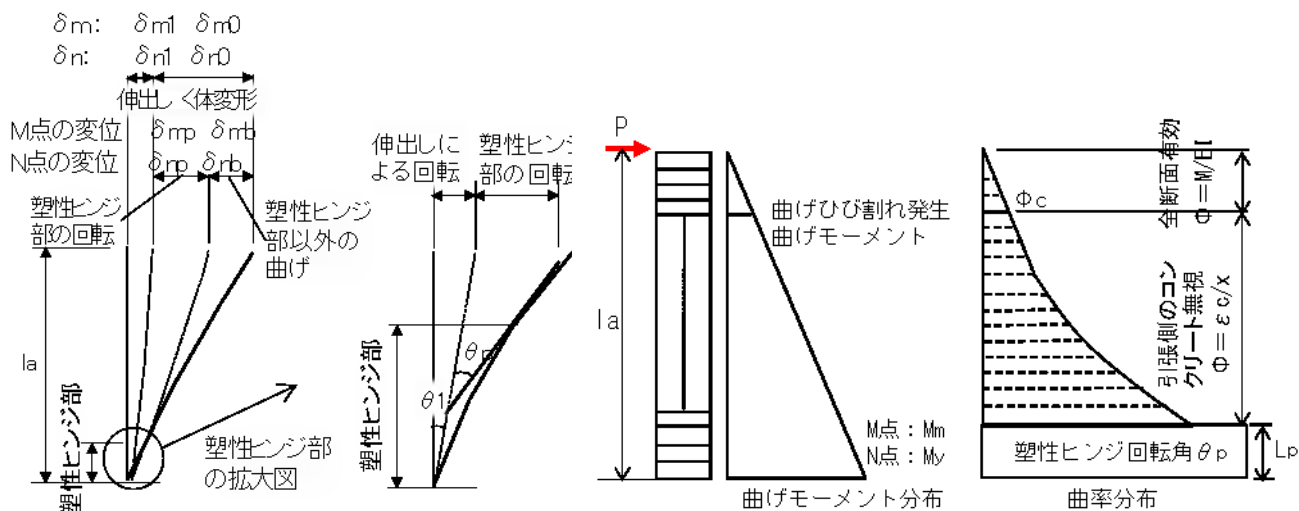


図-10 既往の M 点、N 点く体変形における曲率分布と変位

見ると、基部で降伏し、段落し部の上下で降伏ひずみに近いひずみが生じており、ひずみ分布は2つの山を形成するように2箇所突出する形状を呈している。

そこで、実験で得られたひずみ分布を基本として、簡易なひずみ分布モデルと曲率分布モデルを設定し、曲率から変形量を積分して 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に、基部と段落し部のひずみが突出した簡易モデルを検討した。基部を $\phi 1$ 、段落し部の下でひずみが顕著な下限高さを $\phi 2$ 、段落し部を $\phi 3$ 、段落し部の上でひずみが顕著な上限高さを $\phi 4$ 、载荷点を $\phi 5$ 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-9)

- ・カットオフ点を中心とした上下で、連続鉄筋ひずみの連続性から乖離している区間を L_y とし、ひずみの計測結果を参考に設定する。

図-6のひずみ分布は、カットオフ点を赤点線、カットオフ点を中心として設定した L_y を青点線で、緑のラインは簡易なひずみ分布モデルを示している。 L_y のラインは、段落し部近傍で連続鉄筋のひずみが顕著な領域と、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、 L_y の一番下のラインより上方を、カットオフ鉄筋を除いた連続鉄筋で断面構成されるRC橋脚として考える。

- ・曲率 $\phi 1 \sim \phi 4$ は、損傷レベル 1 時点の計測ひずみ ϵ_s から断面解析による中立軸位置を評価して定めた。 $\phi 5$ は、载荷点のため曲率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、基部近傍と段落し部近傍で曲率が卓越するようにした。

表-4 既往の評価手法を用いた δ_m との比較

試験体	計算値 (mm)	実験値 (mm)	計算値 /実験値
D-11	32.97	135.00	0.24
D-13	25.56	89.50	0.29
D-21	40.02	76.40	0.52

