# 論文 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

幸良 淳志\*1·中田 裕喜\*2·草野 浩之\*3·田所 敏弥\*4

要旨:鉄筋が輻輳するラーメン高架橋接合部では、施工性の向上を目的に、軸方向鉄筋に機械式定着の適用 が考えられる。しかし、コンクリートの拘束力が小さい面を有する柱梁接合部のような部位での定着性能は 不明な点が多く、既往の研究では、半円形フックに比べ、機械式定着具からの支圧力に起因する脆性的な破 壊形態を示す傾向があることが確認されている。本研究では、定着具位置における引張力と定着具の抜出し 量に着目し、機械式定着鉄筋の静的引張特性を明らかにするとともに、定着性能を向上させる検討を行った。 その結果、支圧力と付着力の負担領域を区分することで、定着体の定着性能が向上することを確認した。 キーワード: 柱梁接合部、機械式定着、半円形フック、機械式定着具、抜出し量、付着、支圧力

# 1. はじめに

耐震設計で考慮すべき地震力の増大によって、柱や梁 の軸方向鉄筋量が増加し, 柱梁接合部においては鉄筋が 輻輳する傾向にある。そこで、施工性ならびに品質の向 上を目的に、一般的な半円形フックの代わりに機械式定 着具を用いた定着構造が採用される場合がある。建築構 造物では、機械式定着の適用に関する機械式鉄筋定着工 法設計指針 1)が発刊されており、軸方向鉄筋への適用が 広く普及しているが、土木学会コンクリート標準示方書 <sup>2)</sup>や鉄筋定着・継手指針<sup>3)</sup>においては,軸方向鉄筋に機械 式定着を適用するための明確な規定がない。また、柱梁 接合部のように、コンクリートの拘束力が小さい面を有 する部位における機械式定着鉄筋の定着性能が必ずしも 明確になっていないことから、土木構造物での適用範囲 はマッシブな部位への定着に限られる場合がほとんどで ある。さらに、柱梁接合部での適用を想定した既往の機 械式定着鉄筋の一軸引張試験<sup>4)</sup>において,機械式定着具 の抜出し量が半円形フックと比較して大きくなり、最終 的に機械式定着具付近からのひび割れが進展して脆性的 な破壊形態を示す傾向があることが確認されている。

そこで、本研究では、既往の実験結果を定着具位置に おける引張力と定着具の抜出し量(定着体の荷重変位関 係)に着目して再考察するとともに、その考察内容から、 機械式定着鉄筋の定着性能を向上させる構造について検 討し、実験により検証を行った。

なお、本論文では、半円形フック、機械式定着具、フ ックなしの直筋の定着部分を総称して定着具と呼ぶ。ま た、定着体は定着具とその周辺のコンクリートを含めた 箇所,定着部は定着体を含む部位とする<sup>3)</sup>(**図-1**参照)。



# 2. 既往の実験<sup>4)</sup>について

#### 2.1 実験概要

既往の実験は、かぶりが小さく、コンクリートの拘束 力が小さい面を有するラーメン高架橋接合部における機 械式定着鉄筋の定着性能を確認することを目的としたも のである。具体的には、藤井・森田らの一軸引張試験<sup>5)</sup> を参考に、横梁や縦梁等によって拘束されていない柱外 面の軸方向鉄筋を対象に、直交梁を考慮しないL型とし て実際の上層柱梁接合部を約70%の大きさで模擬した供 試体から4本の鉄筋を一方向に加力する試験である。加 力装置の概要を図-1に、供試体諸元と実験結果を表-1 に示す。供試体は、軸方向鉄筋D25(SD490)、軸方向鉄 筋の純かぶり40mm、横方向鉄筋D13@100mm(SD345)、 コンクリートの圧縮強度27N/mm<sup>2</sup>で、機械式定着を適用 したS3を基準としている。機械式定着具には図-2に示 す直径63mm(=2.5 ¢程度、¢:定着される鉄筋径)、厚 さ30mmの円板を摩擦圧接した構造を用いている。供試

