

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 基礎梁の構造性能に関する研究

高橋拓也

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 金久保利之

2019年 3月

概要

近年、主に戸建住宅などの鉄筋コンクリート基礎工事において、現場での作業簡単化および工期短縮を目的として溶接組立鉄筋が採用されることが増えている。本研究は、この溶接組立鉄筋をダブル配筋梁に応用するべく提案された、3次元状に折曲げ加工したキャップタイと組み合わせて用いる新たな工法について、繰返し荷重下での基礎梁の構造性能を確認することを目的として行ったものである。

第2章では、繰返し荷重下でのせん断性能を確認するために、コンクリート強度とキャップタイ形状をパラメータとした、建研式の繰返し曲げせん断実験を行った。その結果、すべての試験体において、荒川 mean 式および終局強度型指針式 A 法のいずれも、せん断強度を安全側に評価することができた。キャップタイを用いた試験体の最大荷重は通常 135° フックの肋筋を用いた試験体と同等、もしくはそれ以上の値を示した。既往の単調加力実験の結果と比較した結果、繰返し加力の試験体のせん断力-変位関係は、正側加力では単調加力の試験体と同等の性状を示し、負側加力では性能が低下する様子が伺えた。

第3章では、許容応力度設計のみならず、主筋の降伏を許容した上で応力が厳しい梁部材への適用可能性を検討することを目的として、コンクリート強度と主筋の径および本数をパラメータとした、建研式の繰返し曲げせん断実験を行った。その結果、主筋に D19 を 1 段配筋として用いた試験体では付着割裂破壊、主筋に D16 を 2 段配筋として用いた試験体ではせん断破壊の破壊形式となった。前者は靱性保証型指針による付着耐力式によって、後者は終局強度型指針式 A 法によって、どちらも最大荷重を安全側に評価することができた。すべての試験体において、限界変形角は 1/50rad.以上となった。主筋の付着応力は、付着割裂破壊を生じた主筋径が D19 の試験体において大きくなる傾向があり、主筋径が D16 の試験体においても特に梁端部において大きくなった。

目次

第1章	序論	1
第2章	繰返し荷重下のせん断性状	3
2.1	実験概要	3
2.1.1	試験体	3
2.1.2	使用材料	5
2.1.3	加力方法	8
2.1.4	計測方法	9
2.2	実験結果および検討	10
2.2.1	破壊状況とせん断力一部材角関係	10
2.2.2	せん断力一部材角関係の比較	19
2.2.3	最大耐力	21
2.2.4	局部変形	23
2.2.5	主筋および肋筋の歪分布	26
2.2.6	単調加力実験試験体との比較	51
2.3	まとめ	53
第3章	曲げ降伏後の破壊性状	54
3.1	実験概要	54
3.1.1	試験体	54
3.1.2	使用材料	56
3.1.3	加力方法	59
3.1.4	計測方法	60
3.2	実験結果および検討	61
3.2.1	破壊状況とせん断力一部材角関係	61
3.2.2	せん断力一部材角関係の比較	66
3.2.3	最大耐力	67
3.2.4	局部変形	71
3.2.5	主筋および肋筋の歪分布	74
3.2.6	付着応力	85
3.3	まとめ	93
第4章	結論	94
	謝辞	95
	参考文献	96

図目次

図 1-1	全強度溶接組立鉄筋を用いた配筋	1
図 1-2	キャップタイの種類	2
図 2-1	繰返しせん断性状実験における試験体形状	4
図 2-2	繰返しせん断性状実験におけるキャップタイ使用試験体の試験区間配筋	4
図 2-3	繰返しせん断性状実験における鉄筋引張試験結果	5
図 2-4	加力装置	8
図 2-5	加力履歴	8
図 2-6	変位計設置位置	9
図 2-7	歪ゲージ貼付位置	9
図 2-8	試験体 S18-N 破壊状況	11
図 2-9	試験体 S18-II 破壊状況	12
図 2-10	試験体 S18-III 破壊状況	13
図 2-11	試験体 S18-IV 破壊状況	14
図 2-12	試験体 S30-N 破壊状況	15
図 2-13	試験体 S30-II 破壊状況	16
図 2-14	試験体 S30-III 破壊状況	17
図 2-15	試験体 S30-IV 破壊状況	18
図 2-16	繰返しせん断性状実験における せん断力－部材角関係の包絡線の比較 (18MPa シリーズ)	19
図 2-17	繰返しせん断性状実験における せん断力－部材角関係の包絡線の比較 (30MPa シリーズ)	20
図 2-18	せん断力－局部せん断変形関係の包絡線 (通常配筋試験体)	23
図 2-19	せん断力－局部せん断変形関係の包絡線 (キャップタイ試験体タイプ II)	24
図 2-20	せん断力－局部せん断変形関係の包絡線 (キャップタイ試験体タイプ III)	24
図 2-21	せん断力－局部せん断変形関係の包絡線 (キャップタイ試験体タイプ IV)	25
図 2-22	試験体 S18-N 上端主筋の歪分布	27
図 2-23	試験体 S18-N 下端主筋の歪分布	28
図 2-24	試験体 S18-N 肋筋の歪分布	29
図 2-25	試験体 S18-II 上端主筋の歪分布	30
図 2-26	試験体 S18-II 下端主筋の歪分布	31
図 2-27	試験体 S18-II キャップタイと肋筋の歪分布	32
図 2-28	試験体 S18-III 上端主筋の歪分布	33
図 2-29	試験体 S18-III 下端主筋の歪分布	34
図 2-30	試験体 S18-III キャップタイと肋筋の歪分布	35
図 2-31	試験体 S18-IV 上端主筋の歪分布	36
図 2-32	試験体 S18-IV 下端主筋の歪分布	37
図 2-33	試験体 S18-IV キャップタイと肋筋の歪分布	38
図 2-34	試験体 S30-N 上端主筋の歪分布	39
図 2-35	試験体 S30-N 下端主筋の歪分布	40
図 2-36	試験体 S30-N 肋筋の歪分布	41
図 2-37	試験体 S30-II 上端主筋の歪分布	42

図 2-38	試験体 S30-II 下端主筋の歪分布	43
図 2-39	試験体 S30-II キャップタイと肋筋の歪分布	44
図 2-40	試験体 S30-III 上端主筋の歪分布	45
図 2-41	試験体 S30-III 下端主筋の歪分布	46
図 2-42	試験体 S30-III キャップタイと肋筋の歪分布	47
図 2-43	試験体 S30-IV 上端主筋の歪分布	48
図 2-44	試験体 S30-IV 下端主筋の歪分布	49
図 2-45	試験体 S30-IV キャップタイと肋筋の歪分布	50
図 2-46	せん断力一部材角関係の単調加力と繰返し加力の比較	51
図 3-1	曲げ降伏後の破壊性状実験における試験体形状	55
図 3-2	曲げ降伏後の破壊性状実験における試験体形状および試験区間配筋	55
図 3-3	曲げ降伏後の破壊性状実験における鉄筋引張試験結果	56
図 3-4	加力装置	59
図 3-5	加力履歴	59
図 3-6	変位計設置位置	60
図 3-7	歪ゲージ貼付位置	60
図 3-8	試験体 F18-D19 破壊状況	62
図 3-9	試験体 F18-D16 破壊状況	63
図 3-10	試験体 F30-D19 破壊状況	64
図 3-11	試験体 F30-D16 破壊状況	65
図 3-12	曲げ降伏後の破壊性状実験におけるせん断力一部材角関係の包絡線の比較	66
図 3-13	せん断力一部変形関係の包絡線 (F18-D19 試験体)	71
図 3-14	せん断力一部変形関係の包絡線 (F18-D16 試験体)	72
図 3-15	せん断力一部変形関係の包絡線 (F30-D19 試験体)	72
図 3-16	せん断力一部変形関係の包絡線 (F30-D16 試験体)	73
図 3-17	試験体 F18-D19 主筋の歪分布	75
図 3-18	試験体 F18-D19 キャップタイと肋筋の歪分布	76
図 3-19	試験体 F18-D16 上端主筋の歪分布	77
図 3-20	試験体 F18-D16 下端主筋の歪分布	78
図 3-21	試験体 F18-D16 キャップタイと肋筋の歪分布	79
図 3-22	試験体 F30-D19 主筋の歪分布	80
図 3-23	試験体 F30-D19 キャップタイと肋筋の歪分布	81
図 3-24	試験体 F30-D16 上端主筋の歪分布	82
図 3-25	試験体 F30-D16 下端主筋の歪分布	83
図 3-26	試験体 F30-D16 キャップタイと肋筋の歪分布	84
図 3-27	付着応力区間番号	85
図 3-28	Menegotto-Pinto モデル ^[5]	86
図 3-29	試験体 F18-D19 上端主筋の付着応力一部材角関係	87
図 3-30	試験体 F18-D19 下端主筋の付着応力一部材角関係	87
図 3-31	試験体 F18-D16 上端 1 段目主筋の付着応力一部材角関係	88
図 3-32	試験体 F18-D16 上端 2 段目主筋の付着応力一部材角関係	88
図 3-33	試験体 F18-D16 下端 2 段目主筋の付着応力一部材角関係	89
図 3-34	試験体 F18-D16 下端 1 段目主筋の付着応力一部材角関係	89
図 3-35	試験体 F30-D19 上端主筋の付着応力一部材角関係	90

図 3-36	試験体 F30-D19 下端主筋の付着応力一部材角関係	90
図 3-37	試験体 F30-D16 上端 1 段目主筋の付着応力一部材角関係	91
図 3-38	試験体 F30-D16 上端 2 段目主筋の付着応力一部材角関係	91
図 3-39	試験体 F30-D16 下端 2 段目主筋の付着応力一部材角関係	92
図 3-40	試験体 F30-D16 下端 1 段目主筋の付着応力一部材角関係	92

表目次

表 2.1	繰返しせん断性状実験における試験体一覧	3
表 2.2	繰返しせん断性状実験における鉄筋の引張試験結果一覧	5
表 2.3	繰返しせん断性状実験におけるコンクリートの調合表	6
表 2.4	繰返しせん断性状実験におけるコンクリートのフレッシュ性状	6
表 2.5	繰返しせん断性状実験におけるコンクリートの材料試験結果 (18MPa)	7
表 2.6	繰返しせん断性状実験におけるコンクリートの材料試験結果 (30MPa)	7
表 2.7	繰返しせん断性状実験における検討用コンクリート強度	7
表 2.8	試験体 S18-N 記事表	11
表 2.9	試験体 S18-II 記事表	12
表 2.10	試験体 S18-III 記事表	13
表 2.11	試験体 S18-IV 記事表	14
表 2.12	試験体 S30-N 記事表	15
表 2.13	試験体 S30-II 記事表	16
表 2.14	試験体 S30-III 記事表	17
表 2.15	試験体 S30-IV 記事表	18
表 2.16	繰返しせん断性状実験における最大荷重と計算値との比較	21
表 2.17	最大荷重時の局部せん断変形量(mm)	52
表 3.1	曲げ降伏後の破壊性状実験における試験体一覧	54
表 3.2	曲げ降伏後の破壊性状実験における鉄筋の引張試験結果一覧	56
表 3.3	曲げ降伏後の破壊性状実験におけるコンクリートの調合表	57
表 3.4	曲げ降伏後の破壊性状実験におけるコンクリートのフレッシュ性状	57
表 3.5	曲げ降伏後の破壊性状実験におけるコンクリートの材料試験結果 (18MPa)	58
表 3.6	曲げ降伏後の破壊性状実験におけるコンクリートの材料試験結果 (30MPa)	58
表 3.7	曲げ降伏後の破壊性状実験における検討用コンクリート強度	58
表 3.8	試験体 F18-D19 記事表	62
表 3.9	試験体 F18-D16 記事表	63
表 3.10	試験体 F30-D19 記事表	64
表 3.11	試験体 F30-D16 記事表	65
表 3.12	曲げ降伏後の破壊性状実験における最大荷重と計算値との比較	68
表 3.13	曲げ降伏後の破壊性状実験における余裕度計算値と限界変形および破壊形式	68

第1章 序論

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。問題を解決する手段として、主に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組立鉄筋（以下、溶接組立鉄筋）が用いられることが増えている。現場では溶接組立鉄筋を設置し継手筋を結束するだけで配筋が完了するため、作業時間の短縮および省力化に繋げることができる。

現在、溶接組立鉄筋をダブル配筋に展開するための新たな工法として、上部が開口されている U 字型の溶接組立鉄筋（図 1-1）に、三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て用いる工法が提案、研究されている^[1]。建築基準法では、上部にキャップタイをかぶせる形の肋筋において、梁上側端部をフック状にして主筋に固定する必要があるが、本工法では溶接を用いて主筋に固定しているため、部材の構造性能を確認する必要がある。

既往の実験^[1]では、図 1-2 に示した 4 種のキャップタイのうちタイプ I、タイプ II、タイプ III を用い、梁主筋に高強度鉄筋 SD490 を用いたせん断破壊型の試験体の大野式一方向単調曲げせん断加力が行われ、部材せん断強度が通常の 135° フック肋筋試験体と同等以上であることが確認された。また、部材角 3/100rad. の大変形時には、肋筋溶接部が剥離し耐力の低下がみられたことが報告されている。



図 1-1 全強度溶接組立鉄筋を用いた配筋

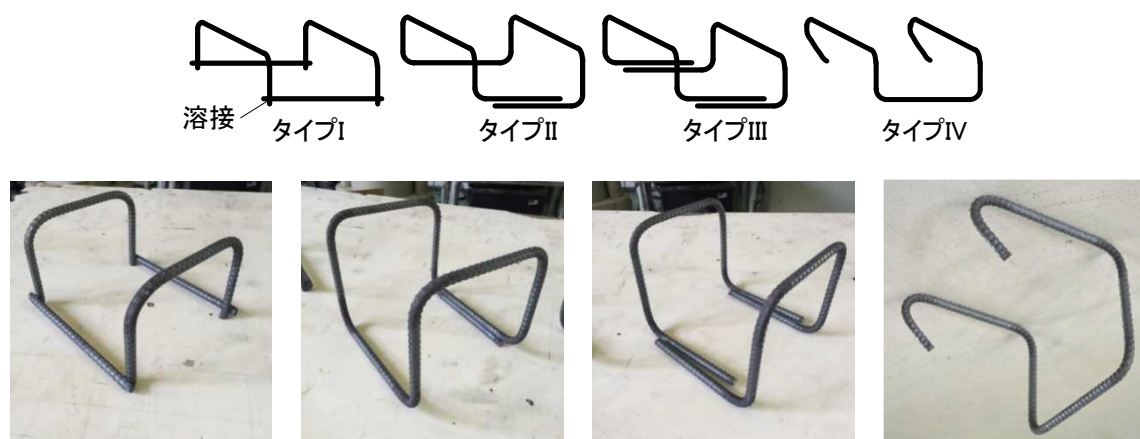


図 1-2 キャップタイの種類

本研究は、溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法ダブル配筋基礎梁の、繰返し荷重下における構造性能を確認することを目的とする。短期荷重下でのせん断性状および曲げ降伏後の破壊性状に着目し、建研式の繰返し曲げせん断実験を行った。

第 2 章では、せん断性状に着目した梁の繰返し曲げせん断実験について述べる。繰返し荷重下におけるキャップタイ工法梁部材のせん断性能を確認することを目的として行った当実験では、既往のせん断実験と同一断面とし、図 1-2 に示した 4 種のキャップタイのうちタイプ II、タイプ III、タイプ IV を用い、梁主筋に高強度鉄筋 SD490 を用いたせん断破壊型の試験体に対して、建研式の計 12 サイクルの正負交番漸増繰返し加力を実施した。

第 3 章では、曲げ降伏後の破壊性状に着目した梁の繰返し曲げせん断実験について述べる。キャップタイ工法ダブル配筋基礎梁について、許容応力度設計のみならず、主筋の降伏を許容した上で応力が厳しい梁部材への適用可能性を検討することを目的として行った当実験では、梁幅と梁せいを既往のせん断実験と同一とし、キャップタイに図 1-2 に示したもののうちタイプ II を、主筋に SD345 を用い、せん断余裕度および付着余裕度をパラメータとした曲げ降伏先行型の試験体に対して、建研式の計 12 サイクルの正負交番漸増繰返し加力を実施した。

第2章 繰返し荷重下のせん断性状

本章では、せん断性状に着目した梁の繰返し曲げせん断実験についての実験概要、結果および考察を述べる。本実験は、繰返し荷重下におけるキャップタイ工法梁部材のせん断性能を確認することを目的として実施したものである。

2.1 実験概要

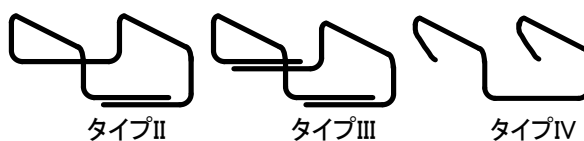
2.1.1 試験体

試験体は、ダブル配筋が必要となる幅を持つ住宅基礎梁を想定した、ほぼ実大の断面を有する梁試験体である。試験体一覧を表 2.1 に、試験体形状を図 2-1 に示す。梁部材を模擬した試験区間における断面の幅 $b \times$ せい D は $220\text{mm} \times 420\text{mm}$ 、主筋は 6-D16、肋筋は D10@200 としている。せん断性状の確認が目的であるため、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、コンクリート目標強度およびキャップタイの種類である。コンクリート目標強度は、想定する運用範囲の下限值と上限値である 18MPa および 30MPa とした。キャップタイは 3 種類使用し、比較のために通常の 135°フック肋筋の試験体も設定した。タイプ II は一本の鉄筋を定着部も含めて三次元状に折り曲げ加工し一周させたものである。タイプ III はキャップタイ定着部を梁軸方向に折り曲げ加工したもの 2 つを組み合わせるものである。タイプ IV は定着部の片側を 135°フックとし、逆側を三次元状に折り曲げ加工したものである。キャップタイ試験体の試験区間における配筋を図 2-2 に示す。タイプ IV では定着部形状の左右の違いを考慮し、フック端が梁側面に対して交互になるよう配した。

表 2.1 繰返しせん断性状実験における試験体一覧

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	
			タイプ	配筋
S18-N	断面 $b \times D$ (mm)=220×420 せん断スパン比 1.5 主筋 6-D16(SD490) p_t =1.55% 肋筋 2-D10@200(SD295) p_w =0.32%	18	(通常配筋 135° フック)	
S18-cII			II	シングル (1 つ間隔)
S18-cIII			III	
S18-cIV			IV	
S30-N		30	(通常配筋 135° フック)	
S30-cII			II	シングル (1 つ間隔)
S30-cIII			III	
S30-cIV			IV	



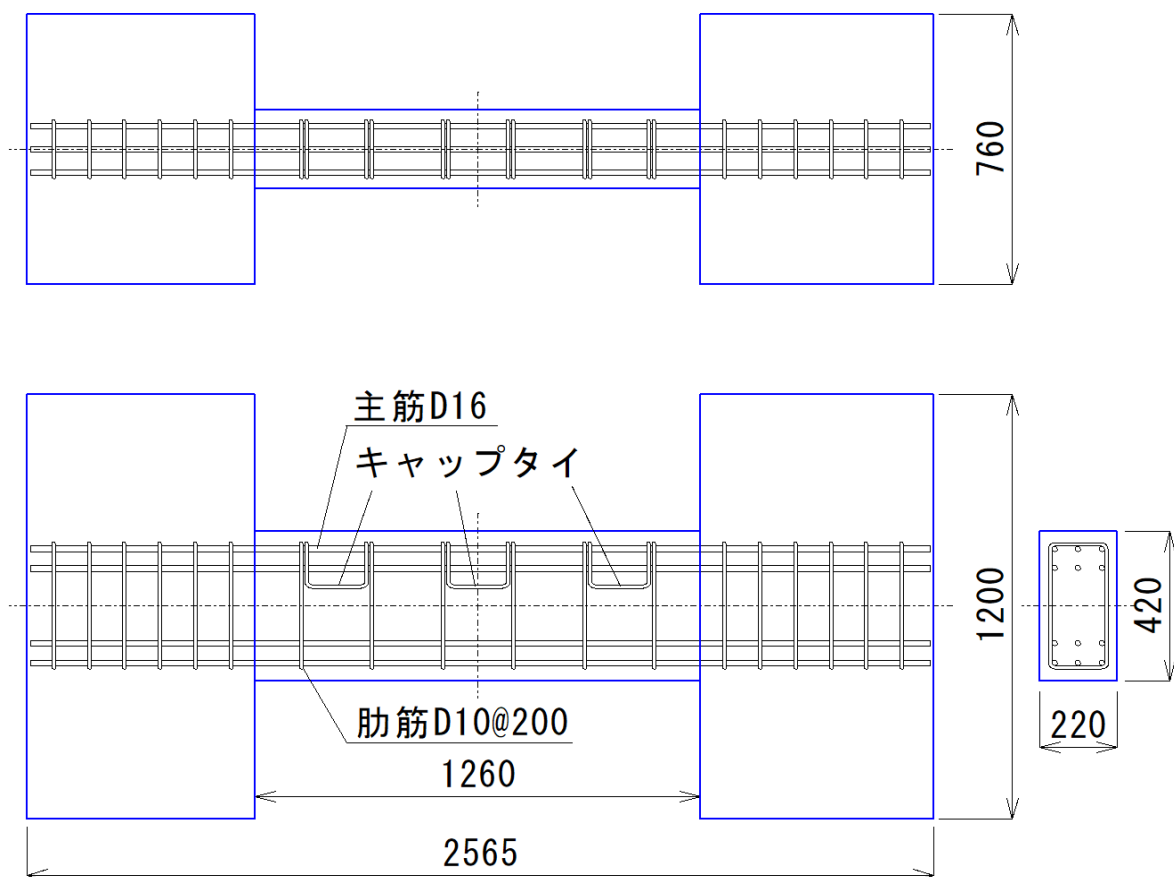


図 2-1 繰返しせん断性状実験における試験体形状

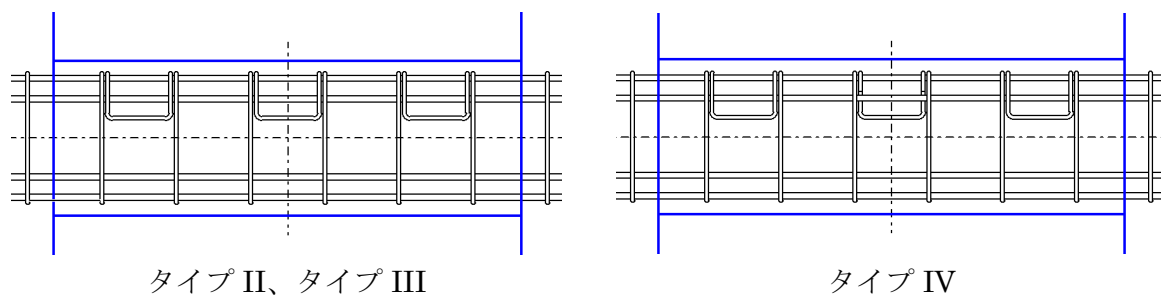


図 2-2 繰返しせん断性状実験におけるキャップタイ使用試験体の試験区間配筋

2.1.2 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 2.2 に、応力-歪関係を図 2-3 に示す。

表 2.2 繰返しせん断性状実験における鉄筋の引張試験結果一覧

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	516	194	0.266	701	18.2	主筋
	2	506	190	0.266	716	15.0	
	3	517	193	0.268	728	9.4*	
	平均	513	192	0.267	715	16.6	
D10 SD295A	1	358	185	0.194	503	28.0	肋筋・ キャップ タイ
	2	362	189	0.192	503	29.8	
	3	356	189	0.188	504	22.1*	
	平均	359	188	0.191	503	28.9	

*D16-3、D10-3 は、標点間外にて破断したため平均値に含めず

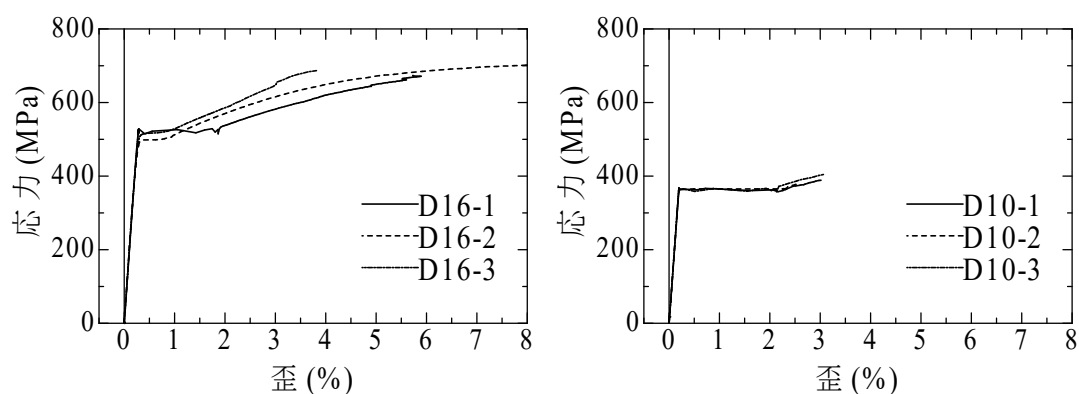


図 2-3 繰返しせん断性状実験における鉄筋引張試験結果

(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計画を表 2.3 に示す。

打設は、試験体 S18-N, S18-II, S18-III, S18-IV (18MPa) では 2017 年 6 月 9 日に、試験体 S30-N, S30-II, S30-III, S30-IV (30MPa) では 2017 年 7 月 7 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 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。

表 2.3 繰返しせん断性状実験におけるコンクリートの調合表

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	875	2.45	
30MPa	56.0	329	184	838	934	3.29	

*: AE 減水剤標準形 (I 種) フローリック SV10 (18MPa) / フローリック RV10 (30MPa)

表 2.4 繰返しせん断性状実験における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	
30MPa	2017.7.7	28	18.5	4.0	27	

コンクリートの材料試験には、φ100mm×200mm の円柱供試体を用いた。打設後約 4 週間は実験室内で封緘養生し、その後材料試験時まで実験室内で気中静置した。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。圧縮強度試験では検長 100mm のコンプレッソメータを用いて、歪の計測を行った。

コンクリートの材料試験結果を、表 2.5～表 2.6 に示す。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 2.7 に示す。

表 2.5 繰返しせん断性状実験におけるコンクリートの材料試験結果 (18MPa)

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	2017.7.18 (39 日)	1	18.0	18.8	1.57	
		2	17.9	17.9	1.82	
		3	18.0	18.5	1.94	
		平均	18.0	18.4	1.78	
	2017.7.27 (48 日)	4	18.9	18.7	1.79	
		5	19.5	18.3	1.94	
		6	19.8	18.7	2.13	
		平均	19.4	18.6	1.95	
	2017.8.2 (54 日)	7	19.7	18.4	1.91	
		8	17.9	17.7	1.88	
		9	19.8	18.5	1.76	
		平均	19.1	18.2	1.85	

表 2.6 繰返しせん断性状実験におけるコンクリートの材料試験結果 (30MPa)

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	2017.8.4 (28 日)	1	34.4	23.7	2.82	
		2	34.4	24.3	2.60	
		3	35.9	24.5	3.12	
		平均	34.9	24.2	2.85	
	2017.8.9 (33 日)	4	33.9	24.0	3.10	
		5	32.5	23.6	2.84	
		6	32.1	23.8	2.90	
		平均	32.8	23.8	2.95	
	2017.8.18 (42 日)	7	35.2	24.2	3.16	
		8	34.4	23.9	3.66	
		9	36.7	24.6	3.00	
		平均	35.4	24.2	3.27	

表 2.7 繰返しせん断性状実験における検討用コンクリート強度

目標強度	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)	備考
18MPa	18.8	18.4	1.86	
30MPa	34.4	24.1	3.02	

2.1.3 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 2-4 に示す。鉛直方向中央部のオイルジャッキにより、軸力が 0 となるように制御を行った。

加力は、部材角 $1/400 \sim 1/15\text{rad}$. で正負交番繰返し加力を行った。加力履歴を図 2-5 に示す。部材角 $1/400 \sim 1/33\text{rad}$. 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 $1/15\text{rad}$. では 1 回の正負加力を行った。

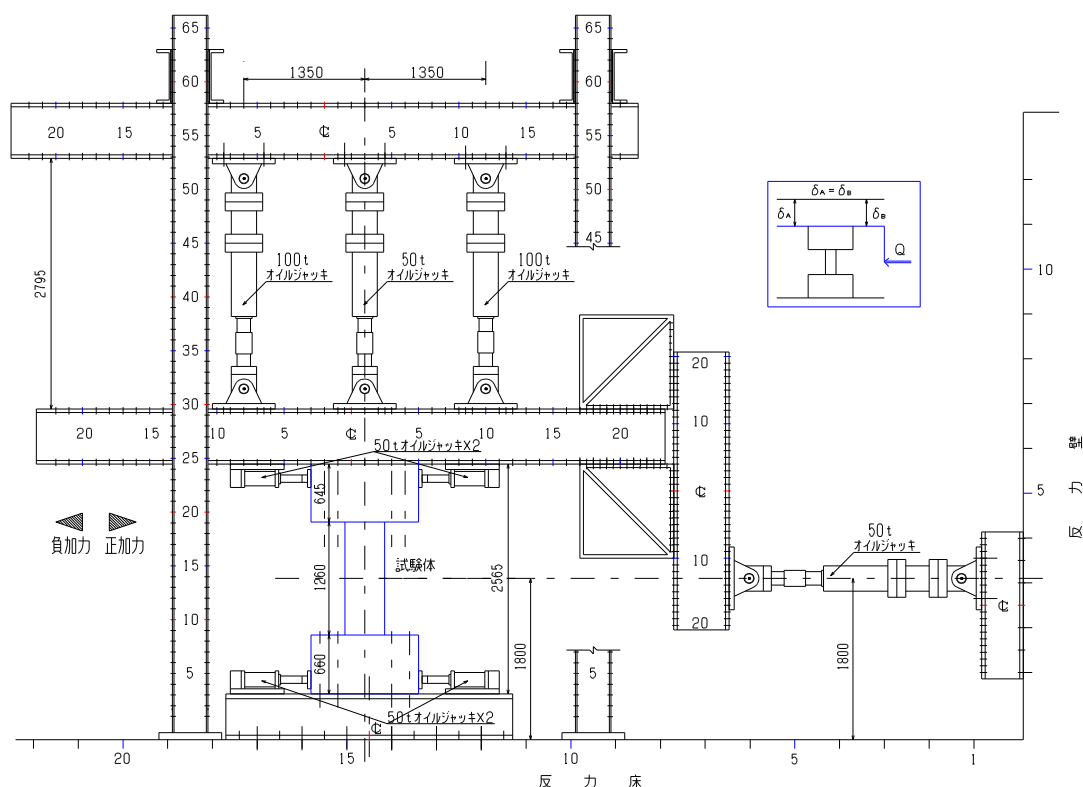


図 2-4 加力装置

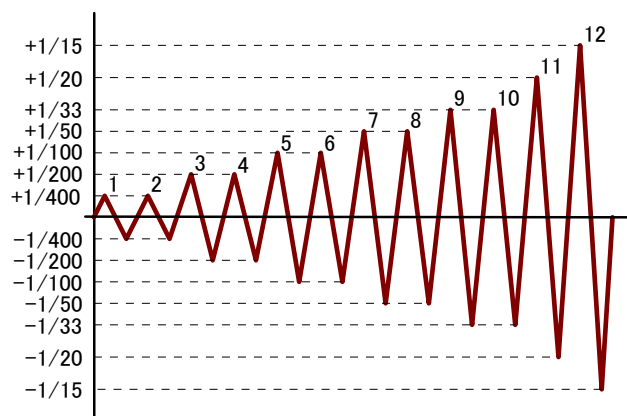
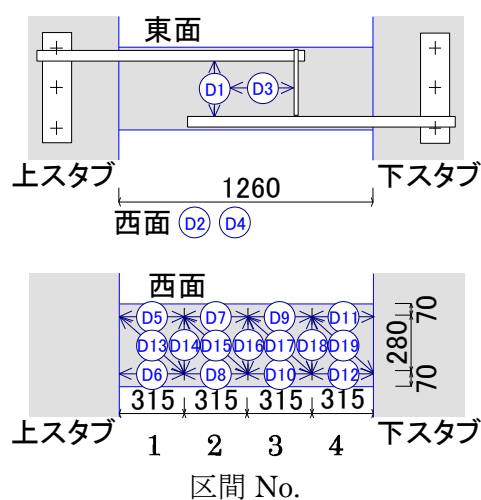


図 2-5 加力履歴

2.1.4 計測方法

計測項目は、ロードセルによるせん断力、スタブ間たわみ、軸方向変形、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 2-6 に示す。加力点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 2-7 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。使用した歪ゲージは、ゲージ長 3mm の汎用歪ゲージ（共和電業製 KFG-3-120-C1、ゲージファクター 2.11）である。



使用機器

たわみ用 D1・D2

SDP-200（東京測器製）精度 0.01mm/ μ

軸変形用 D3・D4

DTH-A-50（共和電業製）精度 0.005mm/ μ

局部変形用 D5～D16

CDP-25（東京測器製）精度 0.002mm/ μ

PI-5（東京測器製）精度約 0.001mm/ μ

図 2-6 変位計設置位置

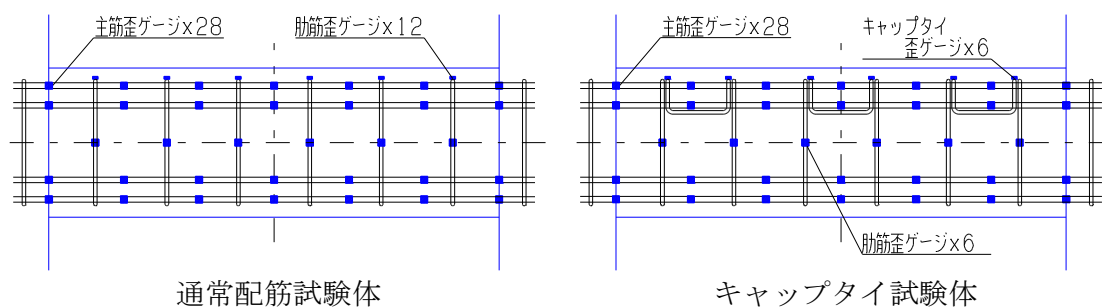


図 2-7 歪ゲージ貼付位置

2.2 実験結果および検討

2.2.1 破壊状況とせん断力－部材角関係

各試験体のせん断力－部材角関係および 1/50rad.加力サイクル（加力サイクル 7）終了時の破壊状況を図 2-8～図 2-15 に、加力時実験記事を表 2.8～表 2.15 に示す。

