

論文 鉄道 RC ラーメン高架橋の杭主筋定着に関する実験的研究

柏原 茂*1・谷村 幸裕*2・高瀬 直輝*3・近藤 眞生*4

要旨: 近年の鉄筋コンクリート (以下, RC) 構造物の耐震設計は, 構造物の靱性に基づく設計が行われている。部材の変形性能が十分に発揮されるためには, 部材接合部が十分な耐力を有し, 軸方向鉄筋が接合部内で十分に定着されることが必要不可欠である。鉄道 RC ラーメン高架橋は 1 柱 1 杭形式が一般的であり, 通常内向きフックを付けているが, 接合部は地中梁・柱・杭部材の鉄筋が交差するためフック定着は施工性が常に問題となっている。本研究では, 地中梁・柱・杭の接合部を模した縮小試験体の交番載荷実験を行い, 杭軸方向鉄筋の定着長および定着方式をパラメータが杭部材の変形に与える影響について検討を行った。

キーワード: 地中梁・柱・杭接合部, 定着

1. はじめに

鉄道 RC ラーメン高架橋は大地震時において崩壊を避けるため, 部材が塑性化することでエネルギー吸収量が大きくなるように設計されるのが一般的である¹⁾。鉄道における RC 部材の変形性能は, 軸方向鉄筋の抜け出しを考慮したものであり, 軸方向鉄筋が地中梁・柱・杭の部材接合部で十分に定着されているのが前提条件である。

本研究では, 杭部材が塑性化するラーメン高架橋の地中梁・柱・杭の接合部を模した縮小試験体の交番載荷試験から, 軸方向鉄筋の定着に関して, 実験的に検討するものである。

試験体のパラメータは, 表 1 に示すように杭部材の軸方向鉄筋の定着方法および定着長とした。ここで, 定着長は図 1 に示すように杭基部からの長さをさす。試験体 No.6 は試験体 No.2 と同じ定着方法, 定着長でコンクリート強度の違いを着目したものである。なお, 柱部材の軸方向鉄筋は, フックを付けて定着させた。

また, 試験体各部材の諸元を表 2 に, 実験時における材料試験の結果を表 3, 4 に示す。鉄筋はすべての部材において軸方向鉄筋, 横方向鉄筋とも SD345 を用いた。

表 1 試験体のパラメータ

試験体 No.	杭軸方向鉄筋	
	定着方法	定着長 (mm)
1	半円形フック(内向き)	20φ=320
2	直筋(フック無し)	30φ=480
3	直筋(フック無し)	20φ=320
4	半円形フック(外向き)	20φ=320
5	定着プレート	20φ=320
6	直筋(フック無し)	30φ=480

φ: 杭の軸方向鉄筋の径 (=16mm)

2. 実験の概要

2.1 試験体

試験体の諸元は, 試験体は, 標準的な 1 柱 1 杭式 RC ラーメン高架橋の地中梁・柱・杭接合部を模擬し, 実物の約 50% 程度の縮小モデルによる十字形試験体とした。試験体の概略形状, 配筋, 定着プレートの形状を図 1 に示す。

*1 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 コンクリート構造担当 (正会員)
 *2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 コンクリート構造担当 工修 (正会員)
 *3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 基礎・土構造担当
 *4 前田建設工業株式会社 技術本部 技術研究所 第 1 gr. 工修 (正会員)

