

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 有孔梁の構造性能に関する研究

上山泰輝

修士（工学）

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保利之

2020年 3月

概要

近年、戸建住宅等の低層建築物の鉄筋コンクリート基礎工事において、現場作業の省力化、時間短縮を目的として、工場であらかじめ組み上げ、溶接された溶接組立鉄筋が用いられることが増えている。また、異形鉄筋同士の溶接接合性能についての研究が行われ、溶接点せん断試験を行った際に、溶接点ではなく、母材で破断する全強度溶接組立鉄筋が開発されている。これらを背景として、溶接組立鉄筋と3次元状に折り曲げ加工されたキャップタイを組み合わせる工法が提案、研究されている。既往の研究において、この工法を用いた梁部材は通常配筋のものと同等以上の構造性能を持つことが示されている。本論文では溶接組立鉄筋とキャップタイを利用した2種類の開口補強筋を提案し、実大断面の試験体の作製、加力を行い、本工法の有孔梁への適用可能性を検討し、さらなる施工の簡略化に資する情報を蓄積することを目的とする。

せん断性状の確認を目的とし、それぞれ一般部破壊型と開口部破壊型を想定した実大断面の梁試験体を作製し、建研式の正負交番繰返し加力を行った。パラメーターは孔径、孔周囲補強筋、肋筋比およびコンクリート強度である。孔径は梁せいに対する比 H/D で $1/5$ および $1/3$ とした。提案する孔周囲補強筋は2種類あり、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、開口上部に2重に取り付ける開口部補強、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。

孔径 $H/D=1/5$ の一般部破壊型試験体は孔のない一般部でせん断破壊、開口部破壊型の試験体は開口部でせん断破壊した。孔径 $H/D=1/3$ の開口部破壊型の試験体は開口部でせん断破壊した。孔周囲補強筋タイプ HB では、軸方向筋と横補強筋溶接部の剥離が確認された。

孔径 $H/D=1/5$ の一般部で破壊した試験体の場合、キャップタイ試験体の最大荷重は、通常肋筋と市販の孔周囲補強筋を用いた試験体より大きく、その比は $1.07 \sim 1.14$ であった。また、キャップタイ試験体の最大荷重は、荒川 mean 式（一般部）による計算値と比較して、 $1.30 \sim 1.54$ であった。各試験体の破壊部位は各せん断強度式を用いた計算結果とほぼ一致した。キャップタイ試験体の開口部せん断強度は、修正広沢 min, mean 式および平瀬らの式を用いて評価できた。

孔周囲補強筋で明確に降伏が見られたものはなかった。最大荷重時の肋筋歪に対する孔周囲補強筋の歪の比は、全試験体平均で 0.81 であった。

目次

第1章 はじめに	1
第2章 実験概要	3
2.1 試験体	3
2.2 使用材料	6
2.2.1 鉄筋	6
2.2.2 コンクリート	8
2.3 加力方法	11
2.4 計測方法	13
2.4.1 試験体 H1～H10	13
2.4.2 試験体 H11, H12	14
第3章 実験結果	16
3.1 破壊状況とせん断力-部材角関係	16
第4章 実験結果の検討	29
4.1 せん断力-部材角関係の比較	29
4.2 最大耐力の検討	31
4.3 主筋および補強筋の歪	38
第5章 まとめ	64
謝辞	65
参考文献	66

図目次

図 1-1 溶接組立鉄筋とキャップタイ	1
図 1-2 開口補強金物とその配筋例	2
図 1-3 溶接組立鉄筋とキャップタイを利用した開口補強筋	2
図 2-1 孔周囲補強筋の形状	4
図 2-2 試験体配筋図	5
図 2-3 鉄筋引張試験結果 (H1～H10)	7
図 2-4 鉄筋引張試験結果 (H11, H12)	7
図 2-5 加力装置 (H1～H10)	11
図 2-6 加力装置 (H11, H12)	12
図 2-7 加力履歴	12
図 2-8 変位計設置位置 (H1～H10)	13
図 2-9 歪ゲージ貼付位置 (H1～H10)	14
図 2-10 変位計設置位置 (H11, H12)	15
図 2-11 歪ゲージ貼付位置 (H11, H12)	15
図 3-1 試験体 H1 破壊状況	17
図 3-2 試験体 H2 破壊状況	18
図 3-3 試験体 H3 破壊状況	19
図 3-4 試験体 H4 破壊状況	20
図 3-5 試験体 H5 破壊状況	21
図 3-6 試験体 H6 破壊状況	22
図 3-7 試験体 H7 破壊状況	23
図 3-8 試験体 H8 破壊状況	24
図 3-9 試験体 H9 破壊状況	25
図 3-10 試験体 H10 破壊状況	26
図 3-11 試験体 H11 破壊状況	27
図 3-12 試験体 H12 破壊状況	28
図 4-1 せん断力-部材角関係の包絡線の比較 (一般部せん断破壊)	29
図 4-2 せん断力-部材角関係の包絡線の比較 (開口部せん断破壊・タイプ HA)	29
図 4-3 せん断力-部材角関係の包絡線の比較 (開口部せん断破壊・孔径 $H/D=1/3$)	30
図 4-4 孔周囲補強筋の考慮方法	31
図 4-5 試験体 H1 主筋のせん断力-歪関係	40
図 4-6 試験体 H2 主筋のせん断力-歪関係	41
図 4-7 試験体 H3 主筋のせん断力-歪関係	42
図 4-8 試験体 H4 主筋のせん断力-歪関係	43
図 4-9 試験体 H5 主筋のせん断力-歪関係	44

図 4-10	試験体 H6 主筋のせん断力－歪関係	45
図 4-11	試験体 H7 主筋のせん断力－歪関係	46
図 4-12	試験体 H8 主筋のせん断力－歪関係	47
図 4-13	試験体 H9 主筋のせん断力－歪関係	48
図 4-14	試験体 H10 主筋のせん断力－歪関係	49
図 4-15	試験体 H11 主筋のせん断力－歪関係	50
図 4-16	試験体 H12 主筋のせん断力－歪関係	51
図 4-17	試験体 H1 肋筋の歪	52
図 4-18	試験体 H2 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	53
図 4-19	試験体 H3 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	54
図 4-20	試験体 H4 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	55
図 4-21	試験体 H4 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	56
図 4-22	試験体 H6 肋筋の歪	57
図 4-23	試験体 H7 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	58
図 4-24	試験体 H8 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	59
図 4-25	試験体 H9 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	60
図 4-26	試験体 H10 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	61
図 4-27	試験体 H11 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	62
図 4-28	試験体 H12 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪	63

表目次

表 2-1 試験体一覧.....	4
表 2-2 鉄筋の引張試験結果一覧 (H1～H10)	6
表 2-3 鉄筋の引張試験結果一覧(H11, H12).....	6
表 2-4 コンクリートの調合表 (H1～H10)	8
表 2-5 コンクリートの調合表 (H11, H12)	8
表 2-6 コンクリートの材料試験結果 (18MPa, H1～H5)	9
表 2-7 コンクリートの材料試験結果 (30MPa, H6～H10)	9
表 2-8 コンクリートの材料試験結果 (18MPa, H11)	10
表 2-9 コンクリートの材料試験結果 (30MPa, H12)	10
表 2-10 検討用コンクリート強度 (H1～H10)	10
表 2-11 検討用コンクリート強度 (H11, H12)	10
表 3-1 試験体 H1 記事表.....	17
表 3-2 試験体 H2 記事表.....	18
表 3-3 試験体 H3 記事表.....	19
表 3-4 試験体 H4 記事表.....	20
表 3-5 試験体 H5 記事表.....	21
表 3-6 試験体 H6 記事表.....	22
表 3-7 試験体 H7 記事表.....	23
表 3-8 試験体 H8 記事表.....	24
表 3-9 試験体 H9 記事表.....	25
表 3-10 試験体 H10 記事表.....	26
表 3-11 試験体 H11 記事表	27
表 3-12 試験体 H12 記事表.....	28
表 4-1 最大荷重と計算値との比較.....	35
表 4-2 最大荷重と開口部計算値の比較.....	37
表 4-3 最大荷重時の孔周囲肋筋と補強筋の歪.....	39

第1章 はじめに

鉄筋コンクリート造建物の配筋作業は、従来、現場で作業員が手作業で行っており、作業時間の長期化や、現場作業の煩雑さ、熟練労働者の不足といった問題点が挙げられている。近年、戸建住宅等の低層建築物の鉄筋コンクリート基礎工事において、現場作業の省力化、時間短縮を目的として、工場であらかじめ組み上げ、溶接された溶接組立鉄筋が用いられることが増えている。また、近年、異形鉄筋同士の溶接接合性能についての研究が行われておらず^[1]、溶接点せん断試験を行った際に、溶接点ではなく、母材で破断する全強度溶接組立鉄筋が開発されている。これらを背景として、図 1-1 に示すような溶接組立鉄筋と 3 次元状に折り曲げ加工されたキャップタイを組み合わせる工法が提案、研究されている。既往の研究^{[2][3]}において、この工法を用いた梁部材は通常配筋のものと同等以上の構造性能を持つことが示されている。



溶接組立鉄筋



3 次元状に折り曲げ加工された
キャップタイ (タイプ II)

図 1-1 溶接組立鉄筋とキャップタイ

鉄筋コンクリート造建物の梁において、配管等を通すために開口を設けることがある。開口を設けることで、梁の構造性能は低下し、孔周囲にひび割れが発生しやすくなるため、孔周囲の補強が必要となる。開口部の補強に関しては、肋筋や斜め筋を用いて補強を行うことが一般的であったが、施工の簡略化のため、様々な形状の補強金物が提案、研究されている^[4]。図 1-2 に補強金物とその配筋例を示す。「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（以下、RC 規準）^[5]においては、これらの補強金物に対する直接的な検討は行われていないが、多くの補強金物において RC 規準の式を準用して評価が行われているという点から、補強金物を用いた場合の有孔梁におけるせん断伝達機構に関する研究も行われている^[6]。



図 1-2 開口補強金物とその配筋例

これらを背景とし、本論文では溶接組立鉄筋とキャップタイを利用した 2 種類の開口補強筋（図 1-3）を提案し、実大断面の試験体の作製、加力を行い、本工法の有孔梁への適用可能性を検討し、さらなる施工の簡略化に資する情報を蓄積することとする。



図 1-3 溶接組立鉄筋とキャップタイを利用した開口補強筋

第2章 実験概要

2.1 試験体

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。試験体一覧を、表 2-1 に示す。断面は幅 $b \times$ せい D が 220mm × 420mm, せん断スパン比は 1.5 とした。コンクリート目標強度は、想定する適用範囲の下限値と上限値である 18MPa と 30MPa とした。

試験体はせん断性状の確認を目的とし、主筋に D16 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。試験体 H1, H2, H3, H6, H7, H8 は一般部破壊型、試験体 H4, H5, H9, H10, H11, H12 は開口部破壊型を想定した試験体である。パラメーターは孔径および孔周囲補強筋である。孔径は梁せいに対する比 H/D で 1/5 および 1/3 とした。孔周囲補強筋の形状を図 2-1 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、開口上部に 2 重に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。試験体 H1, H6 では、比較検討のため、通常 135° フック肋筋と市販流通品の孔周囲補強筋を用いた。

試験体に用いたキャップタイはタイプ II で、一筆書き状に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。試験体 H11, H12 は開口部を除き、135° フックのキャップタイを用いた。試験体配筋図を図 2-2 に示す。なお、2.3 節で後述するが、試験体 H1～H10 は試験体固定用スタブを梁両端に設けた試験体であり、試験体 H11, H12 は梁両端を鋼製アングルで固定して加力を行った試験体である。

表 2-1 試験体一覧

試験 体名	共通事項	コンク リート 目標 強度 (MPa)	一般部肋筋	孔 径 H/D	孔周囲 補強筋	破壊 形式
H1	断面 $b \times D$ (mm) =220×420 せん断スパン比 1.5 主筋 3,3-D16 (SD490) $p_t=1.58\%$	18 2-D10@200 (SD295A) $p_w=0.32\%$	通常配筋 キャップ タイ (タイプ II)	1/5	市販流通品 ^{*1}	一般部 破壊型
H2				1/5	タイプ HA	
H3					タイプ HB	
H4				1/3	タイプ HA	開口部 破壊型
H5					タイプ HB	
H6			通常配筋 キャップ タイ (タイプ II)	1/5	市販流通品 ^{*1}	一般部 破壊型
H7				1/5	タイプ HA	
H8					タイプ HB	
H9				1/3	タイプ HA	開口部 破壊型
H10					タイプ HB	
H11		18	3-D10@100 (SD295A) $p_w=1.73\%$	1/5	タイプ HA	開口部 破壊型
H12		30				

*1 : MAX リンブレン K型 K-0806R

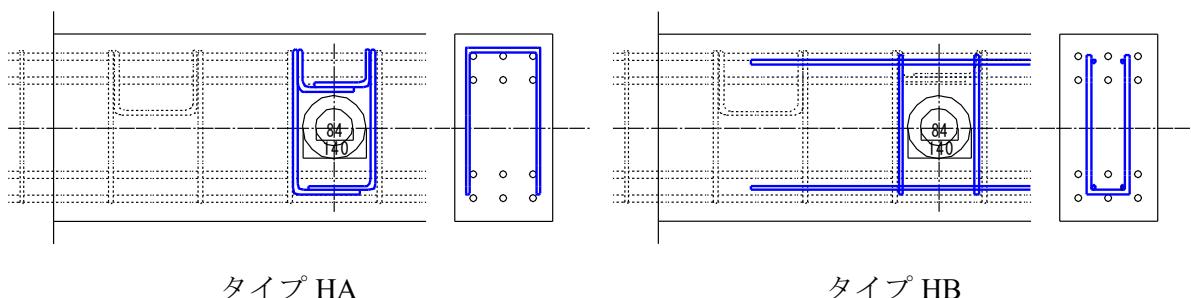


図 2-1 孔周囲補強筋の形状

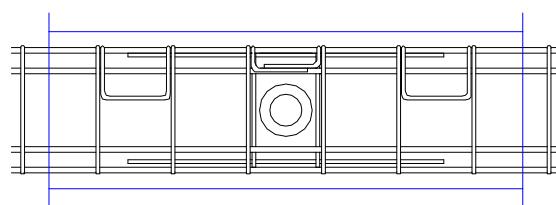
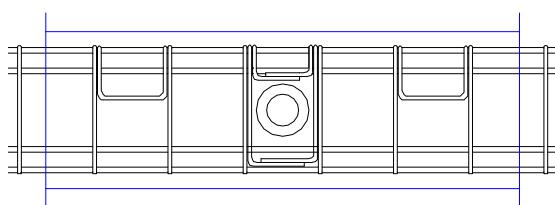
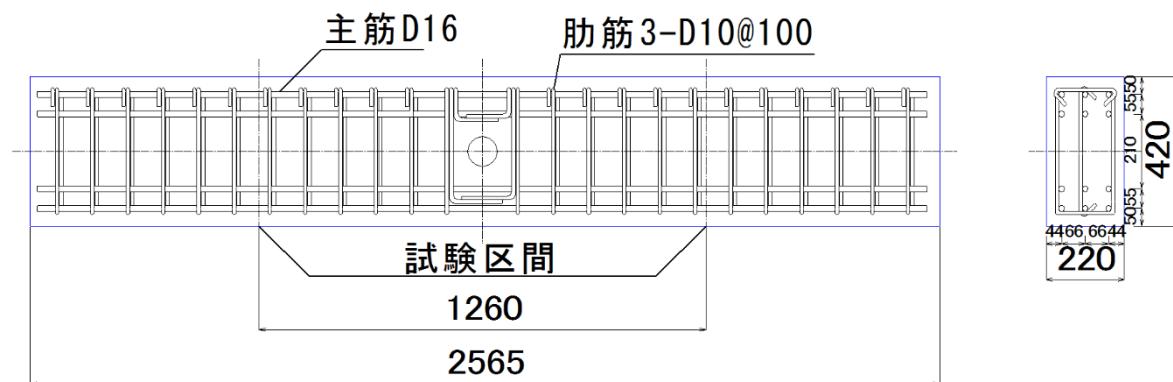
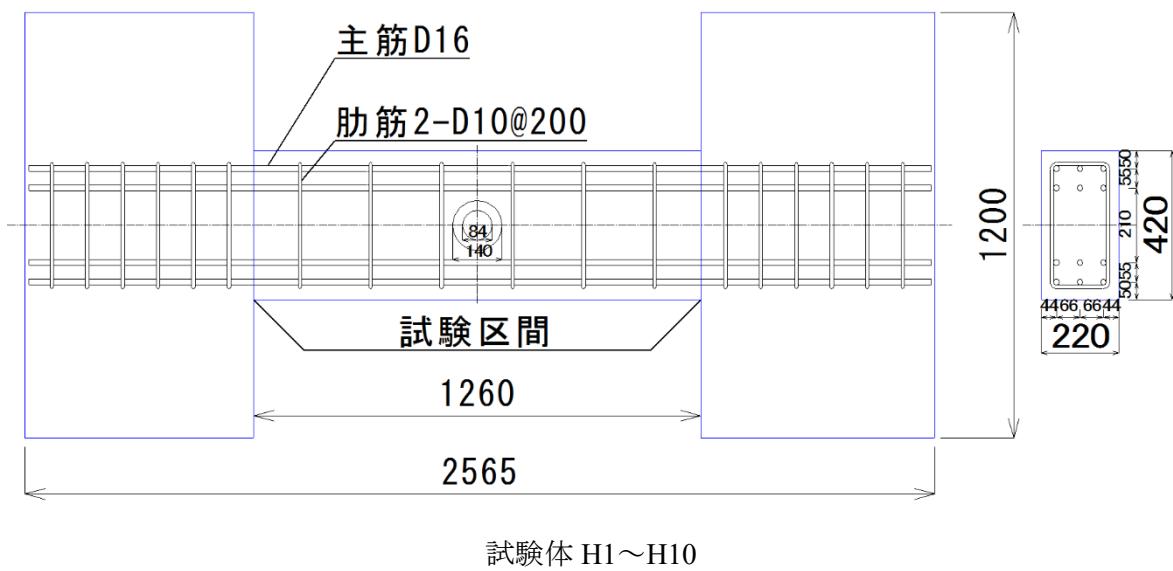


図 2-2 試験体配筋図

2.2 使用材料

2.2.1 鉄筋

主筋には異形鉄筋 D16 (SD490) を用いた。肋筋およびキャップタイには、異形鉄筋 D10 (SD295A) を用いた。引張試験の結果一覧を表 2-2 および表 2-3 に、応力－歪関係を図 2-3 および図 2-4 に示す。

表 2-2 鉄筋の引張試験結果一覧 (H1～H10)

鉄筋	番号	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏歪 (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	備考
D16 SD490	1	520	193	0.270	695	16.5	主筋
	2	528	192	0.275	697	18.4	
	3	517	192	0.269	695	17.2	
	平均	522	193	0.271	696	17.3	
D10 SD295A	1	362	190	0.191	505	29.8	肋筋・ キャップ タイ
	2	366	188	0.195	512	22.9	
	3	372	190	0.196	520	24.8	
	平均	367	189	0.194	512	25.8	

表 2-3 鉄筋の引張試験結果一覧(H11, H12)

鉄筋	番号	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏歪 (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	備考
D16 SD490	1*	522	185	0.281	703	10.6	主筋
	2	521	183	0.285	695	17.2	
	3	516	189	0.273	699	17.7	
	平均	520	185	0.280	699	17.5	
D10 SD295A	1	358	186	0.192	487	25.2	肋筋・ キャップ タイ
	2	359	187	0.192	486	25.4	
	3	356	186	0.192	485	22.8	
	平均	357	186	0.192	486	24.4	

*は標点間外破断のため、破断伸びの平均値には入れていない

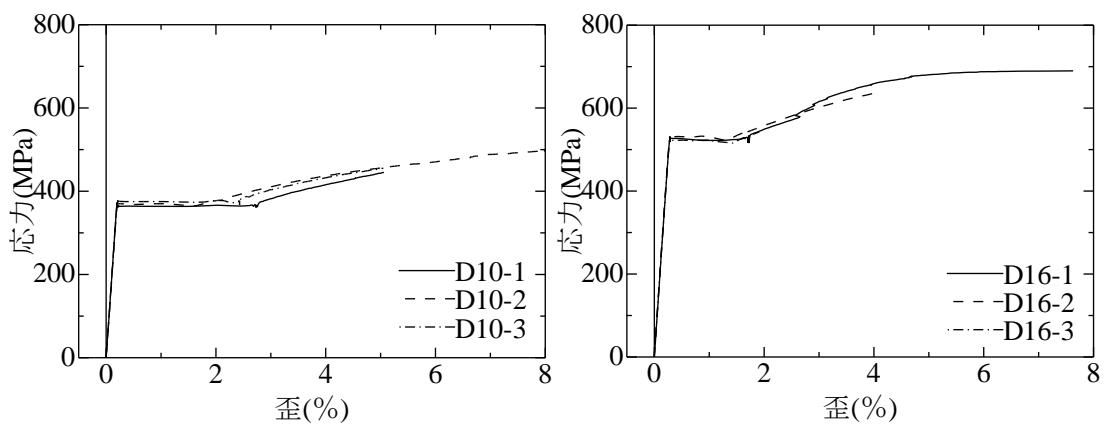


図 2-3 鉄筋引張試験結果 (H1~H10)

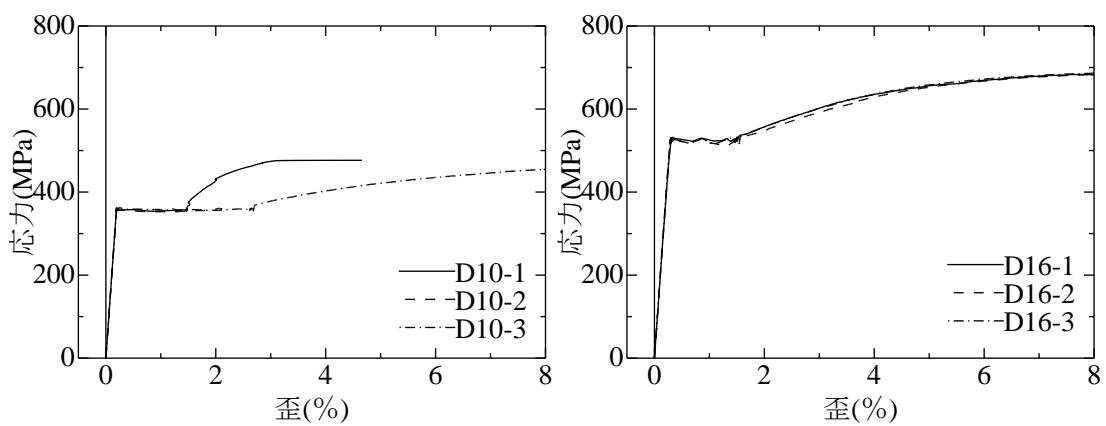


図 2-4 鉄筋引張試験結果 (H11, H12)

2.2.2 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 2-4 および表 2-5 に示す。

表 2-4 コンクリートの調合表 (H1～H10)

目標 強度	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					備考
		C	W	S	G	Ad	
18MPa	78.5	242	200	937	827	2.66	
30MPa	56.0	329	184	838	934	3.33	

表 2-5 コンクリートの調合表 (H11, H12)

目標 強度	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					備考
		C	W	S	G	Ad	
18MPa	78.5	245	192	942	852	2.45	
30MPa	56.0	321	180	846	918	3.21	

各目標強度試験体シリーズの加力期間の前、後に試験を行った。加力には 500kN 万能試験機を用い、圧縮強度試験および割裂引張強度試験を行った。

コンクリートの材料試験結果を、表 2-6～表 2-9 に示す。試験体 H1～H10 では、各目標強度試験体シリーズの加力期間の前、中、後の試験結果の平均値を、試験体 H11, H12 では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 2-10 および表 2-11 に示す。

表 2-6 コンクリートの材料試験結果 (18MPa, H1~H5)

目標強度	加力日(材令)	番号	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(GPa)	割裂強度(MPa)	備考
18MPa	2018.8.24 (29日)	1	19.0	18.5	1.81	
		2	19.3	18.5	2.13	
		3	19.4	18.6	1.91	
		平均	19.3	18.5	1.95	
	2018.9.10 (46日)	4	20.0	18.9	2.12	
		5	20.7	19.2	1.79	
		6	19.8	18.9	1.90	
		平均	20.1	19.0	1.94	
	2018.9.21 (57日)	7	20.6	19.3	2.33	
		8	19.9	18.9	2.25	
		9	20.6	19.3	2.25	
		平均	20.4	19.2	2.28	

