論文　溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法による RC 基礎梁の曲げおよび交差部の構造性能

岡田　健良[*1]・金久保　利之[*2]・掛川　萌子[*3]・高橋　辰弥[*4]

要旨：本研究では，溶接組立鉄筋ユニットを用いたキャップタイ工法による鉄筋コンクリート造基礎梁の基本的な曲げ性能ならびに布基礎交差部の構造性能を把握する目的として，主筋がダブル配筋である実大の 2 種類の片持ち形式梁試験体による正負交番繰返し加力実験を行った。実験の結果，キャップタイ工法による試験体の最大耐力ならびに最大耐力以降の性能は，通常配筋の試験体と同等以上であることがわかった。また，交差部直交梁もダブル配筋であると，主梁の主筋が降伏し，曲げ強度程度の耐力を発揮できることがわかった。

キーワード：基礎梁，スポット溶接，曲げ性能，重ね継手，ダブル配筋，定着性能

1. はじめに

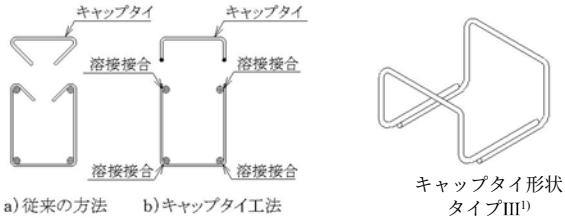
現在，戸建住宅などの低層建物の鉄筋コンクリート造基礎では，工場であらかじめ溶接接合されたシングル配筋ユニットが利用され，布基礎の立上り部やべた基礎の梁に広く普及するようになった。しかし，木造以外の構造種別では，3 階建て以上の規模になると，従来通り，現場で主筋をダブル配筋とし，フック付き肋筋を配筋する工事が主である。職人不足が喫緊の課題と言われるように，現場での省力化を図ることが急務となっている。

著者らは，溶接接合されたシングル配筋ユニットによる組立技術をダブル配筋へ応用し，実用化に向けた基礎的データを蓄積することを目的とした研究を進めている。キャップタイ工法は，主筋と肋筋をスポット溶接接合して，全体を U 字形に加工したユニットと，立体的に曲げ加工したキャップタイを現場へ搬入し，組み立てる工法である（**図－1**）。前報[1)]では肋筋溶接部にもっとも大きな負担が生じると考えられるせん断破壊に着目し，実大梁試験体の曲げせん断加力を行って，従来配筋梁試験体と同等の性能を有していることを確認した。本報では，より実際の部材に近い状態での構造性能を確認することを目的とし，スタブを有する曲げ降伏先行タイプおよび布基礎交差部の 2 種類の試験体を作製し，片持ち梁形式の正負交番繰返し加力実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の一覧を**表－1** に示す。試験体のタイプは 2 種