すべての試験体において、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。長期許容応力度時のひび割れ幅は 0.1mm 以下であった。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、梁最端部または最端部から 2 番目の、せん断ひび割れの発生と対応した位置で筋筋が降伏した。筋筋の降伏の順次発生にともなって耐力上昇が抑えられ、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、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。これらの大まかな破壊性状においては、コンクリート強度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。

18MPa シリーズ試験体では、せん断ひび割れから 2 段目主筋に沿った付着割裂ひび割れが進展し、また、1/50rad.加力サイクル時の耐力低下は、比較的穏やかであった。一方、30MPa シリーズ試験体では、せん断ひび割れが拡幅することで耐力が低下し、1/50rad.加力サイクル時の耐力の低下も激しかった。

タイプ II およびタイプ III のキャップタイを用いた試験体では、大変形時に梁側面のキャップタイ定着部に沿ったひび割れが拡幅し、キャップタイが梁上端のかぶりコンクリートを押し上げ、コアコンクリートの拘束が弱くなっていく様子が伺えた。一方、通常の 135° フックの筋筋を用いた試験体とタイプ IV のキャップタイを用いた試験体では、キャップタイによる梁上端のかぶりコンクリートの押し上げが抑制され、コアコンクリートの拘束が維持されたことで、大変形時の耐力低下がタイプ II およびタイプ III のキャップタイを用いた試験体より小さくなった。

試験体 S18-II において、1/20rad.加力サイクル時に筋筋溶接部の剥離が見られたが、他の試験体では溶接部の破壊は見られなかった。

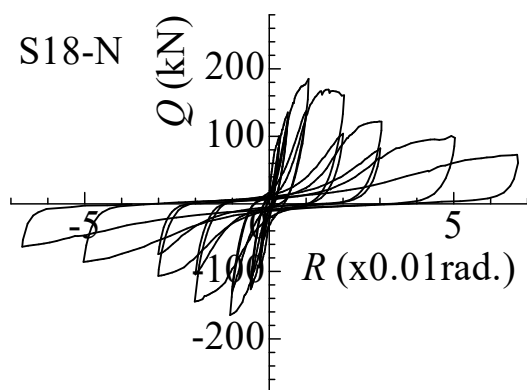


図 2-8 試験体 S18-N 破壊状況

表 2.8 試験体 S18-N 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
17	33	0.5	正側曲げひび割れ発生
31	61	1.2	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm ②0.05mm 除荷時 ①0mm ②0mm
45	100	3.4	正側曲げせん断ひび割れ発生
65	-25	-0.0	負側曲げひび割れ発生
75	-60	-1.2	負側曲げせん断ひび割れ発生 負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.10mm ②0.10mm 除荷時 ①0mm ②0.10mm
411	134	7.0	肋筋降伏
412	138	7.3	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.90mm ④0.70mm 除荷時 ③0.60mm ④0.60mm
435	185	13.4	正側最大荷重 キャップタイ降伏
492	-146	-9.1	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤1.40mm ⑥1.50mm 除荷時 ⑤1.10mm ⑥0.50mm
495	-165	-13.4	負側最大荷重
662	167	21.7	正側主筋降伏
954	-63	-21.4	負側主筋降伏
1329	-1	-47.0	計測終了

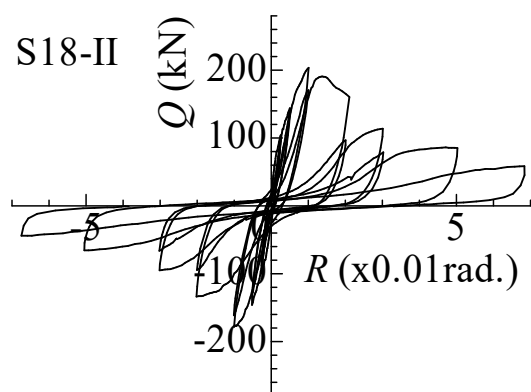


図 2-9 試験体 S18-II 破壊状況

表 2.9 試験体 S18-II 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
35	53	0.9	正側曲げひび割れ発生
39	62	1.2	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.02mm 除荷時 ①0mm
47	81	2.0	正側曲げせん断ひび割れ発生
72	-1	0.8	負側曲げひび割れ発生
96	-58	-1.1	負側曲げせん断ひび割れ発生 負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ②0.05mm ③0.05mm 除荷時 ②0mm ③0mm
230	140	5.9	筋筋降伏
232	144	6.3	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ④0.25mm ⑤0.85mm 除荷時 ④0.05mm ⑤0.30mm
286	-146	-6.5	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑥0.40mm ②0.35mm 除荷時 ⑥0.15mm ②0.05mm
430	195	11.3	正側主筋降伏
433	204	12.7	正側最大荷重
496	-176	-11.5	負側主筋降伏
500	-178	-12.7	負側最大荷重
544	154	10.9	キャップタイ降伏
1307	-1	-48.5	計測終了

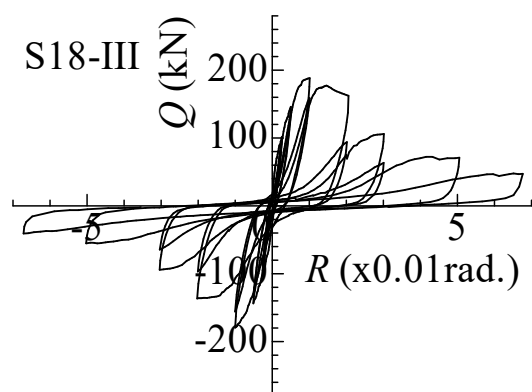


図 2-10 試験体 S18-III 破壊状況

表 2.10 試験体 S18-III 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
12	31	0.4	正側曲げひび割れ発生
31	63	1.2	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.10mm ②0.08mm 除荷時 ①0.05mm ②0.05mm
40	78	1.9	正側曲げせん断ひび割れ発生
64	3	0.9	負側曲げせん断ひび割れ発生
81	-61	-1.1	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.15mm ④0.08mm 除荷時 ③0.05mm ④0.05mm
85	-73	-1.8	負側曲げひび割れ発生
211	146	6.3	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.40mm ⑥0.45mm 除荷時 ⑤0.10mm ⑥0.20mm
262	-144	-6.4	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.40mm ⑧0.65mm 除荷時 ⑦0.15mm ⑧0.25mm
411	177	9.4	肋筋降伏
418	187	11.7	キャップタイ降伏
421	188	12.7	正側最大荷重
490	-180	-12.6	負側最大荷重
746	-117	-13.9	負側主筋降伏
818	91	24.3	正側主筋降伏
1374	-2	-44.7	計測終了

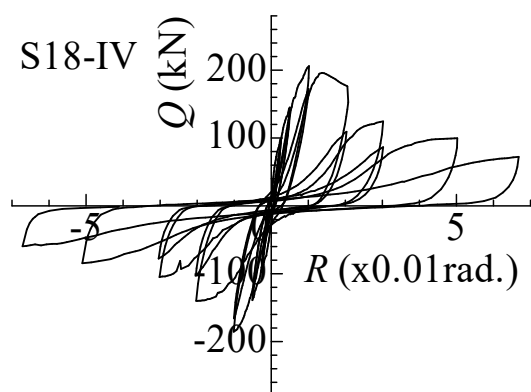


図 2-11 試験体 S18-IV 破壊状況

表 2.11 試験体 S18-IV 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
13	23	0.3	正側曲げひび割れ発生
37	64	1.3	正側曲げせん断ひび割れ発生 正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm ②0.05mm 除荷時 ①0.05mm ②0.05mm
79	-40	-0.5	負側曲げひび割れ発生
87	-64	-1.3	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.05mm ④0.10mm 除荷時 ③0mm ④0.05mm
90	-73	-1.7	負側曲げせん断ひび割れ発生
208	145	6.3	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.80mm ⑥0.50mm 除荷時 ⑤0.30mm ⑥0.20mm
261	-139	-6.4	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.50mm ⑧0.30mm 除荷時 ⑦0.20mm ⑧0.20mm
306	127	5.8	正側付着ひび割れ発生
395	145	6.9	肋筋降伏
412	194	11.3	正側主筋降伏
415	206	12.8	正側最大荷重
484	-186	-12.8	負側最大荷重
650	196	18.0	キャップタイ降伏
738	-139	-22.3	負側主筋降伏
1351	-1	-51.8	計測終了

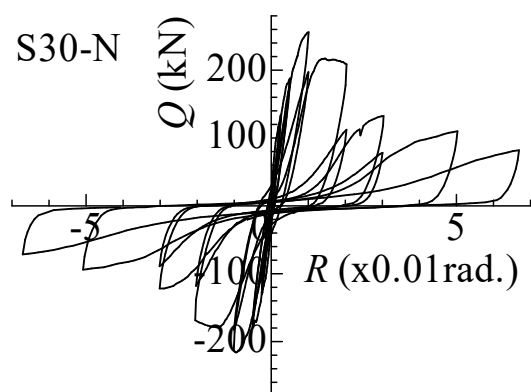


図 2-12 試験体 S30-N 破壊状況

表 2.12 試験体 S30-N 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
28	43	0.5	正側曲げひび割れ発生
38	62	0.8	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm ②0.05mm 除荷時 ①0mm ②0mm
51	100	1.7	正側曲げせん断ひび割れ発生
89	-31	-0.0	負側曲げひび割れ発生
99	-62	-0.7	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.10mm ④0.05mm 除荷時 ③0.05mm ④0.05mm
112	-107	-1.9	負側曲げせん断ひび割れ発生
234	141	3.6	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.25mm ⑥0.20mm 除荷時 ⑤0.10mm ⑥0.05mm
238	159	4.4	正側付着ひび割れ発生
284	-146	-3.8	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.35mm ⑧0.25mm 除荷時 ⑦0.20mm ⑧0.05mm
411	-7	-1.4	筋筋降伏
435	132	4.8	キャップタイ降伏
464	246	10.7	正側主筋降伏
471	256	12.7	正側最大荷重
543	-216	-11.7	負側主筋降伏
544	-216	-12.0	負側最大荷重
1436	-2	-51.3	計測終了

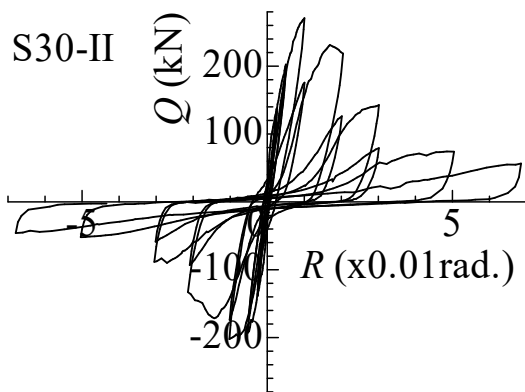


図 2-13 試験体 S30-II 破壊状況

表 2.13 試験体 S30-II 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
27	46	0.4	正側曲げひび割れ発生
34	64	0.7	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm 除荷時 ①0.05mm
47	103	1.7	正側曲げせん断ひび割れ発生
89	-45	-0.2	負側曲げひび割れ発生
96	-64	-0.6	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ②0.10mm 除荷時 ②0mm
109	-103	-1.7	負側曲げせん断ひび割れ発生
251	149	3.8	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.15mm ④0.25mm 除荷時 ③0.05mm ④0.20mm
309	-149	-3.7	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.20mm ⑥0.30mm 除荷時 ⑤0.05mm ⑥0.15mm
478	236	8.8	肋筋降伏
479	243	9.6	正側主筋降伏
491	271	12.7	正側最大荷重
547	-195	-9.0	キャップタイ降伏
551	-199	-11.4	負側主筋降伏
554	-202	-12.9	負側最大荷重
1204	56	40.6	肋筋溶接剥離
1396	-3	-54.7	計測終了

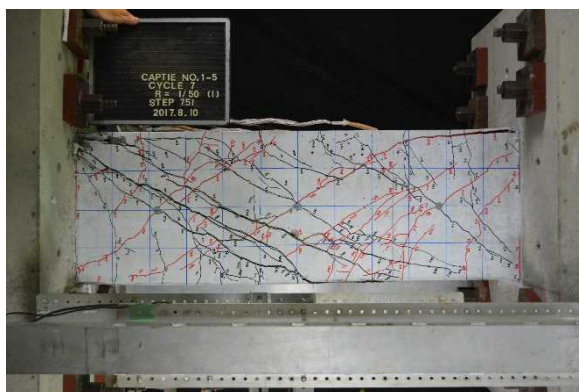
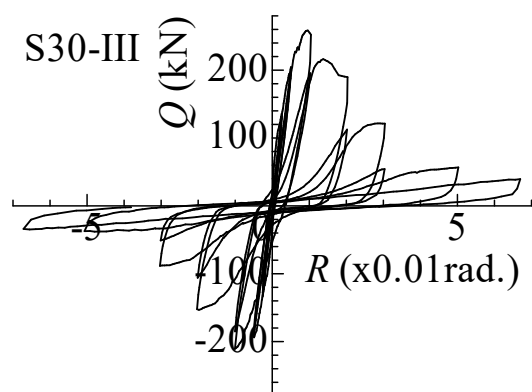


図 2-14 試験体 S30-III 破壊状況

表 2.14 試験体 S30-III 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
27	62	0.6	正側曲げひび割れ発生 正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm 除荷時 ①0.05mm
43	106	1.8	正側曲げせん断ひび割れ発生
84	-44	-0.2	負側曲げひび割れ発生
89	-62	-0.6	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ②0.05mm ③0.05mm 除荷時 ②0.05mm ③0.05mm
100	-101	-1.7	負側曲げせん断ひび割れ発生
255	141	3.5	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.25mm ④0.30mm 除荷時 ①0.05mm ④0.10mm
320	-149	-3.8	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.30mm ⑥0.30mm 除荷時 ⑤0.15mm ⑥0.10mm
487	233	8.8	肋筋降伏
494	237	9.3	正側主筋降伏
505	258	11.7	キャップタイ降伏
506	259	12.1	正側最大荷重
580	-206	-11.6	負側主筋降伏
584	-211	-12.7	負側最大荷重
1442	-2	-48.0	計測終了

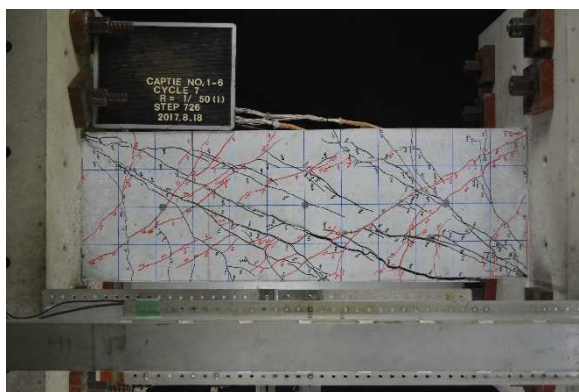
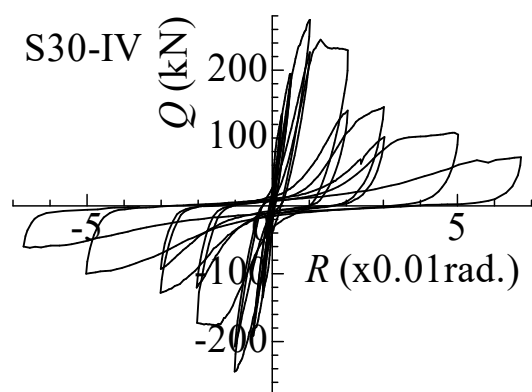


図 2-15 試験体 S30-IV 破壊状況

表 2.15 試験体 S30-IV 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
34	56	0.6	正側曲げひび割れ発生
38	63	0.7	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.05mm 除荷時 ①0mm
57	107	2.0	正側曲げせん断ひび割れ発生
92	-35	-0.1	負側曲げひび割れ発生
100	-62	-0.6	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ②0.05mm 除荷時 ②0.05mm
113	-109	-2.2	負側曲げせん断ひび割れ発生
237	143	3.7	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.30mm ④0.40mm 除荷時 ③0.05mm ④0.10mm
252	194	6.3	筋筋降伏
289	-147	-3.8	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.30mm ⑥0.35mm 除荷時 ⑤0.05mm ⑥0.10mm
450	232	8.7	正側主筋降伏
464	274	12.8	正側最大荷重
526	-211	-9.3	負側主筋降伏
538	-244	-12.8	負側最大荷重
539	-218	-12.5	キャップタイ降伏
1468	-2	-45.2	計測終了

2.2.2 セン断力一部材角関係の比較

コンクリート強度 18MPa シリーズ各試験体のせん断力一部材角関係の包絡線を比較して、図 2-16 に示す。正側 1/50rad.加力サイクル時までは、通常 135° フックの肋筋を用いた試験体の荷重よりキャップタイ試験体の荷重が大きい。負側ではほぼ同等となった。大変形時には、キャップタイ梁側面定着部のひび割れが拡幅し、梁上端のかぶりコンクリートがキャップタイに押し上げられたことで、コアコンクリートの拘束が少なくなり、タイプ II およびタイプ III のキャップタイを用いた試験体の荷重が小さくなっている。一方、タイプ IV のキャップタイを用いた試験体の荷重は、通常 135° フックの肋筋を用いた試験体と同等であった。

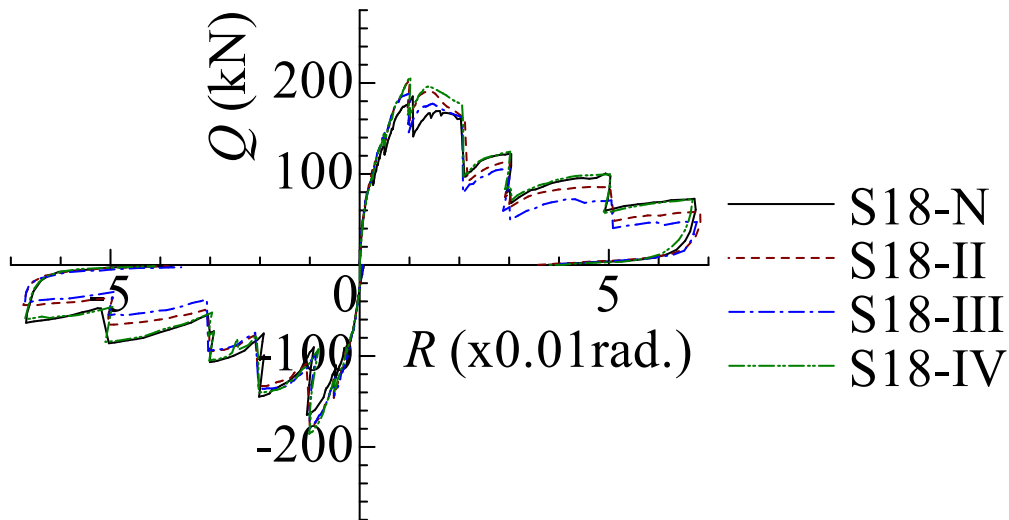


図 2-16 繰返しせん断性状実験における
せん断力一部材角関係の包絡線の比較 (18MPa シリーズ)

コンクリート強度 30MPa シリーズ各試験体のせん断力-部材角関係の包絡線を比較して、図 2-17 に示す。18MPa シリーズ試験体とほぼ同様の傾向が見られるが、タイプ III のキャップタイを用いた試験体の荷重が他の試験体より小さくなった。

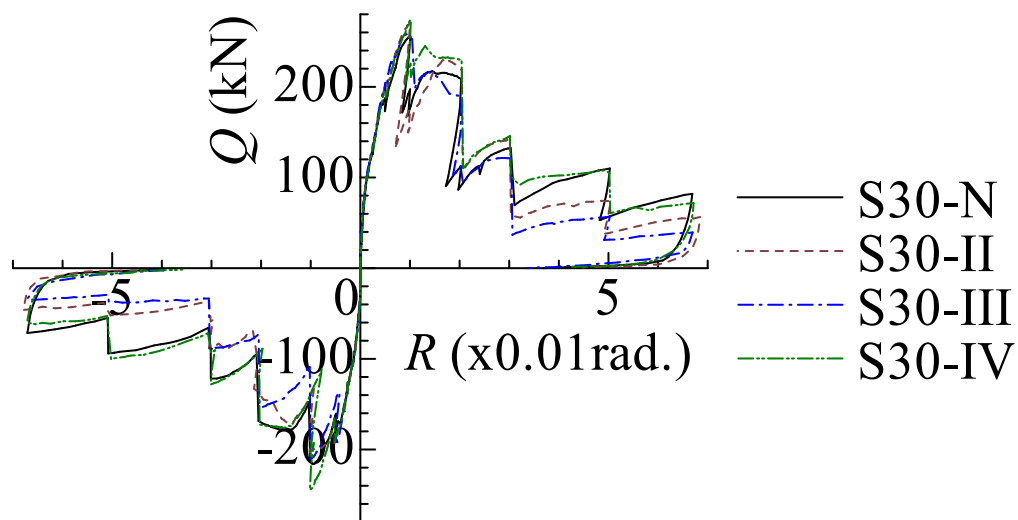


図 2-17 繰返しせん断性状実験における
せん断力-部材角関係の包絡線の比較 (30MPa シリーズ)

2.2.3 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 2.16 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]（以下、RC 規準）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（18MPa シリーズ）、0.64（30MPa シリーズ）、終局強度型指針式 A 法（非靱性）で 0.59（18MPa シリーズ）、0.76（30MPa シリーズ）である。

最大荷重の実験値は、特に 30MPa シリーズ試験体において顕著に差が生じており、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 1.14～1.28（18MPa シリーズ）、1.22～1.35（30MPa シリーズ）、終局強度型指針式 A 法（非靱性）で 0.99～1.11（18MPa シリーズ）、1.03～1.14（30MPa シリーズ）である。

キャップタイを用いた試験体の最大荷重は通常 135° フックの肋筋を用いた試験体と同等、もしくはそれ以上であり、18MPa シリーズ試験体では 1.05～1.12 倍、30MPa シリーズ試験体では 1.00～1.10 倍であった。

表 2.16 繰返しせん断性状実験における最大荷重と計算値との比較

試験体	実験値 (kN)		曲げ 強度 計算値 cQ_{mu} (kN)	せん断強度 計算値 (kN)		$\frac{{}^eQ_{max}}{cQ_{su,mean}}$	$\frac{{}^eQ_{max}}{cQ_{su,A}}$	
	加力方向別	正負平均 eQ_{max}		$cQ_{su,mean}$	$cQ_{su,A}$			
S18-N	正	185	299	153	177	1.14	0.99	
	負	165						
S18-II	正	204				191	1.25	1.08
	負	178						
S18-III	正	188				184	1.20	1.04
	負	180						
S18-IV	正	206				196	1.28	1.11
	負	186						
S30-N	正	256	299	192	227	1.23	1.04	
	負	216						
S30-II	正	271				237	1.23	1.04
	負	202						
S30-III	正	259				235	1.22	1.03
	負	211						
S30-IV	正	274				259	1.35	1.14
	負	244						

* 計算に用いた材料の特性は、材料試験結果に基づく

A) 曲げ強度計算値 (略算式)

$${}_cQ_{mu} = 0.9 \sum a_t \cdot \sigma_y \cdot d / (L_0 / 2)$$

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 (513MPa)
- d : 有効せい
- L_0 : 内法スパン (1260mm)

B) せん断強度荒川 mean 式

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

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 (=0.82 $p_t^{0.23}$)
- σ_B : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm²)
- M/Qd : せん断スパン比 ($M/Qd \leq 3$)
- 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 (=7/8 d) (cm)
- d : 有効せい (1 段目主筋と 2 段目主筋の図心位置)

C) せん断強度終局強度型指針式 A 法

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

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 (359MPa)
- 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

2.2.4 局所変形

1/50rad.加力サイクルまでにおける、せん断力と各測定区間のせん断変形量の関係を図 2-18～図 2-21 に示す。せん断変形量は、図 2-6 に示す各測定区間でトラス状に設置した変位計で測定した変形からモールの歪円を用いてせん断歪を算出し、測定区間までの距離を乗じて全体変形相当に換算した。なお測定区間内のひび割れが大きく拡幅し、変位計の測定容量を超えた時点からのデータは取り除いている。概ね 1/100rad.加力サイクルにて最大耐力に至った後に、主として区間 2 および区間 3 のせん断変形量が大きくなった。特にタイプ II、タイプ III のキャップタイ試験体では、1/50rad.負側サイクルにて 10mm を大幅に超えるせん断変形が見られ、通常配筋試験体およびタイプ IV のキャップタイ試験体に比べせん断変形量が大きくなっている。

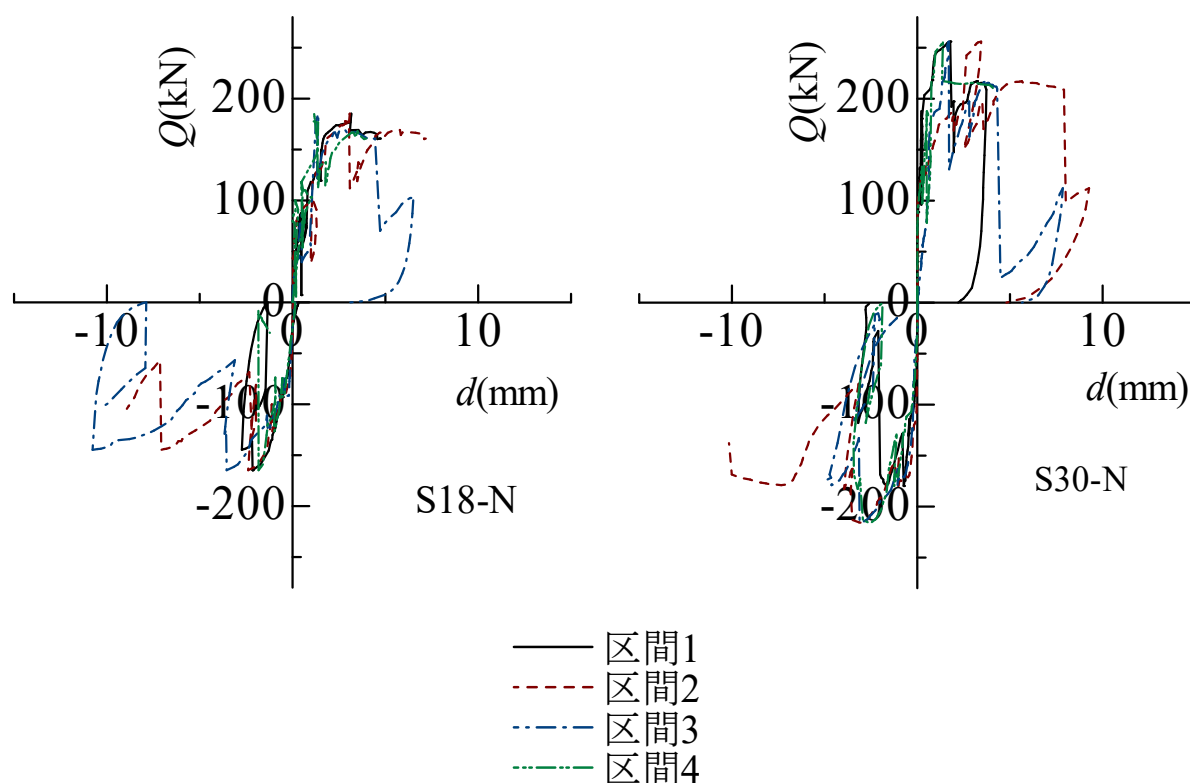


図 2-18 せん断力ー局所せん断変形関係の包絡線（通常配筋試験体）

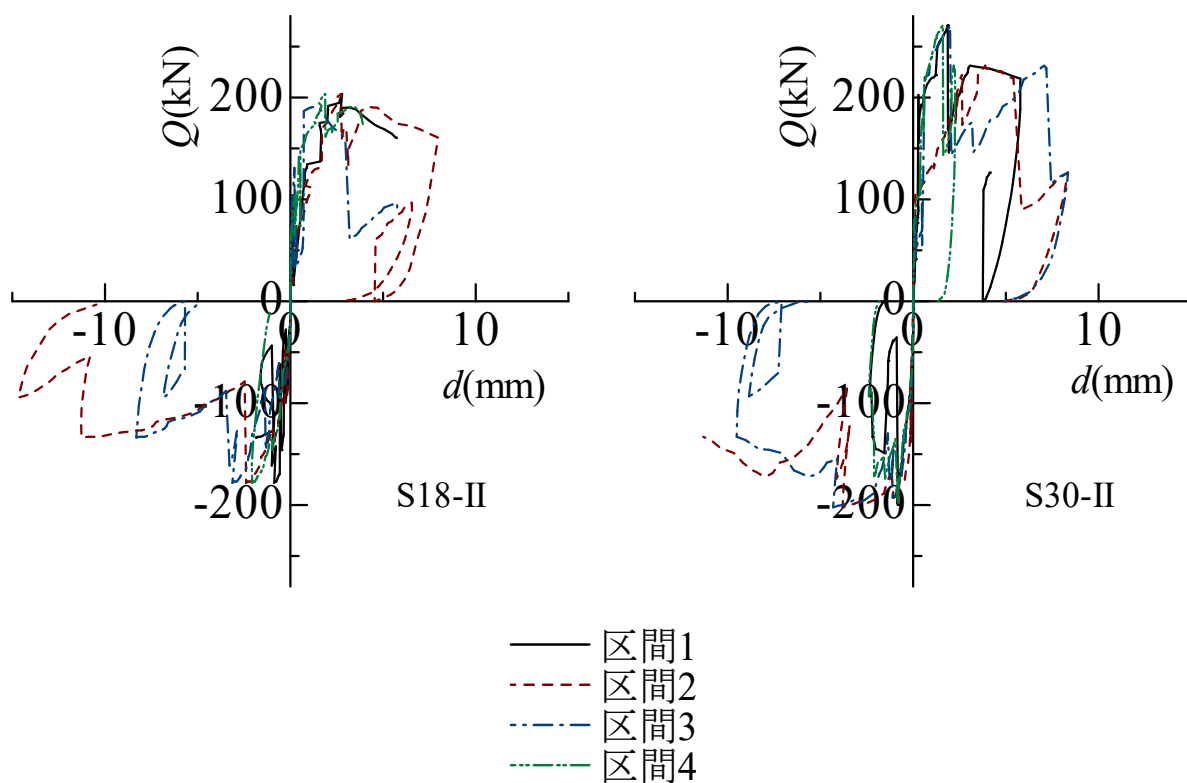


図 2-19 セン断力ー局部せん断変形関係の包絡線 (キャップタイ試験体タイプ II)

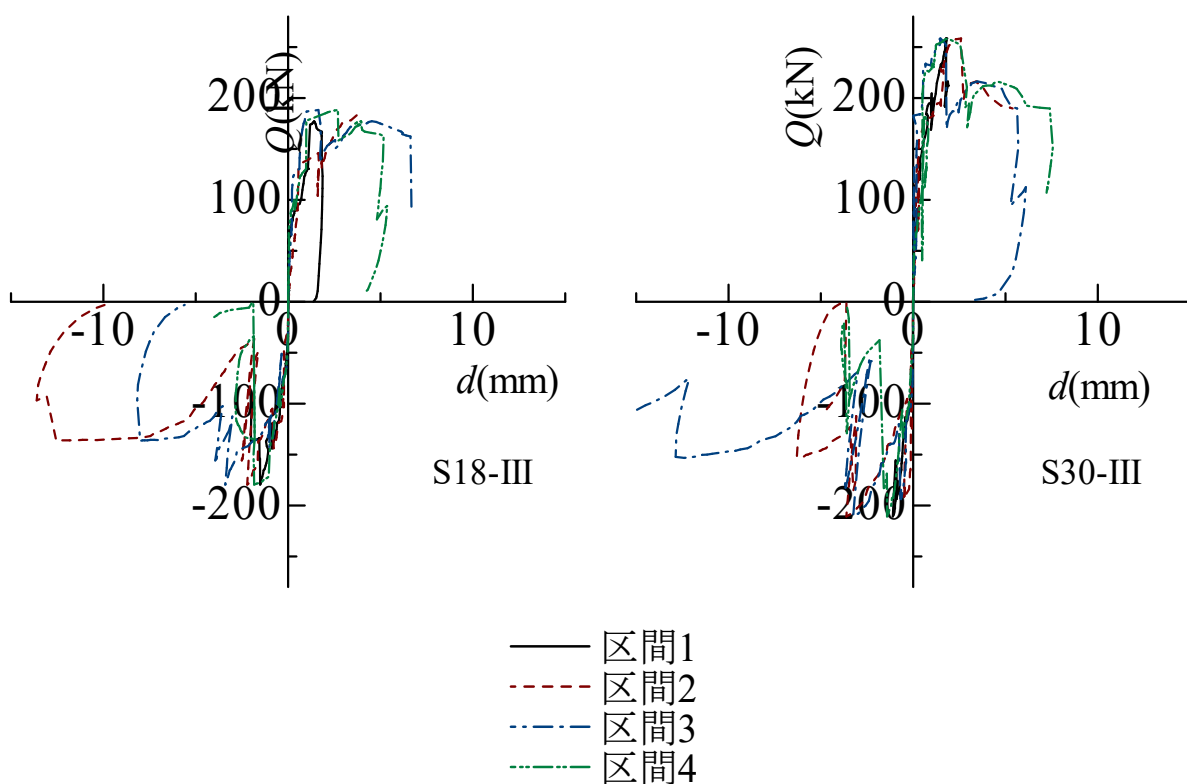


図 2-20 セン断力ー局部せん断変形関係の包絡線 (キャップタイ試験体タイプ III)