表 2-7 コンクリートの材料試験結果 (30MPa, H6~H10)

目標強度	加力日(材令)	番号	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(GPa)	割裂強度(MPa)	備考
30MPa	2018.9.21 (31日)	1	28.3	22.2	2.16	
		2	27.8	22.3	2.22	
		3	27.8	22.2	2.26	
		平均	28.0	22.2	2.21	
	2018.10.4 (44日)	4	28.0	22.7	2.25	
		5	28.3	22.7	2.92	
		6	28.9	22.9	2.01	
		平均	28.4	22.8	2.39	
	2018.10.18 (58日)	7	30.2	23.0	2.63	
		8	28.4	22.6	2.76	
		9	29.0	22.6	2.01	
		平均	29.2	22.8	2.47	

表 2-8 コンクリートの材料試験結果 (18MPa, H11)

目標強度	加力日(材令)	番号	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(GPa)	割裂強度(MPa)	備考
18MPa	2019.11.29 (29日)	1	21.6	19.1	1.99	
		2	20.8	18.8	2.29	
		3	20.6	18.3	2.50	
		平均	21.0	18.7	2.26	
	2019.12.11 (41日)	4	22.8	19.5	2.27	
		5	22.5	19.0	2.30	
		6	22.5	19.1	2.20	
		平均	22.6	19.2	2.26	

表 2-9 コンクリートの材料試験結果 (30MPa, H12)

目標強度	加力日(材令)	番号	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(GPa)	割裂強度(MPa)	備考
30MPa	2019.12.11 (27日)	1	31.4	21.7	2.56	
		2	31.1	21.1	2.15	
		3	31.5	21.7	2.86	
		平均	31.3	21.5	2.52	
	2019.12.19 (35日)	4	31.7	21.8	2.86	
		5	32.1	21.9	2.35	
		6	32.4	21.3	2.76	
		平均	32.1	21.7	2.66	

表 2-10 検討用コンクリート強度 (H1~H10)

目標強度	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(GPa)	割裂強度(MPa)	備考
18MPa	19.9	18.9	2.05	
30MPa	28.5	22.6	2.36	

表 2-11 検討用コンクリート強度 (H11, H12)

目標強度	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(GPa)	割裂強度(MPa)	備考
18MPa	21.8	19.0	2.26	
30MPa	31.7	21.6	2.59	

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 2-5 および図 2-6 に示す。試験体によって固定方法が異なり、試験体 H1～H10 では上下スタブを PC 鋼棒および 50t オイルジャッキで固定し、H11, H12 では梁端部を鋼製アングルで挟んで固定した。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 2-7 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。

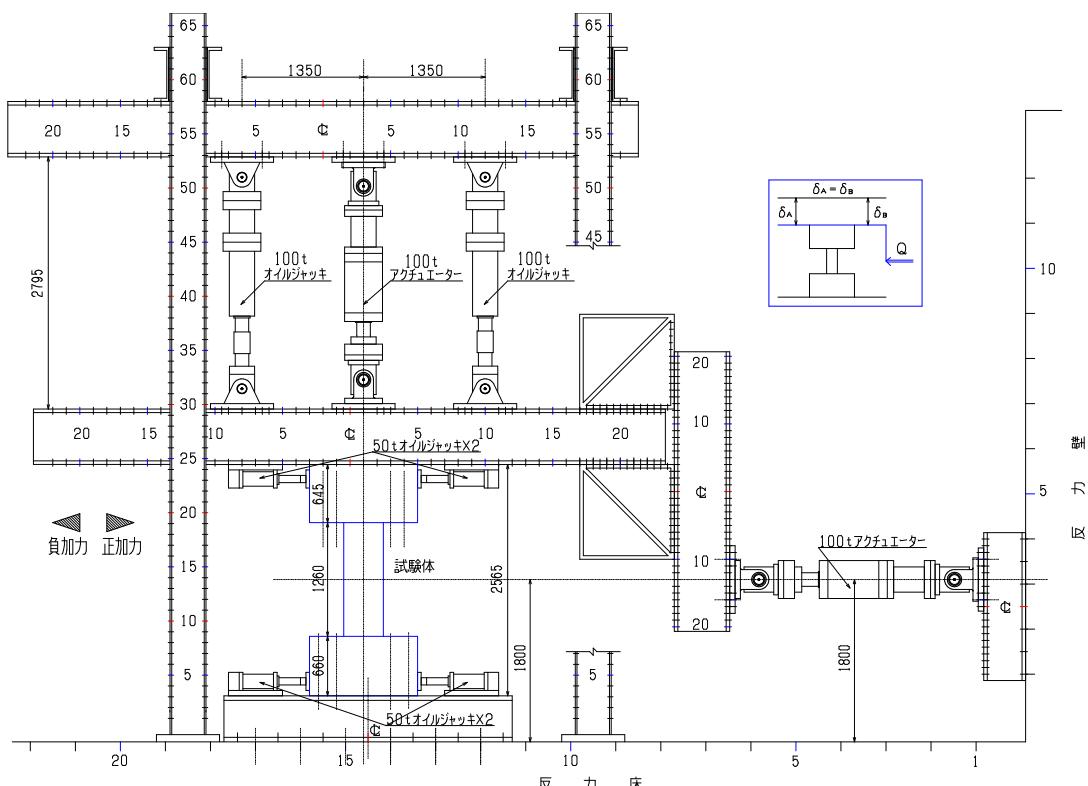


図 2-5 加力装置 (H1～H10)

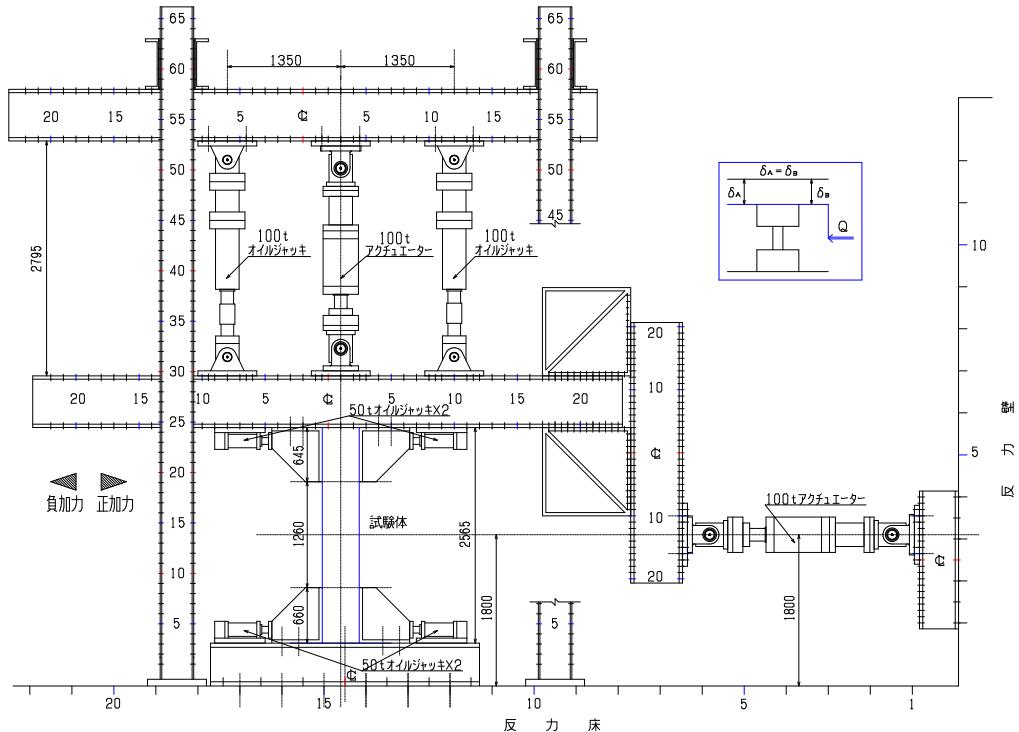


図 2-6 加力装置 (H11, H12)

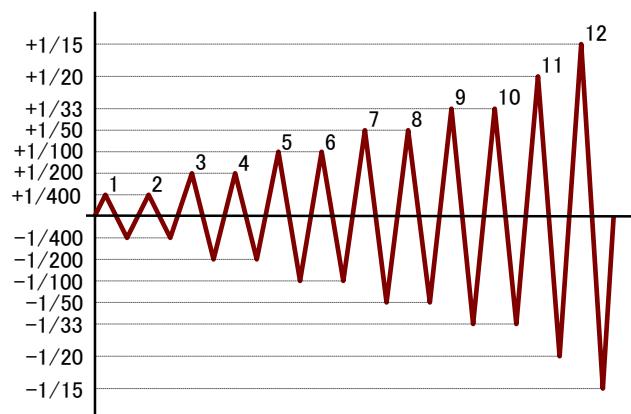


図 2-7 加力履歴

2.4 計測方法

2.4.1 試験体 H1～H10

計測項目は、アクチュエーター出力によるせん断力、スタブ間たわみ、スタブ間軸方向変位、試験体局部変形および主筋、肋筋、キャップタイおよび孔周囲補強筋の歪である。

変位計の設置位置を、図 2-8 に示す。スタブ間たわみおよびスタブ間軸方向変位は、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 2-9 に示す。主筋は危険断面位置、肋筋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。

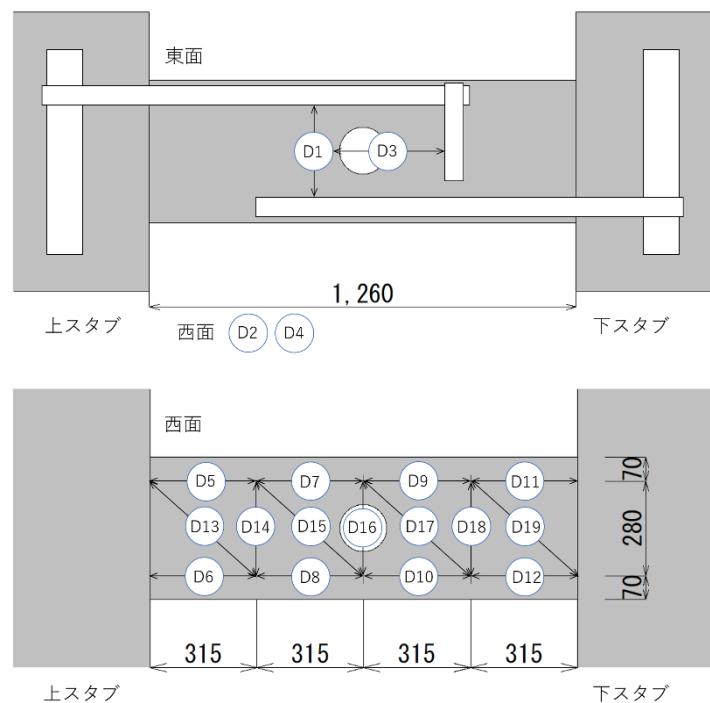


図 2-8 変位計設置位置 (H1～H10)

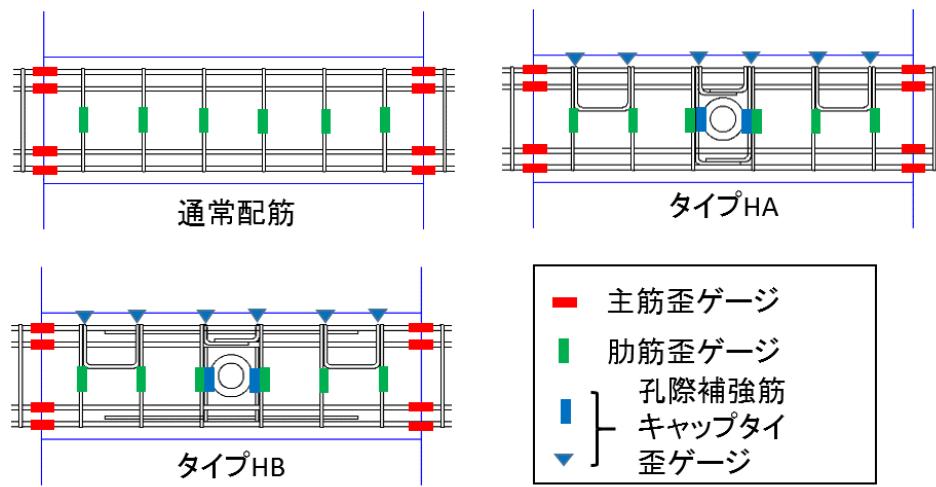


図 2-9 歪ゲージ貼付位置 (H1~H10)

2.4.2 試験体 H11, H12

計測項目は、アクチュエーター出力によるせん断力、スタブ間たわみ、スタブ間軸方向変位、試験体局部変形および主筋、肋筋、キヤップタイおよび孔周囲補強筋の歪である。

変位計の設置位置を、図 2-10 に示す。スタブ間たわみは、D1 と D2 の平均値とした。

歪ゲージの貼付位置を、図 2-11 に示す。主筋は危険断面位置、肋筋は梁側面中央部および上面中央部（キヤップタイ中央部）に貼付した。

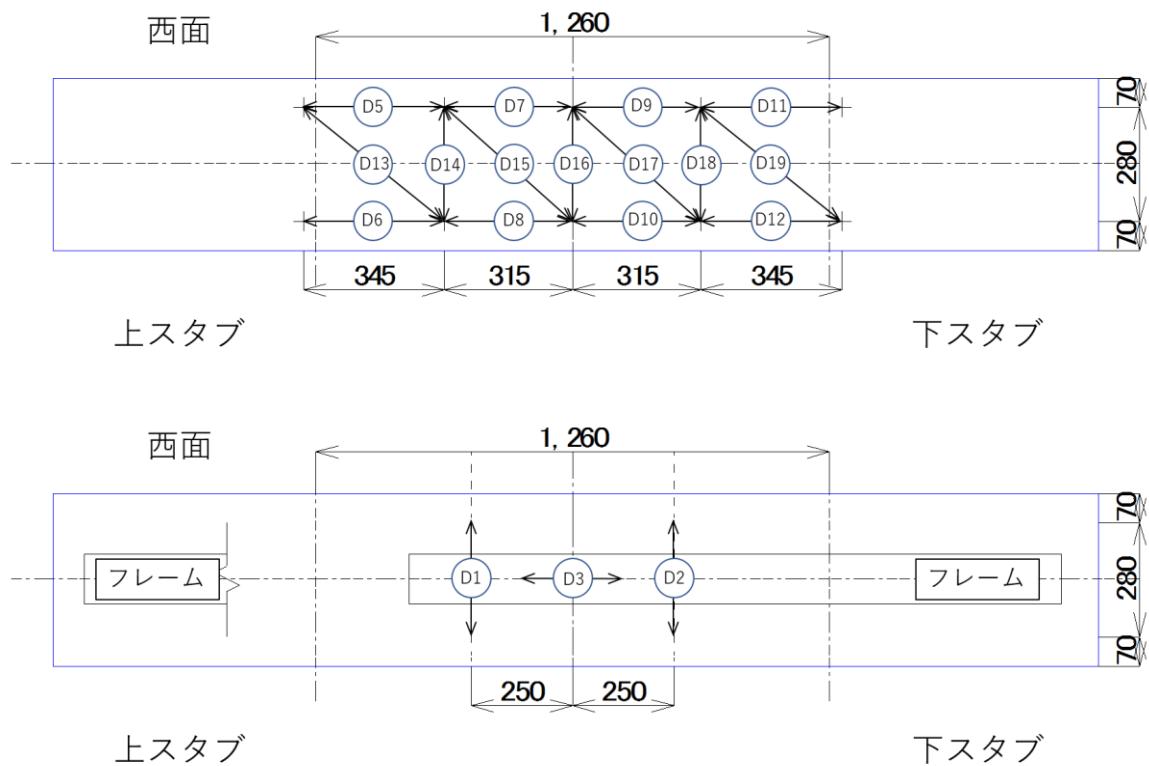


図 2-10 変位計設置位置 (H11, H12)

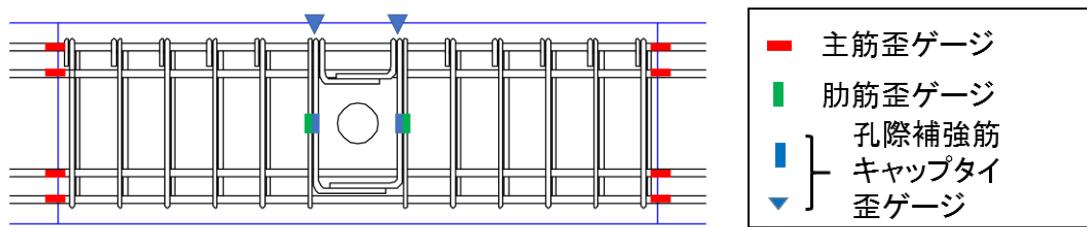


図 2-11 歪ゲージ貼付位置 (H11, H12)

第3章 実験結果

3.1 破壊状況とせん断力一部材角関係

各試験体のせん断力一部材角関係および 1/50rad. 加力サイクル終了時の破壊状況を図 3-1～図 3-12 に、 加力時実験記事を表 3-1～表 3-12 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 1/400rad. 加力サイクルの 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 $H/D=1/5$ の一般部破壊型試験体では、 1/100rad. 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。1/50rad. 加力サイクルにおいてそれらが大きく拡幅し、 荷重が低下した。また、 梁端部のひび割れの拡幅に伴い、 コンクリートの剥落が見られた。1/33rad. 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つた。

孔径 $H/D=1/3$ の開口部破壊型試験体では、 1/100rad. 加力サイクルにおいて開口部接線方向ひび割れが生じ、 同サイクルピーク時に正側最大荷重となった。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つた。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つた。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つた。

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。

孔径 $H/D=1/5$ の開口部破壊型試験体では、 1/50rad. 加力サイクルにおいて開口部接線方向ひび割れが発生、 荷重が低下し、 同サイクルピーク時に正側最大荷重となつた。正側で大きく破壊が進行したため、 結果として負側では 1/100rad. 加力サイクルが最大荷重となつた。1/33rad. 加力サイクルにおいて、 孔周囲補強筋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つた。

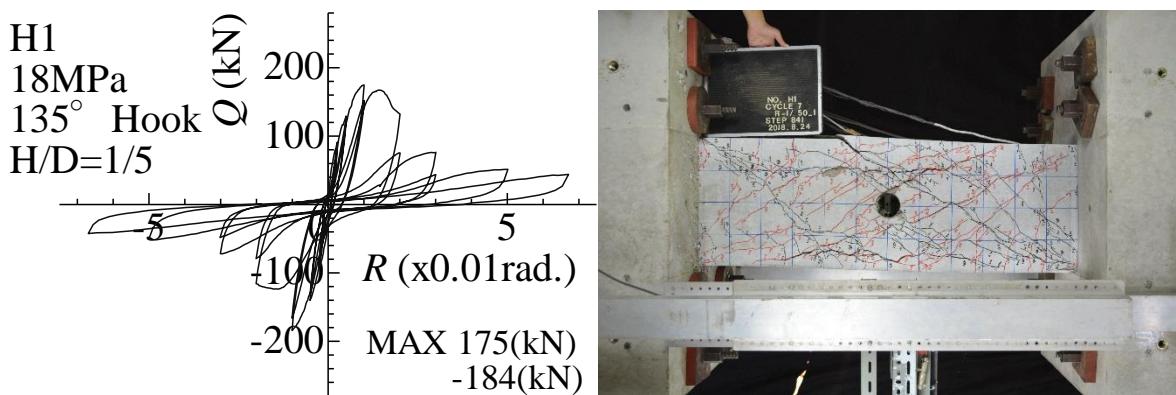


図 3-1 試験体 H1 破壊状況

表 3-1 試験体 H1 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
29	33	0.6	正側曲げひび割れ発生
44	55	1.3	正側開口部斜めひび割れ
48	61	1.6	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.10mm ②0.05mm 除荷時 ①0.05mm ②0.10mm
56	74	2.1	正側曲げせん断ひび割れ発生
98	-37	-0.3	負側曲げひび割れ発生
110	-61	-1.3	負側曲げせん断ひび割れ 負側開口部斜めひび割れ 負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.10mm ④0.05mm 除荷時 ③0.05mm ④0.08mm
316	-140	-6.4	負側開口部主筋沿いひび割れ
469	140	7.6	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.80mm ⑥0.70mm 除荷時 ⑤0.40mm ⑥1.10mm
480	164	10.1	肋筋降伏
486	171	11.3	孔際肋筋降伏
490	175	12.7	正側開口部接線方向ひび割れ 正側開口部主筋沿いひび割れ
491	175	12.7	正側最大荷重
544	-141	-7.3	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.50mm ⑧0.55mm 除荷時 ⑦0.20mm ⑧0.40mm
564	-184	-12.7	負側開口部接線方向ひび割れ 負側最大荷重
1499	1	-23.4	計測終了

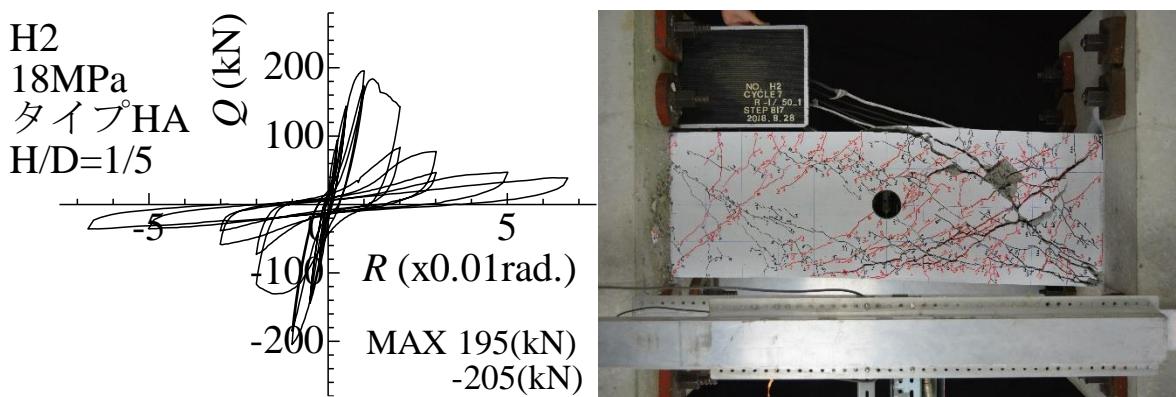


図 3-2 試験体 H2 破壊状況

表 3-2 試験体 H2 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
19	21	0.3	正側曲げひび割れ発生
41	57	1.3	正側開口部斜めひび割れ
43	60	1.4	正側曲げせん断ひび割れ発生
67	62	2.7	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.15mm ②0.15mm 除荷時 ①0.05mm ②0.05mm
86	-21	0.2	負側曲げひび割れ発生
99	-47	-0.9	負側開口部斜めひび割れ
104	-62	-1.5	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.10mm ④0.10mm 除荷時 ③0.08mm ④0.05mm
112	-81	-2.3	負側曲げせん断ひび割れ
259	144	6.4	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.30mm ⑥0.40mm 除荷時 ⑤0.10mm ⑥0.08mm
312	-144	-6.3	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.60mm ⑧0.70mm 除荷時 ⑦0.10mm ⑧0.20mm
410	-131	-6.0	孔際肋筋降伏
450	133	6.3	正側開口部主筋沿いひび割れ
471	195	12.7	正側最大荷重
530	-183	-9.6	肋筋降伏, HA ユニット側面降伏
537	-199	-11.7	負側開口部主筋沿いひび割れ
539	-203	-12.3	負側主筋降伏
541	-205	-12.7	負側最大荷重
720	151	23.1	キャップタイ降伏
724	144	24.9	正側主筋降伏
1481	1	-35.0	計測終了

