

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

佐々木智大¹・川島一彦²

¹学生会員 修（工） 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻
（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 M1-10）

²フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻（同上）

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において、主鉄筋段落しされたRC橋脚は落橋に至る甚大な被害を受けた。我が国で主鉄筋段落し部を有する橋脚の被害が知られ始めたのは1978年宮城県沖地震あたりからであり、1982年浦河沖地震による静内橋の被害を契機に、その重大性が注目されるようになった¹⁾。また、1978年宮城県沖地震の被害を受け、1980年道路橋示方書において主鉄筋の定着長やコンクリートの許容せん断応力の規定の見直しが行なわれた。その後、主鉄筋段落しによる影響やその判定法が多数研究されてきた。

山本らは、軸方向鉄筋を途中定着した橋脚の正負交番載荷を行い、段落しされていない外側鉄筋ひずみは段落し位置で大きくなるのに対し、段落しされた内側鉄筋のひずみは段落し位置付近では小さくなっており、段落し位置より鉄筋径の15～23倍下方で外側鉄筋と同程度のひずみが生じるようになると指摘している³⁾。

このように段落しされた軸方向鉄筋は、その途中定着部で付着切れが発生すると、実際の段落とし位置よりもさらに低い位置までしか応力を負担できなくなる。このため、付着切れが生じた位置から段落とし位置までの間では、軸方向鉄筋が有効に作用するとした場合よりも曲げ耐力が低下するため、より一層、段落し位置で損傷が生じやすくなる。

このため、段落しされた橋脚の耐力を評価する際には、付着切れが生じる領域にある軸方向鉄筋の効果を無視することが多い。しかし、どの程度の範囲まで付着切れが生じるかを実際に検討した例はほとんど無く、根拠のないまま従来は鉄筋の重ね継ぎ手長の規定が準用されてきているのが実情である。

そこで、本検討では、E-Defenseを用いた軸方向鉄筋が段落しされたRC橋脚模型の加震実験結果に基づいて、段落しされた軸方向鉄筋の付着切れが生じる長さについて検討した。

2. 付着切れの定義

段落し部における軸方向鉄筋のひずみ分布の一例を図-1に示す。一般に、外側に配置される軸方向鉄筋は段落としされず、2段配筋では内側の軸方向鉄筋が段落としされる。2.5段あるいは3段配筋される場合には、最初に内側の軸方向鉄筋が段落としされ、次に中央部の軸方向鉄筋が段落としされる。段落しされない軸方向鉄筋は、段落とし部の前後で塑性化が進み、大きなひずみが生じるのに対して、段落しされた鉄筋はある高さからひずみが減少し始め、段落し位置で0になる。これは、段落としされている鉄筋では、鉄筋と周辺コンクリート間に付着切れが生じるためである。

いま、段落としされず連続されている軸方向鉄筋のひずみとその内側にあり段落としされている軸方向鉄筋のひずみの比 r を次式のように定義する。

$$r(x) = \frac{\varepsilon_C(x)}{\varepsilon(x)} \quad (1)$$

ここで、 ε は連続する軸方向鉄筋のひずみ、 ε_C は段落としされた軸方向鉄筋のひずみ、 x は段落とし位置から下向きに取った距離である。以下、 r を軸方向鉄筋ひずみ比と呼ぶ。

図-2は図-1に示したひずみ分布から軸方向鉄筋ひずみ比を求めた結果である。図-2に示すように、付着切れが生じていない領域では軸方向鉄筋ひずみ比はある一定値になるが、段落とし部に近づくにつれて軸方向鉄筋ひずみ比は徐々に大きくなり、付着切れのため段落としされていない軸方向鉄筋が大きく塑性化する領域では軸方向鉄筋ひずみ比はほぼ0に近くなるはずである。

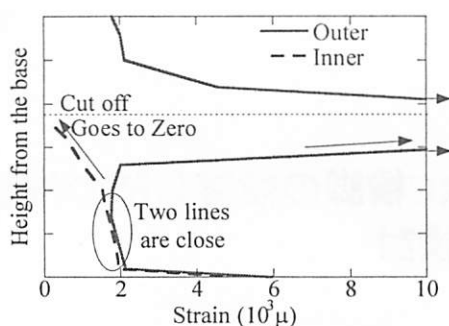


図-1 段落し位置周辺の軸方向鉄筋ひずみ

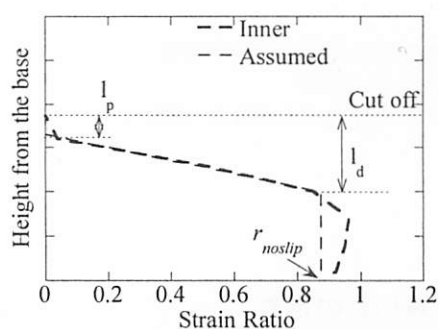


図-2 段落し位置周辺の軸方向鉄筋ひずみ比

ここで、平面保持の仮定が成り立ち、軸方向鉄筋の途中定着部で付着切れが生じていないと仮定すると、軸方向鉄筋ひずみ比 r_{NS} は次のようになるはずである。

$$r_{NS} = \frac{d_C + d_N}{d + d_N} \quad (2)$$

ここで、 d_N は部材軸（図心）から中立軸までの距離、 d は部材軸から段落としされていない軸方向鉄筋までの距離、 d_c は部材軸から段落としされた軸方向鉄筋までの距離である。