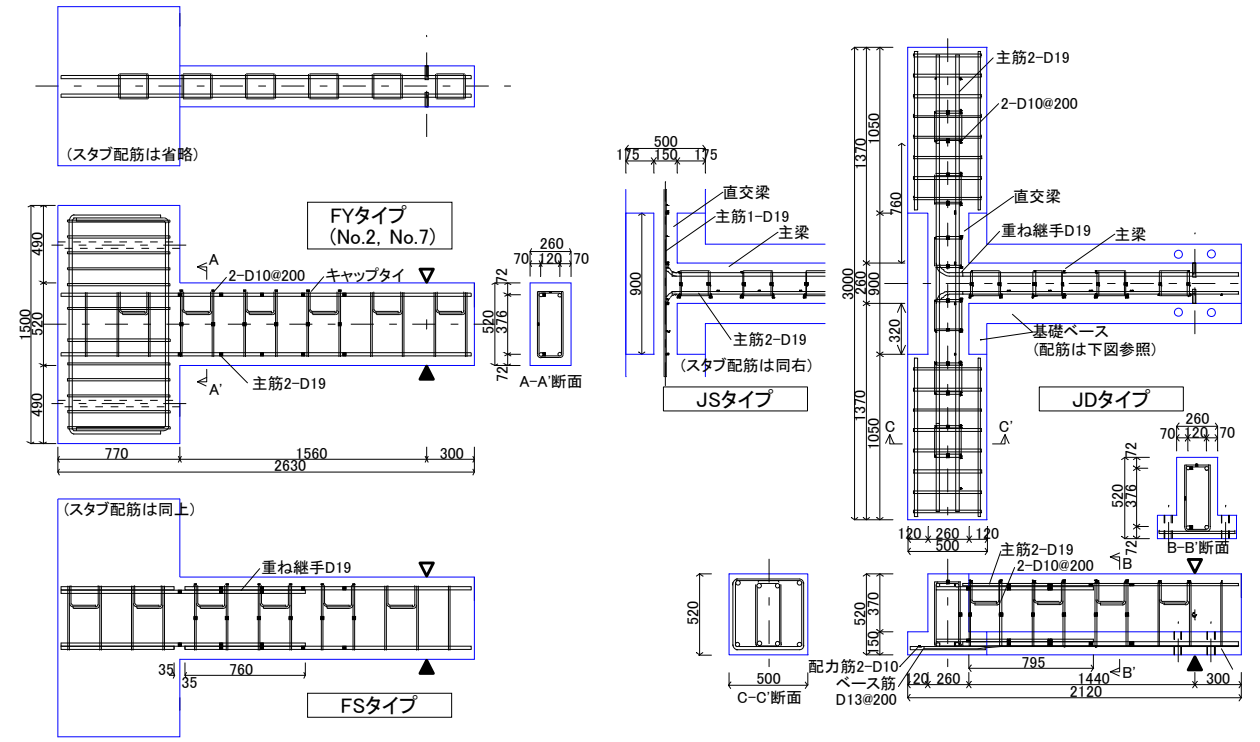
図－1　キャップタイ工法

表－1　試験体一覧

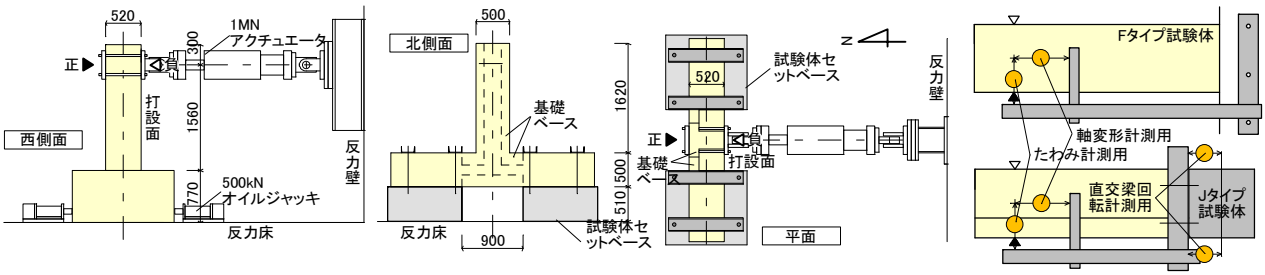
試験体名	共通事項	コンクリート目標強度	試験体タイプ				
			タイプ	肋筋	キャップタイ	主筋継手	直交梁
No.1	断面 b×D＝260×520mm せん断スパン比 2.77～3.00 主筋 2-D19（SD345） p_t＝0.49% 肋筋 2-D10@200（SD295） p_w＝0.27%	18MPa	FY	135°フック	なし	なし	―
No.2			FY	全強度タイプ溶接	タイプ III [1)]		
No.3			FS			あり	
No.4			JS				シングル
No.5			JD				ダブル
No.6		30MPa	FY	135°フック	なし	なし	―
No.7			FY	全強度タイプ溶接	タイプ III [1)]		
No.8			FS			あり	
No.9			JS				シングル
No.10			JD				ダブル

試験体タイプ　FY:主筋曲げ降伏先行型，FS:継手あり主筋曲げ降伏先行型，JS:直交梁シングル配筋，JD:直交梁ダブル配筋

*1 （有）アフェクト設計事務所　(正会員)
*2 筑波大学　システム情報系教授　博士（工学）　(正会員)
*3 筑波大学　システム情報工学研究科　(学生会員)
*4 三栄商事（株）　技術部部長（正会員）