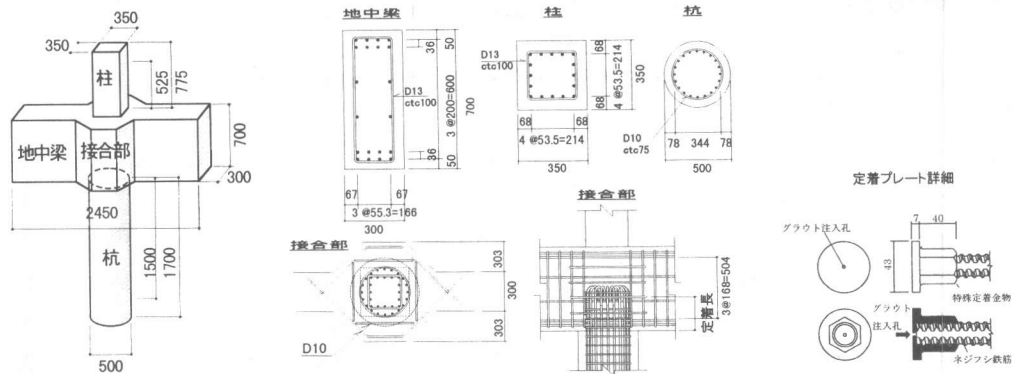


図1 試験体概要

表2 試験体の諸元

部材	断面形状	軸方向鉄筋					横方向鉄筋		
		径	総本数	引張鉄筋	軸方向鉄筋比	引張鉄筋比	径	間隔	横方向鉄筋比
杭	φ500	D16	20	5	0.020	0.005	D10	75	0.004
柱	350×350	D16	16	5	0.026	0.010	D13	100	0.007
地中梁	300×700	D16	16	8	0.018	0.008	D13	100	0.008
		D13	4	—	—	—			

2.2 試験方法

載荷試験装置の概要図を図2に示す。図のように、柱および杭部材の先端をピン固定し、地中梁部材の先端に油圧ジャッキを取り付け、上下方向に静的に正負交番載荷を行った。軸力は、柱部材に取り付けた油圧ジャッキにより導入し、コンクリートの設計基準強度 ($f_{ck}=27\text{N/mm}^2$) の10%に相当する530kNを載荷した。

載荷は、ひび割れ発生時を正負1回ずつ載荷した後、杭部材最外縁の軸方向鉄筋が降伏する変位 δy を基準として、その整数倍の変位で正負交番載荷を行った。ここで、制御の変位 δy は地中梁載荷点を結ぶ線の垂線を基準とした杭部材の先端（ピン固定点）までの距離とした。また、各載荷サイクルにおいて正負3回ずつの静的交番載荷を行った。実験は、杭基部曲げモーメントが降伏時の杭基部曲げモーメントに比べて十分に低下するまで行った。

表3 コンクリート強度試験結果(N/mm²)

	部位	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
圧縮強度	杭	30.6	31.8	32.7	31.3	32.0	31.6
	地中梁	37.6	39.9	29.9	34.2	30.5	23.6
	柱	37.1	38.0	29.4	32.0	32.9	31.7
引張強度	杭	2.81	2.65	2.73	2.61	2.61	2.86
	地中梁	3.57	3.31	3.06	3.28	3.28	2.19
	柱	3.29	3.33	2.46	3.30	3.30	2.90

表4 鉄筋材料試験結果(N/mm²)

鉄筋径	引張降伏強度	引張強度	弾性係数 × 10 ⁵	適用
D16	379.8	553.9	1.84	No.1~4 杭
	383.2	560.5	1.86	柱・梁
	377.8	580.0	1.81	No.5 杭
	383.2	557.2	1.85	柱・梁
	393.2	597.1	1.90	No.6 杭・柱・梁
D13	371.7	519.5	1.77	No.1~4 柱・梁
	393.8	587.3	1.85	No.5 柱・梁
	376.0	549.0	1.66	No.6 柱・梁
D10	352.2	503.2	1.70	No.1~5 杭
	373.6	550.3	1.69	No.6 杭