付着切れが生じると軸方向鉄筋ひずみは同じ高さ z にある付着切れが生じないとした場合の軸方向鉄筋ひずみよりも小さくなる。このため、式(1)で軸方向鉄筋ひずみ比 r を求めると、その値は式(2)で求めた r_{NG} よりも小さくなるはずである。

以上より，軸方向鉄筋ひずみ比を以下のように仮定する．

$$r(x) = \begin{cases} 0 & (0 < x < l_p) \\ \frac{x-l_p}{l_d-l_p} r_{NS} & (l_p < x < l_d) \\ r_{NS} & (l_d < x) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 x は段落し位置から下向きに取った距離、 l_p は段落としされていない軸方向鉄筋が大きく塑性化する範囲の長さ、 l_d は段落としされた鉄筋で付着切れが生じる長さである。

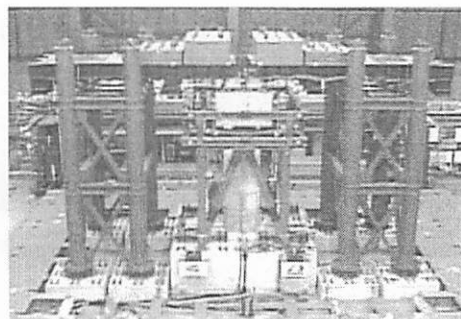


図-3 C1-2実験

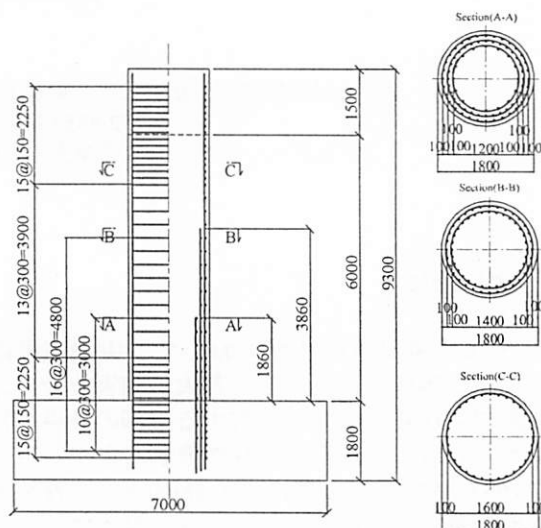


圖-4 C1-2橋脚模型

このように軸方向鉄筋ひずみ比の形状を仮定できれば、付着切れを求めようとする時刻において、軸方向鉄筋ひずみ比の高さ方向の分布を求め、これを式(3)で近似することによって、 l_p および l_d を定めることができる。

3. C1-2実験に対する適用

上記の手法を用いて、C1-2実験（段落しを有する実大RC橋脚模型の加震実験）^{3),4)}に対して、付着切れが生じる長さ l_d を解析する。C1-2実験に関しては、参考文献3)及び4)に詳しいため、ここでは、下記の解析に必要な最小限の事項のみを示す。

図-3はC1-2実験のセットアップ、図-4はC1-2実験に用いられた橋脚模型（以下C1-2橋脚と呼ぶ）を示す。C1-2橋脚は橋脚高さ7.5mで径1.8mの円形断面を有するRC橋脚であり、基部から1.86mおよび3.86mで軸方向鉄筋は途中定着されている。基部から慣性力作用位置までの高さは橋軸方向で8m、橋軸直角方向では9.3mである。また、有効質量は橋軸方向で307ton、橋軸直角方向で215tonとなっており、基部に作用する軸圧縮応力は1.17MPaである。

