

鋼繊維コンクリートを用いたラーメン高架橋 部材接合部の開発

田所 敏弥* 谷村 幸裕* 前田 友章*
徳永 光宏* 轟 俊太朗* 米田 大樹**

Development of a Beam-Column-Pile Joint of Rigid Frame Viaduct Using Steel Fiber Reinforced Concrete

Toshiya TADOKORO Yukihiro TANIMURA Tomoaki MAEDA
Mitsuhiro TOKUNAGA Shuntaro TODOROKI Taiki YONEDA

In the beam-column-pile joint of rigid frame viaduct, the amount of reinforcement tends to increase with an increase of earthquake load in seismic design. Accordingly, assembling of reinforcement bars and filling of concrete become difficult in course of construction. Therefore, in this study, we have developed the beam-column-pile joint structure using steel fiber reinforced concrete that is easy to construct. Further, we have proposed a design method of the joint based on the quantitative evaluation of stiffening effect of steel fiber. Moreover, we verified appropriateness of the design method of the joint by carrying out the reversed cyclic loading test with the specimens of the joint of rigid frame viaduct.

キーワード：ラーメン高架橋，接合部，鋼繊維コンクリート，耐震，定着，基本定着長

1. はじめに

耐震設計において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加する傾向にある。そのため、図1に示すラーメン高架橋の柱・梁・杭の接合部においては、各部材の軸方向鉄筋が輻輳し、鉄筋組み立ての作業性の低下やコンクリートの充填性の低下等の観点から、施工性に優れた構造の開発がもてられている。また、近年、鉄筋の太径化、高強度化にともなう定着長増加により、接合部の寸法が増加する場合がみられる。

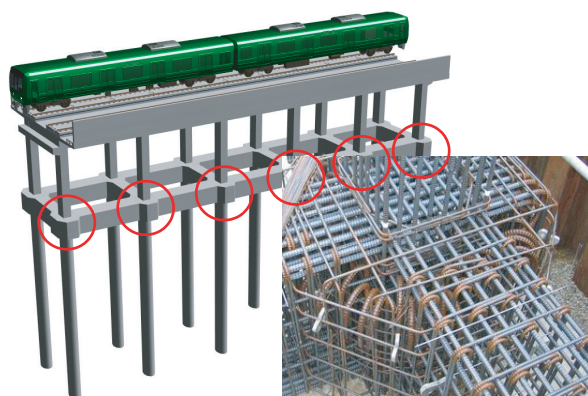


図1 ラーメン高架橋の柱・梁・杭接合部の配筋状況

* 構造物技術研究部（コンクリート構造）

** 前田建設工業(株) テクノロジーセンター 技術研究所

そこで、本研究では、ラーメン高架橋の柱・梁・杭の接合部に鋼繊維コンクリートを用いることにより、接合部の合理化を図った。鋼繊維コンクリートにおいては、ひび割れに対する鋼繊維の架橋効果により、鉄筋の定着性能の向上が期待できることが、既往の研究¹⁾により確認されているが、設計法の提案には至っていないのが現状である。本研究では、鋼繊維の補強効果を一軸引張試験により定量的に評価し、鋼繊維コンクリートを用いた接合部の設計法を提案した。また、ラーメン高架橋の接合部を模擬した試験体による正負交番荷重試験により、地震時の繰返し作用に対する性能を検討し、提案した設計法の妥当性を示した。

2. 鋼繊維コンクリートにおける定着性能の定量化

2.1 試験体および試験方法

鋼繊維コンクリートを用いた接合部の開発においては、鋼繊維コンクリートに埋込まれた鉄筋の定着性能を定量化し、定着長に関する算定式を提案する必要がある。そこで、鉄筋の定着長に影響が大きいと考えられる鋼繊維混入率、鉄筋径、かぶり、横方向鉄筋量等をパラメータに一軸引張試験を行った。また、本研究では、図2に示す直径0.6mm、繊維長30mmの鋼繊維を用いた。