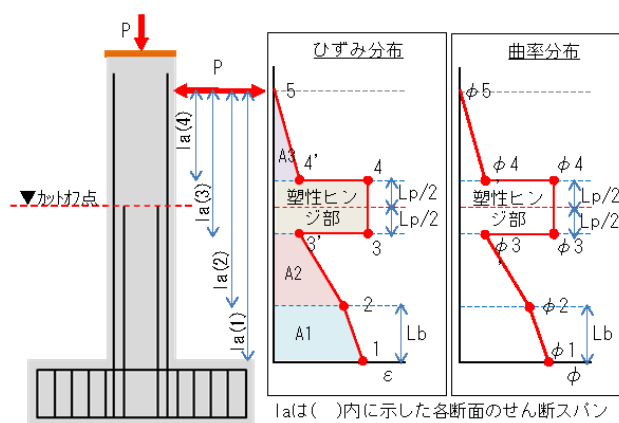


図-11 簡易な曲率分布モデル (損傷レベル 2)

表-3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0.82~1.06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

損傷レベル 2 では段落し部の損傷が顕著になり、図-7のように基部近傍と段落し部近傍で軸方向鉄筋ひずみは ϵ_{sh} を超過する大きな数値を示した。既往の算定手法⁶⁾における損傷レベル 2 の変位は、図-10のように定義されている⁴⁾。今回は実験での損傷状況に基づき、段落し部近傍で塑性ヒンジ部の回転変形 δ_{mp} が生じ、塑性ヒンジ部以外はく体の曲げ変形 δ_{mb} が、基部では伸出しによる変形 δ_{m1} が生じるものとして変位を推定した。段落し部近傍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 ϵ_{sh} を超過して突出している区間を基に定め、変形は柱全体で曲げ変形していることから、載荷点からの距離を $la(1) \sim (4)$ として求めた。表-4 のように、実験値に対する計算値は、0.24~0.52 と、実験値を過小評価する結果となった。

損傷レベル2 (M点) も、実験から得られたひずみ分布と、段落し部近傍で塑性ヒンジを形成する損傷状況を基に、図-11に示す簡易なひずみ分布モデルを仮定し、それに基づく簡易な曲率分布モデルを設定した。以下に設定内容を述べる。

- ・基部を $\phi 1$ 、基部近傍の曲率の大きな区間上端を $\phi 2$ 、段落し部の塑性ヒンジ下端を $\phi 3$ 、段落し部の塑性ヒンジ上端を $\phi 4$ 、載荷点を $\phi 5$ とした簡易な曲率分布モデルとする。

表-5 簡易な曲率分布モデルに基づく δ_m との比較

試験体	計算値 (mm)	実験値 (mm)	計算値 /実験値
D-11	106.60	135.00	0.79
D-13	109.80	89.50	1.23
D-21	88.80	76.40	1.16

表-6 簡易な曲率分布モデルに基づく δ_n との比較

試験体	計算値 (mm)	実験値 (mm)	計算値 /実験値
D-11	117.50	158.60	0.74
D-13	112.50	109.80	1.02
D-21	97.00	105.10	0.92

- ・M 点では段落し部近傍で塑性ヒンジ化した区間を L_p とし、基部近傍の曲率が大きくなる区間は、実験のひずみ分布を基に L_b として設定する。

図-7に、段落し部を中心として設定した塑性ヒンジ部 L_p と、基部に設定した L_b を青点線で示すが、連続鉄筋のひずみが顕著な領域と概ねよく対応している。設定した塑性ヒンジ部 L_p は、参考文献⁶⁾においてMattockらによる式を用いて等価塑性ヒンジ長を算定していることを参考にし、以下の式で算定し、段落し部を中心に設定した。