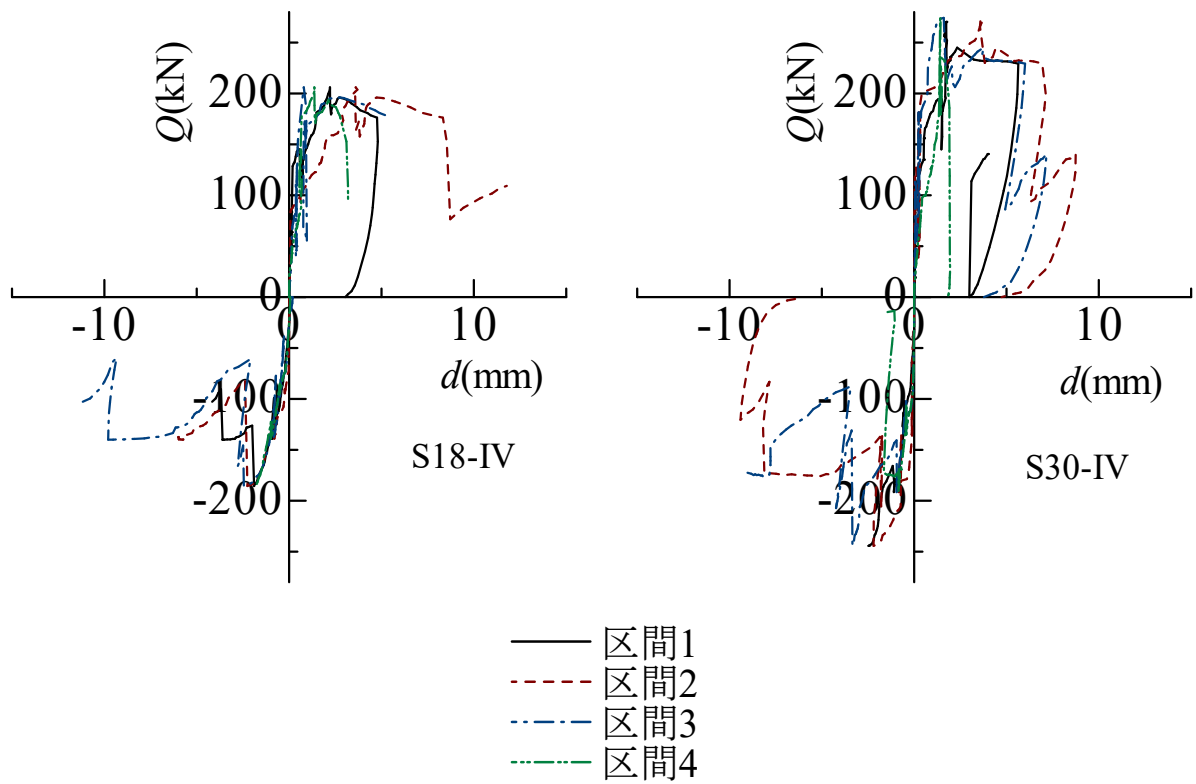


図 2-21 セン断力ー局部せん断変形関係の包絡線 (キャップタイ試験体タイプ IV)

2.2.5 主筋および肋筋の歪分布

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 2-22～図 2-44 に示す。

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見られなかった。一般的に 1 段目主筋の歪が 2 段目主筋より大きくなっている。18MPa シリーズ試験体よりも 30MPa シリーズ試験体の方が歪の勾配が明瞭で、主筋の付着応力が大きくなっていると考えられる。

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 2-24～図 2-45 に示す。肋筋側面の歪はおおむね $1/100\text{rad.}$ 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 $1/50\text{rad.}$ 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。

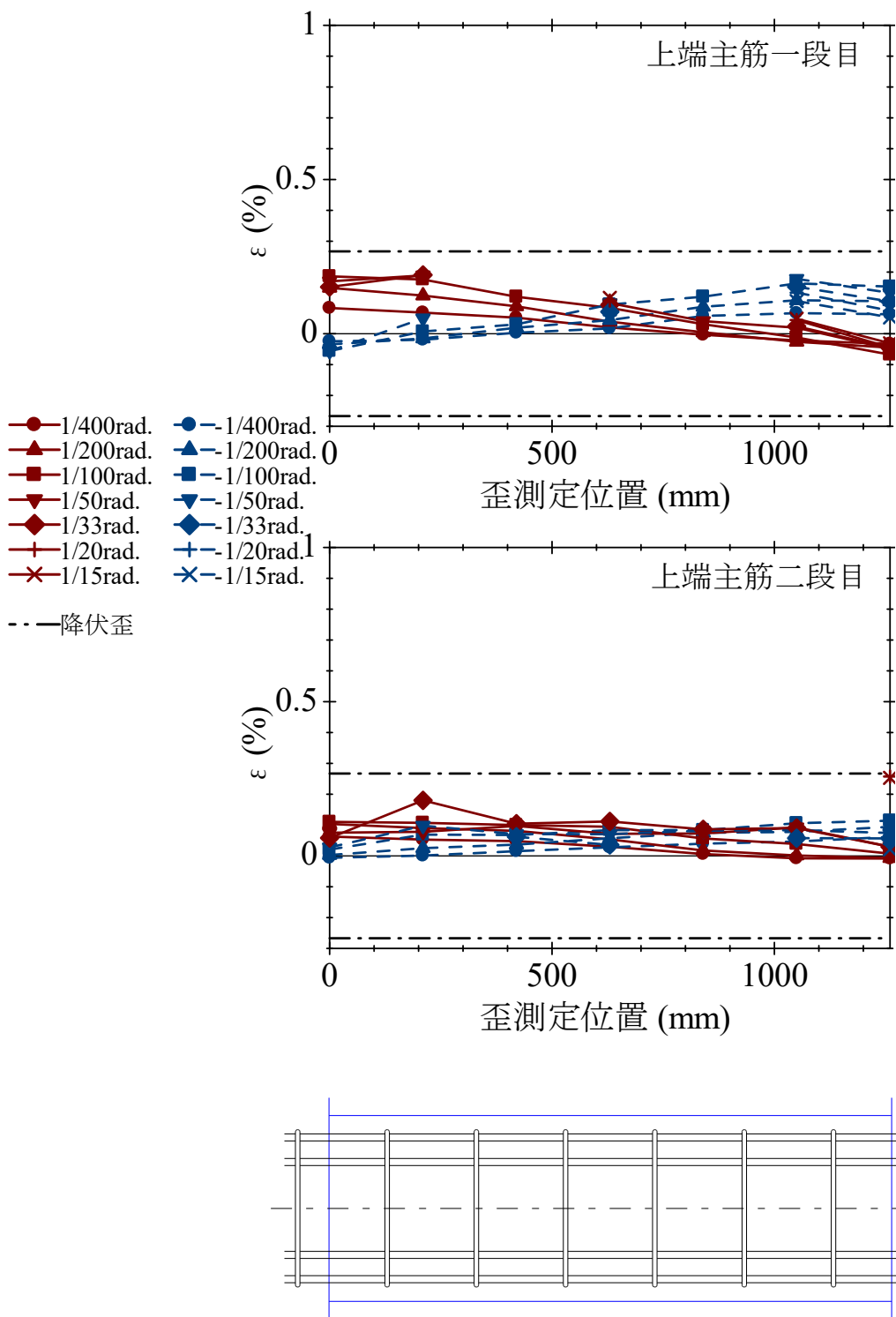


図 2-22 試験体 S18-N 上端主筋の歪分布

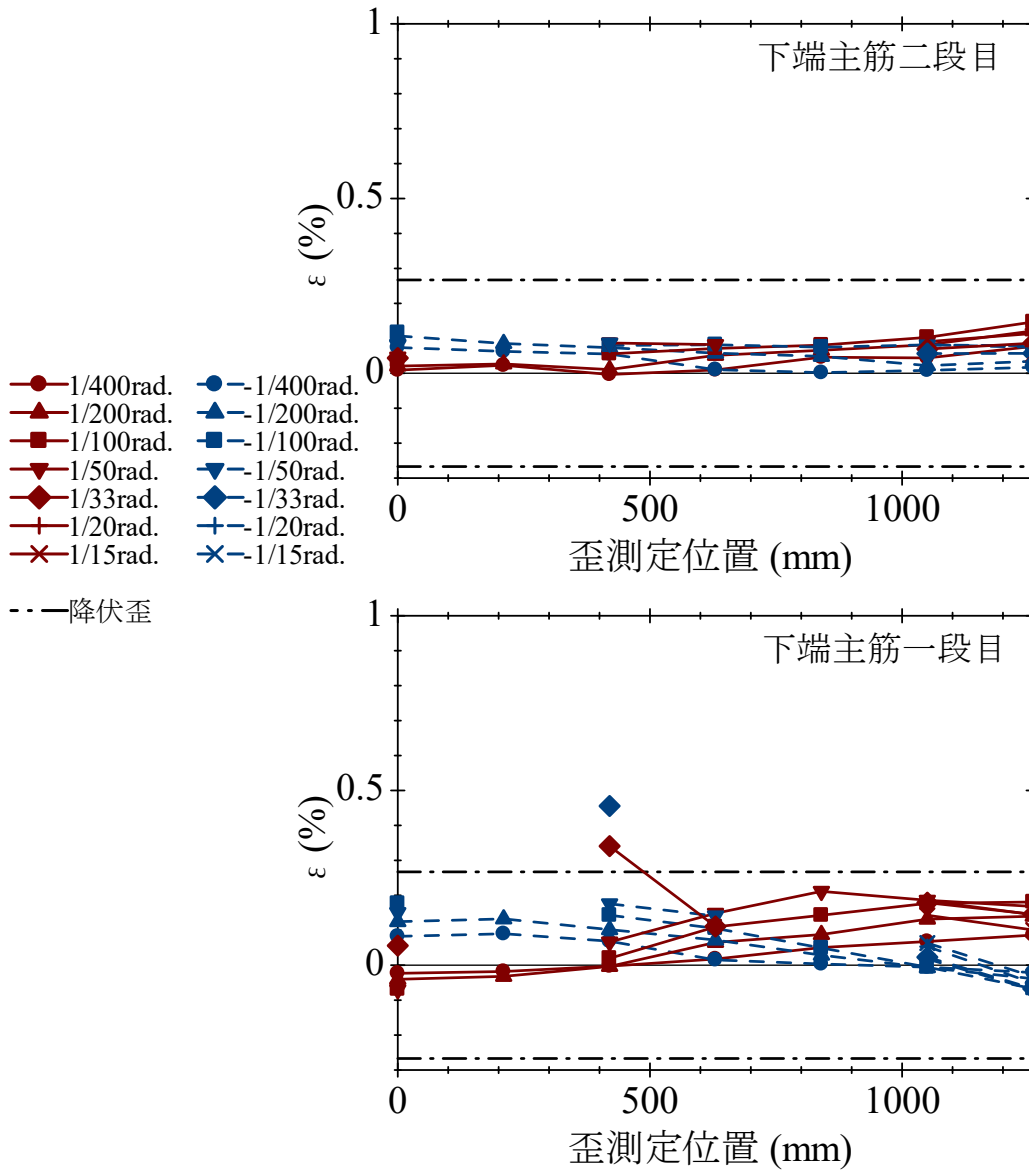
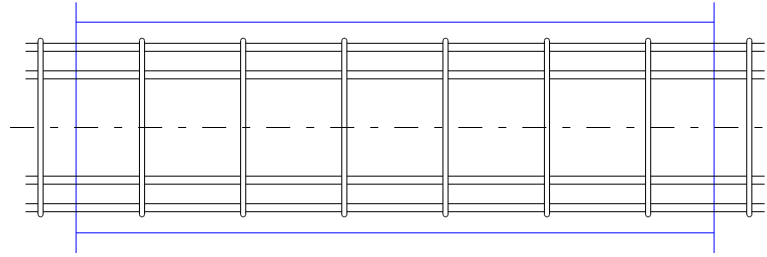


図 2-23 試験体 S18-N 下端主筋の歪分布

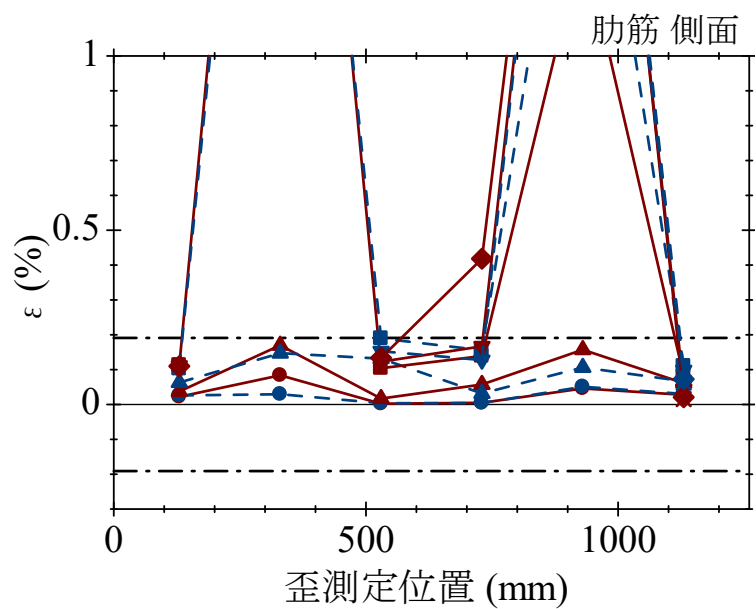
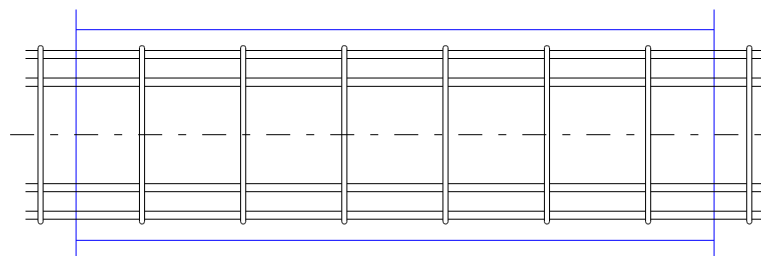
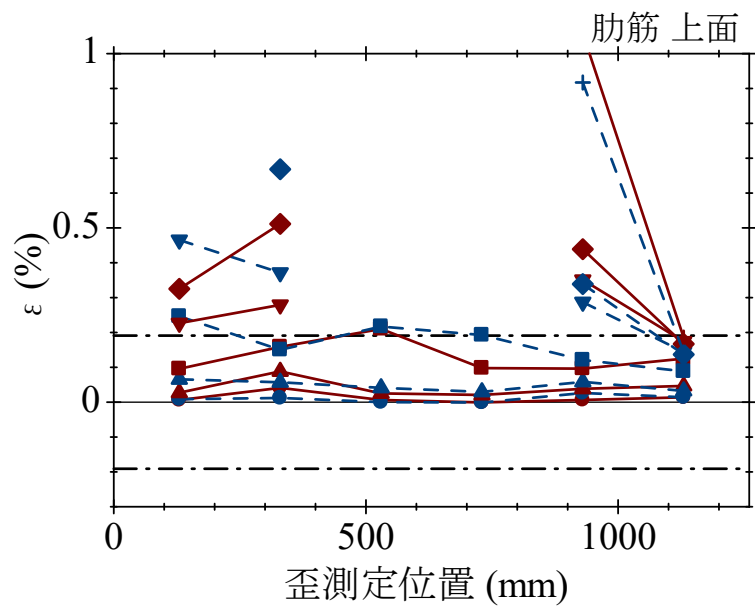


図 2-24 試験体 S18-N 肋筋の歪分布

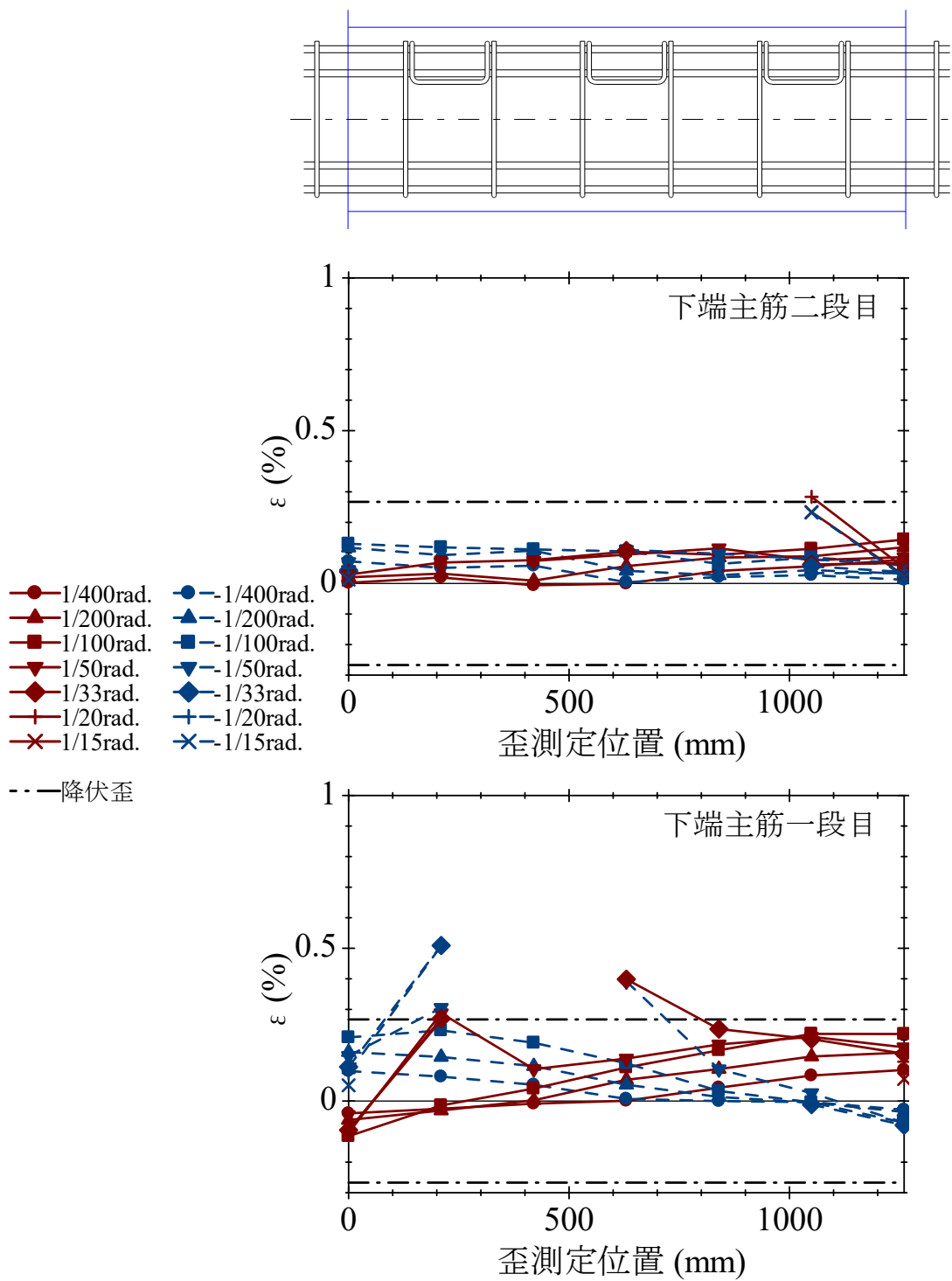


図 2-26 試験体 S18-II 下端主筋の歪分布

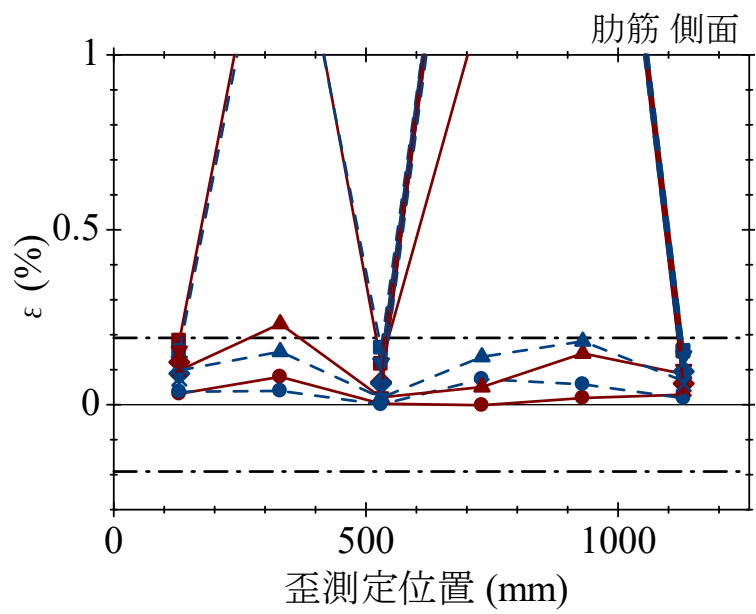
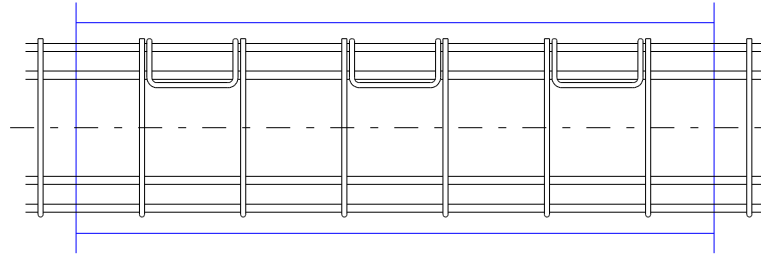
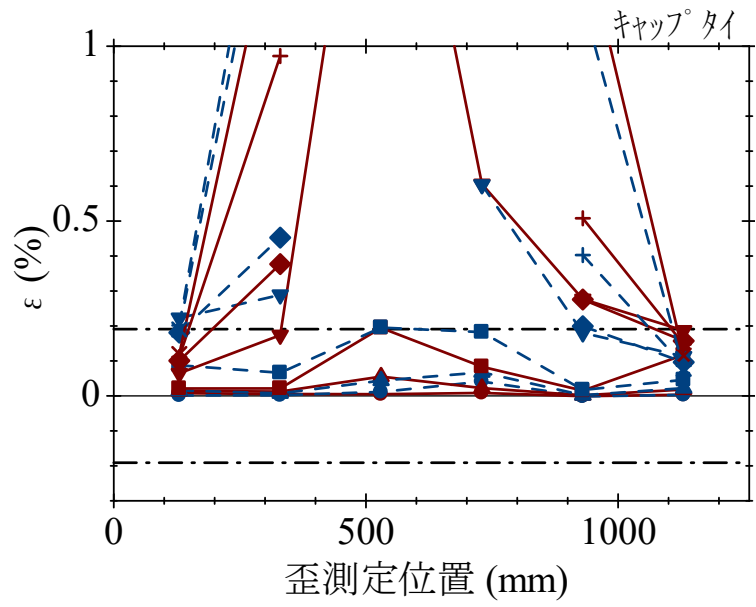


図 2-27 試験体 S18-II キャップタイと肋筋の歪分布

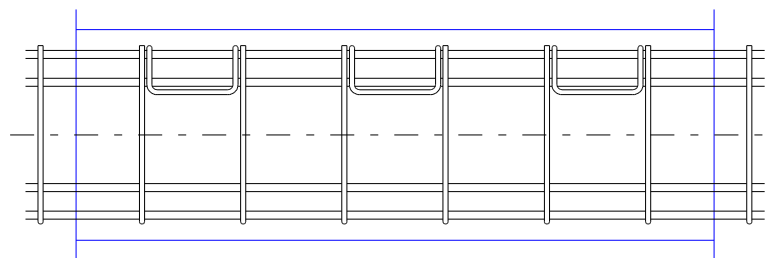
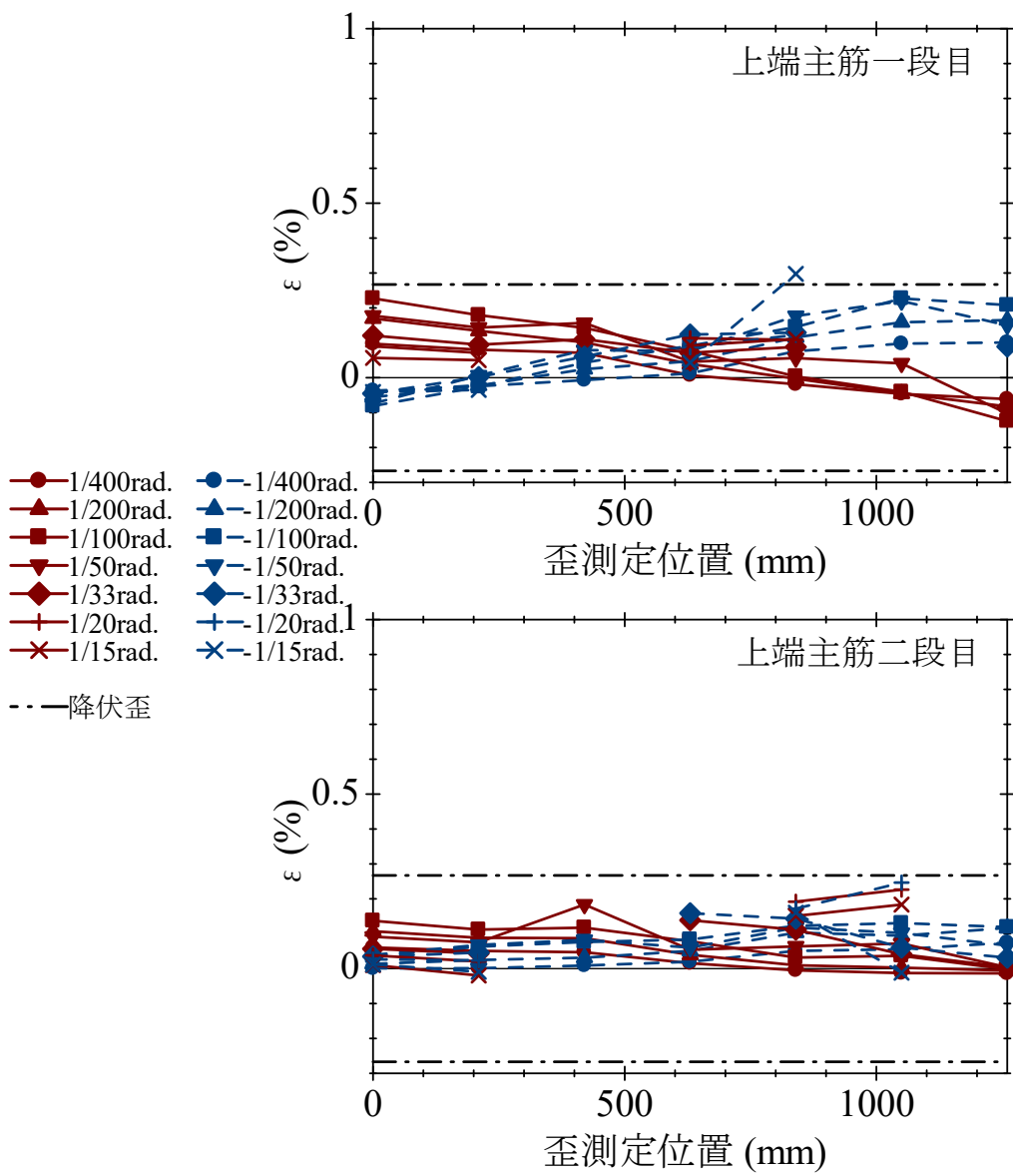


