

論文 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

田所 敏弥*1・谷村 幸裕*2・徳永 光宏*3・米田 大樹*4

要旨： ラーメン高架橋の接合部は、梁柱等の鉄筋が輻輳することから、施工性に優れた機械式定着が用いられる場合がある。しかしながら、接合部に用いられる機械式定着については、必ずしもその性能が明確になっているわけではない。本研究では、定着部に要求される性能のうち、静的引張特性に関する載荷試験を行った。その結果、接合部に機械式定着を用いる場合、現行の設計法にしたがって算定した定着長を確保することによって、所定の性能を有することがわかった。ただし、定着板から脆性的な破壊が生じる場合があるため、一般的に用いられる標準フックに比べ、定着性能が劣る可能性があることがわかった。

キーワード： ラーメン高架橋, 接合部, 定着, 機械式定着, 標準フック

1. はじめに

耐震設計で考慮すべき地震力の増大にともない、ラーメン高架橋の鉄筋量が増大する傾向にある。そのため、梁柱等の軸方向鉄筋が輻輳する接合部においては、標準フックにかわり、施工性に優れた機械式定着を軸方向鉄筋の定着に用いる場合がある。しかしながら、接合部における機械式定着を用いた定着部の性能は、必ずしも明確になっていないのが現状である。建築分野においては、機械式定着に関して、機械式鉄筋定着工法設計指針¹⁾が発表され、機械式定着の適用方法がとりまとめられている。ただし、例えば、L形接合部に関しては、梁降伏先行の供試体がほとんどであり、一般的な土木構造物を対象にした柱降伏先行の実験は少ない。また、柱の軸方向鉄筋の静的引張特性に関して、軸方向鉄筋を取り囲む方向に配置された補強鉄筋やかぶりの影響を定量的に評価した実験も少ない。

機械式定着の保有すべき性能は、適用箇所によって異なる。例えば、鉄道ラーメン高架橋の鉄筋コンクリート（以下、RC）柱の接合部には、一般に、静的な引張りおよび高応力の繰返し応力に対する性能が要求され、また、縦梁においては、さらに列車荷重等の疲労作用に対する性能が要求される。

マッシュアップなコンクリートに埋込まれた鉄筋とラーメン高架橋の接合部のように、かぶりが比較的小さい部位に埋込まれた鉄筋の定着特性は異なる可能性が大きい。そこで、本研究では、図-1に示すラーメン高架橋の上層梁柱接合部における、RC柱外面の軸方向鉄筋を対象に、接合部を模擬したコンクリートに埋込まれた鉄筋の一軸引張試験を行い、ラーメン高架橋の接合部に適用されるべき定着構造について検討した。

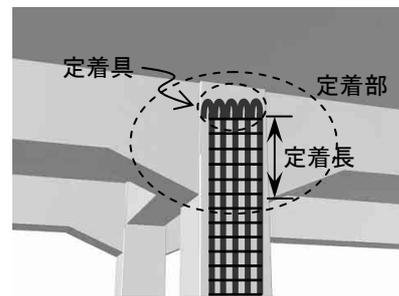


図-1 ラーメン高架橋の梁柱接合部
(用語の定義：土木学会鉄筋定着・継手指針²⁾)

表-1 鉄筋の引張試験結果

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	記事
D25	533.8	181.0	軸方向鉄筋
φ26	1048.8	207.9	軸方向鉄筋
D13	367.0	175.4	横方向鉄筋

2. 接合部に定着される鉄筋の一軸引張試験

2.1 実験方法および供試体

本研究では、機械式定着をラーメン高架橋の接合部に用いる場合を対象に定着板を用いた機械式定着の一軸引張試験を行うとともに、標準フックおよび所定の定着長を確保した定着具なしの鉄筋の一軸引張試験を行い、定着部の静的引張特性について検討した。

