筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

溶接組立鉄筋を用いた RC 造基礎梁の 構造性能に関する実験的研究

掛川萌子

修士(工学)

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保利之

2018年 3月

溶接組立鉄筋を用いた RC 造基礎梁の構造性能に関する実験的研究

論文概要

近年,住宅基礎に用いられる鉄筋コンクリートの鉄筋には,現場配筋作業の軽減や品質確 保の目的により,ユニット化した組立鉄筋が実用化されている。組立鉄筋には,鉄筋同士の 溶接の強度が組立後の形を保っていられる程度であるものと,溶接部が破壊せずせん断補強 筋の規格降伏強度を超える溶接強度を確保したものがある。後者をダブル配筋の梁に応用す る工法として、キャップタイ工法が提案されている。

既往の研究では、キャップタイ工法による梁のせん断耐力は通常のものと同等以上である ことが確認され、キャップタイ工法の有用性が示された。本研究では、キャップタイ工法の 実用化に向け、さらなる資料の蓄積に資するように構造性能を把握することを目的とする。

実部材を想定した,曲げ破壊が先行する基礎梁端部の構造性能を確認することを目的とし, 片持梁形式の正負交番漸増繰返し加力実験を実施した。スタブ端に重ね継手を設けた試験体 も作製し,継手の性能も同時に確認した。実験結果より,キャップタイ工法による試験体の 最大耐力は,通常配筋の試験体と同等かそれ以上となることが確認された。大変形時の加力 サイクルにおいて,キャップタイ付きの試験体は通常配筋の試験体より耐力が大きかった。 キャップタイまたは継手筋により主筋が拘束されたことで,主筋座屈による耐力低下が抑制 されたためだと考えられる。

主筋溶接による効果を確認するため、4 隅の主筋だけでなく全主筋をすべて溶接した試験 体を作製し、せん断加力実験を実施した。各試験体の正負の最大荷重平均値を比較すると、 主筋 3-3 本シリーズでは、通常配筋の試験体より主筋を溶接した試験体の方が大きかった。 主筋 4-2 本シリーズでは、溶接をしていない試験体の最大耐力がもっとも大きく、次いで全 主筋溶接の試験体、キャップタイの試験体となった。すべての試験体は、パラメータに関わ らずほぼ同様のひび割れ性状を示し、主筋溶接による付着割裂ひび割れの抑制効果を確認す ることができなかった。全主筋の溶接は必ずしも性能を向上させるものではないことが分か った。

溶接組立鉄筋を用いた RC 造基礎梁の構造性能に関する実験的研究

第1章 序論
1.1 研究背景
1.2 研究目的
第2章 梁端部の曲げ破壊時の構造性能4
2.1 はじめに
2.2 実験概要
2.2.1 試験体
2.2.2 使用材料
2.3 実験方法
2.3.1 加力方法
2.3.2 計測方法
2.4 実験結果
2.4.1 最終破壊状況とせん断力 - 部材角関係
2.5 実験結果の検討
2.5.1 最大耐力
2.5.2 せん断力 - 部材角関係の比較
2.5.3 鉄筋の歪分布
2.5.4 局部変形
2.6 まとめ
第3章 主筋溶接による影響
3.1 はじめに
3.2 実験概要
3.2.1 試験体
3.2.2 使用材料
3.2.3 加力方法
3.2.4 計測方法
3.3 実験結果
3.3.1 破壊状況とせん断力-部材角関係
3.3.2 ひび割れ発生状況
3.4 実験結果の検討
3.4.1 せん断力-部材角関係の比較 45
3.4.2 最大耐力

目 次

3.4.3	局部変形	19
3.4.4	鉄筋の歪分布	51
3.4.5	主筋の付着応力の推移	0'
3.5 まと	: め 7	2'
第4章 結	論	'3
謝辞		/4
参考文献·		'5

第1章 序論

1.1 研究背景

戸建住宅の鉄筋コンクリート基礎工事における鉄筋配筋作業は、従来は現場で作業員が手 作業で鉄筋を組み立てるものであったが、近年、工場であらかじめ組み上げ溶接した鉄筋(組 立鉄筋)が用いられることが多くなっている。組立鉄筋を用いることにより、現場では組立 鉄筋を設置し継手筋を結束するだけで配筋が完了し、作業時間が短縮され現場における作業 員の負担を減らすことができる。

組立鉄筋には,鉄筋同士の溶接の強度が組立後の形を保っていられる程度であるものと, せん断補強筋の規格降伏強度を超える溶接強度を確保したものがある。後者の全強度溶接組 立鉄筋をダブル配筋の梁部材に応用する工法として,キャップタイ工法が考えられている。

キャップタイ工法では、溶接後の組立鉄筋を折り曲げ加工し(図 1-1),上部にキャップタイ(図 1-2)をかぶせたものを梁の主筋と肋筋として用いる。キャップタイ工法による配筋過程を図 1-3 に示す。