図 2-28 試験体 S18-III 上端主筋の歪分布

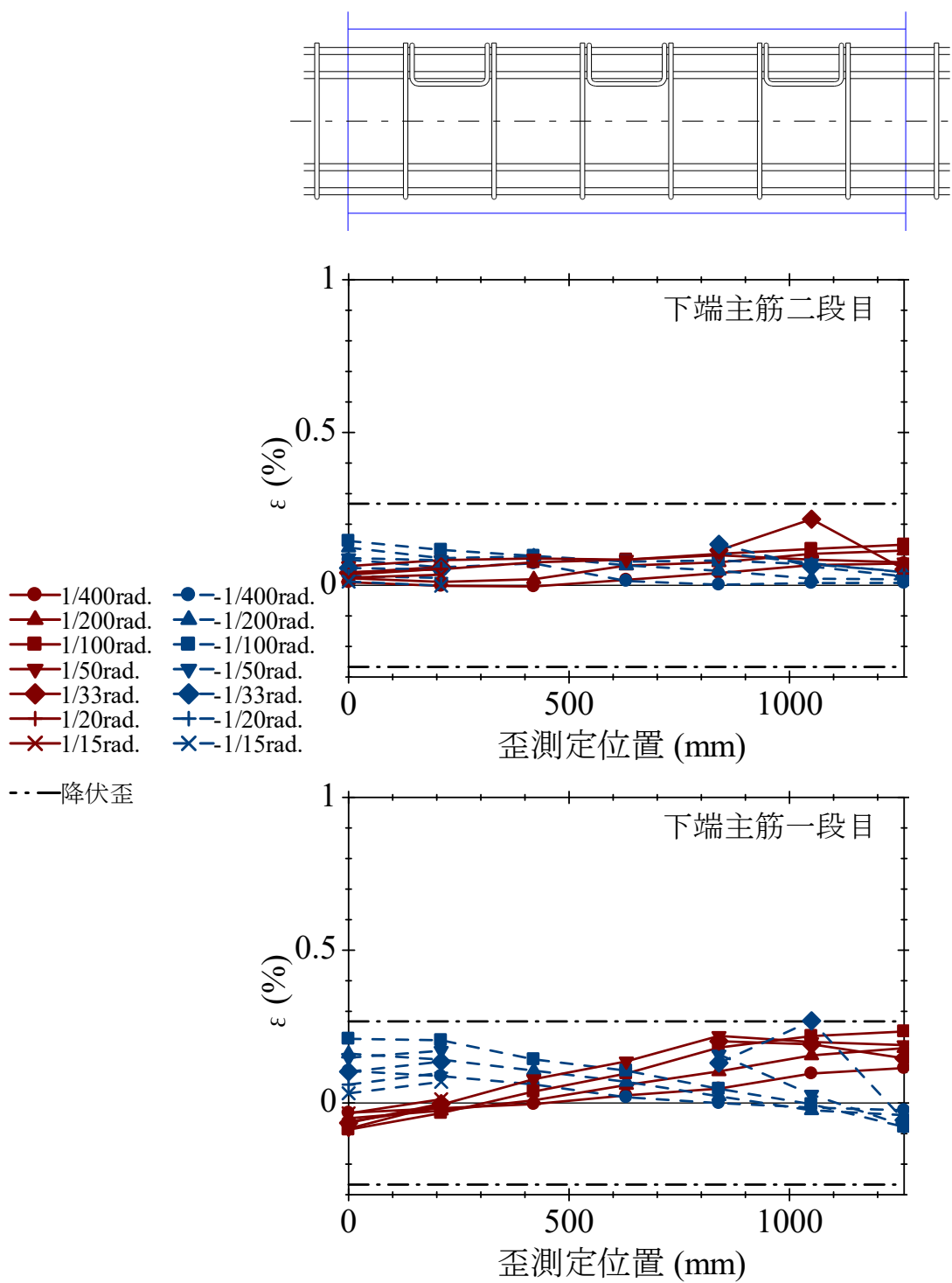


図 2-29 試験体 S18-III 下端主筋の歪分布

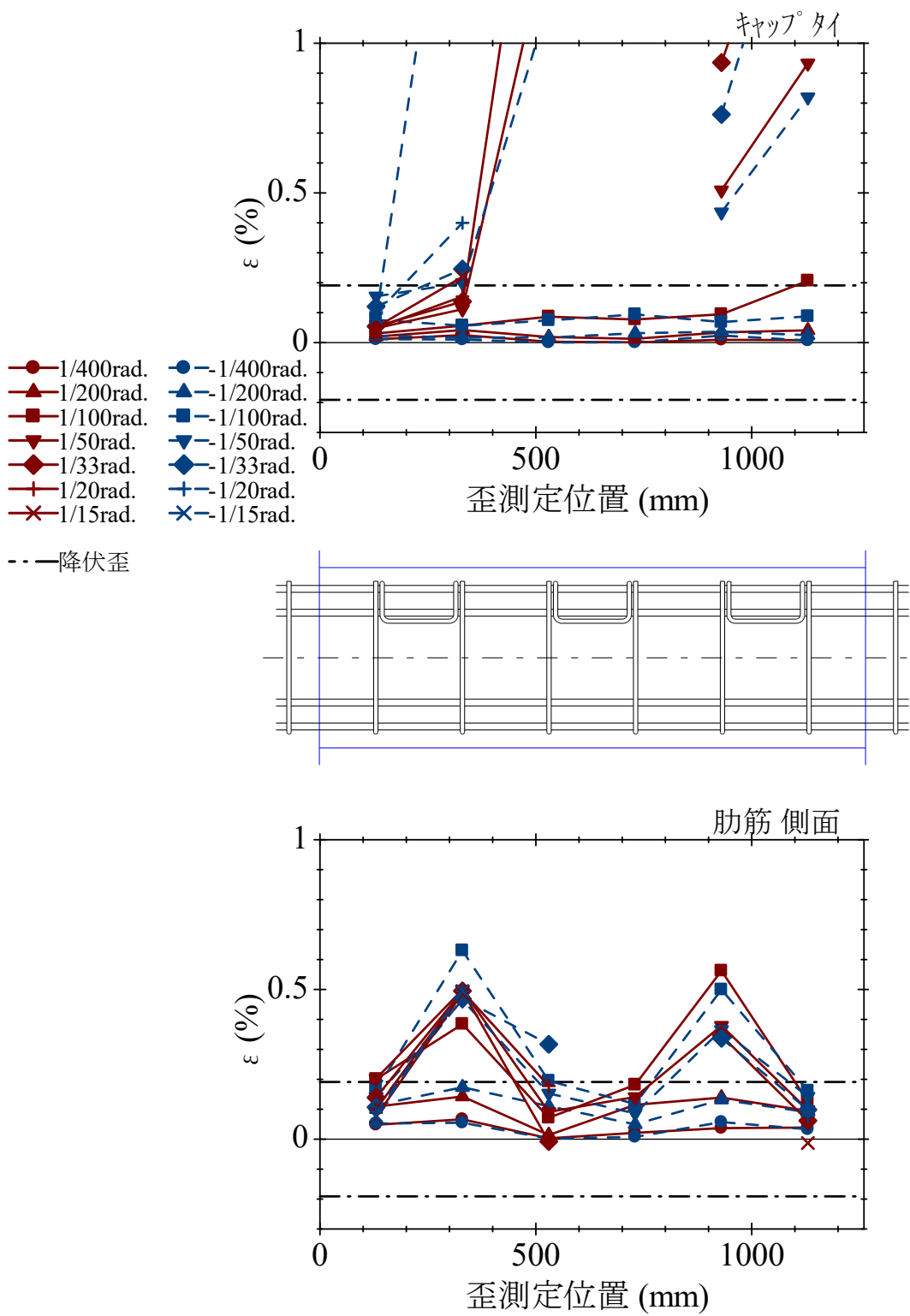


図 2-30 試験体 S18-III キャップタイと肋筋の歪分布

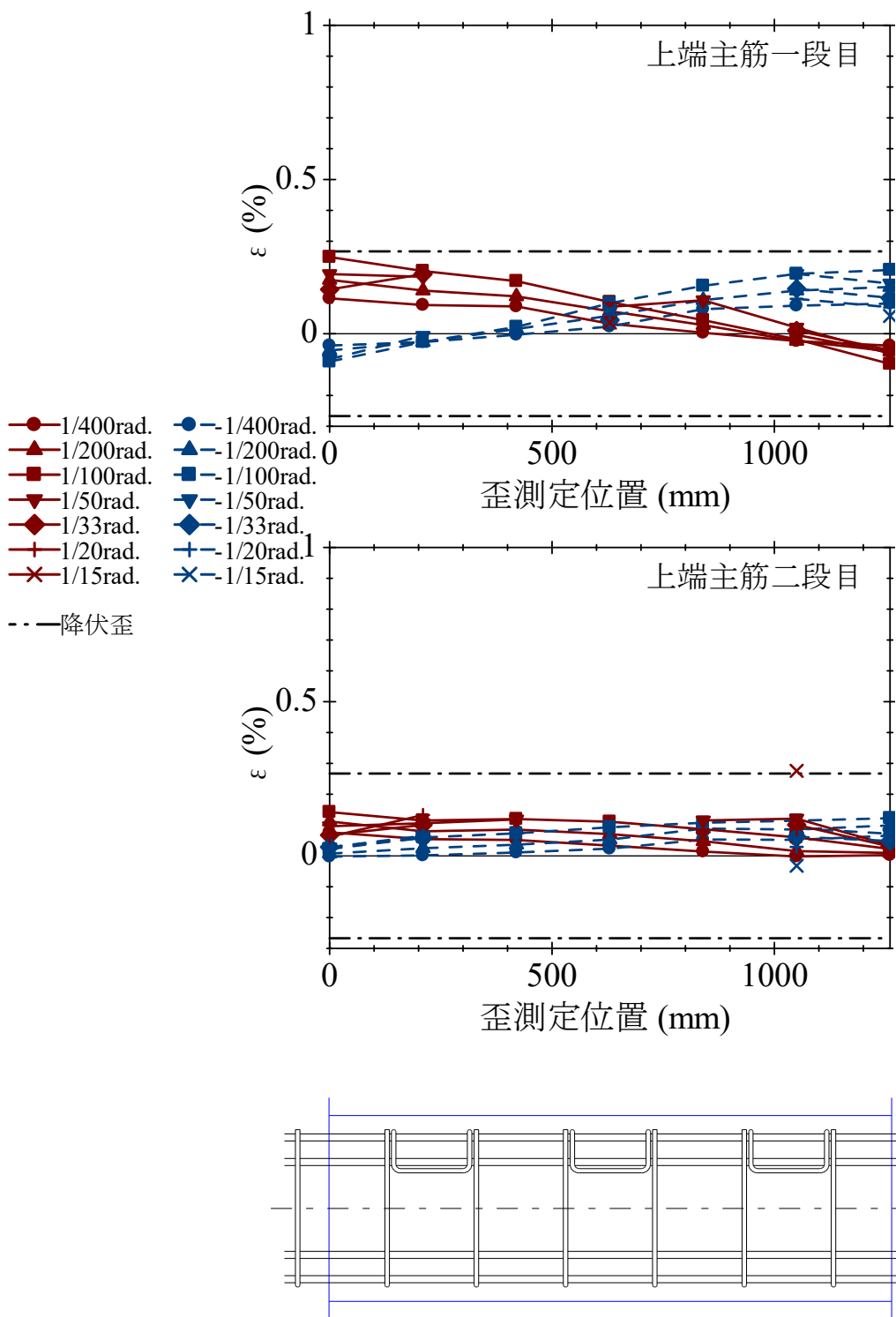


図 2-31 試験体 S18-IV 上端主筋の歪分布

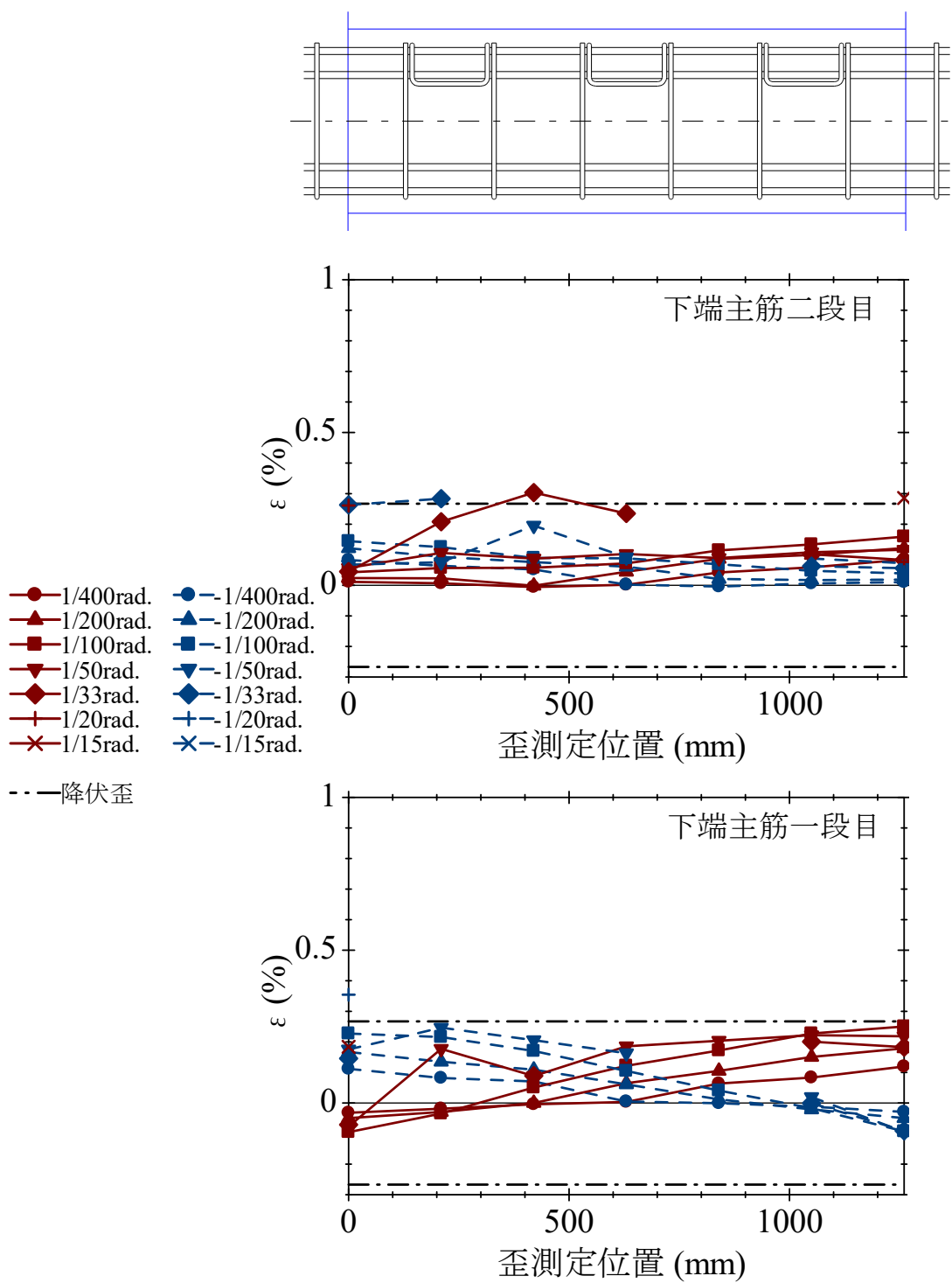


図 2-32 試験体 S18-IV 下端主筋の歪分布

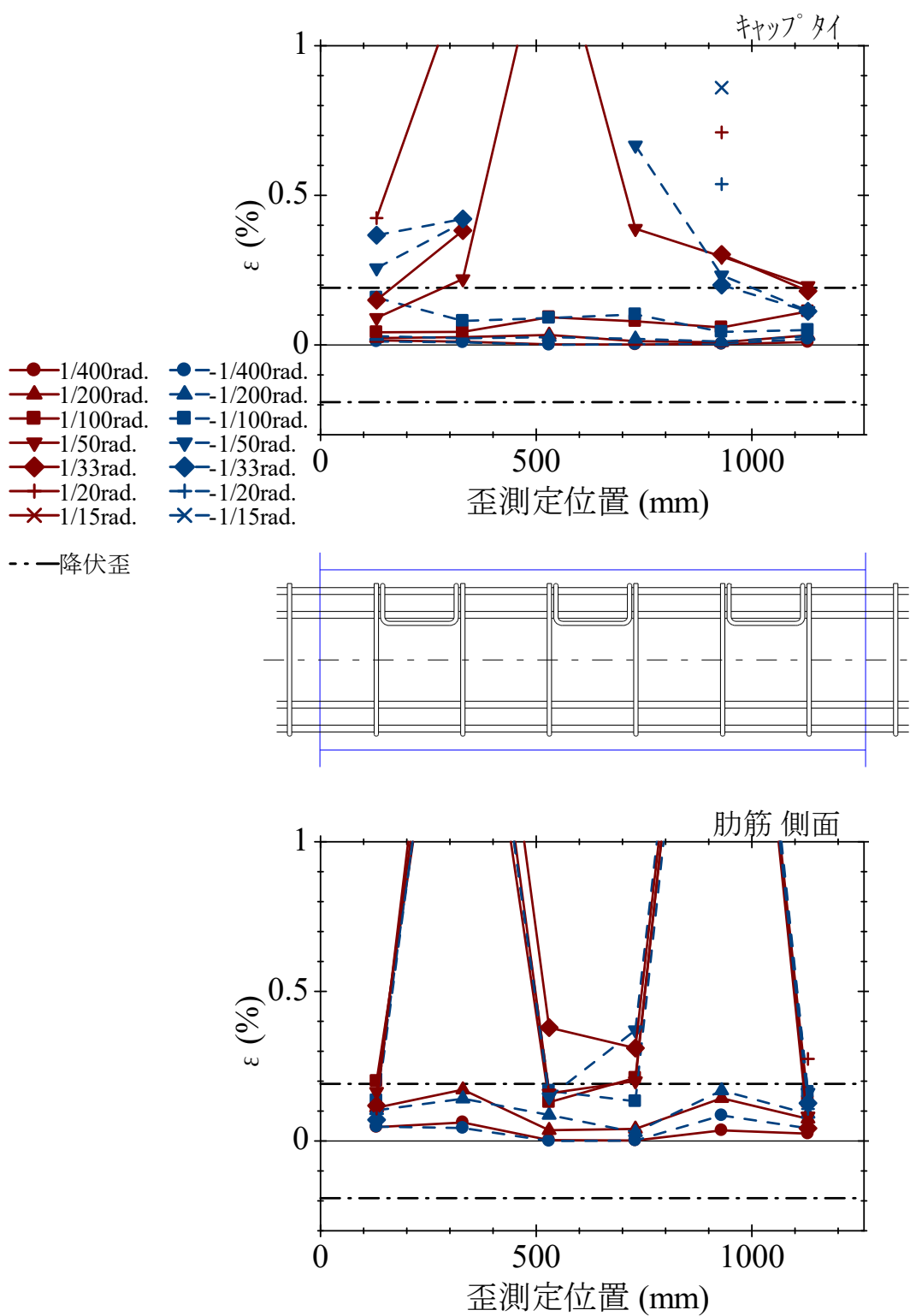


図 2-33 試験体 S18-IV キャップタイと肋筋の歪分布

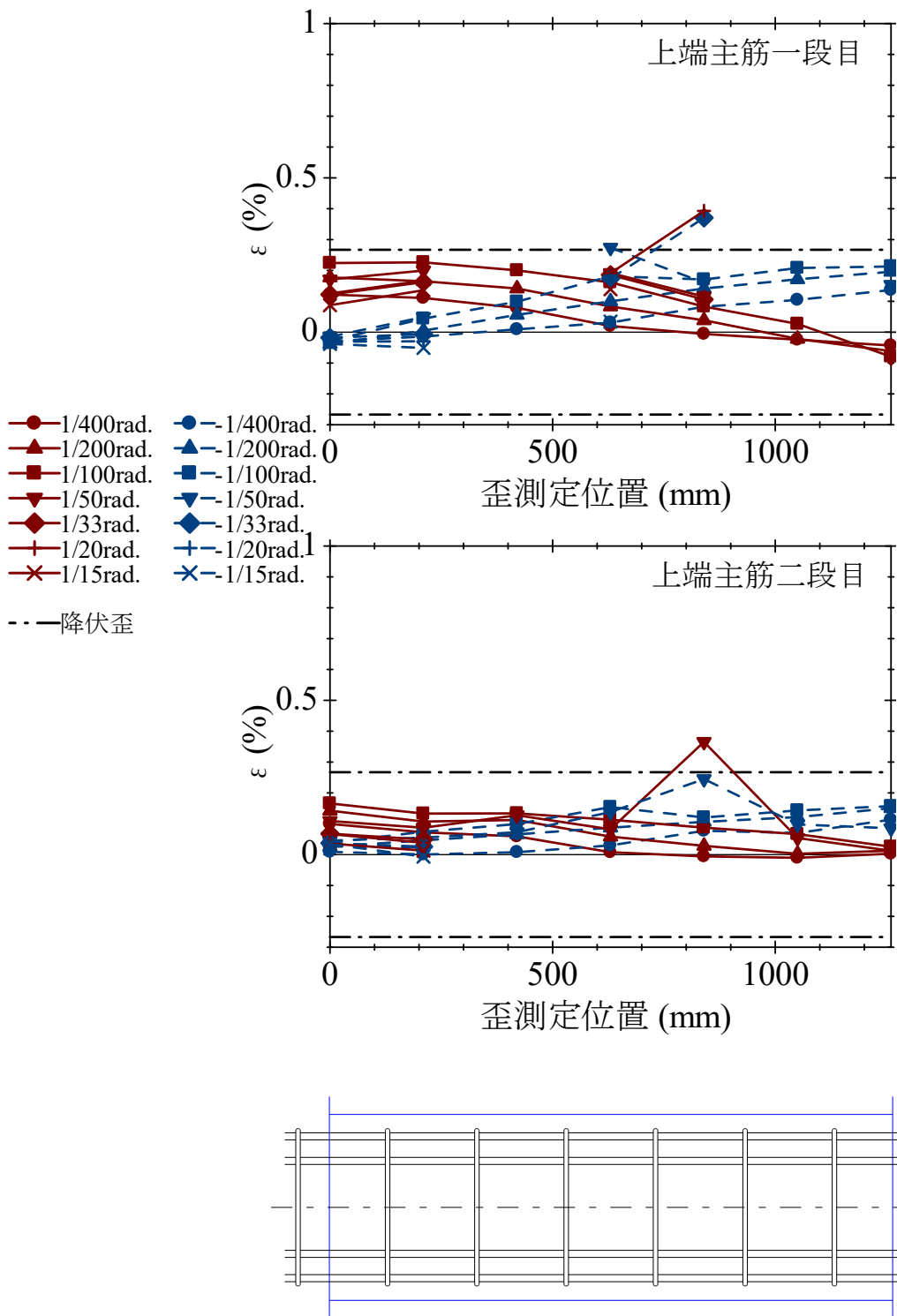


図 2-34 試験体 S30-N 上端主筋の歪分布

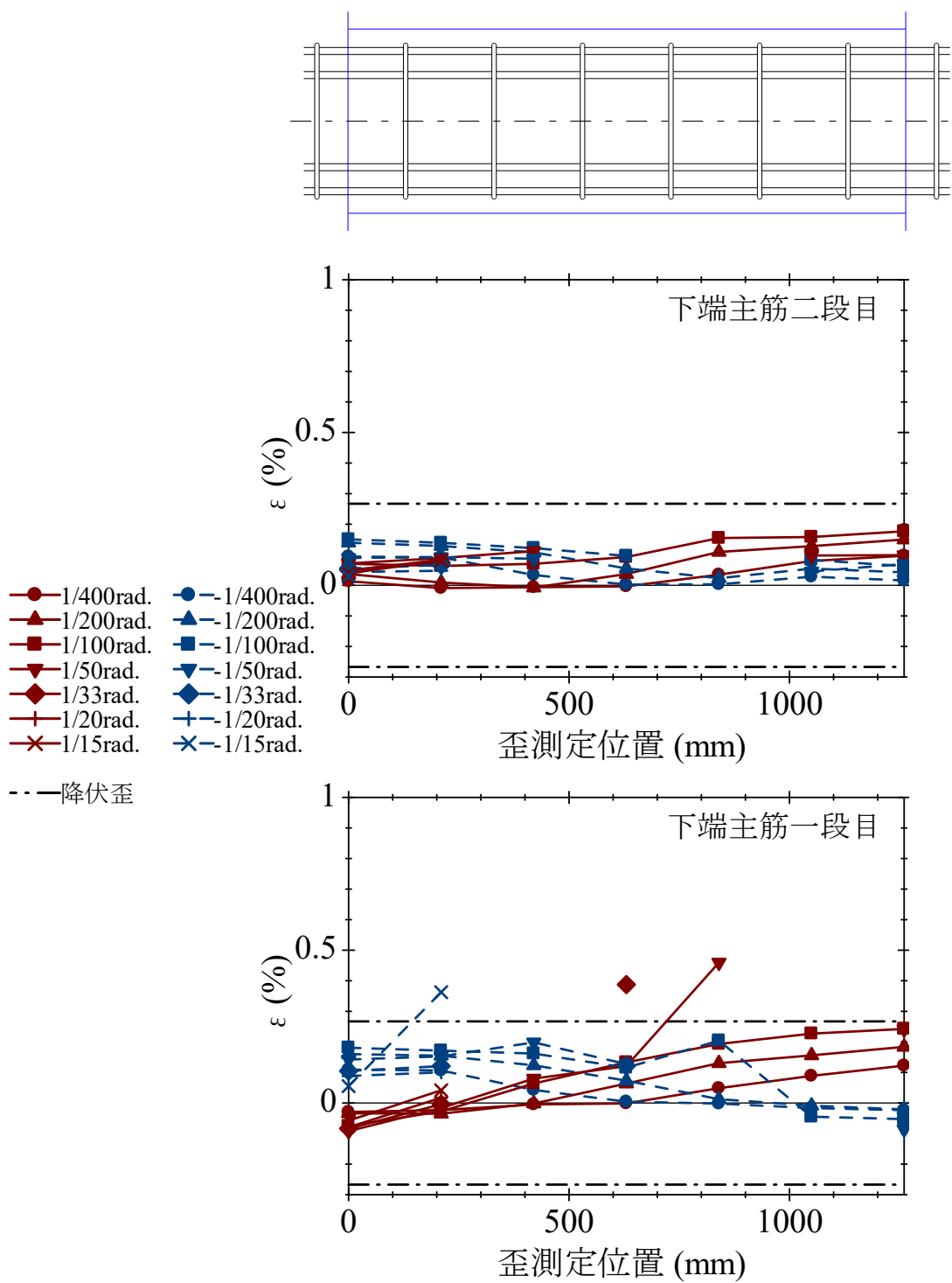


図 2-35 試験体 S30-N 下端主筋の歪分布

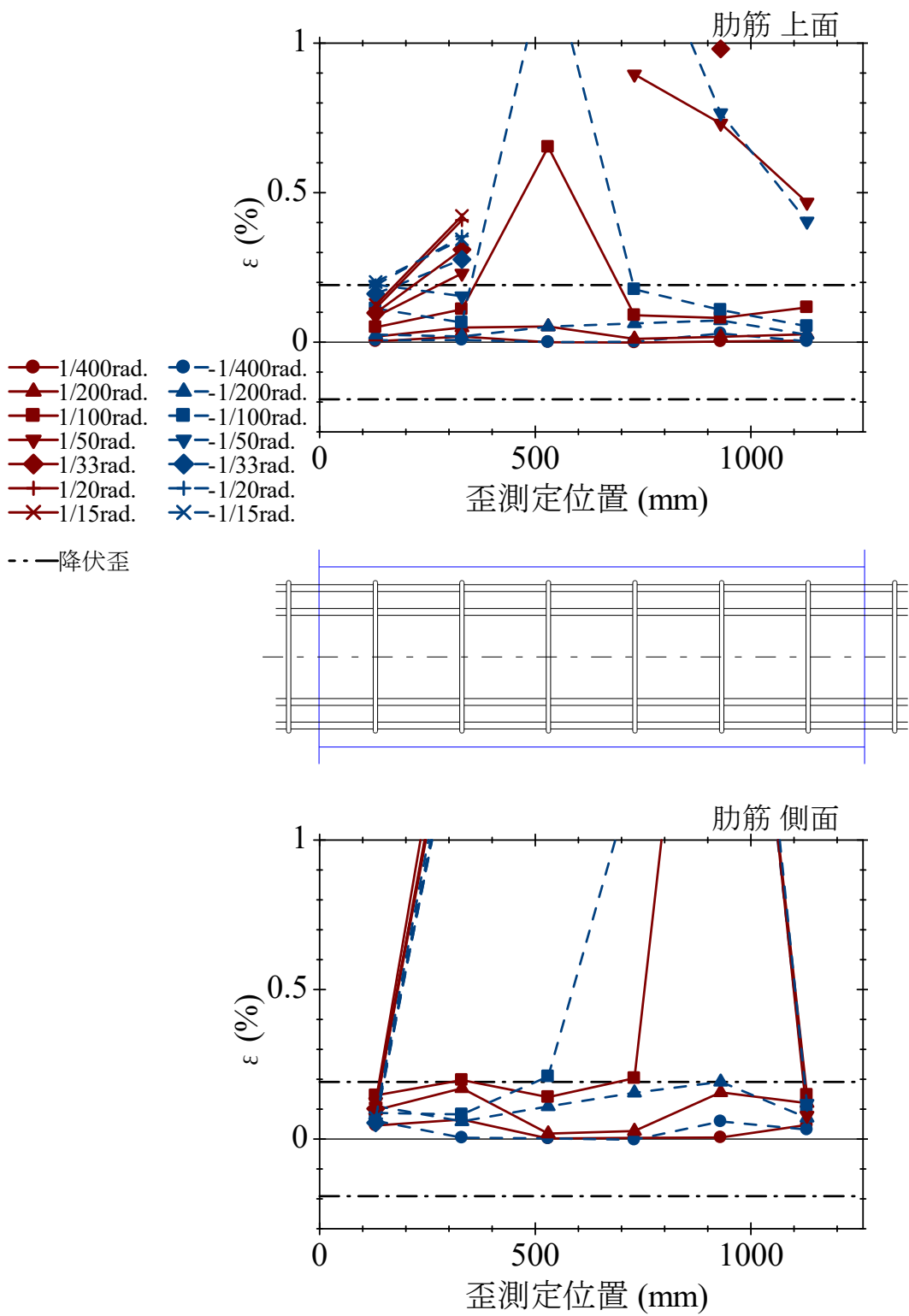


図 2-36 試験体 S30-N 筋筋の歪分布

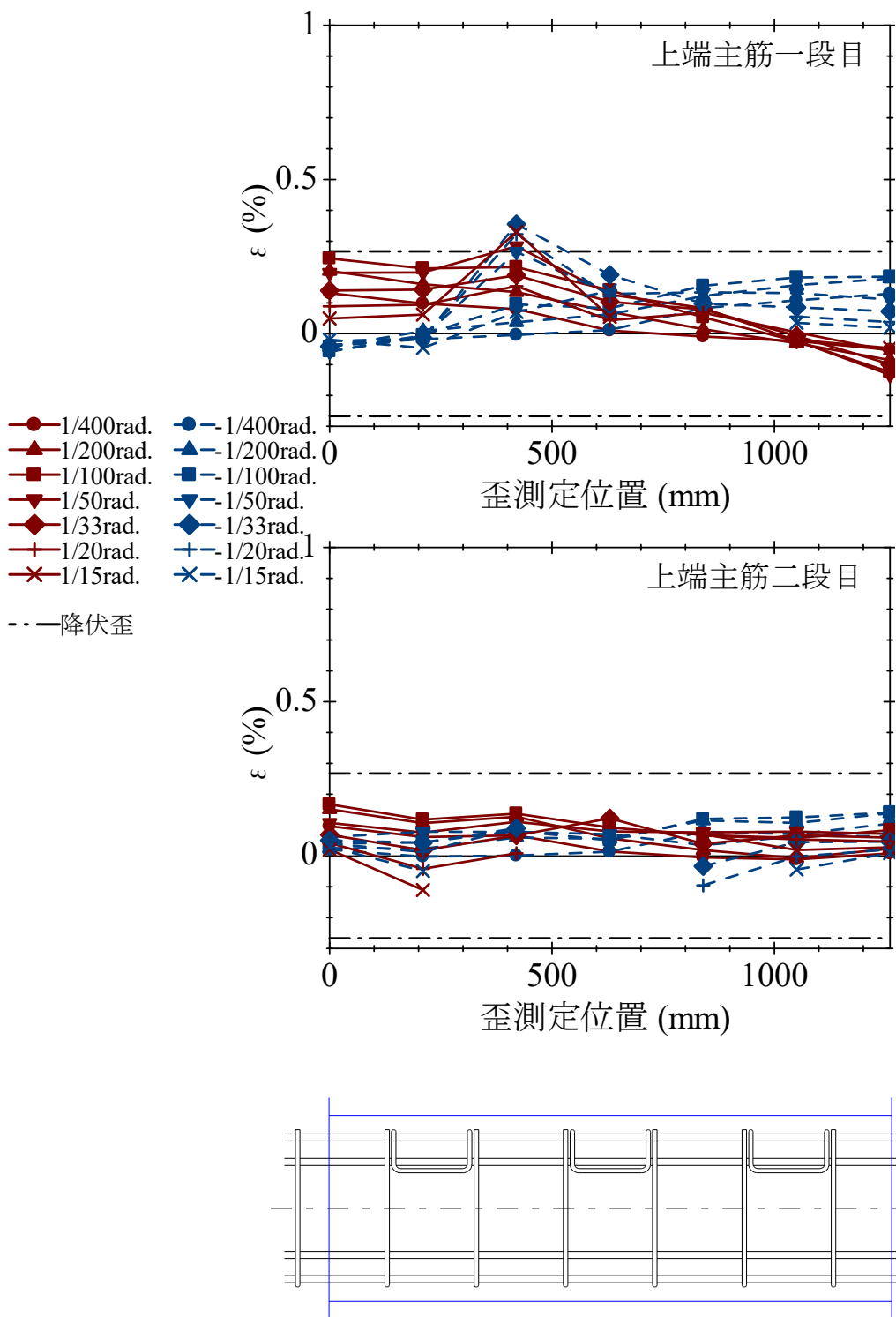


図 2-37 試験体 S30-II 上端主筋の歪分布

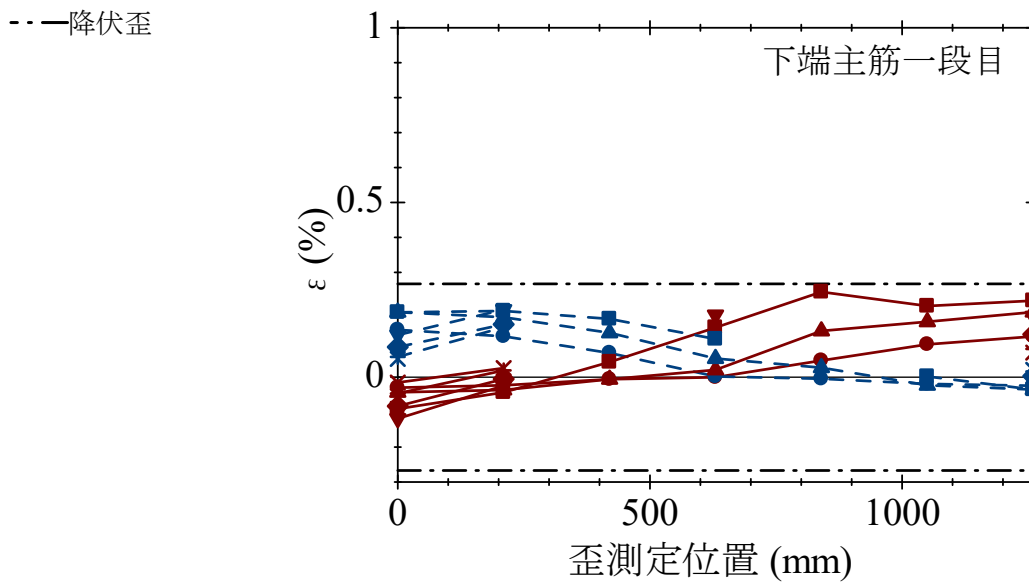
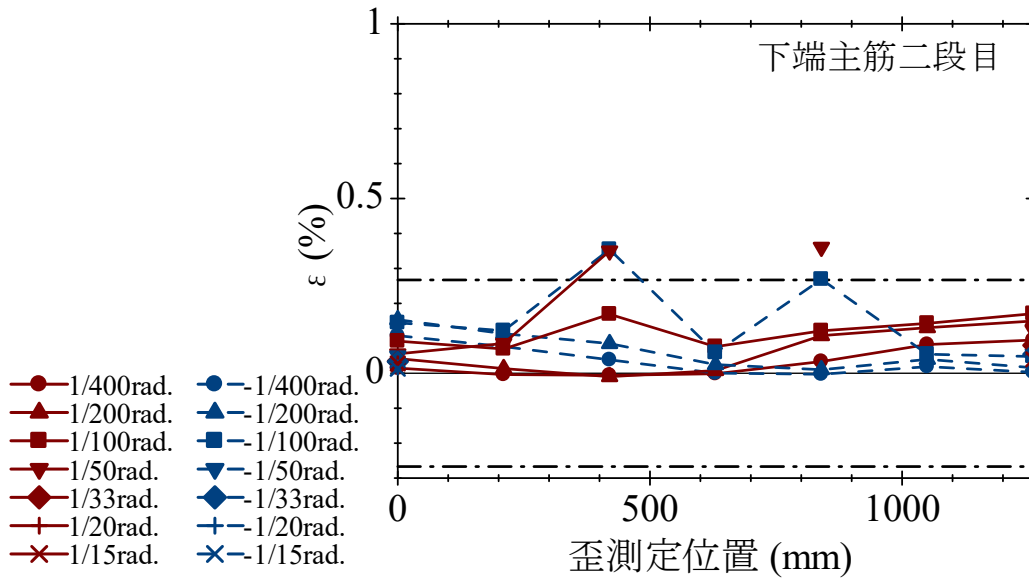
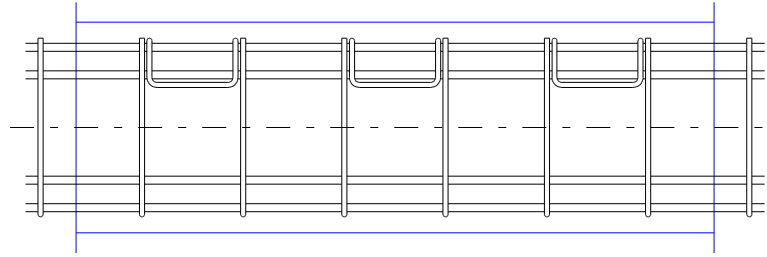


