

論文 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

小林 寿子*1・斉藤 成彦*2・小林 薫*3

要旨：河川等に位置する橋脚基部が大地震時に損傷を受けた場合、復旧には仮締切等の仮設工事を伴うことが想定される。本研究では、橋脚の中間部で曲げ損傷させることで、仮設工事の簡素化を図り、復旧性の向上を目的とした損傷メカニズムの把握に取り組んでいる。本論では、段落し部で曲げ破壊する曲げせん断耐力比の高い RC 橋脚を対象とし、模型試験体の交番载荷実験と、数値解析による繰返し载荷解析を実施し、損傷状況に関する検討を行った。実験および解析結果より、段落し部で曲げ破壊する場合の特徴について報告する。

キーワード：RC 橋脚, 段落し, カットオフ鉄筋, 数値解析, 交番载荷試験

1. はじめに

一般的な RC 橋脚において、断面力に合わせて配筋量を減らす段落し部を設けている。このような橋脚では、大地震時に段落し部でかぶりコンクリートが剥落し、損傷する可能性がある(写真-1)。一方、大地震時に橋脚の基部で損傷を受けた RC 橋脚について、例えば河川での復旧状況を考えた場合、仮締切や施工時期の制約等による工期や費用の長大化も想定される(図-1)。

そこで、橋脚体中間部に損傷を誘導することによる復旧の合理化を目的とし、段落し部で曲げ損傷を誘導した場合の損傷メカニズムの把握を研究している。例えば、図-2のように、河川水位より上部で損傷すれば、吊り

足場等の比較的簡易な仮設工事による復旧が可能となり、早期復旧も期待できる。

著者ら¹⁾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を行っており、基部で降伏し基部で曲げ破壊するケースと、基部で降伏し段落し部で曲げ破壊するケースの2つの破壊形態を得ている。このとき、1D 区間より上のカットオフ鉄筋の定着長と、曲げ性能比(基部が曲げ耐力に達したときの、段落し部の曲げ耐力とカットオフ点の曲げモーメントの比)をパラメータとした破壊位置の整理の可能性が示された。また、数値解析により実験の荷重-変位関係、軸方向鉄筋のひずみ分布、ひび割れ性状の再現性を確認するとともに、解析のひずみ分布から、カットオフ点にひび割れが発生する前はカットオフ点-10φ(φは軸方向鉄筋径)、降伏時にはカットオフ点-30~40φで連続鉄筋とカットオフ鉄筋のひずみが一致していることが分かった。本論では、橋脚段落し部に損傷を適切に誘導するためのメカニズム把握を目的とし、段落し部で破壊する模型試験体の交番载荷実験と、数値解析による繰返し载荷解析を実施し、より詳細な段落し部の損傷状況について報告する。



写真-1 地震後の RC 橋脚損傷事例

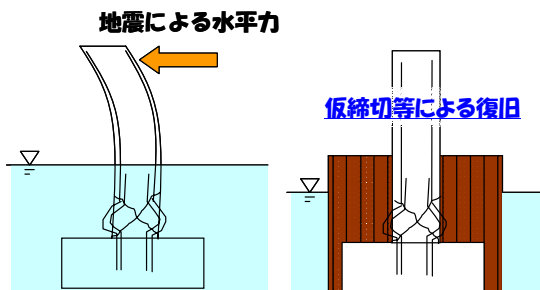


図-1 基部で損傷した場合の復旧イメージ

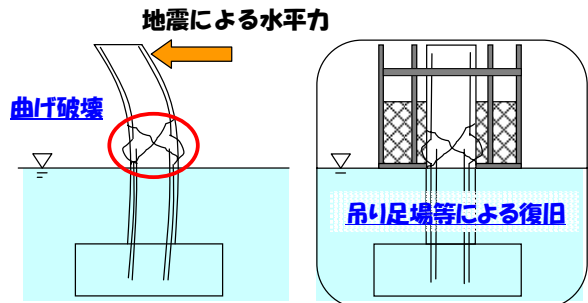


図-2 水位より上で損傷した場合の復旧イメージ

*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 正会員

*2 山梨大学 医学工学総合研究部 准教授 博士(工学) 正会員

*3 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

2. 実験の概要

2.1 試験体諸元

実験に用いた RC 橋脚模型の試験体概要を図-3に、試験体諸元を表-1に示す。試験体は、一般的な鉄道構造物の RC 橋脚を想定しており、断面寸法は約 1/3~1/4 の縮尺模型とした。