*1	(公財)	鉄道総合技術研究所	コンクリート構造 副主任研究員 修(工) (正会員)
*2	(公財)	鉄道総合技術研究所	鋼・複合構造 副主任研究員 修(工) (正会員)
*3	(公財)	鉄道総合技術研究所	コンクリート構造 研究員 修(工) (正会員)
*4	(公財)	鉄道総合技術研究所	コンクリート構造 研究室長 博(工) (正会員)

No.	定着 方法	l (mm)	c (mm)	p <sub>w</sub> (%)	$f'_{c}$ (N/mm <sup>2</sup> )	軸方向 鉄筋	記事	Pc (kN/本)	Pc' (kN/本)	Pd (kN/本)	Pmax (kN/本)	破壊形態
S1	フック	550	40	0.57	26.4	D25	半円形フック	52	120	171	271	鉄筋降伏
S3	機械式	550	40	0.57	26.4	D25	基準供試体	56	106	171	234	コーン破壊
S4	機械式	0	40	0.28	26.4	φ 26	鉄筋付着なし	28	28	—	125	コーン破壊
S5	機械式	550	80	0.57	26.7	D25	かぶり大	57	129	172	246	コーン破壊
S6	機械式	550	120	0.57	26.4	D25	かぶり大	78	159	171	256	コーン破壊
<b>S</b> 7	機械式	550	40	0.28	26.7	D25	横方向鉄筋比小	47	88	156	198	コーン破壊
S8	機械式	550	40	1.14	27.0	D25	横方向鉄筋比大	39	109	205	266	鉄筋降伏
S9	直筋	800	40	0.57	27.2	D25	直筋定着	36	118	173	269	鉄筋降伏

#### 表-1 供試体諸元一覧と実験結果(既往の実験)

l:定着長, c:軸方向鉄筋の純かぶり, pw:横方向鉄筋比, f'c:コンクリート圧縮強度

Pc:最初にひび割れが発生するときの荷重, Pc':定着具付近にひび割れが発生するときの荷重, Pd:設計耐力, Pmax:最大荷重

pw=0.28, 0.57, 1.14%はそれぞれ D13@200mm, @100mm, @50mm, 軸方向鉄筋のあきはすべて 38mm

鉄筋の降伏強度: 軸方向鉄筋 D25(SD490)=533.8N/mm<sup>2</sup>, φ26(SBPR785)=1048.8N/mm<sup>2</sup>, 横方向鉄筋 D13(SD345)=367.0N//mm<sup>2</sup>

# 体形状の一例として S3 の形状を図-3 に示す。

載荷端側のアンボンド区間を除いた鉄筋の定着長は, Orangun ら<sup>6),7)</sup>の提案式を用いて,定着される鉄筋の降伏 強度を 337N/mm<sup>2</sup> と仮定したときに逆算した定着長 32  $\phi$ から,標準フックの効果として 10  $\phi$ 減じた値(=22  $\phi$ =550mm)を基本としている。Pd は Orangun らの提案式 に**表**-1 の値を代入して逆算される鉄筋降伏強度に軸方 向鉄筋断面積を乗じて求めている<sup>4</sup>。

既往の実験では、定着部の静的引張特性に及ぼす影響 が大きいと考えられる定着構造、かぶり、横方向鉄筋比 を主なパラメータとした実験を行っている。具体的には、 定着構造が異なる S1, S3, S9,機械式定着具を用いて純 かぶりを変えた S3, S5, S6,機械式定着具を用いて横方 向鉄筋比を変えた S3, S7, S8 の組合せが比較対象とな る。さらに、S7を基準として、機械式定着具を用いた場 合の定着部の破壊形態に鉄筋付着が及ぼす影響を検討す るため、鉄筋付着を考慮しない PC 鋼棒に定着板を摩擦 圧接した S4 の試験も行っている。