図 2-38 試験体 S30-II 下端主筋の歪分布

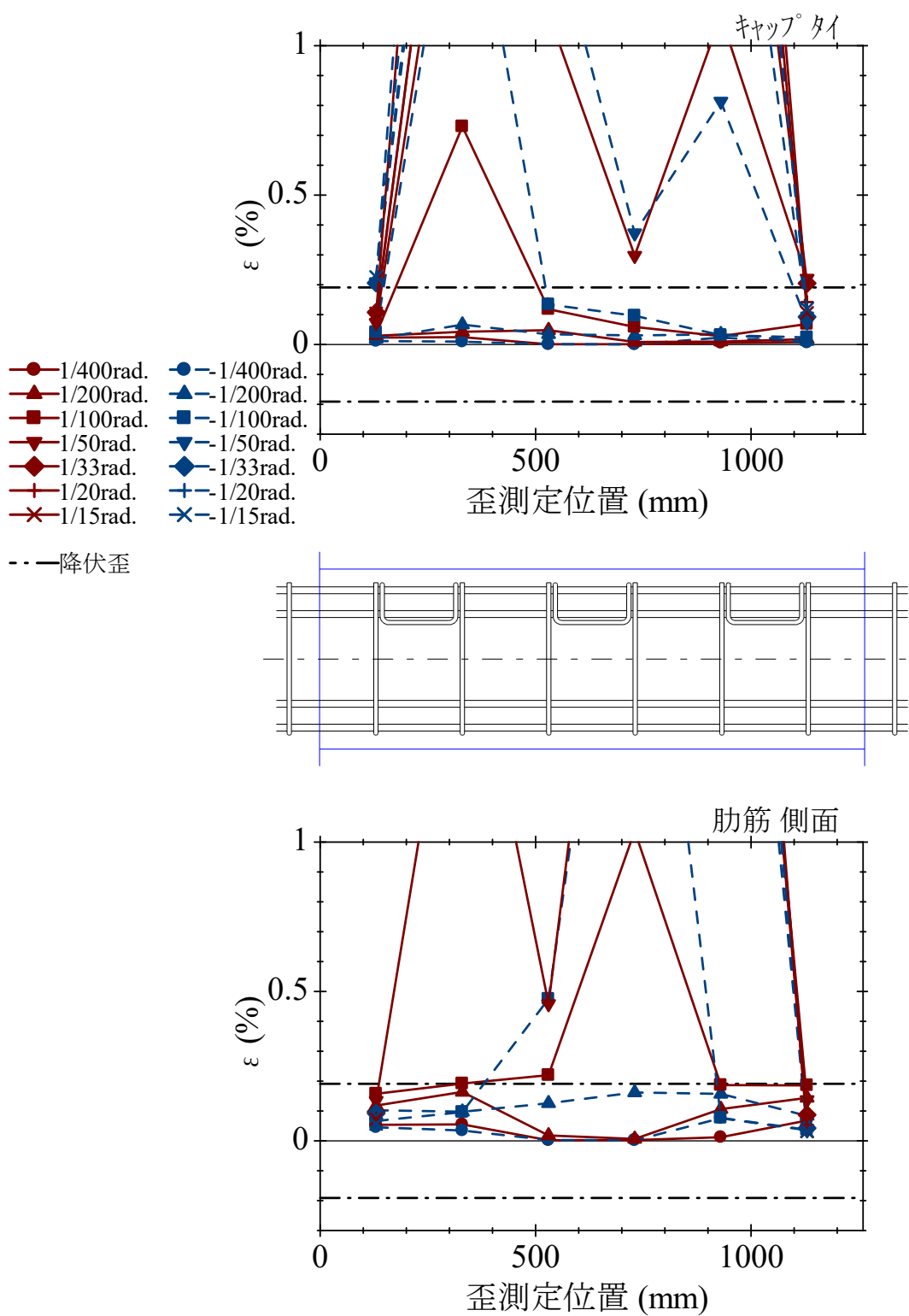


図 2-39 試験体 S30-II キャップタイと肋筋の歪分布

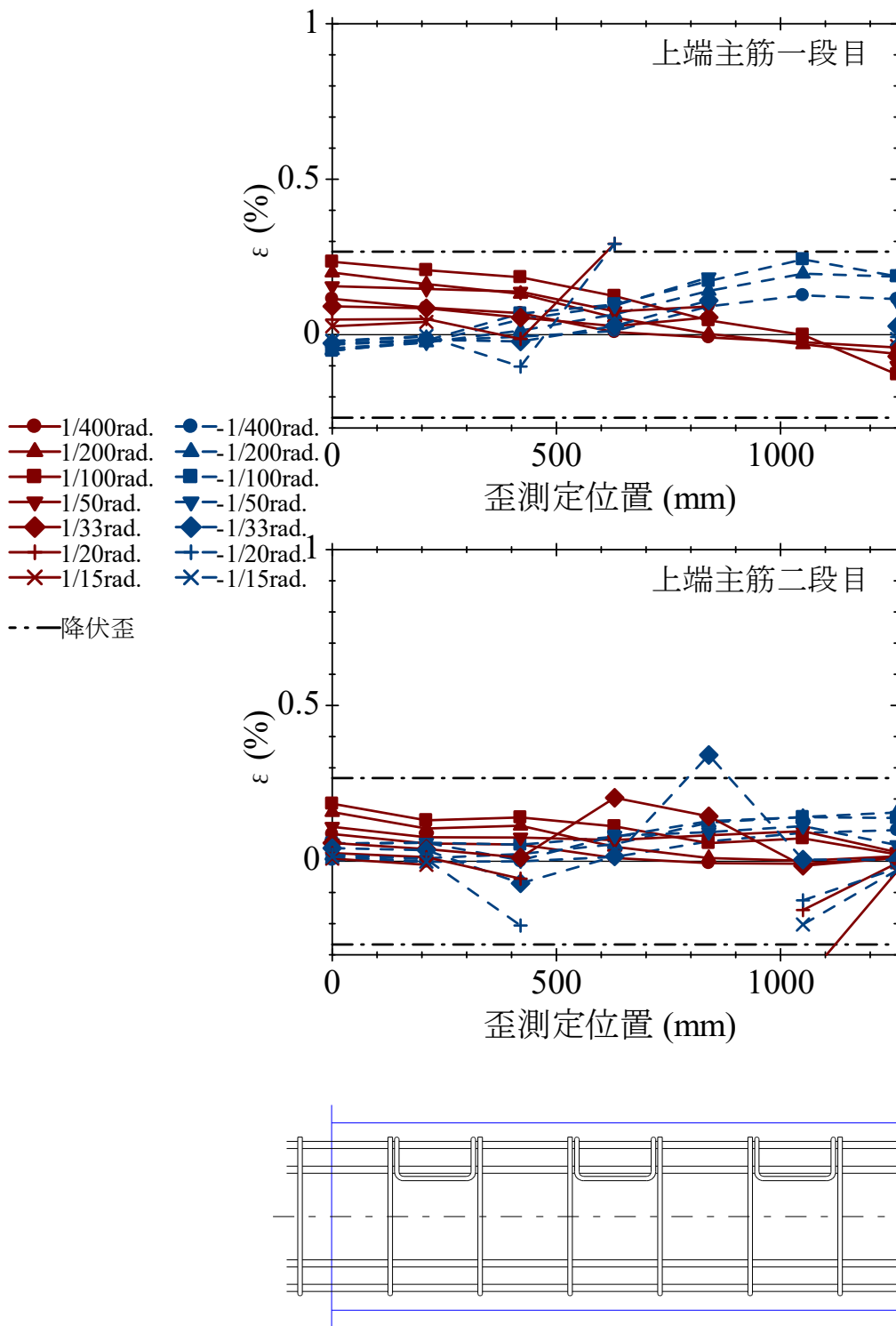


図 2-40 試験体 S30-III 上端主筋の歪分布

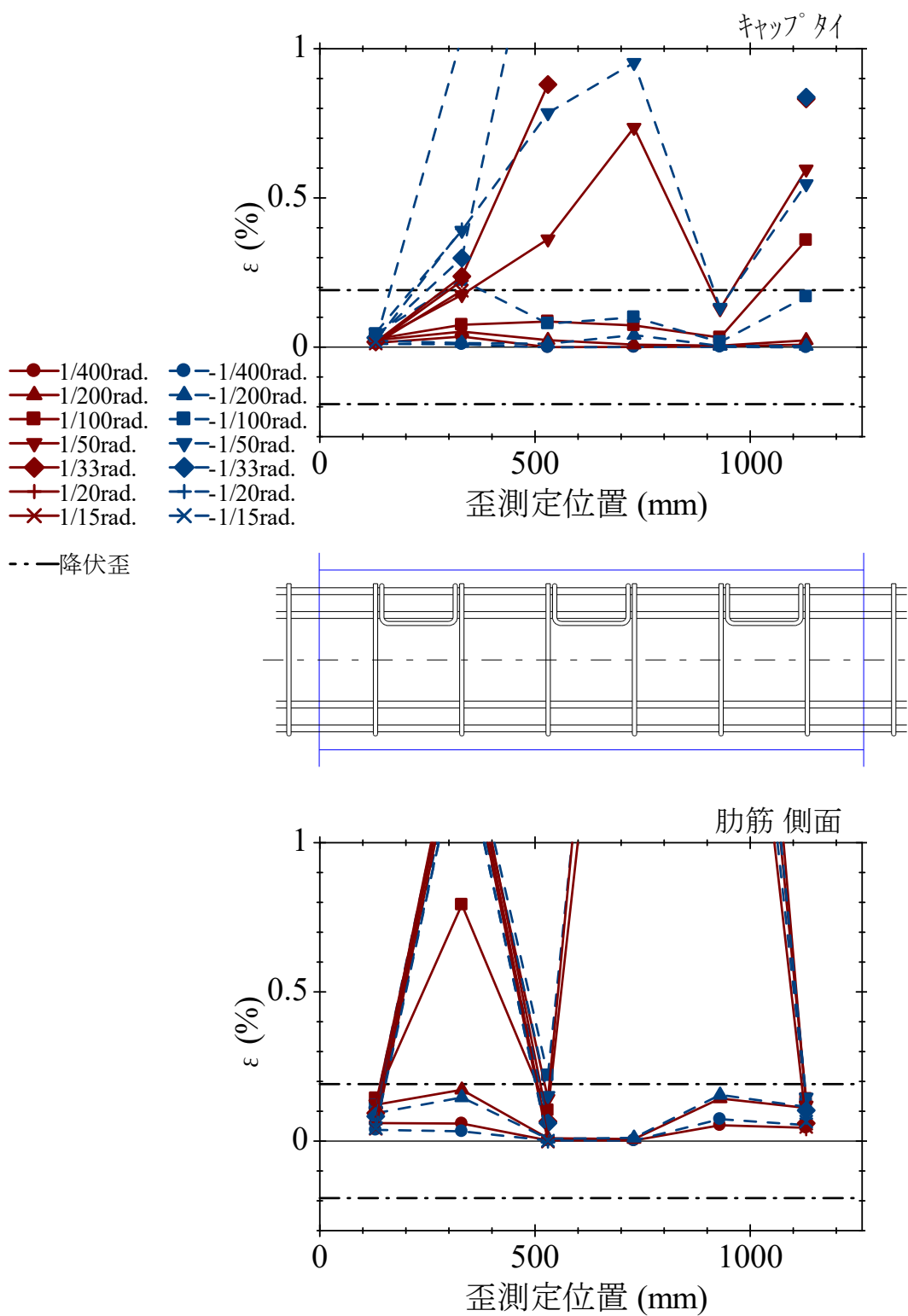


図 2-42 試験体 S30-III キャップタイと肋筋の歪分布

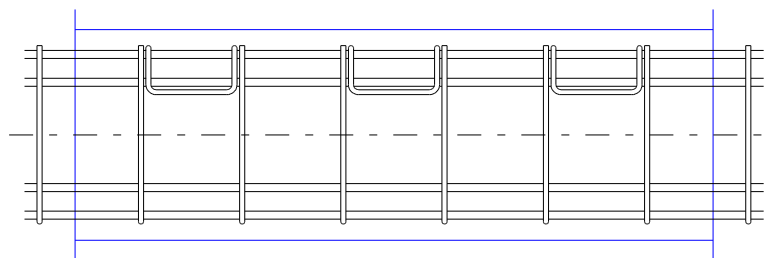
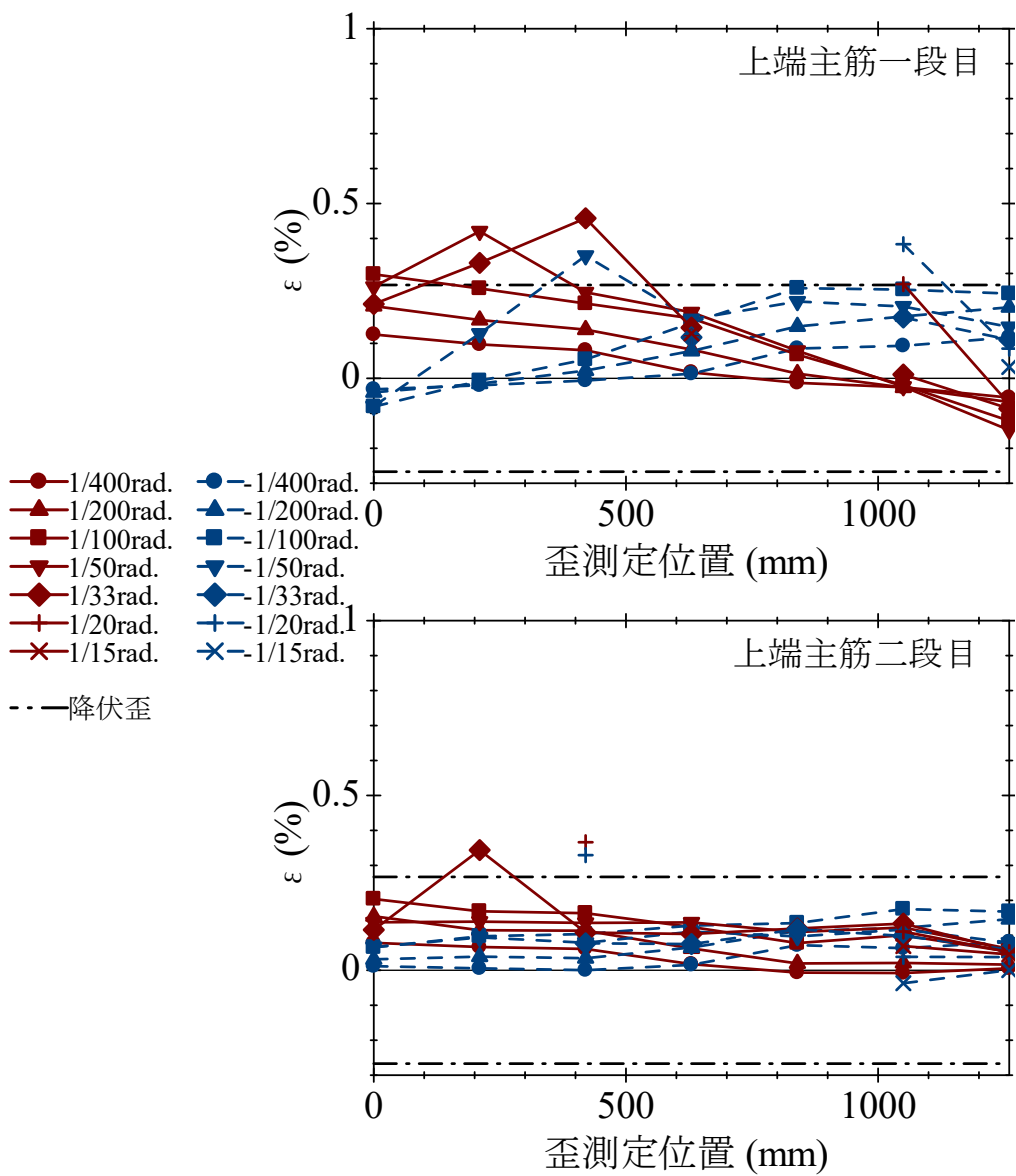


図 2-43 試験体 S30-IV 上端主筋の歪分布

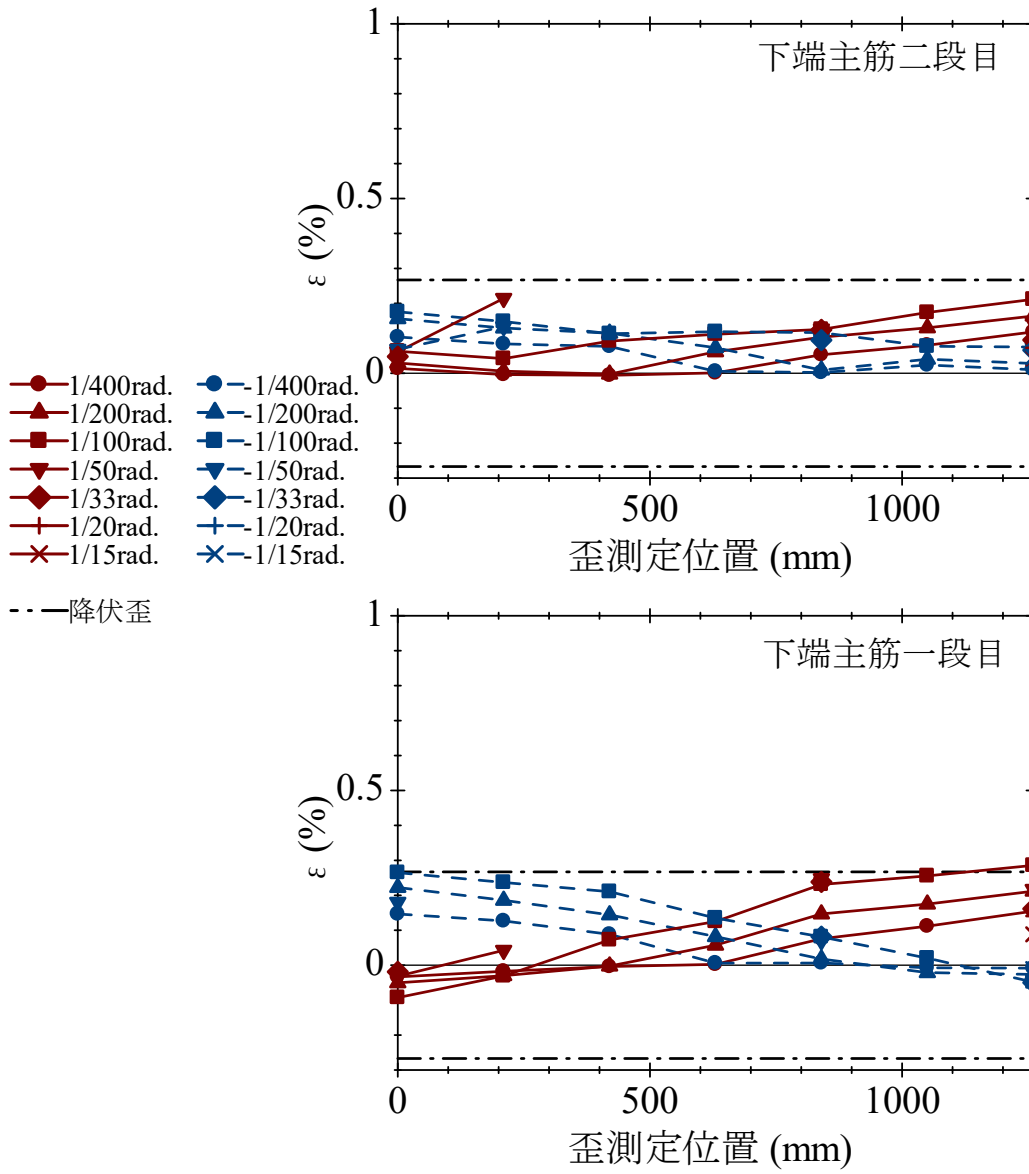
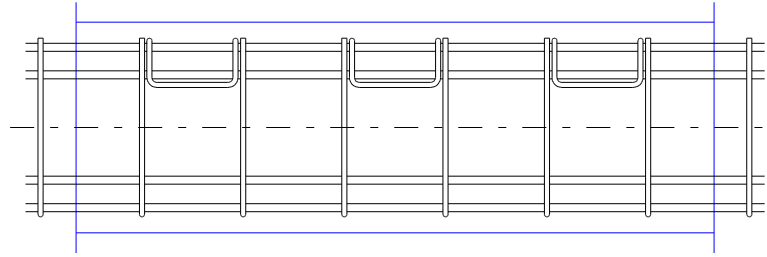


図 2-44 試験体 S30-IV 下端主筋の歪分布

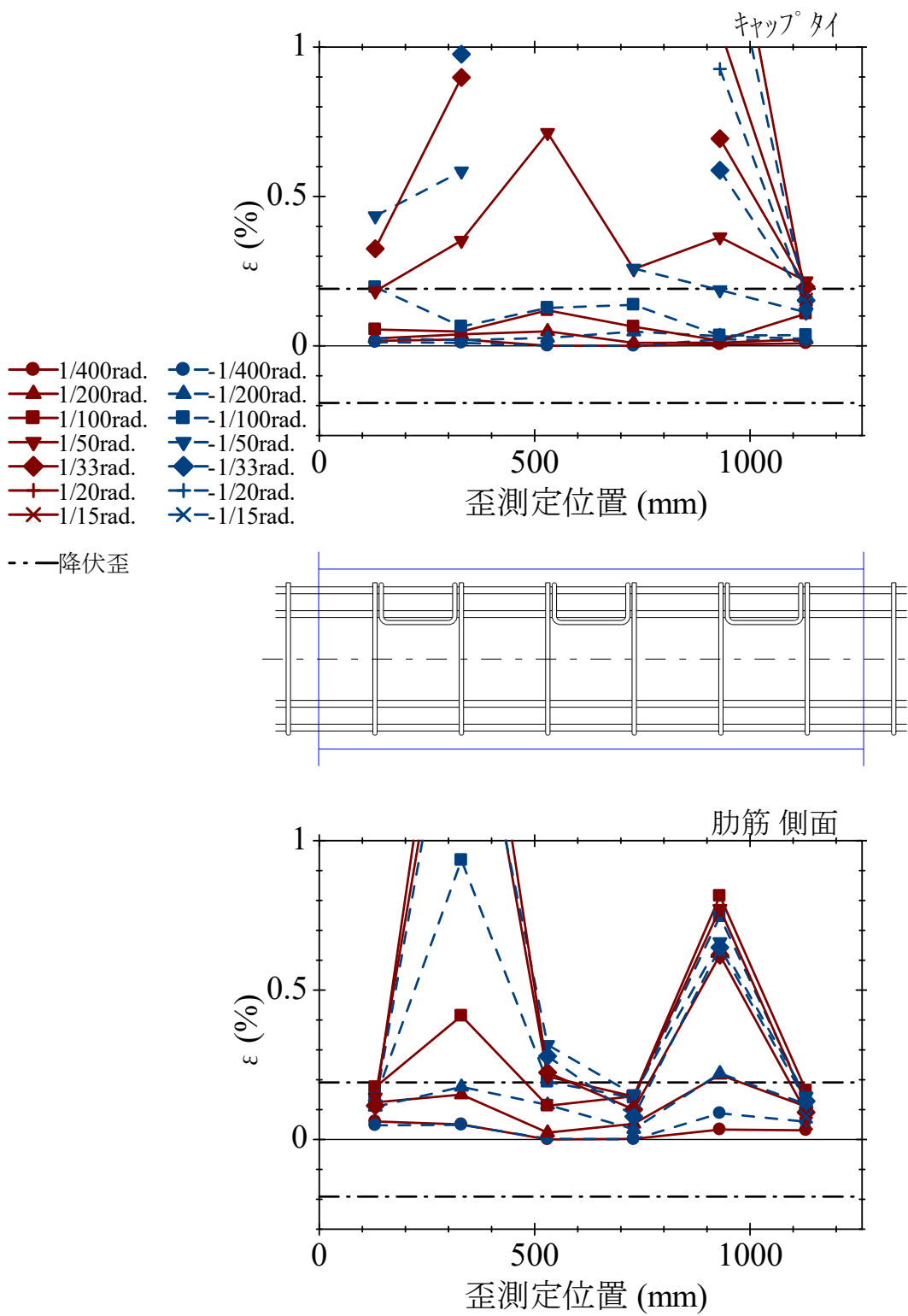


図 2-45 試験体 S30-IV キャップタイと肋筋の歪分布

2.2.6 単調加力実験試験体との比較

既往の実験^[1]による単調加力実験の試験体のせん断力-変位関係と、本章の試験体のせん断力-変位関係の包絡線の比較を図 2-46 に示す。両者の試験体の寸法および配筋は同一であり、鉄筋強度、コンクリート強度とも両者でほぼ同等である。なお、タイプ IV を用いたキャップタイ試験体は単調加力実験を行っていない。

本章の試験体が最大耐力に達した 1/100rad. まで、単調加力と繰返し加力の正側包絡線との差は見られず、負側加力の耐力低下が顕著に表れている。繰返し加力において、正側加力に関しては単調加力と同様の結果が得られるが、正側加力でひび割れが生じた後に載荷する負側加力では単調加力との乖離が見られることがわかる。

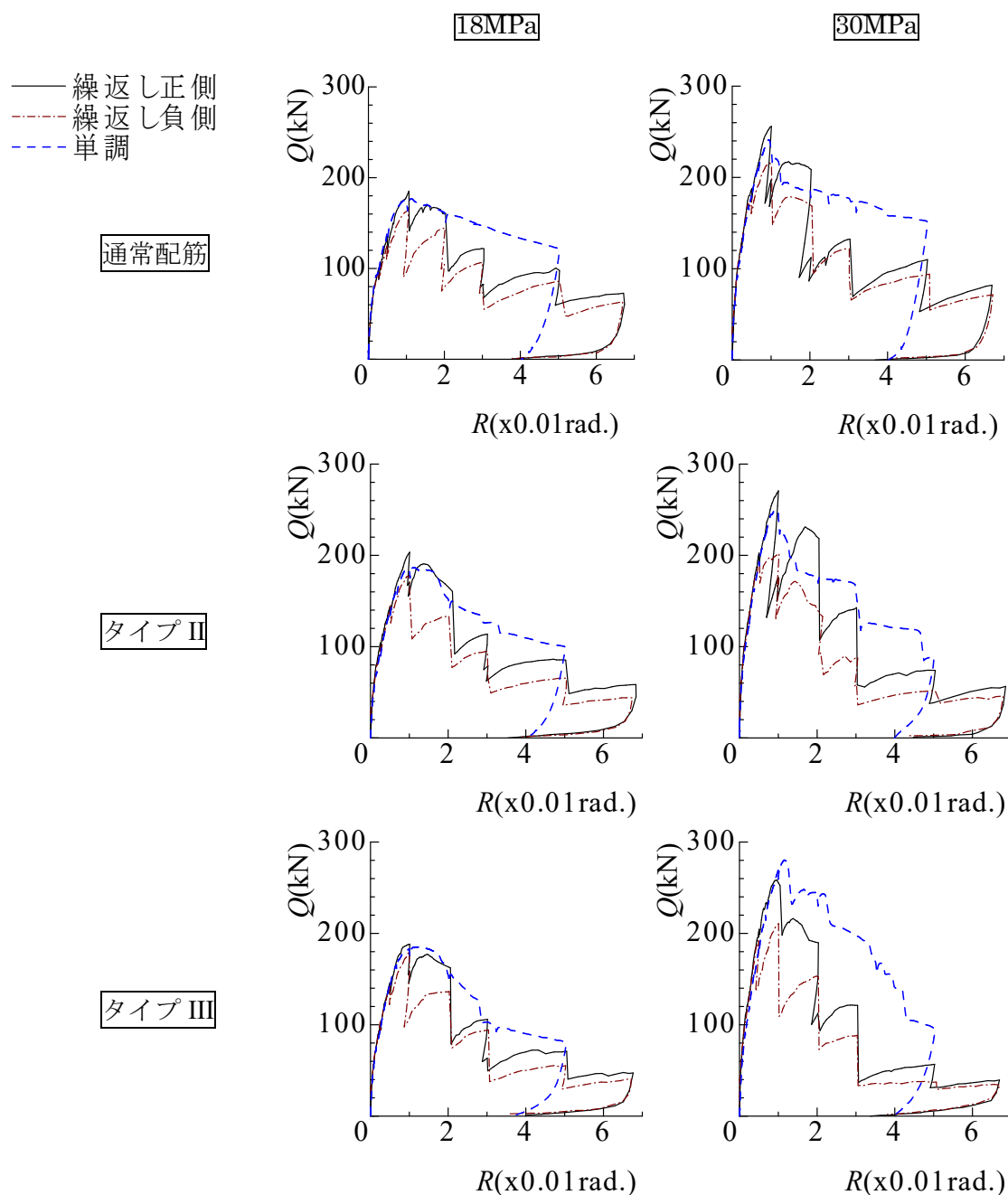


図 2-46 せん断力-変位関係の単調加力と繰返し加力の比較

各試験体の最大荷重時における局部せん断変形量の比較を表 2.17 に示す。繰返し加力のデータについては正側最大耐力時の値とした。全測定区間のせん断変形量の総計で比較すると、通常配筋試験体では繰返し加力時のせん断変形量が単調加力時のせん断変形量と比較して増加している傾向にある。一方キャップタイ試験体においては、せん断ひび割れが試験区間全域に渡って大きく開いた 30MPa シリーズタイプ II 試験体を除き、大きな差は見られない。特に 18MPa シリーズでは減少傾向にあり、キャップタイを用いることで繰返し荷重下においても単調荷重下と同等の変形量に抑制されることが考えられる。

表 2.17 最大荷重時の局部せん断変形量(mm)

コンクリート	配筋	加力	測定区間				総計
			1	2	3	4	
18MPa	通常	単調	1.80	1.50	1.84	2.50	7.64
		繰返し	3.16	3.08	1.39	1.16	8.79
	タイプ II	単調	2.33	2.22	1.27	3.57	9.39
		繰返し	2.79	2.74	0.19	1.88	7.60
	タイプ III	単調	1.90	2.40	2.64	4.58	11.52
		繰返し	0.35	3.64	1.64	2.70	8.33
30MPa	通常	単調	2.04	0.90	1.84	2.16	6.94
		繰返し	3.21	5.64	3.74	1.33	13.92
	タイプ II	単調	1.72	2.12	1.60	2.64	8.08
		繰返し	3.06	3.89	7.06	2.20	16.21
	タイプ III	単調	2.95	2.94	3.51	1.32	10.72
		繰返し	1.88	3.41	3.49	4.53	13.31

2.3 まとめ

本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) すべての試験体において、筋筋の降伏は 1/100rad.加力サイクル時にみられ、筋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。梁主筋の危険断面において、1/100rad.加力サイクルまでに一部降伏がみられたが、2 段目主筋の降伏はなく、試験体の最大耐力はせん断破壊で決定した。
- (2) 正側 1/50rad.加力サイクル時までは、通常 135° フックの筋筋を用いた試験体の荷重よりキャップタイ試験体の荷重が大きいが、負側ではほぼ同等となり、その後はタイプ II およびタイプ III のキャップタイを用いた試験体の荷重が小さくなった。
- (3) タイプ II およびタイプ III のキャップタイを用いた試験体では、大変形時に梁側面定着部のひび割れが拡幅し、梁上端のかぶりコンクリートを押し上げてコアコンクリートの拘束が弱くなっていく様子が伺えた。
- (4) 最大荷重実験値のせん断強度計算値に対する比は、荒川 mean 式で 1.14~1.28 (18MPa シリーズ)、1.22~1.35 (30MPa シリーズ)、終局強度型指針式 A 法で 0.99~1.11 (18MPa シリーズ)、1.03~1.14 (30MPa シリーズ) となり、どちらの式を用いてもせん断強度を安全側に評価することができた。
- (5) キャップタイを用いた試験体の最大荷重は通常 135° フックの筋筋を用いた試験体と同等、もしくはそれ以上であり、18MPa シリーズ試験体では 1.05~1.12 倍、30MPa シリーズ試験体では 1.00~1.10 倍であった。
- (6) 繰返し加力の試験体のせん断力-変位関係は、正側加力では単調加力の試験体と同等の性状を示し、負側加力では性能が低下する様子が伺えた。

第3章 曲げ降伏後の破壊性状

本章では、梁の曲げ降伏後の破壊性状に着目した繰返し曲げせん断実験についての実験概要、結果および考察を述べる。本実験は、キャップタイ工法ダブル配筋基礎梁について、許容応力度設計のみならず、主筋の降伏を許容した上で応力が厳しい梁部材への適用可能性を検討することを目的として実施したものである。

3.1 実験概要

3.1.1 試験体

試験体は、ダブル配筋が必要となる幅を持つ住宅基礎梁を想定した、ほぼ実大の断面を有する梁試験体である。試験体一覧を表 3.1 に、試験体形状を図 3-1 に示す。梁部材を模擬した試験区間における断面の幅 b ×せい D は 220mm×420mm、肋筋は D10@200、せん断スパン比を 1.5 と設定した。キャップタイは、一本の鉄筋を定着部も含めて三次元状に折り曲げ加工し一周させたタイプⅡを使用した。

本実験のパラメータは、コンクリート目標強度と、主筋径および本数である。コンクリート目標強度は、想定する運用範囲の下限値と上限値である 18MPa および 30MPa とした。主筋については、日本建築学会終局強度型指針せん断耐力式および靱性保証型指針付着耐力式による耐力が曲げ耐力を上回るようにした上で、曲げ耐力とせん断耐力の比率が変化するように、コンクリート目標強度ごとに一段配筋の 3-D19 (SD345)、二段配筋の 5-D16 (SD345) を持つ試験体とした。試験区間における主筋配筋を図 3-2 に示す。

表 3.1 曲げ降伏後の破壊性状実験における試験体一覧

試験体名	共通事項	コンクリート 目標強度 (MPa)	主筋	キャップタイ	
				タイプ	配筋
F18-D19	断面 $b \times D$ (mm) =220×420 せん断スパン比 1.5 肋筋 2-D10@200 (SD295) $p_w=0.32\%$	18	3-D19(SD345) $p_t=1.06\%$		シングル (1つ間隔)
F18-D16			3,2-D16(SD345) $p_t=1.30\%$		
F30-D19		30	3-D19(SD345) $p_t=1.06\%$		
F30-D16			3,2-D16(SD345) $p_t=1.30\%$		