軸方向鉄筋は基部では 2.5 段配置されており、外側の軸方向鉄筋は段落としされておらず、内側の軸

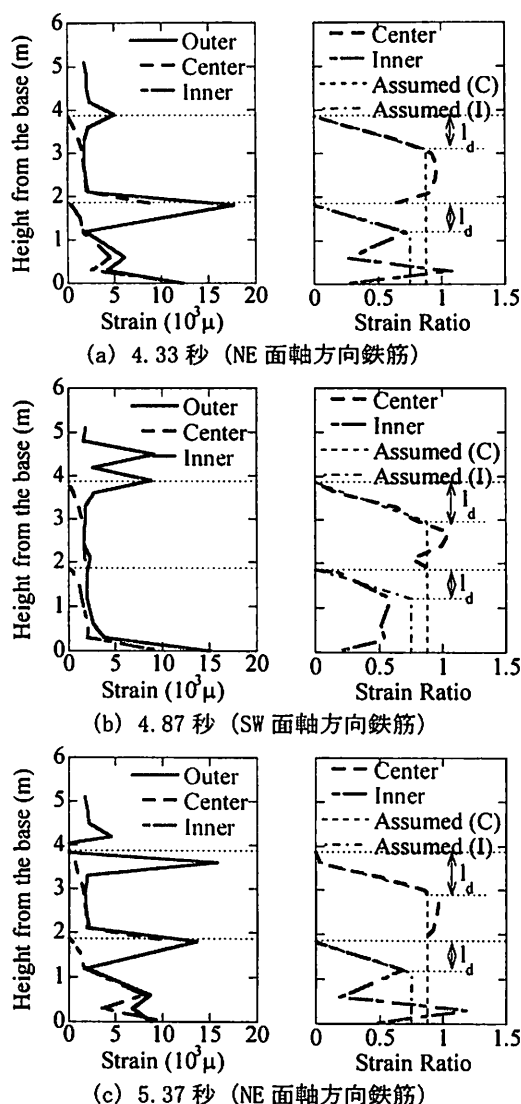


図-5 引張側軸方向鉄筋ひずみ（左：軸方向鉄筋ひずみ，右：軸方向鉄筋ひずみ比）

表-1 外側軸方向鉄筋が大きく塑性化する長さ l_p および 付着切れが生じる長さ l_d

(a) 中間軸方向鉄筋の場合

	時刻 (秒)	l_p	l_d
(a)	4.33	0	770mm=26.6 ϕ
(b)	4.87	0	910mm=31.4 ϕ
(c)	5.37	210mm=7.2 ϕ	890mm=30.7 ϕ
重ね継ぎ手長			440mm=15.2 ϕ

(b) 内側軸方向鉄筋の場合

	時刻 (秒)	l_p	l_d
(a)	4.33	40mm=1.4 ϕ	710mm=24.5 ϕ
(b)	4.87	0	660mm=22.8 ϕ
(c)	5.37	40mm=1.4 ϕ	720mm=24.8 ϕ
重ね継ぎ手長			370mm=12.8 ϕ

方向鉄筋は基部から 1.86m，中間の軸方向鉄筋は基部から 3.86m 位置で，それぞれ段落としされている。

したがって，基部から 1.86m の範囲では 2.5 段（80 本），基部から 1.86m～3.86m の範囲では 2 段（64 本），基部から 3.86m 以上では 1 段（32 本）配筋されている。軸方向鉄筋としてはいずれも 32mm の SD345 が使用されている。また，帯鉄筋には径 13mm の SD345 が 300mm 間隔で配置されている。ただし，基部から 0.95m より下方と 4.85m より上方では，外側の帯鉄筋のみ 150mm 間隔となっている。

軸方向鉄筋の降伏強度，引張強度および弾性係数はそれぞれ 372MPa，557MPa，195GPa であり，帯鉄筋の降伏強度，引張強度および弾性係数はそれぞれ 394MPa，560MPa，190GPa である。また，載荷実験当日に行ったテストピースの圧縮試験の結果得られたコンクリート強度は 30.8 MPa である。

この橋脚は曲げひび割れ発生後せん断ひび割れが進展し，最終的に上部段落し位置で圧縮側コンクリートが圧壊し，軸方向鉄筋が座屈し，せん断圧縮破壊している。

式(2)で r_{NS} を求めるためには，部材軸から中立軸までの距離 d_N が必要であるが，本検討では，簡単のため，部材軸と中立軸が一致すると仮定し， $d_N = 0$ として以下の解析を行う。

図-5は，せん断ひび割れが発生した4.33秒，応答の方向が反転し，別のせん断ひび割れが発生した4.87秒，4.33秒に発生したせん断ひび割れがさらに進展した5.37秒の3時刻における引張側軸方向鉄筋ひずみと式(1)で求めた軸方向鉄筋ひずみ比を求めた結果を示したものである。ここでは，引張り側にある軸方向鉄筋のひずみを解析する必要があることから，4.33秒及び5.37秒ではNE面における軸方向鉄筋のひずみを，また，4.87秒ではNE面とは対称位置にあるSW面の軸方向鉄筋のひずみを，それぞれ用いている。また，式(1)により軸方向鉄筋ひずみ比を求める際には，外側の段落としされていない軸方向鉄筋を基準に，内側の軸方向鉄筋に対して軸方向鉄筋ひずみ比を求めた場合と，中央の軸方向鉄筋に対して軸方向鉄筋ひずみ比を求めた結果の両方の結果を示している。