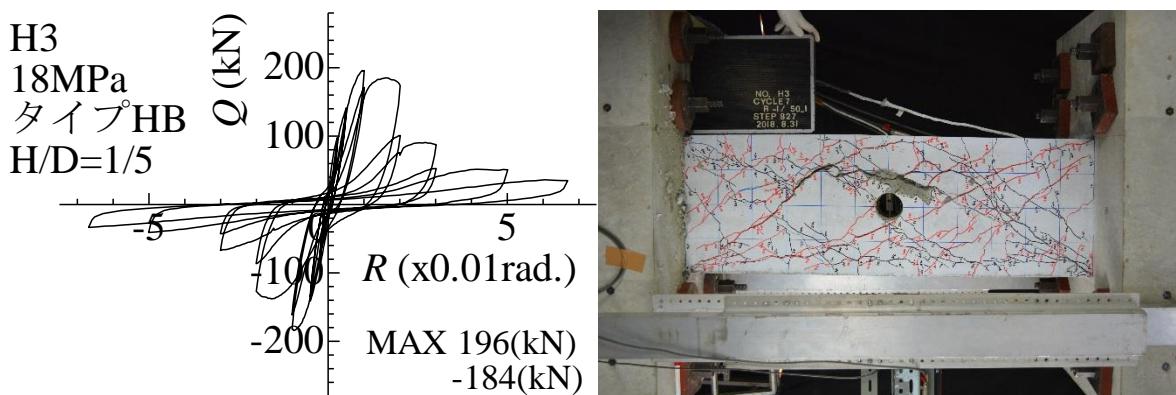


図 3-3 試験体 H3 破壊状況

表 3-3 試験体 H3 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
19	25	0.4	正側曲げひび割れ発生
32	58	1.3	正側曲げせん断ひび割れ発生 正側開口部斜めひび割れ
33	61	1.4	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.10mm ②0.05mm 除荷時 ①0.05mm ②0.05mm
72	-23	0.1	負側曲げひび割れ発生
76	-29	-0.1	負側開口部斜めひび割れ
91	-60	-1.5	負側開口部接線方向ひび割れ
92	-61	-1.6	負側曲げせん断ひび割れ 負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.10mm ④0.10mm 除荷時 ③0.05mm ④0.10mm
255	141	6.4	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.40mm ⑥0.40mm 除荷時 ⑤0.30mm ⑥0.05mm
308	-141	-6.3	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.60mm ⑧0.40mm 除荷時 ⑦0.20mm ⑧0.10mm
359	133	6.2	正側開口部主筋沿いひび割れ
410	-134	-6.3	負側開口部主筋沿いひび割れ
454	160	7.9	肋筋降伏
474	196	12.7	正側最大荷重
541	-184	-12.0	負側最大荷重
542	-184	-12.2	孔部キャップタイ降伏
601	171	12.7	正側開口部接線方向ひび割れ
718	184	18.8	キャップタイ降伏
725	185	21.3	正側主筋降伏
884	83	19.6	HB ユニット降伏
1291	33	32.5	孔際肋筋降伏
1498	1	-34.7	計測終了

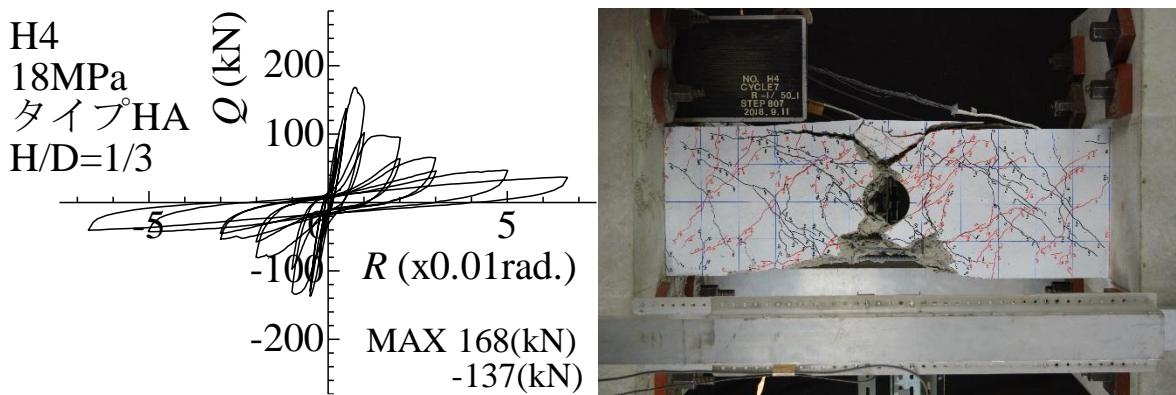


図 3-4 試験体 H4 破壊状況

表 3-4 試験体 H4 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
12	13	0.3	正側曲げひび割れ発生
13	14	0.4	正側開口部斜めひび割れ
40	62	1.7	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.10mm ②0.10mm 除荷時 ①0.05mm ②0.10mm
51	86	2.9	正側曲げせん断ひび割れ発生
75	-21	0.3	負側開口部斜めひび割れ
80	-30	-0.1	負側曲げひび割れ発生
96	-61	-1.6	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.20mm ④0.10mm 除荷時 ③0.20mm ④0.05mm
104	-79	-2.5	負側曲げせん断ひび割れ
304	-136	-6.2	負側開口部主筋沿いひび割れ
305	-137	-6.4	負側最大荷重
348	99	5.0	正側開口部主筋沿いひび割れ
443	142	7.2	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤1.00mm ⑥0.40mm 除荷時 ⑤1.20mm ⑥0.05mm
449	166	8.8	HA ユニット側面降伏
452	168	9.4	正側最大荷重
455	164	10.2	正側開口部接線方向ひび割れ
457	160	10.6	孔際肋筋降伏
513	-99	-5.8	肋筋降伏
525	-130	-9.4	負側開口部接線方向ひび割れ
982	58	27.3	キャップタイ降伏
1078	-4	-22.6	HA ユニット正面降伏
1432	0	-37.6	計測終了

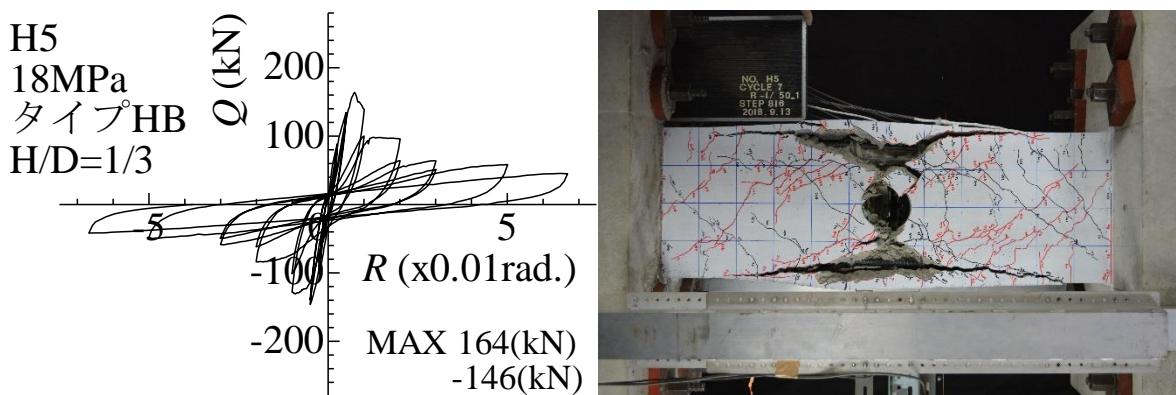


図 3-5 試験体 H5 破壊状況

表 3-5 試験体 H5 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
22	31	0.7	正側曲げひび割れ発生
23	33	0.8	正側開口部斜めひび割れ
37	61	1.7	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.10mm ②0.20mm 除荷時 ①0.05mm ②0.05mm
49	84	2.9	正側曲げせん断ひび割れ発生
72	-17	0.5	負側曲げひび割れ発生
80	-28	0.1	負側開口部斜めひび割れ
94	-62	-1.4	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.20mm ④0.10mm 除荷時 ③0.20mm ④0.08mm
105	-84	-2.3	負側曲げせん断ひび割れ
112	-101	-3.3	負側開口部主筋沿いひび割れ
250	114	4.9	正側開口部接線方向ひび割れ
253	122	5.4	正側開口部主筋沿いひび割れ
303	-129	-5.1	負側開口部接線方向ひび割れ
310	-146	-6.3	負側最大荷重 負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.40mm ④0.60mm 除荷時 ③0.10mm ④0.30mm
451	140	7.2	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ②0.50mm ⑤0.40mm 除荷時 ②1.50mm ⑤0.20mm
460	164	9.4	正側最大荷重
463	159	9.9	孔部キャップタイ降伏
528	-123	-7.6	肋筋降伏
816	-84	-25.3	孔際肋筋降伏
994	55	27.3	キャップタイ降伏
1061	-48	-23.2	HB ユニット降伏
1419	0	-47.4	計測終了

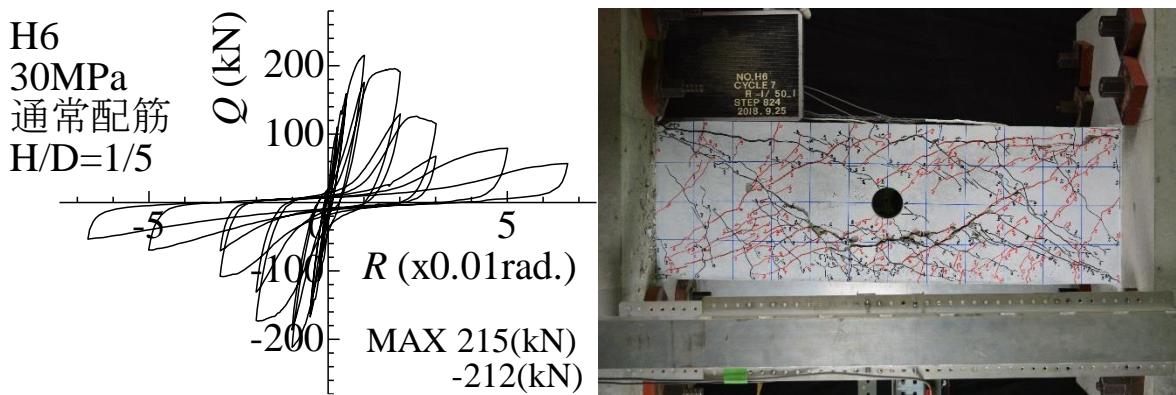


図 3-6 試験体 H6 破壊状況

表 3-6 試験体 H6 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
22	41	0.7	正側曲げひび割れ発生
29	62	1.2	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm ②0.08mm 除荷時 ①0mm ②0.05mm
44	97	2.7	正側開口部斜めひび割れ
45	99	2.8	正側曲げせん断ひび割れ発生
90	-63	-0.9	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.05mm ④0.05mm 除荷時 ③0mm ④0mm
91	-63	-0.9	負側開口部斜めひび割れ
102	-88	-2.0	負側曲げせん断ひび割れ
242	141	5.3	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.40mm ⑥0.40mm 除荷時 ⑤0.10mm ⑥0.20mm
244	147	5.7	肋筋降伏
248	159	6.4	正側開口部主筋沿いひび割れ
290	-142	-4.5	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.50mm ⑧0.40mm 除荷時 ⑦0.30mm ⑧0.20mm
299	-167	-6.3	負側開口部主筋沿いひび割れ
465	215	12.8	正側最大荷重
529	-195	-9.9	孔際肋筋降伏
540	-212	-12.7	負側最大荷重
1458	0	-41.5	計測終了

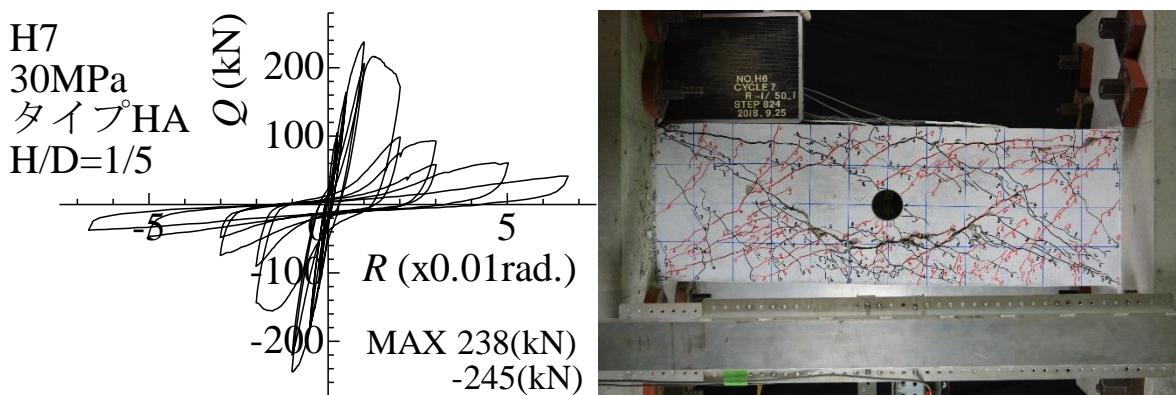


図 3-7 試験体 H7 破壊状況

表 3-7 試験体 H7 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
19	30	0.5	正側曲げひび割れ発生
34	62	1.3	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm 除荷時 ①0.05mm
35	63	1.3	正側開口部斜めひび割れ
49	95	2.7	正側曲げせん断ひび割れ発生
79	-27	0.3	負側曲げひび割れ発生
92	-63	-0.8	負側開口部斜めひび割れ 負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ②0.05mm ③0.05mm 除荷時 ②0.05mm ③0mm
100	-86	-1.6	負側曲げせん断ひび割れ
255	141	5.1	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ④0.30mm ⑤0.30mm 除荷時 ④0.10mm ⑤0.10mm
303	-142	-4.2	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑥0.30mm ⑦0.30mm 除荷時 ⑥0.20mm ⑦0.10mm
471	227	11.0	正側主筋降伏
472	228	11.2	正側開口部主筋沿いひび割れ
478	238	12.5	HA ユニット側面降伏 正側最大荷重
530	-182	-6.4	負側開口部主筋沿いひび割れ
547	-236	-10.5	肋筋降伏
552	-242	-11.7	負側主筋降伏
555	-245	-12.4	負側最大荷重
719	212	14.7	キャップタイ降伏
725	215	16.9	正側開口部接線方向ひび割れ
745	185	24.3	孔際肋筋降伏
1416	-2	50.4	HA ユニット正面降伏
1482	0	-19.5	計測終了

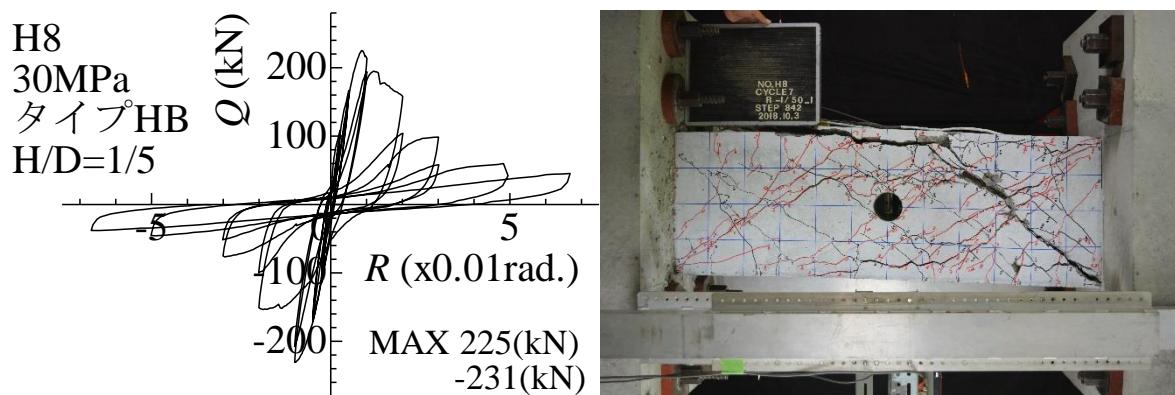


図 3-8 試験体 H8 破壊状況

表 3-8 試験体 H8 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
11	12	0.1	正側曲げひび割れ発生
32	62	1.0	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.08mm 除荷時 ①0mm
35	67	1.1	正側開口部斜めひび割れ
44	86	1.9	正側曲げせん断ひび割れ発生
77	-19	0.4	負側曲げひび割れ発生
98	-63	-1.2	負側開口部斜めひび割れ 負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ②0.08mm ③0.08mm 除荷時 ②0.08mm ③0mm
103	-74	-1.5	負側曲げせん断ひび割れ
261	142	4.9	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ④0.40mm ⑤0.20mm 除荷時 ④0.20mm ⑤0.05mm
266	157	5.8	肋筋降伏
313	-141	-4.7	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑥0.40mm ⑦0.40mm 除荷時 ⑥0.10mm ⑦0.30mm
467	195	8.2	正側開口部接線方向ひび割れ
478	225	11.0	正側最大荷重
481	220	11.8	孔部キャップタイ降伏
528	-134	-4.3	負側開口部主筋沿いひび割れ
536	-176	-6.6	負側開口部接線方向ひび割れ
557	-228	-11.9	負側主筋降伏
561	-231	-12.7	負側最大荷重
615	181	11.3	キャップタイ降伏
618	191	12.3	正側開口部主筋沿いひび割れ
747	158	25.3	正側主筋降伏
1105	-74	-33.2	HB ユニット降伏
1110	-75	-37.9	孔際肋筋降伏
1458	0	-41.9	計測終了

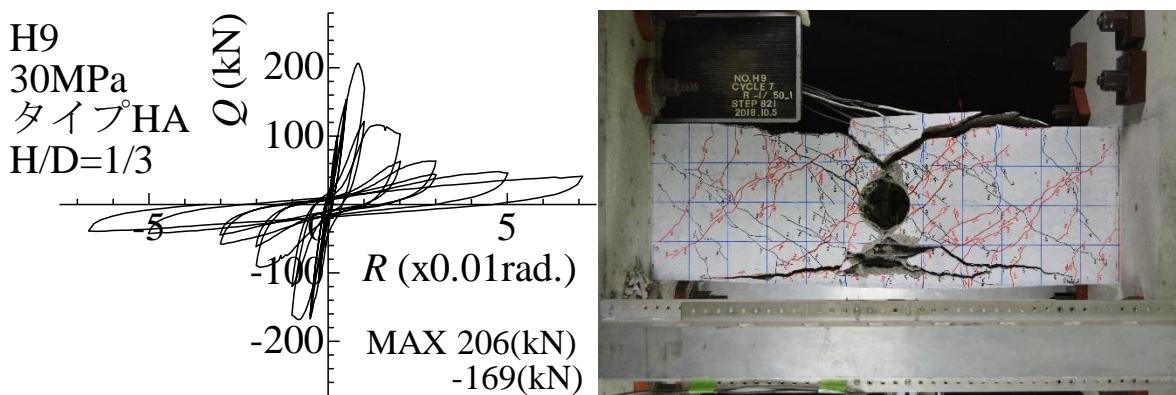


図 3-9 試験体 H9 破壊状況

表 3-9 試験体 H9 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
12	18	0.7	正側曲げひび割れ発生
26	47	1.3	正側開口部斜めひび割れ
32	63	1.7	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm ②0.05mm 除荷時 ①0mm ②0.05mm
40	79	2.3	正側曲げせん断ひび割れ発生
67	-14	0.8	負側曲げひび割れ発生
84	-47	-0.2	負側開口部斜めひび割れ
91	-62	-0.8	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.08mm ④0.10mm 除荷時 ③0.05mm ④0.20mm
108	-99	-2.4	負側曲げせん断ひび割れ
252	143	5.7	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.20mm ⑥0.40mm 除荷時 ⑤0.05mm ⑥0.20mm
299	-142	-4.9	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ④0.40mm ⑦0.40mm 除荷時 ④0.20mm ⑦0.08mm
455	198	9.3	HA ユニット側面降伏
460	206	10.5	孔際肋筋降伏
461	206	10.7	正側最大荷重
462	205	11.0	HA ユニット正面降伏
465	196	11.8	正側開口部主筋沿いひび割れ
526	-164	-9.1	負側開口部主筋沿いひび割れ
528	-168	-9.7	肋筋降伏
530	-169	-10.2	負側最大荷重
1288	-40	-52.8	キャップタイ降伏
1418	0	-42.8	計測終了

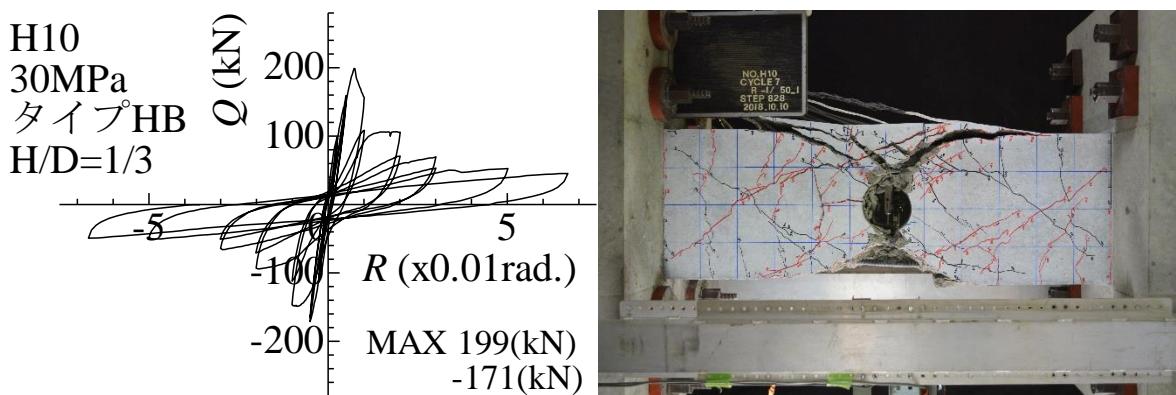


図 3-10 試験体 H10 破壊状況

表 3-10 試験体 H10 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
22	37	0.6	正側曲げひび割れ発生
29	49	1.0	正側開口部斜めひび割れ
35	61	1.4	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.10mm ②0.08mm 除荷時 ①0.10mm ②0.05mm
53	97	3.0	正側曲げせん断ひび割れ発生
85	-37	-0.1	負側曲げひび割れ発生
96	-64	-1.1	負側開口部斜めひび割れ 負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.10mm ④0.05mm 除荷時 ③0.08mm ④0.05mm
113	-101	-2.6	負側曲げせん断ひび割れ
260	142	5.4	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.60mm ⑥0.20mm 除荷時 ⑤0.20mm ⑥0.05mm
308	-142	-4.7	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.30mm ⑦0.30mm 除荷時 ③0.20mm ⑦0.05mm
317	-171	-6.3	負側最大荷重
466	199	9.1	正側最大荷重
468	185	9.9	孔部キャップタイ降伏
473	165	11.7	正側開口部主筋沿いひび割れ
477	157	12.7	正側開口部接線方向ひび割れ
517	-88	-3.1	負側開口部接線方向ひび割れ 負側開口部主筋沿いひび割れ
732	106	24.2	HB ユニット降伏
1093	-66	-37.1	孔際肋筋降伏
1289	-34	-18.7	キャップタイ降伏
1439	0	-45.1	計測終了

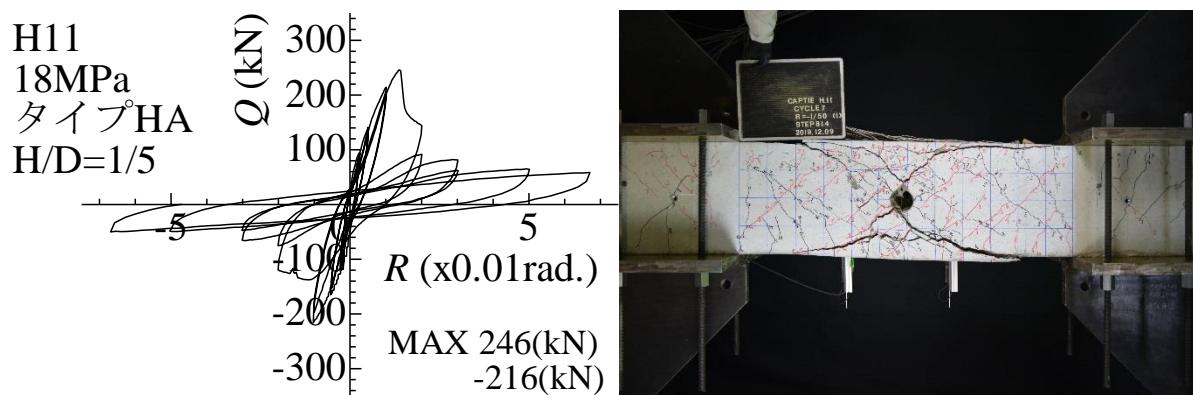


図 3-11 試験体 H11 破壊状況

表 3-11 試験体 H11 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
15	33	0.4	正側曲げひび割れ発生
29	62	1.3	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm ②0.05mm 除荷時 ①0mm ②0mm
36	78	2.0	正側開口部斜めひび割れ
45	95	3.3	正側曲げせん断ひび割れ発生
72	-36	0.5	負側曲げひび割れ発生
83	-62	-0.5	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.05mm ④0.05mm 除荷時 ③0.05mm ④0mm
85	-66	-0.6	負側開口部斜めひび割れ
99	-97	-2.2	負側曲げせん断ひび割れ
255	141	6.3	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.10mm ⑥0.30mm 除荷時 ⑤0.05mm ⑥0.10mm
303	-142	-4.7	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.40mm ⑧0.40mm 除荷時 ⑦0.10mm ⑧0.20mm
541	-216	-12.9	負側最大荷重
699	206	13.0	正側開口部主筋沿いひび割れ
704	229	15.1	正側開口部接線方向ひび割れ HA ユニット側面降伏
706	236	15.8	正側主筋降伏
712	246	17.5	正側最大荷重
714	185	19.0	孔際肋筋降伏
720	157	21.8	HA ユニット正面降伏
783	-122	-9.7	負側開口部接線方向ひび割れ
788	-132	-12.2	負側開口部主筋沿いひび割れ
1423	0	-59.2	計測終了