図 1-1 全強度溶接組立鉄筋



図 1-2 キャップタイ



鉄筋の溶接



組立鉄筋の折り曲げ加工

キャップタイ



キャップタイをかぶせ梁の主筋と肋筋の一部として使用

図 1-3 キャップタイエ法

1.2 研究目的

建築基準法では、上部にキャップタイをかぶせるタイプの肋筋の配筋は、下側のU字型の 肋筋の端部をフック状にして主筋に固定させなければならない。しかし本研究の対象とする 組立鉄筋を用いたキャップタイ工法では、下側の肋筋の端部は主筋との溶接によって固定さ れている。

本研究では溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法の実用化に向け,構造実験を行い,破 壊性状や耐力,変形性能を確認することを目的とする。十分な構造性能が確認されれば,住 宅基礎工事における現場作業員の負担を更に軽減し,良品質の部材を用いることができる。

既往の研究^[1]では,溶接鉄筋とキャップタイを用いた基礎梁のせん断耐力は通常の135°フ ックの肋筋の基礎梁のせん断耐力と同等以上であることが確認され,キャップタイ工法の有 用性が示された。更なる実験データの蓄積のため,実部材を想定した曲げ破壊が先行する基 礎梁端部の性状を確認することを目的とした実験を行う。

また、同研究ではコンクリート目標強度 18MPa シリーズの試験体において、上端筋付着ひ び割れの拡大の抑制がみられた。主筋と肋筋が溶接により強固に緊結され、主筋のすべりが 拘束されて付着劣化の抑制効果が発揮されることが考えられる。溶接組立鉄筋の製作利便性 も考慮し、4 隅の主筋だけでなく全主筋をすべて溶接した試験体を作製し、主筋溶接による効 果を確認する。

第2章 梁端部の曲げ破壊時の構造性能

2.1 はじめに

既往の研究^[1]より,キャップタイ工法を用いた RC 基礎梁のせん断耐力は従来工法による基 礎梁のせん断耐力と同等かそれ以上であることが解明され,キャップタイ工法の有効性が確 認された。そこで本章では,更なる実験データの蓄積のため,実部材を想定した曲げ破壊が 先行する基礎梁端部の構造性能を確認することを目的とし,片持梁形式の正負交番漸増繰返 し加力実験を実施した。スタブ端に重ね継手を設けた試験体も作製し,継手の性能も同時に 確認した。

2.2 実験概要

2.2.1 試験体

試験体一覧を表 2-1 に,試験体の形状および配筋詳細を図 2-1 に示す。試験体は,実際の 住宅基礎梁を想定した,断面幅 b×せい D が 260mm×520mm,加力スパンが 1560mm の試験 体で,変動因子はコンクリート強度と配筋である。試験体は梁端部の曲げ破壊を想定し,試 験体 No.1, No.2 および No.4, No.5 は梁端部曲げ破壊時の,通常 135°フック肋筋と肋筋溶接 およびキャップタイの性能の違いを確認するためのものである。キャップタイの形状は第 1 章図 1-2 のタイプ III で,キャップタイ端を梁軸方向に折り曲げ加工したものを 2 つ1 セット で1 組のキャップタイとして用いる。試験体 No.3 および No.6 は実際の基礎交差部での主筋 継手の性状を確認するためのもので,スタブ端で重ね継手を設けている。コンクリート目標 強度は 18MPa と 30MPa とした。主筋は 2-D19,肋筋は D10@200 の配筋である。

	× = 1		
試験体名	共通事項	コンクリート 目標強度 (MPa)	配筋
No.1	断面 <i>b×D</i> (mm)		通常(135°フック)
No.2	=200×320 せん断スパン比 3.0	18	キャップタイ
No.3	主筋 2-D19 (SD345)		キャップタイ,重ね継手
No.4	<i>pt</i> =0.49% 肋筋 2-D10@200 (SD295)		通常(135°フック)
No.5	$p_w=0.27\%$ まセップタイ・	30	キャップタイ
No.6	タイプ Ш		キャップタイ,重ね継手

表 2-1 試験体一覧



No.1 および No.4 (135°フック)



No.2 および No.5 (キャップタイ)



No.3 および No.6 (キャップタイ,重ね継手)

図 2-1 試験体配筋図

2.2.2 使用材料

(1) 鉄筋

主筋には異形鉄筋 D19 (SD345),肋筋には異形鉄筋 D10 (SD295A)を用いた。鉄筋の材料 特性を表 2-2 に、応力 - 歪関係を図 2-2 に示す。

鉄筋 鋼種	御話	降伏強度	弹性係数	降伏歪	引張強度	破断伸び	借去
	(MPa)	(GPa)	(%)	(MPa)	(%)	浦石	
D19	SD345	398	191	0.208	550	22.9	主筋
D10	SD295A	349	190	0.184	465	24.5	肋筋

表 2-2 鉄筋の材料特性





(2) コンクリート

コンクリートには、レディミクストコンクリートを用い、目標圧縮強度は 18MPa および 30MPa とした。コンクリートの調合表を表 2-3 に示す。

打設時のコンクリートのフレッシュ性状を表 2-4 に示す。試験体は、約1週間の間、シートで封緘した型枠内で養生し、その後脱型して実験室内に静置した。

各目標強度試験体シリーズの加力期間の前,後の試験結果の平均値を,各試験体の検討用 コンクリート強度とした。各試験体の検討用コンクリート強度を表 2-5 に示す。

目標	W/C		備去								
強度	(%)	С	W	S	G	Ad*	加巧				
18MPa	74.5	256	191	924	888	2.56	No.1~3				
30MPa	61.5	355	183	814	940	3.55	No.4~6				

