

論文 機械式に定着された外柱梁接合部の構造性能に関する研究

鬼海 正臣^{*1}・今井 弘^{*2}・カストロ ホワン ホセ^{*3}

要旨：機械式に定着された梁主筋の定着性能に、コンクリート強度と副帯筋の有無、及び定着長さがどのような影響を与えるかを調べるために試験体を11体製作し、静的載荷実験を行った。梁主筋の定着耐力は村上式により妥当に評価され、梁主筋に高強度鉄筋を用いた場合においても十分な定着耐力と靱性能を有した。また、定着長さを $12d$ (d :鉄筋径)としても柱丈の3/4以上確保しない場合には接合部のせん断強度が低下する実験結果が得られた。

キーワード：機械式定着、柱梁接合部、定着耐力、支圧応力

1. はじめに

近年、建築物の高層化に伴い、梁主筋に定着金物を取り付ける機械式定着工法を用いることで配筋の自由度を増し、施工の省力化を図るようになってきた。

本研究では、梁主筋に機械式定着を用いた柱梁接合部において、主にコンクリート強度と接合部内における帯筋、及び定着長さが構造性能に与える影響について実験的に調査した。

2. 試験体概要

各試験体の概要を表-1に、形状を図-1に示す。実験は、梁主筋(ネジ節鉄筋)にSD490を用いた梁の曲げ破壊型のシリーズA、梁主筋にSD685相当のSCM材を用いた柱梁接合部のせん断破壊型のシリーズBの二つに大別される。

使用した定着金物の鉄筋断面積に対する支圧

面積の比は、D25で6.5、D32で6.6である。

定着金物を使用した梁主筋の定着長さは、原則として柱丈の3/4倍、かつ鉄筋径の12倍とし、定着板背面からのかぶり厚を100mm、主筋芯からの側面かぶり厚を75mmとした。

試験体の外形寸法は、柱断面 400×400 、梁断面 350×450 であり、No.11のみ柱断面 600×600 、梁断面 530×600 である。なお、試験体は横にして打設しており、打設上面のものを上端筋、打設下面のものを下端筋と呼ぶ。

柱の主筋は12-D22(SD490)と12-D25(SD490)、梁の片側主筋は3-D25(SD490及びSD685)と3-D32(SD685)を使用した。ただし、No.10は二段配筋で6-D25(SD685)となっている。接合部の帯筋は2-D10@100(USD295A)で全試験体共通となっている。また、No.5のみ接合部内に副帯筋を加え、帯筋は4-D10@100(USD295A)とした。

表-1 試験体概要

試験体	実験因子	F_c (N/mm^2)	設計破壊形式	柱断面	梁断面	梁主筋	柱主筋	接合部帯筋	定着長(mm)	かぶり厚さ	軸力比
A	No.1 基準 A	50	B	400×400	350×450	D25 SD490	D22 SD490	D10 USD295A @100	300	背面100 側面75 (3d)	0.1
	No.2 F_c -高	70									
	No.3 F_c -低-1	36									
	No.4 F_c -低-2	21									
	No.5 副帯筋	21	J								
B	No.7 基準 B	50	J	600×600	530×600	D32	D25 SD490	D10 USD295A @100	384	背面216 側面100 (3.1d)	0.1
	No.8 F_c -高	70	B								
	No.9 F_c -低	36	J								
	No.10 二段配筋	50	J								
	No.11 定着(長)	50	B								
	No.12 定着(短)	50	J								

注) 設計破壊形式 B-梁曲げ降伏型 J-接合部せん断破壊型

- *1 筑波大学大学院 (正会員)
- *2 筑波大学教授 機能工学系 (正会員)
- *3 株木建設(株) 技術研究所 (正会員)

梁主筋には、付着性状の変化を少なくするように、平らなリブ部分に掘った幅 4mm、深さ 3mm の溝内に歪ゲージを貼付した。なお、これによる曲げの影響はほとんどないものとした。