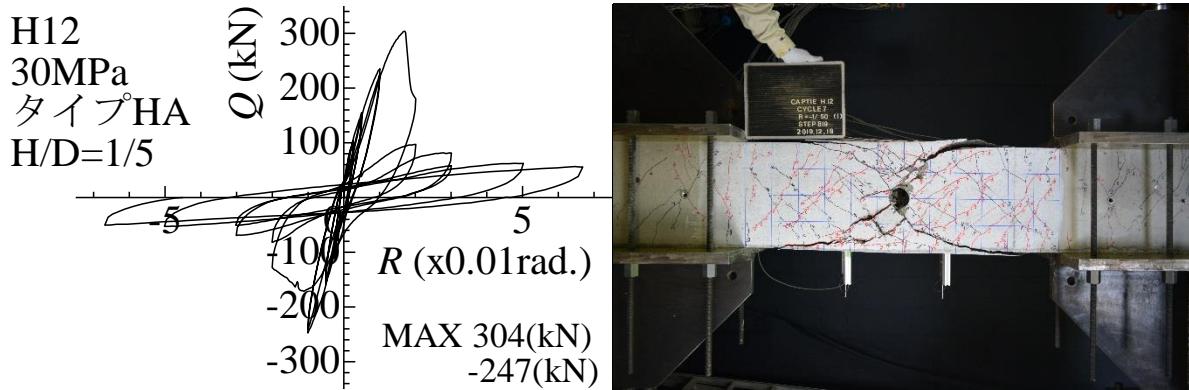


図 3-12 試験体 H12 破壊状況

表 3-12 試験体 H12 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
23	39	0.5	正側曲げひび割れ発生
32	62	1.1	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm ②0.05mm 除荷時 ①0.05mm ②0mm
49	97	3.0	正側開口部斜めひび割れ
77	-31	0.8	負側曲げひび割れ発生
93	-61	-0.4	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.10mm 除荷時 ③0.05mm
99	-77	-0.6	負側開口部斜めひび割れ
101	-82	-0.7	負側曲げせん断ひび割れ
252	136	5.0	正側曲げせん断ひび割れ発生
254	142	5.5	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ④0.30mm ⑤0.20mm 除荷時 ④0.08mm ⑤0.05mm
306	-142	-5.4	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑥0.40mm ⑦0.30mm 除荷時 ⑥0.10mm ⑦0.08mm
469	221	11.2	正側開口部接線方向ひび割れ
541	-247	-12.7	負側最大荷重
697	239	14.1	正側主筋降伏
717	303	20.9	HA ユニット側面降伏
719	304	21.5	正側最大荷重 HA ユニット正面降伏
720	302	21.7	孔際肋筋降伏
722	197	23.7	正側開口部主筋沿いひび割れ
791	-170	-13.6	負側開口部接線方向ひび割れ
801	-156	-18.1	負側開口部主筋沿いひび割れ
1429	0	-56.7	計測終了

第4章 実験結果の検討

4.1 せん断力-部材角関係の比較

一般部でせん断破壊した孔径 $H/D=1/5$ の試験体のせん断力-部材角関係の包絡線の比較を図 4-1 に示す。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つたが、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 の試験体を比較すると、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。孔周囲補強筋タイプ HA のほうがタイプ HB と比較して、主筋およびコアコンクリートを拘束するせん断補強筋の本数が多いためと考えられる。

開口部でせん断破壊した孔周囲補強筋タイプ HA の試験体のせん断力-部材角関係の包絡線の比較を図 4-2 に示す。一般部の配筋が異なるものの、開口径による最大荷重の差が顕著に見られ、 $H/D=1/5$ の試験体のほうが最大荷重は大きく、それ以降の耐力低下も小さい。

開口部でせん断破壊した孔径 $H/D=1/3$ の試験体のせん断力-部材角関係の包絡線の比較を図 4-3 に示す。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つた。孔径 $H/D=1/3$ の場合は梁せいに対して開口径が大きく、開口部での破壊が顕著であるため、孔周囲補強筋の差異が現れ難いと考えられる。

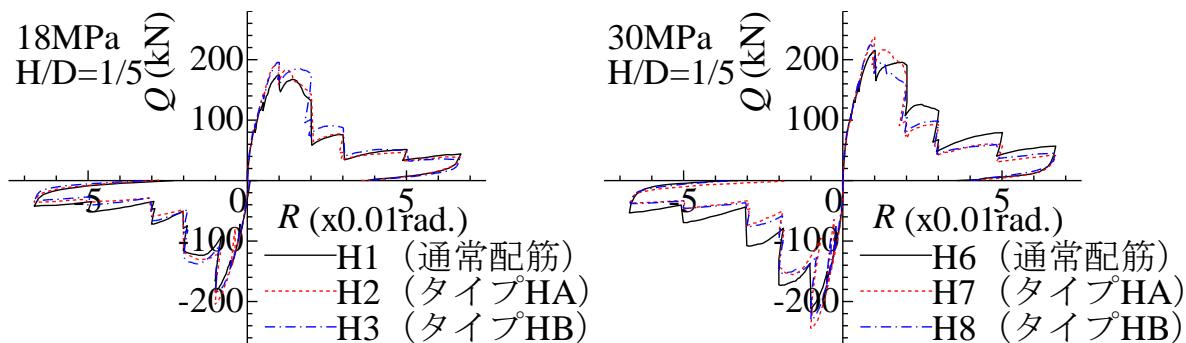


図 4-1 せん断力-部材角関係の包絡線の比較（一般部せん断破壊）

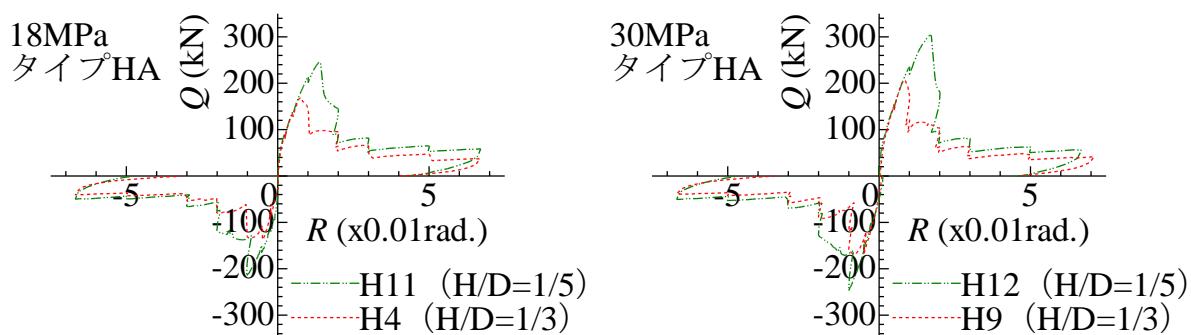


図 4-2 せん断力-部材角関係の包絡線の比較（開口部せん断破壊・タイプ HA）

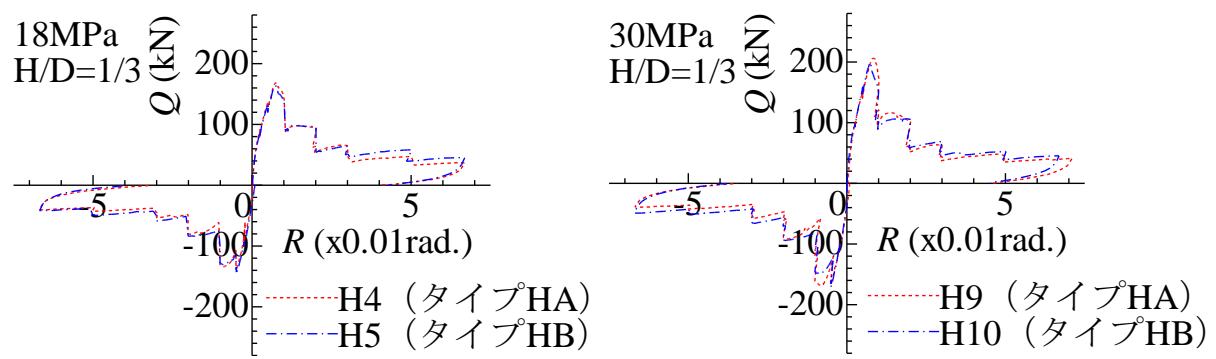


図 4-3 せん断力-部材角関係の包絡線の比較（開口部せん断破壊・孔径 $H/D=1/3$ ）

4.2 最大耐力の検討

試験体の曲げ強度計算値は、RC 規準の曲げ終局強度略算式により算出した。一般部のせん断強度は荒川 min 式^[5]、荒川 mean 式^[5]、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)^[7]によるせん断強度式 A 法、および同学会「鉄筋コンクリート造建物の韌性保証型耐震設計指針・同解説」(以下、韌性保証型指針)^[8]により算出した。開口部のせん断強度は、修正広沢式^[5](修正広沢 min 式)、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^[5]、終局強度型指針式および韌性保証型指針式によって算出した。孔周囲補強筋の考慮方法を図 4-4 に示す。RC 規準に則り、開口部中心から斜め 45° に引いた線と、鉄筋重心との交点までを孔周囲補強筋の有効な範囲とした。孔周囲補強筋タイプ HA、タイプ HB ともに開口部に近い 2 本分の補強筋を考慮している。

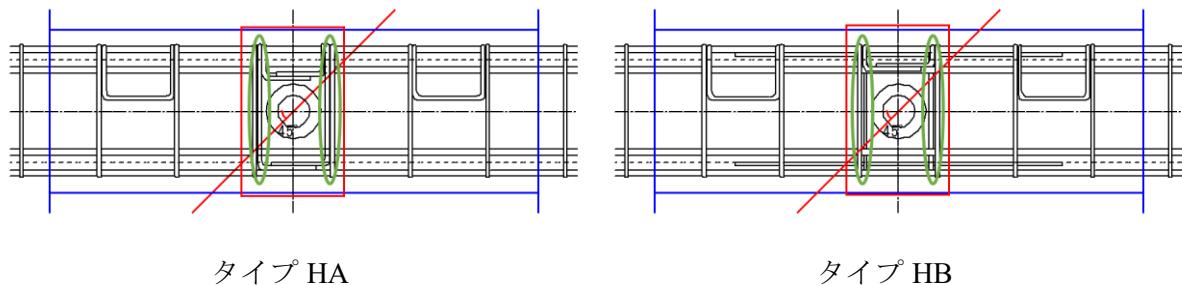


図 4-4 孔周囲補強筋の考慮方法

(1) 曲げ強度 (略算式)

$$cQ_{mu} = 0.9 \sum a_t \cdot \sigma_y \cdot d / (L_0/2) \quad (4-1)$$

ここで、

cQ_{mu} : 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_0 : 内法スパン

(2) せん断強度 (荒川 min 式、荒川 mean 式)

$$cQ_{su,min} = \left\{ \frac{0.092k_u k_p(180+\sigma_B)}{M/Qd+0.12} + 2.7\sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \quad (4-2)$$

$$cQ_{su,mean} = \left\{ \frac{0.115k_u k_p(180+\sigma_B)}{M/Qd+0.12} + 2.7\sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j \quad (4-3)$$

ここで、

cQ_{su} : 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 ($=0.82p_t^{0.23}$)

σ_B : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm²)

- M/Qd : せん断スパン比 ($M/Qd \leq 3$)
 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 (=7/8d) (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)

$$cQ_{su,A} = b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \varphi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B / 2 \quad (4-4)$$

ここで,

- cQ_{su} : せん断強度
 b : 梁幅
 j_t : 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 : せん断補強筋比
 σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度
 ϕ : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度
 $= \min \left\{ 2.0, j_t / (D \cdot \tan \theta), \sqrt{\nu \cdot \sigma_B / (p_w \cdot \sigma_{wy}) - 1.0} \right\}$
 θ : $\tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$
 β : $= (1 + \cot^2 \phi) p_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B$
 D : 梁せい
 L : 内法スパン
 ν : $\nu_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$ (σ_B の単位は kgf/cm²)
 σ_B : コンクリート圧縮強度

(4) せん断強度 (革性保証型指針式)

$$V_u = \mu p_{we} \sigma_{wy} b_e j_e + \left(\nu \sigma_B - \frac{5p_{we}\sigma_{wy}}{\lambda} \right) \frac{bD}{2} \tan \theta \quad (4-5)$$

$$V_u = \frac{\lambda \nu \sigma_B + p_{we} \sigma_{wy}}{3} b_e j_e \quad (4-6)$$

$$V_u = \frac{\lambda \nu \sigma_B}{2} b_e j_e \quad (4-7)$$

による値のうちの最小値

ここで,

- V_u : せん断強度
 b : 断面の幅
 D : 梁せい
 j_e : トラス機構に関与する断面の有効せい
 b_e : トラス機構に関与する断面の有効幅
 σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度
 p_{we} : 有効補強筋比
 $= \frac{a_w}{b_e s}$

a_w	: 1組のせん断補強筋の断面積
s	: せん断補強筋の間隔
μ	: トラス機構の角度を表す係数 $= 2 - 20R_p$
R_p	: 終局限界状態のヒンジ領域の回転角(rad) (今回は 0 とした。)
ν	: $\nu_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$ (σ_B の単位は kgf/cm ²)
σ_B	: コンクリート圧縮強度
λ	: トラス機構の有効係数 $= 1 - \frac{s}{2j_e} - \frac{b_s}{4j_e}$
b_s	: せん断補強筋の断面方向の最大間隔
θ	: アーチ機構の圧縮束の角度 $\tan \theta = 0.9 \times \frac{D}{2L}$
L	: クリアスパン長さ

(5) 開口部せん断強度 (修正広沢 min 式, 修正広沢 mean 式)

$$cQ_{su0,min} = \left\{ \frac{0.092k_u k_p(18+\sigma_B)}{M/Qd+0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_s \cdot s\sigma_y} \right\} b \cdot j \quad (4-8)$$

$$cQ_{su0,mean} = \left\{ \frac{0.115k_u k_p(18+\sigma_B)}{M/Qd+0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_s \cdot s\sigma_y} \right\} b \cdot j \quad (4-9)$$

ここで,

cQ_{su0}	: 開口部せん断強度
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 ($=2.36p_t^{0.23}$)
σ_B	: コンクリート圧縮強度 (MPa)
M/Qd	: せん断スパン比 ($M/Qd \leq 3$)
H/D	: 梁せい D に対する孔の直径 H の比
p_s	: 孔周囲補強筋比 ($=a_s/bc$)
a_s	: 孔の片側にある補強筋の断面積 ($=2\text{-D10} + 2\text{-D10}$) (mm ²)
b	: 梁幅 (mm)
c	: 孔周囲の補強筋の有効な範囲 ($=d - D/2$) (mm)
$s\sigma_y$: 孔周囲補強筋の降伏強度 (MPa)
j	: 応力中心間距離 ($=7/8d$) (mm)
d	: 有効せい (1段目主筋と2段目主筋の図心位置) (mm)

(6) 開口部せん断強度 (終局強度型指針式)

$$cQ_{su0,A} = b \cdot j_{tw} \cdot p_{ws} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi_s \quad (4-10)$$

ここで,

cQ_{su0}	: 開口部せん断強度
b	: 梁幅
j_{tw}	: $=j_t - H/\cos\phi_s - G \cdot \tan\phi_s$

j_t	: 主筋中心間距離 (1段目主筋と2段目主筋の図心位置)
H	: 孔の直径
G	: 孔の両脇の肋筋の間隔 (200mm)
p_{ws}	: 孔の両脇の肋筋比
σ_{wy}	: 孔の両脇の肋筋の降伏強度
ϕ_s	: トラス機構のコンクリート圧縮束の角度 $\cot \phi_s = \sqrt{\nu \cdot \sigma_B / (p_{ws} \cdot \sigma_{wy}) - 1.0}$
ν	: $\nu_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$ (σ_B の単位は kgf/cm ²)
σ_B	: コンクリート圧縮強度

(7) 開口部せん断強度 (韌性保証型指針式)

$$V_{u0} = b_e \cdot j_{ew} \cdot p_{ws} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi_s \quad (4-11)$$

ここで、

V_{u0}	: 開口部せん断強度
b_e	: トラス機構に関与する断面の有効幅
j_{ew}	: $=j_e - H/\cos\phi_s - G \cdot \tan\phi_s$
j_e	: トラス機構に関与する断面の有効せい
H	: 孔の直径
G	: 孔の両脇の肋筋の間隔 (200mm)
p_{ws}	: 孔の両脇の肋筋比
σ_{wy}	: 孔の両脇の肋筋の降伏強度
ϕ_s	: トラス機構のコンクリート圧縮束の角度 $\cot \phi_s = \sqrt{\nu \cdot \sigma_B / (p_{ws} \cdot \sigma_{wy}) - 1.0}$
ν	: $\nu_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$ (σ_B の単位は kgf/cm ²)
σ_B	: コンクリート圧縮強度

各試験体の強度計算値および最大荷重実験値の一覧を表 4-1 に示す。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。また、実験値は正負加力での最大荷重の大きい値を用いている。

一般部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 1.11 (H2), 1.07 (H3), 30MPa シリーズの試験体ではそれぞれ 1.14 (H7), 1.07 (H3) 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 1.04, 30MPa シリーズの試験体で 1.06 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、各式とも計算結果が実験結果の破壊形式とほぼ一致した。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 1.30～1.45、30MPa シリーズの試験体では 1.35～1.54 であった。また、終局強度型指針式および韌性保証型指針式による計算値と比較すると、18MPa シリーズの試験体では 1.96～2.41、30MPa シリーズの試験体では 1.76～2.01 であった。

表 4-1 最大荷重と計算値との比較

試験体 (破壊部位 実験結果)	実験値 最大 荷重 (kN) eQ_{max}	せん断強度計算値 (kN)					実験値／計算値			
		部位	$cQ_{su,min}$ $cQ_{su0,min}$	$cQ_{su,mean}$ $cQ_{su0,mean}$	$cQ_{su,A}$ $cQ_{su0,A}$	V_u V_{u0}	eQ_{max} / min $\{cQ_{su,min},$ $cQ_{su0,min}\}$	eQ_{max} / min $\{cQ_{su,mean},$ $cQ_{su0,mean}\}$	eQ_{max} / min $\{cQ_{su,A},$ $cQ_{su0,A}\}$	eQ_{max} / min $\{V_u,$ $V_{u0}\}$
H1 (一般部)	184	一般部	125	141	183	195	1.47	1.30	2.16	1.96
		開口部	150	163	85	94				
H2 (一般部)	205	一般部	125	141	183	195	1.64	1.45	2.41	2.18
		開口部	150	163	85	94				
H3 (一般部)	196	一般部	125	141	183	195	1.57	1.39	2.30	2.09
		開口部	150	163	85	94				
H11 (開口部)	246	一般部	171	187	332	292	1.63	1.49	2.59	2.44
		開口部	151	165	95	101				
H4 (開口部)	168	一般部	125	141	183	195	1.34	1.19	8.84	2.90
		開口部	133	142	19	58				
H5 (開口部)	164	一般部	125	141	183	195	1.31	1.16	8.63	2.83
		開口部	133	142	19	58				
H6 (一般部)	215	一般部	139	159	213	222	1.55	1.35	1.76	1.76
		開口部	162	178	122	122				
H7 (一般部)	245	一般部	139	159	213	222	1.76	1.54	2.01	2.01
		開口部	162	178	122	122				
H8 (一般部)	231	一般部	139	159	213	222	1.66	1.45	1.89	1.89
		開口部	162	178	122	122				
H12 (開口部)	304	一般部	188	209	402	360	1.84	1.67	2.29	2.55
		開口部	165	182	133	119				
H9 (開口部)	206	一般部	139	159	213	222	1.48	1.35	4.47	2.75
		開口部	141	152	46	75				
H10 (開口部)	199	一般部	139	159	213	222	1.43	1.31	4.32	2.65
		開口部	141	152	46	75				

* 計算に用いた材料の特性は、材料試験結果に基づく
曲げ強度計算値 $cQ_{mu}=304\text{kN}$

開口部破壊型試験体の開口部せん断強度について、上記で述べた計算式に加え、文献^[6]による式（以下、平瀬らによる式）を用いて算出した。

(8) 開口部せん断強度 (平瀬らの式)

$$Q_{su1} = 2b \left[d' p_o \sigma_{oy} \cot\phi + \{v_0 \sigma_B - (1 + \cot^2 \phi) p_o \sigma_{oy}\} \frac{D'}{2} \tan\theta \right] \quad (4-12)$$

ここで、

Q_{su1} : 開口部せん断強度

b : 梁幅

σ_B : コンクリート圧縮強度

H : 孔の直径

v_0 : コンクリート強度の有効係数 ($v_0 = 3.68 \times (10\sigma_B)^{-0.333}$)

D : 部分梁せい ($= (D - H)/2$)

θ : 部分梁のアーチ角度 ($\tan\theta = \frac{\sqrt{L'^2 + D'^2} - L'}{D'}$)

L' : 部分梁のスパン ($= D/2$)

d' : 部分梁の有効せい

d_c : かぶり厚

$p_o \sigma_{oy}$: 開口部ひび割れを横切る横補強筋量 ($= k \sum_i \left(\frac{a_i}{bL'} \sigma_{iy} \sin\alpha_i \right)$)

k : 置換係数

a_i : 補強筋の断面積

σ_{iy} : 補強筋の降伏強度

α_i : 補強筋が材軸となす角度

σ_{wy} : 孔の両脇の肋筋の降伏強度

ϕ : 部分梁のトラス角度

$$\cot\phi = \sqrt{v_0 \cdot \sigma_B / p_o \sigma_{oy} - 1.0}$$

開口部破壊型試験体の開口部せん断強度計算値および実験値最大荷重を表 4-2 に示す。

修正広沢 min, mean 式において、いずれの試験体においても安全側に評価できており、実験値と計算値の比は 1.15~1.84 となった。孔径 $H/D=1/3$ の場合より $H/D=1/5$ の場合に過小評価する傾向がある。修正広沢式を用いて計算を行う際に開口部に近い 2 本分の補強筋を考慮しているが、実際の試験体では開口部接線方向ひび割れがそれぞれ大きく梁端側へと進展しており、一般部に設けた肋筋による耐力上昇の影響があると考えられる。

韌性保証型指針式では、いずれの試験体においても実験値と計算値の比は 2.44~2.90 と、実験値を過小評価している。

平瀬らの式において、いずれの試験体においても精度良く評価できており、実験値と計算値の比は、0.98~1.09 となった。

表 4-2 最大荷重と開口部計算値の比較

試験体	実験値 最大 荷重 (kN) eQ_{max}	開口部せん断強度計算値 (kN)				実験値／計算値			
		$cQ_{su0,min}$	$cQ_{su0,mean}$	V_{u0}	Q_{su1}	$\frac{eQ_{max}}{cQ_{su0,min}}$	$\frac{eQ_{max}}{cQ_{su0,mean}}$	$\frac{eQ_{max}}{V_{u0}}$	$\frac{eQ_{max}}{Q_{su1}}$
H11	246	151	165	101	228	1.63	1.49	2.44	1.08
H4	168	133	142	58	167	1.26	1.18	2.90	1.01
H5	164	133	142	58	167	1.23	1.15	2.83	0.98
H12	304	165	182	119	279	1.84	1.67	2.55	1.09
H9	206	141	152	75	198	1.46	1.36	2.75	1.04
H10	199	141	152	75	198	1.41	1.31	2.65	1.01

