

論文 機械式定着型梁主筋を用いた外柱—幅広梁接合部の挙動

足立 智弘^{*1}・倉本 洋^{*2}・藤原 篤茂^{*3}・松井 智哉^{*4}

要旨：本研究は梁幅が柱幅よりも大きな外柱梁接合部において、梁主筋に機械式定着工法を適用した場合の構造性能について、梁主筋の強度および定着部補強筋のディテールをパラメータとして実験的に検討したものである。柱あるいは直交梁に定着されるそれぞれの梁主筋の応力負担性状および破壊性状の比較から柱—幅広梁接合部の構造性能に直交梁の特性が及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：機械式定着、外柱梁接合部、幅広梁、定着部補強

1. はじめに

近年の基礎構造における基礎梁の設計では、梁幅を大きくして梁せいを低減する事例が増えてきている。これらの事情を鑑みて、筆者らは梁幅が柱幅を上回る柱—幅広梁接合部における梁主筋への機械式定着工法の適用可能性を検討してきた¹⁾。

文献1)では柱外で直交梁主筋の内側に配筋されている梁主筋は柱内に定着されるものと比較して降伏時期は若干遅れるが、定着破壊を防止すれば概ね引張降伏することが分かった。しかしながら、全主筋が引張降伏した場合でも実験値は梁曲げ略算式²⁾による計算耐力を若干下回る結果となり、柱—幅広梁接合部試験体の構造特性に及ぼす直交梁の影響が顕著であったことが確認された。

そこで本研究では、低強度の梁主筋を用いて柱—幅広梁接合部における直交梁の影響を低減して、梁の曲げ降伏を確認することを意図した当該接合部の静的載荷実験を行った。

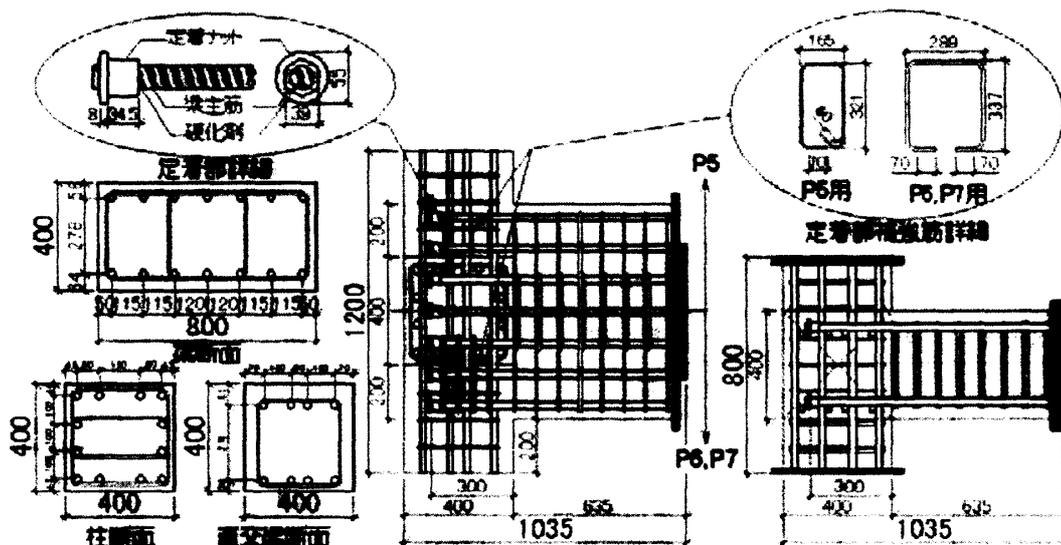
2. 実験概要

2.1 試験体

実験に用いた試験体は、図—1に示すような梁主筋に機械式定着工法を適用した外柱梁接合部であり、実験変数には定着部補強筋量で2種類 (D10@80, D13@60)、梁主筋強度で2種類 (SD390, SD490) を選択した。なお、柱内に定着される梁主筋にフックを掛ける定着部補強筋は配筋作業を簡易にするために90°フックとした。

