

鉄筋の途中定着を有するRC橋脚の曲げ損傷に関する基礎研究



小林 寿子*



小林 薫**



清水 満**

RC橋脚では、橋脚く体中間部で軸方向鉄筋量を低減する段落し部を設ける場合がある。橋脚段落し部は、一部の軸方向鉄筋の長さを短くし、橋脚く体途中まで配置とすることで実現している。長さを短くした鉄筋は、引張応力となるコンクリートに定着され、付着劣化を起こすので、地震時の損傷が発生しやすい。本研究では、鉄筋の途中定着を有し、曲げ損傷が卓越する諸元の試験体で交番載荷試験を実施した。その結果、4つの損傷モードを明らかにした。交番載荷試験結果を整理し、鉄筋のカットオフ点での曲げ耐力に対する性能比と橋脚の断面高さ (D) から上のカットオフ鉄筋定着長から、鉄筋の途中定着を有するRC橋脚の曲げ損傷モードの判定法の提案を行った。

●キーワード：カットオフ点、RC 橋脚、曲げ損傷、交番載荷実験

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段落し部を設けるケースがある。このような橋脚では、大地震時にかぶりコンクリートが剥落する損傷形態となる場合がある（写真1）。RC橋脚では、基部で損傷するのが一般的であるが、河川内や橋脚く体の根入れが深い場合、地震時の復旧を考えると、仮設設備が膨大となり費用の増加や工期の長大化も想定される（図1）。

復旧しやすい個所に損傷の誘導が可能であれば、（図2）RC橋脚構造において、建設条件に応じて、復旧性をも加味したより合理的な耐震設計が可能になると考えられる。

本検討では、曲げせん断耐力比の比較的高いRC橋脚試験体による静的正負交番載荷実験を行い、軸方向鉄筋が先行して降伏する位置、破壊位置に基づき、損傷モードの検討を実施した。本報告では、損傷モードごとの損傷状況と、損傷モードの分類について報告する。なお、損傷モードの分類は、1D（D：断面高さ）区間より上のカットオフ鉄筋の定着長と曲げ性能比（カットオフ点における連続鉄筋のみで計算される曲げ耐力との基部が曲げ耐力となる時のカットオフ点に発生する曲げモーメントの比）で整理した。

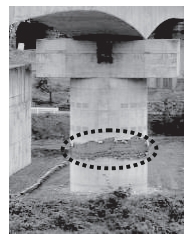


写真1 段落し部の損傷事例

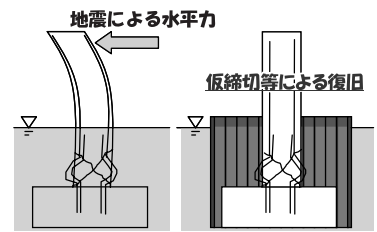


図1 基部損傷時の復旧

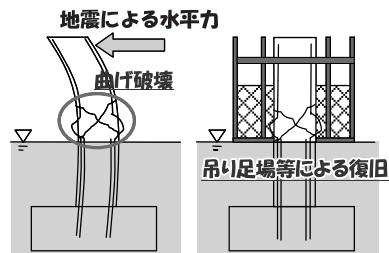


図2 橋脚中間部損傷時の復旧例

2. 実験概要

試験体の配筋および概要を図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、断面寸法は約1/3～1/5程度なるようにした。試験体には、試験体く体途中で軸方向鉄筋量を変化させている。試験体に設定したパラメータは、軸方向鉄筋量の変化点となるカットオフ位置における作用曲げモーメントと連続鉄筋のみで計算される曲げに対する断面性能（曲げ降伏耐力、あるいは曲げ耐力）との比率で（以下「曲げ降伏時の曲げ性能比、曲げ耐力時の曲げ性能比」という）（図3右側参照）、試験体基部から断面高さ位置（以下「1D位置」という）を基準

とし、1D位置からカットオフ点までの鉄筋長と鉄筋径との比率（以下「1Dより上の定着長」という）、試験体基部およびカットオフ点より上部の曲げせん断耐力比（以下「耐力比」という）である。1Dより上の定着長は、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、既往の実験などで明らかにされている。カットオフ鉄筋では、基部の損傷範囲以外の長さが定着となると考え、1Dより上の定着長をパラメータとして考慮することにした。

