

論文 溶接組立鉄筋を用いた RC 有孔梁の構造性能に関する研究

上山 泰輝*1・金久保 利之*2・岡田 健良*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の鉄筋コンクリート造有孔梁に対する適用可能性を検討することを目的として、孔径および孔周囲補強筋の形状を実験因子としたせん断破壊先行型の試験体を作製し、建研式の正負繰返し加力実験を行った。実験の結果、孔径 $H/D=1/5$ の試験体は一般部せん断破壊、孔径 $H/D=1/3$ の試験体は開口部のせん断破壊となった。孔径 $H/D=1/5$ の試験体において、キャップタイ試験体の最大荷重は通常配筋試験体よりも大きく、試験体の破壊部位は荒川 mean 式および修正広沢 mean 式による計算結果と一致した。また、開口部上部のキャップタイの降伏がみられ、歪が大きくなった。
キーワード：組立鉄筋, 溶接鉄筋, 有孔梁, キャップタイ, せん断強度

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物における配筋作業は、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、作業時間の長期化、作業の煩雑さ、熟練労働者の不足といった問題が挙げられている。近年、戸建住宅など低層建築物の鉄筋コンクリート基礎工事において、工場であらかじめ組み上げ、溶接する溶接組立鉄筋が用いられることが増えている。メリットとして作業時間の短縮、省力化などが挙げられる。現在、溶接組立鉄筋に3次元上に折り曲げ加工されたキャップタイを用いる工法が提

案, 研究されている^{1),2),3)}。

これらの研究において、本工法を用いた梁部材は通常配筋のものと同様以上の構造性能を持つことが示された。そこで本研究では、本工法の有孔梁に対する適用可能性を確認することを目的として、梁部材試験体を作製し、建研式正負交番繰返し加力実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体一覧を表-1 に、試験体配筋図を図-1 に、キ

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 (MPa)	キャップタイ	孔径 H/D *1	孔周囲補強筋
H1	断面 $b \times D$ (mm)=220×420 せん断スパン比 1.5 主筋 3,3-D16(SD490) $p_r=1.58\%$ 肋筋 2-D10@200(SD295) $p_w=0.32\%$	18	通常配筋	1/5	既成品*2
H2			キャップタイ タイプ II	1/5	タイプ HA
H3					タイプ HB
H4			1/3	タイプ HA	
H5				タイプ HB	
H6		30	通常配筋	1/5	既成品*2
H7			キャップタイ タイプ II	1/5	タイプ HA
H8					タイプ HB
H9			1/3	タイプ HA	
H10				タイプ HB	

*1 : H =孔径, D =梁せい *2 : MAX リンプレックス K 型 K-0806R

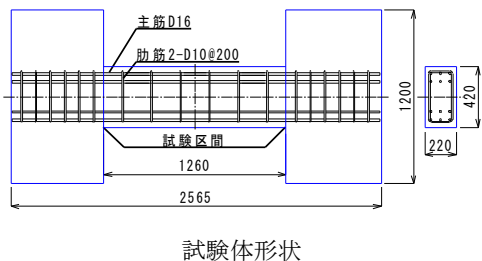


図-1 試験体配筋図

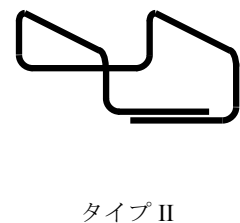
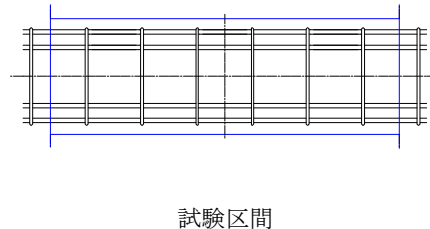


図-2 キャップタイ形状

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (学生会員)

*2 筑波大学 システム情報系教授 博士 (工学) (正会員)

*3 アフェクト設計事務所 (正会員)

*4 三栄商事 (株) 技術部部長 (正会員)

