

論文 鋼繊維補強コンクリートを用いた高架橋接合部における杭軸方向鉄筋の定着長算定手法に関する研究

徳永 光宏*¹・谷村 幸裕*²・伊藤 始*³・米田 大樹*⁴

要旨 : RC ラーメン高架橋における柱, 地中梁, 杭の接合部では, 各部材の鉄筋が交差するため密な配筋となっている。本研究では, 鋼繊維補強コンクリートによる軸方向鉄筋の定着性能向上効果を定量的に把握するために鉄筋の引き抜き実験を行い, 鋼繊維補強効果を加えた軸方向鉄筋の基本定着長算定式を提案した。また, 高架橋接合部を模擬した試験体の正負交番荷重試験から, 提案する基本定着長算定式について検証を行った。

キーワード : 鋼繊維補強コンクリート, 接合部, 定着鉄筋, 基本定着長

1. はじめに

RC ラーメン高架橋における柱, 地中梁, 杭の部材接合部では, 各部材の鉄筋が交差するため密な配筋となっている。そのため, 施工性が低下するとともに, コンクリートの確実な充填性についても注意が必要となるなど, 所定の品質を確保するための課題が生じている。これに対して既往の研究¹⁾では, 鋼繊維補強コンクリートを用いることで, 図-1 に示すように, フックや帯鉄筋を簡略化できることが実験的に確認されているが, 実構造物の設計法に反映するには至っていない。そこで, 本研究では鋼繊維補強コンクリートによる軸方向鉄筋の定着性能向上効果を定量的に把握するために鉄筋の引き抜き実験を行い, 鋼繊維補強効果を加えた軸方向鉄筋の基本定着長算定式を提案した。また, ラーメン高架橋接合部を模擬した試験体の正負交番荷重実験から, 提案する算定式についての検証を行った。

2. 鉄筋の引き抜き試験

2.1 試験体および試験方法

図-2 に試験体形状および諸元を, 図-3 に荷重装置を示す。試験は, 試験体断面内に埋め込まれた4本の鉄

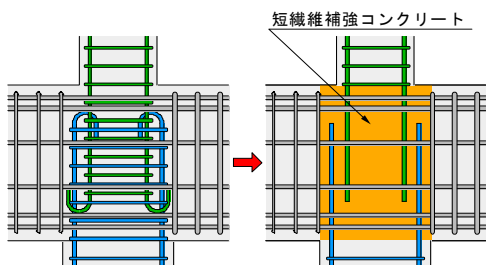
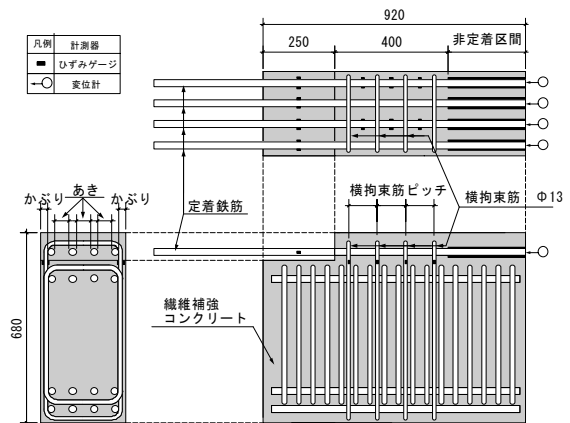


図-1 鋼繊維補強コンクリートによる配筋

筋を2本のPC鋼棒を介して引き抜き, 荷重端で同一の変位を与えるようにした。なお, 試験体形状および荷重



単位 : mm

図-2 試験体形状 (試験体 No.0 : 基準試験体)