4.3 主筋および補強筋の歪

各試験体のせん断力ー主筋歪関係を、図 4-5～図 4-16 に示す。一般部破壊型の試験体では危険断面における明確な降伏はみられなかつたが、開口部破壊型の試験体では、せん断力の大きい試験体の一部で一段目の主筋において降伏が見られた。

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、および孔周囲補強筋のせん断力ー歪関係を、図 4-17～図 4-28 に示す。

孔径 $H/D=1/5$ の一般部破壊型試験体の肋筋は、概ね 1/100rad. 加力サイクルにおいて、端部から 2 番目の位置で降伏している。

孔径 $H/D=1/3$ の開口部破壊型試験体の肋筋は、孔周囲補強筋タイプ HA では孔際で降伏がみられるが、タイプ HB では歪はあまり大きくなかった。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。孔周囲補強筋では、明確な降伏は見られなかつた。

孔径 $H/D=1/5$ の開口部破壊型の試験体では最大荷重を迎えた 1/50rad. 加力サイクルにおいて、孔際の肋筋と開口上部のキャップタイの降伏が見られた。孔周囲補強筋では、明確な降伏は見られなかつた。

各試験体最大荷重時の孔周囲の肋筋と孔周囲補強筋の歪の一覧を、表 4-3 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つた。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。一般部せん断破壊した試験体について、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。開口部破壊型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つた。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 0.81 となつた。

表 4-3 最大荷重時の孔周囲肋筋と補強筋の歪

試験体	加力 方向	孔周囲肋筋の歪 (μ)			孔周囲補強筋の歪 (μ)			孔周囲 補強筋 ／肋筋	破壊 部位
		左側	右側	平均	左端	右端	平均		
H1	正	2187	1432	1809	—	—	—	—	一般部
	負	2420	2303	2362	—	—	—	—	
H2	正	1444	3097	2270	1002	1127	1064	0.47	一般部
	負	1817	4059	2938	1385	1027	1206	0.41	
H3	正	1393	1640	1517	1227	1607	1417	0.93	一般部
	負	1529	1389	1459	1249	1449	1349	0.92	
H4	正	1564	1660	1612	969	1660	1314	0.82	開口部
	負	1230	1040	1135	1313	828	1071	0.94	
H5	正	1446	1698	1572	1284	1421	1353	0.86	開口部
	負	1395	1015	1205	1036	1060	1048	0.87	
H11	正	1832	1330	1581	870	1631	1251	0.79	開口部
	負	990	1310	1150	1177	845	1011	0.88	
H6	正	1733	1609	1671	—	—	—	—	一般部
	負	2432	1514	1973	—	—	—	—	
H7	正	1461	1474	1467	1222	1113	1167	0.80	一般部
	負	1893	1705	1799	1472	1164	1318	0.73	
H8	正	1266	1923	1595	1118	1887	1502	0.94	一般部
	負	1832	1498	1665	1609	1618	1613	0.97	
H9	正	1862	1988	1925	1210	1930	1570	0.82	開口部
	負	2064	1967	2015	1494	549	1021	0.51	
H10	正	1418	1359	1389	1207	1588	1397	1.01	開口部
	負	768	928	848	636	1151	893	1.05	
H12	正	1654	1834	1744	1640	1910	1775	1.02	開口部
	負	1099	1303	1201	1184	1080	1132	0.94	