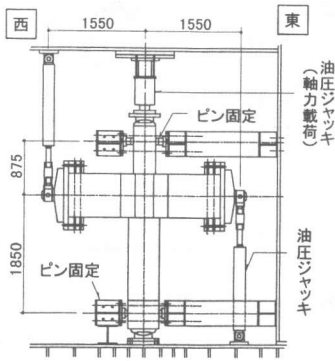


図2 載荷装置概要

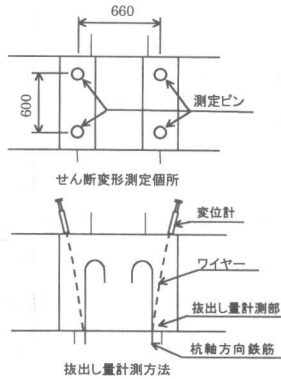


図3 計測方法

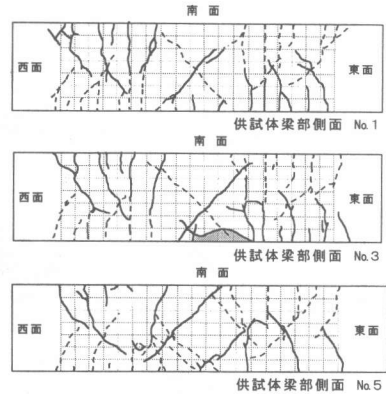


図4 ひび割れ状況

2.3 計測項目

地中梁のせん断力、柱軸力および試験体各部に埋め込んだ標点の水平鉛直変位、各鉄筋のひずみを計測した。また、図3に示すように杭部材基部の軸方向鉄筋にワイヤーを溶接し、その伸縮の値から杭の軸方向鉄筋の抜け出し量を計測した。接合部のせん断変形は、接合部に埋め込んだ測定ピンの変位量から算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 ひびわれ状況

地中梁先端に取り付けたジャッキの加力により、各部材の基部に曲げひび割れが生じた。さらに加力すると、各部材基部の曲げモーメントが大きくなり杭部材の最外縁の軸方向鉄筋が降伏した。このとき、柱部材、地中梁部材の軸方向鉄筋は降伏していない。また、 $1\delta y$ もしくは $2\delta y$ の載荷途中で、No.5 を除く試験体の接合部に接合部中心付近を通るようなせん断ひび割れが斜めに生じた。しかしながら、 $3\delta y$ 以降の載荷でせん断ひび割れが発達することはなかった。No.5 試験体は接合部の中心付近を通らず、菱形形状のせん断ひび割れが生じた。せん断ひび割れ発生位置が定着プレートの配置位置付近であることから、定着プレートの支圧により、ひび割れが発生したものと考えられる。

ここで、ひび割れ状況の例を図4に示す。

その後、 $2\delta y$ もしくは $3\delta y$ で最大荷重に達

し、さらに変形を増すと荷重が低下していった。最大荷重以降は、柱部材、地中梁部材の軸方向鉄筋のひずみは増加せず、杭部材の変形のみが大きくなっていった。No.1,2,4,5 は、変形の増加に伴い、杭部材の曲げひび割れ幅が大きくなり、かぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋が座屈した。そして、 $6\delta y$ もしくは $7\delta y$ で降伏荷重を下回り、 $7\delta y$ の載荷途中で杭部材の軸方向鉄筋が破断し、大きく荷重が低下した。

また、No.3,6 は、 $2\delta y$ で最大荷重に達した後、杭部材の軸方向鉄筋の抜け出し量が大きくなり、急激に荷重が低下し、 $4\delta y$ で降伏荷重を下回った。杭部材は、曲げひび割れ幅が大きくなる程度で、損傷が大きくなることはなかった。しかし、杭部材基部周辺のフーチングのコンクリートが損傷し、円錐型に剥落した。これは、軸方向鉄筋が引き抜かれることにより、生じたものと考えられる。

3.2 杭部材の耐力および変形

各試験体における荷重および変位の実験結果の一覧を表5に示す。表の荷重は接合部中心の曲げモーメントの釣合から求めた杭先端支承の反力を、変位は杭部材先端の変形量を示す。降伏荷重 P_y および降伏変位 δy は、杭部材最外縁の軸方向鉄筋が降伏したときの荷重および変位である。終局変位 δn は、降伏荷重を維持できる最大の変位を示す。