#### 2.2 試験結果の評価方法

本研究での再考察においては,載荷点における鉄筋の 引張力 P1 と定着具の抜出し量 δ2 の関係,定着具位置に おける引張力 P2 と δ2 の関係に着目して検討する。P1δ2 関係は定着部の性能, P2-δ2 関係は定着体の性能を表 すものである。また, 柱部材での地震時の繰り返し載荷 の影響を考えたとき、変形性能の点において、定着具の 抜出しが生じ始める荷重も重要となってくる。したがっ て、P1-δ2 関係において、δ2 が急増し始めるときの P1 (以降, P1<sub>82</sub>) とそのときの P2 (以降, P2<sub>82</sub>) にも着目 した。今回, P1<sub>82</sub>は P1-82 関係において初期剛性が大き く変化したときの荷重とした。なお,既往の研究<sup>4)</sup>では, 載荷点に設置したロードセルで計測した引張力を鉄筋 4 本で除した平均値を鉄筋引張力としていたが、軸方向鉄 筋のひずみゲージ No.1 と No.2 (図-3参照)の値から, アンボンド区間において完全に付着が除去し切れずに少 なからず引張力が負担されており、その値が供試体ごと で異なっていた。そのため、本論文においては、ゲージ



図-2 既往の実験で用いた機械式定着具



No.2 の値に鉄筋断面積とヤング係数を乗じて求めた値 を P1 として再整理した。この際, P1 は,曲げひずみの 影響を除外するために,ひずみゲージを両面張りした A と C の平均値を用いた。同様に, P2 も鉄筋 A と C の定 着具最近傍に貼付したゲージ No.7 のひずみから算出し た。 δ2 は, S1 以外の供試体は定着具に取り付けた変位 計測用ボルトを, S1 は半円形フックの曲げ始め位置に点 付け溶接したインバー線を用いて計測した鉄筋 A と C の 定着具変位の平均値とした。

## 2.3 定着性能の評価

# (1) 定着構造の影響

S1, S3, S9 における P1-62 関係, P2-62 関係および P1<sub>82</sub>と P2<sub>82</sub>を図-4(a)~(c)に示す。S1と S9 は概ね同様 の挙動を示した。また、P1<sub>82</sub>は Pd 以上であり、Pd 時点 の 82 は 0.01mm 程度と非常に小さい値である。一方, S3 の P1<sub>82</sub>は Pd より小さい 106kN で, Pd に達する前に定着 具の抜出しが生じ始めていることがわかる。P2-δ2 関係 においても、同じ P2 に対する S3 の b2 は S1 と S9 に比 べ大きな値を示した。また, S1 と S9 の P2<sub>82</sub> が 60kN 程 度であるのに対して,S3のP2<sub>82</sub>は4kNと非常に小さい。 さらに、P1 と P2 の差分(P1-P2)が定着力のうち軸方向 鉄筋の付着力負担分になることを考えると、図-4(c)か ら、定着具の抜出しが生じ始める時点の付着力について も、S3はS1とS9に比べ50kN程度小さいことがわかる。 なお、S1 と S9 はいずれも鉄筋降伏により実験が終了し ているため、定着部の破壊に起因する Pmax はさらに大 きいと考えられるが、S3 は最終的に定着具付近のひび割 れが大きく進展し脆性的な破壊を示している。ここでは, この破壊形態をコーン破壊と呼ぶことにする。このこと から,半円形フックを機械式定着具に置き換えた S3 は, 半円形フックと同じ 10 φの定着長の低減効果を見込ん でいるが,既往の実験の諸元では,低減効果は10φより も小さいと考えられる。

#### (2) かぶりの影響

S3, S5, S6 における P1-62 関係, P2-62 関係および P1<sub>82</sub> と P2<sub>82</sub> を図-5(a)~(c)に示す。かぶりが大きくな

るにつれ,  $P1_{\delta 2}$ ,  $P2_{\delta 2}$  および付着のいずれも大きくなっ ている。しかしながら,かぶり 120mm の S6 においても  $P1_{\delta 2}$ は Pd 以下で,  $P2_{\delta 2}$ は S1 の半分以下である。また, Pmax に対するかぶりの影響は大きくないことがわかる。