実験は、藤井・森田らの一軸引張試験²⁾を参考に、ラーメン高架橋の接合部を模擬した供試体から4本の鉄筋を一方に加力する一軸引張試験を行った。供試体の諸元、材料試験値、および供試体形状の例を、表-1、表-2および図-2に、また、加力装置を図-3に示す。供試体は、実際のラーメン高架橋の梁柱接合部の約70%縮小をモデル化した形状とし、鉄筋径D25、純かぶり40mm、

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 副主任研究員 博(工) (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究室長 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)

*4 前田建設工業(株) 技術研究所 技術開発土木グループ(土木構造) 工修 (正会員)

表-2 供試体諸元の一覧

No.	定着具	l	c	p_w	f_c	軸方向鉄筋	横方向鉄筋	記事
S1	フック	550	40	0.57	26.4	D25 (SD490) ×4	D13ctc100	半円形フック
S2	フック	250	40	0.28	26.3	D25 (SD490) ×4	D13ctc100	半円形フック
S3	定着板	550	40	0.57	26.4	D25 (SD490) ×4	D13ctc100	基準供試体
S4	定着板	550	40	0.28	26.4	φ 26 (SBPR) ×4	D13ctc100	鉄筋付着なし
S5	定着板	550	80	0.57	26.7	D25 (SD490) ×4	D13ctc100	かぶり
S6	定着板	550	120	0.57	26.4	D25 (SD490) ×4	D13ctc100	かぶり
S7	定着板	550	40	0.28	26.7	D25 (SD490) ×4	D13ctc200	横方向鉄筋比
S8	定着板	550	40	1.14	27.0	D25 (SD490) ×4	D13ctc50	横方向鉄筋比
S9	なし	800	40	0.57	27.2	D25 (SD490) ×4	D13ctc100	定着具なし
S10	なし	400	40	0.57	27.9	D25 (SD490) ×4	D13ctc100	定着具なし
S11	定着板	450,550	40	0.28	26.9	D25 (SD490) ×4	D13ctc200	定着板配置
S12	定着板	450,650	40	0.28	26.9	D25 (SD490) ×4	D13ctc200	定着板配置

l : 埋込み長さ(mm), c : かぶり(mm), p_w : 横方向鉄筋比(%), f_c : コンクリート圧縮強度(N/mm²), あきはすべて 63 (mm),

半円形フックは下向き

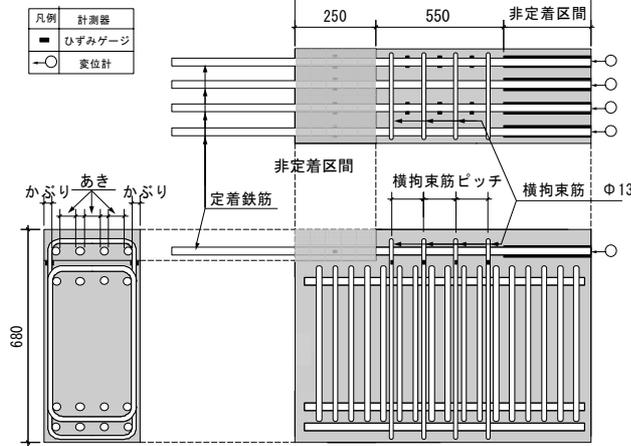


図-2 供試体寸法の例 (S10) (単位: mm)

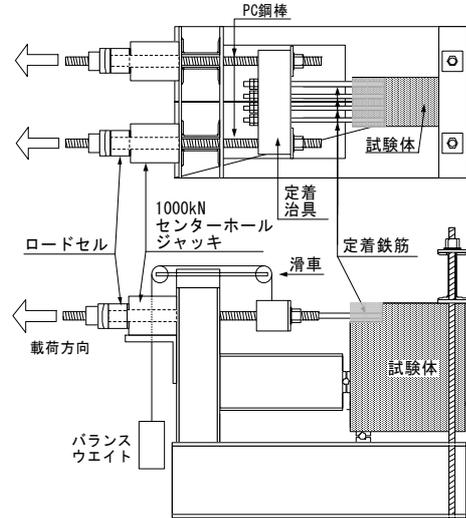


図-3 加力装置図 (単位: mm)