試験体は主鉄筋の段落し部を有し、曲げせん断耐力比は、曲げ破壊モードになるよう既往の鉄道構造物設計基準²⁾に準拠した計算方法に基づき、過去の文献⁴⁾を参考に 1.8 以上に設定した。

パラメータは、1D (350mm) より上のカットオフ鉄筋定着長、引張鉄筋比、降伏時の曲げ性能比とした。なお、軸方向鉄筋径は D10 を標準とし、試験体 D-21 のみ D13 とした。主鉄筋の芯かぶりは全て 35mm とした。

1D より上の定着長は、橋脚基部が塑性ヒンジとなった場合のカットオフ鉄筋の定着長を想定し、25φ を 1 体と、十分な定着長を想定し 85φ 以上を 3 体設定した。

引張鉄筋比は D-12 を基準に、基部は D-11 が約 1.2 倍、D-13 は約 1.3 倍、D-21 は約 1.0 倍とし、段落し部は、D-11 が約 1.6 倍、D-13 は約 1.0 倍、D-21 は約 2.4 倍とした。

降伏時の曲げ性能比は、基部が曲げ降伏耐力に達したとき、段落し部の曲げ降伏耐力(M_{yc})をカットオフ点に発生するモーメント (M_{xyc})で除した値とした。本論では、軸方向鉄筋の降伏する位置をコントロールすることを想定し、降伏耐力を指標とした“降伏時の曲げ性能比”を

パラメータとした。なお、文献¹⁾では、破壊位置のコントロールを想定し、最大耐力を指標とした“曲げ性能比”をパラメータとしている。曲げ降伏耐力分布は、図-3に示すようにカットオフ鉄筋の定着長を考慮すると、カットオフ点より下のある高さで段差が生じる。しかし、定着長が正確に分からないため、本論では、カットオフ点のモーメントを指標とし、事前の数値解析結果を参考に、1.04~1.09 とした。

なお本論では、基部破壊と段落し部破壊の境界付近を検討することを目的としたため、曲げ性能比は同程度の数値としているが、基部に損傷を生じさせない設計とする場合には、曲げ性能比を十分に小さくすればよい。

2.2 載荷方法

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。柱基部で載荷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 $n \times \delta y$ (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載荷した。