キャップタイの形状を図-2に示す。試験体は、低層建築物の基礎梁を模擬した、実大断面の梁試験体である。断面は、幅 $b \times$ せい D が $220\text{mm} \times 420\text{mm}$ 、主筋は 6-D16、肋筋は $D10@200$ の配筋である。コンクリート目標強度は 18MPa および 30MPa とし、両端部に試験体を固定するためのスタブを設けている。試験体は、せん断破壊性状の確認のためせん断破壊先行型とし、通常配筋試験体と溶接組立鉄筋、キャップタイを用いた試験体の合計 10 体を作製した。主な実験のパラメータは孔径、孔周囲補強筋の形状および配筋を図-3に示す。タイプ HA は、高さが小さいキャップタイと大きいキャップタイを使用し、同じ箇所にも取り付ける開口部補強である。タイプ HB は鉄筋同士を溶接し、U字型に折り曲げ加工したユニットを、主筋の間に入れ込む開口部補強である。通常配筋の試験体では既製品を用いて開口部の補強を行った。

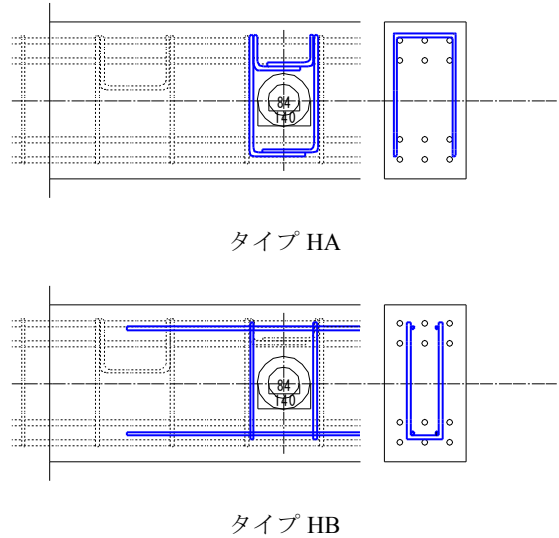


図-3 孔周囲補強筋の形状および配筋

2.2 使用材料

鉄筋の材料特性を表-2に、コンクリートの材料特性(試験体加力時材齢)を表-3に示す。せん断破壊先行型とするため、主筋にはSD490を用いた。

2.3 加力・計測方法

加力装置の概要を図-4に、加力履歴を図-5に示す。加力方法は建研式加力で軸力を0に制御し加力梁の平行度を保ちつつ、100tアクチュエーターでせん断加力を行った。計測項目は、せん断力、スタブ間相対変位、スタブ間軸変位、局部変形、主筋、肋筋、キャップタイ、および孔周囲補強筋の歪である。

表-2 鉄筋の材料特性

種別	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断伸び (%)
D16	522	696	193	17.3
D10	367	512	189	25.8

表-3 コンクリートの材料特性

目標強度	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)	備考
18MPa	19.9	18.9	2.05	加力前・中・後の平均
30MPa	28.5	22.6	2.36	

3. 実験結果および検討

3.1 破壊状況とせん断力-変位関係

部材角 $1/50\text{rad}$ 時のひび割れ状況を図-6に示す。試験体の破壊形式は開口部せん断破壊と一般部せん断破壊の2種類が見られた。いずれの試験体も $1/400\text{rad}$ サイクルの1回目の加力において正負ともに曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、開口部斜めひび割れが発生した。

孔径 $H/D=1/5$ の試験体では、 $1/100\text{rad}$ 加力サイクルにおいて梁端部にせん断ひび割れが発生し、同サイクルピーク時に最大荷重となった。 $1/50\text{rad}$ 加力サイクルにおいてそれらが大きく拡張し、荷重が低下した。また、梁端部のひび割れの拡張に伴い、コンクリートの剥落がみられた。 $1/33\text{rad}$ 加力サイクルにおいて、試験体 H1, H3, H6, H7 では孔周囲補強筋周辺のコンクリートが剥落し、試験体 H2, H8 では梁端部のコンクリートが剥落した。試験体 H8 において主筋と肋筋溶接部の剥離が確認された。破壊形式は一般部せん断破壊となった。孔径 $H/D=1/3$ の試験体では、 $1/100\text{rad}$ 加力サイクルにおいて開口部接線方向ひび割れが生じ、同サイクルピーク時に正側最大