$$L_p = 0.5d + 0.05la$$

ここに、 L_p : 等価塑性ヒンジ長

d : 断面の有効高さ

la : せん断スパン

図-5のM点以降の剥落範囲と比較すると、剥落高さはD-13やD-21でやや下方になるが、柱軸方向のかぶりの剥落長さは概ね評価できていることが分かる。

- ・M点では基部近傍と段落し部近傍のひずみが顕著で、それ以外の箇所ではひずみは降伏しなかった。そのため簡易な曲率分布モデルは、 L_p と L_b を除く高さに設定した点のひずみは降伏していないものとし、図-11における $\phi 3'$ と $\phi 4'$ は降伏直前のひずみとして $\phi 3'$ と $\phi 4'$ を求め、 $\phi 1$ と $\phi 2$ はM点の計測ひずみから曲率を算定し、 $A1 \cdot A2 \cdot A3$ は塑性ヒンジ部以外のく体の曲げ変形として、それぞれ2階積分することにより δ_{mb} を算定した。

- ・塑性ヒンジ化した L_p 部の変位は、曲率分布モデルで設定した点3から点5をせん断スパンとしたRC橋脚としたときの塑性ヒンジ部の回転による変形 δ_{mp} とした。

- ・伸出しによる回転に伴う変形 δ_{m1} 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⁶⁾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 δ_m は、塑性ヒンジ部の回転による変位 δ_{mp} 、塑性ヒンジ部以外の曲げによる変位 δ_{mb} 、基部の伸出しによる変位 δ_{m1} の総和とした。

計算した M 点の変位 δ_m と実験値を表-5 に示す。計算値は実験値の 0.79~1.23 倍となり、実験値を概ね評価できることを確認した。

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-10 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。

・N 点は、各載荷ステップの正負平均による包絡線上で降伏荷重 P_y との交点を求め、その点の変位を実験から得られた N 点の変位 δ_n とした。

・既往の設計基準⁴⁾に基づき、段落し部近傍の塑性ヒンジ部 L_p において、M 点から N 点への曲率の増分を加味し、 δ_{np} を求める。

・N 点の変位 δ_n は、塑性ヒンジ部の回転による変位 δ_{np} 、塑性ヒンジ部以外の曲げによる変位 δ_{mb} 、基部の伸出しによる変位 δ_{n1} 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張は無視するものとした。

表-6 に計算結果と実験値を示す。計算値は実験値の 0.74~1.02 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。

4. まとめ

基部降伏後、段落し部で塑性ヒンジが生じる RC 橋脚の変形性能評価に関して、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。検討結果を以下にまとめる。

- (1) 損傷レベル 1 (Y 点) の降伏変位 δ_y は、実験から段落し部近傍の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することで、概ね推定できた。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、 δ_y はその曲率に基づくく体の変形による変位 δ_{y0} と、基部からの軸方向鉄筋拔出しによる変位 δ_{y1} の和とした。
- (2) 損傷レベル 2 (M 点) の変位 δ_m は、実験で基部近傍の曲率が大きく、段落し部近傍で塑性ヒンジが形成されたことを考慮し、段落し部近傍

に塑性ヒンジを設定し、基部近傍で曲率が大きくなる簡易な曲率分布モデルを設定することで概ね推定できた。簡易な曲率分布モデルは、7 点を直線状に結ぶ線で構成され、段落し部を中心とした等価塑性ヒンジ長 L_p を設定、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。 δ_m 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 δ_{mb} と、塑性ヒンジ部の回転による変位 δ_{mp} 、基部の伸出しによる変位 δ_{m1} の総和とした。

- (3) 損傷レベル 3 (N 点) の変位 δ_n は、実験から段落し部近傍で生じた塑性ヒンジ部以外の損傷が少ないことを考慮した。M 点と同じ簡易な曲率分布モデルを基に、M 点の変位 δ_m に塑性ヒンジ部の回転による変位 δ_{np} と、基部の伸出しによる変位 δ_{n1} 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

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 石橋忠良, 津吉毅, 小林薫, 小林将志: 大変形正負交番荷重を受ける RC 柱の損傷状況及び補修効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, 55-69, 2000.5
- 6) 渡邊忠朋, 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