3. 実験結果

3.1 耐荷性状および破壊性状

試験体 4 体は、全て段落し部で曲げ破壊した。但し、

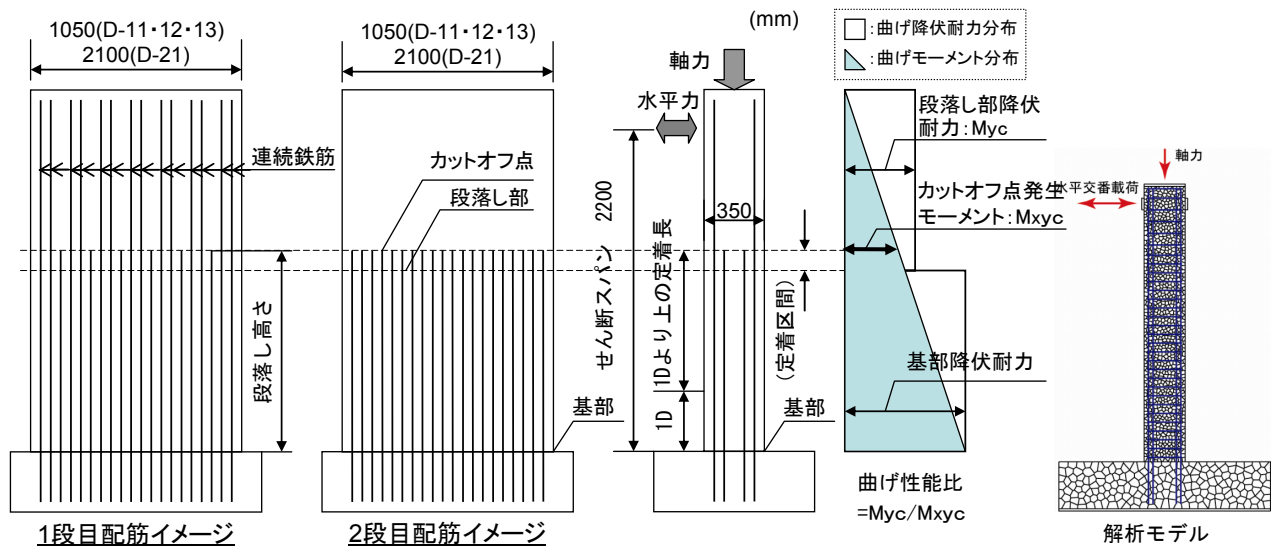


図-3 試験体概要

表-1 試験体諸元

試験体番号	段落し高さ(mm)	1Dより上の定着長(φ)	軸方向鉄筋配置		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 M_{yc}/M_{xyc}	帯鉄筋間隔 (mm)	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)
			段落し部	基部			段落し部	基部					
D-11	1200	85.0	d10 × 16本	d10 × 22本 × 2段	0.0031	0.0085	2.1	2.6	1.09	150	26.9	31.7	0.5
D-12	1280	93.0	d10 × 10本	d10 × 18本 × 2段	0.0019	0.0070	2.3	2.8	1.05	150	22.1	26.1	0.6
D-13	1470	112.0	d10 × 10本	d10 × 24本 × 2段	0.0019	0.0093	1.8	2.3	1.04	120	23.5	26.7	0.6
D-21	680	25.4	d13 × 26本	d13 × 33本 × 7本	0.0046	0.0071	2.2	2.4	1.06	120	26.9	27.1	0.6

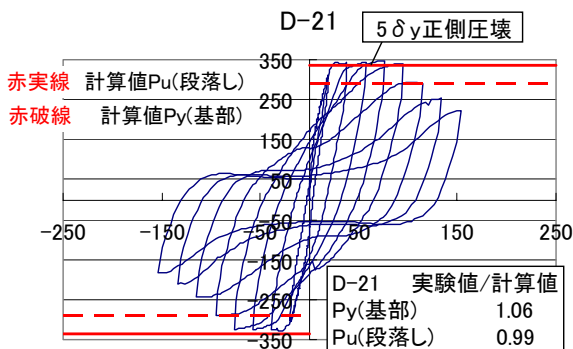
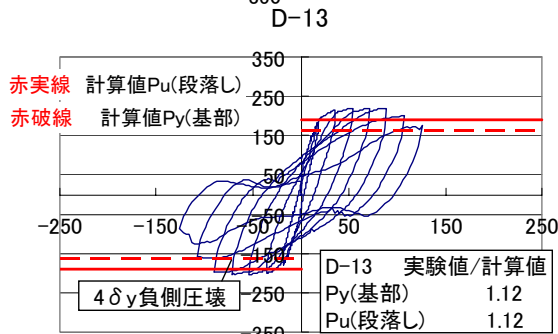
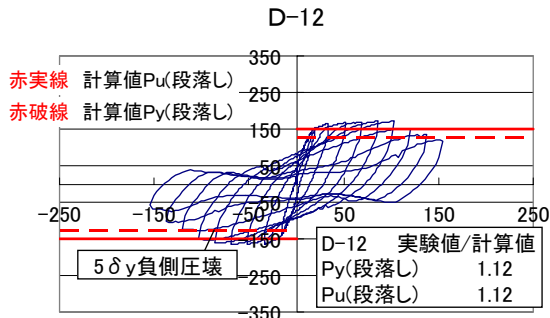
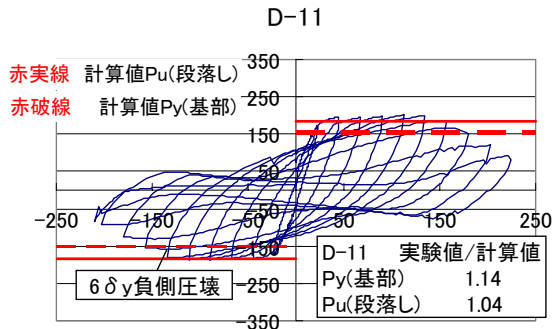


図-4 荷重-変位関係

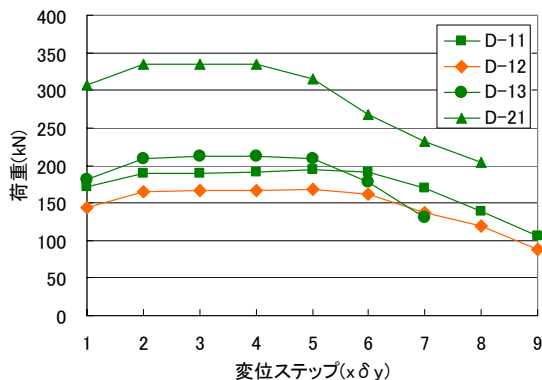


図-5 荷重-変位関係 (包絡線での比較)