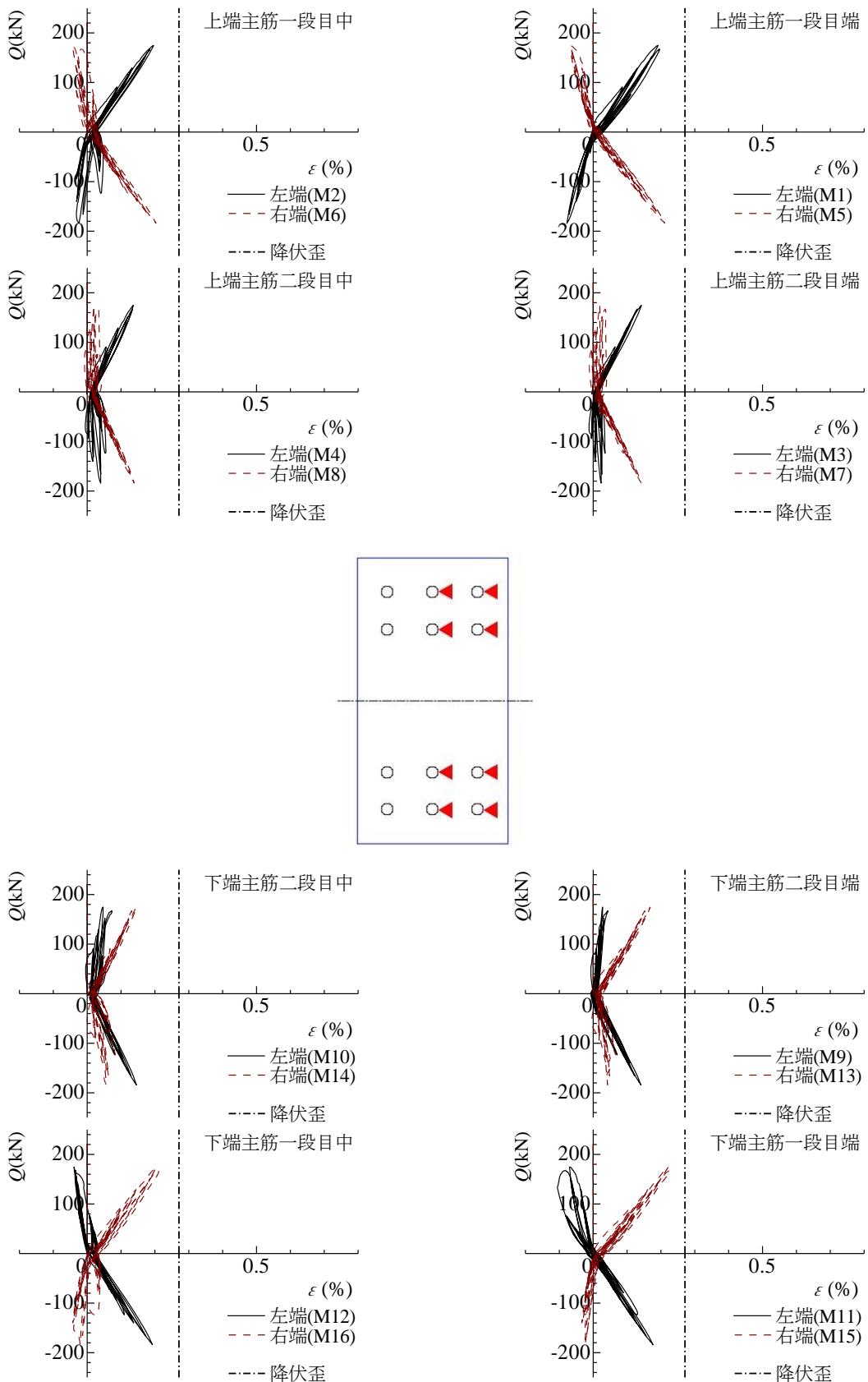


図 4-5 試験体 H1 主筋のせん断力-歪関係

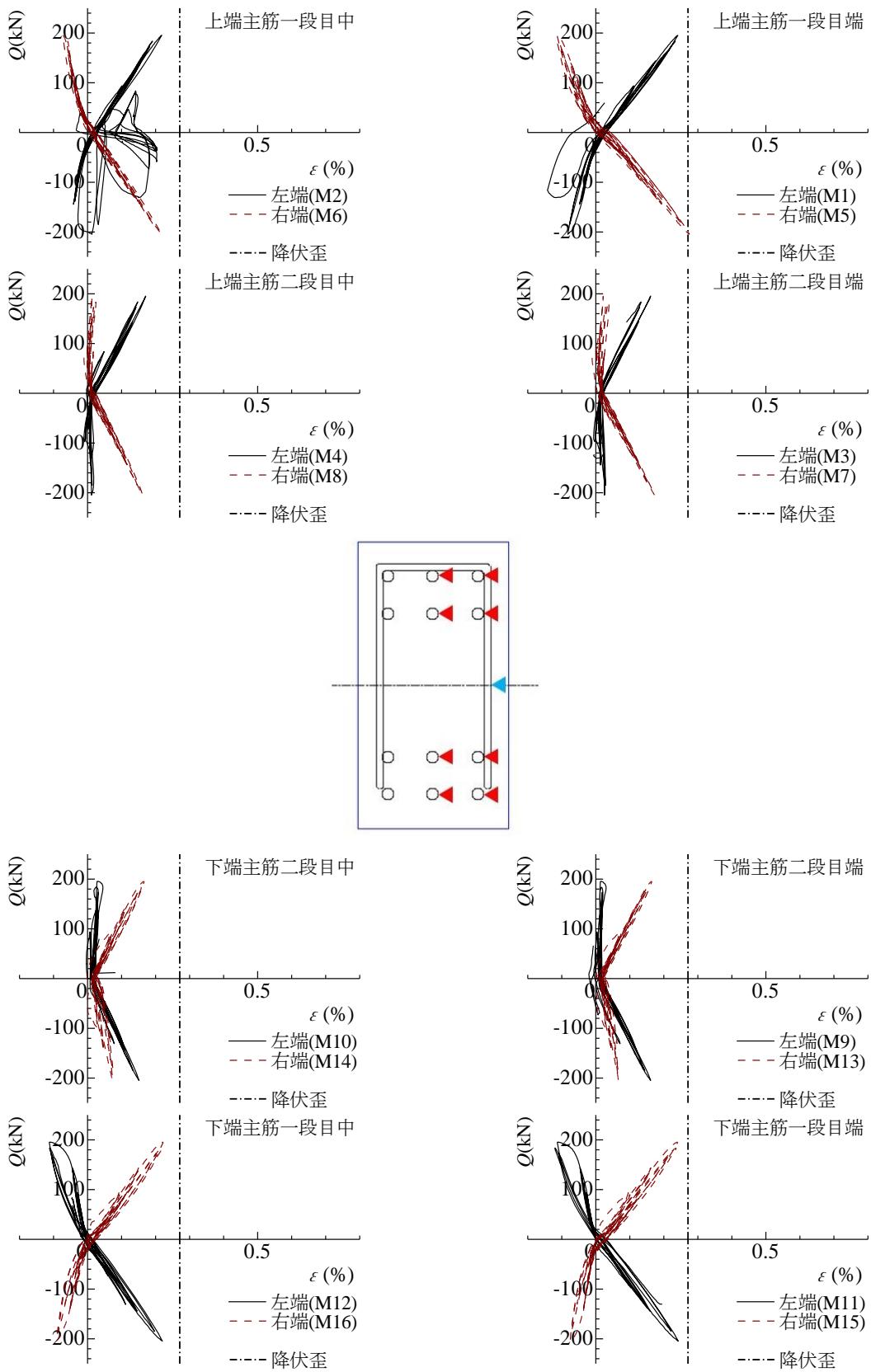


図 4-6 試験体 H2 主筋のせん断力-歪関係

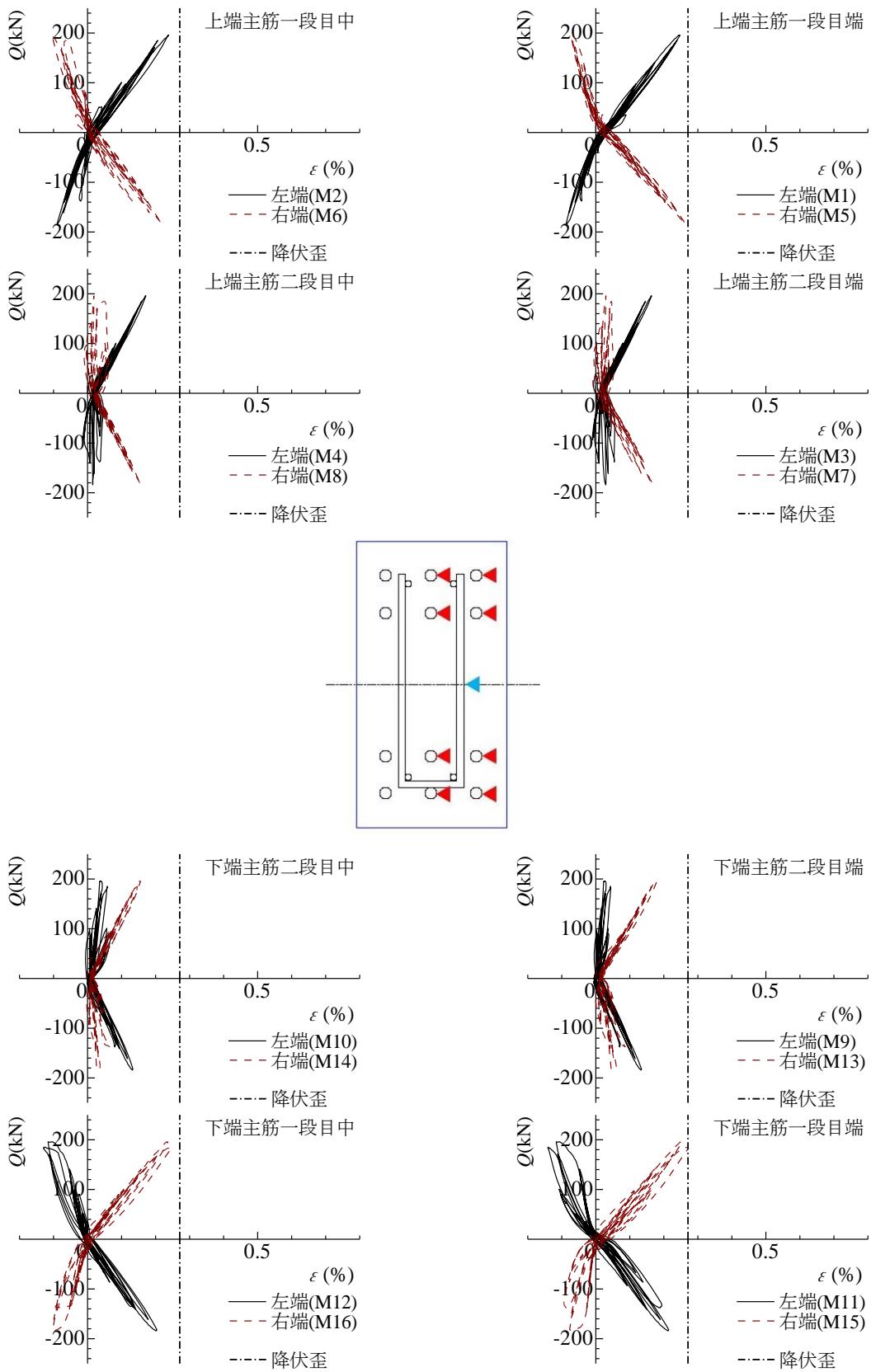


図 4-7 試験体 H3 主筋のせん断力-歪関係

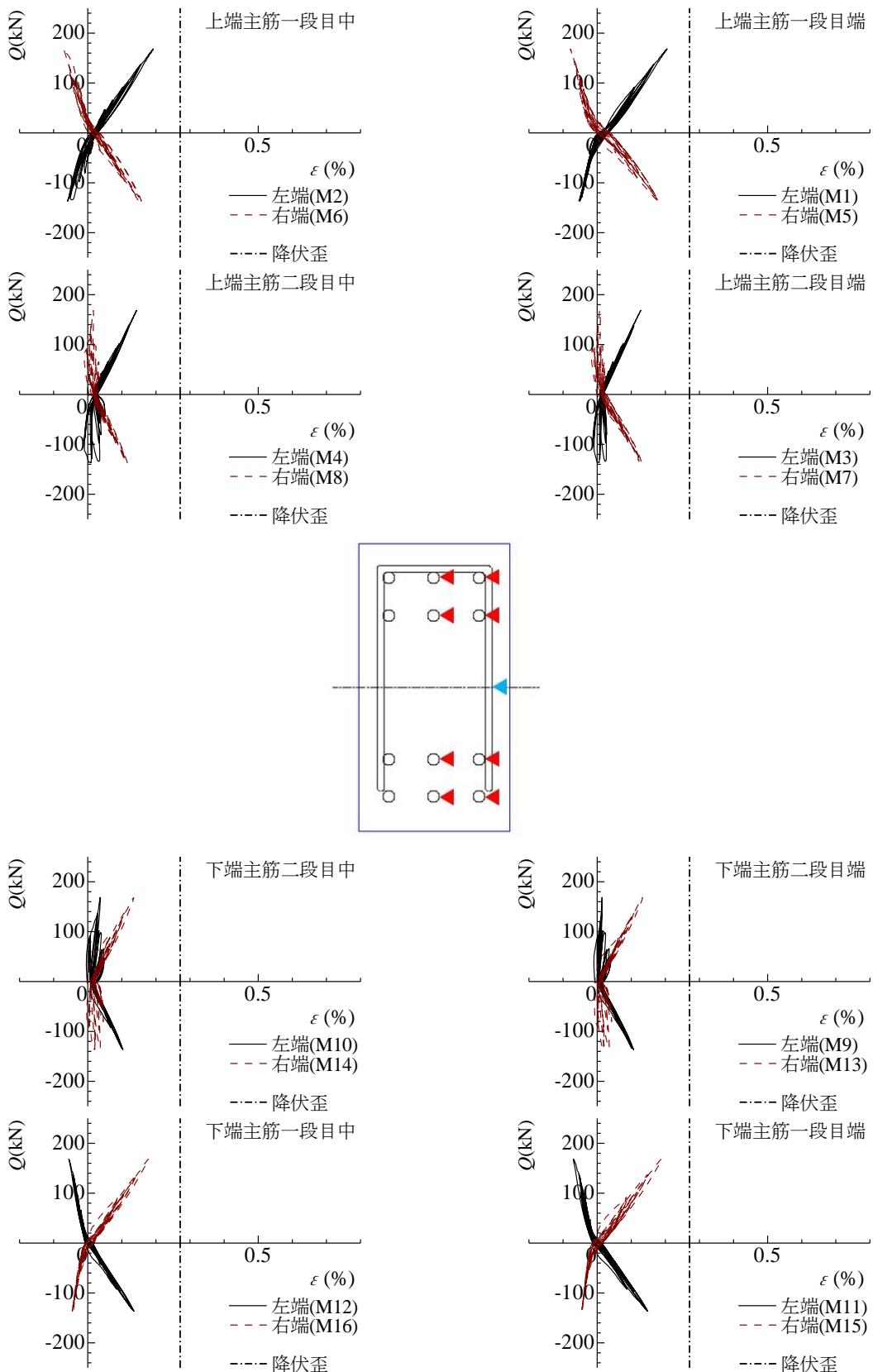


図 4-8 試験体 H4 主筋のせん断力-歪関係

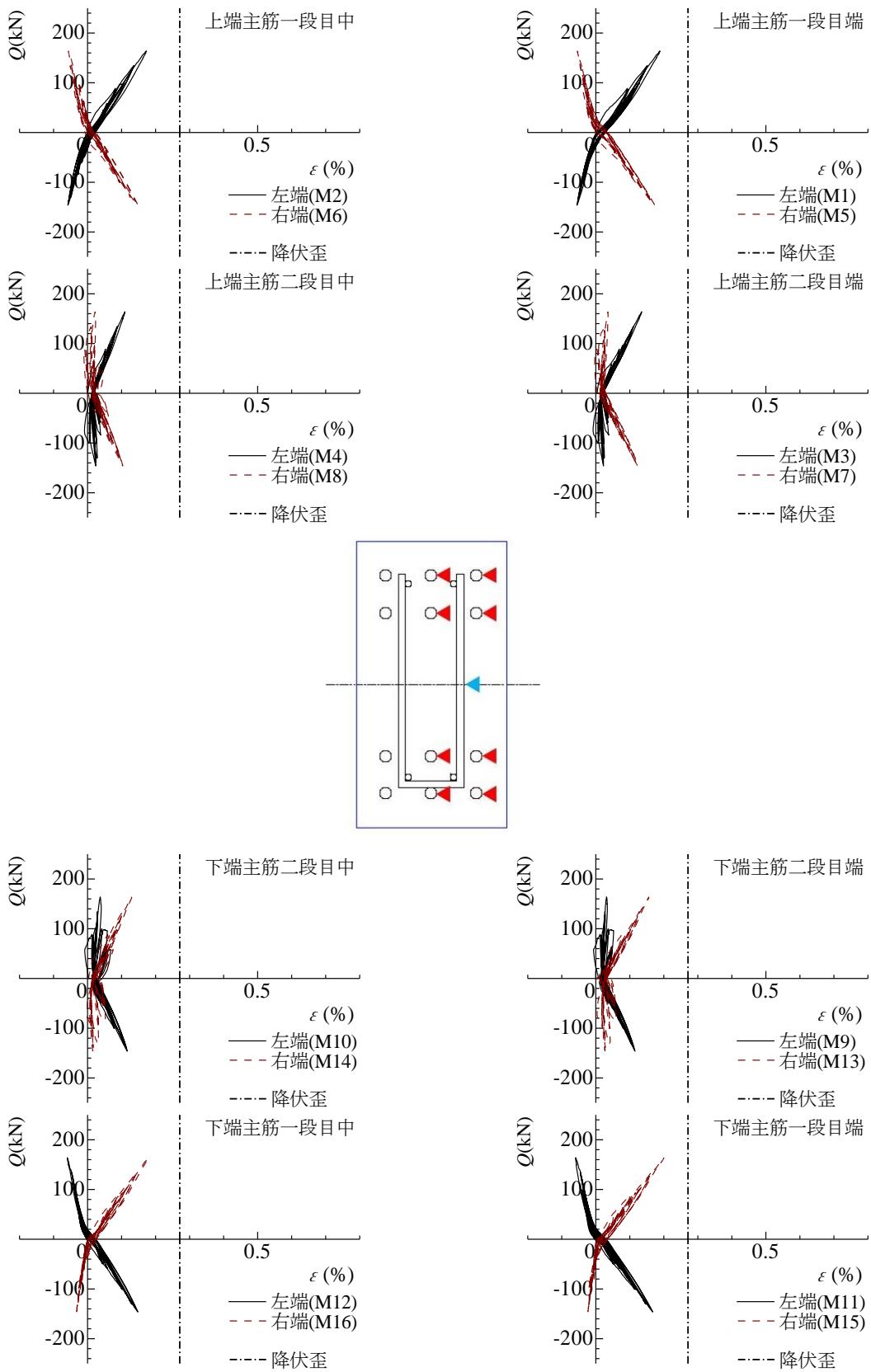


図 4-9 試験体 H5 主筋のせん断力-歪関係

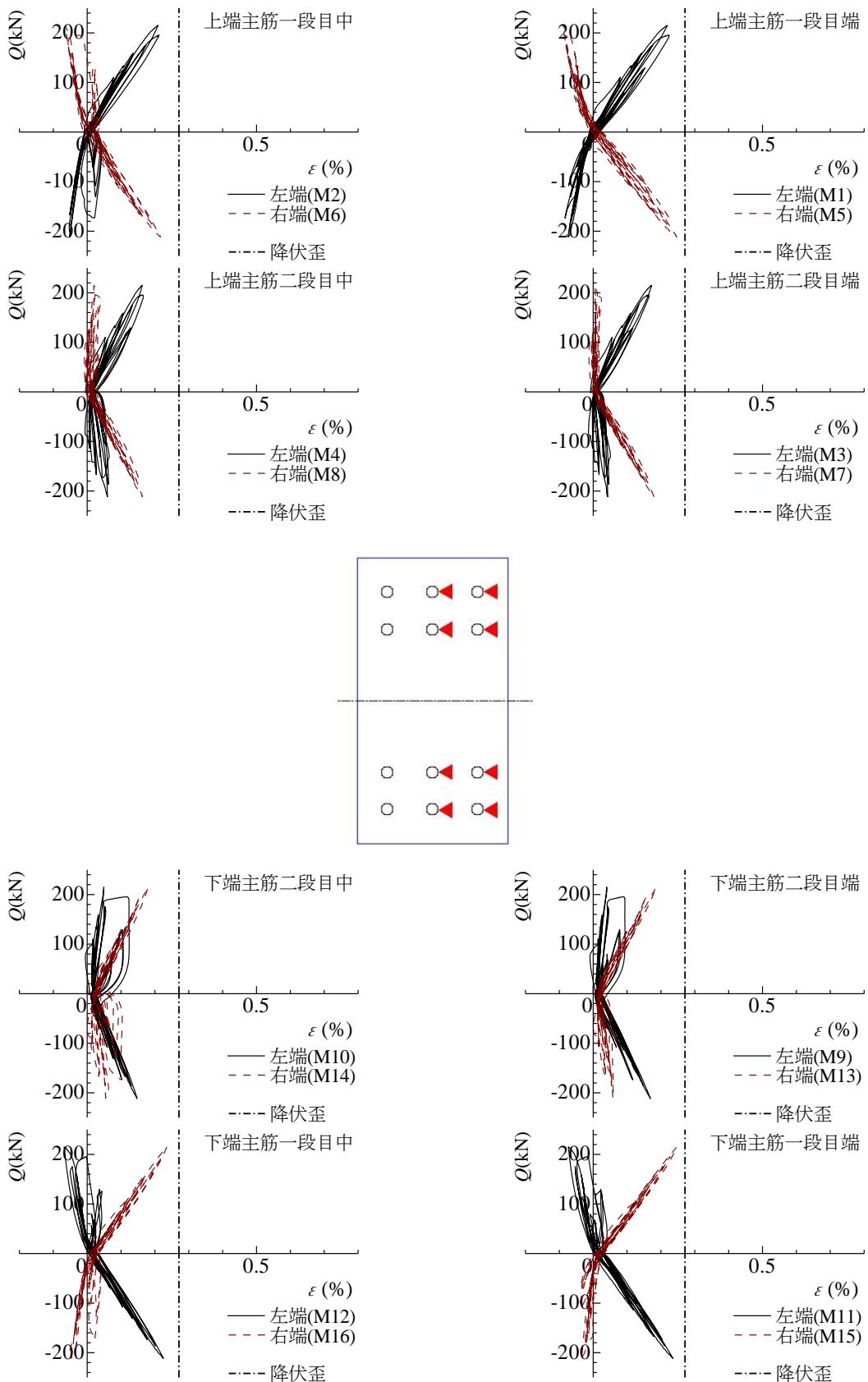


図 4-10 試験体 H6 主筋のせん断力－歪関係

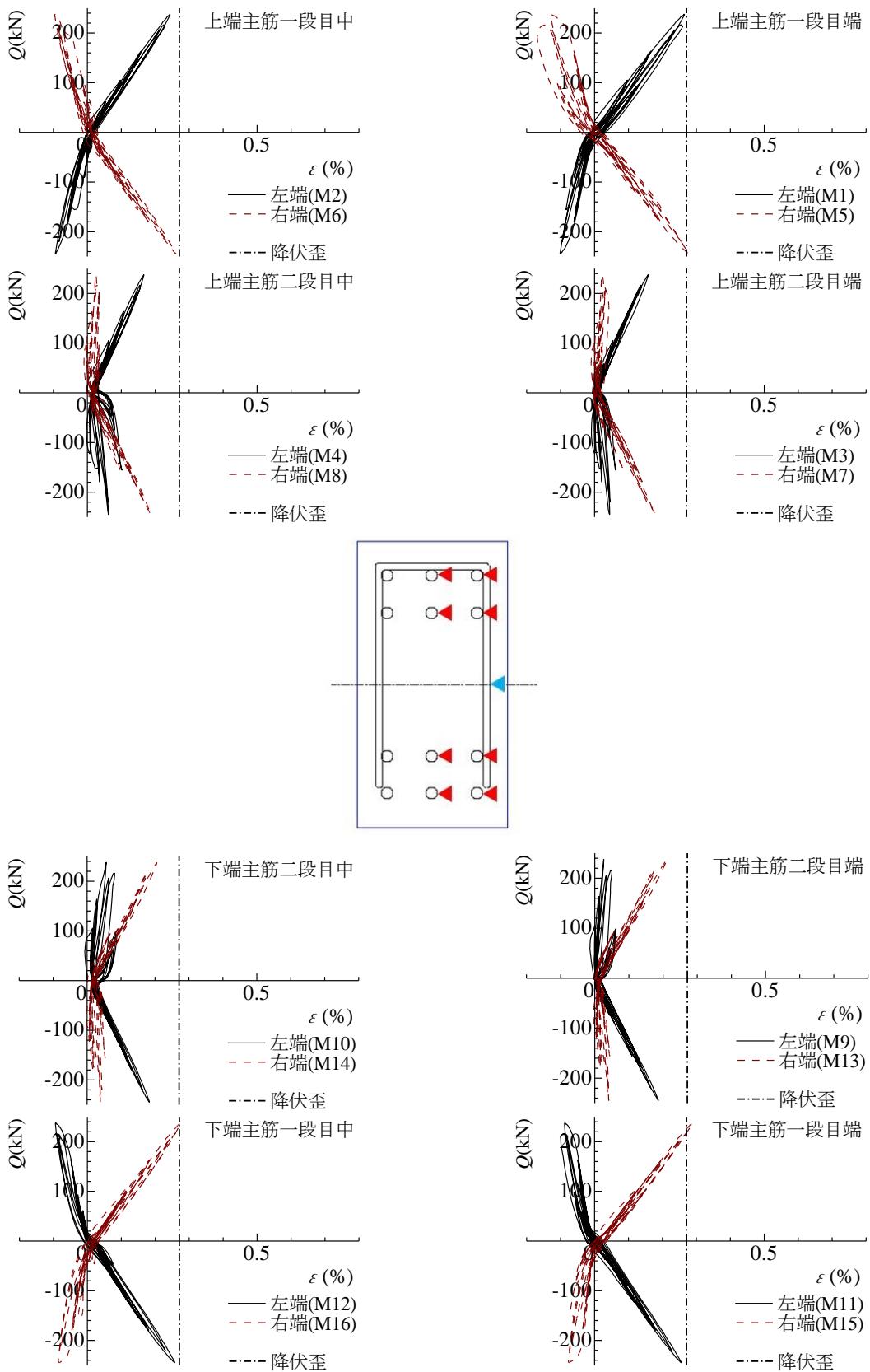


図 4-11 試験体 H7 主筋のせん断力-歪関係

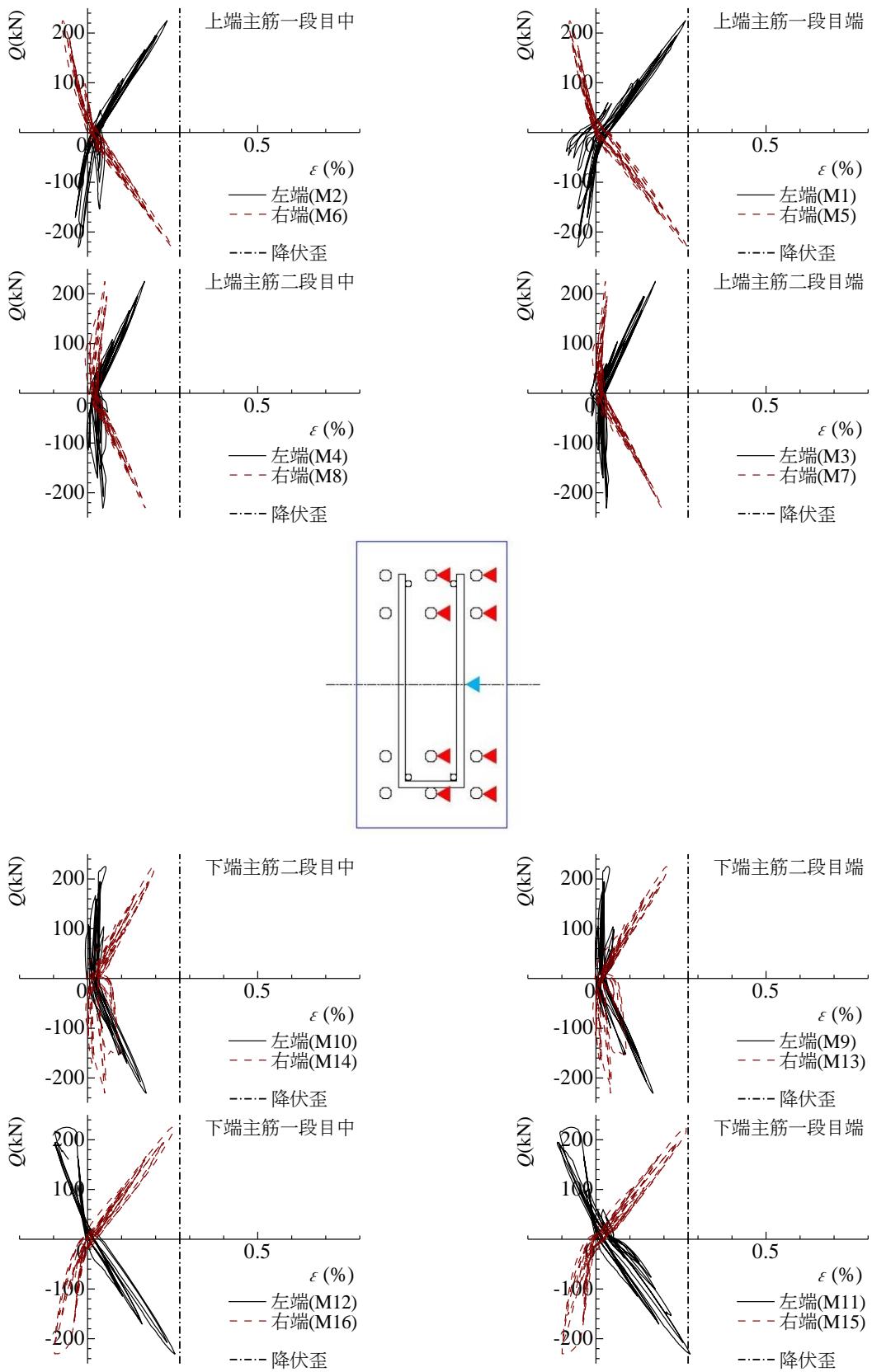


図 4-12 試験体 H8 主筋のせん断力-歪関係

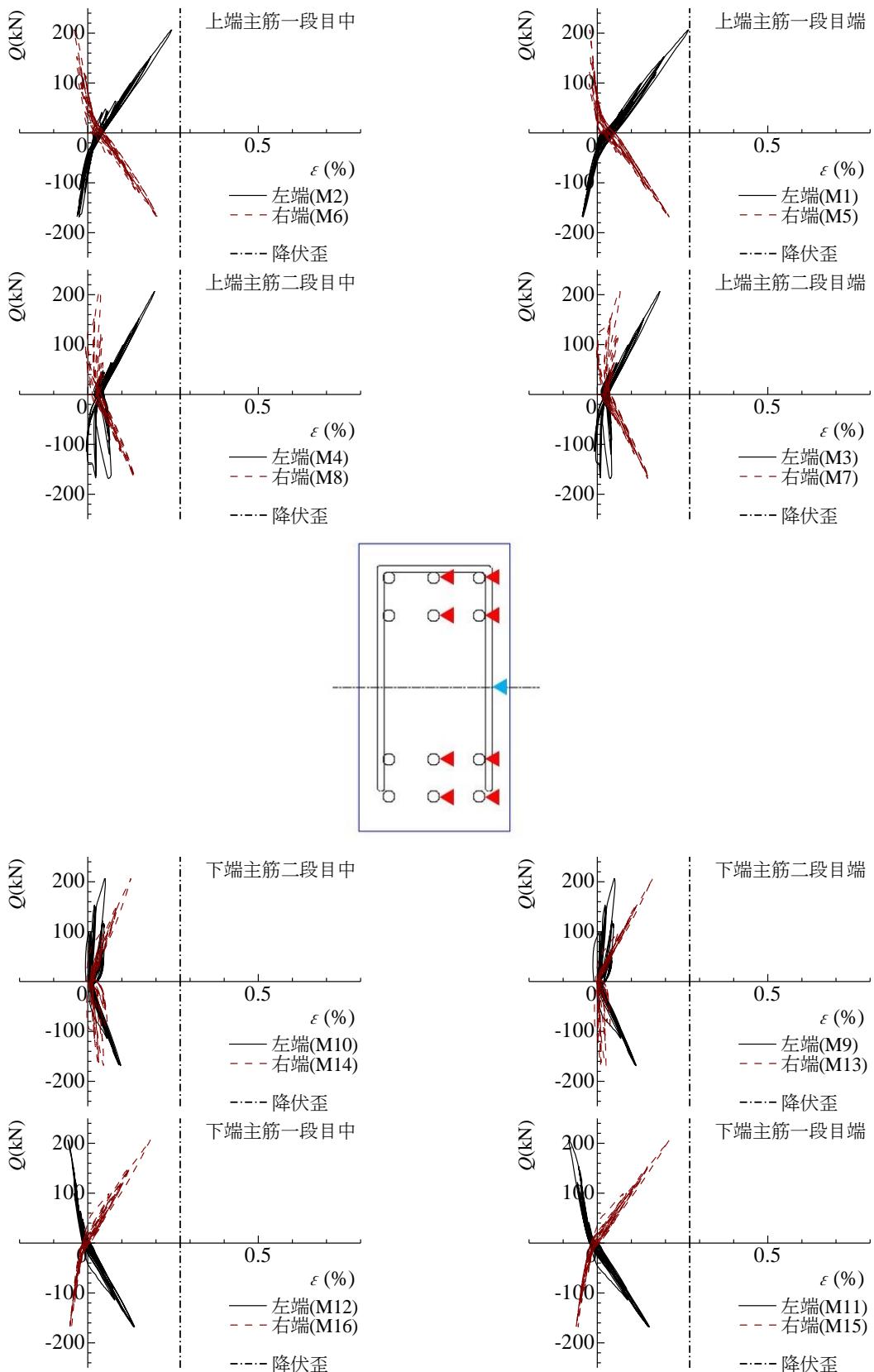


図 4-13 試験体 H9 主筋のせん断力-歪関係

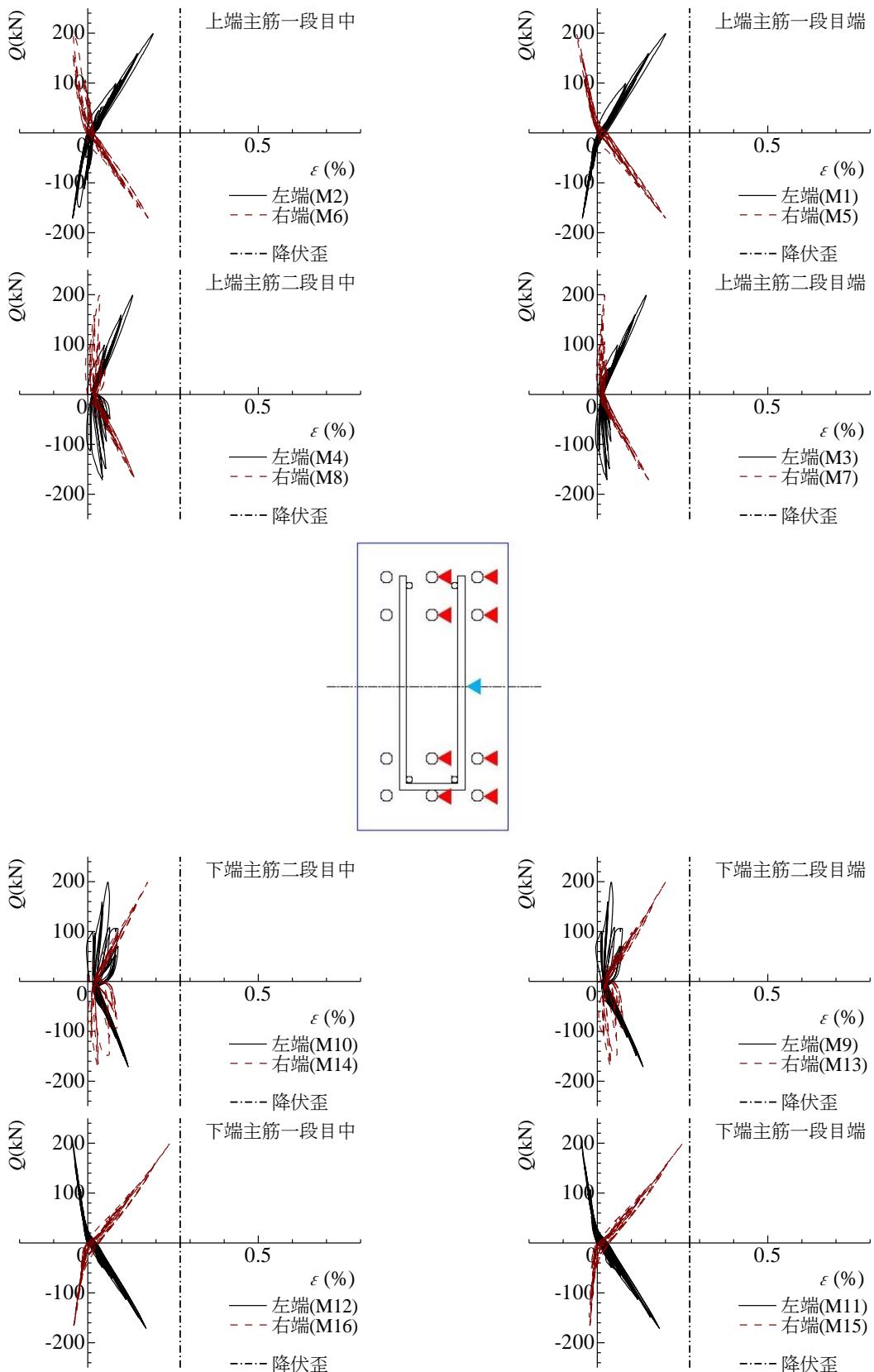


図 4-14 試験体 H10 主筋のせん断力一歪関係

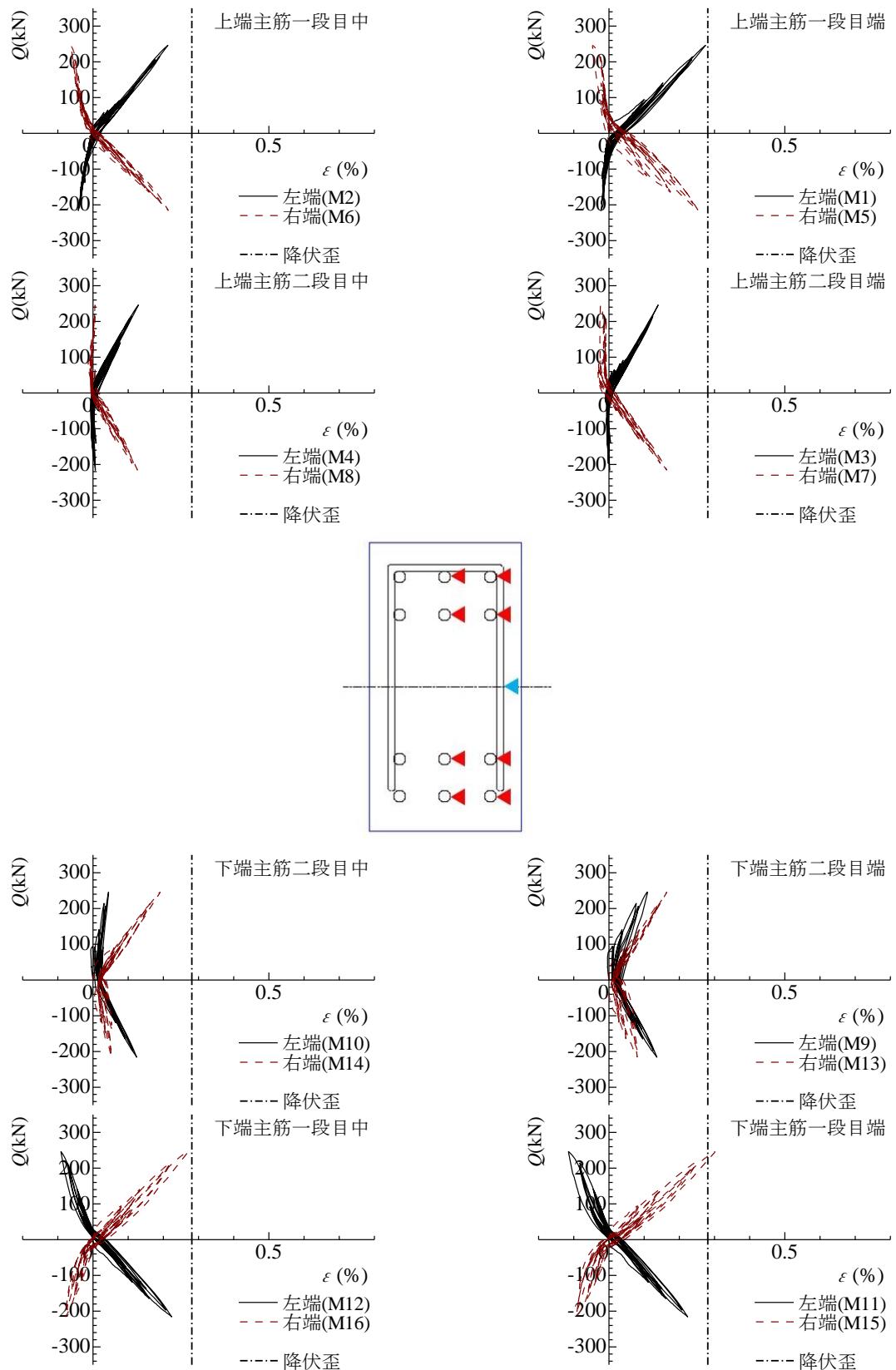


図 4-15 試験体 H11 主筋のせん断力一歪関係

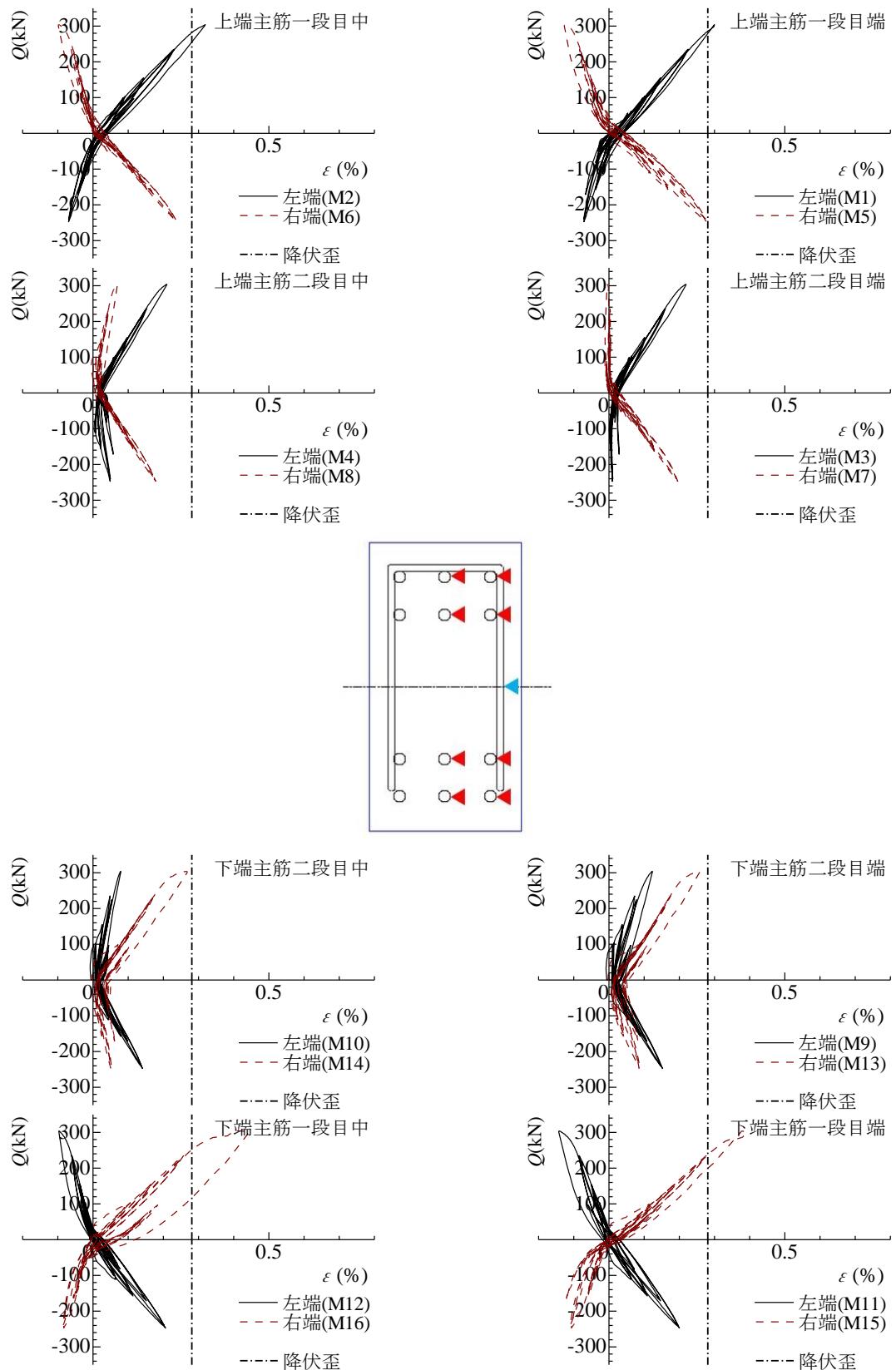


図 4-16 試験体 H12 主筋のせん断力一歪関係

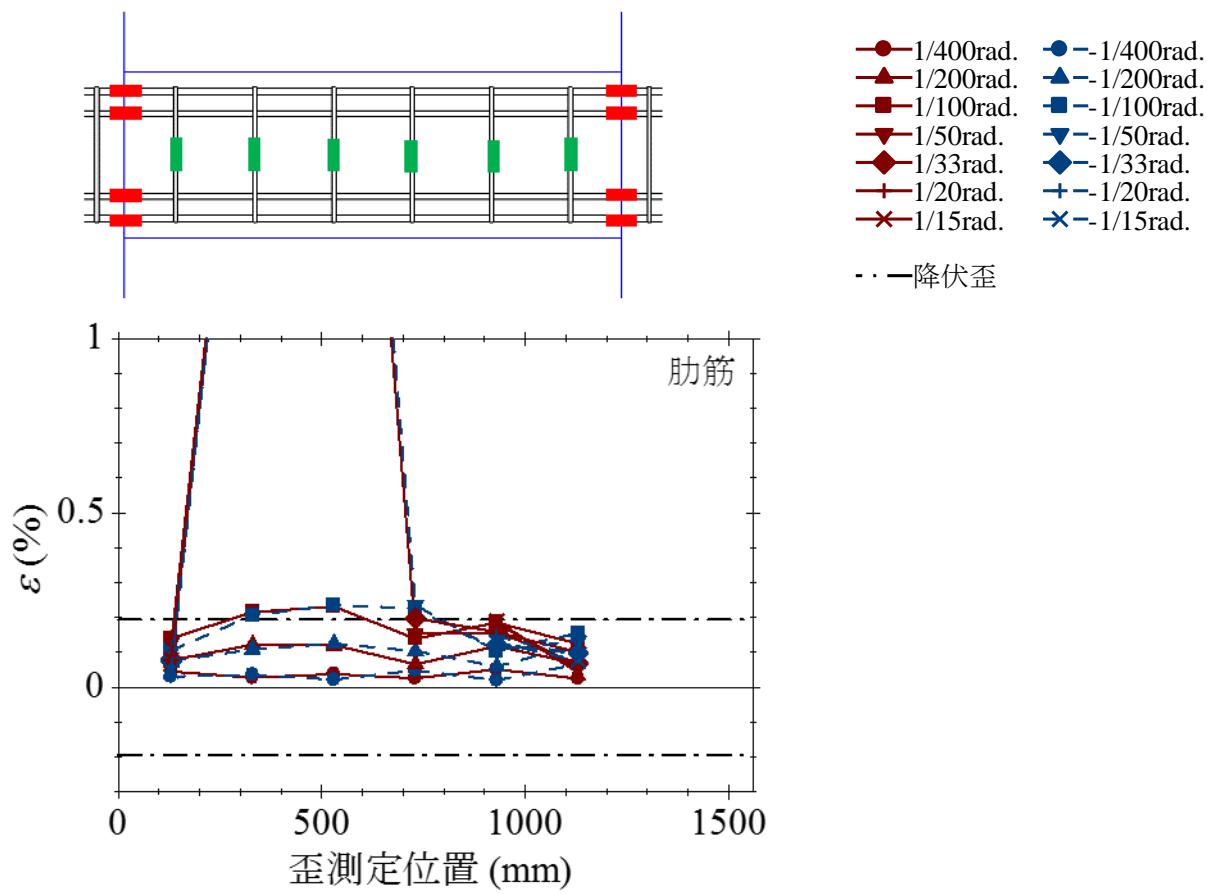


図 4-17 試験体 H1 肋筋の歪

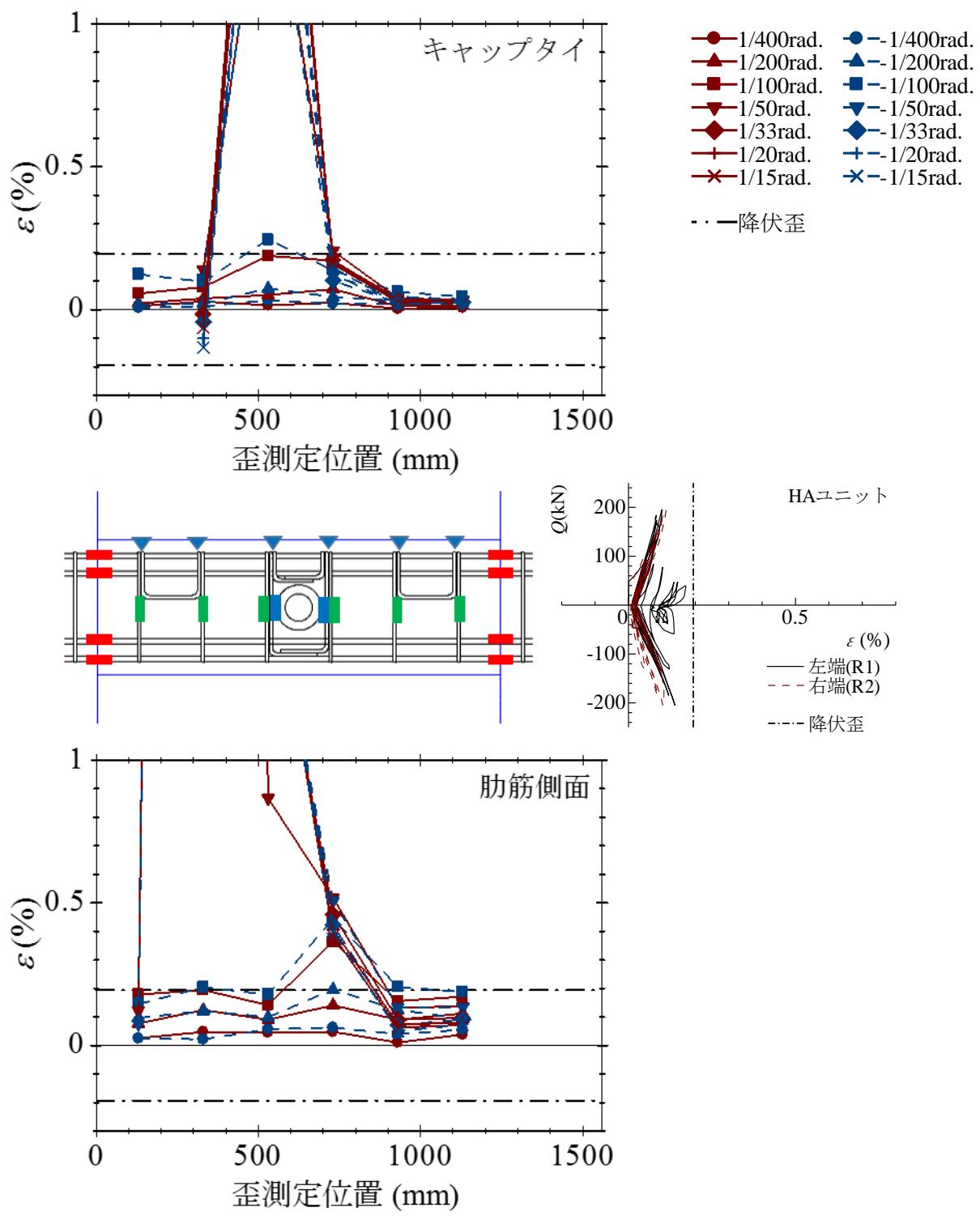


図 4-18 試験体 H2 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

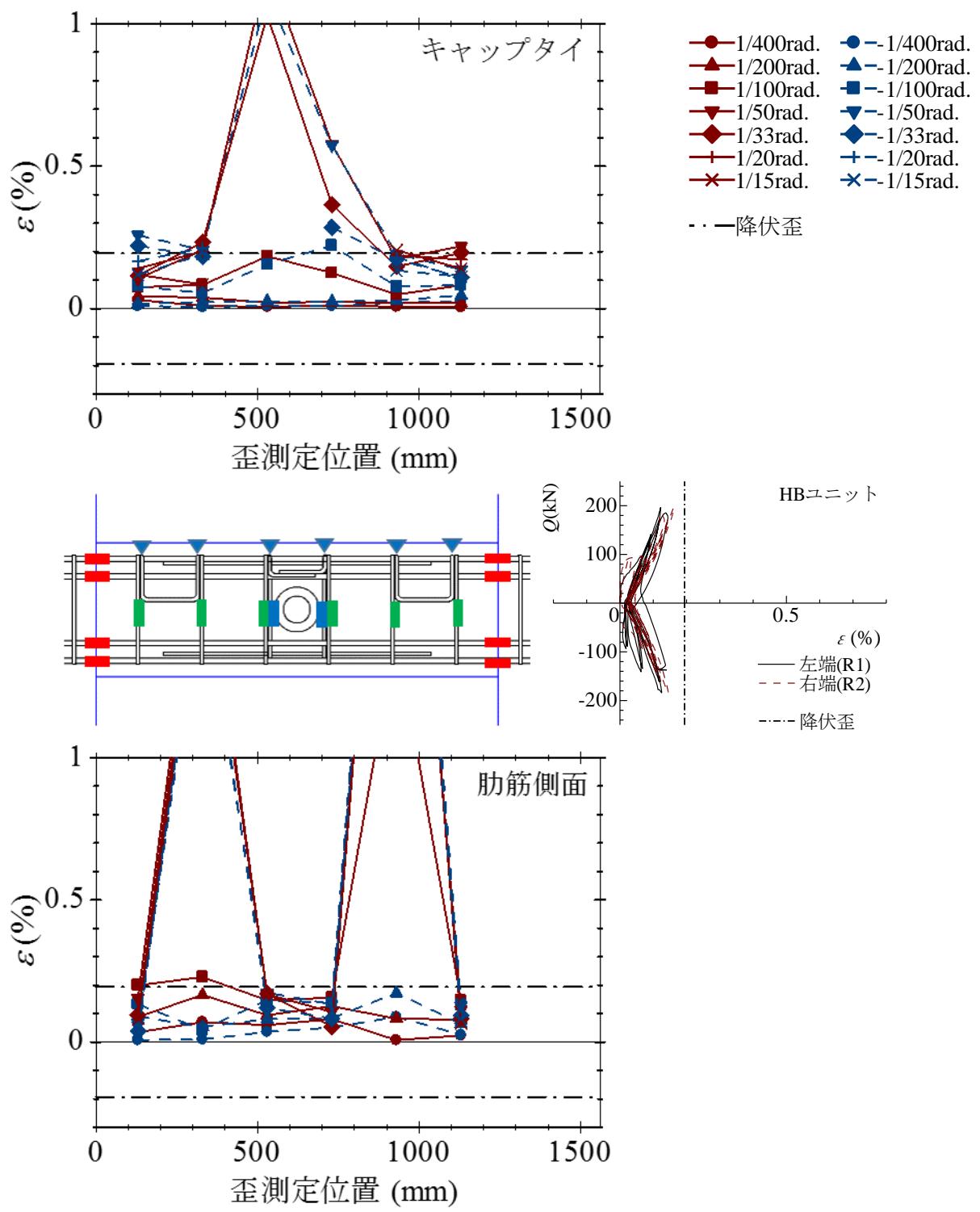


図 4-19 試験体 H3 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

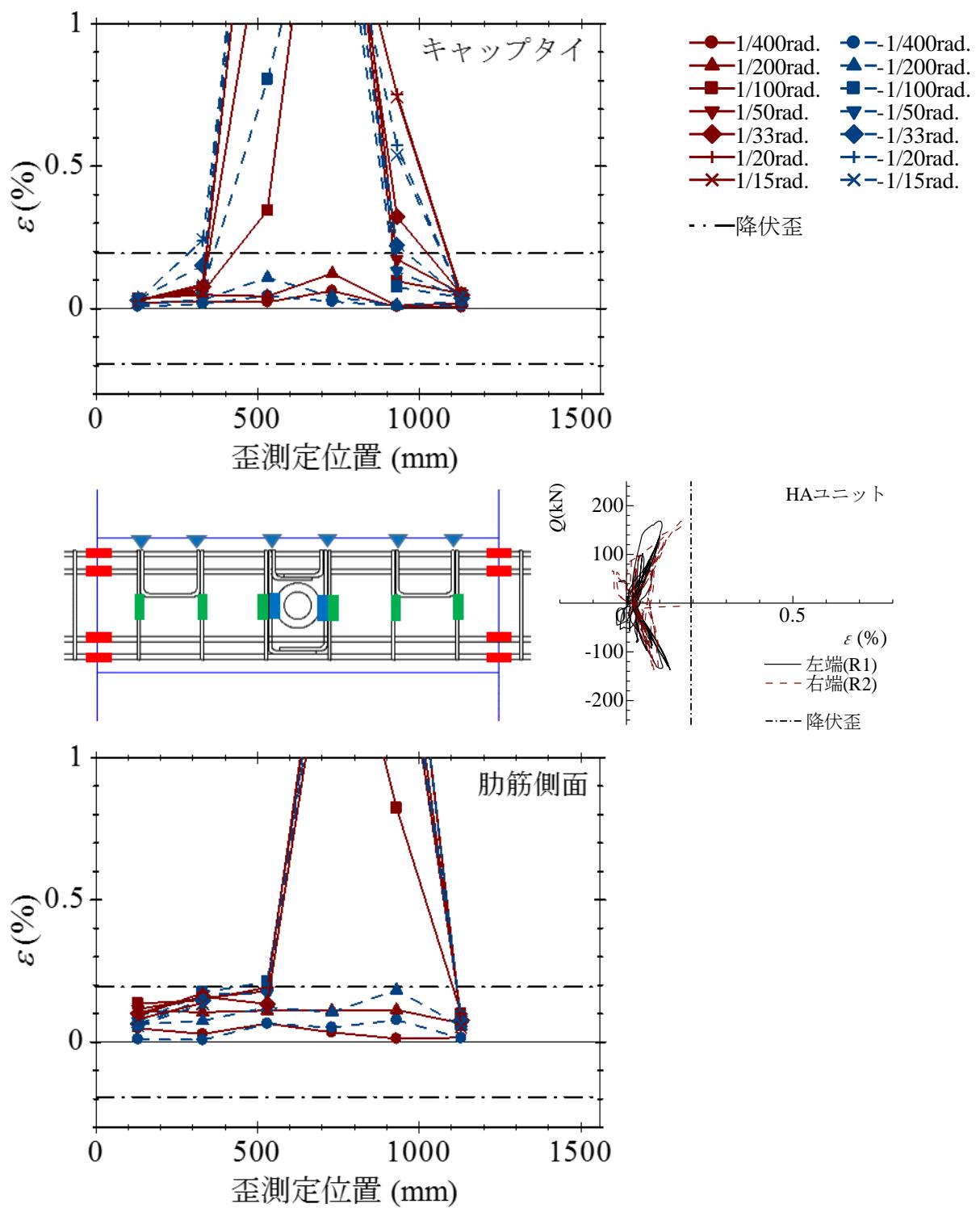


図 4-20 試験体 H4 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

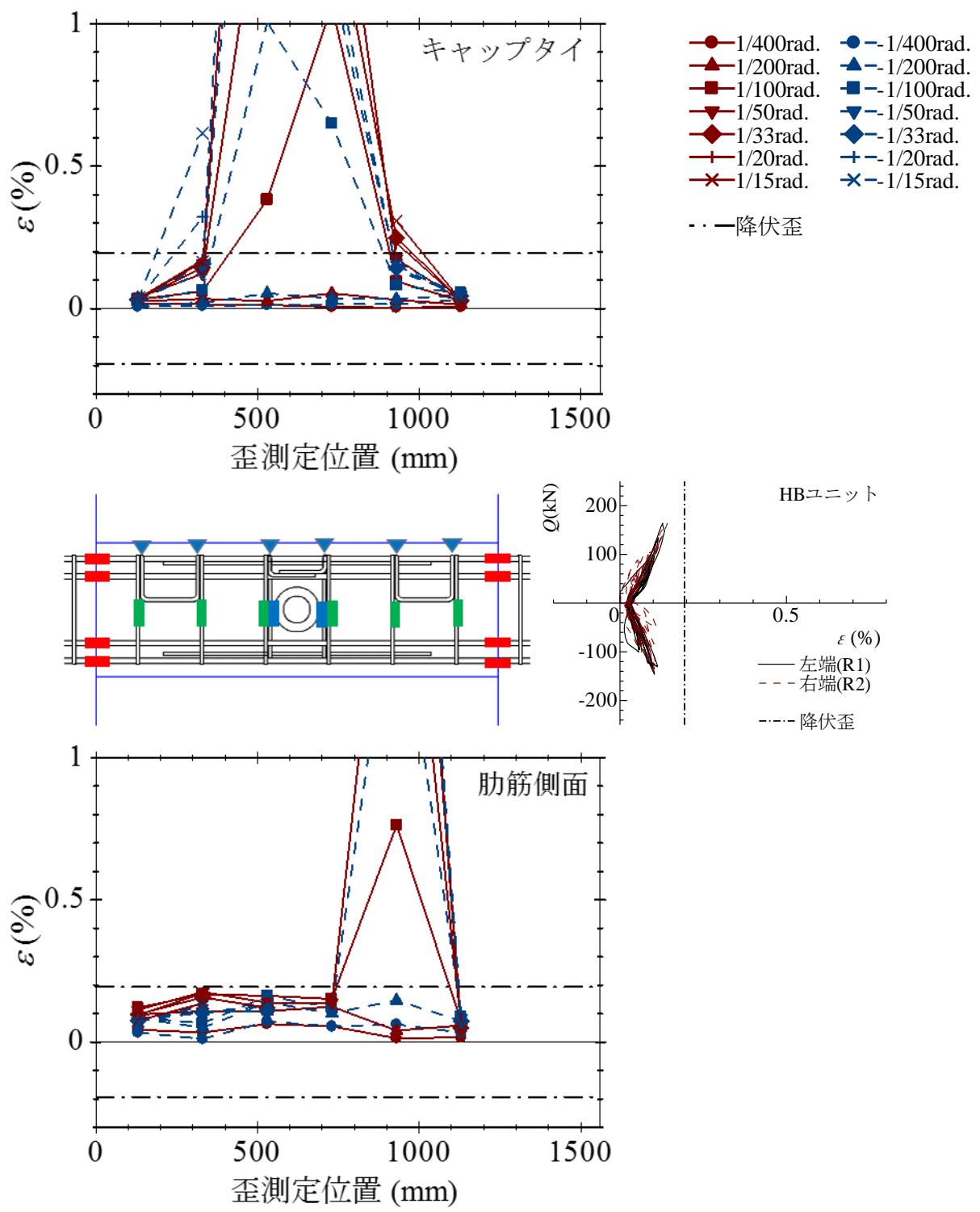