表 2-3 調合表

*: AE 減水剤標準形(I種)マスターポゾリス 78S

表 2-4 フレッシュ性状

目標 強度	打設日	外気温 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリ ート温度 (℃)	備考
18MPa	2016.8.8	30	16.0	5.8	28	No.1~3
30MPa	2016.7.12	27	17.5	3.0	27	No.4~6

表 2-5 検討用コンクリート強度

目標 強度	圧縮強度 (MPa)	静弹性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)	備考
18MPa	24.8	24.4	2.46	No.1~3
30MPa	30.7	29.0	2.60	No.4~6

2.3 実験方法

2.3.1 加力方法

加力装置を図 2-3 に示す。ひび割れ観察面の逆側を示している。試験体を立て起こした上で、1MN アクチュエーターによる片持ち梁形式の正負交番漸増繰返し載荷を行った。加力履歴を図 2-4 に示す。部材角 1/400~1/33rad.は同一部材角で 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。



計測項目は荷重,加力点におけるたわみ,主筋,継手筋,肋筋およびキャップタイの歪,試験体局部変形(曲げ変形およびせん断変形)である。変位計取付位置を図 2-5 に,歪ゲージ貼付位置を図 2-6 に示す。



図 2-5 変位計取付位置



No.3 および No.6 (キャップタイ, 重ね継手)

図 2-6 歪ゲージ貼付位置

2.4 実験結果

2.4.1 最終破壊状況とせん断力 - 部材角関係

最終破壊状況とせん断力 - 部材角 (*Q* - *R*) 関係を図 2-7 および図 2-8 に示す。試験体 No.4 は試験体セット時に誤載荷があった。その際負側の曲げひび割れおよびせん断ひび割れが発生し、負側の主筋が降伏したため、その後 1/100rad.のサイクルから加力・計測を実施した。 No.4 以外の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 (No.3 および No.6 では継手筋) 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の剥落が見られた。1/20rad.または 1/15rad.加力サイクルで緩やかな荷重低下をともなう主筋の座屈が見られた。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るのみであったが、No.2 試験体では 1/15rad.の加力サイクルで肋筋の破断が確認された。No.3 および No.6 の重ね継手の試験体は梁とスタブとの境界におけるひび割れ幅が大きく拡幅し、梁に発生したひび割れは大きく拡幅しなかった。



No.1(通常配筋)

No.2(キャップタイ)

No.3 (キャップタイ, 重ね継手)

No.4(通常配筋)

No.5 (キャップタイ)

No.6 (キャップタイ, 重ね継手)

2.5 実験結果の検討

2.5.1 最大耐力

各試験体の最大荷重実験値と計算値の一覧を表 2-6 に示す。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 1988 年版」^[2]により算出した。No.3 および No.6 の有効せいは継手筋位置とした。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。中でもキャップタイ付きの試験体においては全て 1.2 を超えている。

				実験値	直	中にた				
試験 体名	コンクリート 目標強度	西筋	加力方向	最大荷重 eQmax(kN)	最大荷 重時部 材角	画り强 度計算 値 cQmu(kN)	eQmax / cQmu			
No.1		通常 (135 [°] フック)	正 負	67.9 65.1	1/33 1/33	58.9	1.15 1.11			
No.2	18MPa	溶接	正負	75.5 74.2	1/15 1/20	58.9	1.28 1.26			
No.3		溶接・ 継手	正負	71.8 71.8	1/20 1/20	56.2	1.28 1.28			
No.4		通常 (135 [°] フック)	正負	72.1 68.8	1/20 1/34	58.9	1.22 1.17			
No.5	30MPa	溶接	正 負	74.4 72.3	1/15 1/21	58.9	1.26 1.23			
No.6		溶接・ 継手	正負	70.1 70.4	1/20 1/22	56.2	1.25 1.25			

表 2-6 最大荷重一覧

(1)曲げ強度計算式(略算式)

$$_{c}Q_{mu} = 0.9\sum a_{t}\cdot\sigma_{y}\cdot d/L$$

(2-1)

ここで,

cQmu :曲げ強度

- *a*_t : 引張鉄筋断面積
- *σ*_y : 引張鉄筋の降伏強度
- *d* : 有効せい
- L : 加力スパン (1560mm)

2.5.2 せん断力 - 部材角関係の比較

せん断力 - 部材角 (*Q* - *R*) 関係の包絡線を示す。18MPa シリーズでは部材角 1/33rad.まで 明確な差は見られず,部材角 1/20rad.および 1/15rad.加力サイクルにおいてキャップタイ試験 体の方が通常試験体よりも耐力が大きくなった。30MPa シリーズにおいても 1/20rad.まで明 確な差は見られず,部材角 1/15rad.の加力サイクルにおいて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くなった。両シリーズで差が生じるサイクルの差異は,耐力低下の主 要因となる主筋座屈時の部材角に起因するものであると考えられる。またキャップタイ試験 体ではキャップタイまたは継手筋により主筋が拘束されたことで,主筋座屈による耐力低下 が抑制されたと考えられる。