引張鉄筋の途中定着部では、カットオフ鉄筋の付着劣化が生じることから、現行設計基準¹⁾では、カットオフ点から基本鉄筋定着長分下がった位置を「段落し」と定義している。鉄筋の途中定着部において、繰り返し応力を受ける場合、鉄筋の付着劣化長を正確に把握することはむずかしい。そのため、カットオフ点を基準に、試験体のパラメータを設定することにした。

試験体のカットオフ点の位置は、せん断スパンの1/3.2~1/1.5の範囲である。このとき、カットオフ点での曲げ降伏時の曲げ性能比は、0.96~1.18となっている。試験体の曲げせん断耐力比は、カットオフ点より下で2.3~2.8、カットオフ点から上で1.8~2.6で、既往の研究^{2) 3)}を参考に、せん断損傷を卓越しないようにした。

交番載荷実験は、試験体基部で載荷方向最外縁の主鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の載荷位置の水平変位を降伏変位 δy と定義し、降伏変位の整数倍の水平変位 $n \times \delta y$ ($n=1,2,3 \dots 10$ 以降は、 $12,14,16\delta y$)で順次変位振幅を増加させながら載荷した。

3. 交番載荷実験結果の概要

3.1 損傷モードの分類

交番載荷実験により、軸方向鉄筋が降伏した位置と、損傷が過大となり耐荷性能を喪失したと考えられる位置によ

表1 試験体諸元表

試験体	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 Vyd/Vmu		曲げ性能比 Myc/Mxyc	曲げ性能比 Muc/Mxuc	帯鉄筋間隔(mm)	軸力(MPa)
			続かぶり	段落し部	基部			段落し部	基部				
D-9	1150	80	31mm	d13×14本	d13×20本×2段	0.0024	0.0069	2.6	3.3	1.18	1.14	75	0.7
D-11	1200	85	30mm	d10×16本	d10×22本×2段	0.0031	0.0085	2.1	2.6	1.09	1.06	150	0.5
D-12	1280	93	30mm	d10×10本	d10×18本×2段	0.0019	0.0070	2.3	2.8	1.05	1.04	150	0.6
D-13	1470	112	30mm	d10×10本	d10×24本×2段	0.0019	0.0093	1.8	2.3	1.04	1.05	120	0.6
D-15	1240	89	30mm	d10×15本	d10×21本×2段	0.0029	0.0082	2.0	2.6	1.15	1.13	150	0.6
D-18	680	21	32mm	d16×30本	d16×35本×2段	0.0029	0.0082	1.8	2.6	1.11	1.08	80	0.6
D-19	1090	74	30mm	d10×30本	d10×38本×2段	0.0029	0.0074	2.2	2.6	1.06	1.00	120	0.6
D-20	1170	82	30mm	d10×27本	d10×38本×2段	0.0026	0.0074	2.2	2.6	1.06	1.00	120	0.6
D-21	680	25	29mm	d13×26本	d13×33本×2段	0.0046	0.0071	2.2	2.4	1.06	1.04	120	0.6
D-23	1000	65	30mm	d10×19本	d10×25本×2段	0.0037	0.0097	2.4	2.5	0.96	0.93	120	0.7