図－2　試験体配筋図



(a) Fタイプ試験体　　(b) Jタイプ試験体

図－3　加力方法　　**図－4　変位計位置**

類で，主筋の曲げ降伏を先行させスタブ内での主筋の定着を確保したFタイプと，実際の布基礎交差部を想定したJタイプの2シリーズとした。いずれもコンクリートの目標強度は，本工法の想定する適用範囲の下限値と上限値の18MPaと30MPaとした。試験体の形状および配筋詳細を**図－2**に示す。試験体の断面は両シリーズとも同一で，実大梁を想定した幅 b×せい D＝260mm×520mm，主筋は2-D19である。肋筋配筋はD10@200で，用いたキャップタイの形状は前報[1)]のタイプIIIである。

Fタイプ試験体では，梁端仕口での主筋曲げ降伏を想定し，試験体の固定端側に大断面のスタブを設けた。No.1，No.2，No.6No.7では主筋をスタブ内で定着させ（FYタイプ），No.3およびNo.8では重ね長さ40d（dは主筋径）として重ね継手を設けた（FSタイプ）。梁端に重ね継手を設ける手法はシングル配筋ユニットでは広く採用されている方法で，ダブル配筋の本試験体にも適用し，その性能を確認することを目的とした。なお，No.1およびNo.6は比較のための試験体で，通常の片側135°フック肋筋を用いており，キャップタイの配筋はない。Jタイプ試験体は，布基礎のT形交差部を想定し，定着側梁（直交梁）がシングル配筋の場合（JSタイプ）をNo.4とNo.9，直交梁がダブル配筋の場合（JDタイプ）をNo.5およびNo.10とした。交差部の主梁主筋には重ね継手を設け，実部材を想定し基礎ベースも設けた。

2.2 加力および計測方法

両タイプ試験体とも片持ち梁形式の加力方式を採用し，試験体を立て起こして1MNアクチュエータを用いて正負交番繰返し加力を行った。加力装置を**図－3**に示す。Jタイプ試験体では直交梁の両端スタブを試験体セットベースに固定し，主梁の反対仕口にせん断力を作用させた。せん断スパンは，Fタイプで1,560mm，JSタイプで1,495mm，JDタイプでは1,440mmである。また直交梁のねじりクリアスパンは肋筋の2ピッチを想定し，片側320mmとした。なお，アクチュエータの重量は，カウンターウエイトを設けて相殺させた。加力は，部材角1/400～1/33rad.の同一部材角で2回ずつの正負繰返し加力，部

材角 1/20 および 1/15rad.では 1 回の正負加力を行った。キャップタイ側（打設面）が圧縮側（J タイプ試験体ではベースが引張側）となる方向を正加力とした。

計測項目は，荷重（アクチュエータのロードセル），梁加力点でのたわみ，主梁軸変形，試験体局部変形および主筋，継手筋と肋筋およびキャップタイの歪である。また，J タイプ試験体では直交梁の回転（ねじり角）も計測した。変位計の設置位置を**図－4** に示す。

2.3 使用材料

主筋には D19（SD345），肋筋およびキャップタイには D10（SD295）を用いた。コンクリートには目標圧縮強度 18MPa と 30MPa の普通コンクリートを用いた。これらの材料特性を，**表－2** および**表－3** に示す。

3. 実験結果および検討

3.1 破壊状況およびせん断力－部材角関係

例として，18MPa シリーズ試験体の最終破壊状況を**図－5** に，J タイプ試験体の最終ひび割れ状況を**図－6** に，せん断力－部材角関係を**図－7** に示す。また，実験結果の一覧を**表－4** に示す。

