

ラーメン高架橋の柱梁接合部における機械式定着工法の適用法

中田 裕喜* 西村 脩平* 田所 敏弥* 幸良 淳志**

Application Method of Mechanical Anchorages for the Beam-to-Column Joint of RC Viaducts

Yuki NAKATA Shuhei NISHIMURA Toshiya TADOKORO Atsushi KOURA

As countermeasures for dense rebar at beam-to-column joint of RC viaducts, there could be the application of the mechanical anchoring method for longitudinal bars. However, the behavior of anchorages has not been clarified at the part where the constraint concrete is small, such as the beam-to-column joints. This research experimentally clarifies the behavior of anchorages when applying mechanical anchorages for longitudinal bars at the beam-to-column joint, and proposes conditions under which the mechanical anchoring method can be applied to the beam-to-column joint.

キーワード：ラーメン高架橋，柱梁接合部，機械式定着，軸方向鉄筋，付着

1. はじめに

耐震設計で考慮すべき地震動の増大に伴い，ラーメン高架橋の柱梁接合部において鉄筋が輻輳する傾向にある。このような柱梁接合部における過密配筋は，鉄筋組立作業などの施工性の低下だけでなく，コンクリートの充填不良に伴う品質低下を招く可能性がある。

柱梁接合部における軸方向鉄筋の過密配筋の対策として，柱軸方向鉄筋の定着に一般的に用いられる半円形フックに代わり，機械式定着工法を用いることが考えられる。しかし，図1に示すように，柱梁接合部においては，コンクリートによる拘束の小さい面を有していることが多く，そのような部位を有する柱の軸方向鉄筋に機械式定着工法を用いた場合の定着部の挙動は明らかになっていない¹⁾。また，土木学会^{2) 3)} や，鉄道⁴⁾，道路⁵⁾，建築⁶⁾ の技術基準においては，軸方向鉄筋に機械式定着工法を適用する場合，マッシブなコンクリートへの定着，あるいは実験による検証等が基本となっている。そのため，柱梁接合部の軸方向鉄筋に機械式定着工法を用いた場合の事例はほとんどない。

そこで，本研究では，柱と上層梁の接合部における柱の軸方向鉄筋に，機械式定着工法を用いた場合の定着部の挙動を，実験により明らかにするとともに，機械式定着工法が適用可能な条件を提案することを目的とする。

なお，本報では，図1に示すとおり，機械式定着工法では定着プレート部分を，半円形フックではフック部分を，直筋定着では標準フックの効果である 10ϕ (ϕ ：軸方向鉄筋径)の部分それぞれ総称して定着具，定着具と定着具の定着に寄与する周辺のコンクリートを含めた箇所を定着体，定着体を含む部位を定着部と称する³⁾。

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室
** 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室
(現 株式会社大林組)

2. 静的耐力の検討

2.1 静的耐力に及ぼす各種影響要因の検討

2.1.1 実験概要

ラーメン高架橋柱の軸方向鉄筋に機械式定着工法を適用する場合，静的耐力および高応力繰返し耐力に対する検討が必要となる⁴⁾。本章では，静的耐力の検討のための一軸引張実験^{7) 8) 9)}について示す。

表1，2および図2，3に，一軸引張実験の概要を示す。一軸引張実験は，藤井・森田らの方法¹⁰⁾を参考に，実際の柱梁接合部を約70%の大きさで模擬した供試体とし，柱外面の軸方向鉄筋4本を一方方向に加力するものである。

機械式定着具は，図3右下に示した円形板を摩擦圧接したものとし，直径63mm (2.5 ϕ 程度， ϕ ：軸方向鉄筋径)，厚さ30mmとした。載荷端側の非定着区間を除いた鉄筋の定着長は，コンクリート標準⁴⁾に示される基本定着長の算定式の原式であるOrangunが提案した式(1)，(2)を用いて，定着される鉄筋の降伏強度を337N/mm²と仮定して求められる基本定着長 32ϕ から，標準フックの効果として 10ϕ 減じた値(=22 ϕ =550mm)とした。

$$l_d = \frac{\frac{f_{syd}}{1.25\sqrt{f'_{cd}}} - 13.3}{0.318 + 0.795K_c} \cdot \phi \quad (1)$$

