

論文 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

小林 寿子*1・小林 薫*2

要旨：RC 橋脚では、発生曲げモーメント分布に応じて、軸方向鉄筋量を減らした段落し部を設ける場合がある。本論では、カットオフ鉄筋長を変化させた場合の損傷形態を確認することを目的とし、曲げ損傷する RC 橋脚を対象にパラメータを設定し、正負交番載荷試験を実施した。カットオフ点での作用曲げモーメントと曲げに対する断面耐力との比（以下「曲げ性能比」という）、試験体基部から断面高さ上の位置からカットオフ点までの鉄筋長（以下「1D より上の定着長」という）の2点を主なパラメータとし、降伏位置と、耐力を喪失したと思われる段階での損傷位置について、報告する。

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

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。

鉄筋の途中定着を有する橋脚中間部の損傷に関する既往の研究では、山本ら¹⁾、川島ら²⁾、幸左ら³⁾、によって実施されている。また、軸方向鉄筋量を2か所で段落しされた実物大橋脚模型を用いた加震実験が行われ、橋脚中間部での損傷に対する研究報告⁴⁾もある。既往の研究では、主に、鉄筋途中定着部の設計法、破壊性状、損傷分析などに着目している。また、実物大橋脚の試験体による加震実験からは、段落し部でせん断破壊したと



図-1 RC 橋脚く体中間部での損傷事例

きの軸方向鉄筋の付着劣化領域の検討が行われている。既往の研究においても、鉄筋の途中定着を有する試験体の諸元により、破壊状況が相違することが指摘されている。

著者らは、この研究に関連して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、段落し部で破壊する場合と基部で破壊する場合の損傷状況、降伏時の必要定着長について報告しており、「図-3 に示す M_{uc}/M_{xuc} を 1.14 とした試験体は基部で、1.06 とした試験体は段落し部で曲げ破壊したこと」「図-3 に示す 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」「2次元剛体バネモデルによる数値解析より得られたひずみ分布より、カットオフ点-35~38φにひずみの一致する点が確認されたこと」等が明らかになっている。^{5) 6)}

本論文では、新たに試験体を追加し、カットオフ鉄筋長を変化させた場合の損傷形態への影響を確認することを目的に実験的な検討を行ったので報告する。

2. 実験概要

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-2 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、断面寸法は約 1/5 の縮尺模型とした。パラメータは、カットオフ点位置の作用曲げモーメントと曲げに対する断面耐力との比（以下「曲げ性能比」と

表-1 試験体諸元

試験体	カットオフ高さ mm	1Dより上の定着長φ	軸方向鉄筋(SD345)				引張鉄筋比(段落し部) Ptc	引張鉄筋比(基部) Ptb	曲げせん断耐力比 V_{yd}/V_{mu}		曲げ性能比		帯鉄筋(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
			純かぶり	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-12	1280	93	30mm	386MPa	d10×10本	d10×18本×2段	0.0019	0.0070	2.3	2.8	1.05	1.04	382MPa	150	22.1	26.1	0.6
D-15	1240	89	30mm	386MPa	d10×15本	d10×21本×2段	0.0029	0.0082	2.0	2.6	1.15	1.13	382MPa	150	24.3	33.4	0.6
D-18	680	21	32mm	396MPa	d16×30本	d16×35本 d16×9本	0.0029	0.0082	1.8	2.6	1.11	1.08	382MPa	80	26.3	27.3	0.6

*1 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所工事管理室副課長 (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)