横方向鉄筋比 0.56%, コンクリート圧縮強度 27N/mm²を基準とした。また、機械式定着の形状については、土木学会鉄筋定着・継手指針³⁾に示されるように、様々な種類が提案、開発されているが、本研究では、機械式定着の基本的な静的引張特性を把握することを目的に、直径 63mm (=2.5φ程度, φ: 定着される鉄筋径), 厚さ 30mm の円板を鉄筋に圧着した定着構造を用いた。本研究で用いた機械式定着の定着具を図-4 に示す。なお、打設は、供試体を 90 度回転させ、定着具の方向からコンクリートの打込みを行ったため、ブリーディング等の影響は、小さいものと考えられる。

鉄筋の定着長であるコンクリートへの埋込み長さは、基準供試体 S3 の 550mm を基本とした。定着長 550mm は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に示される Orangun ら^{5),6)}の提案した式 (1) に、定着される鉄筋の降伏強度を 337N/mm² と仮定したときの定着長 32φ から定着具の効果として 10φ を減じた値である。本研究では、定着部の評価を式 (1) を簡略化した設計式ではなく、実験式である式 (1) を用いて行うこととした。



図-4 本研究で用いた機械式定着

$$l_d = \frac{f_{syd}}{1.25\sqrt{f'_{cd}}} - 13.3 \quad (1)$$

$$l_d = \frac{f_{syd}}{0.318 + 0.795K_c} \cdot \phi$$

ここに, l_d : 鉄筋の定着長

f_{syd} : 鉄筋の設計引張降伏強度

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度

ϕ : 定着する鉄筋径

$$K_c = (c_b/\phi) + \{15A_t/(s \cdot \phi)\}$$

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

A_t : 仮定される割裂破壊断面に垂直な横方向鉄筋の断面積

s : 横方向鉄筋の間隔

γ_c, γ_s : 材料係数, 本研究では 1.0 とする

表-3 実験結果の一覧

No.	定着具	l	c	p_w	設計耐力	最大荷重	最大/設計	破壊形態
S1	フック	550	40	0.57	171	258 ^{※2}	1.51 ^{※2}	鉄筋降伏
S2	フック	250	40	0.28	123	234 ^{※2}	2.07 ^{※2}	鉄筋降伏
S3	定着板	550	40	0.57	171	238	1.39	コーン破壊
S4	定着板	550	40	0.28	—	125	—	コーン破壊
S5	定着板	550	80	0.57	172	247	1.44	コーン破壊
S6	定着板	550	120	0.57	171	250 ^{※2}	1.47 ^{※2}	鉄筋降伏
S7	定着板	550	40	0.28	156	201	1.29	コーン破壊
S8	定着板	550	40	1.14	205	254 ^{※2}	1.24 ^{※2}	鉄筋降伏
S9	なし	800	40	0.57	173	253 ^{※2}	1.46 ^{※2}	鉄筋降伏
S10	なし	400	40	0.57	110	162	1.47	付着破壊
S11	定着板	450,550	40	0.28	149 ^{※1}	163	1.09	コーン破壊
S12	定着板	450,650	40	0.28	157 ^{※1}	182	1.16	コーン破壊