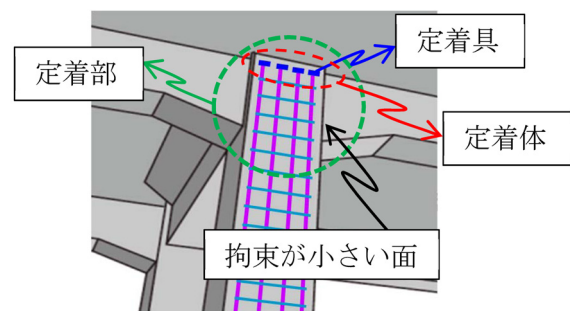


図1 ラーメン高架橋の柱梁接合部

表1 一軸引張供試体の諸元および結果一覧

実験	定着方法	l (mm)	c (mm)	f'_c (N/mm ²)	軸方向鉄筋	横方向鉄筋	P_w (%)	P_d (kN)	$P1_{\delta 2}$ (kN)	$P2_{\delta 2}$ (kN)	P_{bond} (kN)	P_{max} (kN)	破壊形態
S1	フック	550	40	26.4	D25	D13	0.57	171	217	61	156	271	鉄筋降伏
S3	機械式	550	40	26.4	D25	D13	0.57	171	106	6	102	234	コーン破壊
S5	機械式	550	80	26.7	D25	D13	0.57	172	129	16	113	246	コーン破壊
S6	機械式	550	120	26.4	D25	D13	0.57	171	159	20	139	256	コーン破壊
S7	機械式	550	40	26.7	D25	D13	0.28	156	88	6	82	198	コーン破壊
S8	機械式	550	40	27	D25	D13	1.14	205	109	10	99	266	鉄筋降伏
S9	直筋	800	40	27.2	D25	D13	0.57	173	209	58	151	269	鉄筋降伏
S26	機械式	550	215	30	D25	D10	0.32	246	—※1	—※1	—※1	284	鉄筋降伏

l : 定着長, c : 軸方向鉄筋に対するかぶり, f'_c : コンクリート圧縮強度, p_w : 横方向鉄筋比, P_d : 設計耐力の計算値, $P1_{\delta 2}$: $\delta 2$ が急増し始める時の $P1$, $P2_{\delta 2}$: $P1_{\delta 2}$ のときの $P2$, P_{bond} : $P1_{\delta 2}$ のときの軸方向鉄筋の付着の貢献分(= $P1_{\delta 2} - P2_{\delta 2}$), P_{max} : 最大荷重の実験値 ※1: 明確な $\delta 2$ が急増し始める点が無いため記載していない

$$K_c = (c_b / \phi) + \{15A_s / (s \cdot \phi)\} \quad (2)$$

ここに, l_d : 鉄筋の基本定着長(mm), f_{syd} : 鉄筋の引張降伏強度(N/mm²), f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度(N/mm²), ϕ : 定着する鉄筋径(mm), c_b : 鉄筋のかぶりと定着する鉄筋のあきの1/2のうち小さい方の値(mm), A_s : 仮定される割裂破壊断面に垂直な横方向鉄筋の断面積(mm²), s : 横方向鉄筋の間隔(mm), である。

表1に示す通り, 定着方法や軸方向鉄筋に対するかぶり c , 横方向鉄筋, 定着長等をパラメータとした。

2.1.2 実験結果の評価方法

荷点における鉄筋の引張力を $P1$ (kN), 定着具位置における引張力および拔出し量を $P2$ (kN)および $\delta 2$ (mm)と定義し(図3), $P1$ と $\delta 2$ または $P2$ と $\delta 2$ の関係を整理することとする。なお, $P1$ と $\delta 2$ の関係は, 軸方向鉄筋の付着と定着体による貢献を累加した定着部としての特性を, $P2$ と $\delta 2$ の関係は定着体としての特性を表すこととなる³⁾。なお, 実験における $P2$ の算定においては, 定着具前面で計測した軸方向鉄筋の軸ひずみ(図3におけるNo.7のひずみゲージ)に鉄筋断面積とヤング係数を乗じて求めた値とし, 鉄筋AとCの平均値とした。また, $\delta 2$ については, 図3に示すように, 定着具背面に取り付けた治具(ボルトまたはインバー線)を供試体から突出させて, その位置で変位計により計測した値とした。

定着の評価において, 定着具の抜け出しが過大とならないことが重要である^{3) 4)}。本研究では, $P1$ と $\delta 2$ の関係において, $\delta 2$ が急増し始める時の $P1$ (以下, $P1_{\delta 2}$)とそのときの $P2$ (以下, $P2_{\delta 2}$)を用いて, 検討することとした。 $P1_{\delta 2}$ と $P2_{\delta 2}$ を表1に示す。なお, $P1_{\delta 2}$ から $P2_{\delta 2}$ を減じたものが, 軸方向鉄筋の付着の貢献 P_{bond} となる。