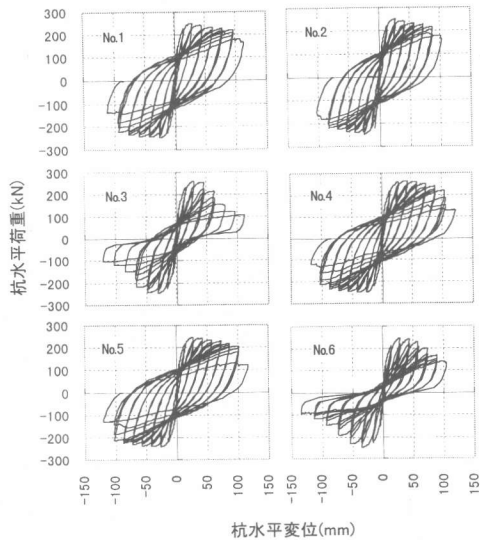


図5 荷重—変位

また、各試験体の荷重—変位曲線を、図5に示す。No. 1, 2, 4, 5は、紡錘形のループを描いている。No.3,6は、 $3\delta y$ 以降で大きく荷重が低下しており、ループの形状もスリップ型となっている。図6に各試験体の荷重—変位関係の包絡線を比較したものを示す。No.3, No.6が他の試験体に比べて、急激に荷重が低下していることがわかる。また、図7に各試験体のエネルギー吸収量の推移を示す。No.3,6がその他の試験体に比べてエネルギー吸収量が小さいことがわかる。

3.4 杭の軸方向鉄筋の定着

各試験体における制御変位 $1\delta y$, $4\delta y$, $6\delta y$ の時に対応するワイヤーにより計測した杭部材軸方向鉄筋の抜け出し量を表6に示す。No.3は他の試験体に比べて抜け出し量が大きく、 $4\delta y$ における抜け出し量は2倍以上となっている。図8に制御した変位を変形成分(①接合部のせん断変形, ②杭の軸方向鉄筋の抜け出しによる変形, ③その他杭部材等による変形)を分離したものを示す。ここで、接合部のせん断変形は接合部に埋め込んだ測定ピンから対角方向の変位量を求め、せん断変形角を算出し、せん

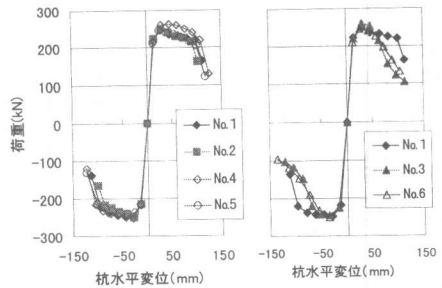


図6 荷重—変位の包絡線

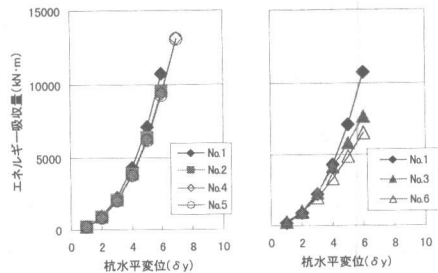


図7 エネルギー吸収量

表5 杭部材の荷重および変位

No.		降伏荷重 Py (kN)	最大荷重 Pmax (kN)	降伏変位 δy (mm)	終局変位 δn (mm)
1	正載荷	222.3	247.8	13.94	88.73
	負載荷	217.9	248.5	12.61	93.97
2	正載荷	221.2	249.8	13.02	79.30
	負載荷	215.8	249.2	13.08	85.01
3	正載荷	220.9	258.9	13.48	59.74
	負載荷	225.7	245.8	16.52	61.42
4	正載荷	215.6	262.1	13.57	105.46
	負載荷	215.8	251.5	13.27	100.47
5	正載荷	213.0	244.1	13.19	100.29
	負載荷	215.9	239.1	13.62	97.54
6	正載荷	209.9	251.6	13.98	67.32
	負載荷	225.7	249.0	17.31	77.13

断変形分の変位を求めた。杭の軸方向鉄筋の抜け出しによる変形は鉄筋の押し込み側、引き抜き側の値の差から回転角を求め、変形量を算出した。No.3,6は制御変位に対しても、軸方向鉄筋の抜け出し量による変形割合がほとんどを占める結果となっている。