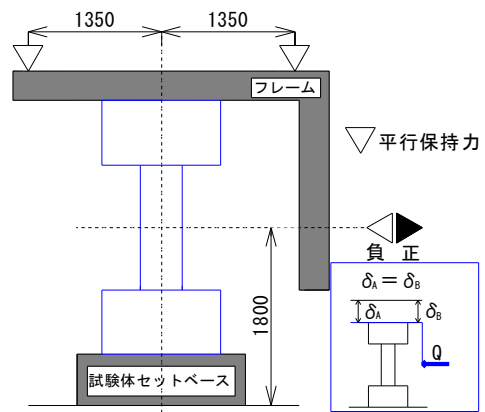


図-4 加力装置概要

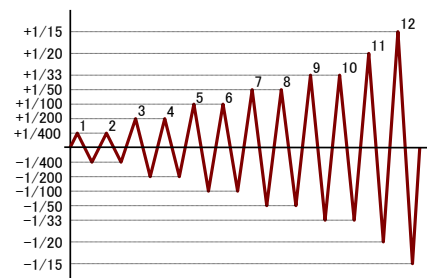
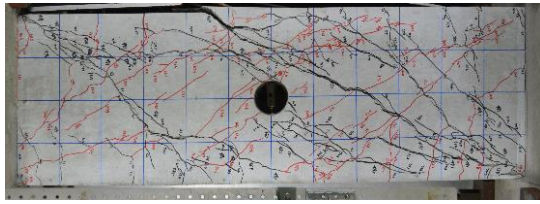
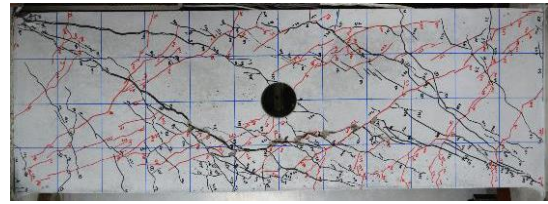


図-5 加力履歴

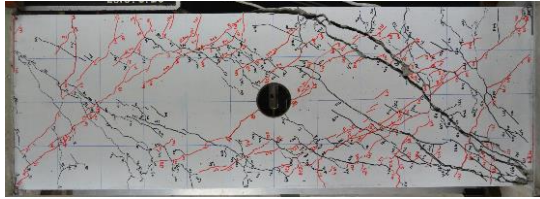


18MPa (H1)

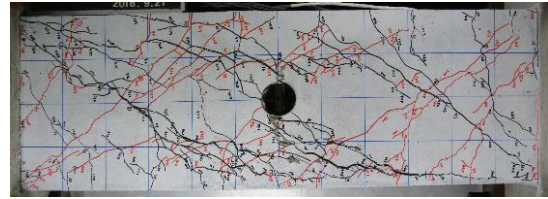


30MPa (H6)

通常配筋試験体

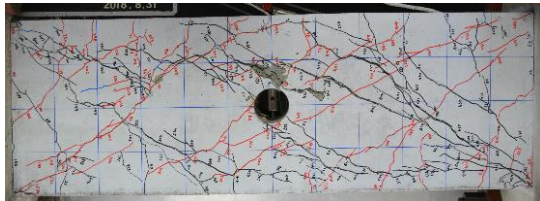


18MPa (H2)