※1：4本の平均埋込み長さを用いて算定，※2：鉄筋降伏時の荷重のため，この数値以上と考えられる

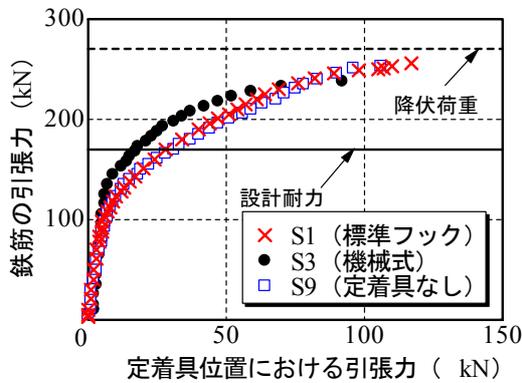


図-5 定着具に作用する引張力 (定着構造別)

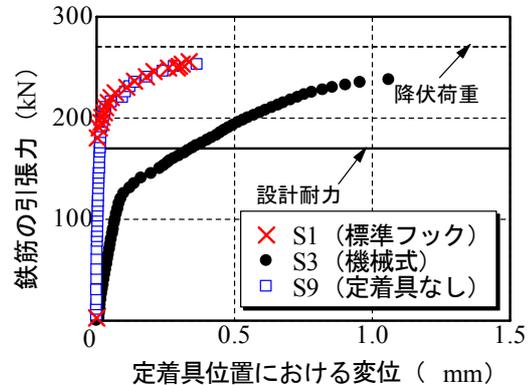


図-6 定着具位置における変位 (定着構造別)

なお、降伏強度 $337\text{N}/\text{mm}^2$ は、式 (1) の定着長 l を基準供試体の埋込み長さとし、基準供試体の諸元、および材料試験値を用いて、鉄筋の強度を逆算した数値である。また、供試体には、鉄筋にグリースを塗布し、付着抵抗を除去した非定着区間 250mm 設け、破壊荷重とともに定着部の破壊形態を検討するため、軸方向鉄筋は SD490 の高強度鉄筋を用いることとした。

2.2 実験パラメータ

本研究では、鉄筋の定着に影響が大きいと考えられる定着構造、かぶり、および横方向鉄筋比をおもなパラメータとして実験を行った。

定着構造が定着部の静的引張特性におよぼす影響を検討するため、標準フックを用いた S1、機械式定着を用いた S3、および定着具を用いず所定の定着長を確保した S9 による実験を行った。また、かぶりが機械式定着を用いた定着部の特性におよぼす影響を検討するため、純かぶりを $40, 80, 120\text{mm}$ とした S3, S5, S6 による実験を行い、横方向鉄筋が機械式定着を用いた定着部の特性におよぼす影響を検討するため、横方向鉄筋比を $0.28, 0.57, 1.14\%$ とした、S3, S7, S8 による実験を行った。さらに、標準フックおよび所定の定着長を確保した定着構造に

ついては、定着性能が良好であることが考えられたため、定着長を所定の長さから、減じた S2, S10 による実験を行い、機械式定着を用いた定着部の破壊形態と鉄筋付着の影響を検討するため PC 鋼棒に定着板を圧着した S4 による実験を行った。

また、施工にあたっては、部材接合部は鉄筋が輻輳し、定着板の配置が困難なことから、隣接した定着板を軸方向に千鳥に配置する場合がみられる。そこで、定着板の位置を変更した場合の影響を検討するため、隣接した定着板を軸方向に千鳥に配置した S11, S12 による実験を行った。

2.3 試験結果の評価方法

本研究においては、既往の評価式においても求められる耐力と実験により得られた最大荷重を比較することにより、定着部の静的引張特性を検討した。ここで、既往の評価式よりも求められる設計耐力は、供試体に埋込まれた鉄筋の長さを定着長とし、式 (1) を用いて算定した鉄筋の降伏強度に断面積を乗じた値とし、最大荷重は実験により得られた鉄筋 1 本あたりの平均の最大荷重とした。