梁、直交梁および柱の断面 (b×D) はそれぞれ800×400mm, 400×400mm および400×400mmである。梁主筋は鉄筋径D22のものを14本配筋し、そのうち8本が直交梁に定着される。梁主筋の定着長さは柱せいの3/4倍とし、柱梁フェイスから定着板までの距離は300mmである³⁾。表—1に本研究の静的載荷に用いた試験体および比較対象とした文献1)の試験体の概要を示す。

また、表—2に試験体各部の計算耐力を示す。計算式は日本建築学会のRC規準²⁾および靱性保証型耐震設計



図—1 試験体配筋状況

*1 東京鉄鋼(株) 開発部 修士(工学) (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

*3 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*4 豊橋技術科学大学 工学部建設工学系助教 博士(工学) (正会員)

指針⁴⁾を用いた。各試験体は梁の曲げ降伏が先行するように設計されている。

2.2 使用材料

表-3に本実験で使用したコンクリートおよび鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。コンクリートの設計基準強度 F_c は 24N/mm^2 とし、梁主筋にはSD390およびSD490を、直交梁および柱の主筋にはSD490の鉄筋をそれぞれ使用した。なお、柱あるいは梁の横補強筋および定着部補強筋には降伏点が 785N/mm^2 級の鉄筋を用いた。

2.3 載荷方法

実験は図-2に示す試験装置を用いて行った。すべての試験体に対して、 450kN (軸力比 $(N/bD\sigma_B)$: 約0.1) の一定軸力下での静的漸増繰返し水平力載荷を行った。水平力載荷は変形制御とし、柱上下端に取付けたピン支

表-1 試験体概要

	梁	柱	直交梁	定着部補強筋
P5	$b \times D = 800 \times 400$ 梁主筋 14-D22-SD390	$b \times D = 400 \times 400$ 柱主筋 12-D25-SD490	$b \times D = 400 \times 400$ 直交梁主筋 8-D22-SD490	SD785級 D10@80
P6	横補強筋 4-D10@80			
P7	$b \times D = 800 \times 400$ 梁主筋 14-D22-SD490	横補強筋 4-D10@100	2-D10@100	SD785級 D13@60
	横補強筋 4-D10@80			

表-2 計算耐力 (kN)

載荷方向	試験体	梁曲げ耐力	柱曲げ耐力	接合部せん断耐力
正	P5, P6	348.8	664.5	702.8 (接合部全幅有効として)
	P7	419.8		
負	P5, P6	342.7		
	P7	412.4		

表-3 材料特性
鉄筋

鉄筋径	鋼種	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	用途
D22	SD390	447	646	梁主筋
D22	SD490	538	704	梁主筋 直交梁主筋
D25	SD490	539	692	柱主筋
D10	SD785級	854	1001	定着部補強筋 横補強筋
D13	SD785級	863	1062	定着部補強筋

コンクリート

設計基準強度 (N/mm ²)	実験時 (N/mm ²)
24	28.6

承間の相対水平変位 δ と上下ピン支承間距離 h ($=1,300\text{mm}$) で与えられる相対部材角 R ($=\delta/h$) で、 $0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03$ および 0.04rad を正負2サイクルずつ繰り返した後、 0.05rad まで載荷を行うものとした。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

写真-1に試験体P5およびP6の $R=0.02\text{rad}$ における直交梁上面と背面のひび割れ状況を、ならびに $R=-0.02\text{rad}$ における試験体P5と試験体P6の直交梁下面のひび割れ状況を示す。また、図-3には正載荷時に生じた試験体のひび割れの模式図を示した。

試験体P5は、 $R=0.005\text{rad}$ で梁の曲げひび割れ(図中A)および直交梁上面に定着板位置に支圧によるひび割れ(同B1)が生じた。 $R=0.01\text{rad}$ では直交梁の背面に柱と直交梁の付け根を基点としたひび割れ(同C1)が生じた。 $R=0.02\text{rad}$ までは定着板位置を起点として直交梁上面の全域に亘りひび割れが発生したが、 $R=0.04\text{rad}$ への載荷中に定着板位置の支圧ひび割れが卓越して拡大し、直交梁上面のかぶりコンクリートを剥離させる定着破壊の様相を呈した。変位振幅の増加に伴い直交梁背面の斜めひび割れ幅は増加したが、直交梁上面のかぶりコンクリートの剥離が始まる $R=0.03\text{rad}$ 以降はひび割れ幅の増加傾向は緩やかとなった。

