

論文 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

小林 寿子^{*1}・斉藤 成彦^{*2}・太田 浩一郎^{*3}・小林 薫^{*4}

要旨：段落しを有する曲げせん断耐力比の高い RC 橋脚を対象として、模型試験体の交番載荷実験と、数値解析による繰返し載荷解析を行い、曲げ損傷メカニズムに関する基礎的検討を行った。載荷実験の結果より、試験体の破壊形態は、橋脚基部で先行降伏し、破壊箇所は基部で破壊したものと段落し部で破壊したものに分かれたが、それぞれの破壊に至る状況・ひび割れ状況の特徴・ひずみ分布を示し、相違点を示した。また、数値解析結果は、最大荷重時の荷重－変位関係や、ひび割れ性状、ひずみ分布が実験結果をよく再現することを示した。

キーワード：RC 橋脚、段落し、カットオフ鉄筋、数値解析、交番載荷試験

1. はじめに

通常の RC 橋脚において地震時の水平力による曲げモーメントは、基部が最大の三角形分布になるため、不要な鉄筋を中間部で減らす段落し部を設けている。しかしながら、写真－1のように、地震により段落し部でかぶりコンクリートが剥落し、曲げ損傷を受ける事例が発生している。現状の設計では基本的には段落し部を設定しない方向にある。しかし、河川などの橋脚では、復旧には河川の仮締切や施工時期の制約等も考えられるため、段落し部に曲げ損傷を誘導することで復旧の合理化を期待し、段落し部の損傷メカニズムについて詳細に把握していきたいと考えている。

段落し部を有する RC 橋脚については、川島ら¹⁾、佐々木ら²⁾、山本ら³⁾、石橋ら⁴⁾によって、既存橋脚の段落し部の照査法や、せん断破壊が生じる橋脚の破壊性状、じん性率やせん断耐力に及ぼす影響等について詳細に検討され、貴重な知見が得られている。

本研究では、既往の研究対象よりも曲げせん断耐力比の高い RC 橋脚を対象とし、曲げ破壊モードとなる橋脚段落し部の損傷メカニズムについて、模型試験体の交番載荷実験と、数値解析による繰返し載荷解析による、基礎的な検討を試みた。

2. RC橋脚模型の交番載荷試験

2.1 模型試験体

実験に用いた RC 橋脚模型の試験体概要を図－1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、断面寸法を約 1/3～1/4 スケールの縮尺模型とした。使用材料は表－2のとおりである。

試験体はいずれも主鉄筋の段落し部を有し、柱基部の



写真－1 鉄道 RC 橋脚の段落し部損傷事例

主鉄筋本数の約 65%をカットオフ点で途中定着し、残りの約 35%の鉄筋（以下、連続鉄筋）は試験体天端まで伸ばしている。曲げせん断耐力比は、既往の鉄道構造物設計基準⁵⁾に準拠し、曲げ破壊モードになるよう 2.0 を上回るように設定した。

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十分な定着長を想定し、60Φ以上とした。また、曲げ性能比は、基部が曲げ耐力に達したとき、段落し部の曲げ耐力(M_u 段)をカットオフ点に発生するモーメント (M_x 段)で除した値とした。図－2に示す曲げ耐力分布は、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が、定着長が正確に分からないため、ここでは、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、曲げ性能比が 1.0 に近いもの(D-11)と、耐力に若干余裕のあるもの(D-9)の 2 体を設定した。

2.2 載荷方法

実験は、軸力を作用させた状態で、図－1のように正負交番載荷した。

*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主席 （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 山梨大学 医学工学総合教育部 （正会員）