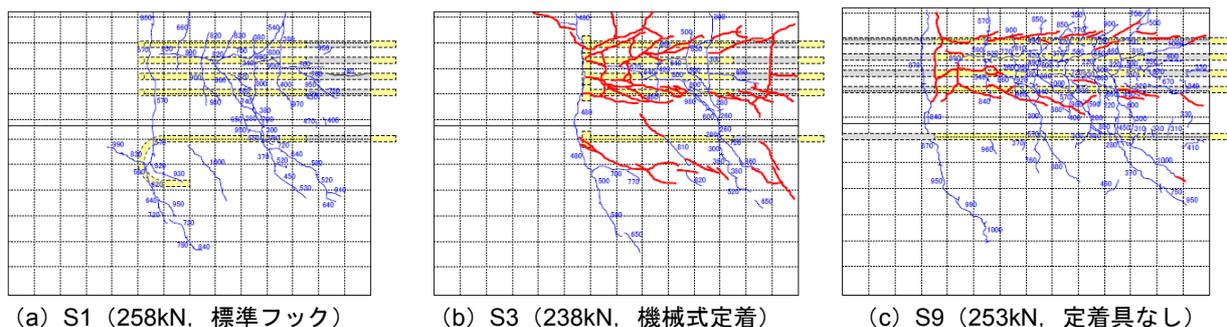


図-7 破壊形態および最大荷重

3. 接合部に定着される鉄筋の静的引張特性

3.1 静的引張特性におよぼす定着構造の影響

(1) 標準フックおよび定着長を確保した定着構造

実験結果の一覧を設計耐力および破壊形態とともに表-3に示す。本研究では、高強度鉄筋を使用したため、定着具からの破壊、または、付着破壊に先行し、鉄筋降伏により実験を終了した供試体がみられた。また、実験では、4本の鉄筋に引張力を完全に均等に作用させることはできないため、引張力を鉄筋の本数で除した1本あたりの引張力が、材料試験から得られた降伏荷重270kNより小さな荷重で鉄筋降伏に至った。

鉄筋1本あたりの引張力と定着具に作用する引張力の関係、引張力と定着具位置の抜出しの関係は定着構造が異なるS1(標準フック)、S3(機械式定着)、およびS9(所定の定着長を確保した定着具なしの鉄筋)をあわせて、図-5、図-6に示す。なお、定着具に作用する引張力は、定着具位置に貼付したひずみゲージより算定した。また、実験終了時の破壊状況を図-7に示す。S1とS9は、定着性能が良好であり、ともに鉄筋降伏により実験を終了し、急激な荷重低下はみられなかった。

ここで、S1におけるフックと、コンクリートとの付着による鉄筋の引張力の分担について検討した。図-5より、設計耐力170kN程度のときの標準フックの分担力は28kN、鉄筋の分担力は143kNと算定される。また、S9について、埋込み位置0~550mmの範囲と550~800mmの範囲のコンクリートとの付着による鉄筋の分担力は、S1と同様であった。また、550mmの定着具位置における抜出し状況についても、S1とS9は、同様の傾向がみられた。設計耐力である170kN程度までは、両者とも抜出しはみられず、良好な定着性能を保持していることがわかる。さらに、設計耐力と実験で得られた最大荷重の比は、1.51、または1.46であり十分な耐力を有していることがわかる。ただし、実験においては、鉄筋降伏により最大荷重に達していることから、付着破壊、または、定着部の破壊に起因する最大荷重は、さらに大きいと考えられる。そこで、鉄筋の埋込み長さを減じたS2(標準フック)、S10(定着具なし)を用いて、さらに、耐力に

ついて検討した。その結果、表-3に示すようにS2については、設計耐力と最大荷重の比は2.01、S10については、1.47となった。S2については、埋込み長さを10φとしたが定着部の破壊はみられず、鉄筋降伏により最大荷重に達した。また、S10については、鉄筋の付着破壊により最大荷重に達した。このことから、定着具のない鉄筋の設計耐力に対する余裕は、1.5倍程度である考えることができる。また、標準フックについては、設計耐力に対し、余裕が2倍以上であると考えられる。