最初に降伏した位置は、D-12が段落し部、他3体は基部であった。

図-4に、載荷点における荷重-変位関係(横軸:荷重 kN, 縦軸:変位 mm)を示す。いずれも段落し部で圧縮縁のコンクリートが圧壊するまで最大荷重を保持し、その後荷重が低下している。

降伏荷重 P_y と最大荷重 P_u の、実験値と参考文献²⁾に基づく計算値を比較したところ、D-21の P_u で0.99とやや実験値が計算値を下回った他は、全て実験値が計算

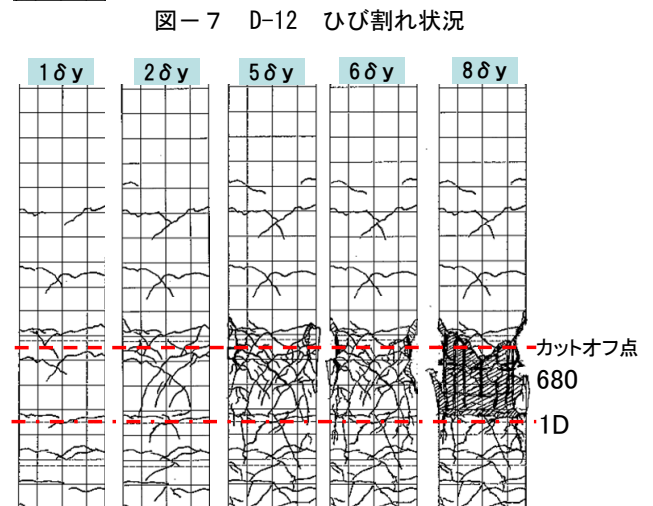
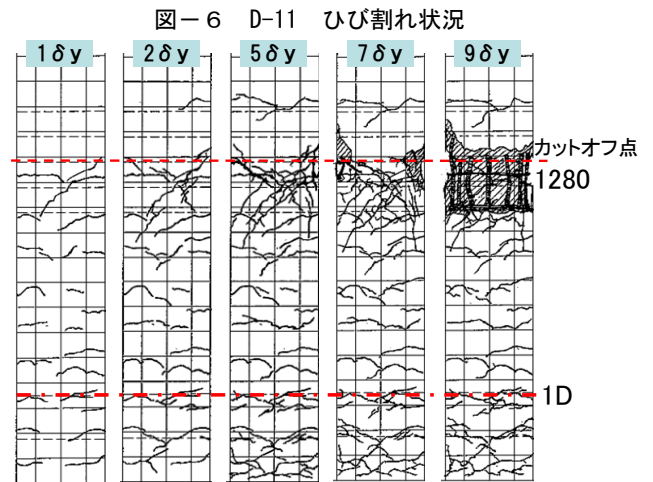
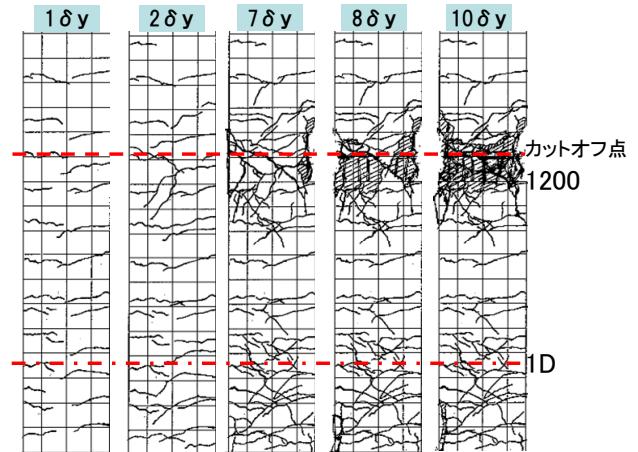


図-8 D-21 ひび割れ状況

値を上回った。

図-5に、各試験体の荷重ステップピーク時正負平均の荷重と変位の包絡線を示す。設定した耐力に差はあるが、最大荷重後の勾配に着目すると、D-13、21の低下勾配がD-11、12よりやや大きい。D-13は、カットオフ点が高い位置にあり、カットオフ後に塑性ヒンジが生じるとせん断スパンが最も短くなるためではないかと推測された。D-21の考察は次のひび割れ状況で述べる。