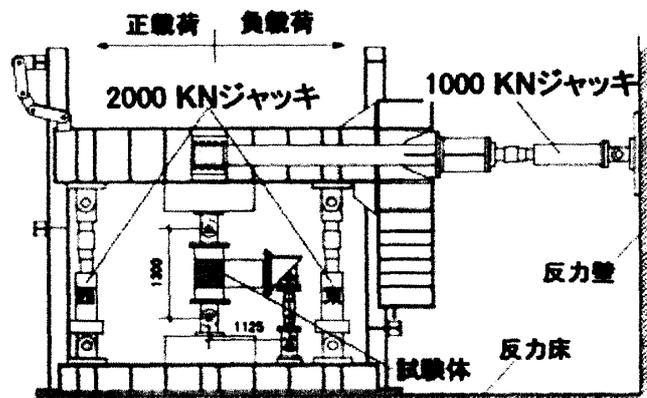


図-2 載荷装置

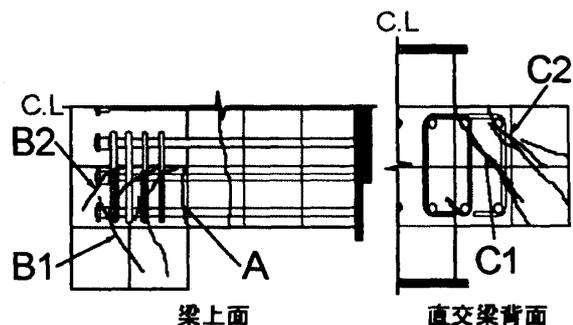


図-3 試験体ひび割れ模式図

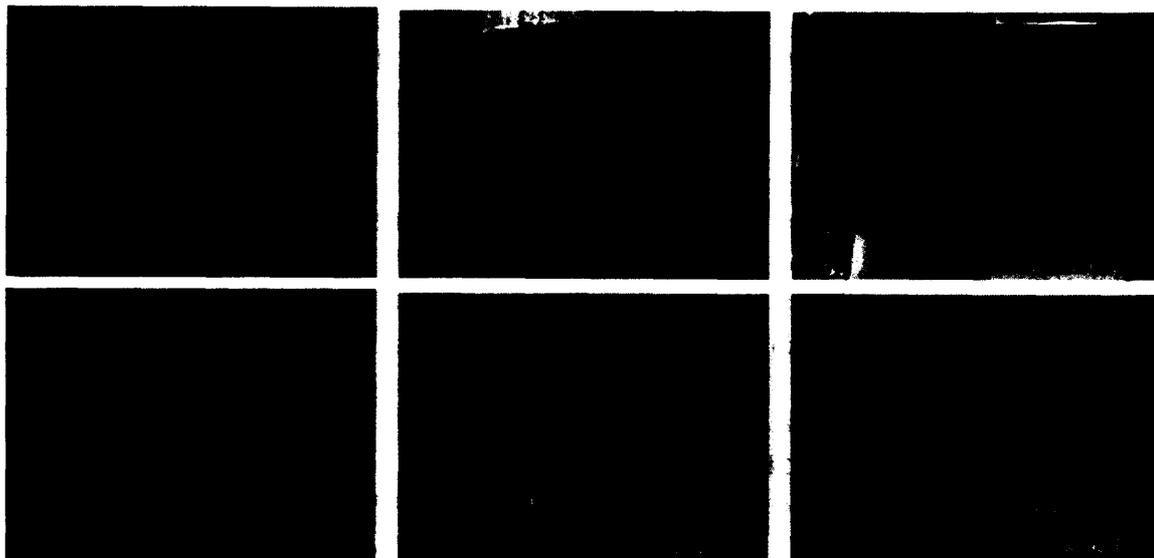


写真-1 直交梁のひび割れ状況

表-4 最大耐力と計算値の比較(kN)

	載荷方向	実験値	計算値*
P5	正	367.5	348.8
	負	377.5	342.7
P6	正	385.0	348.8
	負	374.5	342.7
P7	正	419.0	419.8
	負	418.5	412.4