#### (3) 横方向鉄筋比の影響

S7, S3, S8 における P1- $\delta$ 2 関係, P2- $\delta$ 2 関係および P1 $_{\delta 2}$  と P2 $_{\delta 2}$  を図- $6(a) \sim (c)$ に示す。かぶりの場合と異 なり、Pmax の変化は大きいが、横方向鉄筋比が変化し ても P1 $_{\delta 2}$  と P2 $_{\delta 2}$  への影響は小さいことがわかる。

#### (4) 鉄筋付着の有無の影響

PC 鋼棒を用いて、かつグリスを塗布して付着を切った S4のP2-62 関係を,他のケースとともに図-7に示す。 図-7から、S4の挙動は、機械式定着具を用いたケース とは異なり、S1やS9に近いことがわかる。また、P2の 最大値がS3は85kNであるのに対して、S4は125kNで、 S4の機械式定着具は約1.5倍の引張力を負担している。

# 2.4 機械式定着鉄筋の静的引張特性について

定着具の抜出しが生じ始める点に着目したとき,機械 式定着鉄筋の定着性能を向上するには,横方向鉄筋比の 増加よりもかぶりの増加が有効であることがわかった。 しかしながら,いずれのケースにおいても Pl<sub>82</sub>は Pd 以 下であり,半円形フックに比べ劣る結果となった。ここ で,定着構造による支圧力の方向について考えると,半 円形フックでは,フックの内部に向かって支圧力が作用 し,直線部の鉄筋付着領域にほとんど影響はないと考え られる。一方,機械式定着具の支圧力方向は,アンカー の引抜試験と類似した機構と考えると,鉄筋軸方向から





約45度の範囲に作用し<sup>8)</sup>,鉄筋付着領域と重なると考え られる(図-8)。したがって,機械式定着具を用いた場 合は,支圧力を負担し,抜出しに抵抗するコンクリート 領域が先に付着により損傷を受けることになるが,付着 のない S4 は健全なコンクリートで支圧力を負担してい るため,同じ P2 の値に対して δ2 が小さくなったと考え られる。また,機械式定着のケースではいずれも P1<sub>82</sub>=Pc' であるが,S1 では Pc'=120kN, P1<sub>82</sub>=217kN である。これ は、半円形フックの場合は、フック付近にひび割れが発 生しても、フック先端側が健全なコアコンクリート部分 に定着されており、ひび割れ発生後も抜出しが生じにく いためと考えられる。

# 3. 機械式定着の定着長低減効果と定着性能向上の実験 3.1 実験概要

2 章から,既往の実験の諸元では,機械式定着具の定 着長低減効果には10¢を見込むことができなかった。ま た,定着具手前の鉄筋付着によるコンクリートの損傷に より定着性能が低下すると考えられた。そこで,機械式 定着具に期待すべき定着長の低減効果を明確にするとと もに,定着性能を向上させる方法を考案し,実験により 検証した。使用した鉄筋,定着具は既往の実験と同一種 類で,加力装置も同じものを使用したため実験方法は変 わらない。供試体諸元と実験結果を表-2,鉄筋の材料 試験値を表-3,形状を図-9に示す。基本的な形状は既 往の実験と同じであるため側面の一部のみを示す。

#### 3.2 供試体概要

# (1) 定着長低減効果を検証する供試体

既往の実験で S4 以外の機械式定着具を用いたケース のうち, P2<sub>82</sub>が最も大きいのは S6 の 20kN である。つま り, 既往の実験の諸元では,機械式定着具に期待できる 引張力は 20kN までということになる。20kN は, Orangun らの提案式から逆算すると, 125mm (=5 $\phi$ )分の定着力 と同等であり,機械式定着具には 5 $\phi$ 分の定着長低減効 果が見込めることとなる。よって, S6 の定着長を 5 $\phi$ 延 長したものを H29-1 とした。なお,定着性能の目標とな る直筋定着の S9 はかぶりが 40mm であるため,同じか





ぶりである S3 に対して定着長を延長すべきであるが, S3 の P2<sub>62</sub>は 4kN で, 定着長に換算すると1 φ 程度の低減 効果しか見込めないため,ここでは S6 を基準とした。