特集：構造物技術



繊維径：0.6mm
繊維長：30mm
引張強度の規格値：
1000N/mm²

図2 使用した鋼繊維

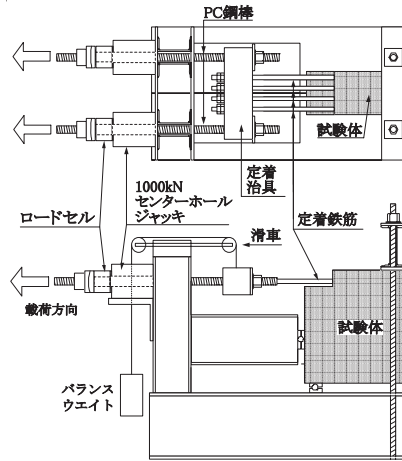


図3 一軸引張試験装置

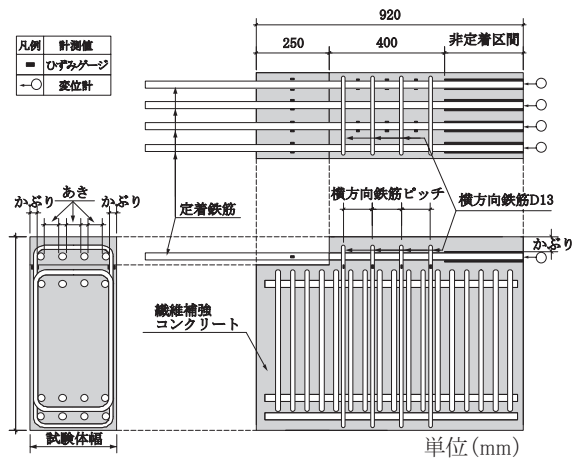


図4 試験体形状の例 (No.0：基準試験体)

試験は、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試験体から4本の鉄筋に2本のPC鋼棒を介して引張力を作用させる一軸引張試験とした。载荷装置および試験体形状を図3および図4、試験体諸元一覧を表1、鉄筋の材料試験値を表2に示す。パラメータは、実構造物を考慮し、鋼繊維混入率：0～1.0%、鉄筋径：D25およびD31、あきの1/2：24.8～42.8mm、横方向鉄筋比：0.57～1.13%とした。ここで、横方向鉄筋比は、横方向鉄筋2本の断面積を横方向鉄筋間隔と試験体幅を乗じた値で除した。

表1 一軸引張試験における試験体諸元一覧

No.	コンクリート 圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	繊維 混入 率 p_f (%)	定着される鉄筋				横方向鉄筋		α_b
			公称 径 ϕ (mm)	あき 1/2 c_s (mm)	定着 長 l (mm)	c_s/ϕ	径 ϕ (mm)	間隔 s (mm)	
0	25.2	—	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
1	28.7	0.5	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	1.0	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
4	48.3	0.5	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
5	62.4	0.5	25.4	24.8	400	0.98	12.7	100	0.76
6	25.0	0.5	25.4	42.8	400	1.69	12.7	50	0.51
7	22.8	1.0	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	0.5	31.8	32.1	400	1.01	12.7	100	0.77
10	21.7	1.0	31.8	32.1	400	1.01	12.7	100	0.77
11	28.7	0.5	25.4	18.8	400	0.74	12.7	100	0.87
12	27.9	0.5	25.4	29.8	400	1.17	12.7	100	0.68
13	25.0	0.5	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	1.0	25.4	31.5	400	1.24	12.7	100	0.66

c_s ：定着する鉄筋のかぶりとあきの1/2の小さい方、本試験ではあきの1/2が小さい

2.2 試験結果および鋼繊維の影響の定量化

横方向鉄筋によって補強された鉄筋の普通コンクリートにおける鉄筋の基本定着長 l_{d0} は、Orangunらの研究^{3), 4)}より式(1)により算定される。

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

- 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 ：定着する鉄筋の公称径 (mm)
 $K_c = (c_b/\phi) + \{15A_t / (s \cdot \phi)\}$
 ただし、 $A_t = A_0 + A'_0 \cdot (s/s') \leq 2A_0$
 c_b ：定着する鉄筋のかぶりとおきの1/2のうち小さい方の値 (mm)
 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⁾(以下、コンクリート標準)では、式(1)を簡略化した式

表2 鉄筋の材料試験値

材質	呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	使用試験体 および部位
SD345	D13	374	176	No.0～13：横方向鉄筋
	D13	367	175	No.14,15：横方向鉄筋
SD490	D25	534	181	No.14,15：軸方向鉄筋
USD685	D25	711	184	No.0～7, 11～13： 軸方向鉄筋
	D32	792	186	No.8～10：軸方向鉄筋