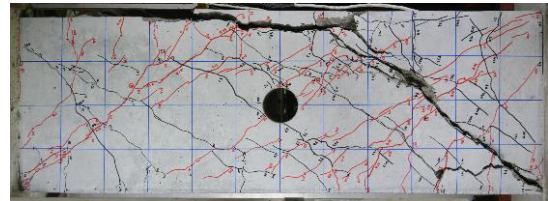


30MPa (H7)

タイプ HA (H/D=1/5)

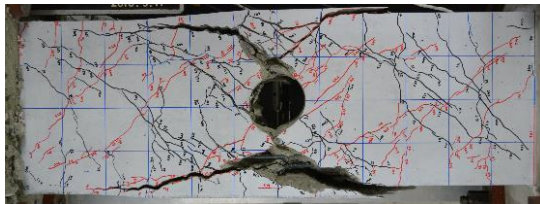


18MPa (H3)

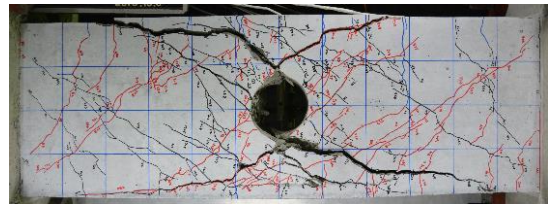


30MPa (H8)

タイプ HB (H/D=1/5)

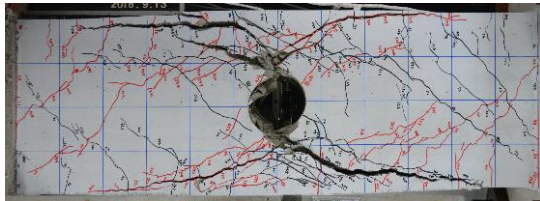


18MPa (H4)

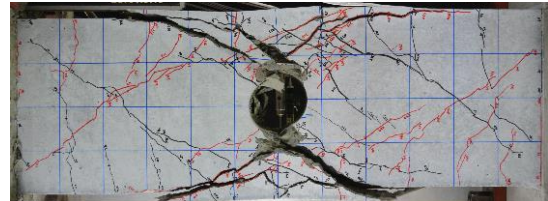


30MPa (H9)

タイプ HA (H/D=1/3)



18MPa (H5)



30MPa (H10)

タイプ HB (H/D=1/3)

図-6 ひび割れ状況 (部材角 1/50rad.時)

荷重となった。試験体 H9 では同サイクルピーク時において負側も最大荷重となった。その他の試験体では 1/100rad.加力サイクルにおいて開口部接線方向ひび割れが大きく拡幅、荷重が低下し、結果として負側では 1/200rad.加力サイクルが最大荷重となった。いずれの試験体も 1/50rad.加力サイクルにおいて開口部接線方向ひび割れから梁上部および底部のコンクリートが剥落した。破壊形式は開口部せん断破壊となった。

孔周囲補強筋タイプ HB の試験体において孔周囲補強筋の軸方向筋と横補強筋溶接部の剥離が確認された。

各試験体のせん断力-部材角関係の包絡線の比較を図-7 に示す。孔周囲補強筋タイプ HA を用いた試験体についてせん断力-部材角関係を示しており、いずれの試験体においても明確な差は見られなかった。孔径 $H/D=1/5$ の試験体において、キャップタイ試験体は通常配筋試験体と比較して、最大荷重が大きい。1/50rad.加力サイクル以降では、18MPa シリーズでは各試験体で大きな差は見られなかったが、30MPa シリーズでは通常配筋試験体の方がキャップタイ試験体よりも荷重低下が少ない傾向が見られた。孔周囲補強筋タイプ HA、タイプ HB の