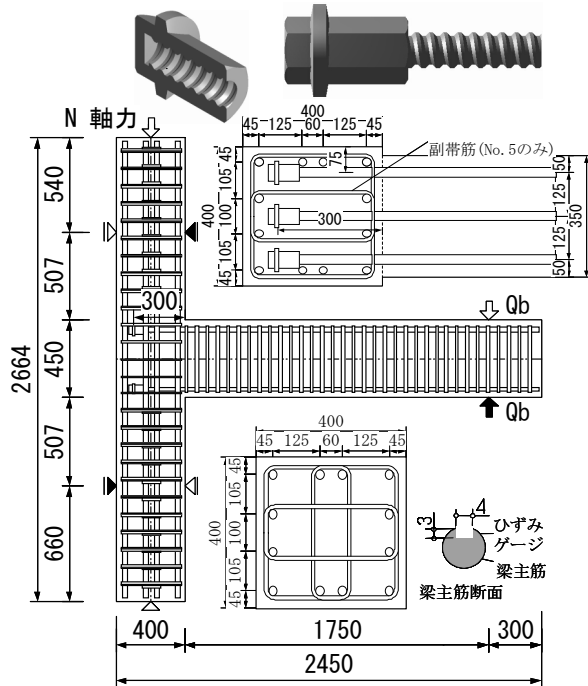


図-1 試験体形状

3. 材料試験結果

表-2 に材料試験結果を示す。スランプ 18cm の普通コンクリートを使用した。シリーズ B の SD685 の主筋については熱処理を施した SCM 材を使用した。また、SD685 は降伏点がないため 0.2% オフセットラインと応力-歪曲線との交点を降伏歪とした。

表-2 材料試験結果

(a) コンクリート材料試験結果

F _c (N/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)			ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
	水中養生 (20℃)	現場封かん			
		4週	実験時		
21	23.9	20.3	26.9	24.2	2.19
36	37.7	35.2	44.3	28.2	3.16
50	57.7	44.9	49.0	28.5	3.17
70	62.4	51.2	61.1	29.0	3.70

(b) 鉄筋材料試験結果

径	規格	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏歪 (μ)
D10	SD295A	369	495	184	2010
	USD685	812	948	205	4050
D13	USD685	743	921	205	3670
D22	SD490	571	757	204	2980
D25	SD490	560	767	201	3090
	SD685	605	870	199	3040
D32	SD685	595	845	205	2902

4. 実験方法

加力装置を図-2 に示す。柱に一定の軸力 ($\sigma_0/F_c=0.1$) を加えた状態で、梁端に、鉛直アクチュエーターにより正負交番に繰り返し荷重を与えた。梁端部の変位を制御し、全体変形角 $R(=\delta/L)=1/800$ を 1 回、その後 1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/25 まで正負 2 回ずつ加力した。

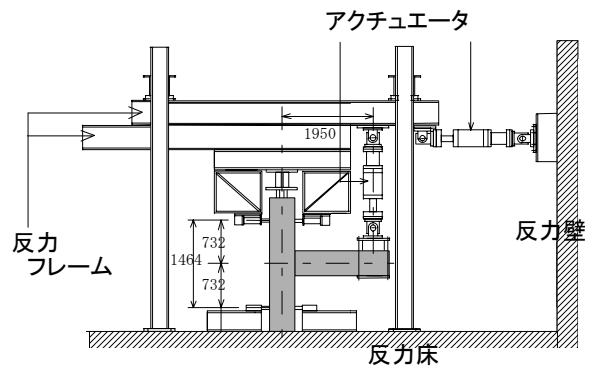


図-2 加力装置

5. 実験結果

5.1 最終ひび割れ状況

各試験体の最終ひび割れ状況を図-3 に示す。
[シリーズ A]

No.4 と No.5 では、接合部でのせん断ひび割れが著しく、柱背面での柱主筋に沿った割裂ひび割れも多数確認されたが、副帯筋を配した No.5 においては、比較的軽微であった。最終段階では、かぶりコンクリートの剥離や面外へのはらみ出しも見られた。

No.1~No.3 の曲げ破壊型では、接合部でのせん断ひび割れや柱背面での割裂ひび割れは、コンクリート強度が大きい程比較的軽微であった。
[シリーズ B]

No.10 と No.12 では、接合部のせん断ひび割れが大きく開くなど、他の試験体に比べ損傷が激しく、柱背面の圧壊やかぶりコンクリートの剥落も認められた。

No.7~9 と No.11 では、コンクリート強度が低い程せん断ひび割れが激しく、No.9 では、柱背面でのひび割れも多く見られた。No.11 では、接合部での大きなせん断ひび割れが少なく、柱背面での割裂ひび割れも軽微であった。