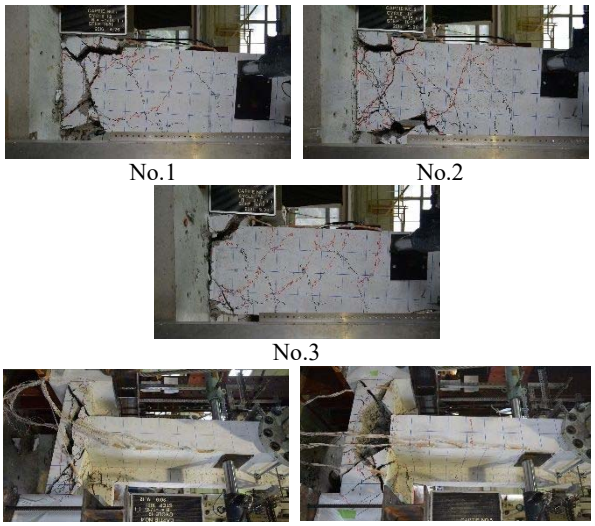
F タイプ試験体では，コンクリート強度によらず，1/400rad.加力サイクル時に曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れが発生した。1/200rad.加力サイクル時に主筋が降伏し，耐力上昇が緩やかになった。その後は紡錘型の履歴性状を示し，圧縮側コンクリートの圧壊およびかぶりコンクリートが剥落した。1/20rad.または 1/15rad.加力サイクルで主筋の座屈が見られ，その際には緩やかな

表－2　使用鉄筋の材料特性

種別	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏歪 (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	使用箇所
D19	398	191	0.208	550	22.9	主筋
D10	349	190	0.184	465	24.5	肋筋

表－3　コンクリートの材料特性

目標強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	割裂引張強度 (MPa)	試験体
18	24.8	24.4	2.46	No.1～3
	22.1	20.7	2.11	No.4, 5
30	30.7	29.0	2.60	No.6～8
	35.9	29.3	2.88	No.9, 10



図－5　最終破壊状況（18MPa シリーズ）

表－4　実験結果一覧

試験体名	コンクリート目標強度	試験体タイプ	因子	実験値			曲げ強度計算値	$_eQ_{max}$ ／ $_cQ_{mu}$	破壊形式
				加力方向	最大荷重 $_eQ_{max}$(kN)	最大荷重時部材角	$_cQ_{mu}$(kN)		
No.1	18N/mm²	FY	通常	正 負	67.9 65.1	1/33 1/33	58.9	1.15 1.11	主梁曲げ降伏 →曲げ破壊
No.2		FY	溶接	正 負	75.5 74.2	1/15 1/20	58.9	1.28 1.26	主梁曲げ降伏 →曲げ破壊
No.3		FS	溶接・継手	正 負	71.8 71.8	1/20 1/20	56.2	1.28 1.28	主梁曲げ降伏 →曲げ破壊
No.4		JS	交差部シングル	正 負	38.6 25.4	1/100 1/200	58.6	0.66 0.43	直交梁主筋降伏 →ねじり破壊
No.5		JD	交差部ダブル	正 負	66.7 45.5	1/50 1/100	60.9	1.10 0.75	直交梁主筋降伏 →ねじり破壊
No.6	30N/mm²	FY	通常	正 負	72.1 68.8	1/20 1/34	58.9	1.22 1.17	主梁曲げ降伏 →曲げ破壊
No.7		FY	溶接	正 負	74.4 72.3	1/15 1/21	58.9	1.26 1.23	主梁曲げ降伏 →曲げ破壊
No.8		FS	溶接・継手	正 負	70.1 70.4	1/20 1/22	56.2	1.25 1.25	主梁曲げ降伏 →曲げ破壊
No.9		JS	交差部シングル	正 負	43.8 28.1	1/103 1/621	58.6	0.75 0.48	直交梁主筋降伏 →ねじり破壊
No.10		JD	交差部ダブル	正 負	73.3 52.6	1/100 1/100	60.9	1.20 0.86	直交梁主筋降伏 →ねじり破壊

荷重低下をともなった。最大荷重は 1/33rad.から 1/15rad.の加力サイクルで計測された。肋筋またはキャップタイの降伏は，大変形時にわずかに見られた。梁端に重ね継手を設けた FS タイプでは，FY タイプと比較して，スタブ間でのひび割れ拡幅が大きかった。

J タイプ試験体では，1/400rad.加力サイクル時に直交梁にねじれによるせん断ひび割れが発生した。1/100rad.または 1/50rad.加力サイクル時に直交梁の主筋が降伏した。直交梁のせん断ひび割れの拡幅が支配的となり，すべり型の履歴性状を示した。最終的には直交梁上面のせん断ひび割れが拡幅し，継手筋の抜け出しとともなってコンクリートが剥落した。主梁部分のひび割れの発生はごくわずかであった。正側加力と負側加力では耐力が異なり，ベースが引張となる正側加力の耐力が大きかった。