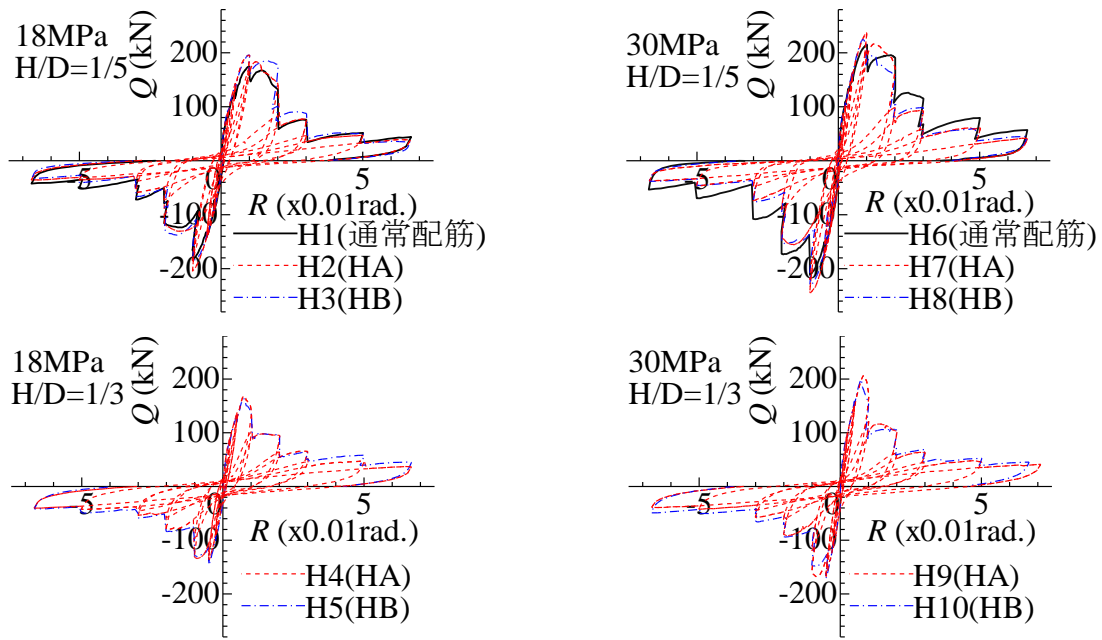


図-7 セン断力-部材角関係の包絡線の比較

試験体を比較すると、孔径 $H/D=1/5$ のときはタイプ HA を用いた試験体の方がタイプ HB を用いた試験体より最大荷重が大きくなる傾向が見られた。また、孔径 $H/D=1/3$ のときはタイプ HA を用いた試験体とタイプ HB を用いた試験体の間に大きな差は見られなかった。

3.2 最大荷重と計算値の比較

各試験体の最大荷重実験値とせん断強度計算値の一覧

を表-4 に示す。せん断強度は荒川 min 式 ($cQ_{su,min}$)、荒川 mean 式 ($cQ_{su,mean}$) 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」⁴⁾によるせん断強度式 A 法 ($cQ_{su,A}$) により算出した。開口部のせん断強度は、修正広沢式 (修正広沢 min 式) ($cQ_{su0,min}$)、修正広沢式の第 1 項の係数 0.092 を 0.115 とした修正広沢 mean 式 ($cQ_{su0,mean}$)、および文献 4)による終局強度型