図9に、ワイヤー計測による抜け出し量 $s①$ とひずみ分布の積分値から求まる抜け出し量 $s②$ との差を $-5\delta y \sim 5\delta y$ で比較した。この図から

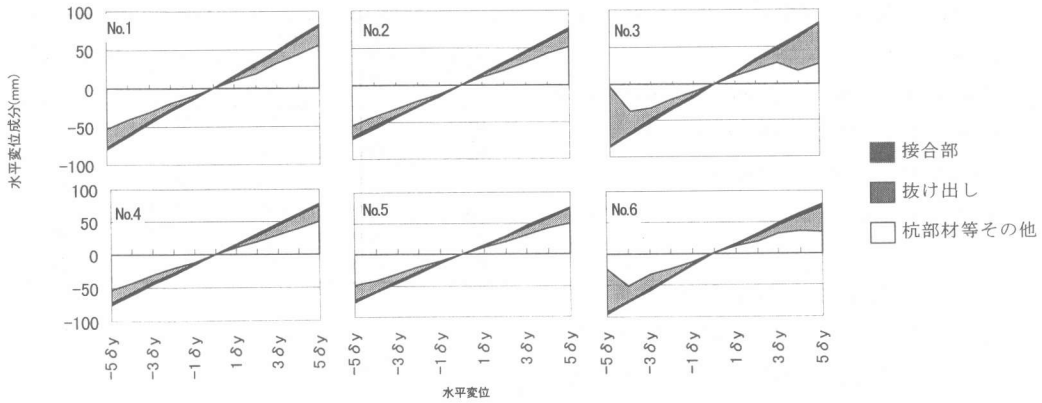


図8 変位の分離

表6 杭の軸方向鉄筋の抜け出し量(mm)

		1 δ y	4 δ y	6 δ y
		1 回目	1 回目	1 回目
No.1	正載荷	0.60	3.62	5.78
	負載荷	0.61	3.84	5.74
No.2	正載荷	0.53	3.17	5.35
	負載荷	0.37	3.06	4.84
No.3	正載荷	0.80	9.89	—
	負載荷	0.87	6.02	18.37
No.4	正載荷	0.66	3.73	6.34
	負載荷	0.39	3.09	5.20
No.5	正載荷	0.59	3.32	5.98
	負載荷	0.59	3.32	6.02
No.6	正載荷	0.64	4.12	12.31
	負載荷	1.02	5.44	15.98

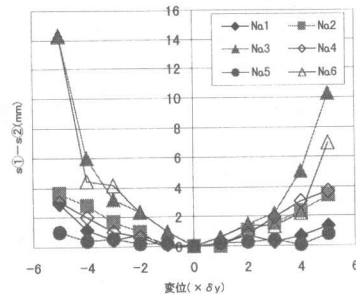


図9 付着切れによる抜け出し量

No.3, 6 試験体は大きな値を示している。s ①—s ②は鉄筋の付着切れによる抜け出し量と考えられると、この抜け出し量により履歴ループがスリップ型となりエネルギー吸収量が他の試験体と比較して小さくなったものと考えられる。

No.1,2,4,5 は付着切れによる抜け出し量はNo.3,6 に比べて少ない。そのため履歴ループが紡錘型となったものと考えられる。

また、各試験体の定着長 l と計算で求まる必要定着長 l_d およびじん性率を表7に示す。図10に定着長 l と必要定着長 l_d との比 l/l_d と、じん性率(終局変位 δ_n / 降伏変位 δ_y) の関係を示す。なお、必要定着長 $l_d^{(1)}$ は各試験体の材料強度および定着方式から以下のように計算した。定着方式がフックまたは定着プレートの必要定着長は、(1)式から 10ϕ 減じた値とする。

直筋方式の必要定着長

$$l_d = l_0 + l' \quad \dots (1)$$

フックまたは定着プレートの必要定着長

$$l_d = l_0 + l' - 10\phi \quad \dots (2)$$

ここで、 l_0 : 基本定着長で(3)式により求める。

$$l_0 = \frac{\frac{f_{sy}}{1.25\sqrt{f'_c}} - 13.3}{0.318 + 0.795 K_c} \phi \quad \dots (3)$$

f_{sy} : 鉄筋の引張降伏強度 (N/mm²)