### (2) 定着性能を向上する供試体

定着具からの支圧力が作用する範囲のコンクリートを 健全な状態に保つことが定着性能の向上に寄与すると考 えられたため、機械式定着具手前の一部分だけアンボン ドにする構造を考案した。そこで、H29-1 で延長した 5 々区間をアンボンドにしたものを H29-2 とした。また、 定着具付近にひび割れが発生した後の半円形フックの抜 出しの挙動を踏まえると、ひび割れたコンクリートに代 わり、補強鉄筋を配置して機械式定着具の抜出し防止を 強化できれば定着性能の向上に効果があると考えられる。 そこで、S3を基準として、機械式定着具前面に横方向鉄 筋を密に配置したものを H29-3 とした。この定着具前面 の横方向鉄筋には、支圧力の負担とひび割れが発生した 後のひび割れ幅抑制やダウエル効果等を期待している。

#### 表-2 供試体諸元一覧と実験結果(今回の実験)

No <sub>o</sub>	定着 方法	<i>l</i> (mm)	l <sub>unbond</sub> (mm)	c (mm)	p <sub>w</sub> (%)	$f'_{c}$ (N/mm <sup>2</sup> )	軸方向 鉄筋	Pc (kN)	Pc' (kN)	Pd (kN)	Pmax (kN)	破壊形態
H29-1	機械式	675	0	120	0.57	28.1	D25	126	212	197	230	コーン破壊
H29-2	機械式	550	125	120	0.57	28.8	D25	135	215	178	238	コーン破壊
H29-3	機械式	550	0	40	0.28	31.1	D25	73	95	185**1)	202	コーン破壊

lunbond:定着具手前に設けたアンボンド区間長,その他の記号は表-1と同じ

※1) 密に配置した横方向鉄筋の効果は考慮していない

表-3 鉄筋の材料試験値

鋼材	鋼種	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	備考	
D25	SD490	511.0	171.1	軸方向鉄筋	
D13	SD345	362.1	182.5	横方向鉄筋	

#### 3.3 実験結果について

# (1) 損傷状況

H29-1, H29-2 および H29-3 の破壊時のひび割れ図を図 -10(a)~(c)に示す。H29-2 は、定着具手前の鉄筋部分 に付着力が働かないため、H29-1 と比較して、供試体上 面に発生した定着具背面のひび割れが直線的になってい ると考えられ、その他の部分は概ね同じひび割れ性状を 示している。H29-3 は他の2体よりかぶりが小さいため、 付着により発生する最初のひび割れ時の荷重 Pc が小さ く、そのひび割れも他の2体より載荷端側に出現したと 考えられる。また、H29-3 では、供試体上面に付着によ るひび割れが多く現れている。

#### (2) 定着性能の評価

P1, P2 および  $\delta 2$  の算出方法は, 2.2 で示した方法と した。P1- $\delta 2$  関係, P2- $\delta 2$  関係および P1 $_{\delta 2}$  と P2 $_{\delta 2}$  を比 較対象とともにそれぞれ図-11~13 に示す。H29-1 の P2 $_{\delta 2}$ は S6 と同程度で, P2- $\delta 2$  関係も近い挙動となって いる。これは, H29-1 は S6 の定着長を延長しただけであ り, 定着体としての定着性能は変わらないためである。 一方, P1 $_{\delta 2}$ は S6 と比較して 50kN 程度大きくなっており, P2 $_{\delta 2}$ が変わらないことを考えると, 定着長を延長したこ とで付着力負担分が大きくなった結果が反映されている。 P1 $_{\delta 2}$ は Pd 以上であり, S9 と同等となった。したがって, P1- $\delta 2$  関係に着目すれば, かぶりを大きくした影響を考 慮する必要はあるが, 今回の仕様において機械式定着具 は 5  $\phi$  程度の定着長低減効果を有していると考えられる。