2.1.3 実験結果

(1) 定着方法による影響

図4に $P1$ と $\delta 2$ および $P2$ と $\delta 2$ の関係を, 図5にS3(機械式)における実験終了時の損傷状況を示す。直筋定着であるS9と, 半円形フックであるS1(定着長550mm)は,

表2 鉄筋の材料試験結果

	降伏強度(N/mm ²)		弾性係数(kN/mm ²)			
	S1, S3 S5~9	S23	S26	S1, S3 S5~9	S23	S26
D25(SD490)	534	511	532	181	171	182
D13(SD345)	367	362	—	175	183	—
D10(SD345)	—	—	376	—	—	188

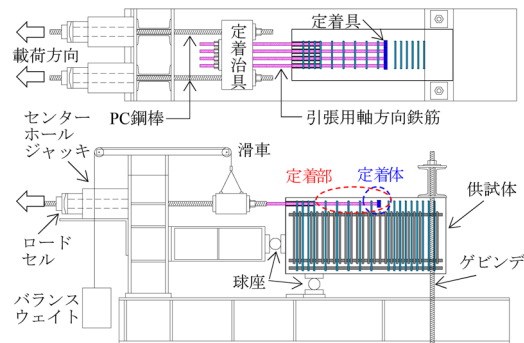


図2 荷重概要

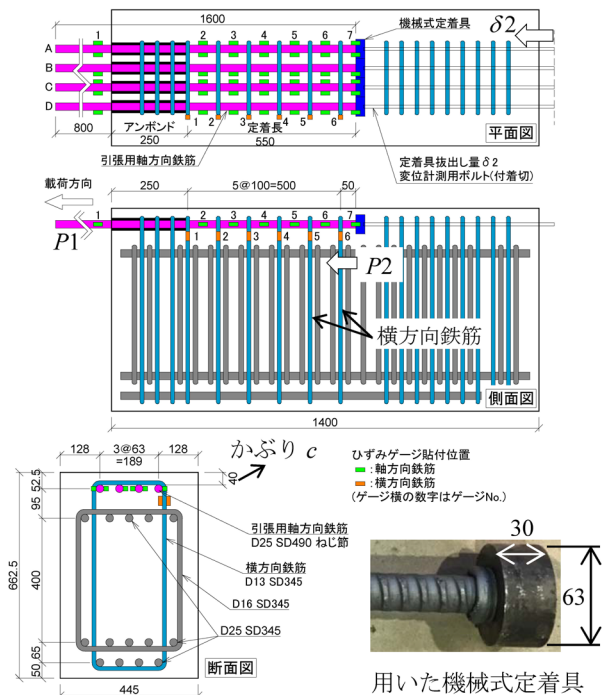


図3 供試体諸元 (S3) (単位: mm)

設計耐力の計算値 P_d に達するまでに δ_2 の顕著な増加は発生せず、 $P_{1\delta_2}$ および $P_{2\delta_2}$ に大きな違いはみられない。一方、図 4(a) に示すように、S1 と同じ定着長で機械式定着の S3 の P_{max} は P_d に達しているものの、 P_d に達する前に δ_2 が急増し、 $P_{1\delta_2}$ は P_d よりも小さい。また、図 4(b) に示すように、S1 と S9 の $P_{2\delta_2}$ が 60kN 程度であるのに対して、S3 の $P_{2\delta_2}$ は 6kN と非常に小さい。

図 5 に、S3 における実験終了後の損傷状況を示す。S1 および S9 は軸方向鉄筋の降伏により P_{max} に達したが、機械式定着である S3 は機械式定着具位置で発生したひび割れに起因して、軸方向鉄筋が降伏せずに P_{max} に達している。本研究では、このような機械式定着具付近のコンクリートのひび割れに起因する破壊をコーン破壊と称することとするが、 $P_{1\delta_2}$ に達したときに機械式定着具付近のコンクリートにひび割れが発生している。

以上のことから、拘束の小さい面に位置する軸方向鉄筋に対し、半円形フックをそのまま機械式定着具に置き換えただけでは、フックと同等の静的耐力または定着長低減効果を有しないと考えられる。