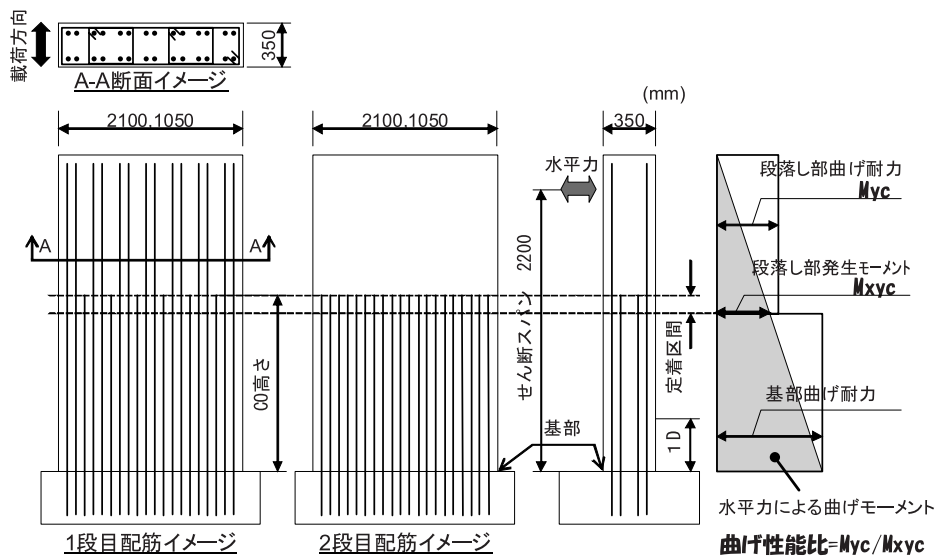


図3 試験体の概要

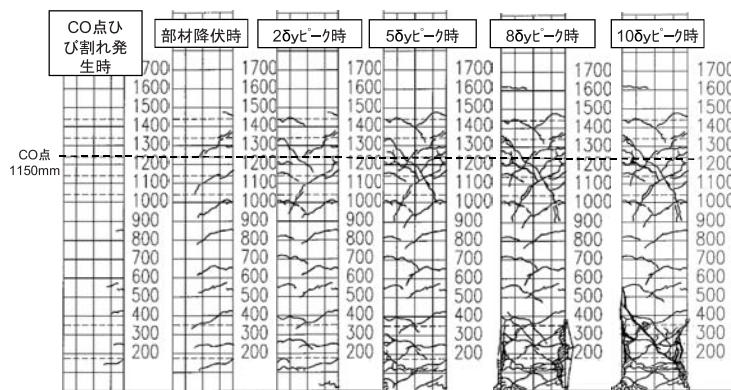


図4 D-15試験体の損傷状態



写真2 D-15実験終了の状況

て、損傷モードを分類した。以下に、損傷モードごとに、交番載荷実験時の損傷過程を述べる。

(1) 損傷モード①：基部降伏、基部破壊

試験体D-15は、基部で軸方向鉄筋が降伏し、基部で破壊した試験体である。この破壊モードは、柱などの実験でよくみられる破壊モードである。図4に、試験体D-15の主な載荷ステップにおけるひび割れ状況を示す。

D-15は、カットオフ点において、降伏時の曲げ性能比が1.15

とした試験体である。コンクリート面のひび割れは、試験体の基部から順次発生し、カットオフ点より上にも軸方向鉄筋径の20倍程度の高さまで発生した。軸方向鉄筋は、基部で降伏しずみに達した。

2 δ_y 以降、最大荷重となる6 δ_y までは、カットオフ点と基部でひび割れ幅が拡大するのが観察された。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、6 δ_y の最大水平変位時に計測したひび割れ幅は、カットオフ点で約3.0mm、試験体基部で約2.5mmであった。

7 δ_y 載荷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約40倍程度であった。8 δ_y の載荷で、基部に圧壊が生じ水平荷重の低下が著しくなった。写真2に、実験終了時の試験体状況を示す。

(2) 損傷モード②: 基部降伏、カットオフ点付近曲げ破壊

試験体D-19は、基部で軸方向鉄筋が降伏し、破壊がカットオフ点付近に生じた試験体である。図5に、試験体D-19の主な載荷ステップにおけるひび割れ状況を示す。

D-19は、カットオフ点において、降伏時の曲げ性能比が1.06とし試験体である。5 δ_y の載荷では、カットオフ点近傍にひび割れの発生が集中するようすが顕著に認められるようになり、圧壊の発生も確認された。このとき、カットオフ点から軸方向鉄筋径の約5倍程度下がった範囲でかぶりコンクリートの浮きが発生していた。7 δ_y の載荷で、カットオフ点近傍に圧壊が進行し、9 δ_y の載荷時にかぶりコンクリートの剥落が顕著となり、軸方向鉄筋が露出した。写真3に、D-19試験体の実験終了後の状況を示す。