として、式(2)が示されている。式(2)では、横方向鉄筋やかぶり等の影響を定着長低減係数 α_b として考慮している。

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

表3 一軸引張試験結果一覧

No.	τ_u	τ_u/f_{bod}	α_b
0	3.4	1.41	0.76
1	4.4	1.67	0.76
2	4.2	1.67	0.76
3	4.4	2.07	0.76
4	5.7	1.53	0.76
5	7.1	1.61	0.76
6	5.8	2.43	0.51
7	6.4	2.85	0.51
8	3.6	1.36	0.77
9	4.4	1.70	0.77
10	4.1	1.86	0.77
11	4.7	1.77	0.87
12	4.9	1.91	0.68
13	4.6	1.94	0.61
14	4.0	1.56	0.66
15	5.1	2.09	0.66

τ_u ：最大せん断応力 (N/mm²), f_{bod} ：材料試験値を用いて算定, なお材料係数 γ_c は 1.0

ここに, f_{bod} ：コンクリートの設計付着強度 (N/mm²)

$$f_{bod} = f_{bok} / \gamma_c \quad (\gamma_c: \text{材料係数, 一般に } 1.3)$$

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

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

一軸引張試験の結果を表3に示す。また, 最大せん断応力 τ_u の付着強度 f_{bod} に対する倍率 τ_u/f_{bod} と鋼繊維を考慮しない横方向鉄筋等の影響に関する低減係数 α_b の関係を図5に示す。なお, 付着強度 f_{bod} については, 材料試験値を用い, 材料係数 γ_c を 1.0 として算定し, 最大せん断応力 τ_u については, 試験結果より, 式(3)を用いて算定した。

$$\tau_u = P_u / (\pi \cdot \phi \cdot l) \quad (3)$$

ここに, P_u ：鉄筋1本あたりの最大引張力 (N)

l ：試験体における鉄筋の埋込み長さ (mm)

図5から, 鋼繊維混入率ごとの τ_u/f_{bod} と低減係数 α_b において, 式(4)に示す反比例の関係が確認できるため, 鋼繊維の影響に関する補正係数 k_s の定量化を行った。な

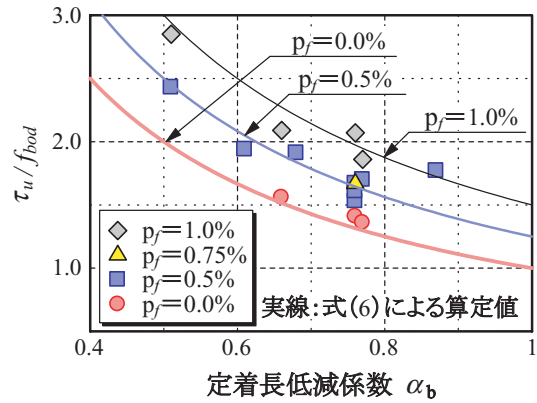


図5 $\tau_u/f_{bod} - \alpha_b$ 関係

お, 図5における τ_u/f_{bod} の増分である補正係数 k_s が, 鋼繊維における補強効果と考えることができる。

$$\alpha_b = k_s / (\tau_u / f_{bod}) \quad (4)$$

また, 補正係数 k_s は, 鋼繊維混入率 p_f との相関が確認できるため, 式(5)が成り立つと考え, a を試験結果よりもとめた。

$$k_s = 1 + a \cdot p_f \quad (5)$$

a ：鋼繊維混入率の影響に関する係数

その結果, $a = 46.6$ (変動係数 $c_v = 0.11$) が得られた。ただし, 設計における簡便性を考慮し, 式(6)とした。また, 図5には, 式(6)による算定値をあわせて示した。

$$k_s = 1 + 50 p_f \quad (6)$$

3. 鋼繊維コンクリートを用いた接合部の定着性能

3.1 試験体および载荷の概要

ラーメン高架橋の接合部においては, 土木学会鉄筋定着・継手指針⁶⁾に示されるように, 接合される部材に応じて, 静的引張力, 高応力の繰返し, および疲労等に対する定着性能が要求される。本研究では, ラーメン高架橋の柱・梁・杭の接合部を対象とするため, 地震時における高応力の繰返しに対して, 所定の定着性能を有することがもとめられる。ここでは, 鋼繊維コンクリートに