加力終了後，ひび割れが大きく拡幅した箇所およびかぶりが剥落した周辺箇所のコンクリートを斫り，F タイプ，J タイプいずれの試験体においても，肋筋溶接部の剥離やキャップタイの損傷はなかったことを確認した。

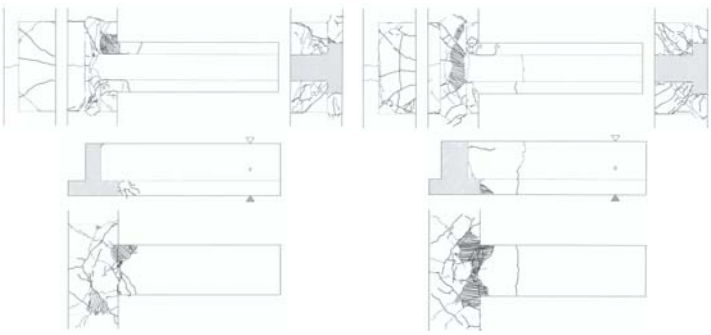
3.2 せん断力－部材角関係の包絡線の比較

F タイプ試験体のせん断力－部材角関係の包絡線を**図－8** に示す。18MPa シリーズでは，部材角 1/33rad.までは明瞭な差は見られない。部材角 1/20rad.および 1/15rad.加力サイクル時に差が見られ，キャップタイ試験体の方が通常試験体よりも耐力が大きい。30MPa シリーズでは，部材角 1/20rad.の正側まで明瞭な差は見られない。部材角 1/15rad.加力サイクル時に差が見られ，キャップタイ試験体の方が通常試験体よりも耐力が大きい。これらの試験体では，部材角 1/20rad.または 1/15rad.加力サイクル時に主筋の座屈が見られ，座屈が主要因となって耐力が低下していることから，主筋座屈時の部材角に起因する差異であると考えられる。キャップタイ試験体ではキャップタイや溶接肋筋または継手筋の存在により主筋が拘束され，座屈時の耐力低下が小さくなったと考えられる。

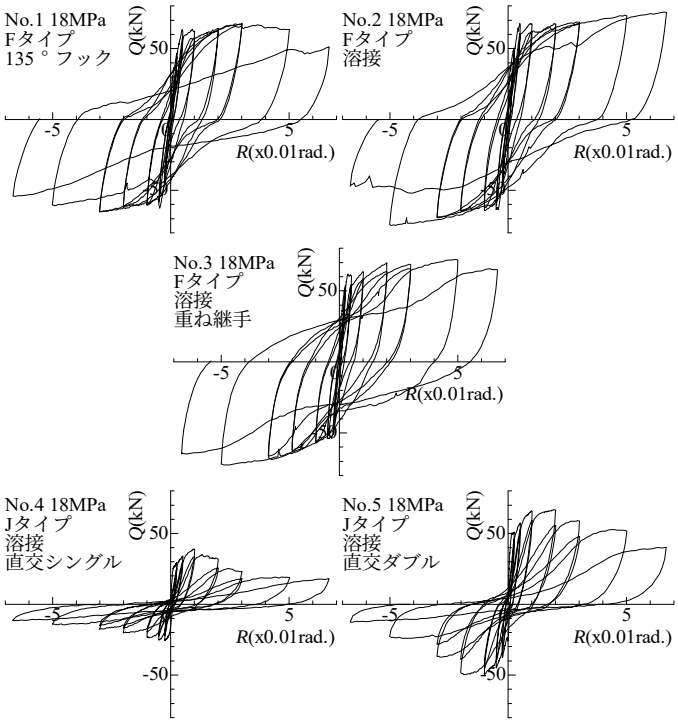
J タイプ試験体のせん断力－部材角関係の包絡線を**図－9** に示す。J タイプ試験体では直交梁の破壊が主要因であるため，直交梁の配筋の違いによる差が明瞭である。また，30MPa シリーズの方が 18MPa シリーズより耐力が大きい。