表-4 最大荷重と計算値との比較

試験体	破壊形式	実験値 (kN)		せん断強度計算値 (kN)			実験値/計算値				
		加力方向別	正負平均 eQ_{max}	部位	$cQ_{su,min}$ $cQ_{su0,min}$	$cQ_{su,mean}$ $cQ_{su0,mean}$	$cQ_{su,A}$ $cQ_{su0,A}$	$\frac{eQ_{max}}{\min}$ $\{cQ_{su,min}, cQ_{su0,min}\}$	$\frac{eQ_{max}}{\min}$ $\{cQ_{su,mean}, cQ_{su0,mean}\}$	$\frac{eQ_{max}}{\min}$ $\{cQ_{su,A}, cQ_{su0,A}\}$	
H1	一般部 せん断 破壊	正	175	一般部	137	156	183	1.31	1.15	1.19	
		負	184		160	175	151				
正		195	開口部	137	156	183	1.46	1.28	1.32		
負		205		160	175	151					
H2	一般部 せん断 破壊	正	196	一般部	137	156	183	1.39	1.22	1.26	
		負	184		160	175	151				
正		168	開口部	137	156	183	1.11	1.02	1.43		
負		137		140	150	107					
H3	開口部 せん断 破壊	正	164	一般部	137	156	183	1.13	1.03	1.45	
		負	146		140	150	107				
H4		一般部 せん断 破壊	正	215	一般部	154	178	213	1.39	1.20	1.15
			負	212		174	193	185			
H5	一般部 せん断 破壊		正	238	一般部	154	178	213	1.57	1.36	1.30
			負	245		174	193	185			
H6		一般部 せん断 破壊	正	225	一般部	154	178	213	1.48	1.28	1.23
			負	231		174	193	185			
H7	開口部 せん断 破壊		正	206	一般部	154	178	213	1.26	1.15	1.40
			負	169		149	163	134			
H8		一般部 せん断 破壊	正	199	一般部	154	178	213	1.24	1.14	1.38
			負	171		149	163	134			

指針式 ($c_{Q_{su0,A}}$) により算出した。孔周囲の補強筋として、孔際の肋筋および孔周囲補強筋の軸直角方向筋を考慮している。また、孔周囲補強筋タイプ HA では高さが大きいキャップタイのみを考慮した。修正広沢式の導出では単調加力による実験結果が多く用いられているが⁹⁾、本研究では実務設計での適用を考慮し、正負加力の平均を最大荷重実験値として検討した。実験値と計算値の比については、それぞれ一般部と開口部のせん断強度計算値の小さい方に対して実験値と比較している。

孔径 $H/D=1/5$ の試験体において、キャップタイ試験体の実験値の最大荷重は通常配筋試験体と比較して大きくなり、それらの比は 18MPa シリーズの試験体ではそれぞれ 1.12 倍 (H2), 1.06 倍 (H3), 30MPa シリーズの試験体ではそれぞれ 1.13 倍 (H7), 1.07 倍 (H8) となった。また、孔周囲補強筋タイプ HA とタイプ HB の試験体を比較すると、タイプ HA を用いた試験体の方が実験値最大荷重は大きくなり、その比は 18MPa シリーズの試験体で 1.05 倍, 30MPa シリーズの試験体で 1.06 倍となった。

孔径 $H/D=1/3$ の試験体において、孔周囲補強筋タイプ HA とタイプ HB の試験体を比較すると、実験値の最大

荷重の差は 18MPa, 30MPa シリーズどちらの試験体においてもほとんど見られなかった。

一般部と開口部のせん断強度計算値を見ると、荒川 mean 式と修正広沢 mean 式による計算結果が実験結果の破壊形式と一致し、孔径 $H/D=1/5$ の試験体では一般部せん断破壊、孔径 $H/D=1/3$ の試験体では開口部せん断破壊となった。一般部せん断破壊となった孔径 $H/D=1/5$ の試験体の実験値最大荷重と荒川 mean 式による計算値を比較すると、18MPa シリーズの試験体では 1.15~1.28 倍, 30MPa シリーズの試験体では 1.20~1.36 倍であった。開口部せん断破壊となった孔径 $H/D=1/3$ の試験体の実験値最大荷重と修正広沢 mean 式による計算値を比較すると、18MPa シリーズの試験体では 1.02, 1.03 倍, 30MPa シリーズの試験体では 1.14, 1.15 倍であった。一般部の荒川 mean 式に対して実験値が約 20~30%の安全率を有していることを考慮すると、孔径 $H/D=1/3$ の試験体における開口部の修正広沢 mean 式に対する実験値の安全率はその半分程度以下となっている。