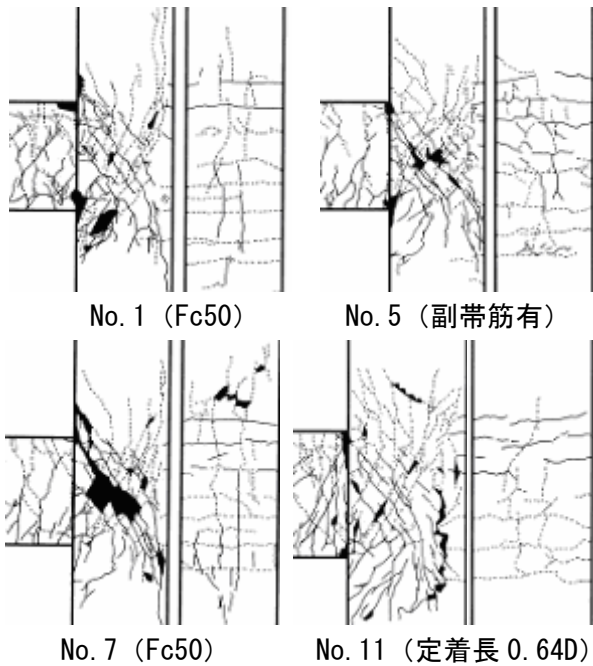


図-3 最終ひび割れ状況

5.2 荷重変位関係

荷重変位関係を図-4に示す。図中の Q_{bmu} と Q_{bjm} はそれぞれ梁曲げ耐力と接合部せん断耐力の計算値であり、表-4に式を示す。各試験体とも全体変形角 $R=1/100$ 付近で曲げ降伏し、 $R=1/50$ で最大耐力に達した。 $R=1/25$ 以降の繰り返しでは、正負両加力時ともに最大荷重を迎えた後、荷重が低下し逆S字の履歴ループを示した。

[シリーズA]

破壊形式は、No.2は曲げ降伏型（以下B型）であり、No.1とNo.3は曲げ降伏先行の接合部せん断破壊型（以下B→J型）と考えられる。コンクリート強度の影響についてみると、コンクリート強度が弱い程、最大耐力は低く、それ以降の耐力低下が激しくなる傾向が見られた。

No.4とNo.5の破壊形式は接合部せん断破壊型（以下J型）であり、最大耐力を迎えた後の耐力低下が著しい。これは柱梁接合部のせん断破壊の進行と、それに伴う梁主筋の定着喪失によるものと思われる。また、副帯筋を配したNo.5では、No.4と比較して耐力低下が若干緩やかであり副帯筋の効果が認められる。

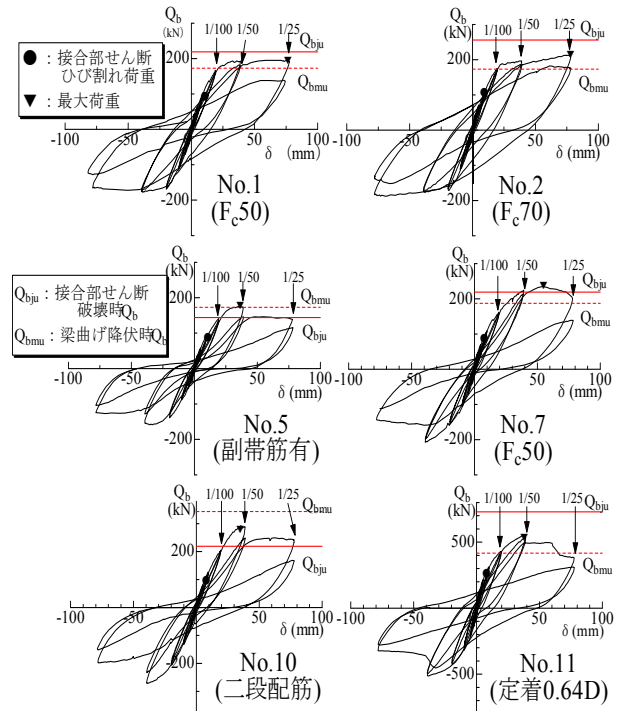


図-4 荷重変位関係

[シリーズB]