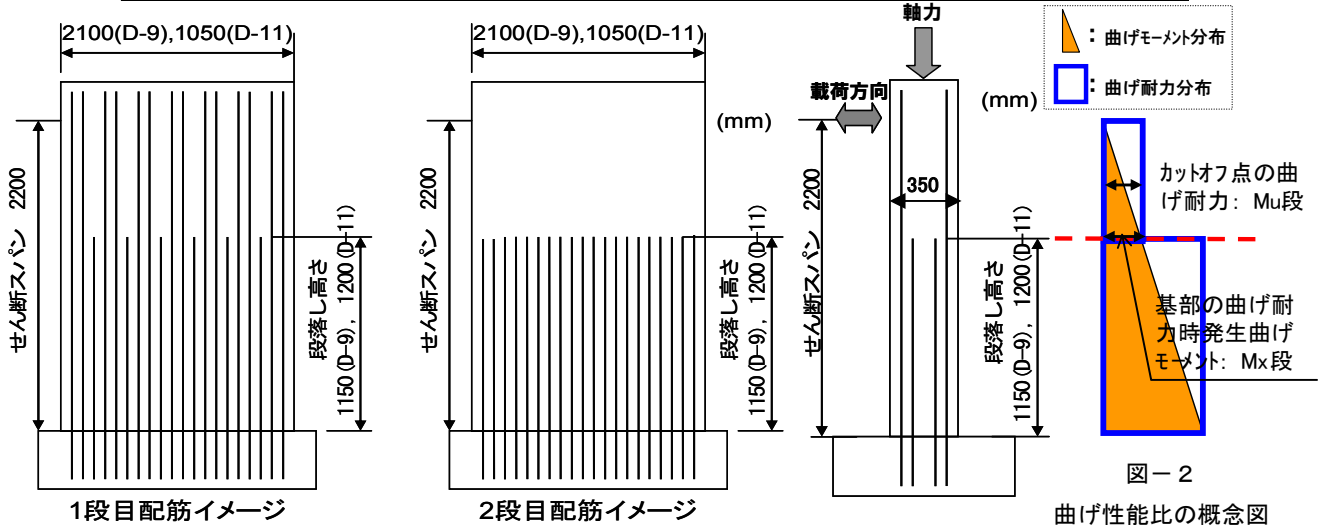
*4 東日本旅客鉄道（株） JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所課長 博士(工学) （正会員）

表－１ 試験体諸元

試験体 番号	1D (mm)	せん断ス パン比a/d	せん断ス パンa(mm)	段落し高 さ(mm)	1Dより上の 定着長(Φ)	主鉄筋配置		主鉄筋比 (基部)Pt	帯鉄筋比 Pw	曲げせん断耐力比Vyd/Vmu		曲げ性能比 Mu段/Mx段
						段落し部	基部			段落し部	基部	
D-9	350	7.0	2200	1150	61.5	D13×14本	D13×20本×2段	0.0069	0.0022	2.86	3.60	1.14
D-11	350	7.0	2200	1200	85.0	D10×16本	D10×22本×2段	0.0085	0.0020	2.37	2.89	1.06

表－２ 使用材料諸元

試験体 番号	主鉄筋		主鉄筋降伏 応力(MPa)	帯鉄筋		帯鉄筋降伏 応力(MPa)	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)
D-9	SD345	D13	371	SD345	D6	404	20.2	32.1
D-11	SD345	D10	390	SD345	D6	404	26.9	31.7



図－１ 試験体概要

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. 試験結果

3.1 損傷状況

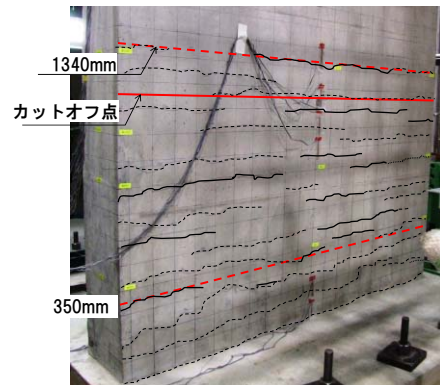
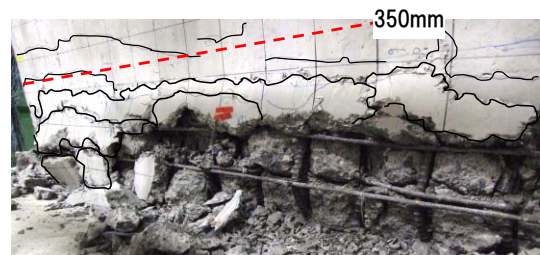
各試験体の損傷状況を以下に示す。