※梁曲げ耐力略算式による。

試験体 P6 における初期ひび割れの発生状況は、 $R=0.05\text{rad}$ で直交梁背面に直交梁に定着される梁最外端主筋位置から斜め方向にひび割れ (図中 C2) が発生したことを除き、概ね試験体 P5 と同様であった。直交梁上面のひび割れは $R=0.01\text{rad}$ 以降、直交梁上面のひび割れは全域に拡大せず、直交梁に定着される柱側の梁主筋の定着板位置の支圧ひび割れ (同 B2) が卓越して拡大し、 $R=0.04\text{rad}$ への載荷途中で定着破壊が生じた。

試験体 P7 は試験体 P6 とほとんど同様の破壊性状を示し、 $R=0.05\text{rad}$ で梁の曲げひび割れ (図中 A)、直交梁上面の支圧ひび割れ (図中 B2) および直交梁背面の斜めひび割れ (図中 C2) がそれぞれ発生した。

なお、負荷荷時においては全試験体とも、 $R=0.01\text{rad}$ で梁の曲げひび割れおよび柱と直交梁の付け根を起点とする直交梁の斜めひび割れが発生し、その後の変位振幅の増加に伴い両ひび割れが拡大する傾向であった。正載荷時で発生した支圧ひび割れは負荷荷時では直交梁の下面にほとんど生じなかった。これは、負荷荷時で引張力を受ける下端主筋は直交梁コア内に定着されているため、

直交梁主筋と直交梁スターラップによって良好な拘束状態となったことが一因と考えられる。

3.2 荷重-変形関係

各試験体の柱せん断力-層間変形角関係を図-4 に示す。図中には梁曲げ略算式による計算値、ならびに柱内あるいは直交梁に定着された梁主筋が初めて降伏したポイントを示す。また、表-4 にはそれぞれの載荷方向における試験体の実験時最大耐力と計算値の比較を示す。

(1) 試験体 P5

正載荷時では、 $R=0.005\text{rad}$ で曲げひび割れが梁に、 $R=0.01\text{rad}$ でねじりひび割れが直交梁背面にそれぞれ生じ、それに伴い剛性の低下が認められた。 $R=0.015\sim 0.02\text{rad}$ で全ての梁主筋が引張降伏に到達し、最大耐力 367.5kN を記録した。その後、 $R=0.04\text{rad}$ へ向かう載荷途中で梁主筋定着部の定着破壊による直交梁かぶりコンクリートの剥離破壊が生じ、架構の耐力が急激に低下した。

負荷荷時におけるひび割れ状況は定着破壊の発生を除き、正載荷時と概ね同様の傾向を示した。梁主筋は $R=0.015\text{rad}$ までに引張降伏に到達した。なお、負荷荷時には定着破壊は認められず耐力は低下しなかった。最大耐力は 377.5kN を記録した。また、最大耐力は正載荷時および負荷荷時ともに計算値を上回った。

(2) 試験体 P6

正載荷時では $R=0.02\text{rad}$ までは試験体 P5 と概ね同様のひび割れ破壊性状および復元力特性を示したが、 $R=0.03\text{rad}$ で最大耐力 385kN を記録した。その後、 $R=0.04\text{rad}$ への載荷中に直交梁背面隅角部から梁主筋の定着板に向かう定着ひび割れが拡大し、架構の耐力も低下したが低下割合は試験体 P5 よりも緩やかであった。試験体 P5 と比較すると、定着部補強筋のディテールが耐力および変形性状に及ぼす影響を顕著に認められる。

負荷荷時においては $R=0.04\text{rad}$.に到るまで試験体P5とほとんど同様の復元力特性となり、耐力低下することなく最大耐力 374.5kN を記録した。

(3) 試験体 P7

試験体 P7 は正載荷時では $R=0.005\text{rad}$.までに梁の曲げひび割れおよび直交梁のねじりひび割れが発生し、それに伴い剛性の低下が認められた。 $R=0.02\text{rad}$.までの載荷で直交梁に定着された梁主筋の一部を除いて引張降伏に到達した。 $R=0.03\text{rad}$.で最大耐力 419.0kN を記録したが、計算値の 419.8kN を若干下回った。