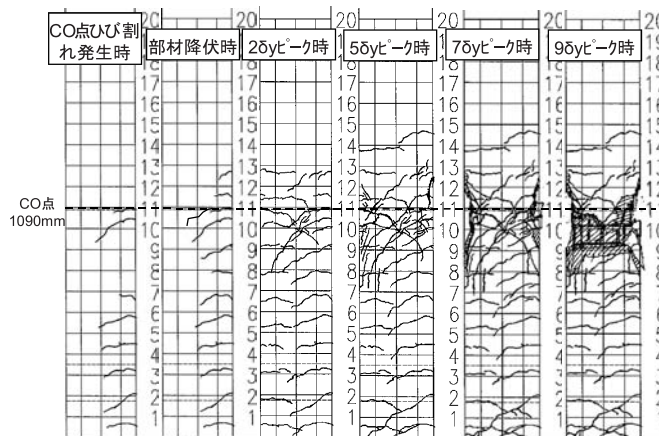


図5 D-19試験体の損傷状況



写真3 D-19実験終了後の状況

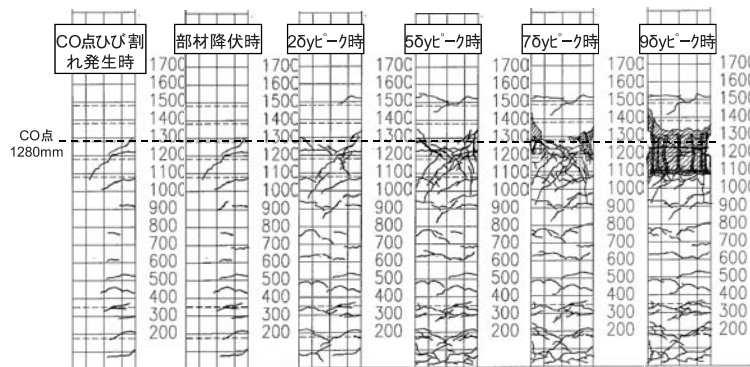


図6 D-12試験体の損傷状況



写真4 D-12実験終了後の状況

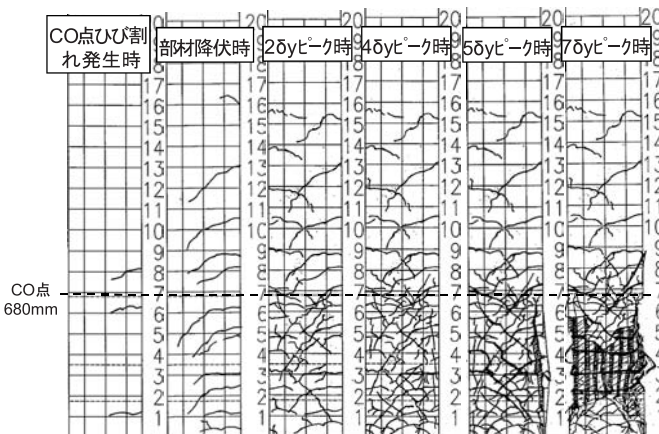


図7 D-18試験体の損傷状況



写真5 D-18実験終了後の状況

(3) 損傷モード③: カットオフ点付近降伏、カットオフ点付近破壊

試験体D-12は、カットオフ点付近で軸方向鉄筋が降伏し、カットオフ点付近で破壊した試験体である。図6に、D-12試験体の主な載荷ステップでのひび割れ状況を示す。

D-12試験体のカットオフ点での曲げ降伏耐力に対する曲げ性能比は1.05である。D-12試験体では、5 δ_y の載荷でカット

オフ点から軸方向鉄筋径の約3倍下がったところから、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 の载荷において、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を剥落させた。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。写真4に、D-12試験体の実験終了後の状況を示す。

(4) 損傷モード④：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する場合

D-18試験体は、1Dから上の定着長を軸方向鉄筋径の21倍とした場合である。図7に、D-18試験体の主な载荷ステップでのひび割れ状況を示す。

D-18試験体は、基部で軸方向鉄筋が降伏した。降伏時のひび割れ幅は基部が最大であったが、2 δy の载荷では、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 δy の载荷では、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ものと思われる。

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定着不良が発生した複合的な損傷形態と考えられる。写真5に、D-18試験体の実験終了後の状況を示す。

3.2 軸方向鉄筋のひずみ分布

交番载荷実験結果において、基部で先行降伏し、基部で破壊したD-15試験体、基部で先行降伏したあと、カットオフ点付近に損傷が移行し、カットオフ点付近で破壊したD-19試験体の軸方向鉄筋のひずみ発生状況について述べる。