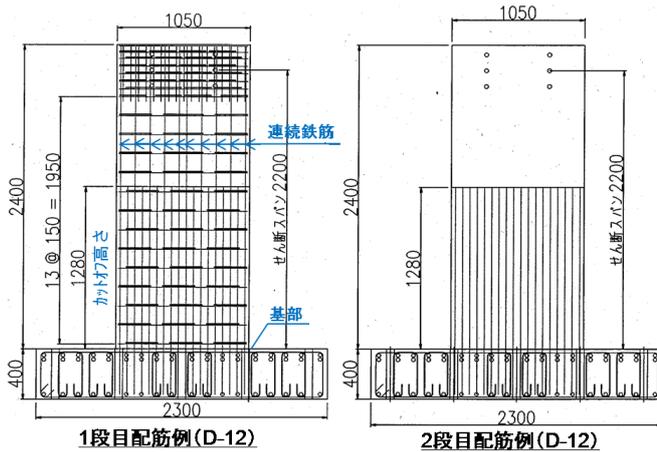


図-2 試験体の配筋例

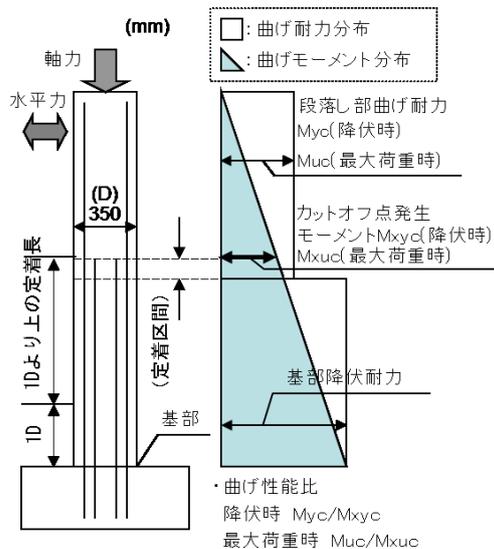


図-3 曲げ性能比の定義

いう(図-3 参照), 試験体基部からの断面高さ(D)を基準点とし, そこからカットオフ点までの鉄筋長(以下「1Dより上の定着長」という)とした。また, カットオフ点を境としたせん断耐力と曲げ耐力時の水平力との比(以下「耐力比」という)を既往の研究⁷⁾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⁸⁾に準拠し耐力を算定した。

1Dより上の定着長をパラメータとした理由は, 基部で損傷が先行した場合, 基部での損傷範囲が概ね1D区間に集中することが, 既往の実験等^{5) 6)}で明らかにされているためである。カットオフ鉄筋では, 基部の損傷範囲を除く長さが定着部になると考えた。

本論では既往の試験体^{5) 6)}に対し, 曲げ性能比の高いD-15試験体, 曲げ性能比が高く1Dより上の定着長が短いD-18試験体を新たに追加した。

2.2 荷重方法

実験は, 図-3に示すように軸力を作用させた状態で正負1回ずつ交番荷重し, 軸方向鉄筋が低サイクル疲労で破断しないようにした。柱基部で荷重方向最外縁のいずれかの主鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の荷重位

置に生じる変位を降伏変位 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。

3. 実験結果

試験体は, D-15試験体, D-18試験体は基部, D-12試験体はカットオフ点付近で先行降伏した。以下に, 損傷の過程と, 損傷状況, 荷重変位関係について述べる。

3.1 降伏時曲げ性能比 1.15・最大荷重時曲げ性能比 1.13・1Dより上の定着長 89 ϕ (D-15試験体)

D-15試験体は, 軸方向鉄筋が基部で降伏ひずみに達し, その後基部の損傷が進展, 基部で破壊した。

図-4に, 荷重変位曲線を示す。D-15は, 8~9 δy から荷重が低下したが, 緩やかな低下となり, 安定した荷重・変位関係を示した。

ひび割れは, 試験体の基部からカットオフ点より上まで発生し, 最大荷重(6 δy)までは, カットオフ点と基部でひび割れ幅が拡大, カットオフ点近傍では, カットオフ点位置のひび割れだけが顕著に拡大した。(図-5)

以後7 δy 荷重時の最大水平変位時に, 点検ハンマーで打音検査したところ, かぶりコンクリートの浮きが発生していた。かぶりコンクリートの浮きの範囲は, カットオフ点より下に軸方向鉄筋径の約5倍, 基部ではフーチング上面から軸方向鉄筋径の40倍程度であった。8 δy で, 基部に圧壊が生じ水平荷重の低下が顕著になった。

3.2 降伏時曲げ性能比 1.05・最大荷重時曲げ性能比 1.04・1Dより上の定着長 93 ϕ (D-12試験体)

図-6に, D-12試験体の荷重・変位曲線を示す。D-12試験体は, カットオフ点付近において, 6 δy の荷重から軸方向鉄筋のはらみだしが生じ, 荷重が低下した。8 δy の荷重から, 荷重・変位曲線の形状が逆S字型になった。

図-7に, D-12試験体のひび割れ状況を示す。D-12試験体は, 5 δy の荷重でカットオフ点から軸方向鉄筋径の約3倍下から, 5倍程度上の位置まで, かぶりコンクリートの浮きが確認された。6 δy の荷重において, カットオフ点付近から軸方向鉄筋のはらみが生じ, かぶりコンクリートが剥落した。かぶりコンクリートの剥落範囲は, 軸方向鉄筋径の約17倍程度であった。