No.7~No.9、及びNo.11はB→J型であり、No.10とNo.12はJ型であると考えられる。

コンクリート強度の影響についてみると、試験体の形状が同一のNo.7~No.9では、ほぼ同様の履歴を示しており、最大耐力を迎えた後の耐力低下にも、違いはあまり見られない。

定着長が $12d$ (d : 鉄筋径) であるが、柱丈 D の 0.64 倍のNo.11では、最大耐力が接合部せん断耐力に達せず、それ以降の耐力低下も著しく、J型に近い挙動を示している。一方、定着長が $12d$ を満たさないが、 $3/4D$ を満たすNo.12では、せん断耐力に到達後、せん断破壊の挙動を示しており、 $3/4D$ を満たす試験体では、耐力式で妥当に評価できると考えられる。

5.3 変形性能

表-3に各試験体の最大耐力の95%時（以下R95）、80%時（R80）の変形性能を示す。

各試験体で、R95時には $0.02 \sim 0.03 \text{ rad}$ 、R80時には 0.04 rad 程度の変形性能を有しており、違いは見られない。しかし、定着長が $0.64D$ のNo.11では、R80時の変形角が 0.032 rad であり、他と比較して、変形性能が劣る結果となった。

表-3 変形性能

	実験因子	F_c (N/mm ²)	実破壊形式	R95 (rad)	R80 (rad)
No. 1	基準 A	50	B→J	0.04以上	0.04以上
No. 2	F_c -高	70	B	0.04以上	0.04以上
No. 3	F_c -低-1	36	B→J	0.022	0.04以上
No. 4	F_c -低-2	21	J	0.020	0.04以上
No. 5	副帯筋	21	J	0.020	0.039
No. 7	基準 B	50	B→J	0.035	0.040
No. 8	F_c -高	70	B→J	0.033	0.041
No. 9	F_c -低	36	B→J	0.025	0.041
No. 10	二段配筋	50	J	0.026	0.039
No. 11	定着(長)	50	B→J	0.024	0.032
No. 12	定着(短)	50	J	0.023	0.040

5.4 最大耐力

梁端部での曲げ耐力 Q_{bmu} 、接合部せん断耐力 Q_{bjm} 、及び梁主筋定着耐力 Q_{ba} を梁のせん断力に換算して表-4 に示す。

実験値 Q_{bu} が梁曲げ耐力の計算値を下回った試験体をみると、いずれも柱梁接合部でのせん断破壊が進行しており、最大耐力も接合部のせん断耐力の計算値に近かった。その他の試験体では、実験値が梁曲げ降伏耐力 Q_{bmu} を上回っており破壊形式との良い対応がみられる。また、副帯筋を配した No.5 は、No.4 と比較して若干の耐力上昇がみられた。

5.5 接合部のせん断応力-せん断歪関係

図-5 に接合部のせん断応力-せん断歪関係を示す。接合部のせん断応力 τ_p は、柱幅と梁幅の平均を有効幅 b_j とし、定着長を有効丈 D_j として求めた。また、せん断歪は接合部(幅 250mm、高さ 300mm)の主筋で囲まれた部分の四隅を基点として斜め方向変形により算出した。