図8に、D-15試験体の主な载荷ステップにおける、連続鉄筋とカットオフ鉄筋のひずみ分布を示す。7 δy までの载荷での

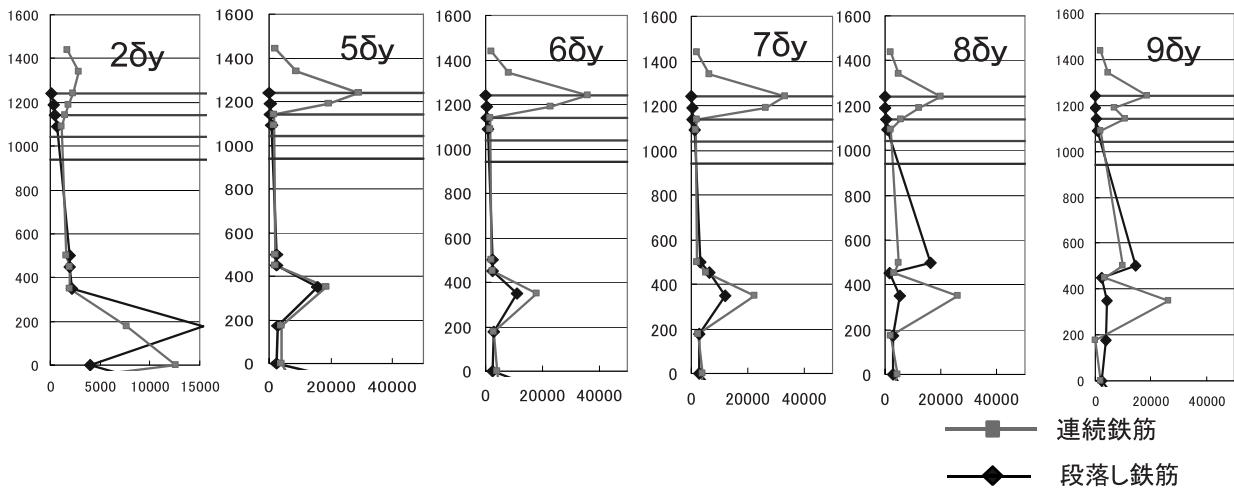


図8 D-15試験体の軸方向鉄筋ひずみ分布の推移

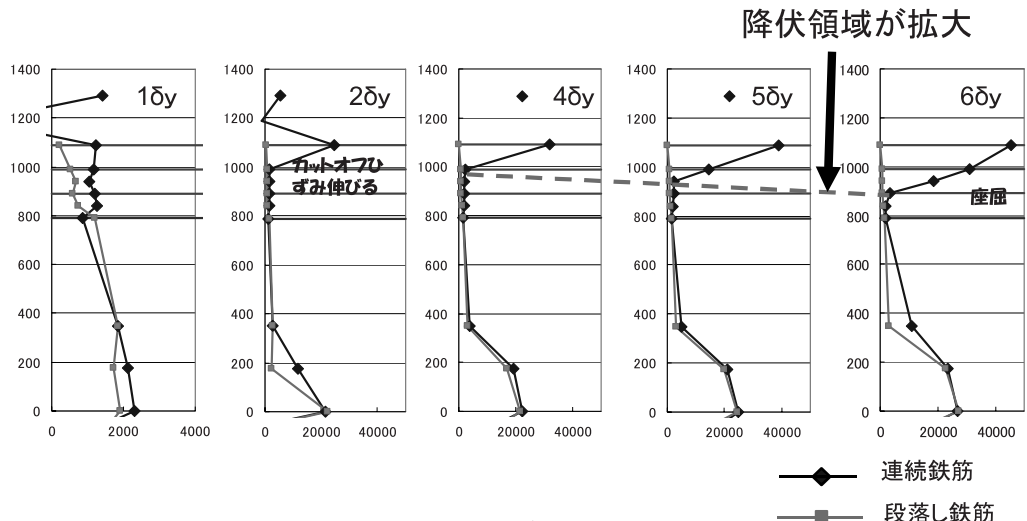


図9 D-19試験体の軸方向鉄筋ひずみ分布の推移

軸方向鉄筋のひずみは、カットオフ点の方が基部近傍より、若干大きく推移している。8 δy の荷重時から基部付近の鉄筋ひずみがカットオフ点より大きくなり、9 δy 時に基部で鉄筋のはらみだしが発生している。D-15試験体では、カットオフ点付近で連続鉄筋は降伏するものの、荷重ステップが進行しても鉄筋ひずみの増加はそれほど大きくなかった。