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

ϕ : 定着する鉄筋の直径(mm)

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

c_b : 定着する鉄筋のあきの 1/2 (=19mm)

A_t : 割裂破壊断面と交差する横方向鉄筋の断面積²⁾ (=28.53mm²)

$$A_t = A_0 \frac{n_1}{n_2} \quad \dots (4)$$

A_0 : 横方向鉄筋 1 本の断面積 (=71.33mm²)

n_1 : 割裂破壊断面と交わる横方向鉄筋の本数 (=2)

n_2 : 引張側 90° の範囲の杭軸方向鉄筋本数 (=5)

s : 横方向鉄筋の中心間隔 (=150mm)

l' : 定着が有効とならない範囲。

$10\phi = 160\text{mm}$ とした。

図10では直筋定着の場合、 l/l_d が高いほどじん性率が大きくなっている。No.2,6は定着長が同じであるが、接合部のコンクリート強度が高いNo.2は定着性能が改善され、図9の付着切れによる抜け出し量が小さくなったため、じん性率が大きくなっているものと考えられる。

定着方式をフックまたは定着プレートとしているNo.1,4,5は、じん性率が高い結果となっており、十分定着されているものと考えられる。No.1,4,5の定着長は 20ϕ であるが、直筋定着で定着長が 30ϕ のNo.2,6に比べて高いじん性率を得られる結果となっている。接合部のコンクリート強度が今回の試験体の中で一番高く、定着性能が一番よいと思われるNo.2試験体と比べてもじん性率が高いことから、フックおよび定着プレートの効果により、少なくとも直筋で約 10ϕ 多く定着していると同等な効果があった。これは文献1)でもフック定着の場合は直筋の定着長から 10ϕ 減じてよいこととしており、今回の実験結果からも 10ϕ の効果は確認できた。

試験体No.2は、破壊形態がNo.1,4,5と同じであり、履歴ループも紡錘型となっているが、No.1,4,5と比べ若干じん性率が劣る結果となった。これは必要定着長が、若干不足しているためと考えられる。

4. おわりに

杭軸方向鉄筋の定着長および定着方式をパラメータとして杭部材の変形に与える影響を検討する目的で実験を行った。

この結果から次のことが明らかになった。

- (1) 杭の軸方向鉄筋の抜け出し量が大きい試験体は、エネルギー吸収量が小さい。

表7 定着長

試験体	定着長 $l(\text{mm})$	必要定着長 $l_d(\text{mm})$	l/l_d	じん性率
No.1	320	572	0.78	6.88
No.2	480	555	0.86	6.30
No.3	320	640	0.50	4.04
No.4	320	599	0.73	7.67
No.5	320	631	0.68	7.38
No.6	480	744	0.65	4.62

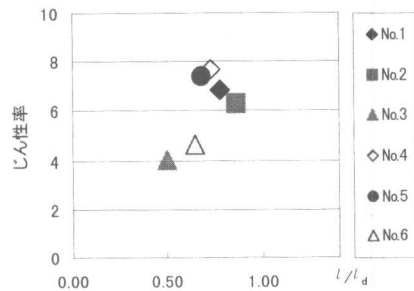


図10 じん性率- l/l_d

- (2) ワイヤー式により求めた軸方向鉄筋の抜け出し量と、ひずみ積分から求めた抜け出し量の差を付着切れによる抜け出し量と考えると、この抜け出し量が大きい試験体(定着長と必要定着長の比が低い直筋定着方式の試験体)は履歴ループがスリップ型となったものと考えられる。
- (3) 定着長が 30ϕ の直筋定着では接合部のコンクリート強度が高くなることで、定着性能が改善され、じん性率が増加する結果となった。
- (4) 本試験体の接合部形状であれば、フックの内、外向き定着および定着プレートによるどの定着方式も定着に対しては、十分有効に働いていると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会: (平成8年制定) コンクリート標準示方書 設計編, 1996.
- 2) 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), 1999