負荷荷時では $R=0.03\text{rad}$.まで前述2体とほとんど同様の復元力特性を示したが、 $R=0.04\text{rad}$.でわずかな耐力低下が確認された。 $R=0.03\text{rad}$.で最大耐力 418.5kN を記録しており、実験値は計算値を上回った。

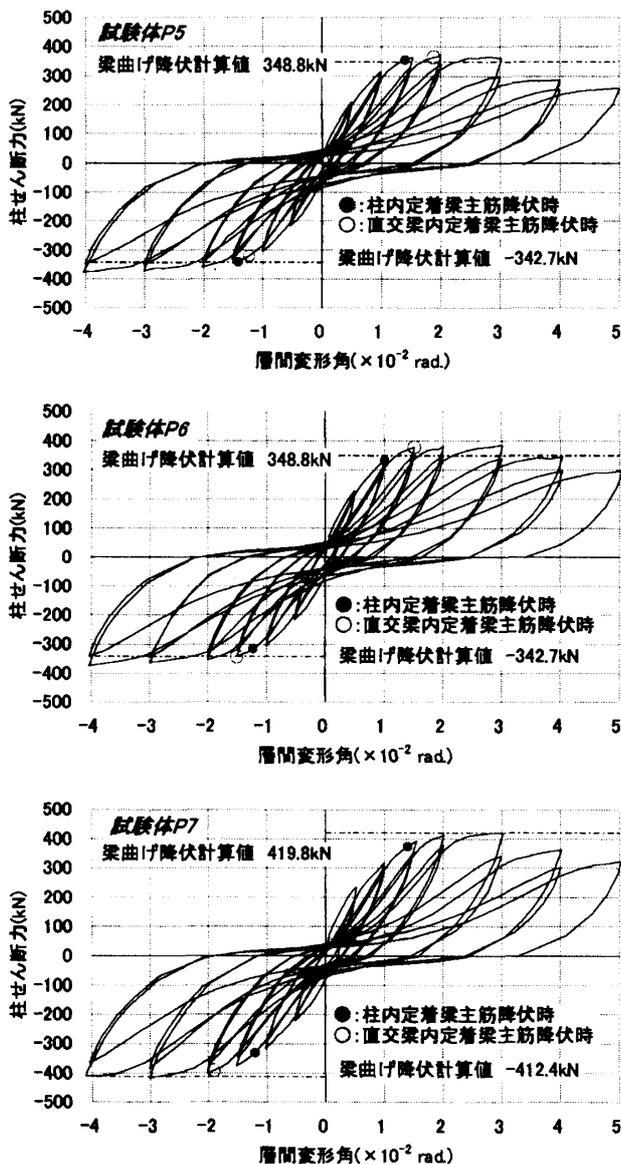


図-4 柱せん断力-層間変形角関係

3.3 梁主筋の応力分布

図-5に柱梁フェイス位置から定着板までの梁主筋の応力分布性状を示す。ここでは、鉄筋は完全弾塑性体であるものと仮定してひずみ測定値を応力に変換している。また、図-6にはひずみゲージの貼付位置を示す。

試験体P5は上端主筋が引張力を受ける正載荷時では、柱フェイス位置における梁主筋応力は $R=0.005\sim 0.02\text{rad}$.まで柱内に定着される主筋の方が直交梁に定着される主筋よりも応力負担割合が高いことが認められる。この傾向は下端主筋が引張力を受ける負載荷時でも同様である。しかしながら、上端主筋では $R=0.02\text{rad}$.で、下端主筋