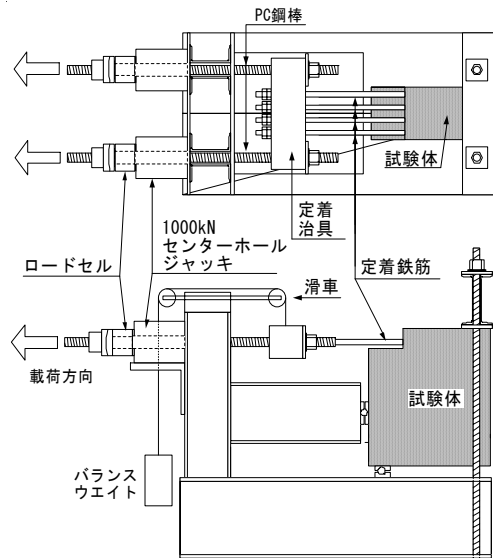


図-3 荷重装置

単位 : mm

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修(正会員)
 *2 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工博(正会員)
 *3 前田建設工業(株) 技術研究所 研究開発G 工博(正会員)
 *4 前田建設工業(株) 技術研究所 研究開発G 工修(正会員)

方法については、藤井らにより行われている方法²⁾を参考とした。

2.2 試験結果の評価方法

横方向鉄筋によって補強されている場合の鉄筋の基本定着長は式(1)により算定される。³⁾⁴⁾

$$l_{d0} = \frac{\frac{f_{syd}}{1.25\sqrt{f'_{cd}}} - 13.3}{0.318 + 0.795K_c} \cdot \phi \quad (1)$$

ここに、 l_{d0} : 鉄筋の基本定着長 (mm)

f_{syd} : 鉄筋の設計引張降伏強度 (N/mm²)

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (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)

$$A_t = A_0 + A'_0 \cdot (s/s') \leq 2A_0$$

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 (mm²)

A_0 : 杭の帯鉄筋1本の断面積 (mm²)

A'_0 : 接合部の補強鉄筋1本の断面積 (mm²)

s : 接合部の杭の帯鉄筋の最大間隔 (mm)

s' : 接合部の補強鉄筋の間隔 (mm)

鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)⁵⁾では、式(1)を簡略化したものとして、式(2)が定められている。

$$l_{d0} = \alpha_b \cdot \frac{f_{syd}}{4f_{bod}} \cdot \phi \quad (2)$$

f_{bod} : コンクリートの設計付着強度 (N/mm²)

$$f_{bod} = f_{bok} / \gamma_c \quad (\gamma_c: \text{材料係数 } 1.3)$$

$$f_{bok} = 0.28f'_{ck}{}^{2/3}$$

f'_{ck} : コンクリートの圧縮強度

$$\alpha_b = (0.75/K_c) + 0.2 \quad (0.5 \leq \alpha_b \leq 1.0)$$

また、式中のコンクリートのかぶりや横方向鉄筋などによる影響については α_b で考慮している。すなわち定着鉄筋の付着強度を τ_u とすると、式(3)のように表される。

$$\tau_u = f_{bod} \times \frac{1}{\alpha_b} = f_{bod} \times \frac{1}{\frac{0.75}{\frac{c_b}{\phi} + \frac{15A_t}{s \cdot \phi}} + 0.2} \quad (3)$$

鋼繊維混入による効果については、式(1)からひびわれや横方向鉄筋等の影響を要因毎に定量化して考慮することは、今回試験の結果からは困難と考えられる。そこで、本検討では式(2)を用いて、係数 α_b に鋼繊維混入による効果全体を乗じる形で取り込むこととした。

また、試験の結果から得られた最大荷重 P_u から、最大付着応力 τ_{uexp} は式(4)により算出される。

表-1 試験体諸元

No.	コンクリート 圧縮強度 f'_{ck} (N/mm ²)	繊維 混入 率 p_f (%)	定着鉄筋			横補強筋		α_b	
			鉄筋 径 ϕ (mm)	かぶり 又はあ きの1/2 c_b (mm)	定着 長 / (mm)	c_b/ϕ	鉄筋 径 ϕ (mm)		ピッ チ s (mm)
0	25.2	—	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
1	28.7	0.50	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
2	26.5	0.75	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
3	20.9	1.00	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
4	48.3	0.50	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
5	62.4	0.50	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
6	25.0	0.50	25.4	42.8	400	1.69	12.7	50	0.51
7	22.8	1.00	25.4	42.8	400	1.69	12.7	50	0.51
8	29.4	—	31.8	32.1	400	1.01	12.7	100	0.77
9	27.9	0.50	31.8	32.1	400	1.01	12.7	100	0.77
10	21.7	1.00	31.8	32.1	400	1.01	12.7	100	0.77
11	28.7	0.50	25.4	18.8	400	0.74	12.7	100	0.87
12	27.9	0.50	25.4	29.8	400	1.17	12.7	100	0.68
13	25.0	0.50	25.4	36.8	400	1.45	12.7	100	0.61
14	27.3	—	25.4	31.5	800	1.24	12.7	100	0.66
15	25.8	1.00	25.4	31.5	400	1.24	12.7	100	0.66