(1) D-9 の損傷状況

D-9 は、基部で曲げひび割れが生じた後、基部から 350mm の高さまで、約 100～150mm 間隔で曲げひび割れが生じた。その後は上方に向けて曲げひび割れが増加していき、1340mm の高さに曲げひび割れが入ると、連続鉄筋の基部が降伏ひずみに達した。

2 δy では、ひび割れの伸展と曲げひび割れの中間に新たな曲げひび割れが発生する状況が見られ、0 から 1340mm の間に約 100～150mm 間隔で曲げひび割れが広がった。写真－３に、2 δy ピーク時の損傷状況を示す。目安として示した直線は、350mm (1D)、カットオフ点 (1150mm) と 1340mm の高さである。なお、本節では、降伏までに生じたひび割れを破線、2 δy 載荷時に生じたひび割れを実線で示す。

4 δy 以降は、基部・175mm (D/2)・カットオフ点のひ

写真－３ 損傷状況 (D-9 2 δy ピーク時)写真－４ 損傷状況 (D-9 10 δy ピーク時)写真－５ 損傷状況 (D-9 14 δy ピーク時)

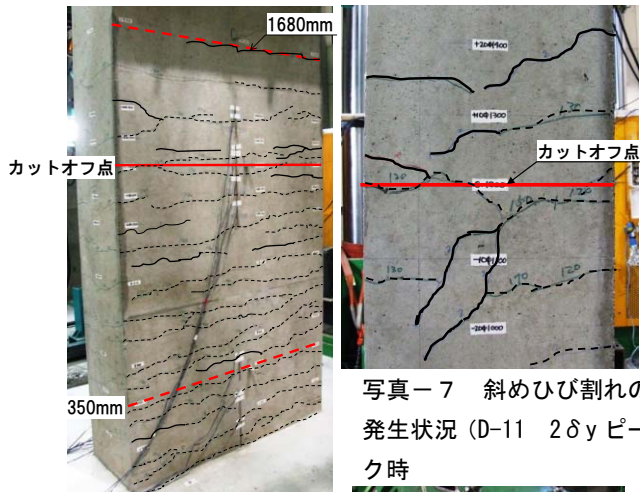


写真-6 損傷状況
(D-11 2δy ピーク時)

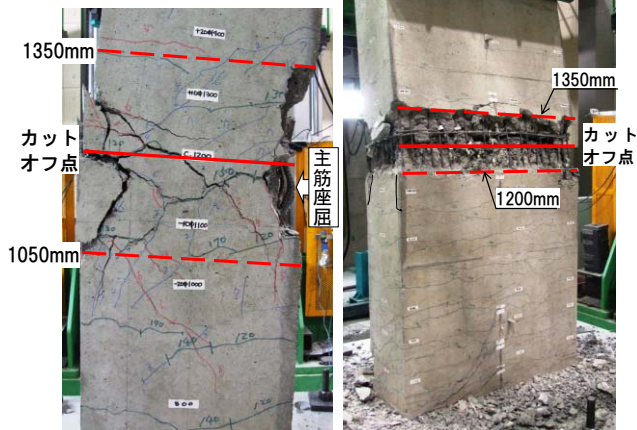


写真-8 損傷状況
(D-11 7δy ピーク時)

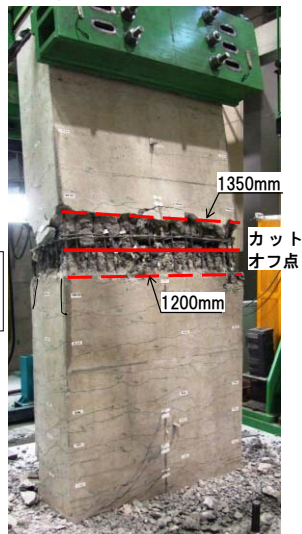


写真-9 損傷状況
(D-11 実験終了時)

び割れが開き、7δyで基部の圧壊が見られたが、再びカットオフ点のひび割れが大きく開き、8δyでは基部から300mmの間の曲げひび割れが顕著になった。

9δyでは175mm(D/2)の高さの曲げひび割れから基部にかけて、主鉄筋のはらみ出しによりかぶりコンクリートが浮き上がり、10δyで剥落が生じた。(写真-4)