(2) かぶり c の影響

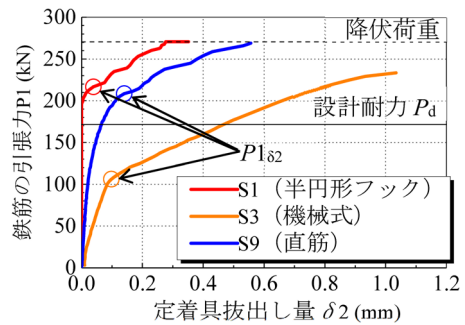
図 6 に、S1 ~ 9 における P_1 と δ_2 および P_2 と δ_2 の関係を示す。かぶり c をパラメータとしたケース (S3, 5, 6) では、表 1 に示すように、 c が大きくなるに従い、 $P_{1\delta_2}$ 、 $P_{2\delta_2}$ および軸方向鉄筋の付着による貢献 P_{bond} のいずれも増加する結果となった。ただし、いずれも P_{max} は P_d には達しているものの、 $c=120\text{mm}$ である S6 においても $P_{1\delta_2}$ は P_d 以下であり、S9 (直筋) ほどの静的耐力は得られなかった。

(3) 横方向鉄筋比 p_w の影響

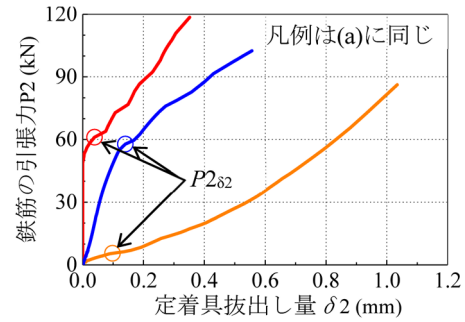
横方向鉄筋比 p_w をパラメータとしたケース (S3, 7, 8) では、表 1 に示すように、 p_w が大きくなるに従い、 $P_{1\delta_2}$ 、軸方向鉄筋の付着による貢献 P_{bond} 、 P_{max} が増加するが、 $P_{2\delta_2}$ には顕著な影響を与えないことがわかった。これは、横方向鉄筋は、機械式定着具周辺のひび割れが発生した後に、その効果が顕著となるためである。いずれも P_{max} は P_d には達しているものの、 $p_w=1.14\%$ である S8 においても $P_{1\delta_2}$ は P_d 以下であり、S9 (直筋) ほどの静的耐力は得られなかった。

以上を踏まえると、拘束の小さい面に位置する軸方向鉄筋に機械式定着具を用いた場合の静的耐力は各種要因の影響を受けるが、一般的な高架橋柱の諸元の範囲で各種諸元を変化させても、現行の半円形フックから単純に機械式定着工法に置換えることは困難であると考えられる。

なお、紙面の都合上割愛したが、機械式定着体と軸方向鉄筋の付着の相互作用や、隣接する軸方向鉄筋の定着長を変化させた場合などの効果についても、文献 7)8) で検討している。



(a) 定着部の検証



(b) 定着体の検証

図4 定着方法による違い

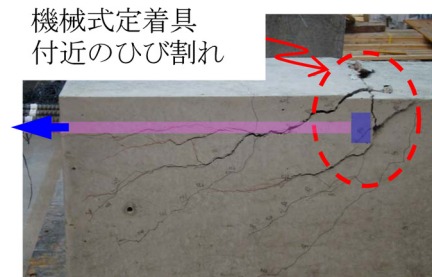
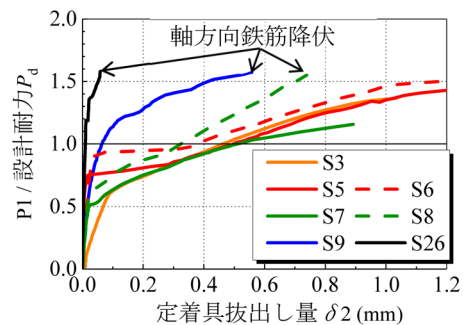
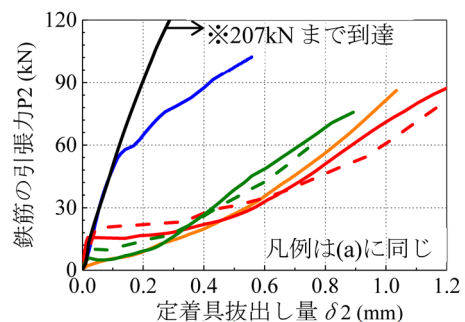