表-2 使用材料の機械的性質

(a) 鉄筋

材質	鉄筋径 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	静弾性係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)	仕様部位
SD345	13	374	1.76	No.0~13 横方向鉄筋
	13	367	1.75	No.14, 15 横方向鉄筋
SD490	25	534	1.81	No.14, 15 軸方向鉄筋
USD685	25	711	1.84	No.0~7, 11~13 軸方向鉄筋
	32	792	1.86	No.8~10 軸方向鉄筋

(b) 鋼繊維

繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	規格引張強度 (N/mm ²)
30	0.60	1100

$$\tau_{uexp} = \frac{P_u}{\phi \pi l \times 4} \quad (4)$$

ここに、

P_u : ロードセルにより計測した荷重 (kN)

l : 定着長 (mm)

本検討では、鋼繊維によるコンクリートの付着強度の向上効果を定量化することを目的に、鋼繊維混入率 p_f (0~1.0%) および係数 α_b (0.51~0.87) をパラメータとした。試験体諸元を表-1に示す。表中、コンクリートの圧縮強度 f'_{ck} については、繊維混入後の試験日における値である。表-2に使用材料の機械的性質を示す。

2.3 試験結果

試験の結果得られた最大荷重 P_u 、最大付着応力 τ_{uexp} および最大付着応力を f_{bod} で除して無次元化した τ_{uexp}/f_{bod} の値を表-3に示す。

(1) 鋼繊維体積混入率の影響

τ_{uexp} と τ_u との比である τ_{uexp}/τ_u と p_f の関係を図-4に示す。これによれば、現行の基本定着長算定式による τ_u は、鋼繊維補強コンクリートを用いた試験体の付着強度について、過小に評価する傾向にあることがわかる。また、 τ_{uexp}/τ_u の値は p_f の増加に対して単調増加する傾向にあることがわかる。これは、鋼繊維がコンクリートの割裂ひび割れの形成を抑制する、すなわち架橋効果により付着強度が向上するためと考えられる。図中点線は、試験結果から求めた回帰直線を表す。

(2) α_b の影響

鋼繊維を混入していない一般的なコンクリートにおいては、付着強度に対するコンクリートのかぶりや横方向鉄筋などによる影響は、係数 α_b で考慮されている。そこで、鋼繊維の混入率毎の τ_{uexp}/f_{bod} と α_b の関係を図-5に示す。なお、 f_{bod} については材料強度として載荷時の材料試験結果を用いて計算した。いずれの場合についても材料係数、部材係数は 1.0 として計算した。これによれば、鋼繊維を混入した場合でも、 τ_{uexp}/f_{bod} の値は、鋼繊維を混入しない試験体と同様に、係数 α_b との間に反比例の関係にあることがわかる。

そこで、本検討では鋼繊維によるコンクリートの付着強度の向上効果を係数 k_s として盛り込み、式(5)、式(6)のような形で表すことができると考えた。

$$\tau_{cal} = f_{bod} \times \frac{1}{\alpha_b} \times k_s \quad (5)$$

$$k_s = 1 + a \cdot p_f \quad (6)$$

ここに、

a : 付着強度の向上効果に対する鋼繊維の混入率の影響を表す係数

p_f : 短繊維体積混入率 ($0 \leq p_f \leq 0.01$)

ここで、図中の点線は後述する 2.4 の式(7)による計算値を示したものである。

2.4 定着長算定式の提案

試験から得られる最大付着応力 τ_{uexp} と式(5)から求める τ_{cal} との差が、最も小さくなるように式(6)中の係数 a の値を求めると、 $a=47.4$ となる。なお、本検討では設計の簡便性を考慮して $a=50$ として検討を行うこととする。