図9に、基部で先行降伏し、カットオフ点付近で破壊したD-19試験体のひずみ分布を示す。D-19は、2 δy から4 δy の荷重ステップにおいて、基部の鉄筋降伏領域の拡大が見られる。4 δy 以降の荷重ステップから、カットオフ点付近の連続鉄筋のひずみが基部より大きくなった。6 δy で、カットオフ点付近で連続鉄筋がはらみだした。D-19試験体では、カットオフ点付近で連続鉄筋が降伏し、荷重ステップの進行に伴って、カットオフ点付近の鉄筋ひずみの増加が累積していく傾向を示した。

4. 基部で先行降伏し、カットオフ点付近に損傷が移行するメカニズムの検討

試験体D-19は、基部で降伏し、カットオフ点付近に損傷が移行して破壊した。試験体D-13も試験体D-19と同様な損傷形態となった。降伏位置から、損傷がカットオフ点に移行した損傷メカニズムについて、鉄筋のひずみ分布から検討を行った。鉄筋の発生ひずみの推移から、損傷が移行したメカニズムとしては、以下のように考えることができる。

- ①初期荷重段階で、基部の鉄筋降伏領域が拡大する。
- ②基部の鉄筋降伏領域の拡大により、試験体く体が発生

する曲げモーメント分布が図10のように変化すると考えられる。

- ③図10のように、発生曲げモーメント分布が変化しカットオフ点付近の発生曲げモーメントが大きくなり、かつ、カットオフ鉄筋の付着劣化領域が拡大する。カットオフ点付近の連続鉄筋の降伏範囲の拡大と鉄筋の発生ひずみが基部より卓越するようになる。

- ④カットオフ点付近で鉄筋がはらみだし、かぶりコンクリートを剥落させ、カットオフ点付近の損傷が進行し、破壊にいたる。

基部の鉄筋降伏領域の拡大に伴い、発生曲げモーメントがシフトするが、実験結果から、カットオフ点における曲げ耐力時の曲げ性能比が1.05~1.15未満となる場合は、損傷が移行し、カットオフ点付近が曲げ破壊した。

5. 破壊部位の判定法の検討

交番荷重実験結果から、鉄筋途中定着部を有するRC橋脚の破壊部位の判定法の検討を行う。

交番荷重実験に用いた試験体は、カットオフ点位置をせん断スパンの1/3.2~1/1.5の範囲、曲げ降伏時のカットオフ点での曲げ性能比は0.96~1.20、試験体の曲げせん断耐力比はカットオフ点より下で2.3~2.8、カットオフ点から上で1.8~2.6の範囲で、せん断損傷が卓越しない諸元となっている。