3.3 降伏時曲げ性能比 1.11・最大荷重時曲げ性能比 1.08・1Dより上の定着長 21 ϕ (D-18試験体)

図-8に, D-18試験体の荷重・変位曲線を示す。D-18試験体は, 1Dより上の定着長は, 軸方向鉄筋径の21倍と比較的短い。実験では, 基部と1Dより上の損傷が複合した損傷状況となった。5 δy の荷重時から軸方向鉄筋のはらみだしが顕著になるとともに, 荷重低下も顕著となった。荷重の低下は, 比較的急激であった。

図-9に, D-18試験体のひび割れ状況を示す。

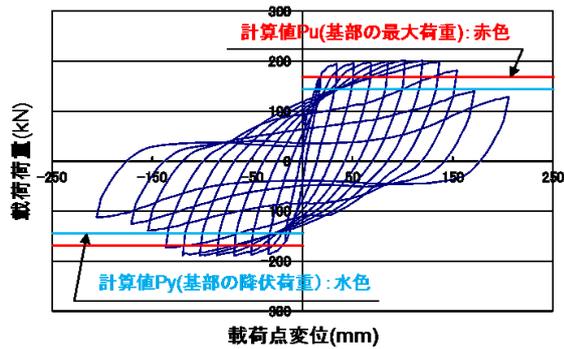


図-4 荷重変位曲線 (D-15)

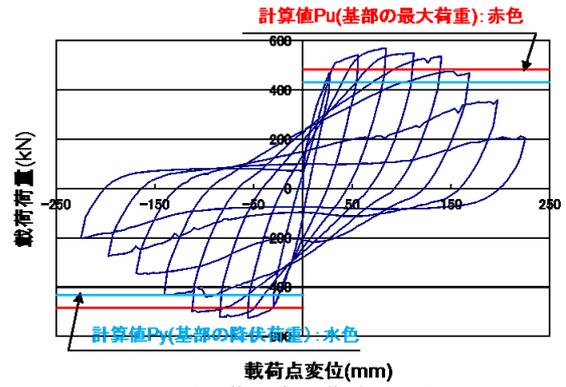


図-8 荷重変位曲線 (D-18)

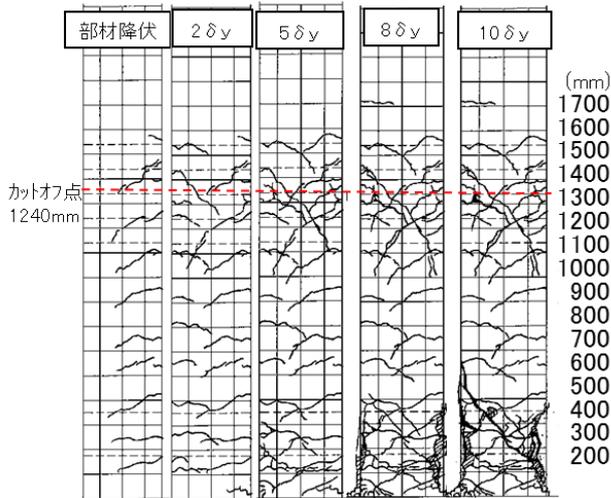


図-5 主な荷重ステップのひび割れ状況 (D-15)

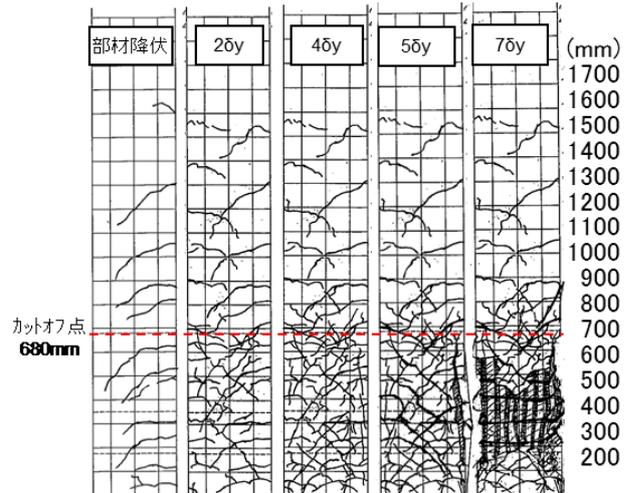


図-9 主な荷重ステップのひび割れ状況 (D-18)