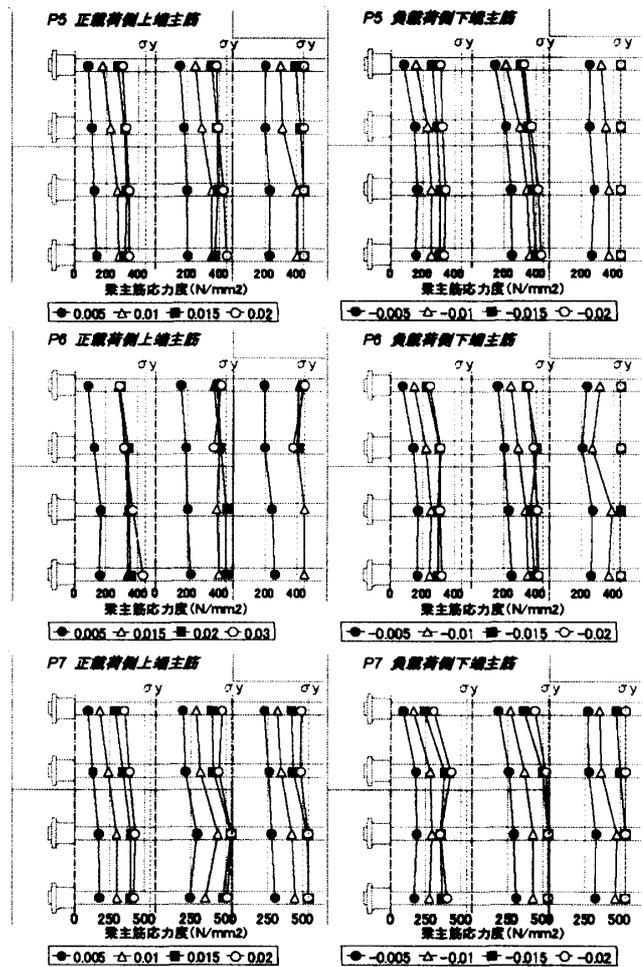


図-5 梁主筋の応力分布図

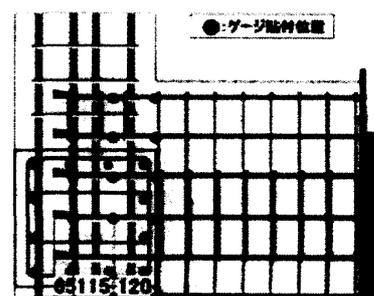


図-6 梁主筋ゲージ貼付位置

では $R=0.015\text{rad}$ で全主筋が引張降伏に達した。

試験体 P6 は正載荷時では $R=0.02\text{rad}$ までに直交梁に定着される 2 本の梁主筋が引張降伏に到っていない。最外主筋は $R=0.03\text{rad}$ で明確な引張降伏が確認されたが、柱に近い側の鉄筋は明確な引張降伏は認められなかったが、ひずみレベルは引張降伏に相当するものであった。

下端側では $R=0.01\text{rad}$ までは柱内定着主筋と直交梁定

着主筋とで負担応力の割合の差異が認められるが、 $R=0.015\text{rad}$ 以降は全主筋が引張降伏に到達した。

試験体 P7 は他の試験体と同様に、柱内に定着される主筋よりも直交梁に定着される主筋の方が応力負担は小さく、特に上端側は引張降伏に到らなかった。下端側は $R=0.02\text{rad}$ で全主筋が引張降伏に到達した。また、試験体 P6 の時に見られたような直交梁定着主筋の定着位置の違いによる明確な応力負担割合の変化は認められなかった。

3.4 引抜性状

$R=0.005\sim 0.02\text{rad}$ までの各載荷サイクルピーク時における梁主筋の引抜量を図-7に示す。引抜量の測定は図-8に示すように、定着板背面より延長したボルトと直交梁背面のコンクリートとの相対変位による。なお、正載荷時においては上端主筋の引抜量を、負載荷時には下端主筋の引抜量を示している。

梁主筋に SD390 鉄筋を使用した試験体 P5 および P6 において、柱内に定着された梁主筋の引抜性状は上端主筋および下端主筋ともにほとんど同様である。また、直交梁に定着された下端主筋も概ね同様の傾向となっている。一方、SD490 鉄筋を用いた試験体 P7 は前述の 2 つの試験体と比較して同一変位振幅における引抜量は大きくなっているが、引抜性状は概ね同様の傾向が見受けられる。