以上より、鋼繊維の混入効果を考慮した基本定着長の算定式を式(7)~式(8)のように設定した。

$$l_{d0} = \frac{\alpha_b \cdot f_{syd}}{k_s \cdot 4f_{bod}} \cdot \phi \quad (7)$$

$$k_s = 1 + 50p_f \quad (8)$$

表-3 試験結果一覧

No.	最大荷重 P_u (kN)	最大 付着応力 τ_{uexp} (N/mm ²)	τ_{uexp}/f_{bod}
0	434.0	3.4	1.41
1	559.5	4.4	1.67
2	531.7	4.2	1.67
3	560.1	4.4	2.07
4	725.1	5.7	1.53
5	902.9	7.1	1.61
6	743.2	5.8	2.43
7	818.2	6.4	2.85
8	579.5	3.6	1.36
9	699.2	4.4	1.70
10	649.4	4.1	1.86
11	593.8	4.7	1.77
12	628.7	4.9	1.91
13	591.8	4.6	1.94
14	1012.9	4.0	1.56
15	651.9	5.1	2.09

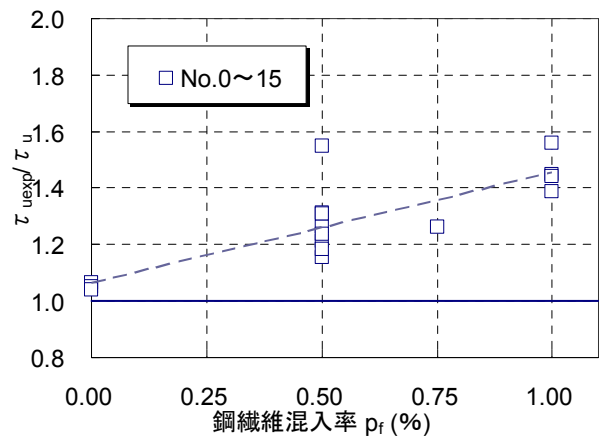


図-4 $\tau_{uexp}/f_{bod}-p_f$ 関係

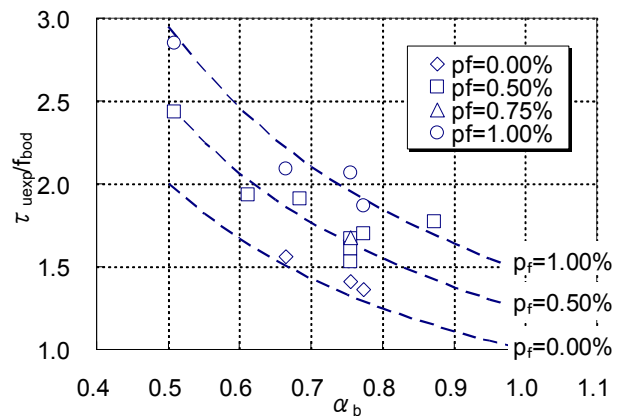


図-5 $\tau_{uexp}/f_{bod}-\alpha_b$ 関係

3. 部材試験による提案式の検証

3.1 試験概要

(1) 試験体

試験体形状および諸元を図-6、図-7 および表-4に示す。また、使用した鉄筋および鋼繊維の機械的性質を表-5に示す。試験体は標準的な1柱1杭形式のRCラ

表-4 試験体諸元

No	杭軸方向鉄筋		接合部形状(mm)			杭軸方向鉄筋(mm)			杭接合部帯鉄筋		接合部補強鉄筋		繊維混入率	コンクリート圧縮強度(N/mm ²)		
	定着方法	定着長	Bj	Tj	Hj	径φ	かぶり	水平あき	径(mm)	ピッチ(mm)	径(mm)	ピッチ(mm)		杭	接合部	柱
0	フック無し	30 φ	760	760	700	15.9	70.0	38.1	9.5	96.7	9.5	168.0	-	31.8	39.9	38.0
S1	フック無し	30 φ							1.0%	37.7			30.8	32.0		
S2	フック無し	30 φ							0.5%	35.6			31.8	34.5		
S3	フック無し	15 φ			1.0%				29.9	27.2			41.5			
S4	フック無し	20 φ			0.5%				31.3	29.5			48.7			
S5	フック無し	25 φ	1.0%	41.9	39.9	37.4										