表4 正負交番载荷試験における試験体諸元一覧

No	埋込み長さ	接合部形状			杭の軸方向鉄筋			接合部の横方向鉄筋		接合部の補強鉄筋		p_f (%)	コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)		
		B	T	H	公称径	かぶり	あき	公称径	間隔	公称径	間隔		杭	接合部	柱
基準	30 ϕ							9.5	96.7			0.0	31.8	39.9	38.0
S1	30 ϕ	760	760	700	15.9	70.0	38.1	なし	9.5	168.0		1.0	37.7	30.8	32.0
S2	30 ϕ											0.5	35.6	31.8	34.5
S3	15 ϕ											1.0	29.9	27.2	41.5
S4	20 ϕ			550								0.5	31.3	29.5	48.7
S5	25 ϕ											1.0	41.9	39.9	37.4

ϕ ：定着される鉄筋径, B：接合部幅 (mm) 図7参照, T：接合部幅 (mm) 図7参照, H：接合部高さ (mm), 径 (mm), かぶり (mm), あき (mm), 間隔 (mm), p_f ：繊維混入率

特集：構造物技術

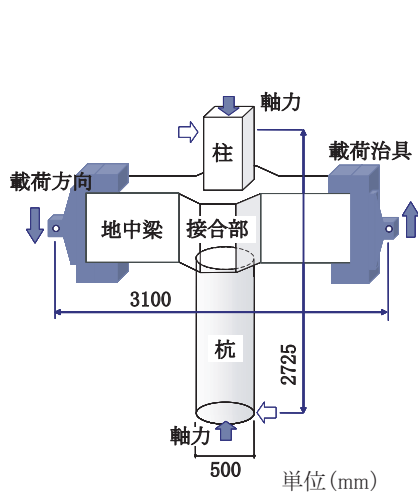


図6 試験体形状

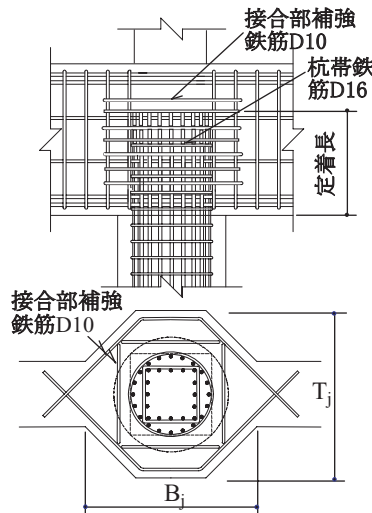


図7 接合部形状

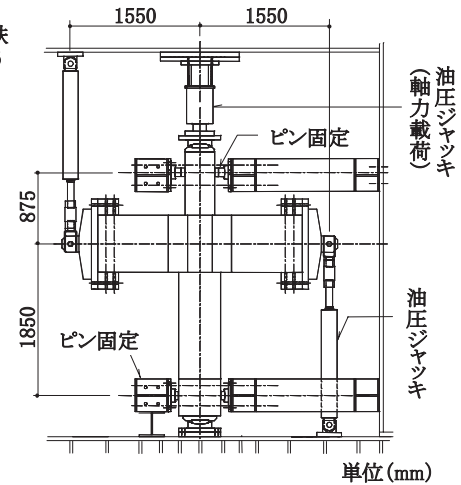


図8 荷重装置

おける鉄筋の一軸引張試験より提案した定着長算定式の妥当性について、ラーメン高架橋の接合部を模擬した試験体による正負交番荷重試験より検討した。

試験体諸元、材料試験値、試験体形状、接合部形状、および荷重装置を、表4、表5、図6、図7、および図8に示す。試験体は標準的な1柱1杭形式のラーメン高架橋の柱・梁・杭の接合部を模擬した実大の50%の縮小モデルとした。本研究においては、杭の軸方向鉄筋の定着部に着目し、試験パラメータを鋼繊維混入率、定着長、および接合部形状とした。基準試験体は、普通コンクリートを用い、現行の設計法にしたがって算定した所定の定着長を確保した試験体とした。S1～S5は、接合部内においては、杭および柱部材の横方向鉄筋は配置せず、鋼繊維補強コンクリートを用いた。なお、低減係数 α_b の範囲は、0.57～0.67である。