14δyで350mmの高さまでかぶりが押し出され(写真-5)、16δyで基部の鉄筋が座屈して破断し、実験を終了した。

(2) D-11の損傷状況

D-11は、基部で曲げひび割れが生じた後、基部から350mmの間と、カットオフ点(1200mm)に曲げひび割れが生じ、その後1540mmの高さまで全体的に曲げひび割れが増加していき、カットオフ鉄筋の基部が降伏ひずみに達した。

写真-6に、2δyピーク時の損傷状況を示す。1680mmの高さに新たに曲げひび割れが発生したほか、荷重方向と並行な面にはカットオフ点から斜め下に伸びるひび割

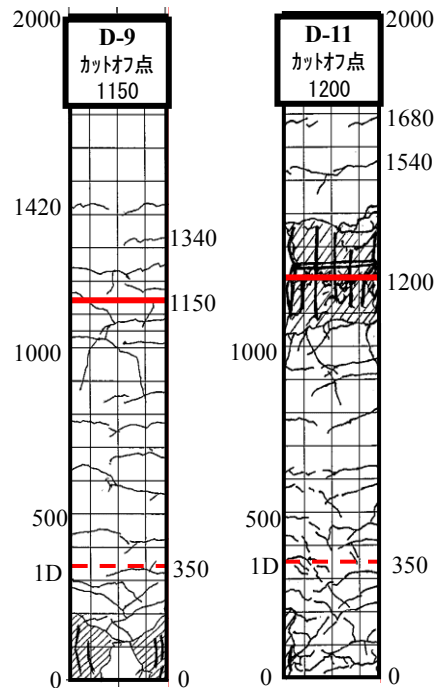


図-3 実験終了時の破壊状況

れが発生した。(写真-7)

3～5δyでは、カットオフ点と基部から200mmの高さまでのひび割れが開くようになり、6δyではカットオフ点を中心に上下100mm(1100～1300mm)の高さで圧壊が生じた。7δyで1000mmから1350mmが一気にはらみ出してかぶりの浮きと剥落が生じ、座屈した主鉄筋が表出した。(写真-8)

8δyからカットオフ点において、主鉄筋のはらみ出しと剥落が進展して部材が折れ曲がるように変形し、10δyでカットオフ点の主鉄筋が座屈して破断したため、実験を終了した。(写真-9)

(3) 実験終了時の破壊状況

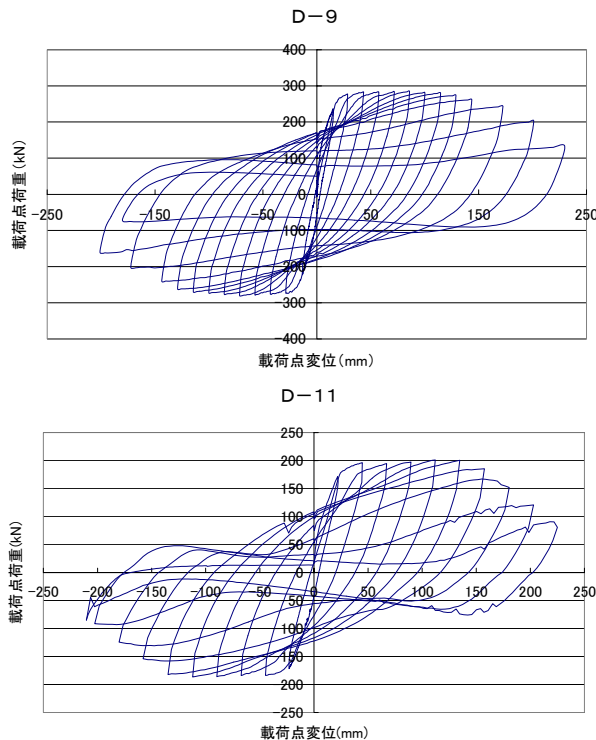
図-3に、実験終了時の、荷重方向と並行な面のひびわれと損傷の状況を示す。縦横の直線は、縦方向は中心から100mm間隔で、横方向は基部から上方に100mm間隔となっており、斜線は剥落範囲を、剥落範囲内の太い線は表出した鉄筋を示している。