図-5によると，中央の軸方向鉄筋に対して求めた軸方向鉄筋ひずみ比は式(3)の仮定とよく一致するが，内側の軸方向鉄筋に対して求めた軸方向鉄筋ひずみ比は式(3)の仮定とあまり一致しない。橋脚基部から600mm程度の範囲で軸方向鉄筋に生じるひずみは5,000 μ 以上と大きいために測定されたひずみの信頼性が低下している可能性がある。

表-1に図-4から求められた3時刻における外側軸方向鉄筋が大きく塑性化する長さ l_p と，内側及び中間の軸方向鉄筋の付着切れが生じる長さ l_d を求めた結果である。ここでは，比較のために，土木学会コンクリート標準示方書に示されている重ね継ぎ手長も示している。上部段落し位置における中間軸方向鉄筋の付着切れが生じる長さ l_d は，加震後4.33秒では770mm（=26.6 ϕ ）となったのに対し，5.37秒

では890mm (=30.7φ) と120mm (=4.1φ) 程度長くなっている。これは上部段落し位置における損傷の進展に伴い、 l_d が長くなったことを示している。

これに対し、下部段落し位置における内側軸方向鉄筋の付着切れが生じる長さ l_d は、加震後4.33秒では710mm (=24.5φ) となったのに対し、5.37秒では720mm (=24.8φ) と l_d はほとんど変化していない。上部段落とし位置に比較してほとんど損傷が進展せず、内側軸方向鉄筋周辺に生じるひび割れが中間軸方向鉄筋周辺よりも少なかったためと考えられる。

また、下部段落し位置における付着切れが生じる長さ l_d は上部段落し位置における l_d に比較して、60mm (=2.1φ) ～250mm (=8.6φ) 程度短くなっている。これは、上部段落とし位置の途中定着部からコンクリート表面までは200mmであり、帯鉄筋は2段であるのに対し、下部段落し位置の途中定着部はコンクリート表面から300mmと深く、帯鉄筋も3段と上部段落とし位置よりも帯鉄筋が多いことから、付着切れに伴うひび割れが上部段落とし位置に比較して下部段落とし位置では生じにくいいため、見かけ上付着強度が上がったような状態になり、付着切れが生じる長さが短くなったと考えられる。

なお、付着切れが生じる長さ l_d をコンクリート標準示方書で定義されている重ね継ぎ手長と比較すると l_d は、基部から3.86mで段落としされた中間軸方向鉄筋、基部から1.86mで段落としされた内側軸方向鉄筋ともに重ね継ぎ手長の約2倍となった。

4. まとめ

主鉄筋段落しされた実大RC橋脚模型の加震実験 (C1-2実験) の結果に基づき、段落しされた鉄筋の

付着切れについて検討した。本検討の結果をまとめると以下の通りである。

1) C1-2実験に対し付着切れが生じる長さ l_d を求めると、上部段落とし位置では加震開始後4.33秒では770mm (=26.6φ) となったのに対し、5.37秒では890mm (=30.7φ) と120mm (=4.1φ) 程度長くなっている。このことは損傷の進展に伴い付着切れが生じる長さ l_d は増加することを示している。

2) 下部段落とし位置における付着切れが生じる長さ l_d は、上部段落とし位置に比較して短くなった。下部段落とし位置の途中定着部の方が、上部段落とし位置に比べコンクリート表面から深い位置にあり、帯鉄筋の本数も3段と多かったことから、ひび割れの発生が抑えられ、見かけ上付着強度が上がったためと考えられる。

4) 今回はせん断ひび割れが生じ、進展した3つの時刻でしか検討していないため、さらに損傷が進展した場合についても検討の必要がある。今後さらにデータの解析を進める予定である。

参考文献

- 1) 浅沼秀弥：静岡橋地震被害調査，土木技術資料，Vol. 25，No. 11，pp. 15-20，1983.
- 2) 山本強，石橋忠良，大坪政行，小林普爾：鉄筋を途中定着した橋脚の耐震性に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 348/V-1，pp. 61-70，1984.
- 3) 右近大道，梶原浩一，川島一彦：E-Defenseを用いた実大RC橋脚 (C1-2橋脚) 震動破壊実験報告，第12回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム，2009.
- 4) 佐々木智大，川島一彦，松崎裕，右近大道，梶原浩一：E-ディフェンスを用いた段落し部を有するRC橋脚の破壊特性に関する検討，第12回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム，2009.