荷重は、図8に示すように、梁を上下方向に加力し、杭最外縁の軸方向鉄筋が降伏する杭の水平変位 δ_y を基準変位とし、その整数倍で3回ずつ正負交番荷重を行った。ここで、杭の水平変位 δ は地中梁と荷重点を結ぶ線の垂線を基準に、杭基部までの距離とした。なお、軸力は押込み時の杭の最大軸応力に相当する 2.7N/mm^2 となる 530kN とした。

3.2 正負交番荷重試験による杭の変形性能の評価

(1) 破壊形態に関する検討

試験により得られた杭の荷重-変位関係、およびコンクリート標準より算定される骨格曲線を図9に示す。また、荷重試験における破壊状況例を図10に示す。杭の破壊形態は、以下の2タイプに大別することができる。

- ① 軸方向鉄筋の座屈、塑性ヒンジの形成によって荷重低下に至った試験体
- ② 軸方向鉄筋が座屈することなく、抜出しの増大によって荷重低下に至った試験体

普通コンクリートを用いた基準試験体は、 $2\delta_y$ で最大荷重に達した後、コンクリートの圧壊の進行とともに、

表5 鉄筋の材料試験値

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	適用した試験体および部位*
D19	406	184	S3, S4: 梁
	463	196	S5: 梁
D16	380	184	基準: 杭
	383	186	基準
	393	190	S1, S2
	356	175	S3, S4: 杭柱
	373	195	S5: 杭柱
D13	372	177	基準
	376	166	S1, S2
	396	185	S3, S4
	405	186	S5: 柱梁
D10	352	170	基準: 杭
	374	169	S1, S2
	392	183	S3, S4: 杭
	387	195	S5: 杭

* 部位名が無い場合は杭柱梁すべてに適用

かぶりのはく落し、軸方向鉄筋が座屈した。そして、 $5\delta_y$ で荷重が降伏荷重を下回り、 $6\delta_y$ の繰返しにおいて軸方向鉄筋が破断した。破壊形態としては①のタイプに分類される。鋼繊維コンクリートを接合部に用いたS1, S2, S5は、基準試験体と同様に接合部に斜めひび割れが生じたものの、鋼繊維の架橋効果により、ひび割れ幅は小さく、接合部内の杭に横方向鉄筋を配置していないにもかかわらず、軸方向鉄筋の伸出量は、図11に示すように基準と同等であった。また、破壊状況も基準試験体と同様に塑性ヒンジが形成され、軸方向鉄筋が座屈する①のタイプであった。

一方で、S3, S4は $2\delta_y$ もしくは $3\delta_y$ で最大荷重に達した後、軸方向鉄筋の抜出しが急増し、急激に荷重低下した。ここでは、定着不良による付着劣化にともなう過大な伸出を抜出しと呼ぶこととする。また、基部においては、か