両試験体とも基部で降伏し、0から1Dの間とカットオフ点に斜めひび割れが生じているが、D-9は基部で破壊し、D-11はカットオフ点で破壊している。

実験終了時のカットオフ点よりも上の曲げひび割れに着目すると、D-9は1340mmの高さにひび割れが生じて降伏した後、1420mmの高さに6δyでひび割れが生じているが、D-11は1540mmの高さにひび割れが生じて降伏した後、2δyで1680mmの高さにひび割れが生じており、D-11のほうが高い位置で生じている。

3.2 荷重-変位関係

D-9とD-11の荷重点荷重と荷重点変位の関係を図-4



図－４ 荷重－変位関係

(1) D-9 の荷重－変位関係

D-9 は、基部に損傷が集中し始めた $8\delta y$ まで荷重は横ばいで推移し、基部のはらみ出し後徐々に荷重が低下した。基部のかぶりコンクリートが剥落した $10\delta y$ でループは紡錘型からスリップ型へと移行するような履歴を呈し、 $12\delta y$ で降伏荷重を下回り、 $16\delta y$ で主鉄筋が破断するまでループは痩せるような履歴にはならなかった。

(2) D-11 の荷重－変位関係

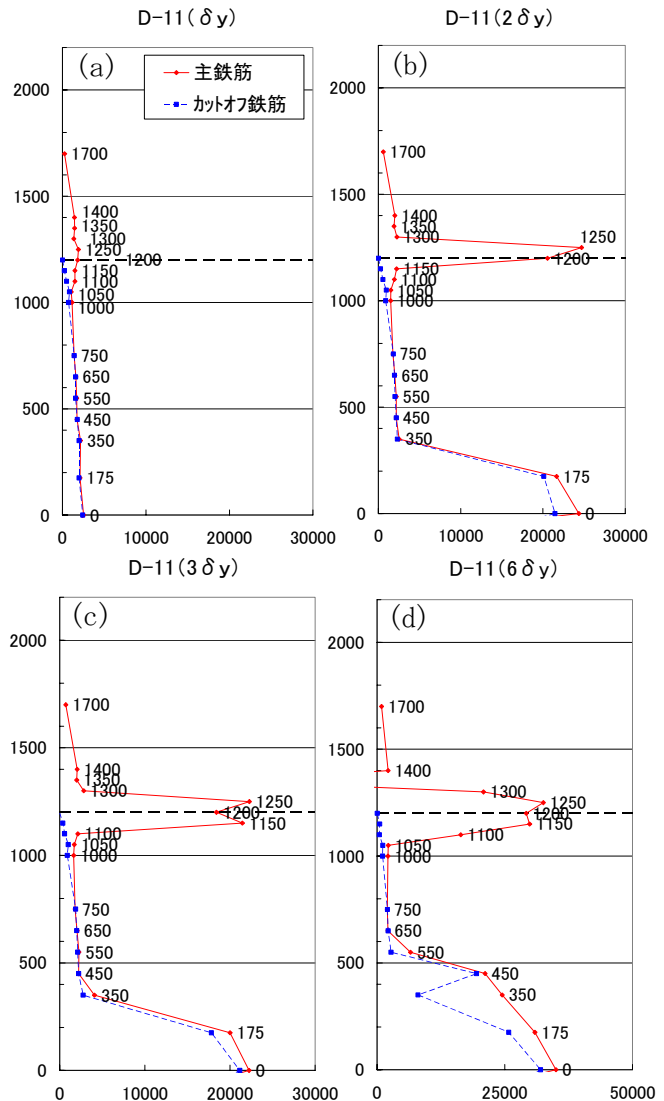
D-11 は、カットオフ点の圧壊が開始した $6\delta y$ 以降荷重が徐々に低下し、 $7\delta y$ でカットオフ点を中心としたかぶりコンクリートの剥落が生じて荷重低下が顕著になり、ループは紡錘型からスリップ型へ移行し、 $9\delta y$ からは、スリップ型からループが痩せるような形状へと変化した。