図 2-9 せん断力 - 部材角関係の抱絡線

2.5.3 鉄筋の歪分布

試験体の主筋,継手筋の各加力サイクルピーク時の歪分布を,No.1~No.3 (18MPa シリーズ) について図 2-10 に,No.4~No.6 (30MPa シリーズ) について図 2-11 にそれぞれ示す。横軸の 歪測定位置はスタブ境界面を原点としており,1,560mm 位置が加力点である。主筋の降伏範 囲は,No.1 試験体では 520mm 程度,No.2,No.4,No.5 試験体では 780mm 程度であった。重 ね継手を有する No.3 および No.6 試験体では,継手筋の降伏がスタブ境界面から 260mm 程度 の範囲で見られ,継手筋の降伏が先行し梁主筋の降伏は見られなかった。

各試験体の肋筋,キャップタイの各加力サイクルピーク時の歪分布を,18MPa シリーズについて図 2-12 に,30MPa シリーズについて図 2-13 にそれぞれ示す。肋筋の歪はスタブ境界面位置から2本目または3本目で相対的に大きくなる傾向が見られたが,1/50rad.加力サイクルまではいずれも降伏は見られなかった。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見られた程度であった。

図 2-10 主筋および継手筋の歪分布(18MPa シリーズ)

図 2-11 主筋および継手筋の歪分布(30MPa シリーズ)

図 2-12 肋筋およびキャップタイの歪分布(18MPa シリーズ)

図 2-13 肋筋およびキャップタイの歪分布(30MPa シリーズ)

2.5.4 局部変形

試験体を3つの区間に分け(図 2-5参照),局部変形を測定した。曲げ変形を各区間の変位から区間ごとに曲率を算出して求めた。各試験体の,各区間の曲げ変形の全体変形に対する割合の推移を図 2-14に示す。

いずれの試験体においても,曲げ変形が支配的である。また,重ね継手の試験体である No.3 と No.6 では梁端部での変形割合が特に大きい。梁端部とスタブとの境界におけるひび割れ幅 が大きかったためであると考えられる。

■ 区間1 ■ 区間2 ■ 区間3

図 2-14 曲げ変形の割合

2.6 まとめ

本章では,実部材を想定した曲げ破壊が先行する基礎梁端部の構造性能を確認することを 目的とし,片持梁形式の正負交番漸増繰返し加力実験を実施した。スタブ端に重ね継手を設 けた試験体も作製し,継手の性能も確認した。

実験結果より,キャップタイ工法による試験体の最大耐力は,通常配筋の試験体と同等か それ以上となることが確認された。また,大変形時の加力サイクルでは,キャップタイ付き の試験体が通常配筋の試験体より耐力が大きかった。キャップタイまたは継手筋により主筋 が拘束されたことで,主筋座屈による耐力低下が抑制されたと考えられる。

全ての試験体において,最大耐力は実験値が計算値を上回っており,その比は 1.11~1.28 で ある。特にキャップタイ付きの試験体は全て 1.2 を超えていた。

第3章 主筋溶接による影響

3.1 はじめに

既往の研究^[1]では、コンクリート目標強度 18MPa シリーズの試験体において、上端筋付着 割裂ひび割れの拡大の抑制がみられた(図 3-1)。また、第2章でも主筋溶接とキャップタイ による試験体は通常試験体よりも性能が向上した。本章では主筋溶接による効果を確認する ため、4 隅の主筋だけでなく全主筋をすべて溶接した試験体も作製し、建研式の正負交番漸増 繰返し加力実験を実施した。

キャップタイ工法

キャップタイ工法

キャップタイ工法 図 3-1 最大耐力付近のひび割れ発生状況^[1]

3.2 実験概要

3.2.1 試験体

試験体一覧を,表 3-1 に示す。試験体は,ダブル配筋が必要となる梁幅を有する低層住宅 基礎梁を想定した,ほぼ実大断面の梁試験体である。断面は,幅 b×せい D が 220mm×420mm, 主筋は 6-D16,肋筋は D10@200 の配筋である。本実験では,主筋と肋筋の溶接の影響を確認 するためにせん断スパン比を 1.5 と設定し,梁主筋に高強度鉄筋 SD490 を 6 本配して,せん 断破壊先行型の試験体とした。

本実験のパラメータは、主筋の配筋、主筋と肋筋の溶接の有無および溶接箇所数、キャッ プタイの種類である。主筋の配筋は1段目3本、2段目3本としたものと、1段目4本、2段 目2本としたものの2種類である。各試験体の断面のイメージ図を、図3-2に示す。No.2-2 とNo.2-4は溶接組立鉄筋の製作利便性を考慮し、主筋と肋筋を溶接した後に折り曲げ加工し、 肋筋端部を梁側面部においてフレア溶接している。そのためNo.2-3においても溶接閉鎖型の 肋筋を用いている。コンクリート目標強度は18MPaとした。使用したキャップタイは第1章 図1-2のタイプIIおよびタイプIVである。タイプIIはいわゆる一筆書きで、キャップタイ 定着部も含めて三次元に折り曲げ加工したものである。タイプIVは片側を135°フックとし、 逆側の定着部を三次元に折り曲げ加工したものである。