3.3 主筋および補強筋の歪

各試験体の歪ゲージの貼付け位置を図-8 に示す。い

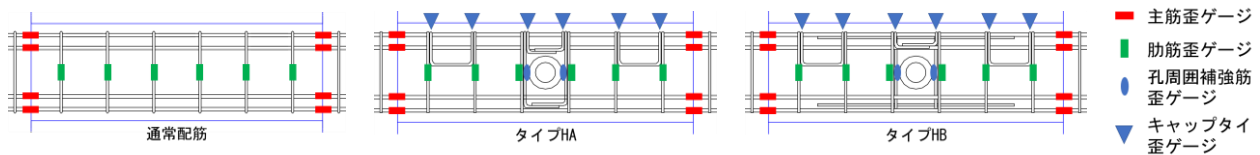


図-8 歪ゲージ貼付け位置

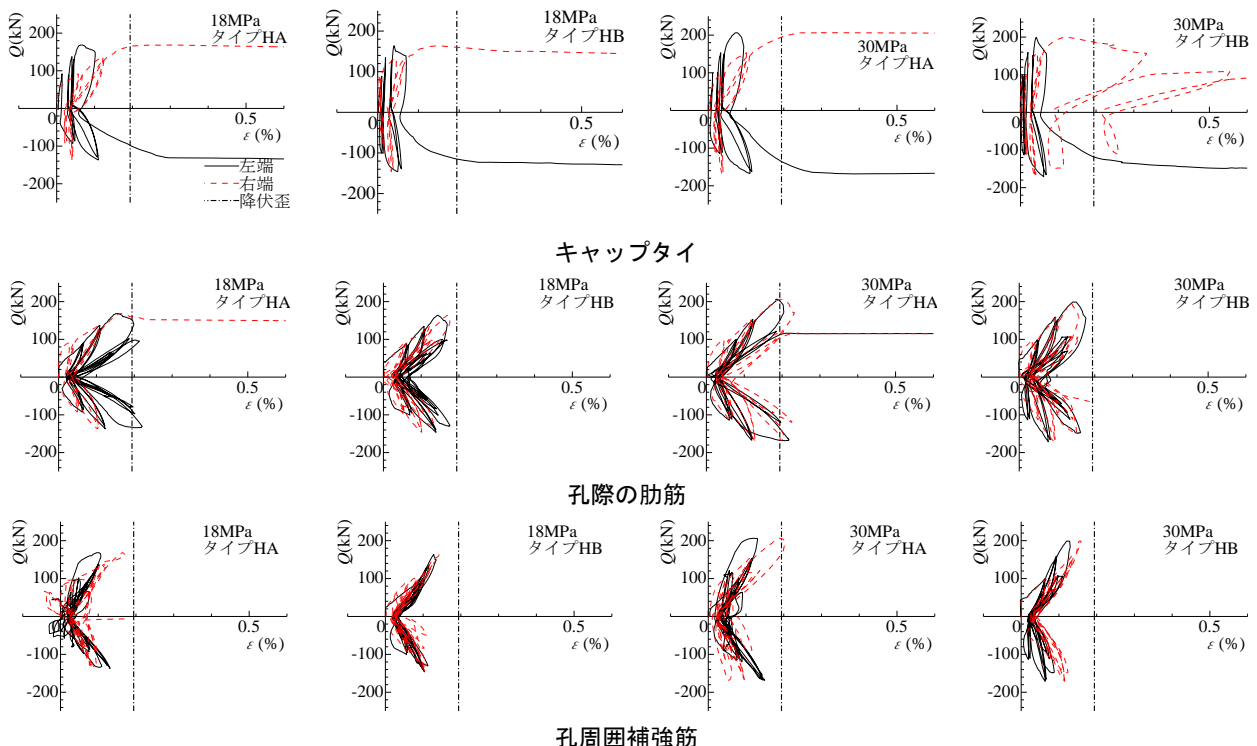


図-9 孔位置での肋筋、キャップタイおよび孔周囲補強筋の歪とせん断力の関係 ($H/D=1/3$)