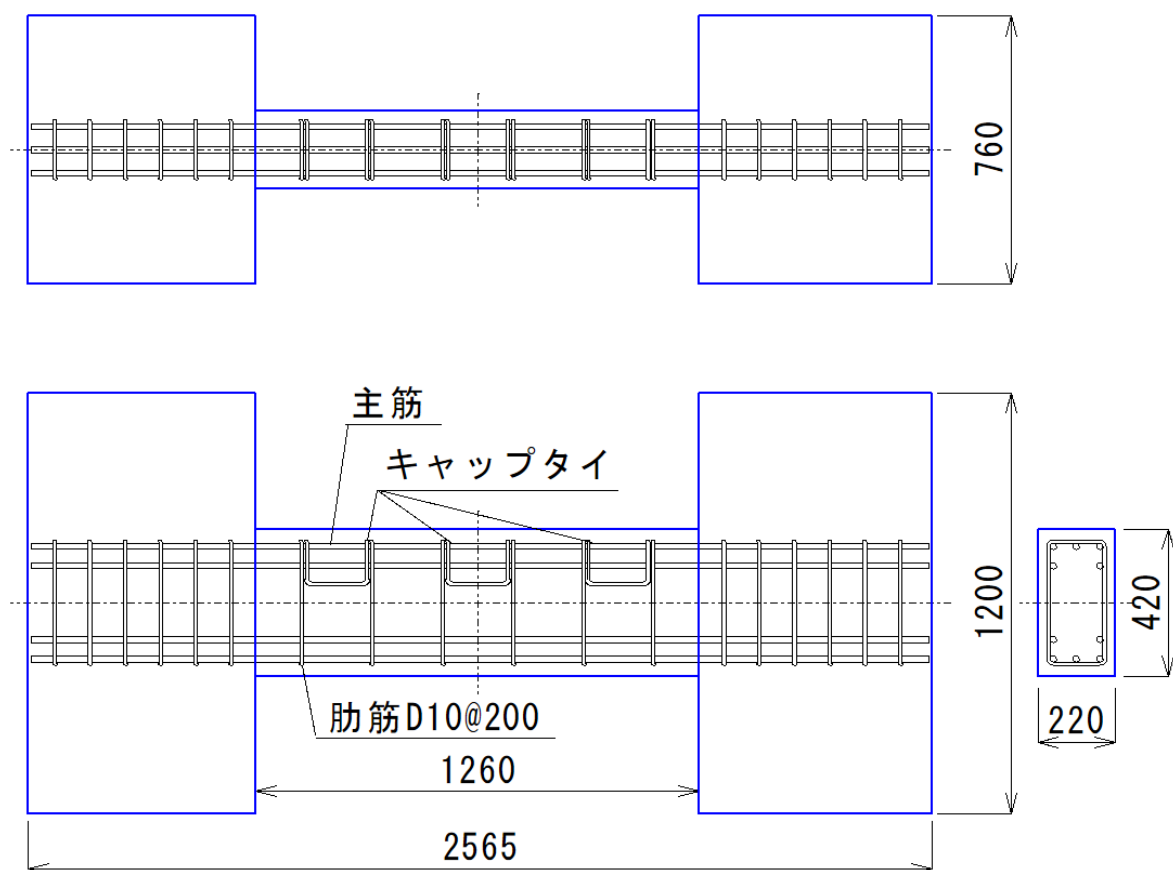


図 3-1 曲げ降伏後の破壊性状実験における試験体形状

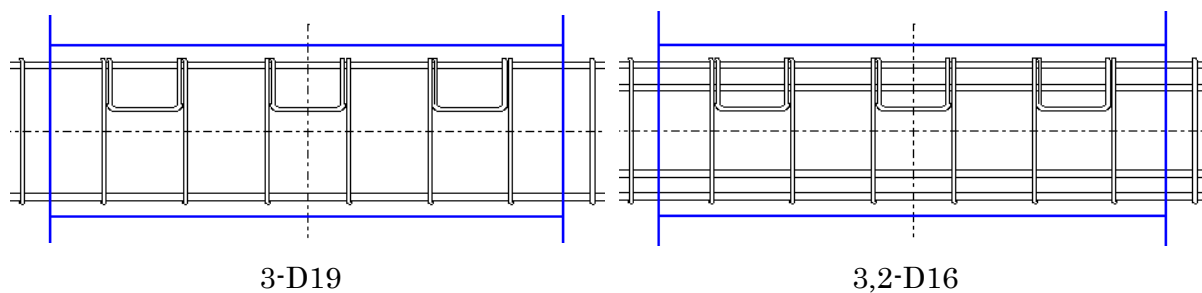


図 3-2 曲げ降伏後の破壊性状実験における試験体形状および試験区間配筋

3.1.2 使用材料

(1) 鉄筋

主筋には異形鉄筋 D19 および D16 (SD345)、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 3-3 に示す。

表 3.2 曲げ降伏後の破壊性状実験における鉄筋の引張試験結果一覧

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
D19 SD345	1	373	193	0.193	557	23.2	主筋
	2	389	192	0.203	557	24.1	
	3	380	193	0.197	559	23.4	
	平均	381	193	0.198	558	23.6	
D16 SD345	1	353	195	0.181	516	26.5	
	2	356	192	0.185	518	22.5	
	3	361	194	0.186	521	21.3	
	平均	357	194	0.184	518	23.4	
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	

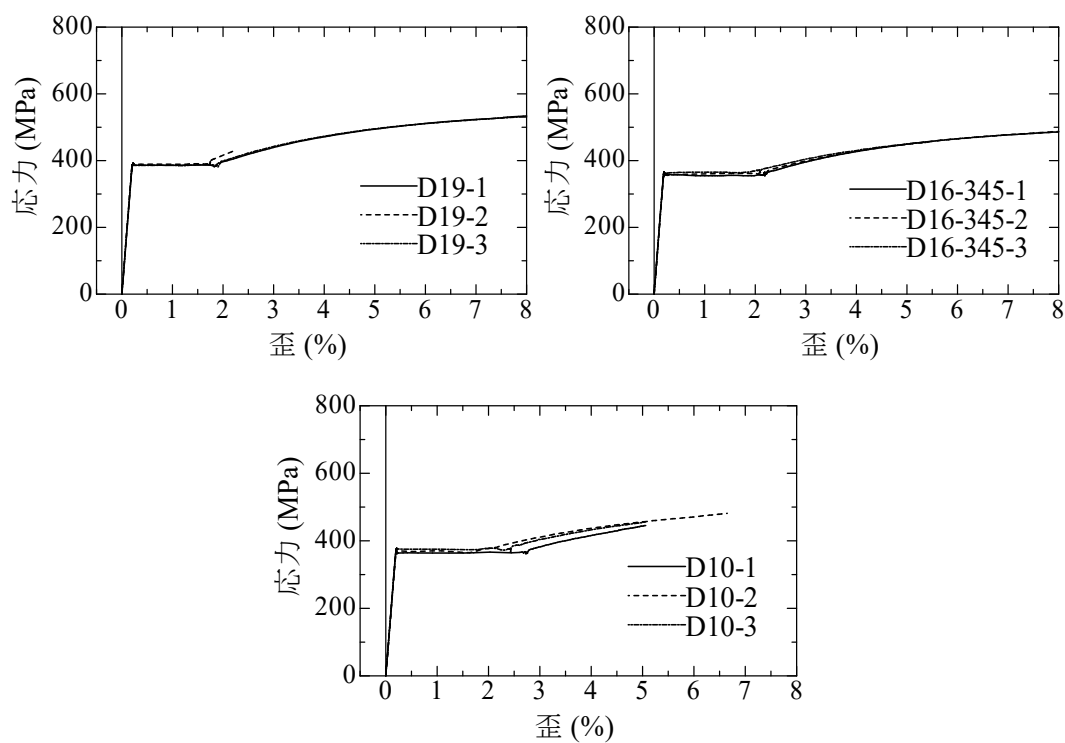


図 3-3 曲げ降伏後の破壊性状実験における鉄筋引張試験結果

(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計画を表 3.3 に示す。

打設は、18MPa シリーズを 2018 年 7 月 26 日に、30MPa シリーズを 2018 年 8 月 21 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。

表 3.3 曲げ降伏後の破壊性状実験におけるコンクリートの調合表

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

* : AE 減水剤 マスターボゾリス 78R

表 3.4 曲げ降伏後の破壊性状実験におけるコンクリートのフレッシュ性状

目標 強度	打設日	外気温 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリ ート温度 (°C)	備考
18MPa	2018.7.26	30	18.5	3.6	31	
30MPa	2018.8.21	35	17.5	3.7	33	

コンクリートの材料試験には、φ100mm×200mm の円柱供試体を用いた。打設後約 4 週間は実験室内で封緘養生し、その後材料試験時まで実験室内で気中静置した。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。圧縮強度試験では検長 100mm のコンプレッソメータを用いて、歪の計測を行った。

コンクリートの材料試験結果を、表 3.5～表 3.6 に示す。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 3.7 に示す。

表 3.5 曲げ降伏後の破壊性状実験におけるコンクリートの材料試験結果（18MPa）

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 3.6 曲げ降伏後の破壊性状実験におけるコンクリートの材料試験結果（30MPa）

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 3.7 曲げ降伏後の破壊性状実験における検討用コンクリート強度

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	

3.1.3 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 3-4 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 $1/400 \sim 1/15\text{rad}$. で正負交番繰返し加力を行った。加力履歴を図 3-5 に示す。部材角 $1/400 \sim 1/33\text{rad}$. 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 $1/15\text{rad}$. では 1 回の正負加力を行った。

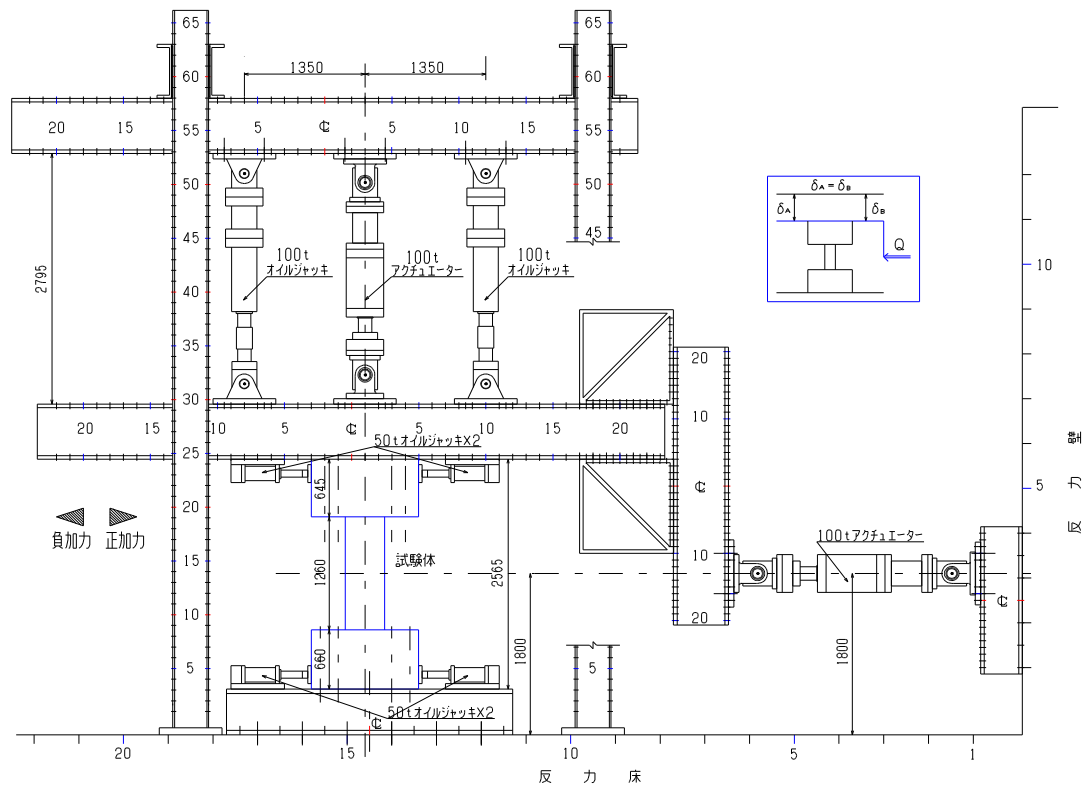


図 3-4 加力装置

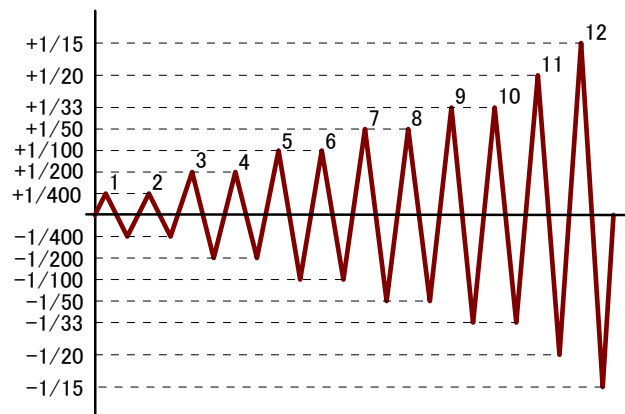


図 3-5 加力履歴

3.1.4 計測方法

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、軸方向変形、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 3-6 に示す。第 2 章の実験と同様である。

歪ゲージの貼付位置を、図 3-7 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に、キャップタイには梁上面側中央部に貼付した。使用した歪ゲージは、ゲージ長 3mm の汎用歪ゲージ（東京測器製 FLA-3-11-5LJC、ゲージファクター 2.11）である。

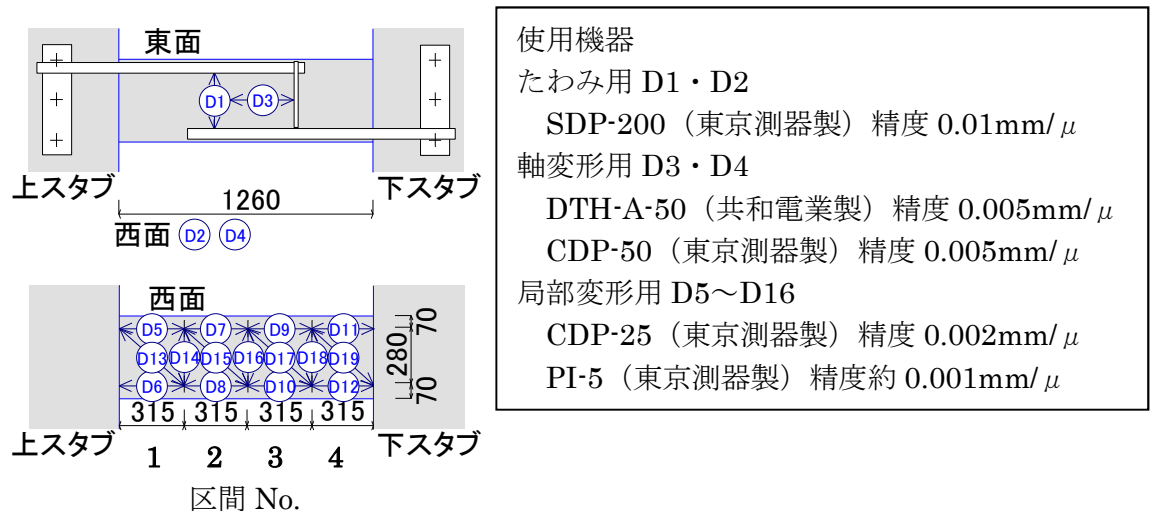


図 3-6 変位計設置位置

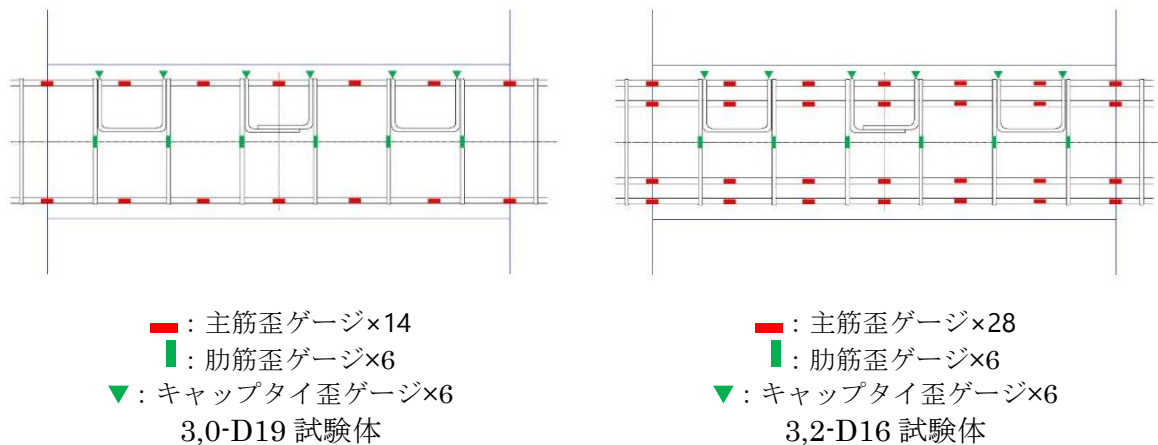


図 3-7 歪ゲージ貼付位置

3.2 実験結果および検討

3.2.1 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（加力サイクル 7）終了時の破壊状況を図 3-8～図 3-11 に、加力時実験記事を表 3.8～表 3.11 に示す。

すべての試験体において、1/400rad.加力サイクル時に、梁端部に順次曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れが発生し、1/200rad.加力サイクル時に、腹部にせん断ひび割れが、主筋位置に付着ひび割れが発生した。1/100rad.加力サイクル時に主筋が降伏し、剛性が低下した。

最初の筋筋の降伏は、試験体 F30-D16 では 1/200rad.加力サイクル時に、その他の試験体では 1/100rad.加力サイクル時に見られた。キャップタイはいずれの試験体においても 1/100rad.加力サイクル時に見られた。1/50rad.加力サイクル正側時には荷重－変形関係が負勾配に転じ、試験体 F18-D16 では正側最大荷重を示した。なお、その他の試験体は、1/100rad.加力サイクル時にて最大荷重を示した。

主筋に D19 を用いた試験体では、1/33rad.加力サイクル時に主筋に沿った付着ひび割れが連続して大きく拡幅し、キャップタイ周辺のかぶりコンクリートが剥落した。1/20rad.加力サイクル時には、主筋上面および底面のかぶりコンクリートが大きく剥落し、加力終了後には筋筋上部溶接部の剥離および底部コーナー部での筋筋破断が見られた。荷重低下の要因は、主筋位置での付着割裂破壊と考えられる。

主筋に D16 を用いた試験体では、1/33rad.加力サイクル時に腹部のせん断ひび割れが大きく拡幅し、1/20rad.加力サイクル時には、梁側面のかぶりコンクリートが大きく剥落した。加力終了後には筋筋上部溶接部の剥離が見られた。荷重低下の要因は、梁腹部でのせん断破壊と考えられる。

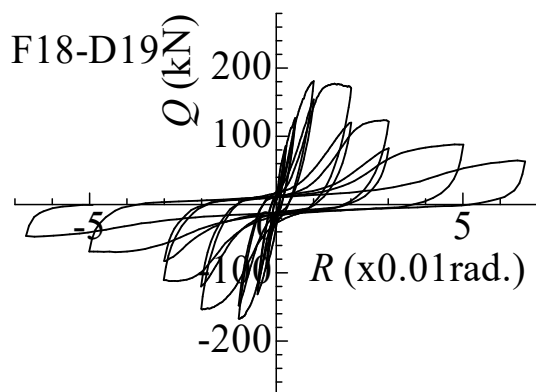


図 3-8 試験体 F18-D19 破壊状況

表 3.8 試験体 F18-D19 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
19	29	0.7	正側曲げひび割れ発生
35	65	2.0	正側曲げせん断ひび割れ発生
67	-23	0.3	負側曲げひび割れ発生
85	-71	-1.9	負側曲げせん断ひび割れ発生
226	96	4.0	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.40mm ②0.30mm 除荷時 ①0.20mm ②0.10mm
235	120	5.9	正側付着ひび割れ発生
239	111	6.0	正側せん断ひび割れ発生
275	-97	-3.8	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.40mm ④0.40mm 除荷時 ③0.40mm ④0.30mm
281	-117	-5.1	負側せん断ひび割れ発生
288	-132	-6.3	負側付着ひび割れ発生
429	147	8.4	正側主筋降伏
431	155	9.0	肋筋降伏 正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.80mm ⑥0.60mm 除荷時 ⑤0.60mm ⑥0.40mm
446	181	12.6	正側最大荷重
503	-150	-9.0	負側主筋降伏
504	-153	-9.4	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦1.40mm ⑧1.10mm 除荷時 ⑦1.40mm ⑧0.50mm
511	-165	-11.3	キャップタイ降伏
517	-167	-12.7	負側最大荷重
1379	-1	-62.0	計測終了

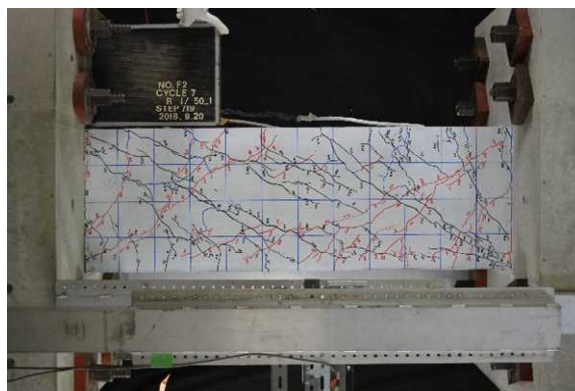
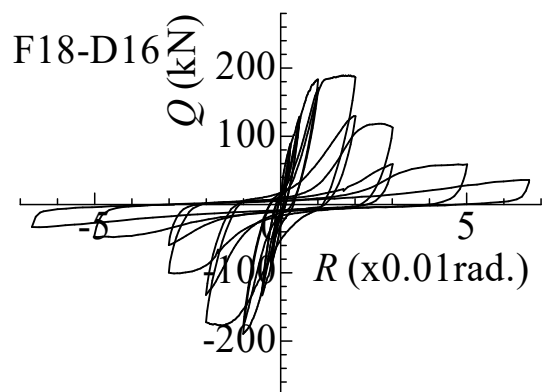


図 3-9 試験体 F18-D16 破壊状況

表 3.9 試験体 F18-D16 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
22	36	0.7	正側曲げひび割れ発生
37	65	1.9	正側曲げせん断ひび割れ発生
75	-30	-0.1	負側曲げひび割れ発生
89	-58	-1.3	負側曲げせん断ひび割れ発生
236	95	3.9	正側せん断ひび割れ発生
241	105	4.8	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.30mm ②0.30mm 除荷時 ①0.08mm ②0.05mm
287	-104	-4.1	負側せん断ひび割れ発生 負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.40mm ④0.30mm 除荷時 ③0.20mm ④0.10mm
297	-132	-6.2	負側主筋降伏
335	70	3.9	正側付着ひび割れ発生
397	-125	-6.2	負側付着ひび割れ発生
436	133	7.0	正側主筋降伏
438	140	7.5	肋筋降伏
447	166	9.6	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.80mm ⑥0.70mm 除荷時 ⑤0.50mm ⑥0.40mm
520	-166	-9.2	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.80mm ⑧0.80mm 除荷時 ⑦0.40mm ⑧0.60mm
533	-190	-12.7	負側最大荷重
587	168	12.4	キャップタイ降伏
714	189	23.7	正側最大荷重
1445	0	-36.1	計測終了

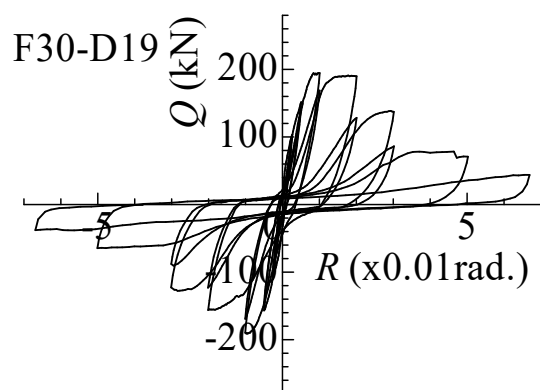


図 3-10 試験体 F30-D19 破壊状況

表 3.10 試験体 F30-D19 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
26	44	0.7	正側曲げひび割れ発生
34	62	1.2	正側曲げせん断ひび割れ発生
48	96	2.8	正側長期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.08mm ②0.10mm 除荷時 ①0.08mm ②0.08mm
80	-35	0.0	負側曲げひび割れ発生
92	-61	-0.8	負側曲げせん断ひび割れ発生
110	-96	-2.5	負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.20mm ④0.10mm 除荷時 ③0.20mm ④0mm
258	140	5.6	正側付着ひび割れ発生
303	-134	-4.6	負側付着ひび割れ発生
313	-151	-6.2	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑤0.70mm ⑥0.60mm 除荷時 ⑤0.30mm ⑥0.10mm
454	157	7.3	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ⑦0.60mm ⑧0.70mm 除荷時 ⑦0.30mm ⑧0.40mm
455	159	7.5	正側主筋降伏
482	195	12.7	正側最大荷重
530	-138	-5.8	肋筋降伏
534	-154	-6.8	負側主筋降伏
544	-181	-9.3	キャップタイ降伏
558	-191	-12.5	負側最大荷重
1465	-1	-47.6	計測終了

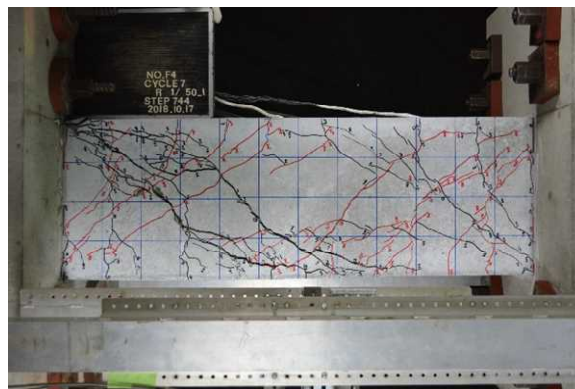
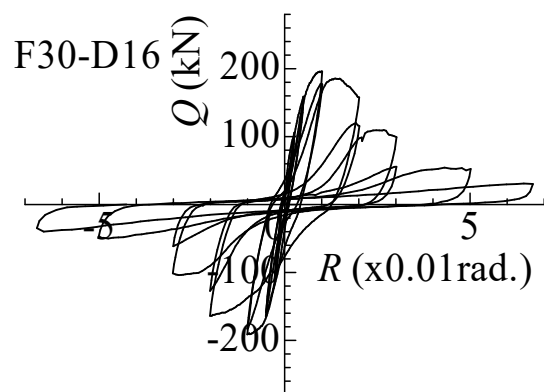


図 3-11 試験体 F30-D16 破壊状況

表 3.11 試験体 F30-D16 記事表

ステップ	せん断力 (kN)	たわみ (mm)	記事
18	31	0.5	正側曲げひび割れ発生
46	96	2.7	正側曲げせん断ひび割れ発生
51	106	3.3	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
76	-26	0.4	負側曲げひび割れ発生
98	-82	-1.6	負側曲げせん断ひび割れ発生
108	-103	-2.8	負側せん断ひび割れ発生 負側長期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.30mm ④0.20mm 除荷時 ③0.10mm ④0.05mm
161	102	3.3	正側せん断ひび割れ発生
244	128	4.4	正側主筋降伏
299	-145	-5.1	負側主筋降伏
306	-165	-6.4	肋筋降伏
447	166	7.3	正側短期許容応力度時ひび割れ幅 ①0.60mm ⑤0.70mm 除荷時 ①0.30mm ⑤0.50mm
462	193	10.7	正側付着ひび割れ発生
468	195	12.0	キャップタイ降伏
471	196	12.8	正側最大荷重
524	-168	-6.5	負側短期許容応力度時ひび割れ幅 ③0.80mm ⑥0.80mm 除荷時 ③0.70mm ⑥0.10mm
539	-186	-10.1	負側付着ひび割れ発生
550	-191	-12.7	負側最大荷重
1468	0	-53.7	計測終了

3.2.2 セン断力一部材角関係の比較

各試験体のせん断力一部材角関係の包絡線を比較して、図 3-12 に示す。1/100rad.加力サイクル時までは 30MPa シリーズ試験体の剛性が大きく、コンクリート強度の違いによる差が顕著に見られる。主筋に 3,2-D16 を配筋した試験体のほうが引張鉄筋比は大きい、主筋の降伏強度は D19 のほうが大きいことにより、曲げ強度はほぼ同程度である。1/50rad.加力サイクル時では、試験体 F18-D19 の荷重が付着割裂破壊の影響により他の試験体より小さくなり、試験体 F30-D16 の荷重がせん断ひび割れの拡幅により低下した。1/33rad.加力サイクル以降では、D19 主筋を用いた試験体のほうが D16 主筋を用いた試験体より荷重低下が小さく、主筋量の違いが影響していると考えられる。

いずれの試験体においても、1/50rad.加力サイクルピーク時まで最大荷重の 80%以上の耐力を有していた。

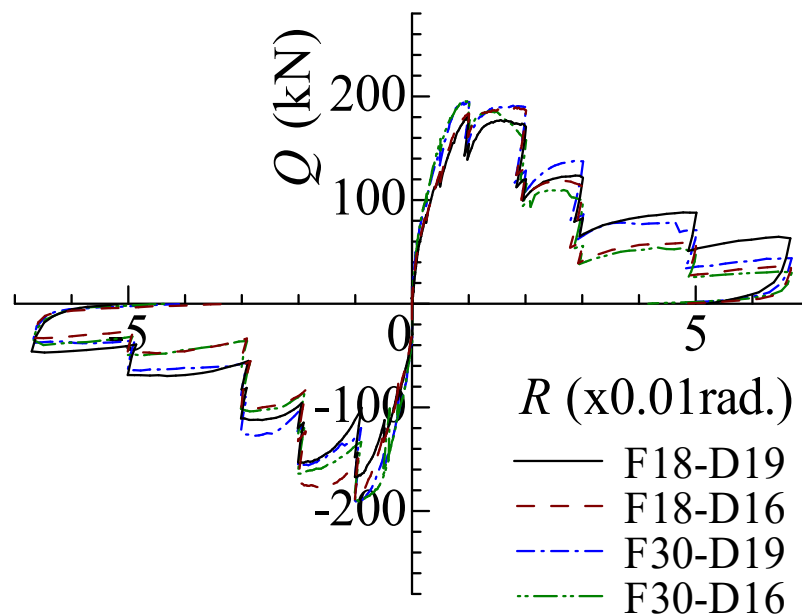


図 3-12 曲げ降伏後の破壊性状実験におけるせん断力一部材角関係の包絡線の比較

3.2.3 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 3.12 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]（以下、RC 規準）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。付着耐力は日本建築学会「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」（以下、靱性保証型指針）^[4]による付着耐力式により算出した。余裕度は、荒川 mean 式で 0.89～1.10、終局強度型指針式 A 法（非靱性）と靱性保証型付着耐力の小さい方で 1.08～1.29 である。

最大荷重の実験値（正負の平均値）は、いずれの試験体でも曲げ強度計算値を上回り、その比は 1.01～1.12 である。さらに、曲げ降伏先行型であるものの荒川 mean 式による計算値をも上回り、その比は 1.02～1.22 である。

各試験体のせん断および付着余裕度、限界変形、破壊形式の一覧を表 3.13 に示す。限界変形は、荷重一部材角関係における各サイクルピーク時または負勾配間を結ぶ包絡線上で、最大荷重時の 80%の荷重に低下した時点の部材角として求めた。限界変形はすべての試験体において 1/50rad.を上回った。

表 3.12 曲げ降伏後の破壊性状実験における最大荷重と計算値との比較

試験体	実験値 (kN)			曲げ強度 計算値 cQ_{mu} (kN)	せん断強度 計算値 (kN)		付着 耐力 計算値 (kN)	余裕度		eQ_{max} / cQ_{mu}
	加力 方向別		正負 平均 eQ_{max}		荒川 mean 式 $cQ_{su,mean}$	終局強度 型 A 法 $cQ_{su,A}$		$eQ_{su,mean}$ / cQ_{mu}	$\min$ $\{cQ_{su,A},$ $cV_{bu}\}$ / cQ_{mu}	
F18-D19	正	181	174	173	167	212	197	0.97	1.14	1.01
	負	167								
F18-D16	正	189	190	176	156	189	195	0.89	1.08	1.08
	負	190								
F30-D19	正	195	193	173	190	241	224	1.10	1.29	1.12
	負	191								
F30-D16	正	196	194	176	177	218	222	1.01	1.24	1.10
	負	191								

* 計算に用いた材料の特性は、材料試験結果に基づく

表 3.13 曲げ降伏後の破壊性状実験における余裕度計算値と限界変形および破壊形式

試験体	実験値 (kN)			曲げ強度 計算値 cQ_{mu} (kN)	せん断余裕度		付着 余裕度 靱性保 証型 cV_{bu} / cQ_{mu}	限界変形 R_u (rad.)		破壊形式 F:曲げ降伏 S:せん断破壊 BS:付着割裂 破壊
	加力 方向別		正負 平均 eQ_{max}		荒川 mean 式 $cQ_{su,mean}$ / cQ_{mu}	終局強度 型 A 法 $cQ_{su,A}$ / cQ_{mu}				
F18-D19	正	181	174	173	0.97	1.23	1.14	正	1/39	F → BS
	負	167						負	1/41	
F18-D16	正	189	190	176	0.89	1.08	1.11	正	1/40	F → S
	負	190						負	1/44	
F30-D19	正	195	193	173	1.10	1.39	1.29	正	1/38	F → BS
	負	191						負	1/47	
F30-D16	正	196	194	176	1.01	1.24	1.26	正	1/49	F → S
	負	191						負	1/47	

* 計算に用いた材料の特性は、材料試験結果に基づく

A) 曲げ強度計算値（略算式）

$${}_cQ_{mu} = 0.9 \sum a_t \cdot \sigma_y \cdot d / (L_0 / 2)$$

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（1260mm）

B) せん断強度荒川 mean 式

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

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（=0.82 $p_t^{0.23}$ ）
- σ_B : コンクリート圧縮強度（kgf/cm²）
- M/Qd : せん断スパン比（ $M/Qd \leq 3$ ）
- 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（=7/8 d ）（cm）
- d : 有効せい（1 段目主筋と 2 段目主筋の図心位置）

C) せん断強度終局強度型指針式 A 法

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

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

D) 付着耐力（靱性保証型指針式）

$$V_{bu} = \min \left(\sum (\tau_{bu} \psi) j_e + \left\{ v \sigma_B - \frac{2.5 \sum (\tau_{bu} \psi)}{\lambda b_e} \right\} \frac{bD}{2} \tan \theta, \frac{\lambda v \sigma_B}{2} b_e j_e \right)$$

$$\sum (\tau_{bu} \psi) = \tau_{bu} \sum \psi_1 + \tau_{bu2} \sum \psi_2$$

ここで、

V_{bu} : せん断強度

j_e : 肋筋のせん断力方向への芯々間隔

v : $= 0.7 - \frac{\sigma_B}{200}$

σ_B : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

λ : $= \left(1 - \frac{s}{2j_e}\right) \cdot \left(1 - \frac{b_s}{4j_e}\right)$

s : 肋筋間隔

b_s : 肋筋断面方向最大間隔

b_e : 肋筋のせん断力直交方向への芯々間隔 ($= b_s$)

b : 梁幅

D : 梁せい

$\tan \theta$: $= 0.9 \times \frac{D}{2L}$

L : 内法スパン

τ_{bu} : 1 段目主筋付着信頼強度

$$= \alpha_t \{ (0.086 b_{si} + 0.11) \sqrt{\sigma_B} + k_{st} \}$$

τ_{bu2} : 2 段目主筋付着信頼強度

$$= 0.6 \alpha_t \{ (0.086 b_{si2} + 0.11) \sqrt{\sigma_B} + k_{st2} \}$$

(上端筋のとき、 $\alpha_t = 0.75 + \frac{\sigma_B}{400}$ / 下端筋のとき、 $\alpha_t = 1$)

b_{si} : $= (b - N_1 d_b) / (N_1 d_b)$

b_{si2} : $= (b - N_2 d_b) / (N_2 d_b)$

k_{st} : $= (56 + 47 N_w / N_1) (b_{si} + 1) p_w$

k_{st2} : $= 103 (b_{si2} + 1) p_w$

N_w : 1 組の肋筋の足の数

N_1 : 1 段目主筋本数

N_2 : 2 段目主筋本数

d_b : 主筋径

p_w : せん断補強筋比

$\sum \psi_1$: 1 段目主筋周長合計

$\sum \psi_2$: 2 段目主筋周長合計

3.2.4 局部変形

1/50rad.加力サイクルまでにおける、せん断力と各測定区間の曲げ変形量およびせん断変形量の関係を図 3-13～図 3-16 に示す。図 3-6 に示す各測定区間でトラス状に設置した変位計で測定した変形から、各区間の曲率を算出し区間長あたりの変位量を求めることで曲げ変形量を、モールの歪円を用いてせん断歪を算出し測定区間までの距離を乗じて全体変形相当に換算することでせん断変形量を、それぞれ求めた。なお測定区間内のひび割れが大きく拡幅し、変位計の測定容量を超えた時点からのデータは取り除いている。各試験体ともに、概ね 1/100rad.加力サイクルにて最大耐力に至った後で、曲げ変形量は主として区間 1 および区間 4 において大きくなり、せん断変形量は試験区間全体に渡って大きくなっている。特に曲げ降伏後にせん断破壊が生じた、主筋に D16 を用いた試験体では、1/100rad.加力サイクル正側時または 1/50rad.加力サイクル正側時に曲げ変形量が大きくなった後、負側に移ってからせん断変形量が大きくなるという傾向が顕著に見られる。