試験	十週年四	コンクリート	主筋	(SD490)	肋筋
体名	六世争攻	日信短度 (MPa)	配筋	溶接箇所	キャップタイ
No.2-1			2 2 D16	135°	フック
No.2-2	断面 b×D (mm) =220×420 せん断スパン比 1.5 肋筋 2-D10@200(SD295)		5,5-010	外周全箇所	溶接閉鎖型
No.2-3		18		なし	溶接閉鎖型
No.2-4		10	42 D16	全箇所	溶接閉鎖型
No.2-5			4,2-D10	4 隅	タイプ II
No.2-6				4 隅	タイプ IV

表 3-1 試験体一覧

図 3-2 試験体断面のイメージ図

試験体の配筋図を,図 3-3 に示す。No.2-6 では,キャップタイタイプ Ⅳ のフック端が梁側 面に対して交互になるようセットした。

No.2-1~No.2-4

No.2-1

No.2-3~2-6

3.2.2 使用材料

(1) 鉄筋

主筋には異形鉄筋 D16 (SD490), 肋筋には異形鉄筋 D10 (SD295A) を用いた。引張試験の 結果一覧を表 3-2 に, 応力-歪関係を図 3-4 に示す。

坐欿	来旦	降伏強度	弾性係数	降伏歪	引張強度	破断伸び	借考		
业大月刀	留方	(MPa)	(GPa)	(%)	(MPa)	(%)	加方		
	1	516	194	0.266	701	18.2			
D16	2	506	190	0.266	716	15.0	十次		
SD490	3	517	193	0.268	728	9.4*	土肋		
	平均	513	192	0.267	715	16.6			
	1	358	185	0.194	503	28.0	叶标		
D10	2	362	189	0.192	503	29.8	別肋・		
SD295A	3	356	189	0.188	504	22.1*	イヤツノ		
	平均	359	188	0.191	503	28.9	24		

表 3-2 鉄筋の引張試験結果一覧

*:標点間外破断

(2) コンクリート

コンクリートには,目標圧縮強度を 18MPa としたレディミクストコンクリートを用いた。 コンクリートの調合表を表 3-3 に示す。

打設は, No.2-1 は 2017 年 6 月 9 日に, No.2-2~2-6 は 2017 年 8 月 25 日に行った。打設時の コンクリートのフレッシュ性状を表 3-4 に示す。試験体は,約 1 週間の間,シートで封緘し た型枠内で養生し,その後脱型して実験室内に静置した。

目標	W/C		単位量(kg/m ³)						
強度	(%)	С	W	S	G	Ad	加巧		
18MPa	78.5	245	192	942	875	2.45^{*1}	No.2-1		
18MPa	78.5	250	196	934	869	2.50^{*2}	No.2-2~2-6		

表 3-3 コンクリートの調合表

*1: AE 減水剤フローリック SV10(標準形) *2: AE 減水剤フローリック RV10(遅延形)

表 3-4 コンクリートのフレッシュ性状

目標 強度	打設日	外気温 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリ ート温度 (℃)	備考
18MPa	2017.6.9	23	19.5	3.7	21	No.2-1
18MPa	2017.8.25	30	16.5	4.6	28	No.2-2~2-6

加力期間の前,中,後の試験結果の平均値を,各試験体の検討用コンクリート強度とした。 各試験体の検討用コンクリート強度を表 3-5 に示す。

表 3-5 検討用コンクリート強度

目標 強度	圧縮強度 (MPa)	静弹性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)	備考
18MPa	18.8	18.4	1.86	No.2-1
18MPa	23.5	23.0	2.21	No.2-2~2-6

3.2.3 加力方法

加力はいわゆる建研式加力で,試験体を立て起こしてセットし,上下スタブ間の平行度を 保持したまません断加力を行う,逆対称曲げモーメント加力方式である。加力装置を図 3-5 に示す。鉛直方向中央部のアクチュエーターにより,軸力が0となるように制御を行った。

加力は,部材角 1/400~1/15rad.で正負交番繰返し加力を行った。加力履歴を図 3-6 に示す。 部材角 1/400~1/33rad.は同一部材角で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。

図 3-6 加力履歴
3.2.4 計測方法

計測項目は, せん断力, スタブ間たわみ, 軸変形, 試験体局部変形および主筋, 肋筋および キャップタイの歪である。

変位計の設置位置を,図 3-7 に示す。スタブ間たわみおよび軸変形は,それぞれ D1 と D2, D3 と D4 の平均値とした。

歪ゲージの貼付位置を,図 3-8 に示す。主筋には梁せいの 1/2 の 210mm 間隔で歪ゲージを 貼付した。肋筋には,梁側面中央部および上面中央部(キャップタイ中央部)に貼付した。