表-5 最大荷重時の孔際の肋筋と孔周囲補強筋の歪の一覧

試験体	加力方向	孔際の肋筋 (μ)	孔周囲補強筋 (μ)	孔周囲補強筋 / 肋筋	破壊部位
		左右平均	左右平均		
H1	正	1809	—	—	一般部
	負	2362	—	—	
H2	正	2270	1064	0.47	一般部
	負	2938	1206	0.41	
H3	正	1517	1417	0.93	一般部
	負	1459	1349	0.92	
H4	正	1612	1314	0.82	開口部
	負	1135	1071	0.94	
H5	正	1572	1353	0.86	開口部
	負	1205	1048	0.87	
H6	正	1671	—	—	一般部
	負	1973	—	—	
H7	正	1467	1167	0.80	一般部
	負	1799	1318	0.73	
H8	正	1595	1502	0.94	一般部
	負	1665	1613	0.97	
H9	正	1925	1570	0.82	開口部
	負	2015	1021	0.51	
H10	正	1389	1397	1.01	開口部
	負	848	893	1.05	

ずれの試験体においても危険断面における明確な主筋降伏は見られなかった。孔径 $H/D=1/5$ の試験体では、概ね $1/100\text{rad}$ 加力サイクルにおいて、梁端部から 2 番目の肋筋が降伏した。

孔径 $H/D=1/3$ の試験体に関して、孔位置での肋筋、キャップタイおよび孔周囲補強筋の歪とせん断力の関係を図-9 に示す。孔径 $H/D=1/3$ の試験体では、開口部上部のキャップタイの歪が他のキャップタイの歪と比較して大きく、最大荷重時に降伏が見られた。孔接線方向に生じたせん断ひび割れが孔際の肋筋を避けて拡幅し、主筋位置まで進展するため、キャップタイの歪が大きくなると考えられる。

最大荷重時の孔際の肋筋と孔周囲補強筋の歪の一覧を表-5 に示す。孔周囲補強筋で最大荷重時に明確に降伏が見られたものはなかった。孔際の肋筋と孔周囲補強筋を比較すると孔際の肋筋の歪が孔周囲補強筋の歪よりも大きい傾向が見られた。孔径 $H/D=1/5$ の試験体について、孔周囲補強筋タイプ HA とタイプ HB の試験体を比較すると、孔周囲補強筋と孔際の肋筋の比がタイプ HA の方が小さい傾向が見られた。孔径 $H/D=1/3$ の試験体について同様に比較すると、タイプ HA とタイプ HB の間

に明確な差は見られなかった。キャップタイ試験体における孔周囲補強筋と孔際の肋筋の比は、全試験体平均で 0.82 となった。

4 まとめ

- (1) 孔径 $H/D=1/5$ の試験体は一般部せん断破壊、孔径 $H/D=1/3$ の試験体は開口部のせん断破壊となった。孔周囲補強筋のタイプ HB において軸方向筋と横補強筋溶接部の剥離が確認された。
- (2) 孔径 $H/D=1/5$ の試験体において、キャップタイ試験体の最大荷重は通常配筋試験体と比較して大きくなり、18MPa シリーズの試験体では 1.06~1.12 倍、30MPa シリーズの試験体では 1.07~1.13 倍となった。
- (3) 試験体の破壊部位は荒川 mean 式および修正広沢 mean 式を用いた計算結果と一致した
- (4) 孔径 $H/D=1/3$ の試験体では、開口部上部のキャップタイの歪が他のキャップタイの歪と比較して大きく、最大荷重時に降伏が見られた。

謝辞

実験の実施にあたっては、筑波大学大学院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) 岡田健良, 金久保利之, 掛川萌子, 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 基礎梁の曲げおよび交差部の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1363-1368, 2017.7
- 3) 高橋拓也, 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 基礎梁の繰返し荷重下におけるせん断性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.127-132, 2018.7
- 4) 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
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 鉄筋コンクリート有孔ばりの強度とじん性, 建築雑誌, Vol.94, No.1157, pp.51-53, 1979.11