このように耐力の限界値は、標準フックと定着長を確保した定着具なしの鉄筋で異なるが、設計において考慮する所定の引張力の範囲においては、引張力に対する応力伝達機構、および耐荷性能がほぼ同じと考えられることから、フックの効果として定着長を10φ減じる現行の設計方法が、接合部においても適用できると考えられる。

(2) 機械式定着を用いた定着構造

定着板を用いたS3は、238kNに達したとき定着板付近からひび割れが発生し、脆性的な破壊に至った。ここでは、この破壊形態をコーン破壊と呼ぶこととする。このように、定着板を用いたS3においては、最大荷重が設計耐力171kNを上回っているため、静的な引張力に対しては、設計で想定する所定の性能は有しているものの、標準フック、または、所定の定着長を確保した定着具なしの鉄筋に比べると定着性能が劣る可能性がある。また、鉄筋と定着板の引張力の分担は、標準フックと異なり、最終的に定着板に大きな引張力が作用し、定着板からコーン破壊することがわかった。また、引張力と定着板位置の抜出しの関係においても、S1、S9と異なり、設計耐力に達する前に抜出しが生じ、また、その後の増加量も大きいことがわかる。

このように、機械式定着を接合部に用いる場合、標準フックおよび定着長を確保した定着具のない鉄筋よりも定着耐力が劣る可能性があることがわかった。また、設計耐力と実験より得られた最大荷重との比は、1.4程度であるが、鉄筋の実強度のばらつきを考慮すると必ずしも十分な余裕量ではないと考えられる。このため、接合部に機械式定着を適用する場合については、高応力の

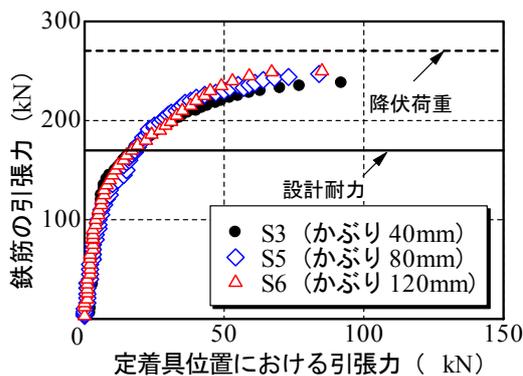


図-8 定着板に作用する引張力（かぶり別）

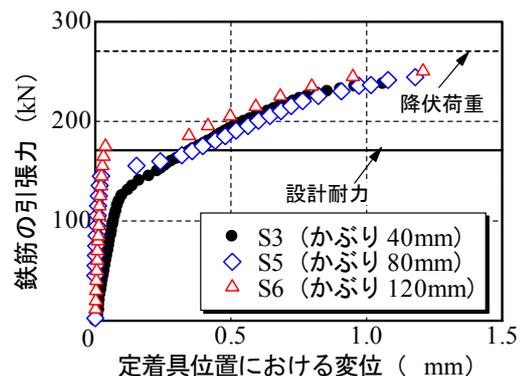


図-9 定着板位置における変位（かぶり別）

繰返し特性に関し検討するとともに、横方向鉄筋の増加、または、十分なかぶりの確保などにより、脆性的な定着部のコーン破壊に配慮することが重要と考えられる。

3.2 静的引張特性におよぼすかぶりの影響

ラーメン高架橋の接合部に用いられる機械式定着においては、定着板からコーン破壊が発生する可能性があり、標準フックに比べ定着性能が劣ることがわかった。これは、マッシュなコンクリートに比べ、接合部においては、かぶりが小さいためと考えられる。そこで、接合部において機械式定着を用いた定着部の静的引張特性におよぼすかぶりの影響を検討し、機械式定着を用いる場合の接合部の構造細目について検討した。