図5 損傷状況 (S3: 機械式)



(a) 定着部の検証



(b) 定着体の検証

図6 各種要因の影響

2.2 突出梁を有する柱梁接合部における検討

2.2.1 概要

ラーメン高架橋の接合部における過密配筋の低減のために、図7に示すような突出梁が柱外面に設けられることがある。この場合、柱外面軸方向鉄筋の接合部におけるかぶりは、突出梁厚さを考慮することで数100mmを超えるとともに、直交梁などにより十分なコンクリートの拘束効果を期待できる。そこで、図7のような部位を想定した場合の定着の効果を検討する。

表1、2および図8に、供試体諸元(S26)を示す。突出梁の長さは、実構造物での事例や、供試体が縮尺供試体であることなどを考慮して、175mmとした。また、横梁の上側軸方向鉄筋を模擬したU字形の鉄筋を配置した。なお、荷重は、前節と同様に一方向に加力した。

2.2.2 実験結果

図9に、実験の状況および実験終了後の損傷状況を示す。また、図6にP1と δ_2 およびP2と δ_2 の関係を併記した。

損傷状況について、まず突出梁と直交梁の境界でひび割れが発生し、P1=207kNで荷重と直交する方向にひび割れが発生した。さらに荷重を続けると、これらのひび割れが進展するものの、新たなひび割れは発生せず、軸方向鉄筋が降伏することで実験を終了した。また、図6に示すように、軸方向鉄筋の降伏まで定着具の抜出しがほとんど生じず、十分な静的耐力を有していると考えられる。なお、文献9では、有限要素解析によって、突出梁、直交梁および梁軸方向鉄筋それぞれの貢献を検討している。直交梁および梁軸方向鉄筋も静的耐力に貢献するため、これらが設けられていることが前提となる。

3. 高応力繰返し耐力の検討

3.1 実験概要

本章では、高応力繰返し耐力の検討のための正負交番荷重実験について示す。

供試体諸元を図10に、材料試験の結果を表3に示す。供試体は柱と上層横梁を模擬したL形接合部であり、すべての柱軸方向鉄筋を機械式定着とした。比較のために、突出梁を設けないL形接合部も製作した。ただし、横梁を固定するスタブは共有している。なお、突出梁を設けた接合部の諸元は、図8に示した一軸引張実験の供試体と一致させている。

荷重は、柱基部から高さ1400mmの位置にて水平方向に加力し、接合部が開く方向を正側、閉じる方向を負側と定義した。荷重のサイクルは、柱軸方向鉄筋が降伏したときの柱水平変位 δ_y を基準として、 δ_y の整数倍変位において、各サイクル3回の繰返しを行った。なお、柱に軸方向力は作用させていない。

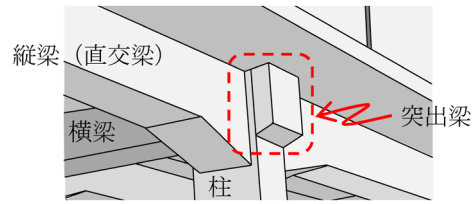


図7 突出梁を有する柱梁接合部

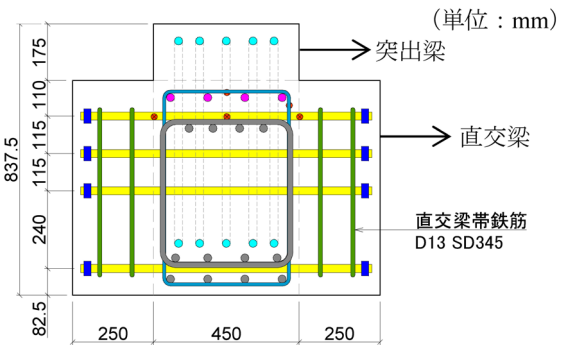
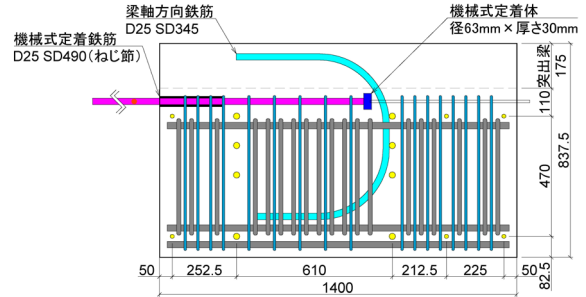


図8 供試体諸元(S26)