図-6~8に、D-11、12、21の荷重方向に並行な橋脚面のひび割れ状況を示す。

D-11は、基部で降伏した後、 $7\delta y$ で段落し部が圧壊するまで、ひび割れは基部周辺と段落し部の2箇所集中して発生した。圧壊後は段落し部のかぶりが剥落し、損傷が集中、曲げ破壊した。

唯一段落し部で降伏し、曲げ破壊したD-12は、段落し部のひび割れが、降伏時から実験終了まで顕著で、弾落し部で圧壊した後は圧壊した位置から折れ曲がるように変形した。なお、D-13は基部で降伏し、段落し部で曲げ破壊したが、D-11よりもD-12に近いひび割れ発生状況であった。

D-21は、D-11と同様、基部と段落し部にひび割れが集中したが、損傷が進行につれ基部と段落し部のひび割れが重なるように伸展する状況が確認できた。D-21のPuが計算値をやや下回った点や、Pu後の低下勾配がやや大きくなったのは、この損傷状況の影響が推察される。

写真-2に、圧壊時、剥落時、剥落伸展時（圧壊後剥落時の次の荷重ステップ）における各試験体の損傷状況を示す。剥落時と剥落伸展時の右に示した数値は、剥落範囲の正負平均値である。同じく写真の下の上段には、剥落範囲の長さをmm単位で表記し、()内に主鉄筋径で除した数値を示した。写真の下の下段には、カットオフ点~剥落範囲下端までの長さをmm単位で表記し、()内に主鉄筋径で除した数値を示した。

剥落時の剥落範囲は、 $15\sim 21\phi$ 、剥落下端はカットオフ点 $-6\sim 13.5\phi$ となり、最大値と最小値で $6\sim 7\phi$ の開きがあった。段落し部の引張鉄筋比が小さいD-12、13の剥落範囲は 15ϕ 、 16.5ϕ となり、引張鉄筋比の大きいD-11、21の 21ϕ 、 19.6ϕ と比べ小さくなった。

剥落伸展時では、剥落範囲が $16.5\sim 25\phi$ 、剥落下端はカットオフ点 $-8\sim 18.8\phi$ と、最大値と最小値の開きは 10ϕ 程度に拡大した。傾向としては、剥落時と同様に引張鉄筋比の大きなD-11、21の剥落範囲が大きくなった。また、D-21の剥落下端はカットオフ点 -18.8ϕ と最もカットオフ点から下がった位置となり、段落し部の損傷が基部へ近づくように拡大し、基部の損傷と複合して生じたものと推察された。

3.2 軸方向鉄筋のひずみ分布

破壊性状において、圧壊後の剥落範囲に特色が見られたことから、降伏時と圧壊直前における軸方向鉄筋のひずみ分布に着目した。図-9~12は各試験体の軸方向鉄筋ひずみ分布であるが、青がカットオフ鉄筋、赤が連続鉄筋を示している。また、横の太線はカットオフ点、縦の点線が降伏ひずみ、一点鎖線がひずみ硬化開始点を表し、連続鉄筋のひずみ硬化開始点に達した範囲を網掛