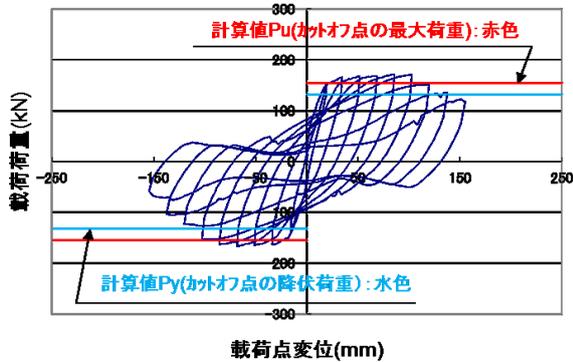


図-6 荷重変位曲線 (D-12)

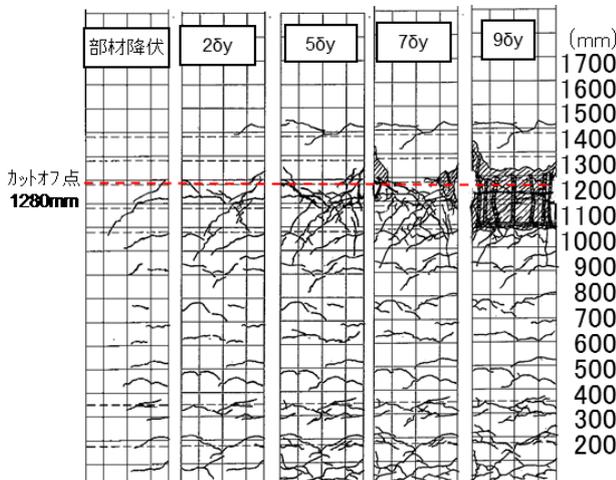


図-7 主な荷重ステップのひび割れ状況 (D-12)

D-18 試験体は、降伏時のひび割れ幅は基部が最大であったが、 $2\delta_y$ の荷重では、カットオフ点付近が大きく開き、基部からカットオフ点付近の範囲で部材軸方向に、かつ軸方向鉄筋に沿うようなひび割れが発生した。また、カットオフ点付近から、試験体基部に向かう短い斜め方向のひび割れが多数発生した。カットオフ点より上方では、ひび割れの増加や伸張がほとんど見られなかった。

$5\delta_y$ の荷重では、基部からカットオフ点付近の範囲において、かぶりコンクリートの圧壊と軸方向鉄筋がはらみだした。カットオフ鉄筋のはらみだしは確認されなかった。これは、カットオフ点近傍までのかぶりコンクリートが剥落していることから、1Dより上での定着機能が喪失したと思われる。

かぶりコンクリートの剥落範囲は、基部からカットオフ点近傍までとなった。この状況から、基部のコンクリート圧壊、連続鉄筋のはらみだし、1D位置より上方のカットオフ鉄筋の付着劣化が発生した複合的な損傷形態と考えられる。

以上のことから、D-12・D-15・D-18 試験体は、降伏位置やほぼ耐荷力を喪失したと思われる段階までの損傷過程が異なる実験結果となった。

4.各種パラメータの影響

今回の試験より得られた、3つのパターンでの損傷状況について、破壊状況写真と軸方向鉄筋のひずみ分布と合わせ、各パラメータの影響に関して以下に整理する。

4.1 降伏時曲げ性能比 1.15・最大荷重時曲げ性能比 1.13・1Dより上の定着長 89φ (D-15 試験体)

図-10に、降伏時の曲げ性能比を1.15と最も大きく設定したD-15試験体の、降伏時・最大荷重時・圧壊直前・圧壊後の連続鉄筋とカットオフ鉄筋のひずみ分布を、写真-1に、破壊状況を示す。

軸方向鉄筋の降伏ひずみ 2309μ とひずみ硬化開始点 16577μ にY軸方向のラインを引き、カットオフ点はX軸方向の破線で示した。降伏時は基部がカットオフ点に先行して降伏し、最大荷重時にはカットオフ点のひずみが他の側面に比べ最大となった。最大荷重時にひずみ硬化開始点を越えた測点は、カットオフ点・カットオフ点-5φ、1D(350mm)の3点であった。圧壊直前にはカットオフ点のひずみが最大荷重時より減少し、一方で1D高さのひずみは 26008μ と最も大きくなった。