図 4-21 試験体 H4 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

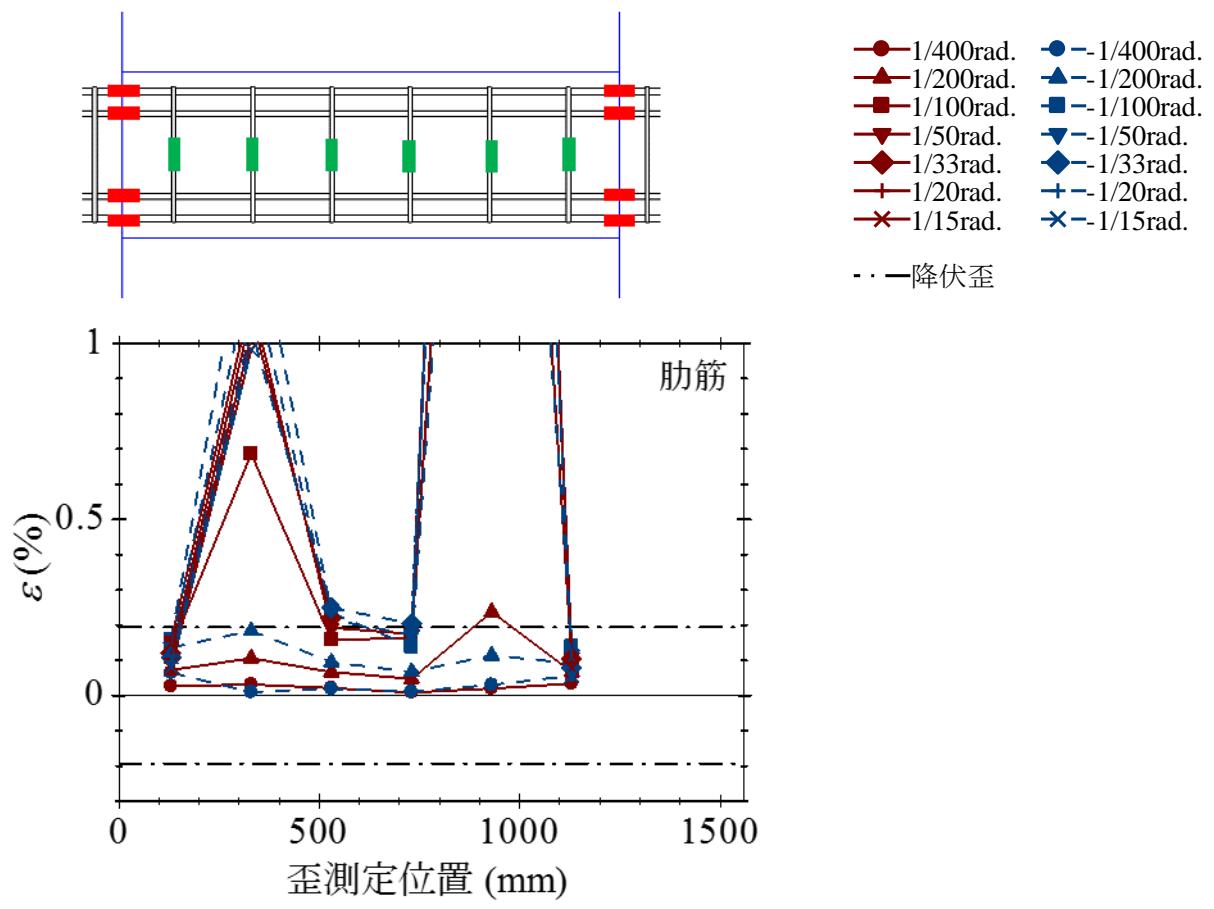


図 4-22 試験体 H6 肋筋の歪

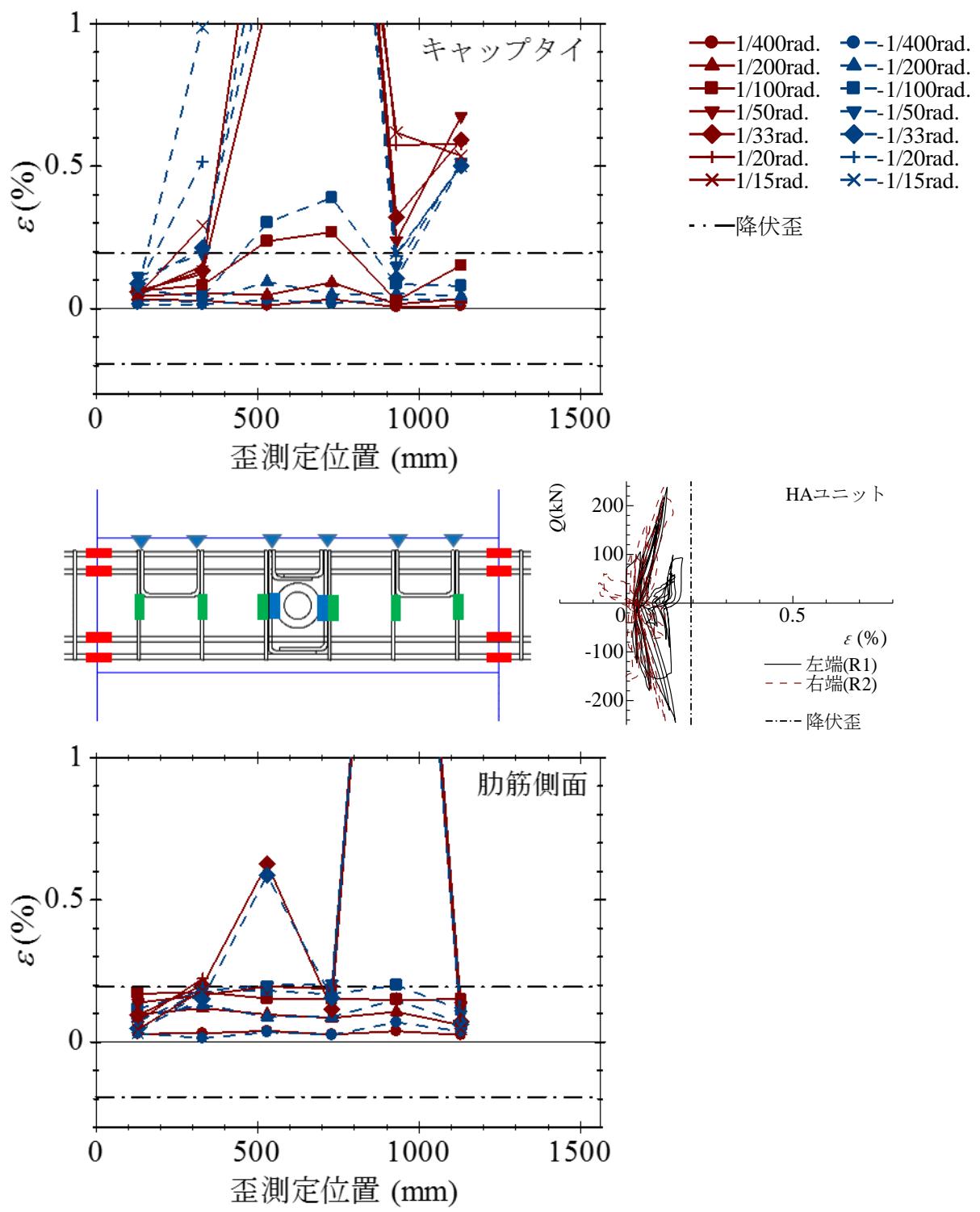


図 4-23 試験体 H7 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

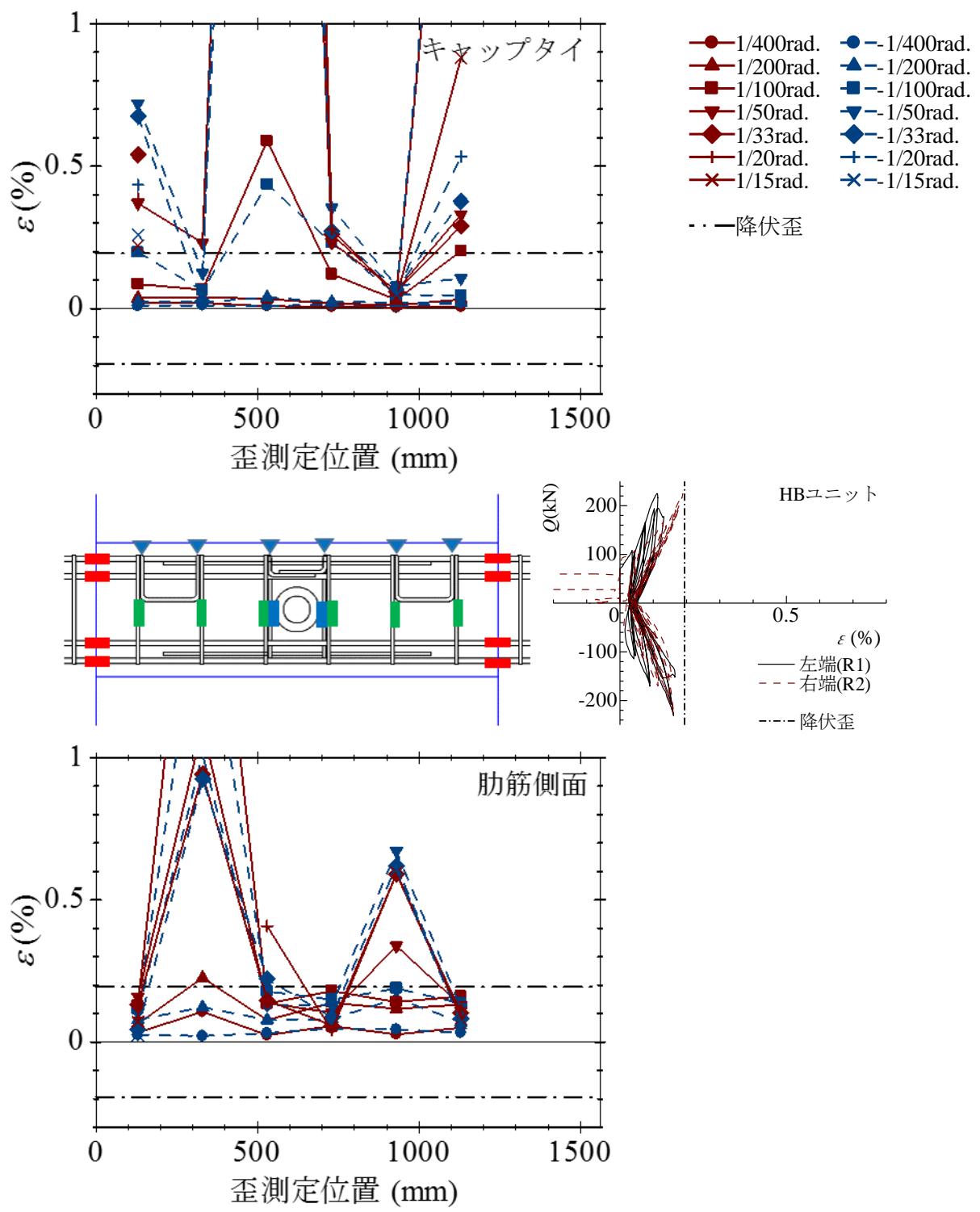


図 4-24 試験体 H8 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

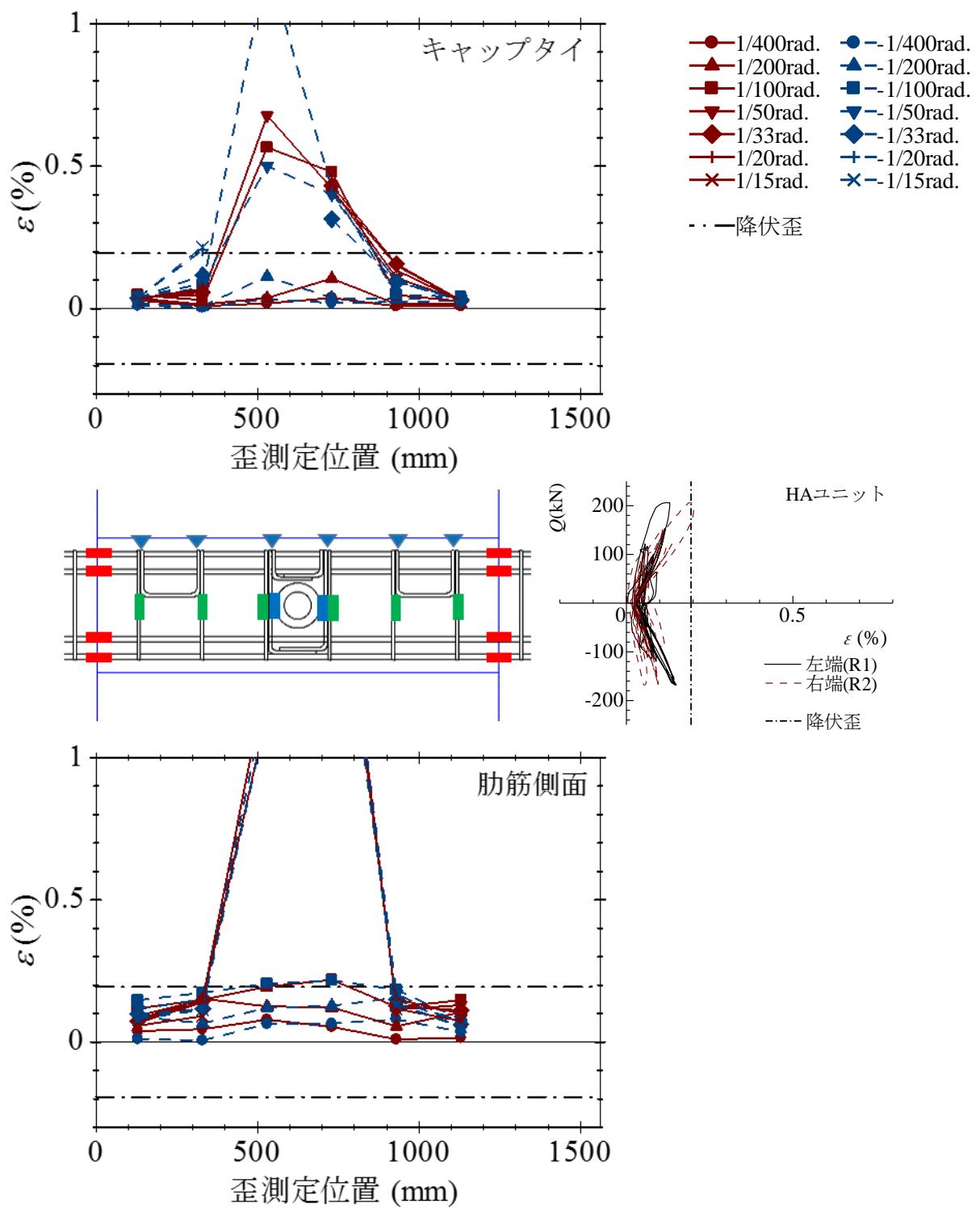


図 4-25 試験体 H9 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

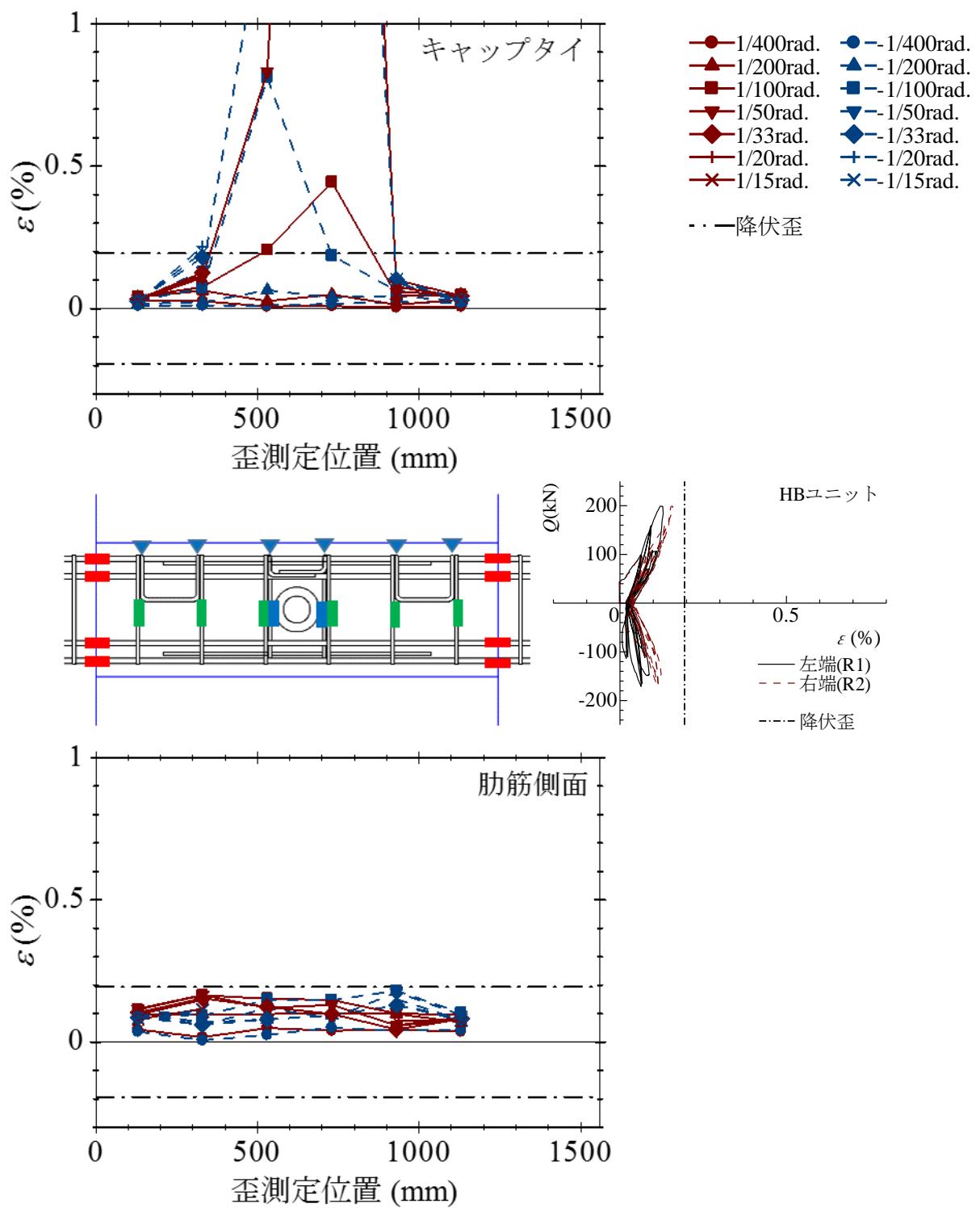


図 4-26 試験体 H10 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

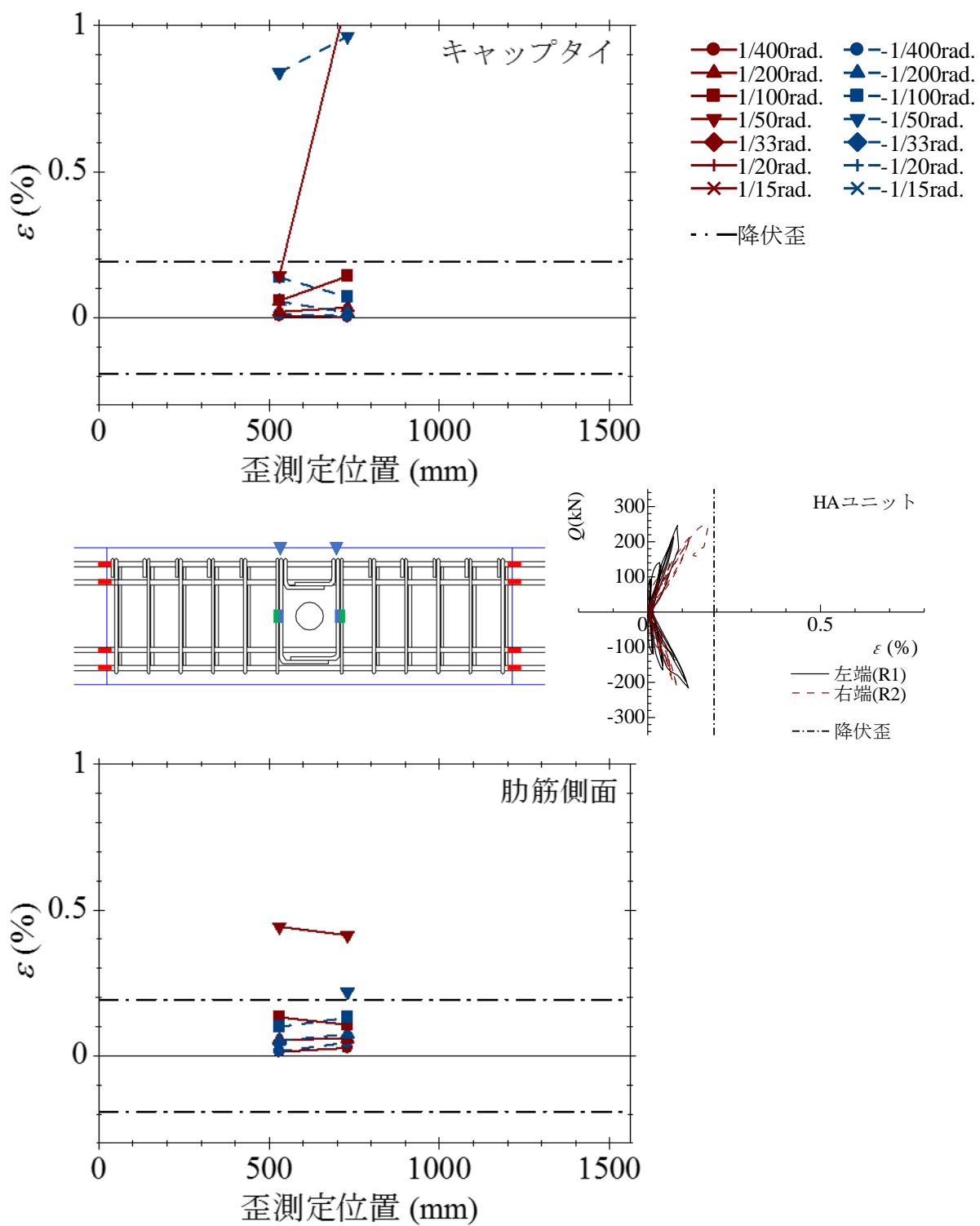


図 4-27 試験体 H11 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

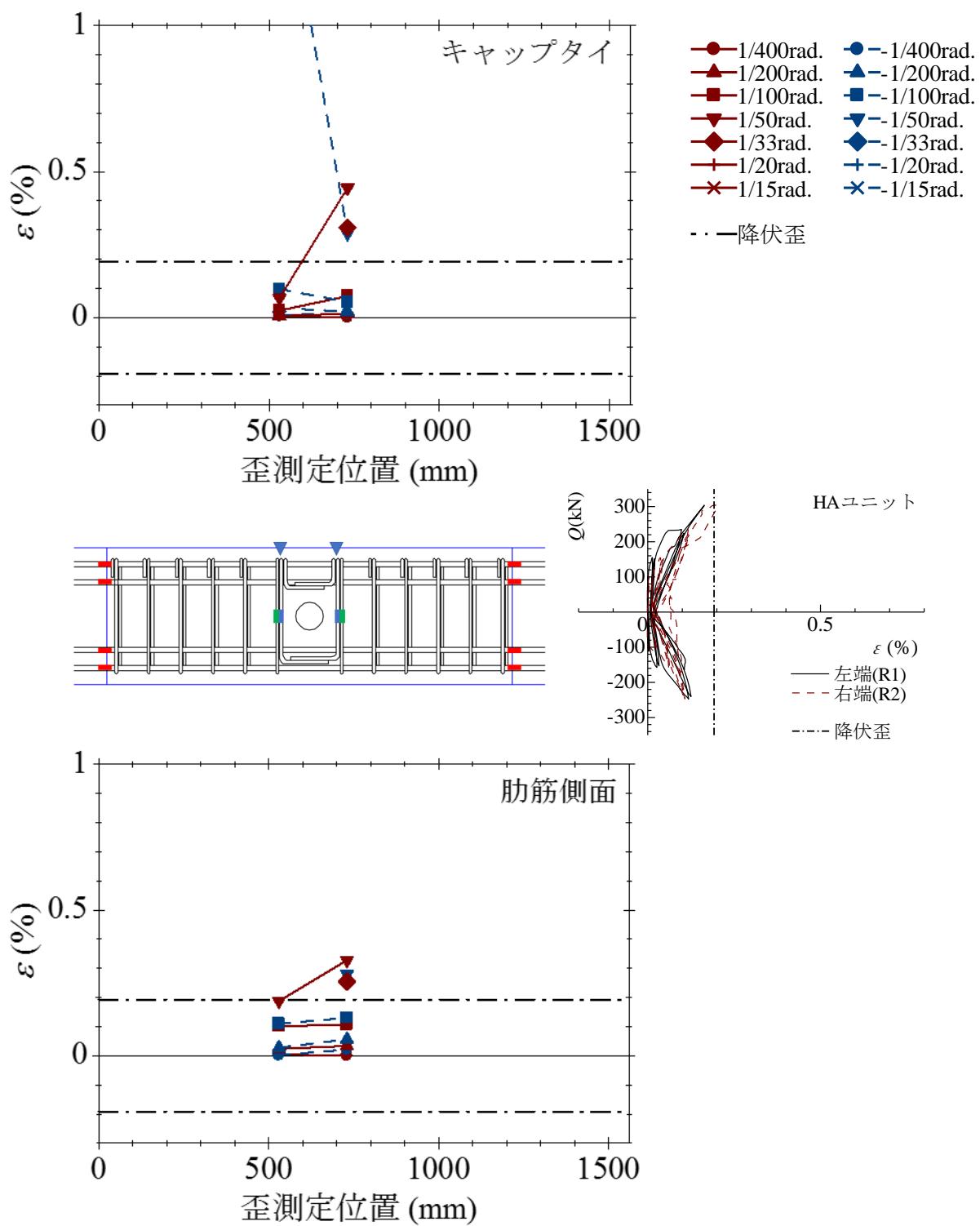


図 4-28 試験体 H12 肋筋・キャップタイ・孔周囲補強筋の歪

第5章 まとめ

溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法の有孔梁に対する適用可能性を検討し、さらなる施工の簡略化に資する情報を蓄積することを目的として、溶接組立鉄筋とキャップタイを利用した2種類の開口補強筋を提案し、実大断面の試験体の作製、建研式の正負交番繰返し加力を行った。本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 孔径 $H/D=1/5$ の一般部破壊型試験体は孔のない一般部でせん断破壊、開口部破壊型の試験体は開口部でせん断破壊した。孔径 $H/D=1/3$ の開口部破壊型の試験体は開口部でせん断破壊した。
- (2) 孔周囲補強筋タイプ HB では、軸方向筋と横補強筋溶接部の剥離が確認された。
- (3) 孔径 $H/D=1/5$ の一般部で破壊した試験体において、キャップタイ試験体の実験値最大荷重は、通常肋筋と市販の孔周囲補強筋を用いた試験体より大きく、その比は 1.07～1.14 となった。また、キャップタイ試験体の実験値最大荷重は、荒川 mean 式（一般部）による計算値と比較して、1.39～1.54 であった。