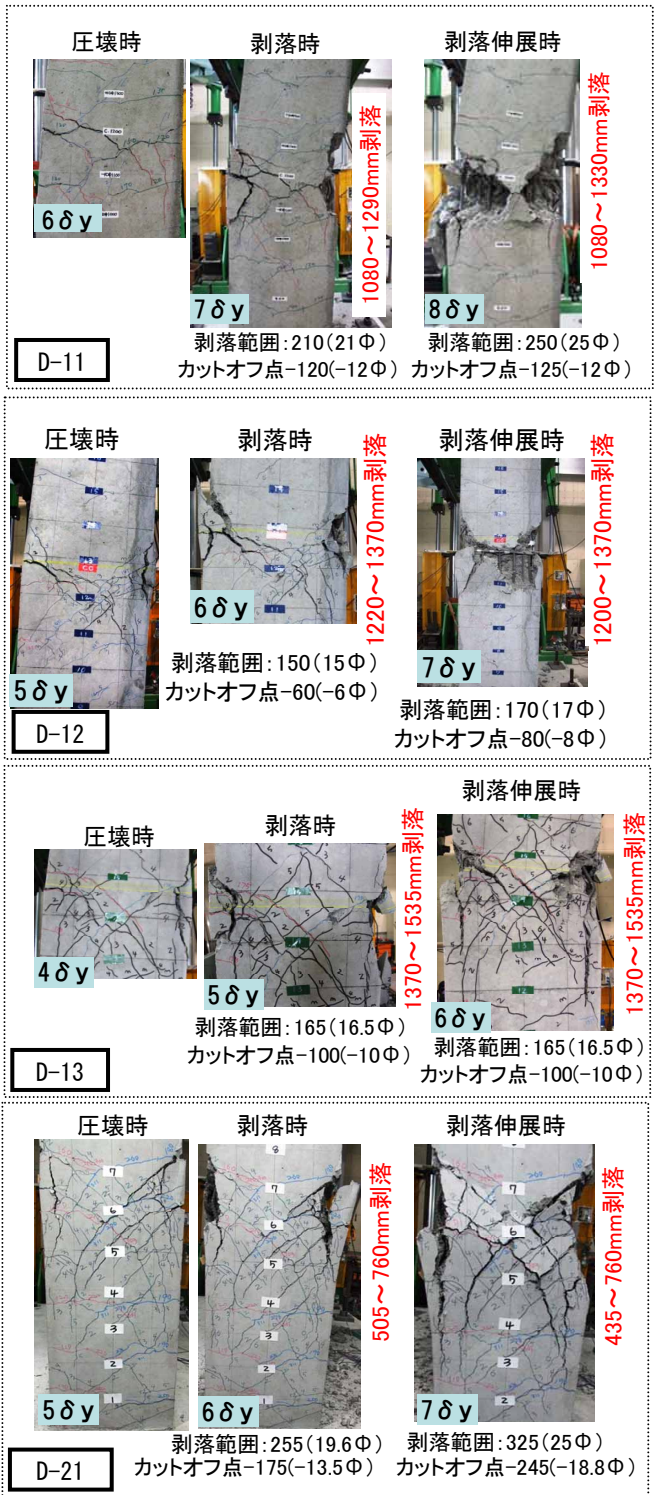


写真-2 損傷状況

けた。軸方向鉄筋の降伏ひずみとひずみ硬化開始点は、事前に実施した引張試験結果に基づいている。

ひずみゲージは、損傷の集中が予測されるカットオフ点の周辺と基部～1D間に配置し、連続鉄筋とカットオフ鉄筋のひずみの乖離状況や全体的なひずみ分布状況の把握を目的とし、決定した。

降伏時の連続鉄筋とカットオフ鉄筋のひずみ（図-9～12の左側の列）から、D-11, 12, 13は、正確な位置は特定できないがカットオフ点から20φ以上下がった位置で一致する可能性が伺える。これに対しD-21は、基部～カットオフ点までひずみの一致する点が見当たらず、基部～カットオフ点にかけて連続鉄筋とカットオフ鉄筋の乖離が予測された。

次に、圧壊直前の軸方向鉄筋ひずみがひずみ硬化開始点に達した範囲と、圧壊時に剥落した範囲を比較すると、概ね重なっていることが分かる。（図-9～12の右側の列）しかし、D-11, 12, 13は、基部付近でもひずみ硬化開始点に達しており、この範囲は剥落範囲とは一致しない。

3.3 数値解析

軸方向鉄筋ひずみ分布の、より詳細な検討を行うため、模型試験体の数値解析を実施した。

解析には、コンクリートを離散的に扱う解析手法の一つである2次元剛体バネモデルを用いた。RC橋脚試験体の解析モデルを図-3に示す。剛体バネモデルは、コンクリートを剛体要素と仮定し、隣接する要素間のバネに材料の非線形特性をモデル化することにより、ひび割れのような材料の不連続現象を比較的容易に表現できることが特徴である。鉄筋は、はり要素を用いて離散的に扱い、はり要素の節点において付着バネ要素を介してコンクリート剛体要素と接合される。コンクリート、鉄筋、および鉄筋とコンクリート間の付着に関する材料モデルの詳細は、文献³⁾を参照されたい。

解析より得られた荷重-変位関係、軸方向鉄筋のひずみ分布、ひび割れ性状の再現性については既報¹⁾において確認されており、今回の試験体D-11, 12, 13, 21においても概ね実験結果とよく対応した。図-13に、D-13の荷重-変位関係およびひび割れ性状を代表として示す。解析は鉄筋座屈を考慮していないため、6δyを過ぎても荷重低下を示していないが、降伏荷重および変位はよく対応している。またひび割れ性状より、段落し位置での損傷をよく表していることが確認できる。