図-4のように、D-15試験体は他の試験体に比べ、最大荷重を最も長く保持し、荷重の低下も緩やかな紡錘型を示し、エネルギー吸収量も大きくなった。

写真-1のように、破壊位置は基部であったが、ひびわれは図-5に示すようにカットオフ点近傍にも多く発生した。ひずみは最大荷重まではカットオフ点付近でも進展し、カットオフ点付近のひずみが進展している状況はひび割れとも一致する。

基部で降伏し基部で破壊した損傷パターンについては、曲げ性能比を降伏時で1.15、最大荷重時で1.13と最も大きくした影響ではないかと推察される。また、1Dより上の定着長を89φとした点については、ひずみ分布やひび割れ状況から基部とカットオフ点付近のひび割れやひずみがつながるような状況は見られず、ひび割れは多数発生したものの最終的にカットオフ点付近での破壊が見られなかったことから、十分な定着長が確保されていたと推察される。

4.2 降伏時曲げ性能比 1.05・最大荷重時曲げ性能比 1.04・1Dより上の定着長 93φ (D-12 試験体)

図-11に、カットオフ点付近で降伏・カットオフ点付近で破壊したD-12試験体のひずみ分布を、写真-2に破壊状況を示す。

D-12試験体は、降伏時にカットオフ点が基部に先行して降伏したが、基部のひずみはカットオフ点ひずみを 100μ 程度下回る程度で大きな差は無かった。最大荷重時は圧壊直前と同時期となったが、このときひずみ硬化開始点を越えた測点は、カットオフ点+10φ・カットオフ点+5φ・カットオフ点・カットオフ点-5φ、D/2(175mm)、

基部の6点で、基部に比べ、カットオフ点+15φ～カットオフ点-5φのひずみが大きな数値を示していた。

D-12試験体の荷重変位関係は、D-15が7～8 δy までほぼ最大荷重を保持したのに対し、図-8のように5～6 δy までと、変位段階ではやや早い段階で荷重低下が生じたものの、急激な低下は示していない。

ひずみ分布は、D-15試験体よりカットオフ点付近のひずみの伸び、大きさともに卓越している。

このように、降伏時の曲げ性能比を1.05、最大荷重時の曲げ性能比を1.04としたD-12は、荷重が最大値を示す5 δy まではD-15とよく似たひび割れ状況となっており、荷重変位関係においてもほぼ最大荷重を維持しているが、ひずみ分布ではカットオフ点付近が顕著であり、D-15と明確な違いを呈している。

1Dより上の定着長に着目すると、D-15試験体が89φであるのに対し、D-12試験体が93φとやや長いのが、D-12のひずみ分布では、圧壊後においても1Dより上でカットオフ鉄筋と連続鉄筋がほぼ同等の数値を示す点が複数みられる。このことから、D-12試験体は基部でも複数ひび割れが発生しているが、カットオフ鉄筋の定着長不足により破壊位置がカットオフ点付近になったとは考えにくい。D-15に比較し、最大荷重時の曲げ性能比が小さいことが破壊位置に影響しているのではないかと推察される。

4.3 降伏時曲げ性能比 1.00・最大荷重時曲げ性能比 1.08・1Dより上の定着長 21φ (D-18 試験体)

図-12に、D-18試験体の基部降伏・1Dより上のカットオフ鉄筋付着劣化と基部の破壊が複合した破壊のD-18試験体のひずみ分布を、写真-3に破壊状況を示す。D-18試験体は、降伏時に基部が先行して降伏し、基部以外のD/2～カットオフ点+15φの測点までのひずみはほぼ同等の数値を示した。最大荷重時も基部が 17396μ で最大となったが、カットオフ点+10φおよび+5φにおいても 16000μ 程度と高い数値を示し、ひずみ硬化開始点を越える測点は高さ方向にほぼ一定の間隔で断続的に見られた。圧壊直前には1Dからカットオフ点-10φの間で 25000μ を超える高い値が見られ、カットオフ点のひずみは減少、基部からカットオフ点にかけて連続鉄筋ひずみとカットオフ鉄筋ひずみとの乖離が拡大した。

D-18試験体は図-8のように荷重変位関係は今回対象とした3体の試験体のうち最大荷重を保持する変位段階が短く、荷重低下も最も急激なものとなった。

ひずみ分布に着目すると、基部からカットオフ点まで、連続鉄筋のひずみが平均化するような状況が見られ、基部とカットオフ点付近だけでなく、双方の中間部においても同様のひずみの伸びが確認できる。