3.3 ひずみ分布

図－５の(a)～(d)に、D-11 の主な荷重ステップのひずみ分布を示す。横軸はひずみ(μ)、縦軸とグラフの中に示した数値は基部からの高さ、点線はカットオフ高さを示した。

(a)の δy 時において連続鉄筋の基部がカットオフ点 (1200mm) にやや先行して降伏し、(b)の $2\delta y$ 時に連続鉄筋のカットオフ点ひずみが基部を上回っていることが確認できる。(c)と(d)を見ると、カットオフ鉄筋のカットオフ点と 1150mm のひずみは、(a)の δy 以降ひずみが増えていない。

このことから、実験終了時の破壊状況で述べた D-11



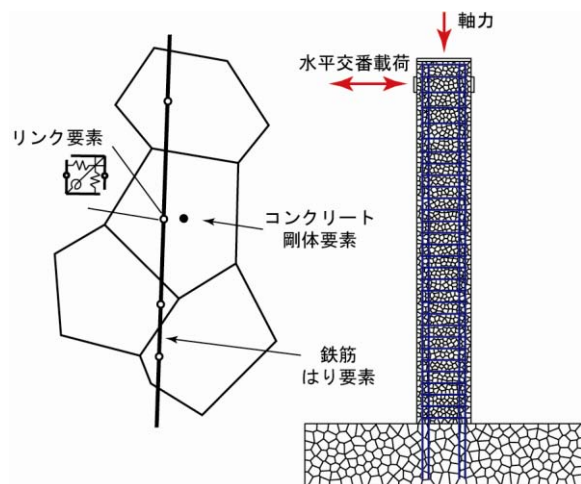
図－５ 各荷重ステップピーク時のひずみ分布

の高い位置でのひび割れは、カットオフ点での付着力の低下に伴い発生したのではないかと考え、荷重途中のひずみを確認したところ、降伏荷重に達する前のカットオフ点のひび割れ発生時を境に、カットオフ点と 1150mm のひずみが小さくなっていることが判明した。降伏前に 1540mm の高さにひび割れが発生し、 $2\delta y$ では 1680mm の高さにも発生した。 1540mm と 1680mm のひび割れは、カットオフ点での付着力の低下に起因し、カットオフ点より上方で曲げ変形しようとして発生したものと考えられる。

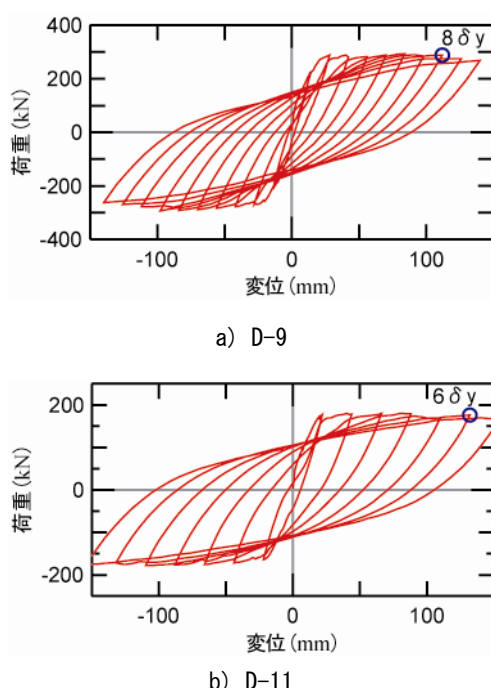
また、荷重ステップの進行に伴い、上方にかけてひずみが増加していることから、カットオフ鉄筋の付着低下範囲が拡大し、ひずみの大きな位置が上方へ移行したのではないかと想定される。