図 3-7 変位計設置位置



3.3 実験結果

3.3.1 破壊状況とせん断カー部材角関係

各試験体のせん断力-部材角関係および 1/200, 1/100, 1/50, 1/33rad.時の破壊状況を図 3-9 ~図 3-14 に示す。

各試験体ともに、1/400rad.加力サイクル時に、順次曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れ が梁端部に発生した。その後せん断ひび割れの発生にともなって剛性が低下し、1/100rad.加力 サイクル時に肋筋が降伏した。最初の肋筋の降伏は、梁最端部または最端部から2番目の位 置で発生し、せん断ひび割れの発生位置と対応していた。肋筋の降伏は、1/100rad.加力サイク ル時におおむね4本の肋筋でみられた。肋筋の降伏の順次発生にともなって耐力が上昇しな くなり、1/100rad.加力サイクル時に最大荷重を迎えた。その後の繰返し加力サイクルでは典型 的なスリップ型の性状を示し、各加力サイクルピーク時の耐力も大きく低下していった。最 終的には、梁全周面に渡って、大きくかぶりコンクリートが剥落した。これらの大まかな性 状においては、主筋配筋の違いやキャップタイの種類による差異は見られなかった。

キャップタイ付きの試験体では、キャップタイの破壊や溶接剥離は見られなかったものの、 1/33rad.加力サイクル以降の大変形時にキャップタイの浮き上がりが見られ、耐力が大きく低 下した。キャップタイの浮き上がりにともなって1段目主筋の中筋が断面外側に大きくはら みだした(図 3-15)。







1/50

1/33



図 3-9 試験体 No.2-1 破壊状況およびせん断力 - 部材角関係







1/50

1/33



図 3-10 試験体 No.2-2 破壊状況およびせん断力 - 部材角関係



1/100



1/50

1/33



図 3-11 試験体 No.2-3 破壊状況およびせん断力 - 部材角関係



1/100



1/50

1/33



図 3-12 試験体 No.2-4 破壊状況およびせん断力 - 部材角関係



1/100



1/50

1/33



図 3-13 試験体 No.2-5 破壊状況およびせん断力 - 部材角関係







1/50

1/33



図 3-14 試験体 No.2-6 破壊状況およびせん断力 - 部材角関係



(No.2-5)



(No.2-6)



3.3.2 ひび割れ発生状況

各試験体の部材角-1/100rad.加力サイクル (加力サイクル 6) 終了時のひび割れ状況を,主筋 3-3 本シリーズについて図 3-16 に,主筋 4-2 本シリーズについて図 3-17 に示す。実線が正側 加力サイクル (加力方向▼および▲)時に生じたひび割れを,破線が負側加力サイクル (加 力方向△および▽)時に生じたひび割れを示す。

各試験体ともに、せん断ひび割れが支配的である。せん断ひび割れの他には主筋に沿った ひび割れも見られる。すべての試験体は、パラメータに関わらずほぼ同様のひび割れ性状を 示し、主筋溶接による付着割裂ひび割れの抑制効果を確認することができなかった。







図 3-17 ひび割れ発生状況(主筋 4-2 本)

3.4 実験結果の検討

3.4.1 せん断カー部材角関係の比較

主筋が1段目3本,2段目3本試験体のせん断力-部材角関係の包絡線を比較して,図 3-18 に示す。

外周部を全溶接した試験体の方が通常配筋の試験体より最大耐力は大きい。最大耐力後, 正側では部材角 1/50rad.以降に, 負側では 1/33rad.以降にほぼ同等の挙動を示した。



図 3-18 せん断カー部材角関係の包絡線の比較(主筋 3-3 本シリーズ)

主筋が1段目4本,2段目2本試験体の試験体のせん断力-部材角関係の包絡線を比較して,図 3-19に示す。

No.2-3(溶接なし)と No2-.4(全主筋溶接)の最大耐力を比較すると,正側では No2-.3の 方が, 負側では No.2-4の方が大きく,前述の主筋 3-3本シリーズとは異なる傾向を示した。

No.3 と No.4, No.5 (キャップタイ付)の最大耐力を比較すると,正側・負側共に通常配筋の試験体である No.2-3 の方が大きかった。主筋 4-2 本の配筋ではキャップタイの主筋拘束効果が十分に得られず,耐力が上昇しなかったと考えられる。また,キャップタイ付きの試験体では最大耐力後の耐力低下が著しかった。



図 3-19 せん断カー部材角関係の包絡線の比較(主筋 4-2 本シリーズ)

3.4.2 最大耐力

各試験体の曲げ強度計算値および最大荷重実験値の一覧を,表 3-6 に示す。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 1988 年版」^[2]により算出した。 せん断強度は荒川 mean 式^[2]および日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震 設計指針・同解説」(以下,終局強度型指針)^[3]によるせん断強度式A法により算出した。せ ん断余裕度は、荒川 mean 式で 0.51~0.56 である。

全体的に,最大荷重の実験値は負側加力時より正側加力時の方が大きい。正負の最大荷重 の平均値をせん断強度計算値と比較すると,その比較値は,荒川 mean 式で 1.10~1.24,終局 強度型 A 法では 0.93~1.06 である。終局強度型指針 A 法による計算値は最大荷重実験値を若 干上回ったが,実験値をよく表している。

試験体	実験值 (kN)			曲げ 強度	せん断強度 計算値 (kN)		eQmax	eQmax
	加力方向別		正負平均 eQmax	計算值 <i>cQmu</i> (kN)	c Q su,mean	cQsu,A	c Q su,mean	cQsu,A
No.2-1	正 負	185 165	175	299	153	177	1.14	0.99
No.2-2	正 負	215 193	204	297	164	192	1.24	1.06
No.2-3	正 負	213 186	200	306	171	202	1.17	0.99
No.2-4	正 負	196 200	198				1.16	0.98
No.2-5	正 負	212 182	197				1.15	0.98
No.2-6	正 負	200 176	188				1.10	0.93