ここでは、かぶり 40, 80, 120mm とした S3, S5, S6 によって、かぶりが定着部の特性におよぼす影響を検討した。なお、かぶり以外の供試体諸元は、すべて同じである。また、供試体は、実大の約 70% の縮小モデルであるため、本研究で設定したかぶりは、実構造物において、60, 120, 180mm 程度と考えることができる。

実験より得られた引張力と定着板に作用する引張力の関係、引張力と定着板位置の抜出しの関係を図-8、図-9 に示す。鉄筋と定着板の引張力の分担は、かぶりが小さい方が若干、定着板に作用する引張力は大きくなるが、有意な差はほとんどみられなかった。また、破壊時に定着板に作用する引張力は、100kN 程度であった。ここで、定着板からのコーン破壊と定着板に作用する荷重について検討するため、鉄筋とコンクリートの付着を除去するため、PC 鋼棒に定着板を圧着した S4 による実験を行った。S4 については、鉄筋における引張力の分担がないため、最大荷重 125kN が定着板に作用すると考えられる。このように定着板に作用する荷重があるレベル、本研究においては、100kN 程度に達すると定着板からの脆性的な破壊が生じると考えられる。

また、定着位置における抜出しの状況については、かぶりの大きさにより抜出しの発生荷重が異なることがわかる。さらに、最大荷重とかぶりの関係を図-10 に示す。式 (1) からわかるように、標準的な配筋の場合、

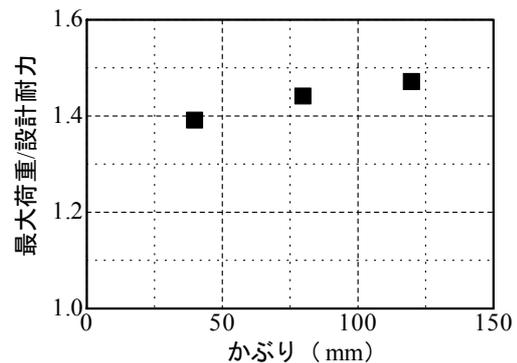


図-10 かぶりが耐力におよぼす影響

定着耐力にかぶりが影響しないことがわかる。しかし、機械式定着におけるコーン破壊は、定着板から破壊であるため、図-10 に示すように、かぶりを増加させることによって定着耐力が増加することがわかった。なお、かぶりを 120mm とした S6 については、鉄筋降伏で実験を終了したため、定着部における最大荷重は、さらに増加すると考えられる。

3.3 静的引張特性におよぼす横方向鉄筋の影響

機械式定着を用いることにより、定着板からのコーン破壊により耐力が低下する可能性があるため、横方向鉄筋の増加による定着部の性能の向上について検討した。ここでは、接合部の横方向鉄筋比 0.57% を基準とし、0.28%, 1.14% とした S3, S7, S8 について実験を行い、横方向鉄筋の影響について検討した。

実験より得られた引張力と定着板に作用する引張力の関係、引張力と定着板位置の抜出しの関係を図-11、図-12 に示す。横方向鉄筋比が異なるため、供試体の設計耐力は異なるが、いずれの供試体においても、設計で考慮している所定の耐力を有していることがわかる。また、横方向鉄筋の増加にしたがって、定着される鉄筋の定着性能が向上するため、結果として定着板に作用する引張力が低下し、抜出し変位も小さくなると考えられる。このように横方向鉄筋比を増加させることによって、機械式定着を用いた定着部の性能が向上することが確認できた。