4. 数値解析

段落しを有する RC 橋脚の損傷メカニズムをより詳細



図－6 RC 橋脚試験体の解析モデル

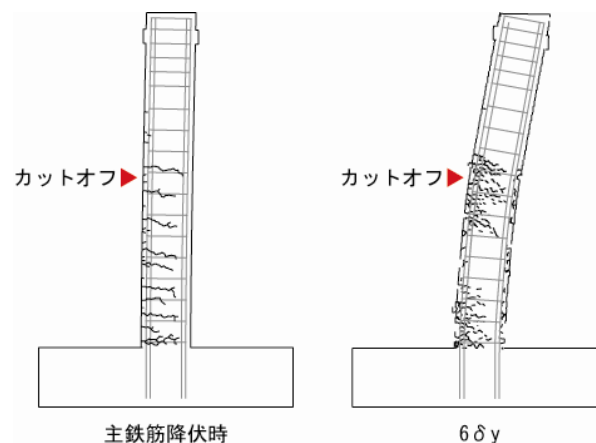


図－7 荷重－変位関係（解析結果）

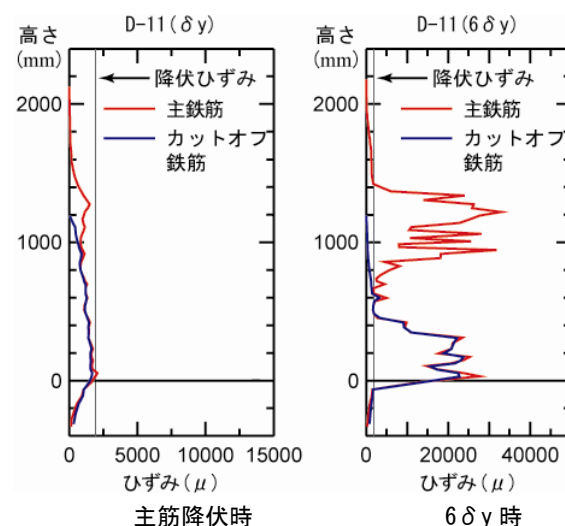
に検討を行うため、模型試験体の数値解析を実施した。

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－6 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⁹⁾を参照されたい。

図－7 に、解析より得られた荷重－変位関係を示す。両試験体ともに、解析結果より得られた降伏荷重および



図－8 ひび割れ性状（解析結果）



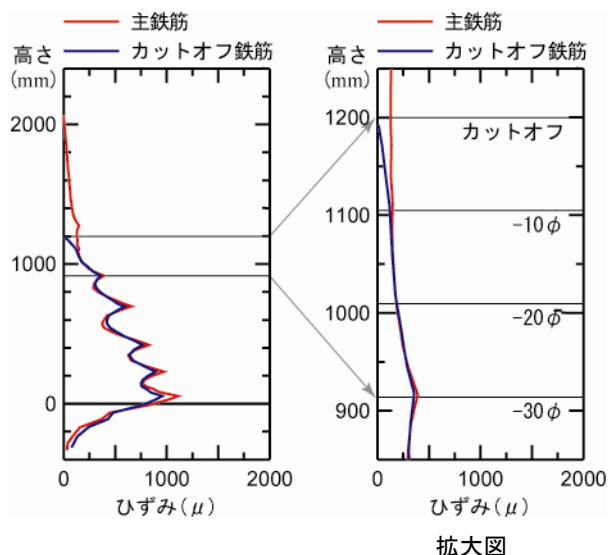
図－9 D-11 のひずみ分布（解析結果）

最大荷重は、実験結果（図－4）とよく対応している。解析は、鉄筋の座屈および低サイクル疲労破断を考慮していないため、実験結果に見られる最大荷重以降の履歴挙動の変化を再現できていないが、最大荷重時の変位（D-9 は $8\delta y$ 、D-11 は $6\delta y$ ）はほぼ対応している。