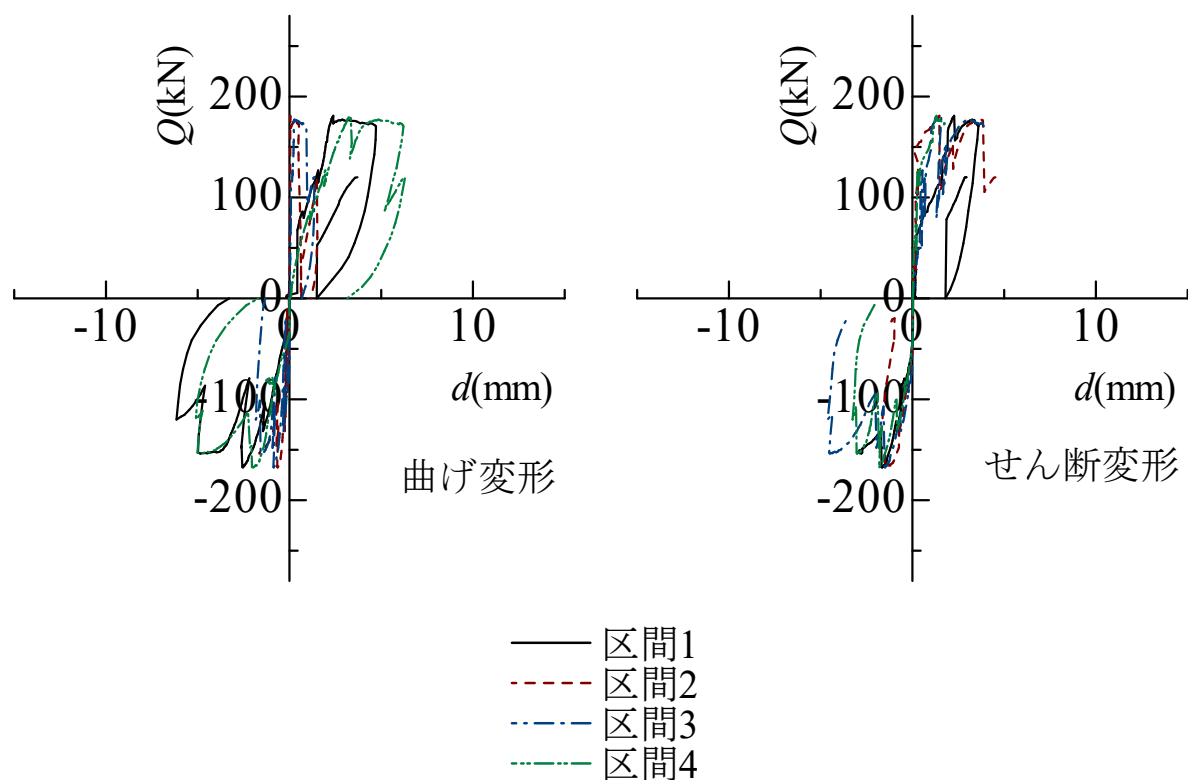
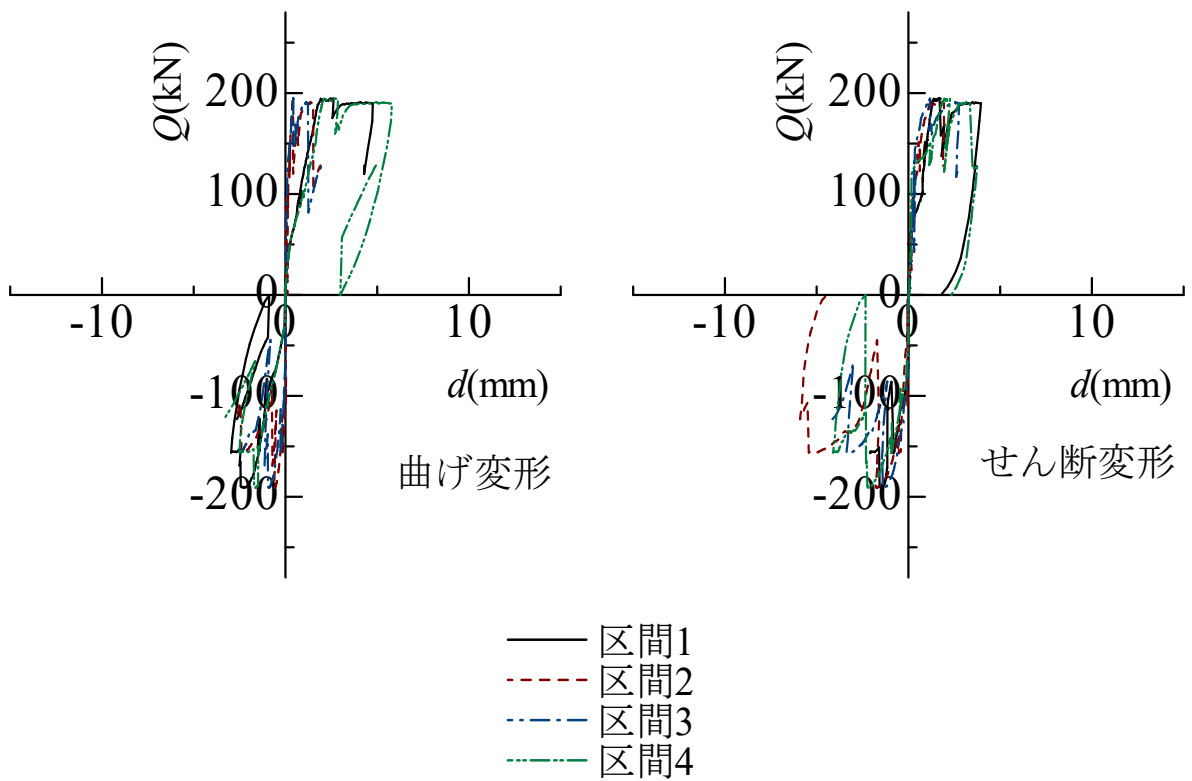
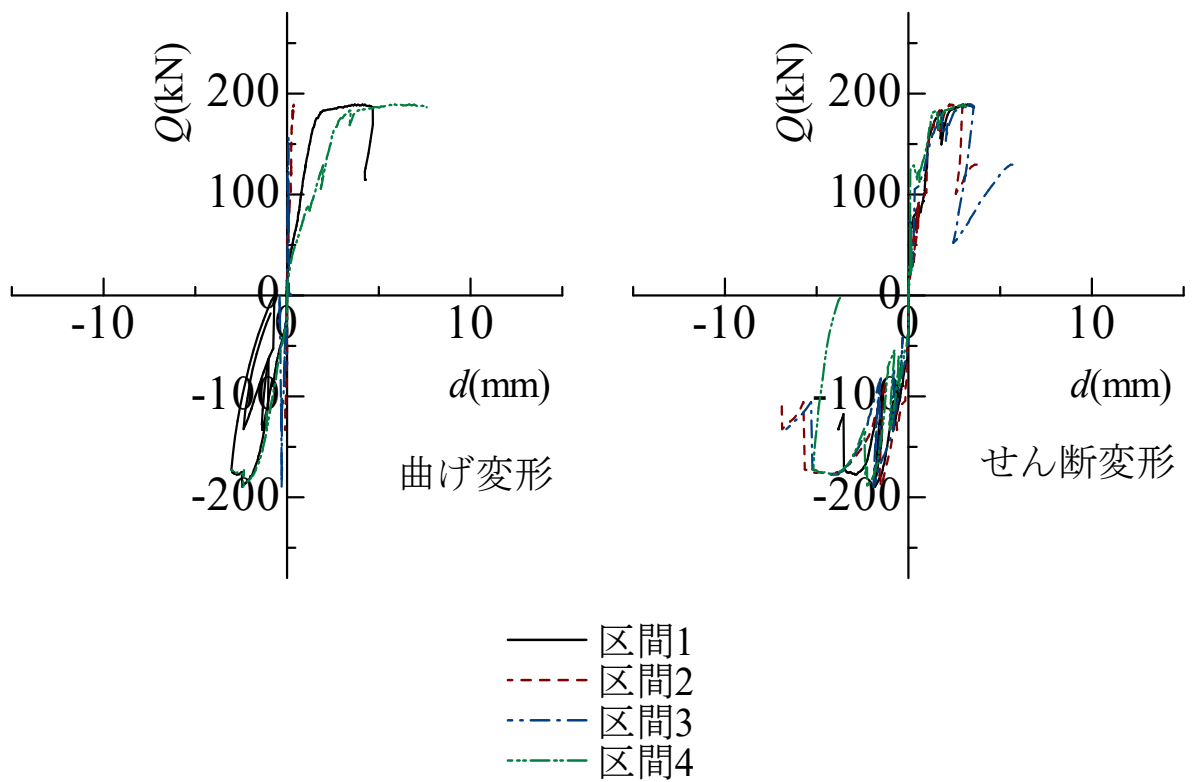


図 3-13 せん断力－局部変形関係の包絡線 (F18-D19 試験体)



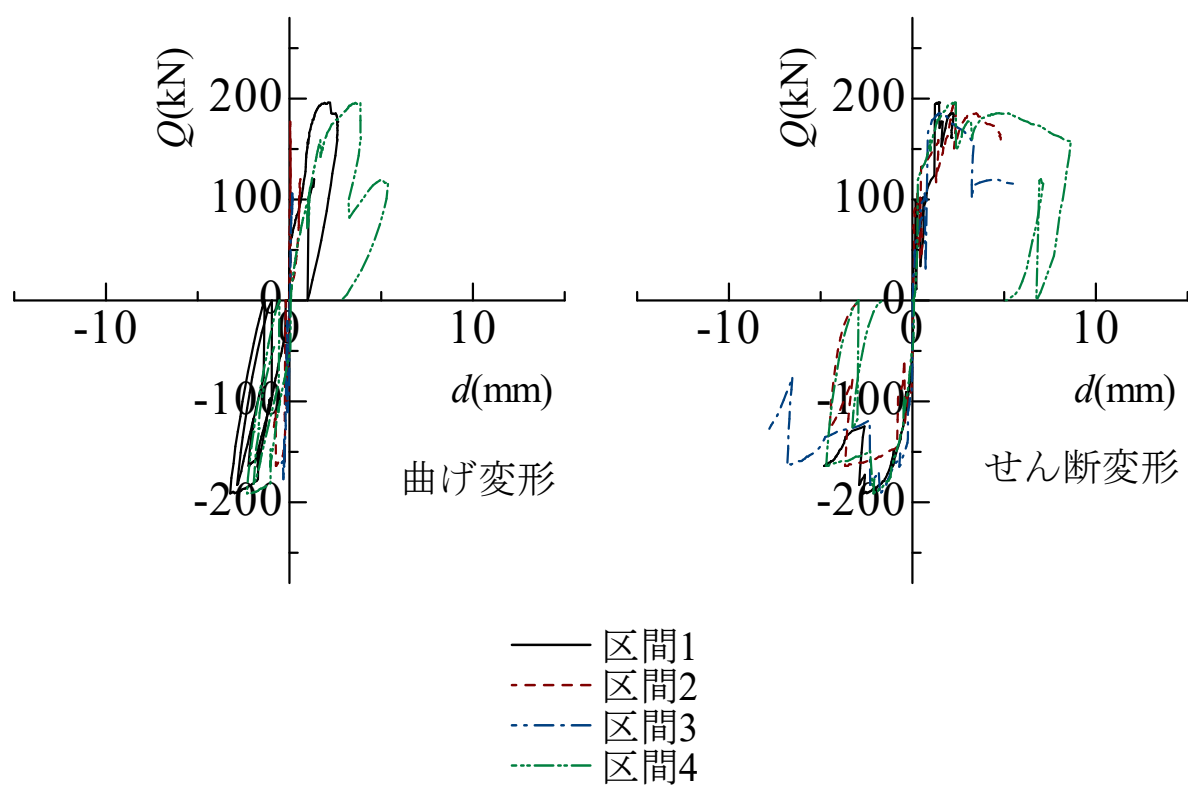


図 3-16 せん断力－局所変形関係の包絡線 (F30-D16 試験体)

3.2.5 主筋および肋筋の歪分布

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 3-17～図 3-25 に示す。

いずれの試験体においても、危険断面位置において $1/100\text{rad}$ 加力サイクル時に降伏が確認できる。降伏領域は概ね梁端から 2 番目の歪ゲージ位置 (210mm) までで、3,2-D16 配筋試験体の 1 段目と 2 段目とで明瞭な差は見られなかった。3,0-D19 試験体では付着破壊が生じたが、歪分布の勾配が明確に緩やかになってはいない。30MPa シリーズの下端 1 段目主筋では歪分布が乱れており、せん断ひび割れや、肋筋溶接による主筋の局所的な応力増加の影響が考えられる。

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 3-18～図 3-26 に示す。肋筋側面の歪はおおむね $1/100\text{rad}$ 時には降伏し、最端部から 2 番目の位置で大きくなっている。キャップタイの歪もおおむね $1/100\text{rad} \sim 1/50\text{rad}$ 時には降伏し、それ以降は全般的に肋筋よりも歪が大きくなっている。特に付着破壊が生じた 3,0-D19 試験体では、試験区間全域で降伏に至っており、付着破壊によるかぶりコンクリートの損傷や主筋のずれに起因するものと考えられる。

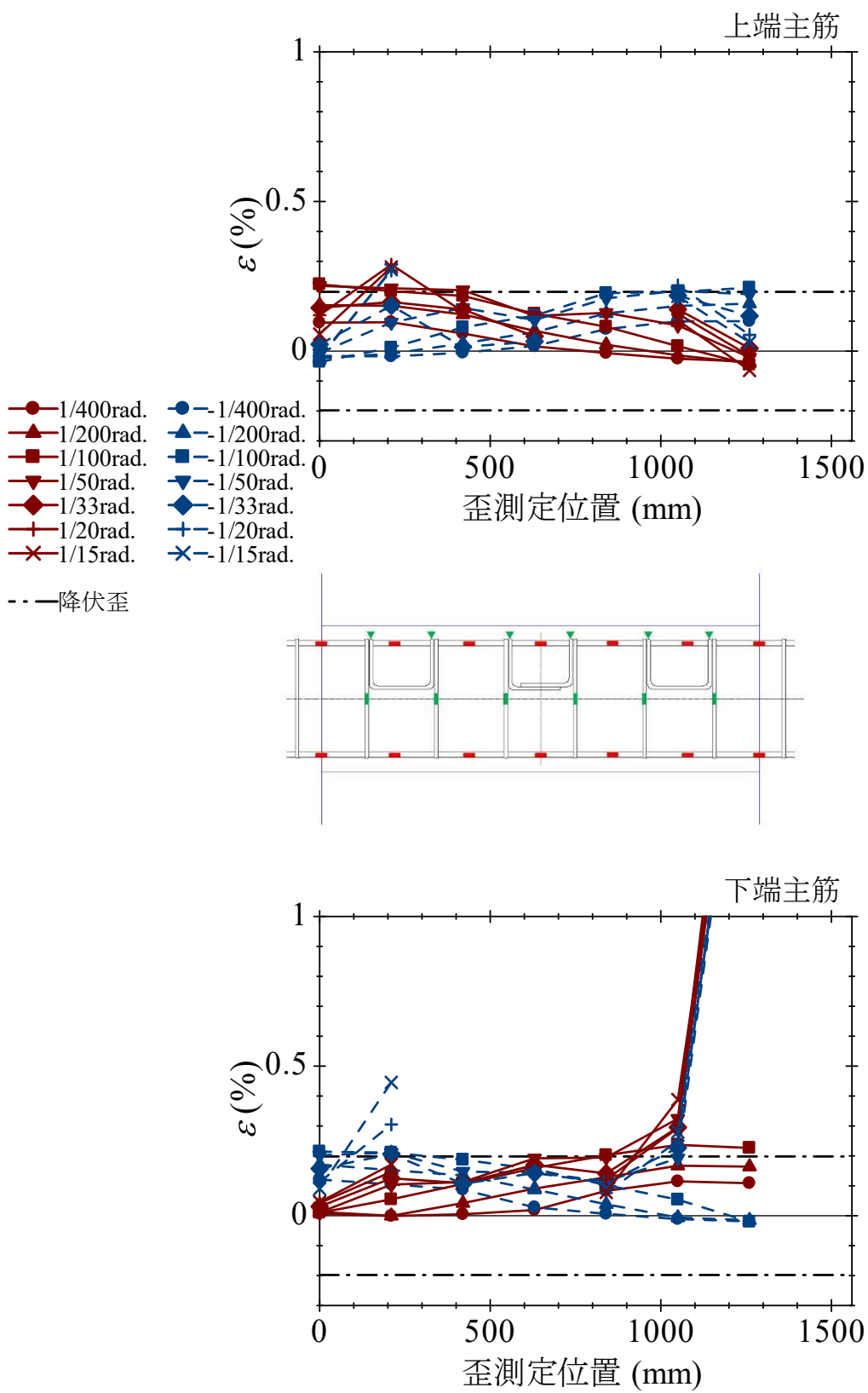


図 3-17 試験体 F18-D19 主筋の歪分布

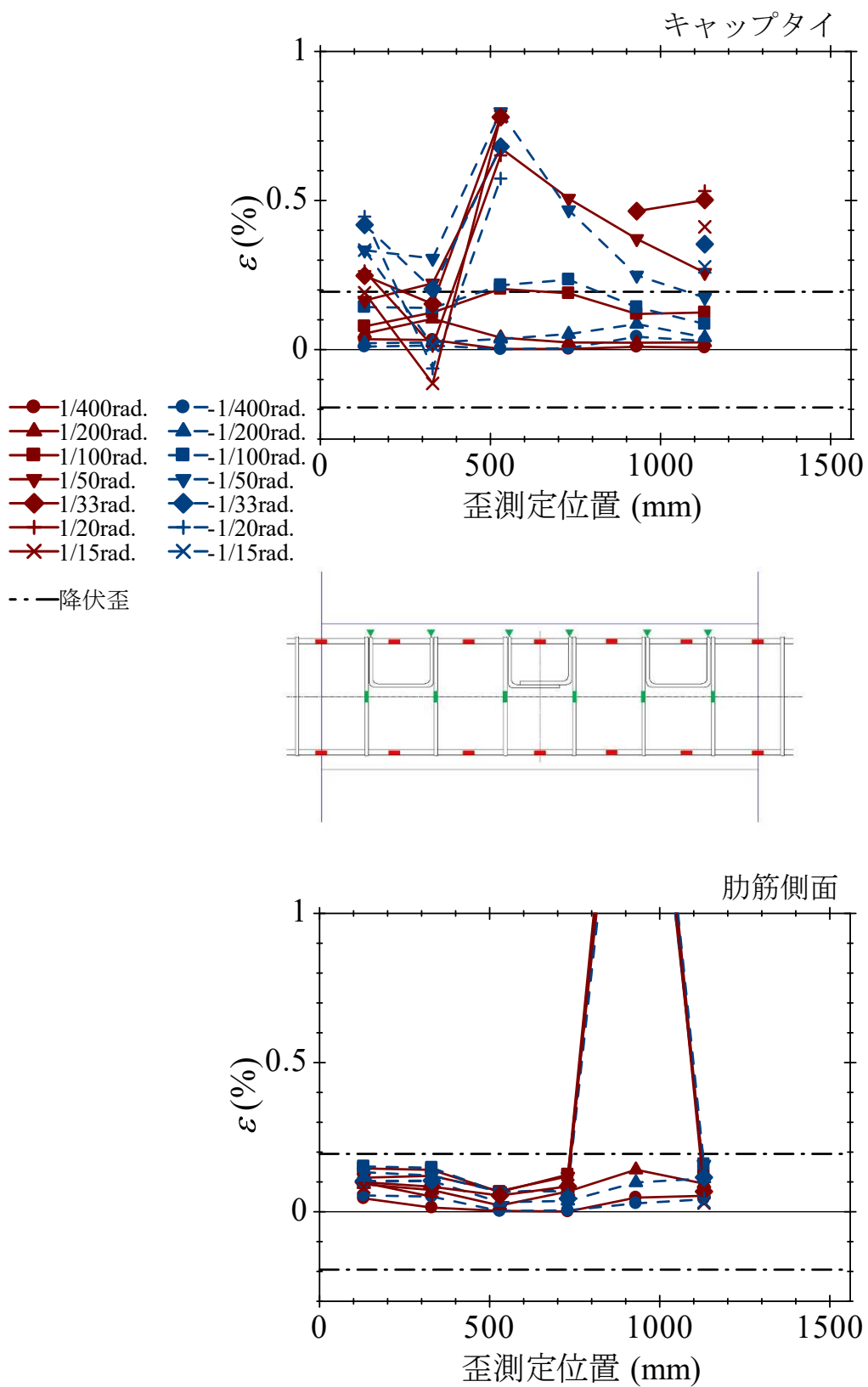


図 3-18 試験体 F18-D19 キャップタイと肋筋の歪分布

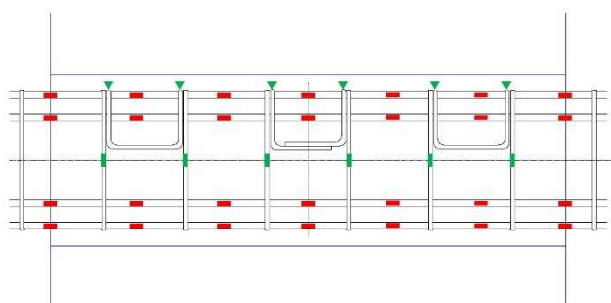
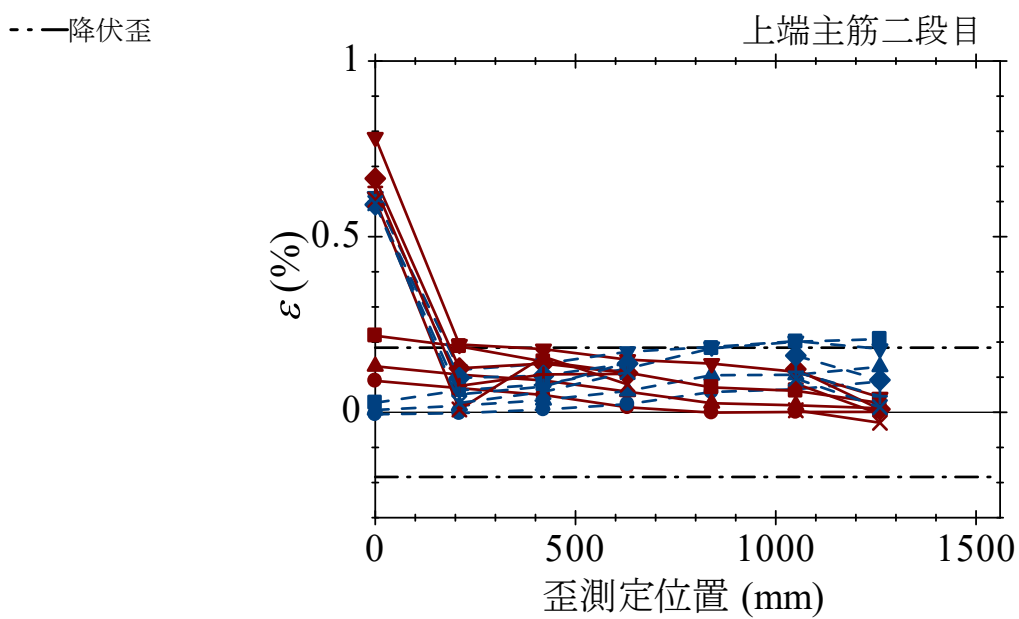
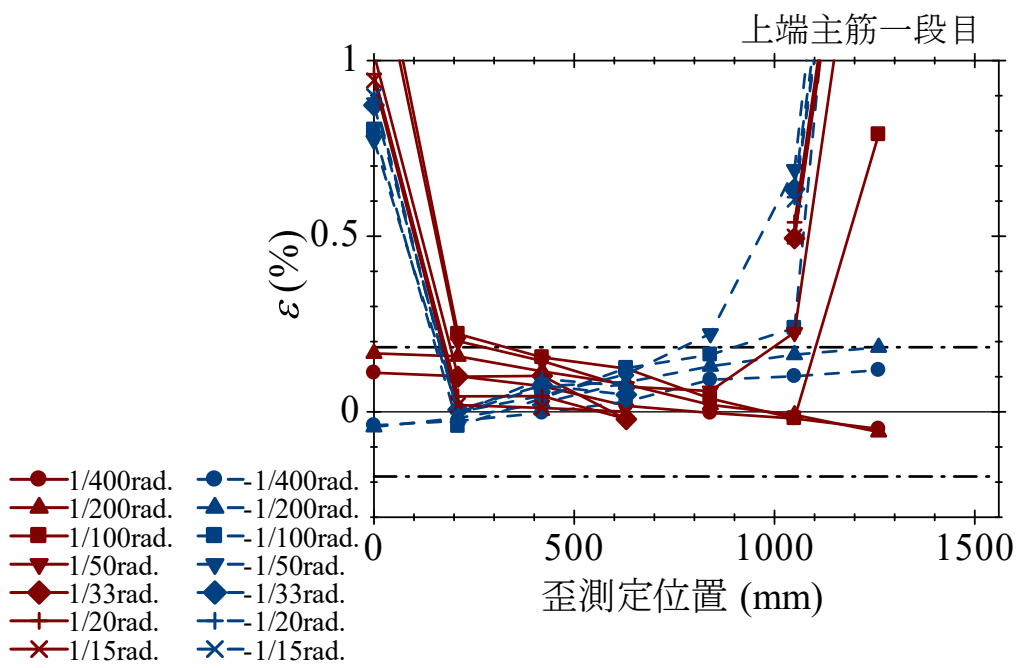


図 3-19 試験体 F18-D16 上端主筋の歪分布

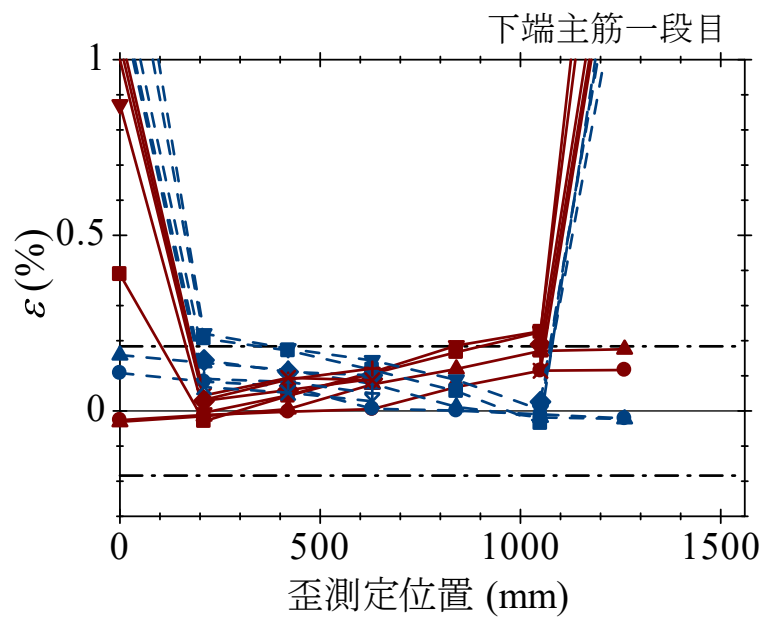
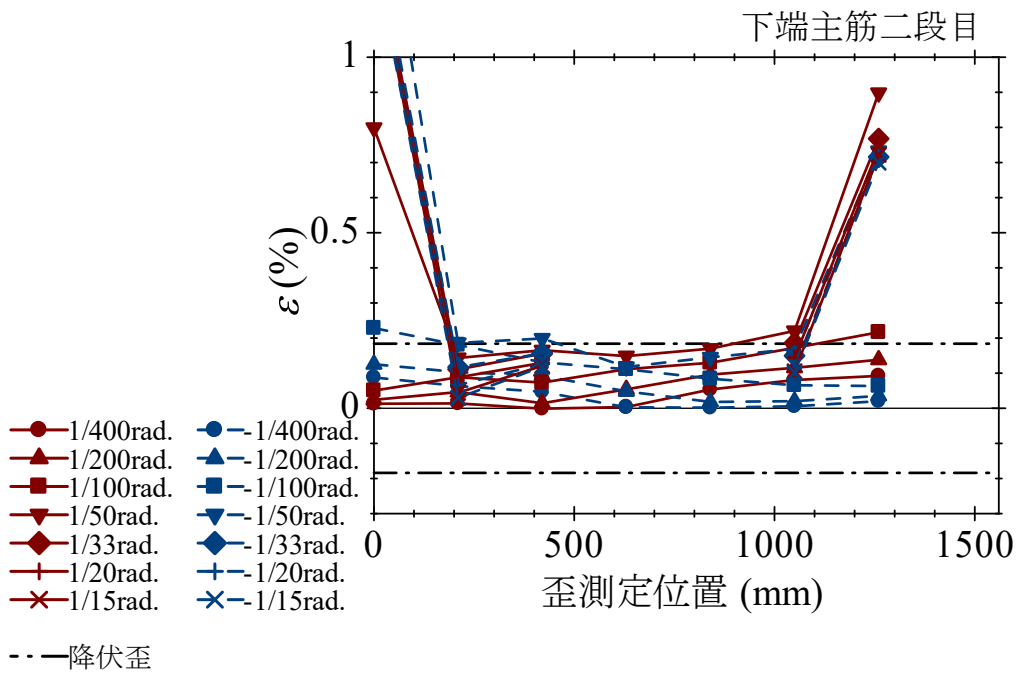
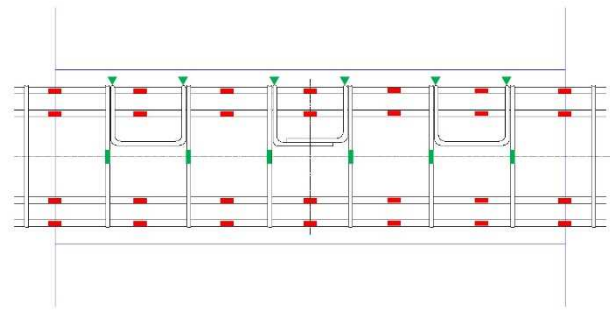