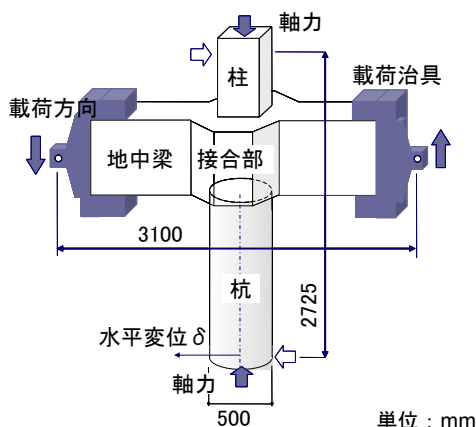


図-6 試験体形状図

一メン高架橋の地中梁、柱および杭部材の接合部を模擬した十字架試験体とした。試験体は実大構造物の50%程度の縮小モデルとし、杭軸方向鉄筋の定着長さおよび水平あき、繊維混入率、 f_{ck} および接合部の寸法をパラメータとした。なお、表中に示す定着長は、杭基部（接合部下端）からの距離である。

基準試験体 No.0 は比較のための試験体であり、接合部について従来の普通コンクリートを用いている。その他試験体については、接合部内の杭および柱部材の横方向鉄筋を配置せず、接合部は鋼繊維補強コンクリートを用いた仕様となっている。なお、試験体 S1～S5 について、定着長の低減係数 α_b は 0.57～0.67 の範囲とした。

(2) 試験方法

荷重は、図-6 に示すように、地中梁を上下方向に、杭最外縁の軸方向鉄筋が降伏する水平変位 δ_y の整数倍で3回ずつ正負交番荷重を行った。ここで、水平変位 δ は地中梁の荷重点を結ぶ線の垂線を基準とした杭先端までの距離とした。軸力はコンクリートの設計基準強度 27N/mm^2 の10%に相当する 2.7N/mm^2 (530kN) とした。

3.2 試験結果

(1) 破壊形態

試験により得られた荷重-変位関係、および鉄道構造物等設計標準・解説(コンクリート構造物)⁵⁾により計算される Y 点、M 点、N 点を図-8 に重ねて示す。各試験体の破壊形態は、概ね次の2通りに分類される。
①最大荷重に達した後に杭の軸方向鉄筋が座屈し、その

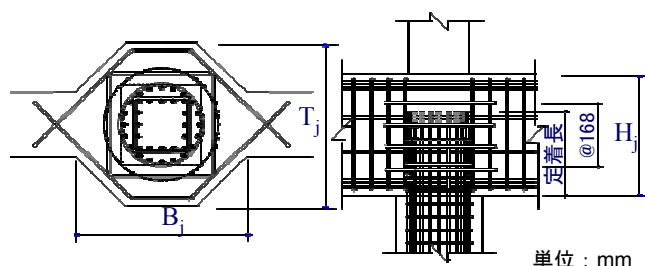


図-7 接合部形状 (試験体 No.0 : 基準試験体)

表-5 鉄筋の材料試験結果

鉄筋径 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 ($\times 10^5\text{N/mm}^2$)	適用箇所
D19	405.5	602.7	1.84	No.S3, S4 地中梁
	463.1	631.6	1.96	No.S5 地中梁
D16	379.8	553.9	1.84	No.0 杭
	383.2	560.5	1.86	No.0 柱・地中梁
	393.2	597.1	1.90	No.S1, S2 杭・柱・地中梁
	355.8	542.8	1.75	No.S3, S4 杭・柱
D13	372.8	550.7	1.95	No.S5 杭・柱
	371.7	519.5	1.77	No.0 柱・地中梁
	376.0	549.0	1.66	No.S1, S2 柱・地中梁
	395.9	529.9	1.85	No.S3, S4 柱・地中梁
D10	404.9	557.2	1.86	No.S5 柱・地中梁
	352.2	503.2	1.70	No.0 杭
	373.6	550.3	1.69	No.S1, S2 杭・柱・地中梁
	391.5	534.4	1.83	No.S3, S4 杭
	386.9	550.7	1.95	No.S5 杭