表 3-6 最大荷重と計算値との比較

*計算に用いた材料の特性は、材料試験結果に基づく

(1) 曲げ強度計算値(略算式)

$${}_{c}Q_{mu} = 0.9\sum a_{t} \cdot \sigma_{y} \cdot d / (L_{0} / 2)$$

(3-1)

ここで,

 $_{c}Q_{mu}$:曲げ強度

*a*_t :引張鉄筋断面積

σ₂:引張鉄筋の降伏強度

d : 有効せい

*L*₀ : 内法スパン (1260mm)

(2) せん断強度荒川 mean 式

$${}_{c}Q_{su,mean} = \left\{ \frac{0.115k_{u}k_{p}(180 + \sigma_{B})}{M/Qd + 0.12} + 2.7\sqrt{p_{w} \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j$$
(3-2)

- cQsu : せん断強度 (kgf)
- *k*_u : 断面寸法による補正係数(=0.72)
- k_p : 引張鉄筋比 p_t (%) による補正係数 (=0.82 $p_t^{0.23}$)
- σ_B : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm²)
- *M/Qd*: せん断スパン比 (*M/Qd*≦3)
- *p*_w : せん断補強筋比
- σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度(kgf/cm²)
- *b* :梁幅 (cm)
- *j* : 応力中心間距離 (=7/8*d*) (cm)
- d: 有効せい(1段目主筋と2段目主筋の図心位置)

(3) せん断強度終局強度型指針式 A 法

$$cQ_{su,A} = b \cdot j_{l} \cdot p_{w} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot\phi + \tan\theta \cdot (1-\beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_{B}/2$$
(3-3)
ここで、

$$cQ_{su} : せん断強度$$

$$b : 梁幅$$

$$j_{l} : 主筋中心間距離 (1 段目主筋と 2 段目主筋の図心位置)$$

$$p_{w} : せん断補強筋の降伏強度 (359MPa)$$

$$\phi : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度$$

$$= \min\{2.0, j_{l}/(D \cdot \tan\theta), \sqrt{v \cdot \sigma_{B}/(p_{w} \cdot \sigma_{wy}) - 1.0}\}$$

$$\theta : \tan\theta = \sqrt{(L/D)^{2} + 1 - L/D}$$

$$\beta : = (1 + \cot^{2}\phi)p_{w} \cdot \sigma_{wy}/v \cdot \sigma_{B}$$

$$D : 梁せ \vee$$

$$L : 内法スパン$$

$$v : v_{0} = 0.7 - \sigma_{B}/2000 \quad (\sigma_{B} O) 単位は kgf/cm^{2})$$

σB : コンクリート圧縮強度

3.4.3 局部変形

試験体を4つの区間に分け(図 3-7参照),局部変形を測定した。曲げ変形は各区間の変位から区間ごとに曲率を算出して求めた。せん断変形は各区間の変位から区間ごとにせん断変 形角を算出し、全体変形から曲げ変形の合計を差し引いたものをせん断変形角の比率に応じ て各区間に割り振り求めた。各試験体の、各区間の変形割合の推移を図 3-20 に示す。

すべての試験体においてせん断変形が支配的であり,特異な変形を示す試験体は見られな かった。



図 3-20 局部変形

3.4.4 鉄筋の歪分布

各試験体の主筋の各加力サイクルピーク時における歪分布を,図 3-21~図 3-32 に示す。 横軸はスタブ境界面を原点としている。

いずれの試験体においても、危険断面における明瞭な主筋降伏領域はみられなかった。全 般的に1段目主筋の歪が2段目主筋より大きくなっている。

各試験体の肋筋およびキャップタイの各加力サイクルピーク時における歪分布を,図 3-33 ~図 3-38 に示す。肋筋側面の歪はおおむね 1/100rad.時には降伏し,最端部から2番目の位置で大きく,1%を超えているものも多い。キャップタイの歪はおおむね 1/50rad.時には降伏し,中央部で特に大きくなっている。これらは、せん断ひび割れの拡幅および梁上端のかぶりコンクリートの損傷場所に対応していると考えられる。













図 3-26 試験体 No.2-3 下端主筋の歪分布











図 3-31 試験体 No.2-6 上端主筋の歪分布





















図 3-37 試験体 No.2-5 キャップタイと肋筋の歪分布


図 3-38 試験体 No.2-6 キャップタイと肋筋の歪分布

3.4.5 主筋の付着応力の推移

各試験体における主筋の付着応力(τ)の推移を図 3-39 に示す。主筋に貼付した歪ゲージの位置を x_1, x_2 として、主筋の降伏が無い場合、その間の付着応力は以下の式で求められる。