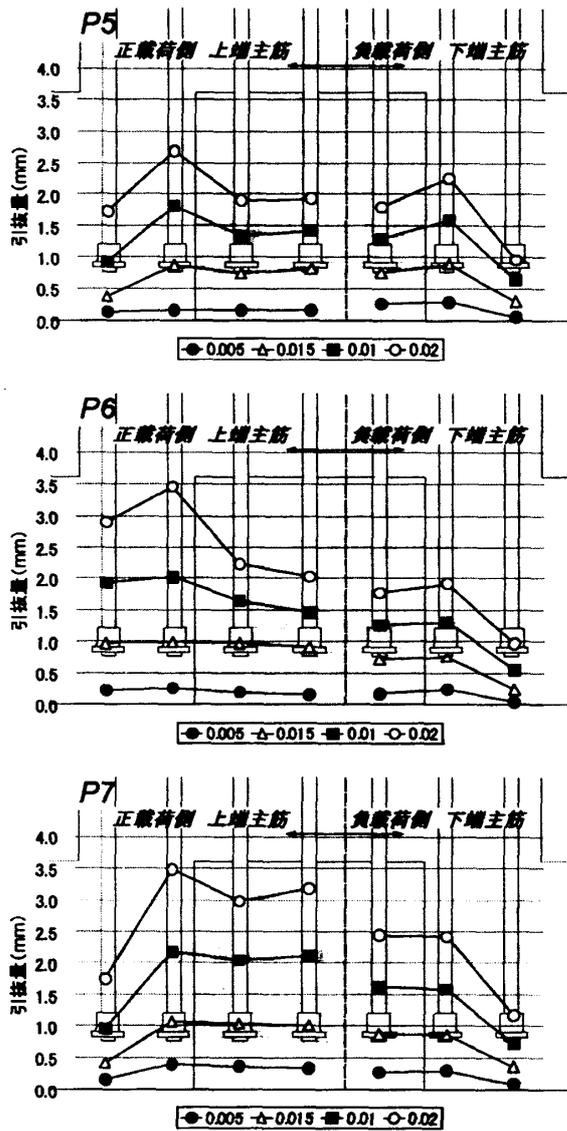


図-7 梁主筋引抜性状

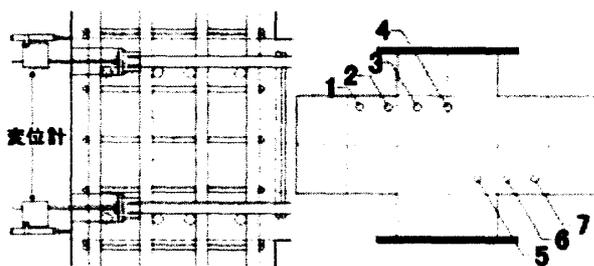


図-8 梁主筋引抜測定方法および測定主筋

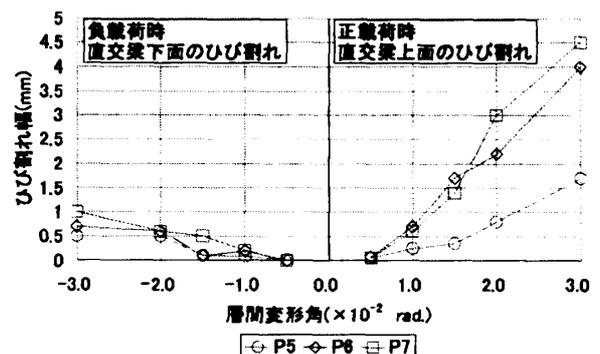
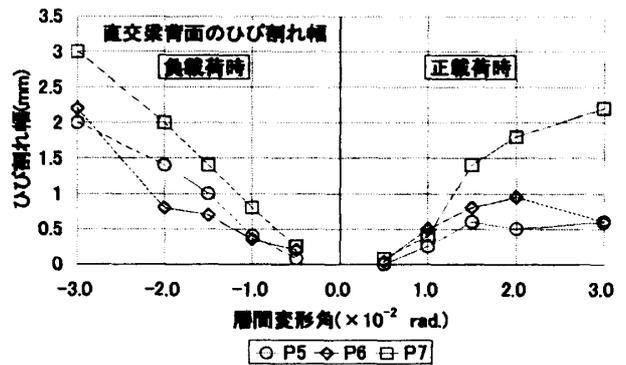


図-9 ひび割れ幅履歴

4. 考察

4.1 定着部補強筋の影響

定着部補強筋のディテールをパラメータとした試験体 P5 および P6 について比較検討を行う。また、図-9 には $R=0.03\text{rad}$ までの各載荷サイクル 1 回目のピーク時における最大ひび割れ幅を、直交梁背面、直交梁上面および下面についてそれぞれ示す。なお、直交梁上面は正載荷時の、直交梁下面は負載荷時のひび割れ幅である。