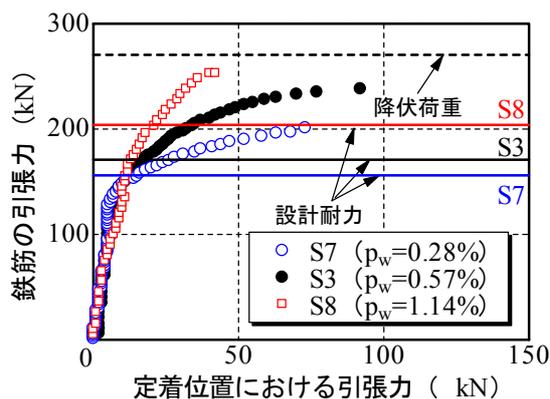


図-11 定着板に作用する引張力（横方向鉄筋別）

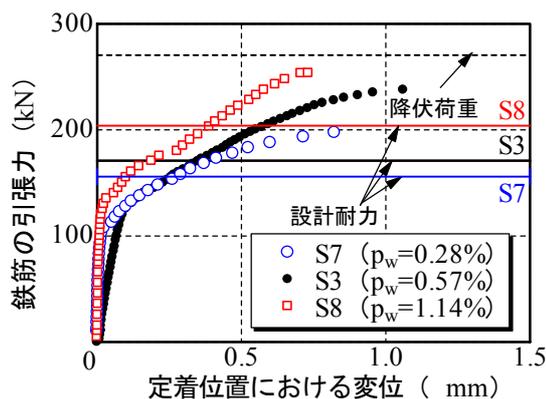


図-12 定着板位置における変位（横方向鉄筋別）

3.4 静的引張特性におよぼす定着板配置の影響

鉄筋が輻輳する接合部においては、鉄筋のあきが十分に確保できないため、施工現場において、隣接する定着板の位置をずらして配置する場合がある。そこで、定着板の配置状況が耐力におよぼす影響について検討した。

引張力を作用させる4本の鉄筋のうち、2本の埋込み長さを450mm、残り2本の埋込み長さを550mmとし、千鳥に配置した供試体をS11、2本の鉄筋を450mm、残り2本を650mmとした供試体をS12とした。また、表-3に示す設計耐力の算定においては、4本の鉄筋の平均の埋込み長さを用いた。なお、S12の平均の埋込み長さは550mmであり、定着板の配置以外は、S7と同じ諸元である。

表-3に示すように、本研究においては、定着板を千鳥に配置することによって、最大荷重、または設計耐力に対する余裕が、10%程度低下した。これは、定着板を千鳥に配置することによって、鉄筋および定着板に均等に引張力が作用しないため、過大な引張力が作用した定着板において破壊が先行するためと考えられる。なお、設計耐力に対する余裕は、本研究の場合、10%程度であるため、鉄筋の実強度のばらつきを考慮すると十分とはいえない。このことから、施工現場における、定着板配置の変更は、定着部の性能を低下させる可能性があるため、十分な配慮が必要といえる。

4. まとめ

ラーメン高架橋の接合部における、機械式定着を用いた定着部の静的引張特性に関する本研究により、以下の知見が得られた。

- (1) 機械式定着を用いる場合、既往の算定式にしたがって算定した定着長を確保することによって、所定の性能を確保できると考えられる。
- (2) 機械式定着を用いた定着部の耐力、抜出しに関する特性は、標準フック、および所定の定着長を確保した鉄筋に比べ劣る可能性がある。また、定着板にあ

るレベルの引張力が作用すると定着板から脆性的な破壊が生じる可能性があることがわかった。

- (3) 機械式定着を用いた定着部においては、かぶりの増加によって、定着耐力が増加することがわかった。また、横方向鉄筋の影響については、既往の算定式によって、妥当に評価できることを確認した。
- (4) 平均の埋込み長さが同等な場合においても、定着板を軸方向にずらして配置することによって、不均等な引張力が定着板に作用するため、定着部の性能が低下する可能性があることがわかった。

本研究は、機械式定着を用いた定着部の静的引張特性に関するものである。そのため、ラーメン高架橋の柱等の定着に機械式定着を適用する場合については、高応力の繰返し特性に関する検討等、適用される部位に要求される性能をあわせて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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) 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
- 3) 土木学会：鉄筋定着・継手指針：土木学会コンクリートライブラリー128，2007.8
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），丸善，2007.12
- 5) 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
- 6) 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