 $\tau = EA(\varepsilon_{x1} - \varepsilon_{x2})/\emptyset(x_1 - x_2)$

ここで,

E : 主筋の弾性係数

A : 主筋の断面積

ε : 主筋歪

である。図 3-39 では,スタブ境界面から 210mm および 1050mm の位置に貼付した歪ゲージ の値を用いた。

最大荷重を迎える 1/100rad.加力サイクル時に,主筋の付着応力も最大となる傾向がみられる。全体的に1段目主筋の方が2段目主筋より付着応力が大きくなっているが,No.2-3 に関しては 1/100rad.加力サイクル時以降2段目主筋の方が付着応力が大きくなっている。

主筋 4-2 本シリーズについて比較すると、主筋溶接をしていない試験体 No.2-3 の付着応力 が大きく、溶接をした試験体の付着応力を上回った。



図 3-39 主筋付着応力の推移

3.5 まとめ

既往の研究では,主筋と肋筋の溶接により主筋のすべりが拘束されて付着劣化の抑制効果 が発揮された可能性が示唆された。本章では主筋溶接の効果を確認するため,せん断加力実 験を行った。

各試験体の正負の最大荷重平均値を比較すると,主筋 3-3 本シリーズでは,通常配筋の試 験体より主筋を溶接した試験体の方が大きかった。主筋 4-2 本シリーズでは,溶接をしてい ない試験体の最大耐力がもっとも大きく,次いで全主筋溶接の試験体,キャップタイの試験 体となった。

正負の最大荷重の平均値をせん断強度計算値と比較すると、その比較値は、荒川 mean 式で 1.10~1.24,終局強度型 A 法では 0.93~1.06 である。終局強度型指針 A 法による計算値は最大 荷重実験値を若干上回ったが、実験値をよく表している。

各試験体の大まかな破壊性状については,主筋配筋の違いやキャップタイの種類による差 異は見られなかった。キャップタイ付きの試験体では,キャップタイの破壊や溶接剥離は見 られなかったものの,1/33rad.加力サイクル以降の大変形時にキャップタイの浮き上がりが見 られ,耐力が大きく低下した。キャップタイの浮き上がりにともなって1段目主筋の中筋が 断面外側に大きくはらみだした。

すべての試験体は、パラメータに関わらずほぼ同様のひび割れ性状を示し、主筋溶接によ る付着割裂ひび割れの抑制効果を確認することができなかった。

主筋 4-2 本シリーズの付着応力を比較すると、主筋溶接をしていない試験体の付着応力が 大きく、溶接をした試験体の付着応力を上回った。

第4章 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

第2章では、曲げ破壊が先行する基礎梁端部の構造性能を確認することを目的とし、片持 梁形式の正負交番漸増繰返し加力実験を実施した。実験結果より、キャップタイ工法による 試験体の最大耐力は、通常配筋の試験体と同等かそれ以上となることが確認された。また、 大変形時の加力サイクルでは、キャップタイ付きの試験体が通常配筋の試験体より耐力が大 きかった。全ての試験体において、最大耐力は実験値が計算値を上回っており、その比は 1.11~1.28 である。特にキャップタイ付きの試験体は全て 1.2 を超えていた。

第3章では主筋溶接による効果を確認するため、4隅の主筋だけでなく全主筋をすべて溶接した試験体を作製し、せん断加力実験を実施した。各試験体の大まかな破壊性状については、主筋配筋の違いやキャップタイの種類による差異は見られなかった。キャップタイ付きの試験体では、キャップタイの破壊や溶接剥離は見られなかったものの、1/33rad.加力サイクル以降の大変形時にキャップタイの浮き上がりが見られ、耐力が大きく低下した。キャップタイの浮き上がりにともなって1段目主筋の中筋が断面外側に大きくはらみだした。

すべての試験体は、パラメータに関わらずほぼ同様のひび割れ性状を示し、主筋溶接による付着割裂ひび割れの抑制効果を確認することができなかった。主筋 4-2 本シリーズの付着 応力を比較すると、主筋溶接をしていない試験体の付着応力が大きく、溶接をした試験体の 付着応力を上回った。

今回の実験では主筋溶接の有用性を示す結果が得られなかった。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々のご指導およびご協力をいただきました。

指導教員であります筑波大学システム情報系教授の金久保利之先生には、本研究における 相談から実験の実施、論文推敲に至るまで懇切丁寧にご指導いただきました。ここに心より 深く感謝の意を表します。副指導教員であります筑波大学システム情報系准教授の八十島章 先生には、的確な助言と丁寧なご指導をいただきました。同じく副指導教員であります筑波 大学システム情報系教授の境有紀先生には研究に対する有益な助言をいただきました。ここ に感謝申し上げます。筑波大学技術職員の小島篤志氏には、実験を遂行するにあたり多くの ご協力をいただきましたことを感謝いたします。三栄商事株式会社の皆様には、材料の提供 から実験の補助等、終始ご協力いただきました。深く感謝いたします。

本研究を進めるうえで研究室の多くの方々にご協力をいただきました。特に同期の大圖友 梨子氏,川村佳弘氏には多大なる助言,助力をいただきましたことを感謝いたします。先輩 方,後輩方からも数々のご支援をいただき,感謝の意を表するとともに今後のご活躍を期待 しております。

> 2018 年 1 月吉日 掛川 萌子

参考文献

- [1] 掛川萌子ほか: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, 1988
- [3] 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990