後終局時には鉄筋が破断する試験体

②杭の軸方向鉄筋が大きく座屈することなく、抜け出すことで荷重低下する試験体

従来の定着方法をとった基準試験体 No.0 は、 $2\delta_y$ で最大荷重に達した後、杭部材の曲げひび割れ幅の増加に伴ってかぶりコンクリートがはく落し、軸方向鉄筋が座屈した。そして $5\delta_y$ もしくは $6\delta_y$ で降伏荷重を下回り、杭部材の軸方向鉄筋の破断に伴って $7\delta_y$ 荷重時に荷重が大きく低下した。破壊形態としては前者に分類される。

また、試験体のうち、S1, S2, S5 については、基準試験体と同様に接合部に斜めひび割れを生じるものの、ひび割れ幅は拡大することなく、ひび割れが小さくなった。また、これら試験体は接合部内に帯鉄筋を配置していな

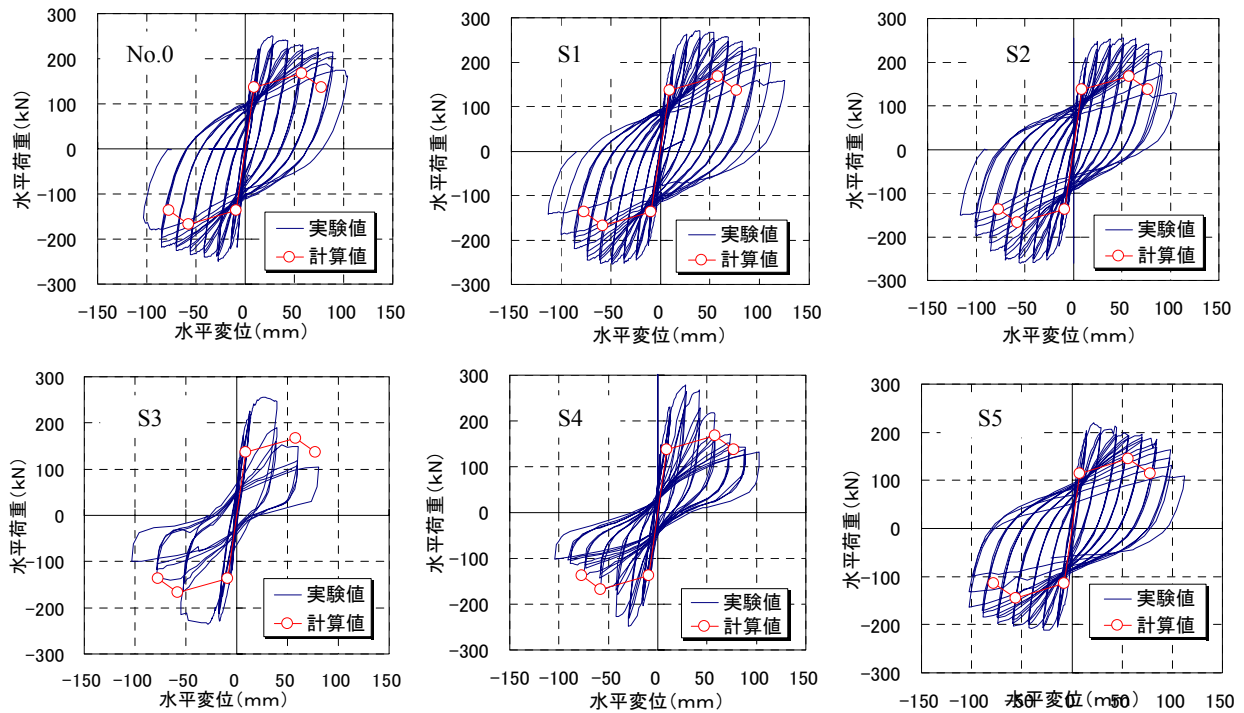


図-8 荷重-変位関係

いにかかわらず、杭の軸方向鉄筋の伸出が大きくなることはなかった。その後は、基準試験体同様に杭基部に塑性ヒンジを形成し、杭の軸方向鉄筋が座屈、破断した後に荷重低下が見られた。