ひび割れ状況では、基部付近で生じたひび割れとカッ

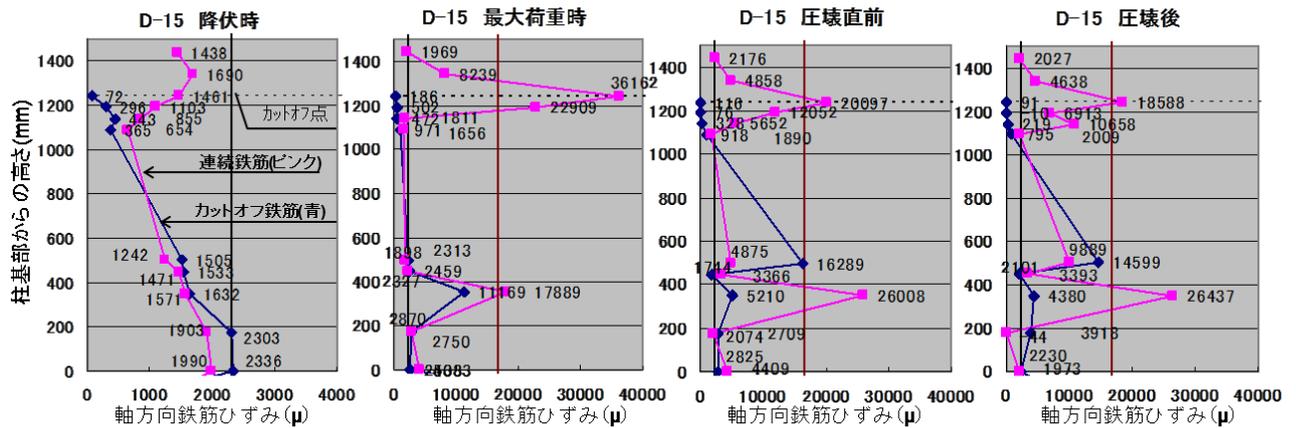


図-10 主な変位段階での軸方向鉄筋ひずみ分布 (D-15)

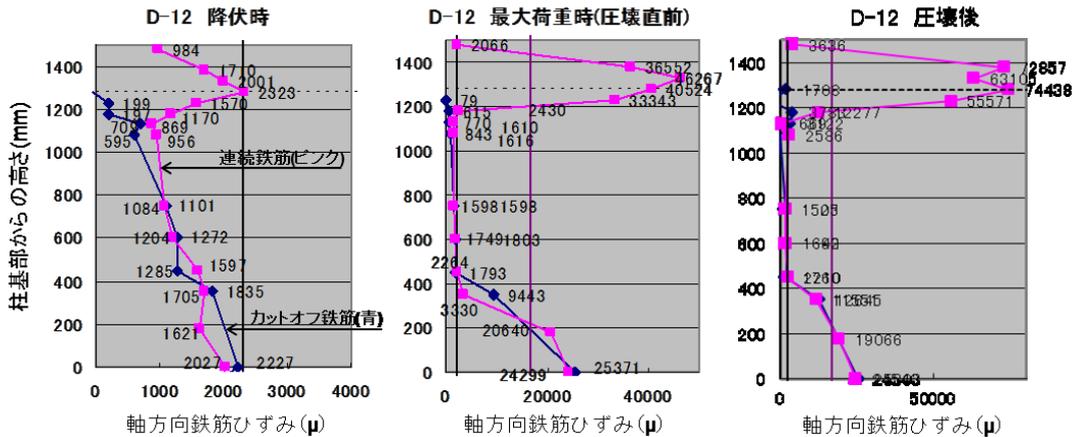


図-11 主な変位段階での軸方向鉄筋ひずみ分布 (D-12)