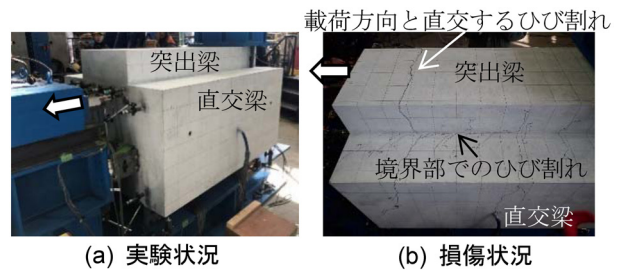


図9 実験および損傷状況(S26:突出梁考慮)

3.2 実験結果

図11に、実験より得られた荷重点における水平荷重と柱水平変位の関係、および計算値⁴⁾を示す。突出梁が無い場合、負荷時に柱軸方向鉄筋が引張降伏する前に図12に示すひび割れが発生し、荷重が低下した。その後、このひび割れが進展し、かぶりコンクリートが剥落した。この現象は、2章で示した一軸引張実験における破壊状況と類似している。計算値と比較すると、Y点(軸方向鉄筋の降伏点)およびM点(最大耐力点)における曲げモーメントに達しない結果となった。

一方、突出梁が有る場合、定着具背面付近のひび割れは発生せず、正荷重、負荷重ともに計算値のY点およびM点の曲げモーメントに達した。しかし、+3 δ_y の1サイクル目に目標変位に到達する直前に、突出梁と接合

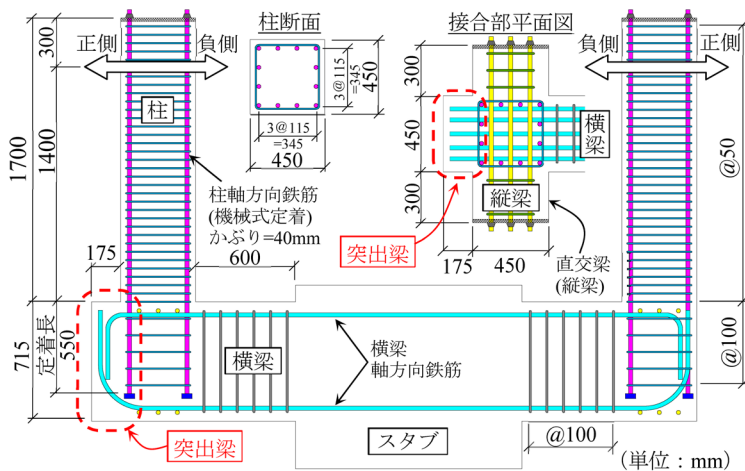


図10 供試体概要 (左：突出梁有り 右：突出梁無し)

部の境界に図13(a)に示すひび割れが発生し、荷重が低下した。これは、梁軸方向鉄筋に引張力が作用することに起因し、フック定着部が突出梁を外側に押し出すように変形したためと考えられる(図13(b))。なお、実構造物における突出梁においては、梁軸方向鉄筋を取り囲むようにコ形鉄筋が配置されている。本実験と同様な突出梁を設け、コ形鉄筋を配置した既往のL形接合部の実験¹¹⁾では、図13(a)に示すようなひび割れは発生せず、所定の変形性能を有していた。すなわち、突出梁を設けた接合部では、コ形鉄筋によって梁軸方向鉄筋の変形を拘束する必要があると考えられる。

一般に、接合部には、柱の塑性ヒンジ部に配置される帯鉄筋と同量の横方向鉄筋が配置される⁴⁾。梁軸方向鉄筋のフックが外側に押し出される現象は、突出梁が無い場合でも起こり得ると考えられるが、過去の地震被害において、このような損傷事例は観察されていない。これは、接合部内に配置されている横方向鉄筋が梁軸方向鉄筋の変形を拘束しているためと考えられる。したがって、塑性ヒンジ部に配置される帯鉄筋と同量のコ形鉄筋を配置すれば、このような現象は生じないと考えられる。

図14に、突出梁がある供試体の柱軸方向鉄筋のひずみ分布を示す。外側の柱軸方向鉄筋のひずみ分布を比較すると、突出梁が無い場合、 $-1\delta_y$ に達する前に図12に示したひび割れが発生したことで、定着具位置における最大ひずみ(P_2 に相当)は 800μ 程度となったが、突出梁が有る場合は、 $-2\delta_y$ 載荷時で 1200μ に達した。それ以降は、 $+3\delta_y$ 載荷時の図13(a)に示したひび割れの発生に起因してひずみは増加しなくなったが、突出梁にコ形鉄筋を配置すれば、さらに引張力を負担できたとと思われる。