このような試験体諸元を前提とすると、試験体の破壊部位を決定づける最も有力なパラメータは、1Dから上のカットオフ

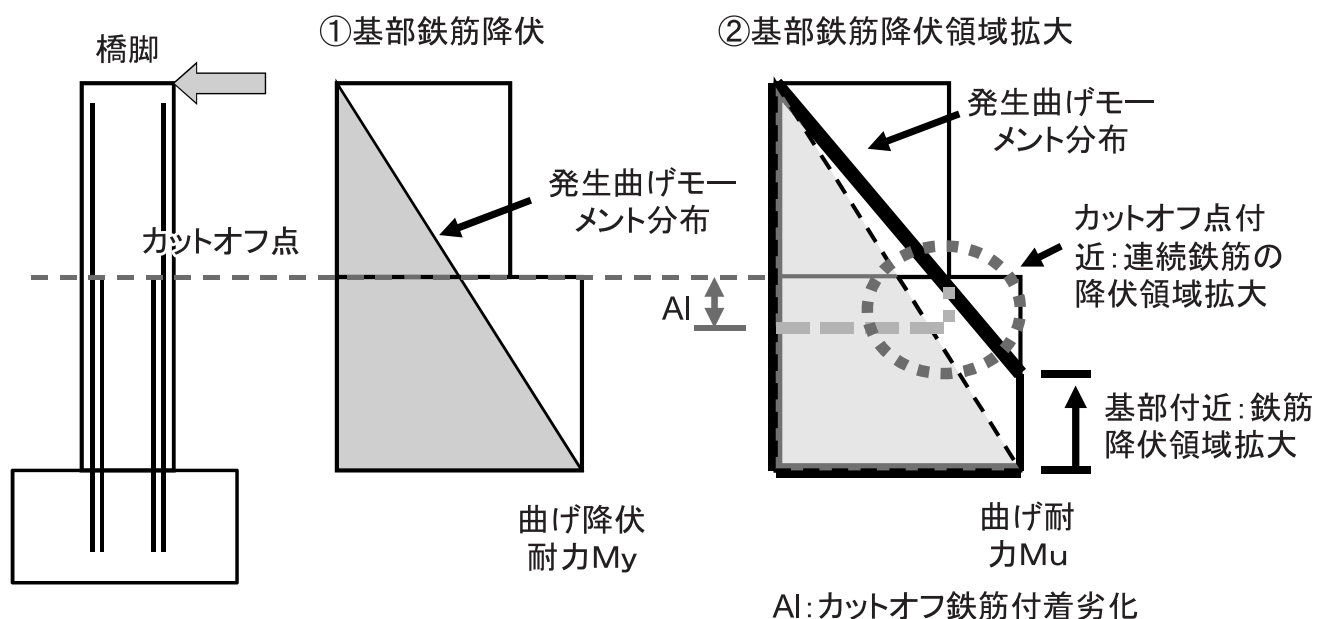
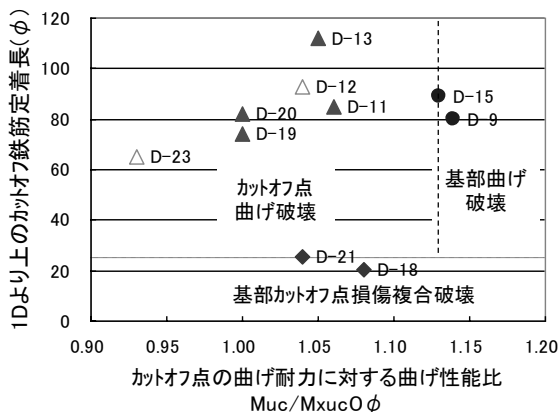


図10 基降落伏後、カットオフ点付近への損傷移行メカニズム



- ・基部曲げ破壊: $Muc / Mxuc0 \phi > 1.13$ かつ 1Dより上に 25 φ以上の定着長
- ・カットオフ点曲げ破壊: $Muc / Mxuc0 \phi < 1.13$ かつ 1Dより上に 25 φ以上の定着長
- ・カットオフ点損傷複合破壊: 1Dより上の定着長が 25 φ未満

凡例 損傷モード①: ● 損傷モード②: ▲ 損傷モード③: △ 損傷モード④: ◆

図11 鉄筋途中定着を有するRC橋脚の曲げ損傷部位の分類図

鉄筋の定着長、カットオフ点の曲げ耐力に対する曲げ性能比と考えられる。図11に、損傷部位の検討結果を示す。図11は、X軸にカットオフ点での曲げ耐力に対する曲げ性能比、Y軸に1D区間より上部のカットオフ鉄筋の定着長で示したものである。図12から、曲げ損傷が卓越する鉄筋途中定着を有するRC橋脚の破壊部位を概ね判定できると考えられる。

6. 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) カットオフ点での曲げ耐力に対する曲げ性能比が1.13以上とした試験体は、基部で先行降伏、基部で曲げ破壊となった。
- (2) カットオフ点での曲げ耐力に対する曲げ性能比を1.0程度未満とした試験体は、基部で先行降伏した後、カットオフ点付近に損傷が移行しカットオフ点付近で曲げ破壊となった。
- (3) 基部で鉄筋が先行降伏し、カットオフ点に損傷が移行した理由は、基部で鉄筋降伏領域が拡大したことにより、発生曲げモーメントがシフトし、カットオフ点付近の発生曲げモーメントが大きくなったため損傷が基部からカットオフ点に移行したものと考えられる。

- (4) カットオフ点での曲げ性能比を0.96~1.03未満とした試験体は、カットオフ点で先行降伏、カットオフ点付近で曲げ破壊となった。
- (5) 1Dから上部のカットオフ鉄筋の定着長を25φ以下とした試験体は、基部で先行降伏し、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する損傷形態となった。
- (6) 損傷部位の判定は、実験に用いた試験体諸元の範囲内で、1Dから上部のカットオフ鉄筋の定着長、カットオフ点での曲げ耐力に対する曲げ性能比から概ね判定が可能である。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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
- 3) 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。