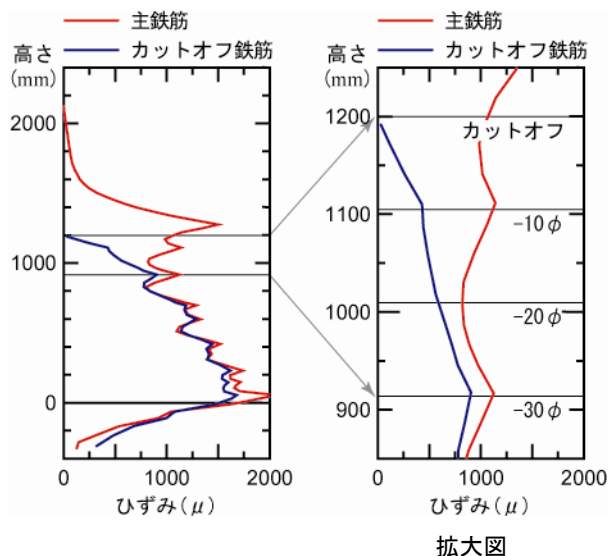
図－8 に、解析より得られた D-11 のひび割れ性状を示す。解析結果は、曲げひび割れの分布をよく再現できており、最大荷重時（ $6\delta y$ ）では、基部とカットオフ点に損傷が集中していることが確認できる。

図－9 に、解析より得られた D-11 の鉄筋ひずみ分布を示す。解析結果は、実験結果（図－5）を精度良く再現できており、基部で降伏した後、付着劣化によりカットオフ点でカットオフ鉄筋のひずみが減少し、カットオフ点での曲げ破壊に移行していることが確認できる。なお、D-9 についても、解析結果は実験結果を精度良く再現できている。

カットオフ点付近でのカットオフ鉄筋の定着状況を



図－１０ カットオフ点にひび割れ発生前のひずみ分布 (D-11 の解析結果)



図－１１ 主筋降伏時のひずみ分布 (D-11 の解析結果)

確認するため、カットオフ点でのひび割れ発生前、および主鉄筋降伏時 (δy) のひずみ分布を図－１０および図－１１に示す。カットオフ点でひび割れが発生する前は、鉄筋ひずみは基部で最も大きく、カットオフ鉄筋と主鉄筋のひずみはほぼ対応している。カットオフ点付近を拡大してみると、カットオフ点から 10ϕ 下がったあたりで両鉄筋のひずみは一致している。

δy 時には、カットオフ点付近にも曲げひび割れが発生しているため、カットオフ点付近の主鉄筋のひずみが増大している。カットオフ点付近の主鉄筋およびカットオフ鉄筋のひずみを比較すると、カットオフ点より 30ϕ から 40ϕ 離れた位置で両鉄筋のひずみは一致しており、これはひび割れの発生する引張部における鉄筋の必要定

着長に対応するものと考えられる。

剛体バネモデルを用いた数値解析は、段落しを有する RC 橋脚の曲げ破壊挙動を比較的精度良く再現することができ、カットオフ鉄筋の定着性状など、段落し部の損傷メカニズムの解明に有用な情報が得られることが確認された。

5. まとめ

曲げせん断耐力比の高い、カットオフ鉄筋の定着長と曲げ性能比をパラメータとした RC 橋脚模型試験体の、交番載荷実験と数値解析から得られた、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) 載荷実験より、基部で降伏し基部で破壊するケース (D-9) と、基部で降伏しカットオフ点で破壊するケース (D-11) の 2 つの破壊形態を得た。
- (2) 曲げ性能比の小さい D-11 では、高い位置まで曲げひび割れが発生した。これは、カットオフ鉄筋の付着力低下により、カットオフ点より上で曲げ変形が進行したためとひずみ分布から推察された。
- (3) 2 次元剛体バネモデルによる数値解析より得られた荷重-変位関係、ひび割れ性状、ひずみ分布は、実験結果とほぼ対応することが示された。
- (4) 解析より得られたひずみ分布より、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 、 δy 時にはカットオフ点- $30\sim 40\phi$ 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。これは、引張部における鉄筋の定着長に対応するものと考えられる。

参考文献

- 1) 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, pp.83-95, 1995.10
- 2) 佐々木智大, 川島一彦: 主鉄筋段落し部を有する RC 橋脚のファイバー要素解析, 土木学会地震工学論文集, pp.981-988, 2007.8
- 3) 山本強, 石橋忠良, 大坪正行, 小林普爾: 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, pp.61-70, 1984.8
- 4) 石橋忠良, 大坪正行, 栗原啓之: 橋脚における鉄筋の途中定着部の設計, 構造物設計資料, No.73, pp.7-14, 1983.3
- 5) 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.
- 6) 和田映二, 斉藤成彦, 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.