内側の柱軸方向鉄筋のひずみ分布について、突出梁の有無で大きな違いは見られない。内側軸方向鉄筋は、梁部材側に位置しているものの、図15に示すように、正載荷時に柱前面において梁に曲げひび割れが発生するため、梁による拘束は期待できない可能性がある。しか

表3 材料試験結果

(a) 鉄筋

種類		降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
柱軸方向鉄筋	D25 (SD390)	410	186
柱帯鉄筋	D10 (SD345)	362	179
梁軸方向鉄筋	D25 (SD490)	521	188
梁帯鉄筋	D13 (SD345)	363	180

(b) コンクリート

供試体	部位	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
突出梁有り	柱	24.8	1.81	27.2
	梁・接合部	25.9	2.15	29.0
突出梁無し	柱	25.4	1.95	27.5
	梁・接合部	25.6	2.12	28.6

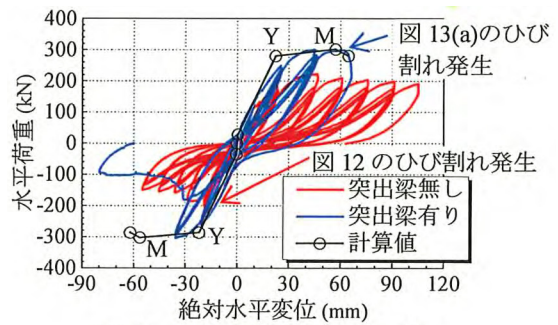


図11 高応力繰返し耐力の検証

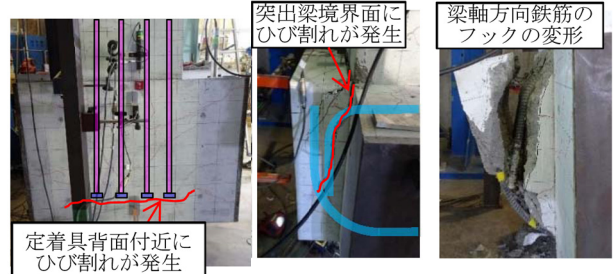


図12 損傷状況 (突出梁無し)

(a) $+3\delta_y-1$ (b) 実験終了時
図13 損傷状況 (突出梁有り)

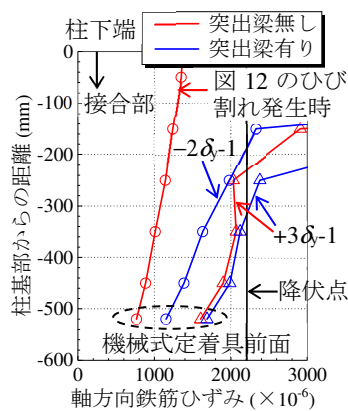


図14 軸方向鉄筋ひずみ分布

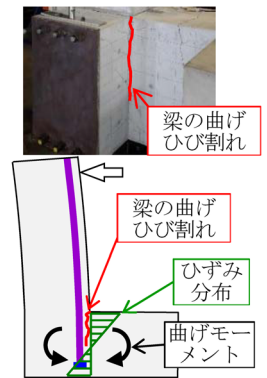


図15 内側軸方向鉄筋の定着

しながら、定着具位置におけるひずみは $+3\delta_y$ 載荷時で 1500μ に達しており、定着体が大きな引張力を負担している。これは、正載荷時には定着体が曲げ圧縮応力によ