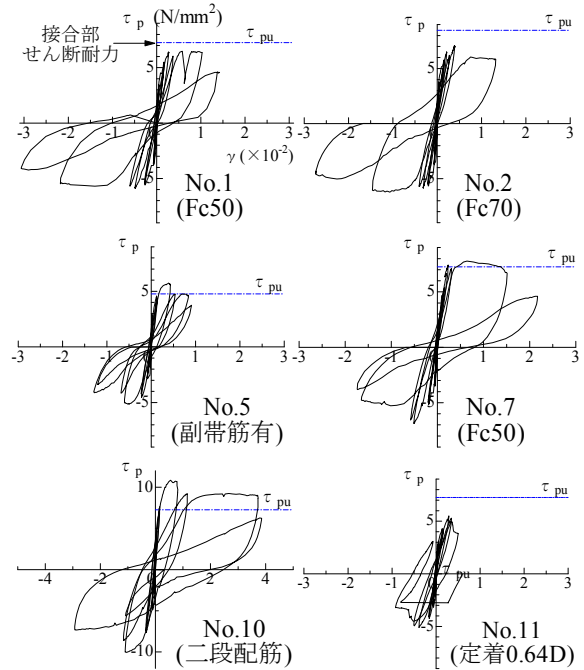


図-5 接合部せん断応力-せん断歪関係

B 型及び B→J 型の試験体では、梁主筋の違いによらず、コンクリート強度が低い程、曲げ降伏時のせん断歪が大きく、降伏後の $R=1/25$ での繰り返しでせん断破壊が進行した。一方、J 型の試験体では、 $R=1/50$ の加力時に接合部せん断耐力の計算値 τ_{pu} を上回りせん断破壊を示した。副帯筋を配した No.5 では、 $R=1/50$ の繰り返しでせん断歪が増大しているが、絶対量は小さく、No.4 に比べ約 1/2 以下に抑えられている。

No.11 では、No.12 に比べせん断歪が小さく、歪の進展はほとんど見られなかった。

表-4 最大耐力一覧(単位: kN)

試験体	実験値	計算値					
		梁曲げ耐力		接合部せん断耐力		定着耐力	
	Q_{bu}	Q_{bmu}	Q_{bmu}/Q_{bu}	Q_{bjm}	Q_{bjm}/Q_{bu}	Q_{ba}	Q_{ba}/Q_{bu}
No. 1	195	173	0.89	219	1.12	235	1.21
No. 2	212	173	0.82	256	1.21	251	1.18
No. 3	190	173	0.91	204	1.07	227	1.19
No. 4	161	173	1.07	144	0.89	187	1.16
No. 5	177	173	0.98	144	0.81	196	1.11
No. 7	235	187	0.80	219	0.93	235	1.00
No. 8	245	187	0.76	256	1.04	251	1.02
No. 9	201	187	0.93	204	1.01	227	1.13
No. 10	293	343	1.17	219	0.75	442	1.51
No. 11	554	417	0.75	730	1.32	524	0.95
No. 12	282	288	1.02	219	0.78	367	1.30

各耐力計算式

- 梁の曲げ耐力式は建築学会式で求めた

$$Q_{bmu} = 0.9a_t \sigma_s d / L_p$$

- 接合部せん断耐力は AIJ 靱性保証型設計指針式で求めた

$$Q_{bjm} = k \cdot \phi \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j$$

- 定着耐力 Q_{ba} は村上式¹⁾により求めた

$$\sigma = k \cdot \sigma_{std} \quad (\sigma_{std} = 324 \cdot \sqrt{f_c} \quad k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3)$$

(* σ, f_c は kgf/cm² 単位)

5.6 変形割合

図-6 に全体変形に占める各部材の変形割合の推移の典型例を示す。変形割合は、各部材の20cmごとの曲率とせん断歪を求め、それらによる変形を累加して求めた。

B型及びB→J型の試験体では、梁の変形割合が大部分を占め、梁が曲げ降伏したとされる $R=1/50$ で一旦梁の変形割合が増大したが、その後加力が進行するにつれて接合部の変形割合が増大していった。

J型の試験体では、接合部の変形割合が常に増大し、接合部のせん断破壊が卓越している。最終的な変形の割合は、破壊状況や破壊形式との良好な対応が認められる。No.5では、全体変形に対して接合部の変形割合は小さく抑えられており、副帯筋は有効に働いたと考えられる。No.10では、全体変形に対して梁の変形割合が小さく抑えられ接合部の変形割合が特に大きい。

5.7 歪分布

(1) 梁主筋の歪分布

図-7 に各試験体の打設面引張側梁主筋の歪分布の代表例を示す。

B型及びB→J型となった試験体では、全体変形角 $R=1/100$ より、梁主筋の歪が降伏歪に達し始め、以降、ほとんどが降伏歪に達した。また、接合部内における定着板直前の歪は、 $R=1/50$ 程度までは降伏していないことから、この段階までは定着力を定着板と鉄筋の付着力で分担していたと考えられる。

J型となった試験体では、歪に進展は見られず、 $R=1/25$ においても降伏歪に達していない。また、定着端部付近までの歪は加力の最終段階においても一定である。これは、加力の早い段階で接合部内の破壊が進行したことで、コンクリートと梁主筋の付着劣化が進み、定着力の大部分を定着板が負担していたためと考えられる。