図-14に、降伏時と圧壊直前におけるD-13の軸方向鉄筋ひずみ分布を代表して示す。降伏時の連続鉄筋とカットオフ鉄筋のひずみ一致高さは、カットオフ点-38φとなった。この高さは、実験ではひずみ計測点ではないが、実験での測定点から推測される想定値（カットオ

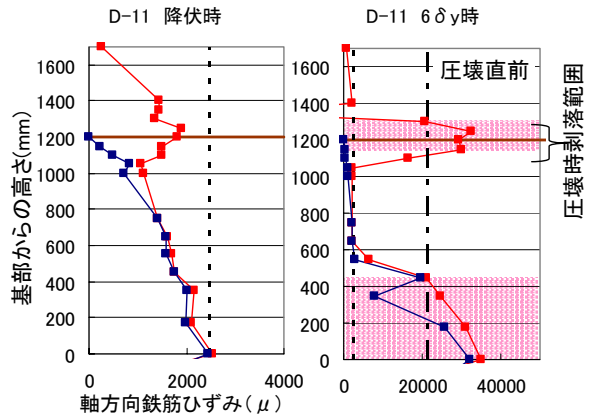


図-9 ひずみ分布 (D-11)

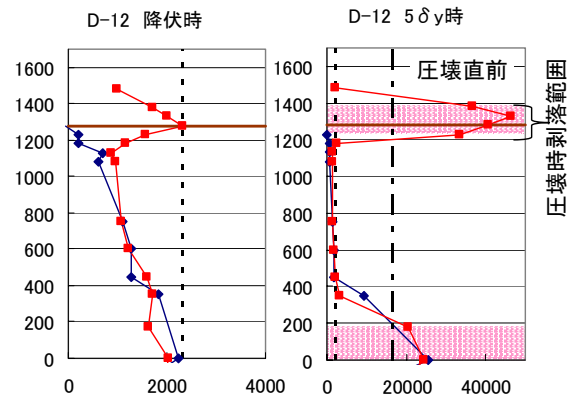


図-10 ひずみ分布 (D-12)

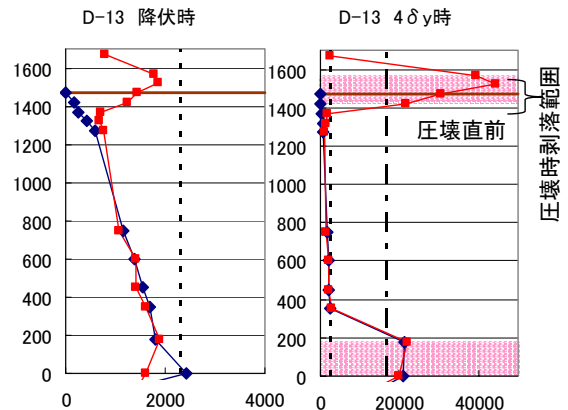


図-11 ひずみ分布 (D-13)

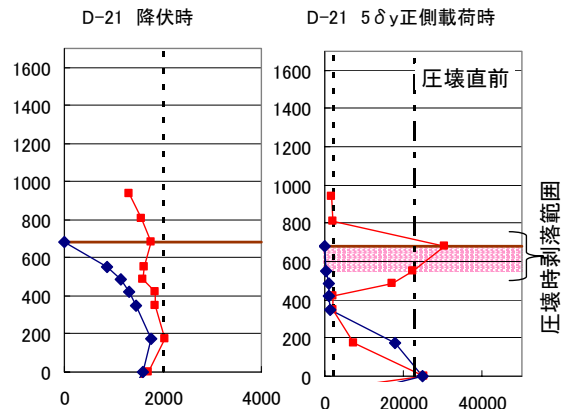


図-12 ひずみ分布 (D-21)

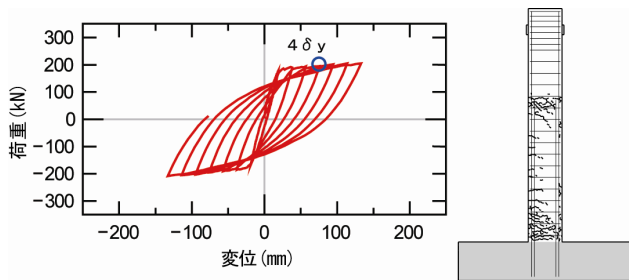


図-1 3 荷重-変位関係およびひび割れ性状 (D-13)