一方で、試験体 S3, S4 は $2\delta y$ もしくは $3\delta y$ で最大荷重に達した後、杭軸方向鉄筋の伸出量が大きくなり、急激に荷重が低下し降伏荷重を下回った。杭部材はかぶりコンクリートははく落する程度で、杭の軸方向鉄筋が大きく座屈することはなかった。これは、接合部の鉄筋が伸出したことで、塑性ヒンジが未形成となったためと考えられる。

(2) 荷重-変位関係

図-8 に荷重-変位関係を示す。また、履歴吸収エネルギーの推移を図-9 に示す。試験体 S1, S2, S5 については、従来の定着方法をとった基準試験体とほぼ同等の耐力、変形性能が得られた。また、鋼繊維の混入率のみを変化させた試験体 S1, S2 では、何れも所定の定着長が確保されており、混入率によって耐力、変形性能に差はみられなかった。これに対し、試験体 S3, S4 では、他の試験体に比べて $3\delta y$ 以降の荷重低下が著しく大きく、履歴ループの形状も細長くなった。そのため、図-9 からエネルギー吸収量で比較すると、試験体 S3, S4 は他の試験体に比べて劣る結果となっていることが分かる。なお、他の試験体については基準試験体 No.0 とほぼ同等のエネルギー吸収量となった。

(3) 杭軸方向鉄筋の伸出量

図-10 に付着切れによる伸出量の推移を示す。付着切れによる伸出量は、最外縁の軸方向鉄筋基部に取り

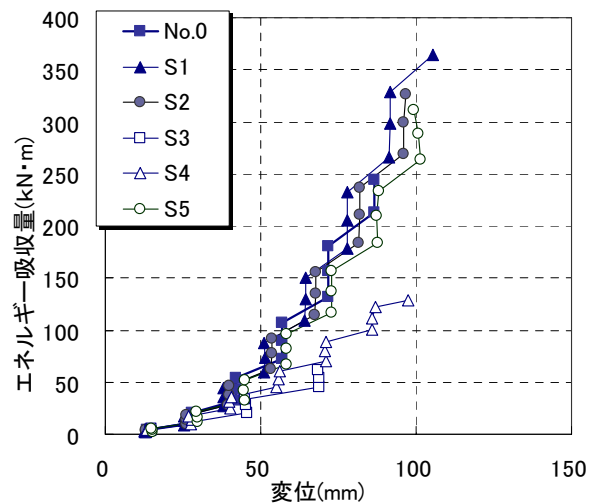


図-9 エネルギー吸収量

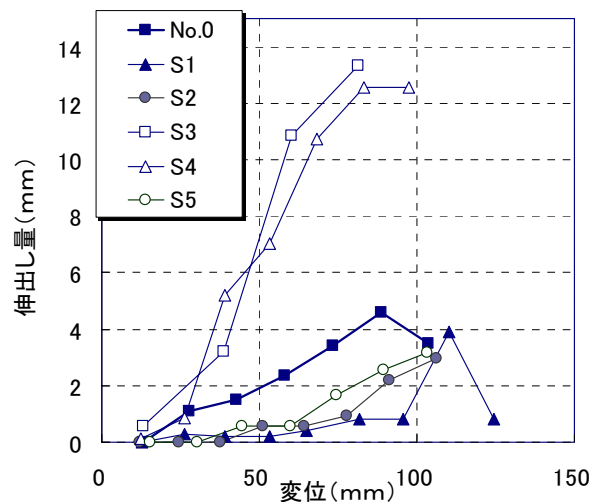


図-10 付着切れによる伸出量

付けたワイヤーの伸縮量から接合部内の杭軸方向鉄筋に貼り付けたひずみゲージより計測されたひずみ分布を長さ方向に積分することによって得られる鉄筋の変形量を減じた値である。図-10 から試験体 S1, S2, S5 は基準試験体と比べてもほぼ同等の伸出し量に留まっている。これに対して試験体 S3, S4 は他の試験体に比べて著しく大きくなっており、他の試験体の終局時での伸出し量相当である 4mm を $3\delta_y$ 載荷時ですでに超過する結果となった。また、試験体間におけるこれらの傾向は前節で述べた荷重-変位関係に見られる傾向に一致する。このことから荷重の低下が杭軸方向鉄筋の伸出しによるものと考えられる。試験体 S5 については正側載荷時に計測を失敗したため、負側載荷時の値を示した。