(2) 定着板の支圧応力分担率

表-5 に付着力と定着板による支圧力の分担率を示す。定着板直前の歪より算出した値を定着板の分担力とし、柱面の歪より算出した値を

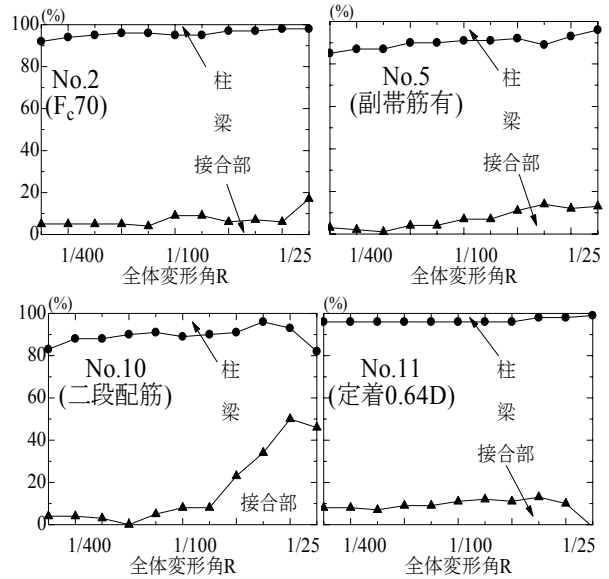


図-6 変形割合

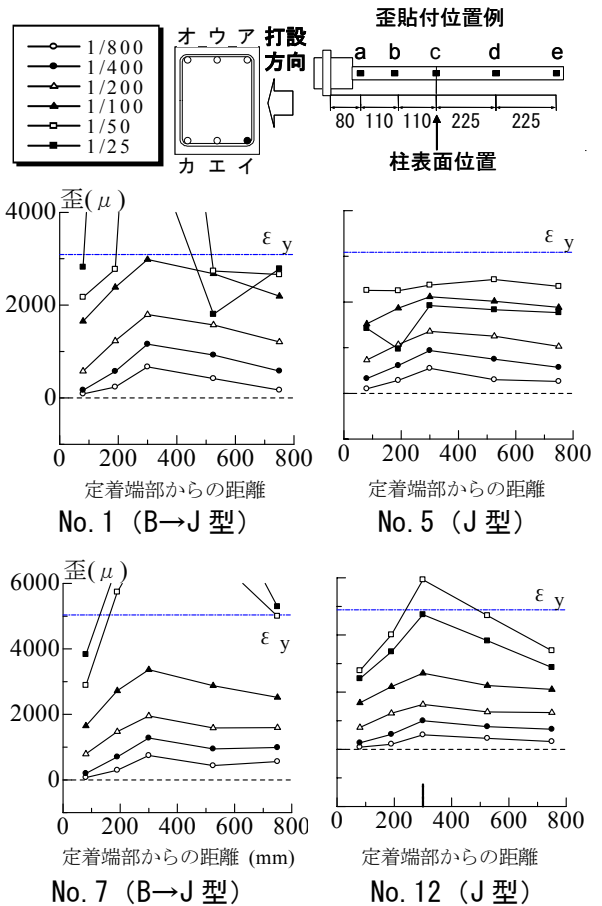


図-7 主筋の歪分布

鉄筋に入力した力とした。

B型及びB→J型の試験体では、0.01rad時の定着板の負担率が約60%で、0.02radになると多少の増大がみられ、ほぼ70%前後を定着板が負担している。

一方、J型もしくはJ型に近い挙動を示した試験体では、0.01rad時の分担率が65~75%であり、この段階で接合部のせん断破壊に伴い、付着力の喪失が進行し、定着力の大部分を定着板の支圧力が負担していることがわかる。

5.8 定着板の支圧応力度と変位量関係

図-8に支圧応力度 σ_c と定着板の変位量の関係を示す。定着板の平均支圧応力度 σ_c は、定着板直近の鉄筋の歪(図-7歪(a))より算出した軸方向力を定着金物の支圧面積(定着板面積より主筋断面積を差し引いた面積)で除した値を表す。また、変位量は柱背面に対する定着板の抜け出し量を表し、その間のコンクリートのひび割れ幅も含む。