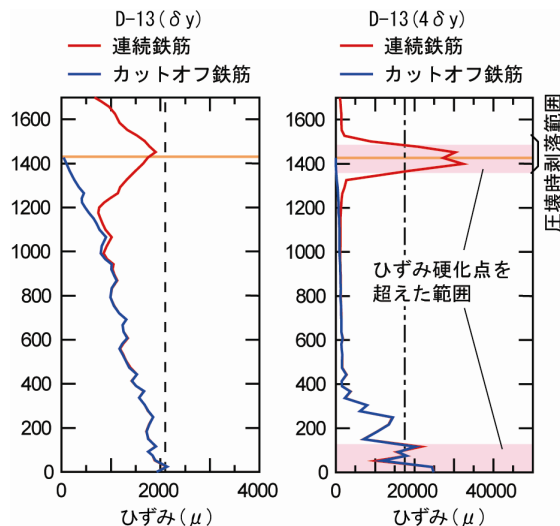


図-1 4 数値解析によるひずみ分布 (D-13)

フ点から 20φ 以上下がった位置で一致) や、他の測定点の実測値と解析値が概ね一致することから、精度良く再現できているものと考えられる。

同様に、他の試験体の降伏時における連続鉄筋とカットオフ鉄筋のひずみ一致高さを解析から求めたところ、カットオフ点から、D-11 で-35φ、D-12 で-38φ、D-21 では一致点が無かった。

D-21 は、降伏時には、カットオフ鉄筋と連続鉄筋ひずみが基部〜カットオフ点まで乖離し、カットオフ鉄筋の付着力低下の兆候と見られることから、1D より上の定着長 25φ は、十分な定着長ではないと想定される。基部と段落し部の損傷が重なり合わずに段落し部で曲げ破壊した他の試験体では、降伏時の連続鉄筋とカットオフ鉄筋のひずみ一致点がカットオフ点-38〜-35φ と近似しており、これは 1D より上の必要定着長に対応するものと考えられる。

4. まとめ

カットオフ鉄筋定着長、引張鉄筋比、曲げ性能比をパラメータとした RC 橋脚模型試験体の、交番荷重実験と数値解析から得られた、段落し部の曲げ損傷メカニズムに関する知見は以下のとおりである。

(1) 降伏時の曲げ性能比を 1.04~1.09 程度とした試験体

D-11, 12, 13, 21 は、段落し部で曲げ破壊した。

- (2) 降伏時の曲げ性能比を 1.05 程度とした D-12 は、最初に降伏した位置が段落し部になり、1.04 程度の D-13 では基部となった。また、圧壊後の耐力低下勾配は 1.05 程度の D-13 がやや大きくなった。これは、D-13 の定着位置が高いことによる影響が推察されるが、今後更なる検討が必要である。
- (3) 圧壊後のコンクリート剥落範囲は、段落し部の引張鉄筋比の小さい D-12, D-13 は小さく、引張鉄筋比の大きい D-11, D-21 は大きくなった。
- (4) カットオフ鉄筋の定着長を 25φ とした D-21 の段落し部損傷状況は、段落し部の損傷が基部の損傷と重なり合うようになり、カットオフ点より下の剥落範囲が基部へ向けて拡大するような傾向が見られた。
- (5) 試験体 D-11, 12, 13, 21 の圧壊後の剥落範囲は、圧壊直前の連続鉄筋ひずみ分布におけるひずみ硬化開始点を越えた範囲と、破壊位置(段落し部)では概ね一致した。但し、剥落の生じなかった基部でもひずみ硬化開始点を越えた範囲が見られた。
- (6) 2次元剛体バネモデルによる数値解析より得られた降伏時のひずみ分布より、1D より上の定着長が 25φ の D-21 は、降伏時の連続鉄筋とカットオフ鉄筋のひずみ一致点が無く、カットオフ鉄筋の付着力低下の兆候と考えられた。D-11, 12, 13 ではカットオフ点-35φ~-38φ にひずみの一致する点が確認されており、これは 1D より上の必要定着長に対応するものと考えられる。

参考文献

- 1) 小林寿子, 齊藤成彦, 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研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.19-24, 2010.
- 2) 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.
- 3) 和田映二, 齊藤成彦, 檜貝勇: RC 部材中の鉄筋の損傷状態に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.895-900, 2006
- 4) 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