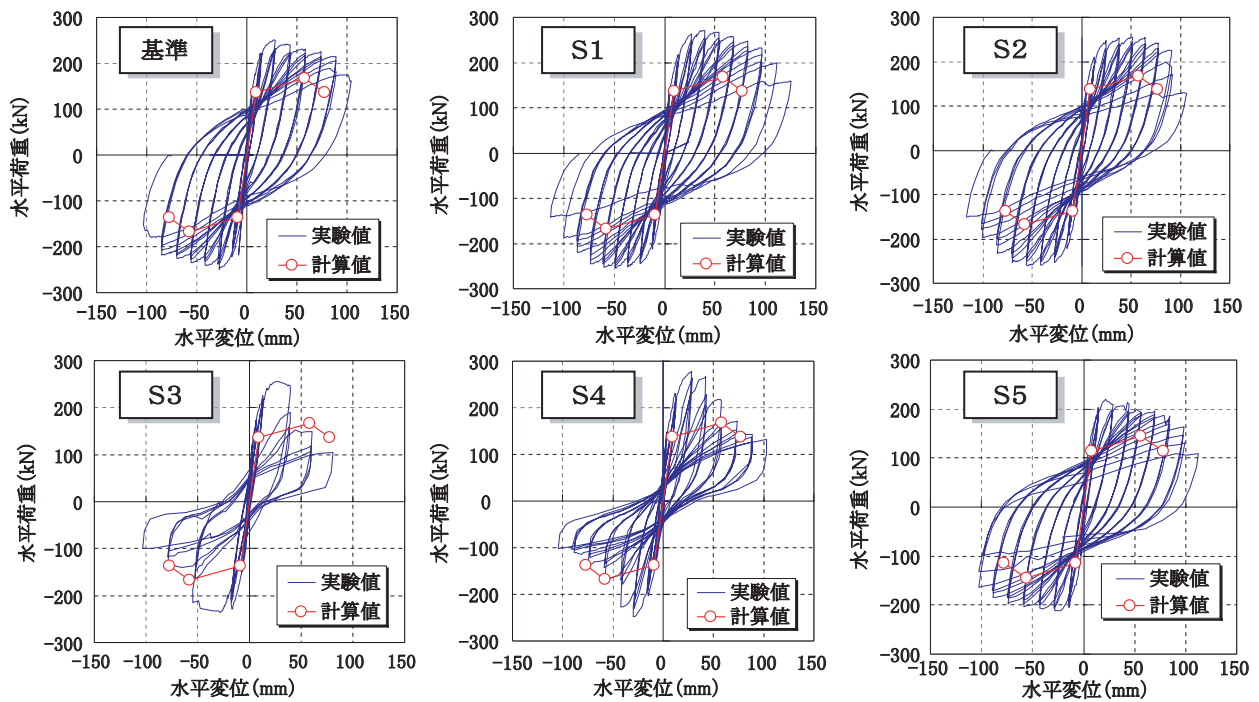


図9 荷重－変位関係



(a) 基準(定着良好) (b) S3(定着不良) (c) S5(定着良好)

図10 杭基部の破壊状況の例

ぶりののはく離がみられたが、軸方向鉄筋の座屈はみられず、②のタイプの破壊形態と考えられる。このように、S3、S4は、軸方向鉄筋の接合部からの拔出しによって、軸方向鉄筋に交番応力が伝達されないため、塑性ヒンジが形成されず、所定の変形性能を確保できなかったと考えられる。
 (2) 荷重－変位関係に関する検討

図9より、S1、S2、S5においては、所定の定着長を確保した基準試験体と同等の耐力、変形性能を有しており、設計で想定している骨格曲線を上回ることが確認できる。これに対し、S3、S4では、所定の変形性能を有しておらず、履歴曲線も拔出しが想定されるスリップ型であることがわかる。

ここで、最外縁の軸方向鉄筋の伸出しおよびエネルギー吸収量を図11および図12に示す。伸出しについては、杭基部の最外縁の軸方向鉄筋に取り付けたワイヤーの伸縮量より測定した。図11および図12から、S1、S2、S5は、十分な定着長を確保した基準試験体と同等の伸出し量およびエネルギー吸収量であり、所定の変形性能を

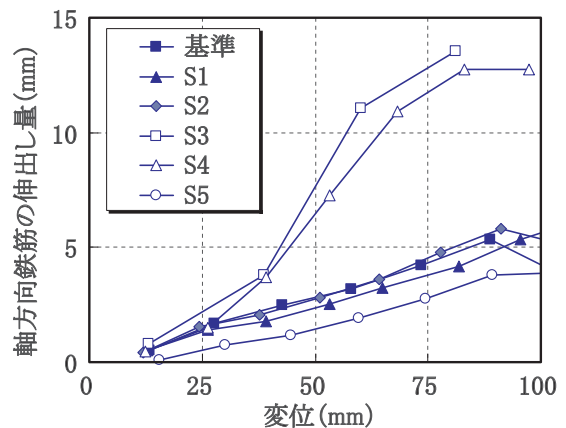


図11 杭の軸方向鉄筋の伸出し

有していることから、軸方向鉄筋の定着長さが十分であると判断することができる。一方、S3、S4においては、定着不良により、伸出し量は大きくなり、また、エネルギー吸収量は小さくなっていることがわかる。このよう