3.3 最大荷重

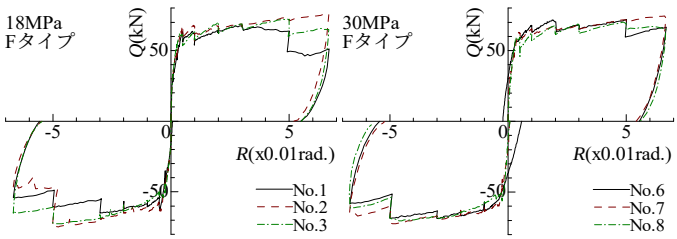
各試験体の曲げ強度計算値および最大荷重実



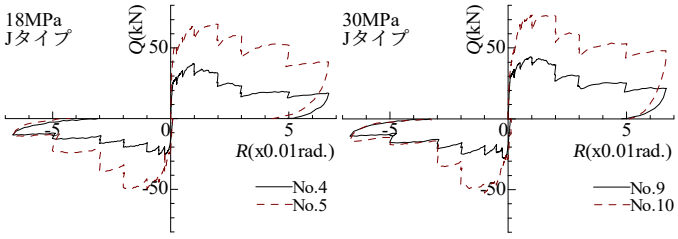
図－6　最終ひび割れ状況（J タイプ試験体 18MPa シリーズ）



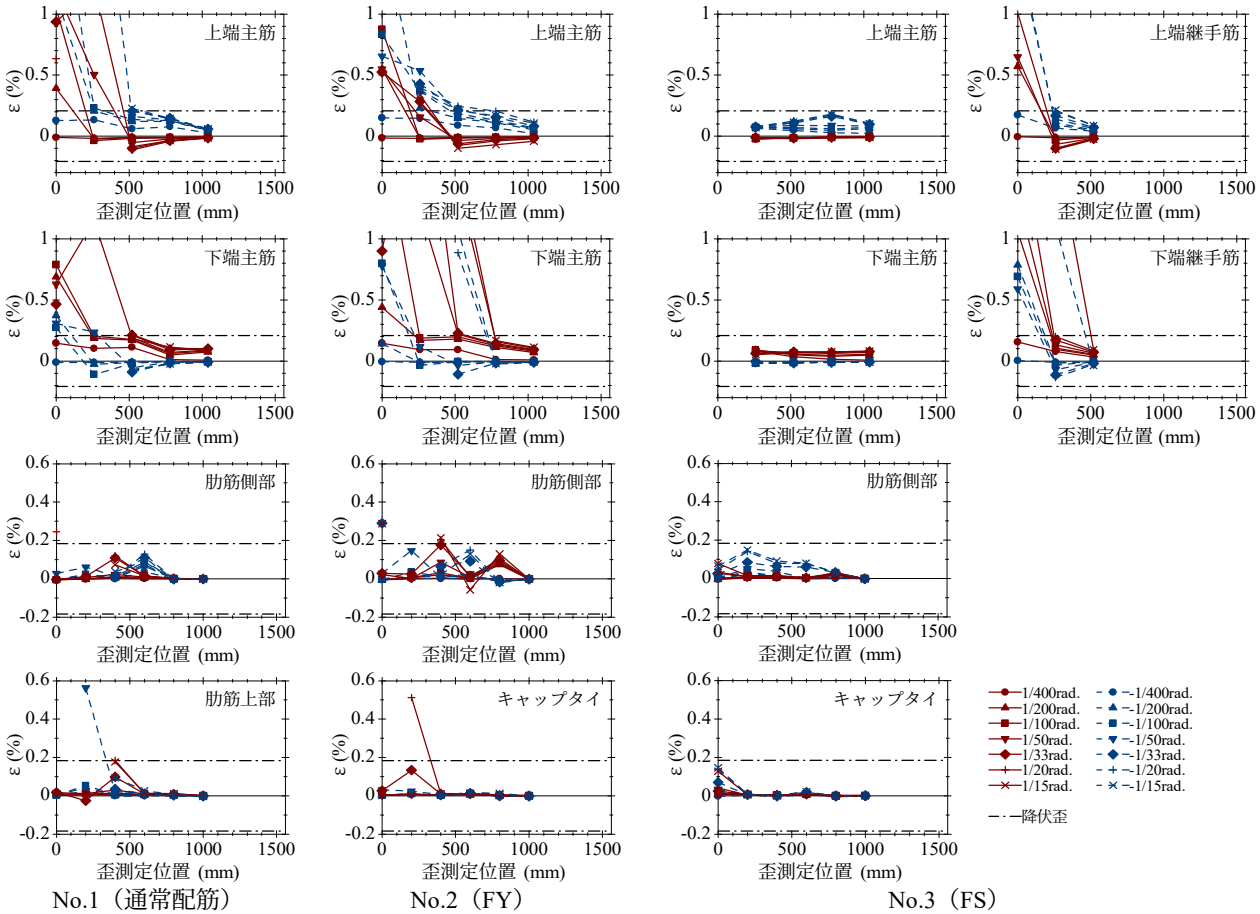
図－7　せん断力－部材角関係（18MPa シリーズ）



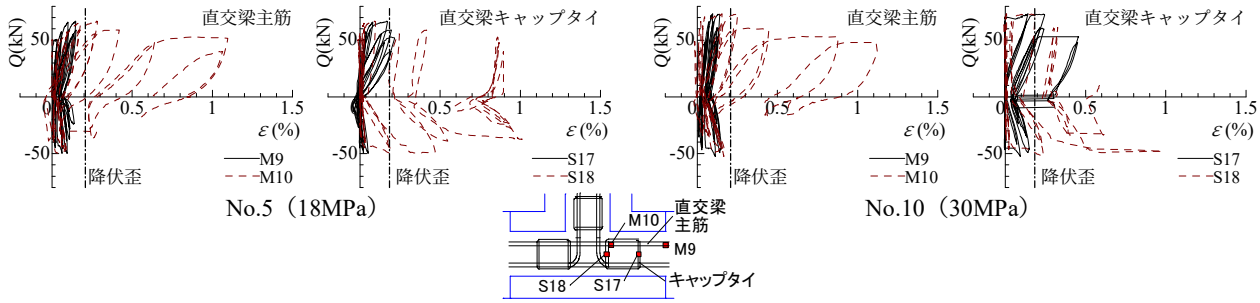
図－8　せん断力－部材角関係の包絡線（F タイプ試験体）



図－9　せん断力－部材角関係の包絡線（J タイプ試験体）



図－10　主筋・肋筋・キャップタイ・継手筋の歪分布（18MPa シリーズ）



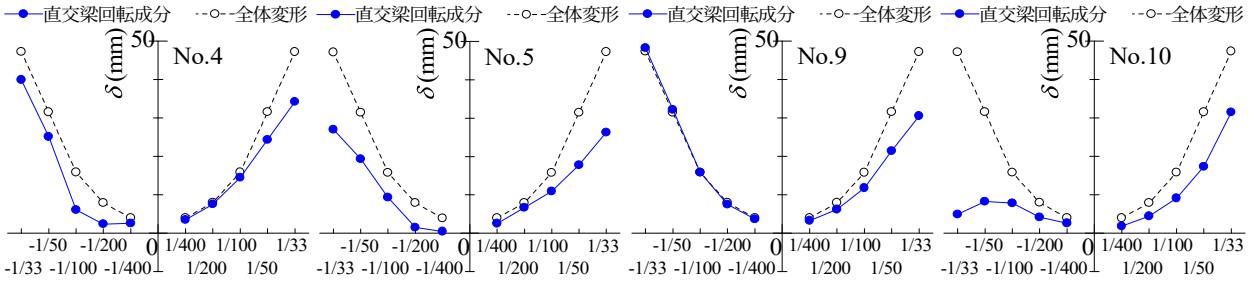
図－11　直交梁の主筋およびキャップタイの歪（JD タイプ）

験値の一覧は**表－4** に示した。曲げ強度計算値は，日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」[2]により算出した。重ね継手を有する FS タイプ試験体の有効せいは，継手筋位置とした。なお，本報では，ダブル配筋した主梁の性能を確認するため，直交梁のねじれ性状が支配的となった J タイプ試験体においても，主梁の曲げ強度計算値で検討する。

F タイプ試験体ではいずれも実験値が曲げ強度計算値を上回り，その比は 1.11～1.28 である。特にキャップタイ試験体では，いずれの試験体においても 1.2 を超えている。J タイプ試験体では，直交梁の破壊により実験値は曲げ強度計算値に至らない場合が多いが，直交梁がダブル配筋の No.5 および No.10 試験体では正側加力において実験値が計算値を上回り，その比は 1.10～1.20 であった。直交梁がダブル配筋であると，主梁の主筋が降伏し，曲げ強度程度の耐力を発揮できる。