打設方向の違いによる影響を見ると、同じ変位量では打設時上端筋と打設時下端筋に比べ中段筋の支圧応力度は大きく、変位量も小さい。この傾向はコンクリート強度が高い程認められた。このことから、支圧力と変位量は打設高さによらず、コアコンクリート内により近い位置で定着された主筋の支圧応力度が最も大きく、変位量も小さくなると考えられる。また、No.5はNo.4に比べて接合部せん断破壊が進んだ後の変位量が約半分を抑えられており、副帯筋の効果が認められる。

6. 結論

外柱梁接合部に、機械的に定着された梁主筋を用いたト形試験体の静加力実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 接合部の破壊形式は、定着板の変位量に大きく影響を及ぼし、接合部のせん断破壊の進行に伴い変位量は増大していく。
- (2) ト形試験体において、主筋に定着金物を用いて定着する際の耐力は村上式によって妥当に評価される。
- (3) ト形試験体においては、かぶり厚さを鉄筋径の3倍、定着長さを柱丈の3/4かつ鉄筋径の12倍とした場合、十分な定着耐力を有する。定着長さにおいては、柱丈の3/4倍を確保し

表-5 定着板の支圧応力分担率

	実破壊形式	0.01rad		0.02rad	
		定着板分担率(%)	付着力分担率(%)	定着板分担率(%)	付着力分担率(%)
No.1	B→J	64.2	35.8	64.5	35.5
No.2	B	59.4	40.6	67.1	32.9
No.3	B→J	61.7	38.3	68.4	31.6
No.4	J	67.9	32.1	67.9	32.1
No.5	J	63.8	36.2	76.3	23.7
No.7	B→J	62.3	37.7	68.5	31.5
No.8	B→J	62.2	37.8	68.6	31.4
No.9	B→J	66.3	33.7	71.5	28.5
No.10	J	74.0	26.0	75.6	24.4
No.11	B→J	64.7	35.3	70.9	29.1
No.12	J	71.9	28.1	69.6	30.4

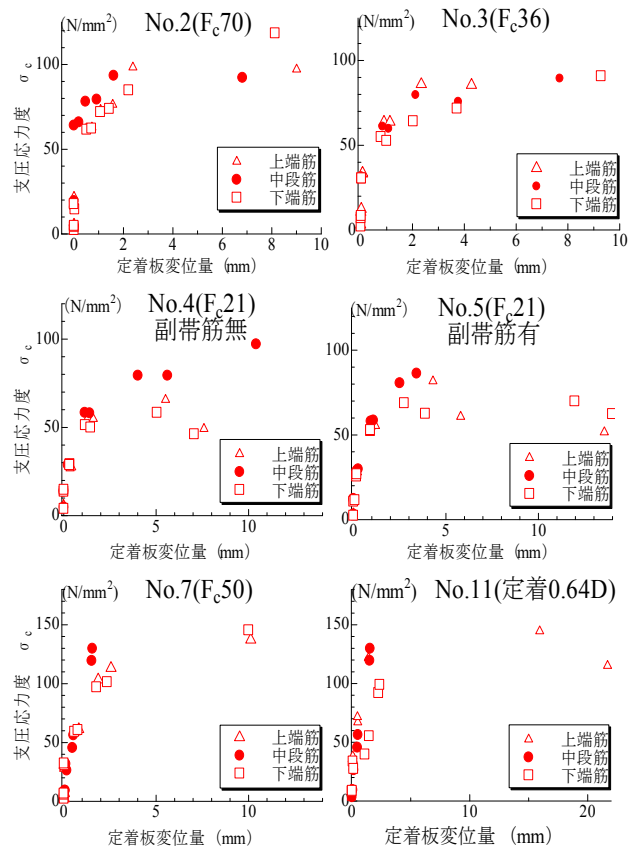


図-8 支圧応力度と定着板変位量関係

ない場合は変形性能が劣り、破壊形式にも大きな影響を及ぼす。

- (4) 主筋にSD685を用いた場合においては、荷重の増加に伴い定着板の支圧力分担率は増加し、付着力の分担率は減少するが、十分な定着耐力と靱性能を有する。

参考文献

- 1) 村上, 宮崎, 窪田: 高強度電炉鉄筋の開発に関する研究(その21), AIJ, C構造II, 1993.9, pp.127-128