3.1 節で述べたように、両試験体には正載荷時において直交梁上面に定着板による支圧ひび割れが発生した。図-9 に示すようにいずれの試験体も $R=0.015\text{rad}$ 以降にひび割れ幅の増加割合が大きくなっている。また、試験体 P5 よりも試験体 P6 の方が最大ひび割れ幅が大きくなっているが、これは、試験体 P5 では直交梁上面の全域にひび割れが分散したのに対して、試験体 P6 では柱に近い側の梁主筋の定着板位置の支圧ひび割れが大きく集中したためである。

試験体 P6 では当該主筋に定着部補強筋のフックが掛かっているため、定着板および梁主筋の直交梁上面へのはらみ出しに対する拘束力が低くなり、結果として定着板の引抜移動量が大きくなったものと考えられる。よって、 $R=0.03\text{rad}$ の大変形に到っても明瞭な引張降伏が認められなくなるような応力負担割合の低下が生じたと推察される。一方、フックの掛かっている梁最外端側主筋では $R=0.03\text{rad}$ において引張降伏が生じており、フックの有無による有意差が認められる。

また、正載荷時に生じた直交梁背面のひび割れに着目すると、試験体 P5 は柱と直交梁の付け根から斜めひび割れが生じたのに対し、試験体 P6 は概ね梁最外端主筋位置から斜めひび割れが生じている。このようなひび割れ発生位置の違いを勘案すれば、定着部補強筋を直交梁と柱の接合面を横断して配筋することで直交梁の固定度が増加し、梁の曲げ耐力が増加したものと推察される。

なお、負載荷時においては直交梁下面および直交梁背面のひび割れ状況、並びに履歴特性に大きな差異は認められなかった。

4.2 梁主筋強度の影響

梁主筋の強度の影響を梁主筋に SD390 を用いた試験体 P6 と SD490 を用いた試験体 P7 の比較から検討する。

正載荷時には試験体 P7 は定着部の破壊の影響もあり、直交梁に定着される全ての梁上端主筋が引張降伏しなかった。また、 $R=0.015\text{rad}$ 以降の試験体 P7 の直交梁の背

面のひび割れ幅は、試験体 P6 よりも大きくなっており、直交梁の固定度が低くなっているものと推察される。このように定着破壊および直交梁の固定度の低下に起因して、梁の曲げ耐力が若干計算値よりも低くなったものと考えられる。

一方、負載荷時には両試験体ともに全下端主筋が引張降伏した。試験体 P6 の実験時最大耐力が 374.5kN で、梁曲げ耐力計算値の 342.7kN を大きく上回ったのに対し、試験体 P7 の実験時最大耐力は 418.5kN で同計算値の 412.4kN を若干上回る結果となった。試験体 P6 および試験体 P7 とともに変位振幅の増加に伴いひび割れ幅が拡大している傾向が認められるが、いずれの載荷サイクルにおいても試験体 P7 の方がひび割れ幅が大きくなっている。ひび割れ幅の拡大に伴い直交梁の固定度が低下したことによって試験体 P7 の実験時最大耐力と曲げ耐力計算値の比が小さくなったものと考えられる。

5. まとめ

幅広梁を有する外柱梁接合部試験体の静的加力実験の結果から、当該接合部の構造特性は直交梁の以下の特性に影響されることを明らかにした。

- 1) 直交梁の背面に生じる斜めひび割れに起因する直交梁の固定度の低下によって梁の曲げ耐力が低下する。
- 2) 定着部補強筋を柱と直交梁の界面を横切るように配筋することで直交梁の固定度を高めることができる。
- 3) 定着部補強筋のフックを上下端の梁主筋同士に掛けることで定着板のはらみ出しを抑え、引抜に対する抵抗を高めることができる。

参考文献

- 1) 藤原篤茂, 足立智弘, 松井智哉, 倉本洋: 梁主筋に機械式定着を用いた外柱-幅広梁接合部の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, pp.223-228, 2007.7
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 3) 東京鉄鋼株式会社: プレートナット工法, (財)日本建築センター-一般評価 BCJ 評定-RC0152-02
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999