次に、H29-2 の P2<sub>82</sub>は H29-1 の 2 倍程度の 48kN を示 していることから、定着具手前にアンボンド区間を設け、 支圧力と付着力の負担領域を区分することで定着体とし ての定着性能が向上することが確認できた。定着具が抜 出し始めるときの付着力の差である 5  $\phi$  相当分の 20kN 程度を、アンボンドにしたことで機械式定着具が負担で きるようになったと考えられる。H29-2 についても、P1<sub>82</sub> は Pd 以上となった。ただし、P1- $\delta$ 2 関係が近い挙動を 示し、Pmax も同程度となっていることから、(*l* + *l*<sub>unbon</sub>)



の合計が同じ H29-1 と H29-2 の定着部としての定着性能は、今回の仕様においては同等であると考えられる。

H29-3の結果からは、P1<sub>82</sub>とP2<sub>82</sub>はS3とほぼ同じ値を 示したが、抜出しが生じ始めてからのδ2の増加量は、同 じ P2 に対して S3 の半分程度になっており、定着体とし ての定着性能が向上していることがわかる。定着具前面 の横方向鉄筋の効果を確認するために、H29-3 と S3 の P1=100kN, 150kN, 202kN (202kN は H29-3 の Pmax) 時点 の横方向鉄筋のひずみ分布を図-14 に示す。S3 の定着 具から1本目のゲージ No.6 は, H29-3 の密に配置した横 方向鉄筋の3本目の位置に相当する。P1=100kN時点で ひずみ分布にはほとんど差はないが、荷重レベルが上が ってくるにつれ、定着具に近い位置のひずみは鉄筋量の 多い H29-3 が小さい値を示していることから、定着具付 近にひび割れが発生して以降は横方向鉄筋の効果が働い ていることがわかる。しかしながら, P1<sub>80</sub>は Pd 以下であ るため、どの程度の鉄筋量を配置すればよいかは検討を 要する。また、P1-62関係から、定着部としての定着性 能はS3と同等と考えられる。

## 4. まとめ

(1)機械式定着を用いる場合、定着具の抜出しが生じ始める荷重が半円形フックや直筋定着より小さく、抜出しが生じ始めてからの増加量も大きいことがわかった。(2)機械式定着具には半円形フックと同等の定着長低減



効果は期待できず,本研究の仕様の場合,5¢程度の 低減効果を有していることがわかった。

(3)定着体の定着性能を向上させるには、機械式定着具手前の支圧力と付着力の相互作用を排除するために、定着具手前の鉄筋の一部の区間をアンボンドにすること、また、定着具付近にひび割れが発生した後の定着具の抜出しを防止するために、定着具前面に横方向鉄筋を密に配置することが有効であることがわかった。ただし、今回の仕様では、比較すべき供試体間では、定着部としての定着性能は同等であったため、今後さらに最適な仕様を検討していく必要がある。

本研究で得られた成果は、本研究における実験の仕様 に関するものであり、使用する定着具や条件が異なれば 結果が変わる可能性があることに留意する必要がある。

# 参考文献

- 日本建築総合試験所:機械式鉄筋定着工法設計指針, 機械式鉄筋定着工法研究委員会,2006
- 2) 土木学会:コンクリート標準示方書(設計編),丸

善, 2012.12

- 3) 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,2007.8
- 田所敏弥,谷村幸裕,徳永光宏,米田大樹:高架橋 接合部における機械式定着を用いた定着部の静的 引張特性,コンクリート工学年次論文集,Vol.31, No.2, pp.691-696, 2009
- 5) 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I報 付着割裂破壊を支配する要因に ついての実験結果-,日本建築学会論文報告集,第 319号,1982.2
- Orangun,C.O., Jirsa,J.O. and Breen,J.E. : A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, Journal of ACI, Proceedings Vol.74, No.3, pp.114-122, 1977.3
- Thompson,M.A., Jirsa,J.O., Breen,J.E. and Meinheit,D.
  F. : Behaviour of Multiple Lap Splices in Wide Sections, Journal of ACI, Proceedings Vol.76, pp.227-248, 1979.2
- 8) 土木学会:コンクリートライブラリー141 コンク リートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針 (案),丸善,2014.3