3.3 提案式の検証

表-6 に、試験体の鉄筋の埋込み長さ l と設計上必要とされる定着長 l_d との比 (l/l_d) の一覧を示す。ここで、必要定着長 l_d は式(7)により算定した基本定着長 l_{d0} に、現行の設計⁹⁾と同様に定着長が有効とならない範囲 10ϕ を加えた値である。また、図-11 に試験体の埋込み長さ l と提案式により算定した必要定着長 l_d の関係を示す。

図-11 において、実線より左側が接合部に要求される安全性であり、各試験体は前項「3.2 (1) 破壊形態」における分類に従って、①および②に属する試験体をそれぞれ gr.1 および gr.2 に分類した。

これによると、定着長が必要定着長 l_d を満たす試験体は、基準試験体と同等の性能を示した前者に、 l/l_d が 1.0 以下であり定着不十分となる試験体は、杭の軸方向鉄筋が伸出した後者に一致する結果となった。また、gr.1 に属する試験体は基準試験体と比べて、同程度実線近くに分布していることから、提案式が現行式と同等な経済性を有していると考えられる。これにより、提案式の十分な精度が確認された。

4. まとめ

本研究によって行った試験および検討の範囲内で、以下の知見が得られた。

- (1) 試験の結果より、接合部に鋼繊維コンクリートを用いた場合の定着効果の定量化を行なった。提案式によって、定着性能の向上効果を考慮した定着長が算定可能となった。
- (2) ラーメン高架橋接合部を模擬した試験体の正負交番載荷試験から、提案式についての検証を行った。試験の結果、提案式は安全性および経済性について載荷試験の結果を十分に再現できており、提案式が十分な精度を有していることが確認された。
- (3) 部材試験から、接合部内の柱、杭の横補強鉄筋を鋼繊維補強コンクリートに置換した試験体は、変形性

表-6 必要定着長一覧

No.	試験体埋込み長さ l ($\times \phi$)	必要定着長 l_d ($\times \phi$)		l/l_d	記事
		l_{d0} ($\times \phi$)			
0	30.0	25.3	15.3	1.19	
S1	30.0	25.9	15.9	1.16	
S2	30.0	28.7	18.7	1.04	
S3	15.0	25.7	15.7	0.58	定着不十分
S4	20.0	27.8	17.8	0.72	定着不十分
S5	25.0	20.8	10.8	1.20	

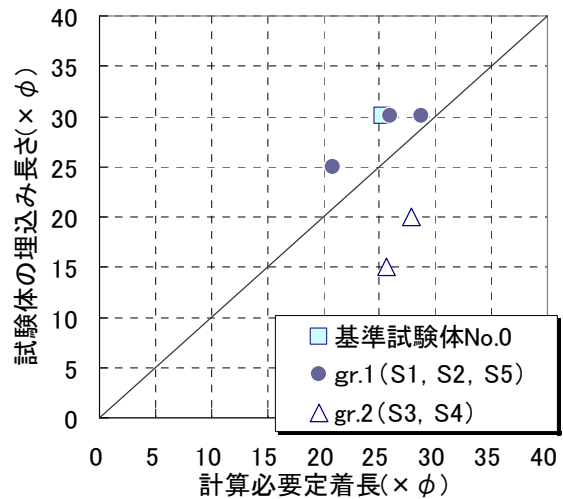


図-11 l/l_d 関係

能とエネルギー吸収能について基準試験体と同等の性能を持つことが確認された。これにより、接合部内の柱、杭の横補強鉄筋は、提案式によって鋼繊維補強コンクリートに置換できることが分かった。

参考文献

- 1) 山田尚義, 近藤真生, 柏原茂, 谷村幸裕: 鋼繊維補強コンクリートを用いたラーメン高架橋部材接合部の主筋定着方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.853-858, 2001
- 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, 日本建築学会論文報告集, 第 319 号, p.47 ~55, 1982
- 3) 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,p.114~122,1977.3
- 4) 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,p.227 ~ 248,1979.2
- 5) 財団法人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, 2004.4
- 6) 財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物, 1997.3