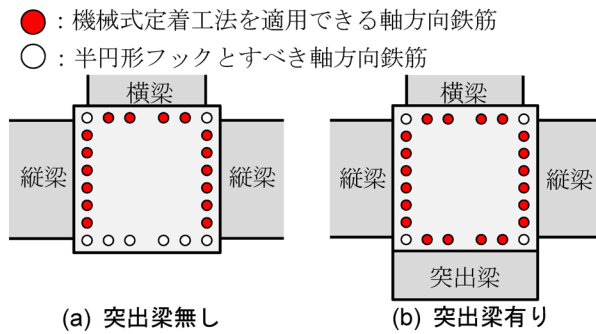


図 16 機械式定着工法の適用可能箇所（柱断面図）

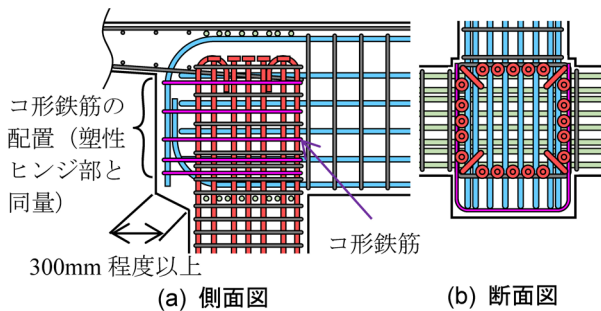


図 17 配筋の例（突出梁有りの場合）

る拘束を受けているためと考えられる（図 15）。

4. 機械式定着工法の適用可能な条件の提案

2, 3 章で得られた知見を踏まえ、柱軸方向鉄筋への機械式定着工法が適用できる箇所を図 16 に示す。突出梁または直交梁（縦梁，横梁）を有する面においては、機械式定着工法を適用できると考えられる。ただし、隅角部（四隅）においては、必ずしも拘束が十分でないと想定されることから、配筋の手引き¹²⁾に示される直筋定着の適用の区分と同様に、半円形フックとした。

図 17 に、配筋の例を示す。機械式定着工法を用いる場合には、突出梁を設けて梁軸方向鉄筋を突出梁内で定着するとともに、従来接合部に配置している横方向鉄筋と同量のコ形鉄筋を配置する必要がある。また、突出梁の大きさは、実験結果を踏まえて、一般的なラーメン高架橋を対象に、300mm 程度以上確保することとした。なお、機械式定着工法は、土木学会の鉄筋定着・継手指針³⁾に示される、静的耐力および高応力繰返し耐力を満足するものとする。

柱の軸方向鉄筋に機械式定着工法を適用することで、従来の半円形フックの場合と比較して、接合部内の鉄筋の幅輦が低減できると考えられる。

5. まとめ

- 1) 拘束の小さい面に位置する軸方向鉄筋に機械式定着工法を用いた場合の静的耐力は各種要因の影響を受

けるが、一般的な高架橋柱の諸元の範囲で各種諸元を変化させても、現行の半円形フックから単純に機械式定着工法に置換えることは困難であることがわかった。

- 2) 接合部における過密配筋の低減のために設けられる突出梁や、直交梁等を考慮することで、所定の静的耐力が得られることがわかった。
- 3) 突出梁を設けることで、高応力繰返し耐力は向上する。また、接合部内で梁軸方向鉄筋を拘束できるように、突出梁にコ形鉄筋を配置する必要があることがわかった。
- 4) ラーメン高架橋の柱梁接合部における柱軸方向鉄筋に、機械式定着工法を適用可能な条件を提案した。

文 献

- 1) 吉武謙二，小川晃，小倉大季，前之園司：梁および柱の軸方向鉄筋の定着仕様が接合部性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.34，No.2，pp.541-546，2012
- 2) (公社) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，丸善，2017
- 3) (公社) 土木学会：コンクリートライブラリー 128 鉄筋定着・継手指針 [2007 年版]，丸善，2007
- 4) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善，2004
- 5) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，丸善，2017
- 6) (財) 日本建築総合試験所：機械式鉄筋定着工法設計指針 (2010 年改定)，機械式鉄筋定着工法研究委員会，2010
- 7) 幸良淳志，中田裕喜，草野浩之，田所敏弥：高架橋接合部における機械式定着鉄筋の静的引張特性と定着性能向上に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.505-510，2018
- 8) 幸良淳志，中田裕喜，草野浩之，田所敏弥：RC 柱梁接合部において千鳥配置とした機械式定着鉄筋の一軸引張特性に関する検討，土木学会第 73 回年次学術講演会，V-487，pp.973-974，2018
- 9) 西村脩平，中田裕喜，幸良淳志，田所敏弥：突出梁を有する RC 柱梁接合部における機械式定着部の静的引張特性に関する検討，土木学会第 74 回年次学術講演会，V-612，2019
- 10) 藤井栄，森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 第一報 付着割裂破壊を支配する要因についての実験結果一，日本建築学会論文報告集，第 319 号，1982
- 11) 古屋卓稔，渡辺健，田所敏弥，服部尚道：ラーメン高架橋の柱梁接合部の配筋・定着方式が柱の部材性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.217-222，2017
- 12) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 配筋の手引き，2005