3.4 鉄筋の歪

F タイプ試験体（18MPa シリーズ）の主筋，肋筋，キャップタイ，継手筋の各加力サイクルピーク時の歪分布を**図－10** に示す。横軸の歪測定位置は危険断面（スタブ境界）が原点となっており，1,560mm 位置が加力点である。主筋の 0.5D（D は梁のせい）位置の歪をみると，No.2 試験体の歪が No.1 試験体より大きく，前報 [1]と同様に肋筋の溶接接合による主筋拘束の効果を維持する傾向が大



図－12　直交梁のねじれによるたわみの推移

きい様子が伺える。重ね継手を有する No.3 試験体では，継手筋の降伏が危険断面位置および 0.5*D* までの範囲でみられ，主梁主筋の降伏は見られなかった。

肋筋の歪は，危険断面位置から 2 本目または 3 本目の肋筋で相対的に大きくなる傾向がみられるが，1/50rad.までは降伏はみられなかった。No.2 試験体の歪が No.1 試験体より大きくなっている箇所が見受けられる。キャップタイの降伏も，1/33rad.加力サイクル以降でわずかにみられた程度であった。

JD タイプ試験体の直交梁の主筋およびキャップタイの歪とせん断力の関係を**図－11** に示す。No.5 と No.10 のいずれの試験体においても，最大荷重付近において主筋およびキャップタイの歪が降伏に達している。主筋の降伏以降，断面のねじれに伴う大きな変形に追従するように，キャップタイの歪も増加している。最終的にねじれによるせん断破壊が発生したが，その場合でも溶接部の剥離や破断はみられなかったことを，加力終了後に周辺のコンクリートを斫って確認している。

3.5 直交梁のねじれによる変形成分

J タイプ試験体において，変位計で測定した直交梁の回転角に主梁のせん断スパンを乗じ全体たわみに換算して，直交梁のねじれによる変形成分を計算した。各加力サイクルピーク時における全体変形と直交梁回転成分の推移を，横軸にサイクルを取り，**図－12** に示す。

直交梁がシングル配筋の No.4，No.9 試験体では，主梁に生じたひび割れはわずかで（**図－6** 参照），全体変形成分の多くが直交梁のねじれによるものであることが分かる。しかし，変位計を設置した位置が直交梁の中心位置であるので，その位置より上部から破壊した場合は，No.10 試験体の負側のように，直交梁の成分が減少している。

4. まとめ

(1) 曲げ降伏先行の F タイプ試験体では，主筋降伏後耐力が緩やかに上昇し，紡錘型の履歴性状を示し，圧縮側コンクリートの圧壊および主筋の座屈がみられた。肋筋またはキャップタイの降伏は大変形時にわずかにみられた程度で，溶接部の剥離やキャップタイの損傷はなかった。

(2) F タイプ試験体では最大荷重時の実験値が曲げ強度計算値を上回り，実験値の計算値に対する比は 1.11～1.28 であった。

(3) 交差部を想定した直交梁を有する J タイプ試験体では，加力早期に直交梁にねじれによるせん断ひび割れが発生し，最大耐力時に直交梁の主筋および肋筋が降伏した。直交梁上面のせん断ひび割れが拡幅し，ねじり破壊した。

(4) J タイプ試験体では，直交梁の破壊により実験値は曲げ強度計算値に至らなかった。直交梁がダブル配筋であると，主梁の主筋が降伏し，曲げ強度程度の耐力を発揮できることが認められた。

(5) 前報 [1]のせん断破壊型試験体による実験結果とあわせて，キャップタイ工法を用いた梁の構造性能は，従来配筋梁試験体と同等以上の性能を有していると考えられる。

謝辞

実験の実施，データのとりまとめにあたっては，筑波大学卒研生 高橋拓也氏の協力を得た。

参考文献

1) 掛川萌子，金久保利之，岡田健良，高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法による RC 基礎梁のせん断性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.217-222，2016.7

2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2010