- (4) 一般部と開口部のせん断強度計算値は、各せん断強度式の計算結果が実験結果の破壊形式とほぼ一致した。
- (5) キャップタイ試験体の開口部せん断強度は、修正広沢 min, mean 式および平瀬らの式を用いて評価できる。
- (6) 孔周囲補強筋で明確に降伏が見られたものはなかった。最大荷重時の肋筋歪に対する孔周囲補強筋の歪の比は、全試験体平均で 0.81 であった。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々のご指導、ご協力をいただきました。指導教員である筑波大学教授 金久保利之先生には、研究計画から実験実施、論文作成に至るまで懇切丁寧にご指導ご鞭撻を賜りました。試験体の材料や資金・情報の提供を賜りました三栄商事株式会社、アフェクト設計事務所の皆様、試験体作製にあたりご協力いただいたアシス株式会社の皆様に深く感謝申し上げます。また、筑波大学技術職員 小島篤志氏には試験体作製および実験遂行に至るまで多大なご協力をいただきましたことを厚く御礼申し上げます。

本研究を行うにあたり、筑波大学准教授 八十島章先生には、実験結果の考察において、的確な助言を多数いただきました。また、筑波大学 金久保・八十島研究室の先輩方、同期、後輩達には多くのご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げると共に、今後の活躍を期待しております。

参考文献

- [1] 岡田健良, 金久保利之, 高橋辰弥: 異形鉄筋のスポット溶接接合性能に及ぼす溶接条件の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.281-282, 2017.7
- [2] 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
- [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] 石岡拓, 和泉信之: K 型開口補強筋により補強した有孔基礎梁のせん断強度に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.163-168, 2018
- [5] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- [6] 平瀬智樹, 日比野陽, 篠原保二, 林靜雄: RC 造有孔梁のせん断伝達機構に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.259-264, 2011
- [7] 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
- [8] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の韌性保証型耐震設計指針・同解説, 1999