特集：構造物技術

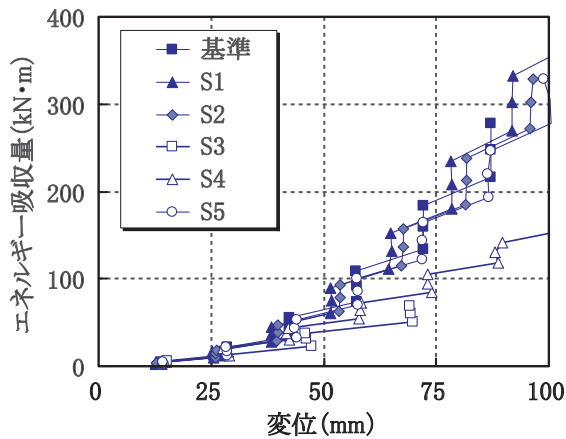


図12 杭のエネルギー吸収量

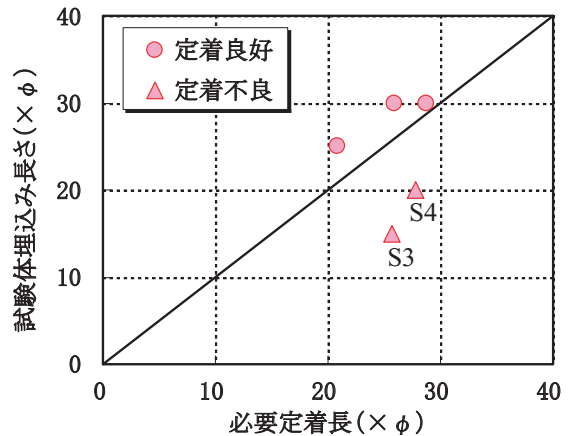


図13 定着長算定式の評価

に、S3, S4については、荷重－変位関係、軸方向鉄筋の伸出し量、エネルギー吸収量、および破壊形態の観点から、軸方向鉄筋の定着長さが不足していると判断される。

3.3 提案した定着長算定式の検証

接合部を模擬した試験体による載荷試験の結果をもとに、一軸引張試験より提案した鋼繊維コンクリートに埋込まれた鉄筋の定着長算定式の妥当性を検討した。

図13に試験体の鉄筋の埋込み長さとして提案の定着長算定式にしたがって求めた必要定着長の関係を示す。必要定着長は式(7)より算定した基本定着長 l_{d0} に、現行の設計法⁵⁾にしたがって、定着が有効とならない区間として杭径の0.4倍または 10ϕ (ϕ : 定着される鉄筋径)の小さい方の値を加えた。なお、鋼繊維の影響を考慮した低減係数 α_b/k_s の下限値は、本研究における試験範囲、および鋼繊維の緻密な架橋効果を考慮して、0.4とし、鋼繊維混入率 p_f の上限は、コンクリート打ち込み時の施工性を考慮し、0.01とした。

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

$$\alpha_b/k_s = \{ (0.75/k_c) + 0.2 \} / (1+50 p_f)$$

ただし、 $0.4 \leq \alpha_b/k_s \leq 1.0$ 、かつ $p_f \leq 0.01$

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

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

ただし、 $c_b/\phi \leq 2.5$ 、かつ $A_t \leq 2A_0$

図13に示すように、必要定着長に対し埋込み長さが小さい試験体は、正負交番載荷試験の結果、定着長不足と判定されたS3およびS4であった。また、定着良好と判定されたすべての試験体が、必要定着長より埋込み長さが大きい試験体であった。このように、提案した定着長算定式は、繰返し荷重が作用する接合部における定着性能を精度よく評価できることがわかる。

4. まとめ

鋼繊維コンクリートを用いたラーメン高架橋の部材接

合部に関する本研究の範囲において、以下の知見が得られた。

- (1) 鋼繊維コンクリートに埋込まれた鉄筋の一軸引張試験より、鋼繊維の架橋効果による定着性能の向上を確認した。そして、定着性能におよぼす効果を定量的に評価し、鋼繊維コンクリートに埋込まれた鉄筋の定着長算定式を提案した。
- (2) 接合部を模擬した試験体による正負交番載荷試験より、地震時の繰返し荷重に対する接合部の定着性能について検討した。その結果、提案した定着長算定式は、繰返し荷重を受ける場合においても、十分な精度を有することを確認した。
- (3) 接合部を模擬した試験体の正負交番載荷試験より、鋼繊維の架橋効果によって、杭および柱部材の横方向鉄筋を省略できることを確認し、施工性に優れた接合部の配筋方法を提案した。

文献

- 1) 山田尚義, 近藤眞生, 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, pp.47~55, 1982
- 3) Orangun, C.O., J irsa, 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
- 4) Thompson, M.A., J irsa, 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
- 5) (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), 2004.4
- 6) 土木学会: 鉄筋定着・継手指針, コンクリートライブラリー 128, 2007.8