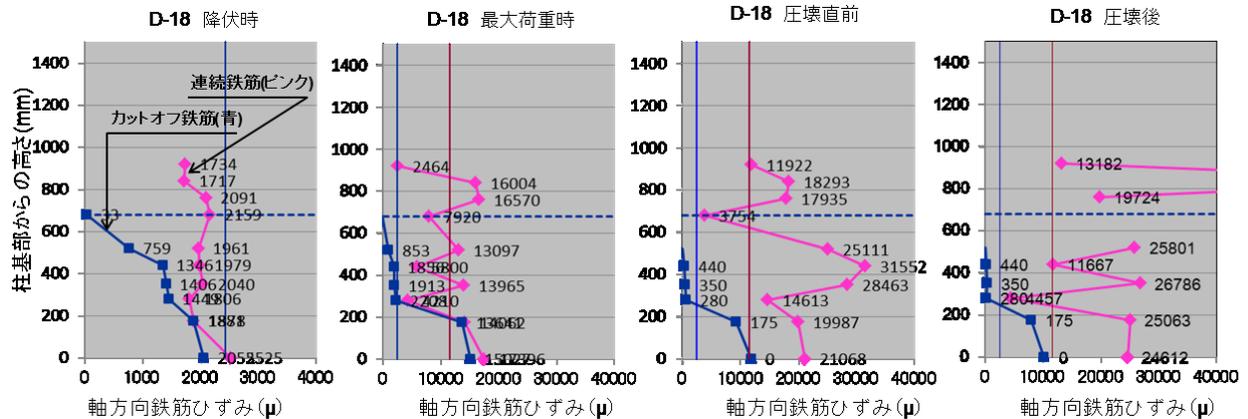


図-12 主な変位段階での軸方向鉄筋ひずみ分布 (D-18)

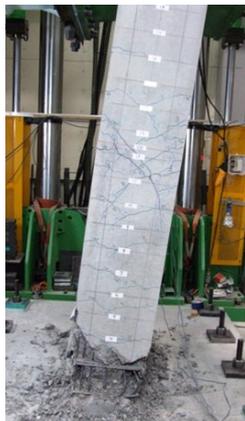


写真-1 D-15 実験終了時の状況



写真-2 D-12 実験終了時の状況



写真-3 D-18 実験終了時の状況

トオフ点付近に生じたひび割れの双方の損傷が重なるように進展する傾向が見られ、最終的には軸方向鉄筋に沿ったひび割れが生じた後に一気にかぶりが剥落し、荷重が低下している。

以上をまとめると、D-18試験体は、基部で降伏した点は降伏時の曲げ性能比を1.11とD-12試験体よりも大きくしたことが影響しているものと考えられる。一方で、最大荷重時の曲げ性能比を1.08とD-12試験体より大きくしたにも関わらず基部で破壊せず、基部とカットオフ点付近の複合的な破壊を呈した点については、1Dより上の定着長を 21ϕ と短くしたことが破壊の損傷箇所にも大きく影響したものと推察される。

4. まとめ

鉄筋の途中定着を有する RC 橋脚の曲げ損傷に関して、模型試験体による交番載荷実験から検討を行った。検討結果を以下にまとめる。

- (1) 降伏時の曲げ性能比を 1.05 とした D-12 試験体は、カットオフ点で降伏し、降伏時の曲げ性能比を 1.15 とした D-15 試験体と 1.11 とした D-18 試験体は、基部で降伏した。
- (2) 曲げ耐力時の曲げ性能比を 1.04、1D より上の定着長を 93ϕ とした D-12 試験体は、カットオフ点付近のひずみが進展し、カットオフ点付近で曲げ破壊した。
- (3) 曲げ耐力時の曲げ性能比を 1.13、1D より上の定着長を 85ϕ とした D-15 試験体は、最大荷重時までは基部とカットオフ点付近双方のひずみが進展したが、基部で曲げ破壊した。
- (4) 1D から上部のカットオフ鉄筋の定着長を 21ϕ とした D-18 試験体は、1D より上のカットオフ鉄筋の付着劣化の影響と推察される、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。

参考文献

- 1) 山本強, 石橋忠良, 大坪正行, 小林晋暹: 鉄筋を途中定着した橋脚の耐震性能に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 348 号/V-1, pp61-70, 1984.8
- 2) 川島一彦, 星隈順一, 運上茂樹: 鉄筋コンクリート橋脚・主鉄筋段落し部の耐震判定法とその適用, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp83-95, 1995.10
- 3) 幸左賢二, 津吉毅, 加藤啓介, 濱本朋久: 段落し部を有する PC 橋梁の損傷分析, 構造工学論文集 Vol.54A, pp343-352, 2008.3
- 4) 佐々木智大, 川島一彦: E-ディフェンス震動実験に基づく RC 橋脚の段落し部の付着切れに関する検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.64, No.1(地震工学論文集第 30 巻), pp434-441, 2009
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 石橋忠良, 津吉毅, 小林薫, 小林将志: 大変形正負交番載荷を受ける 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
- 8) 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.