図 3-20 試験体 F18-D16 下端主筋の歪分布

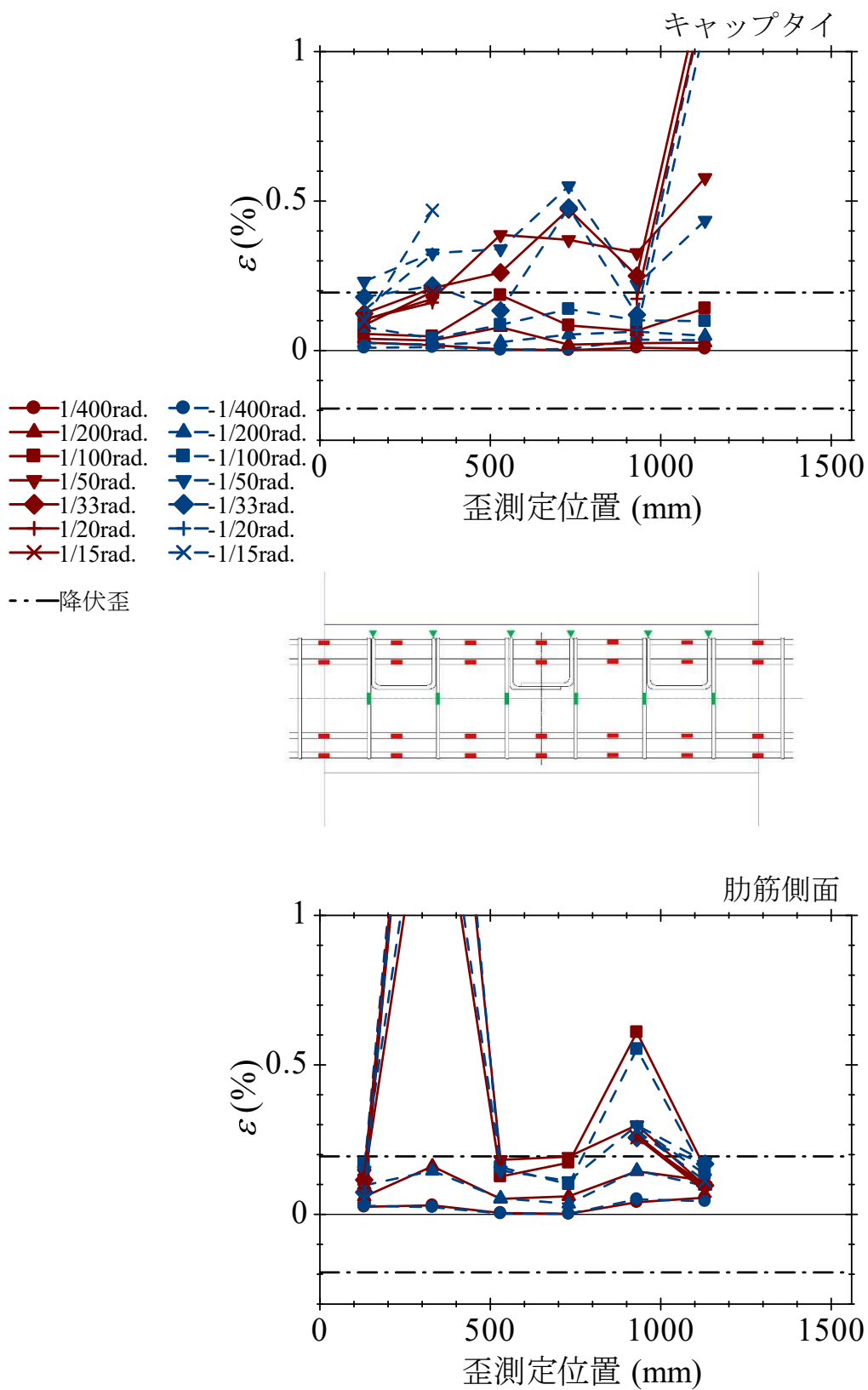


図 3-21 試験体 F18-D16 キャップタイと肋筋の歪分布

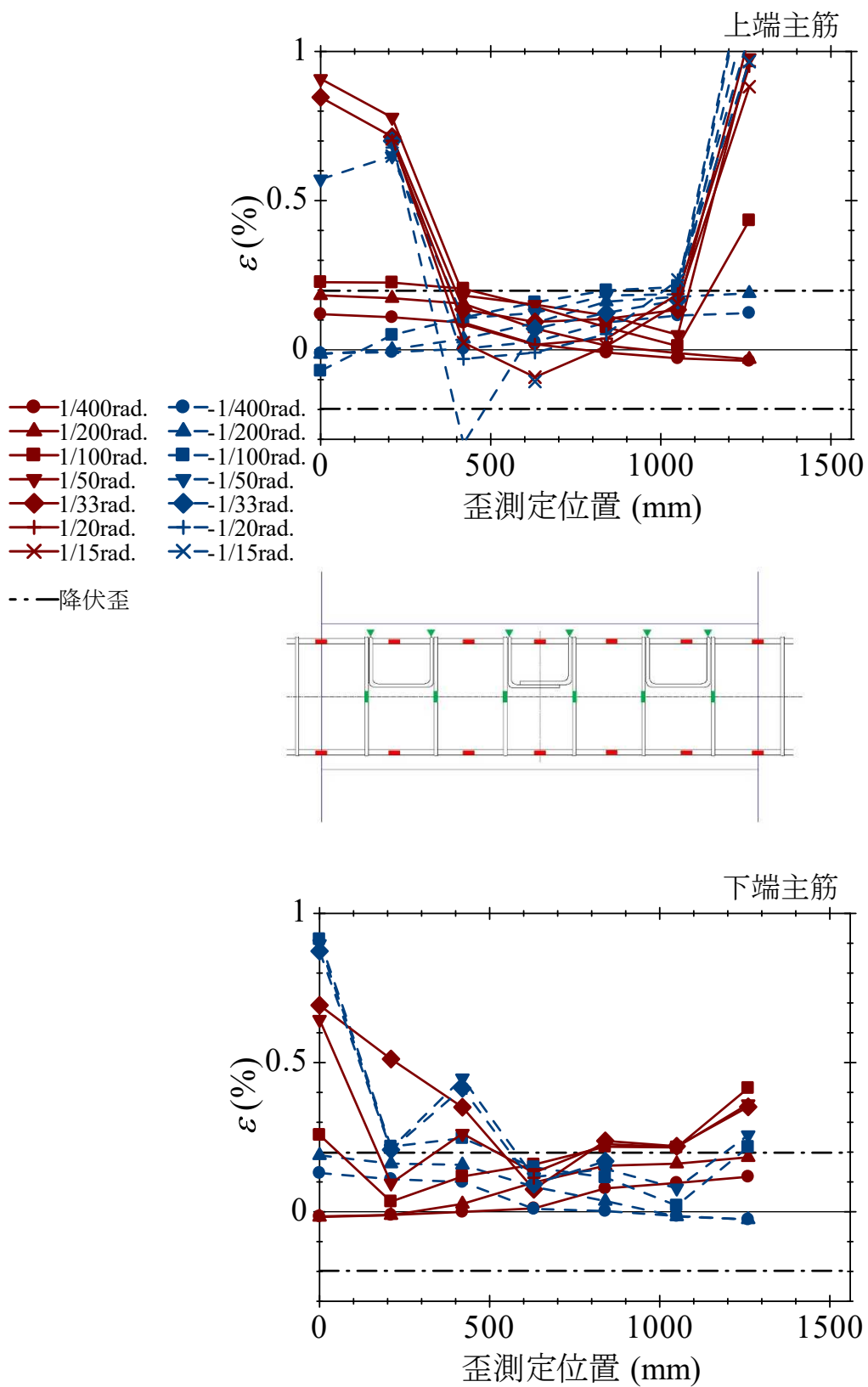


図 3-22 試験体 F30-D19 主筋の歪分布

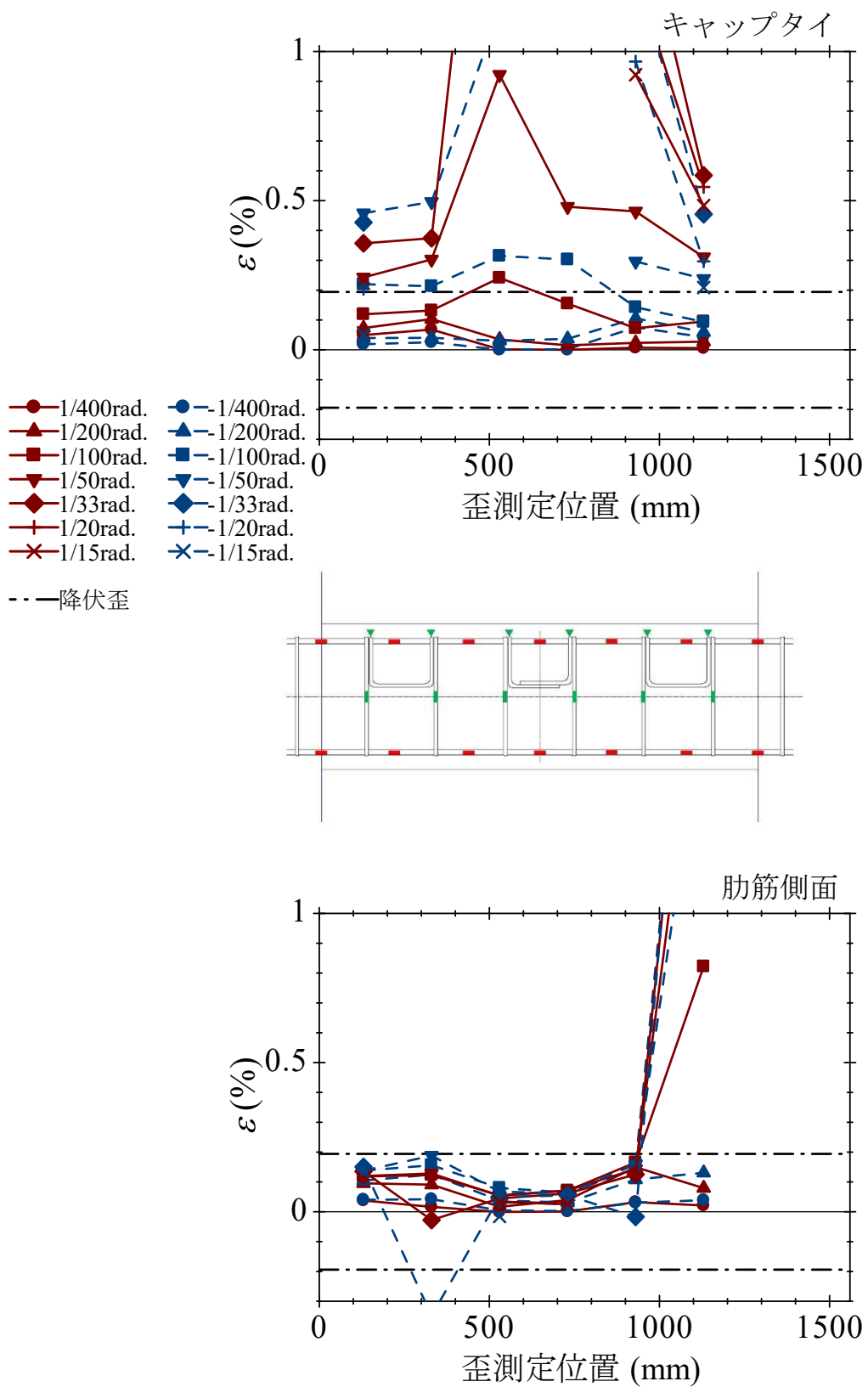


図 3-23 試験体 F30-D19 キャップタイと肋筋の歪分布

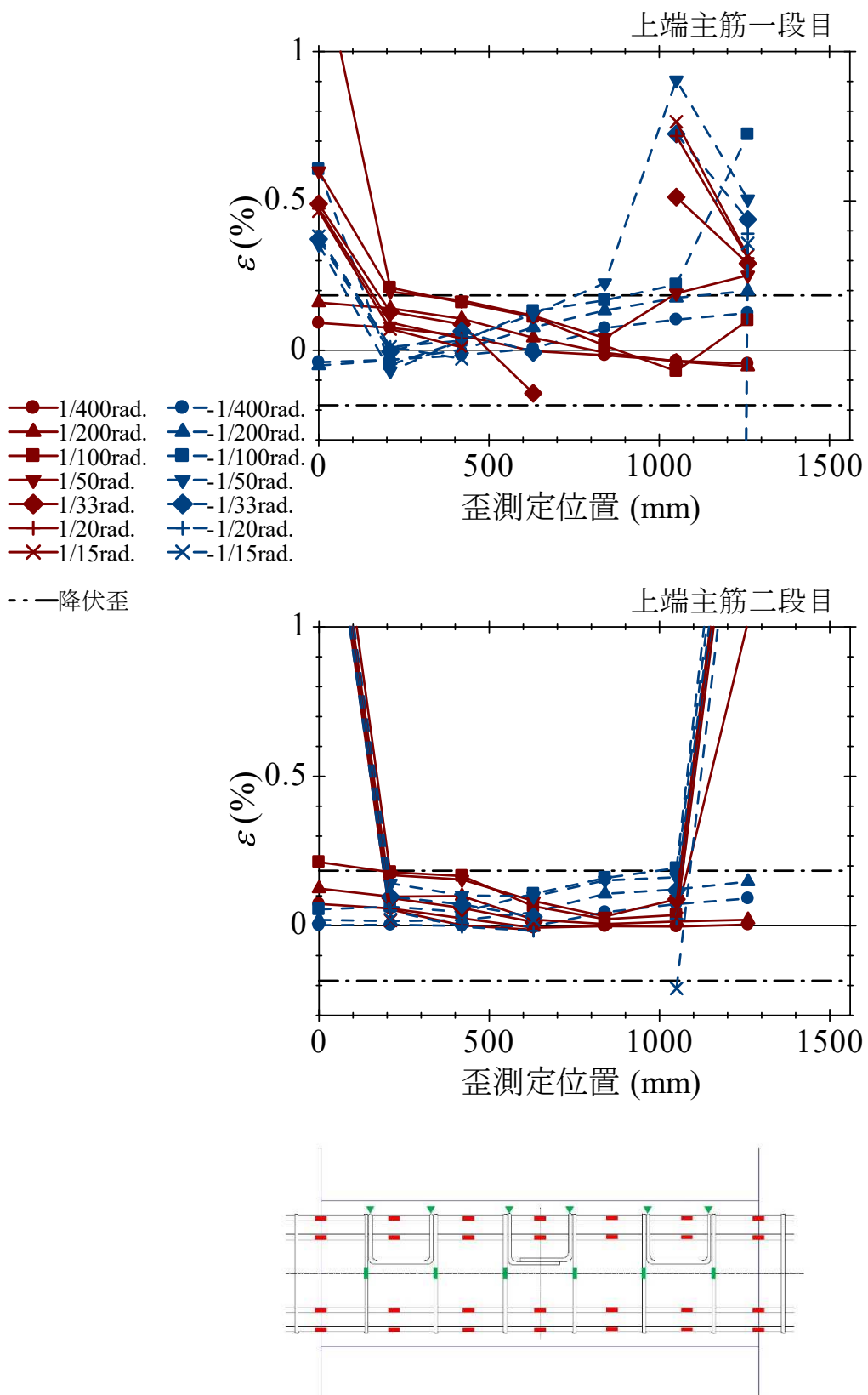


図 3-24 試験体 F30-D16 上端主筋の歪分布

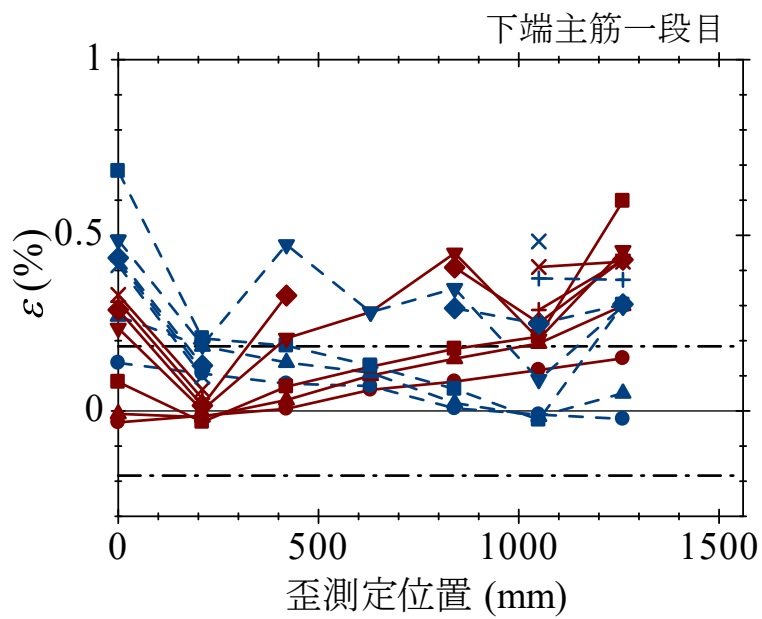
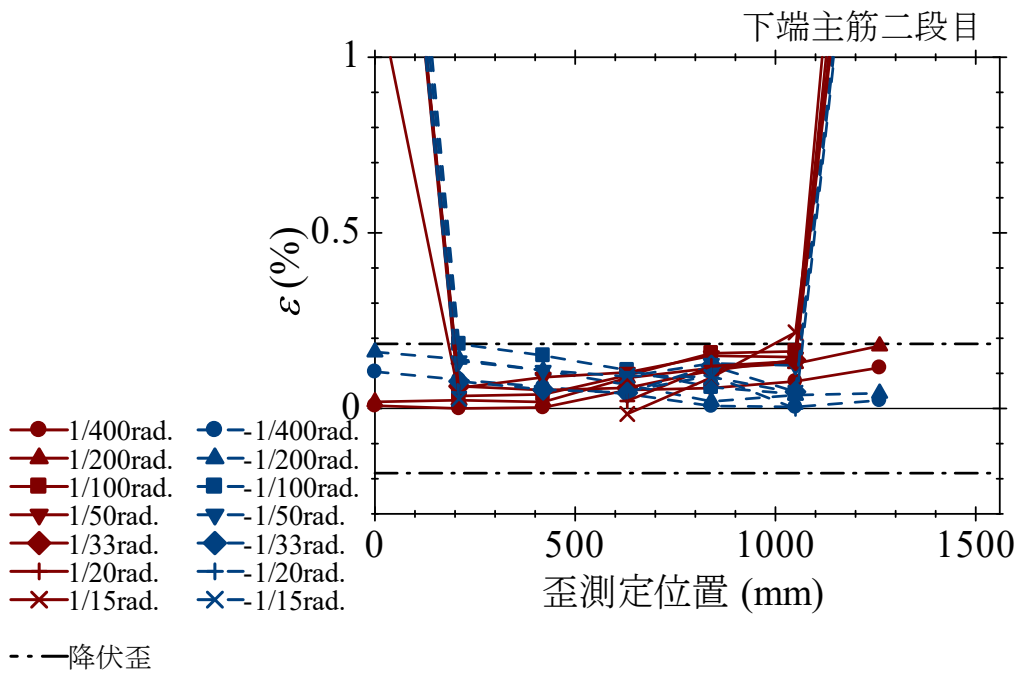
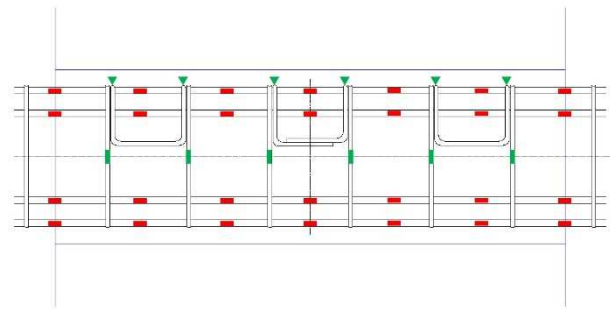


図 3-25 試験体 F30-D16 下端主筋の歪分布

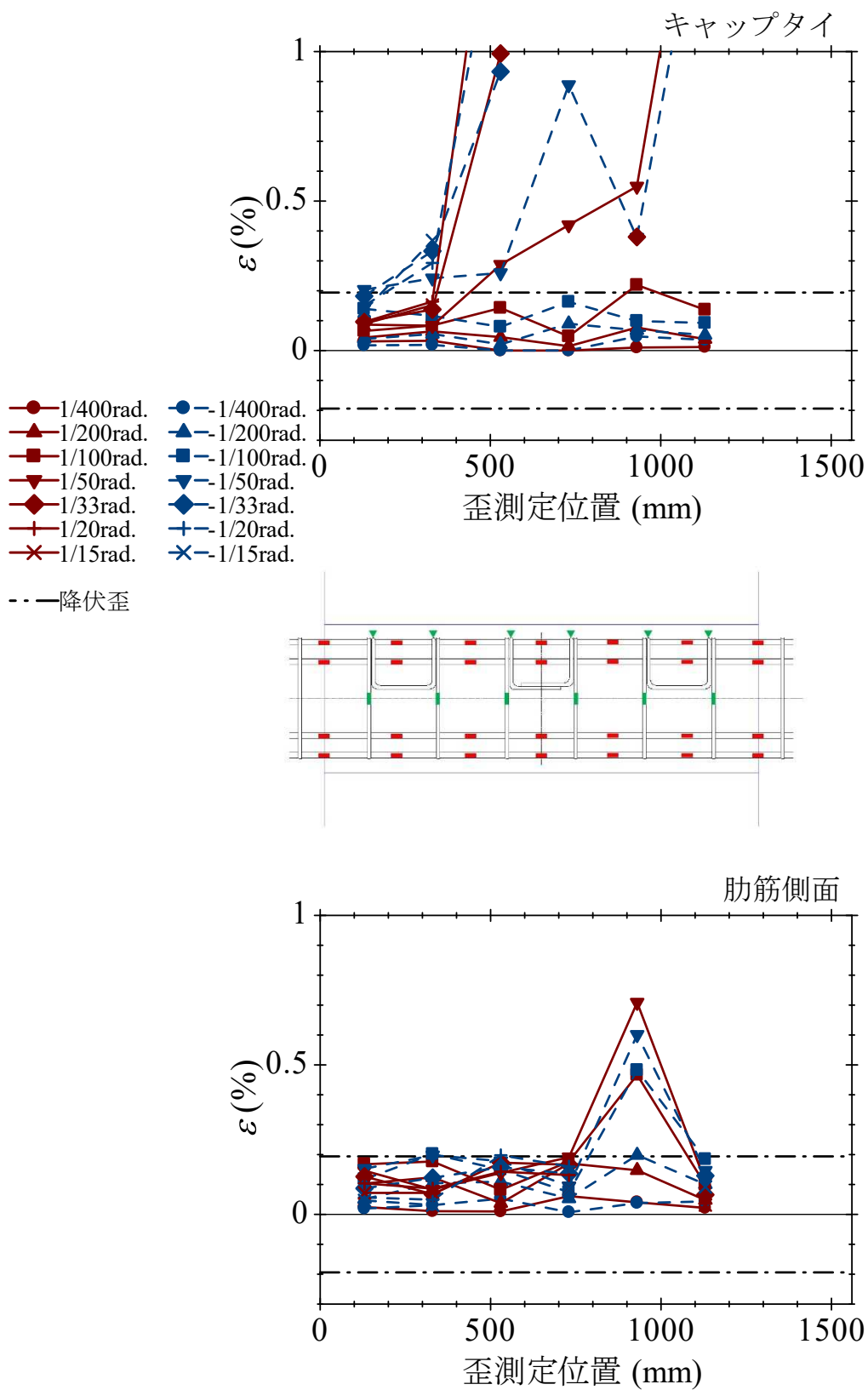


図 3-26 試験体 F30-D16 キャップタイと肋筋の歪分布

3.2.6 付着応力

各主筋について、図 3-27 に示す歪ゲージ貼付け位置の 6 区間で、2 点の歪ゲージの値から求めた応力の差から、それぞれの区間における付着応力を算出した。1/33rad.加力サイクル時までの付着応力と部材角の関係を図 3-29～図 3-40 に示す。なお、グラフ中の計算値は、靱性保証型指針式^図による付着信頼強度の計算値を表している。付着応力の算出にあたり、主筋降伏後の塑性域における鉄筋の材料特性モデルとして、図 3-28 に示す Menegotto-Pinto モデル^図を用いた。

付着割裂破壊が大きく生じた F30-D19 試験体において、付着応力が特に大きくなっている。また、F18-D19 試験体では、下端主筋右側の Sec2 において、せん断力に対し付着が大きく抵抗している様子が見られる。せん断破壊を生じた、主筋に D16 を用いた試験体では、おおむね付着信頼強度程度の大きさに留まっているが、1 段目主筋、2 段目主筋問わず、梁端部において付着応力が大きくなっている箇所を確認できる。特に主筋に D19 を用いた試験体において、同一加力サイクル内で付着応力の勾配が反転している様子が見られるが、これは肋筋が溶接されていることによる主筋のせん断力方向への拘束が影響していると考えられる。

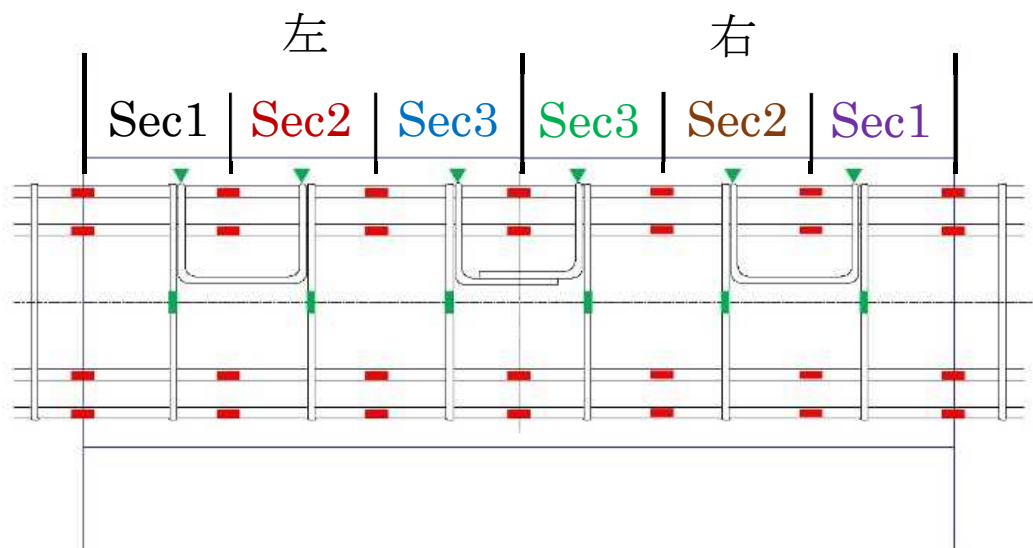


図 3-27 付着応力区間番号

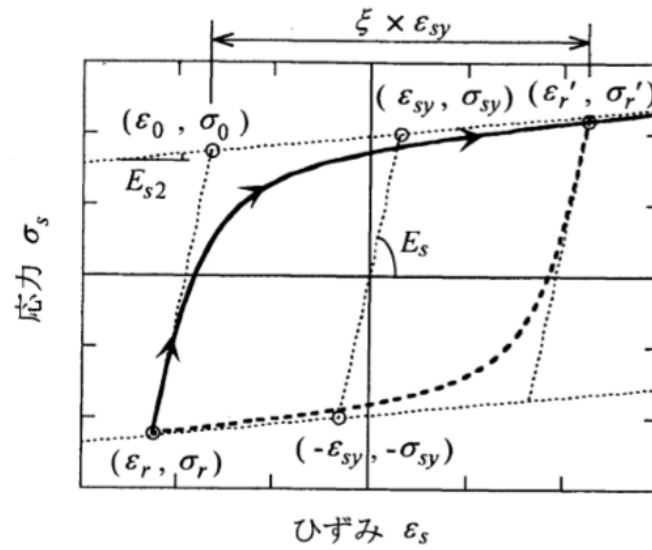


図 3-28 Menegotto-Pinto モデル⁵⁾

Menegotto-Pinto モデル

$$\frac{\sigma_s - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r} = R_s \tilde{\varepsilon} + \frac{(1 - R_s) \tilde{\varepsilon}}{(1 + \tilde{\varepsilon}^{R_b})^{\frac{1}{R_b}}}$$

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r}$$

ここで、

ε_r, σ_r : 載荷反転点の歪と応力
 ε_0, σ_0 : 漸近線の交点
 $\varepsilon_{sy}, \sigma_{sy}$: 鉄筋の降伏歪と降伏応力

$$P_s : = \frac{E_{s2}}{E_s}$$

E_s : 鉄筋初期弾性係数

E_{s2} : 鉄筋降伏後の弾性係数

$$R_b : = R_{b0} - \frac{a_1 \tilde{\varepsilon}}{a_2 + \tilde{\varepsilon}}$$

R_{b0}, a_1, a_2 : 材料定数 ($R_{b0}=20, a_1=18.5, a_2=0.15$ とする)

$$\zeta : = \frac{|\varepsilon_0 - \varepsilon_r|}{\varepsilon_{sy}}$$

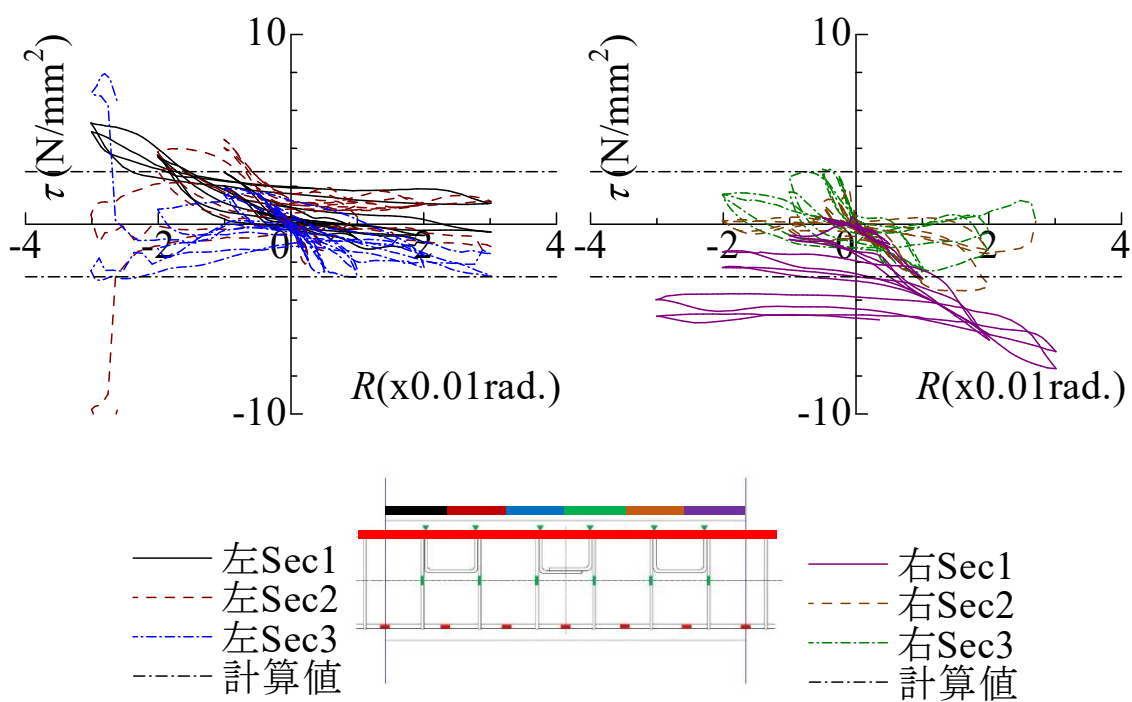


図 3-29 試験体 F18-D19 上端主筋の付着応力一部材角関係

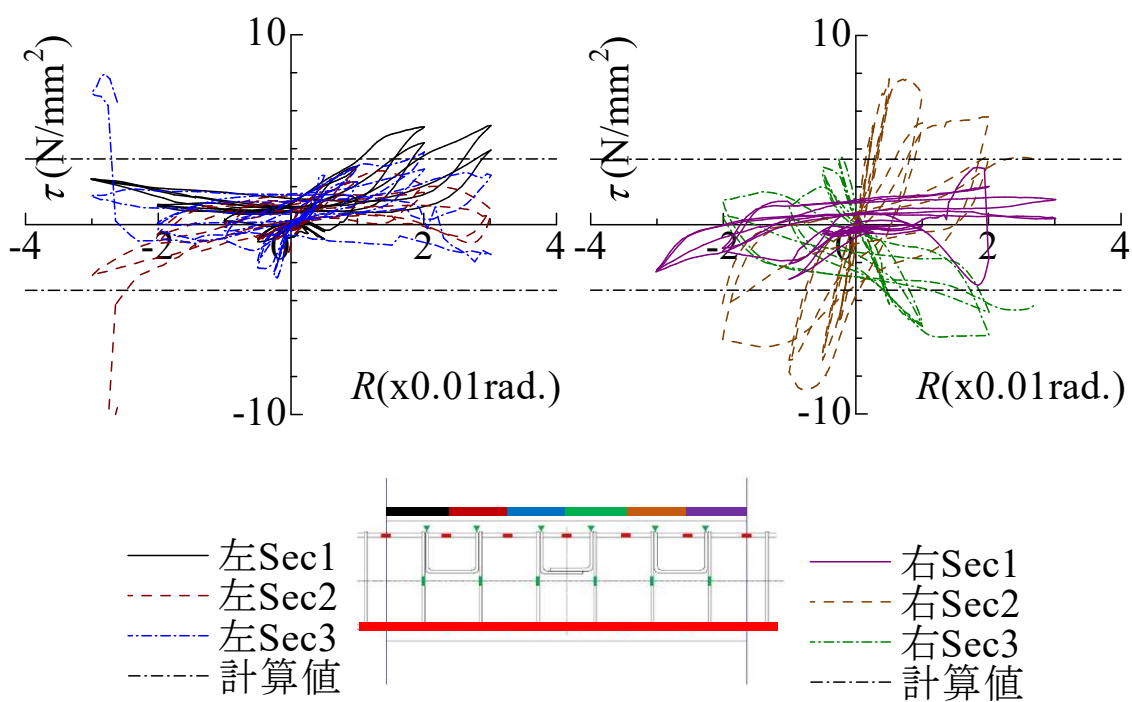


図 3-30 試験体 F18-D19 下端主筋の付着応力一部材角関係

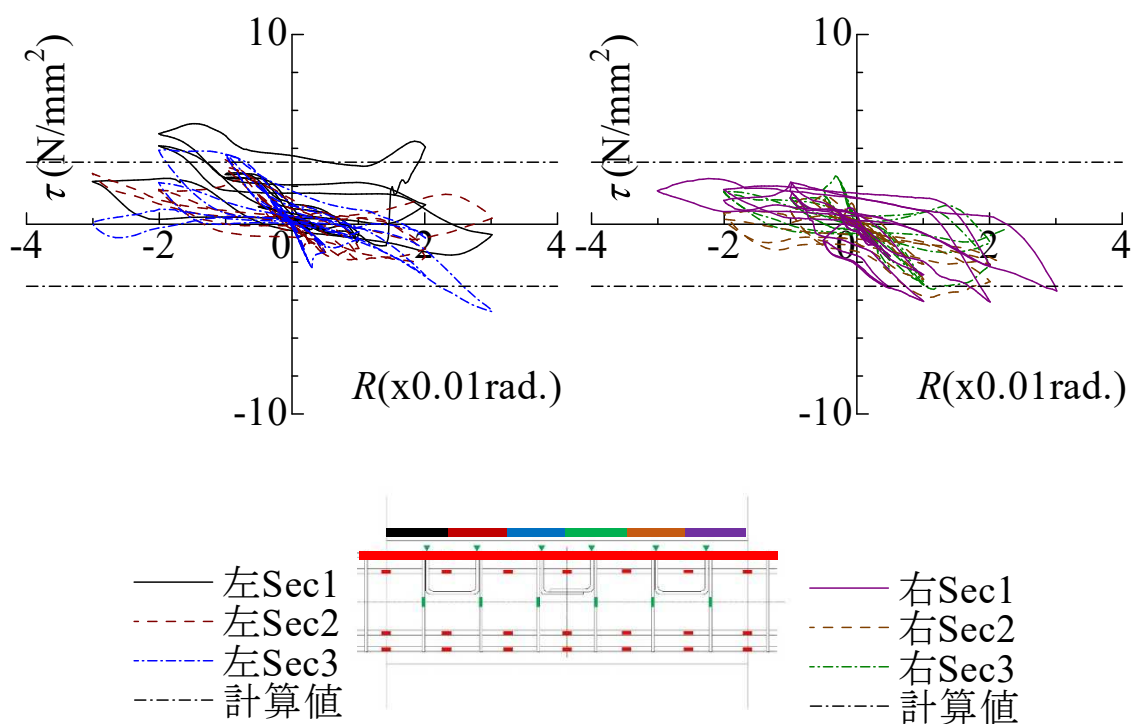


図 3-31 試験体 F18-D16 上端 1 段目主筋の付着応力-部材角関係

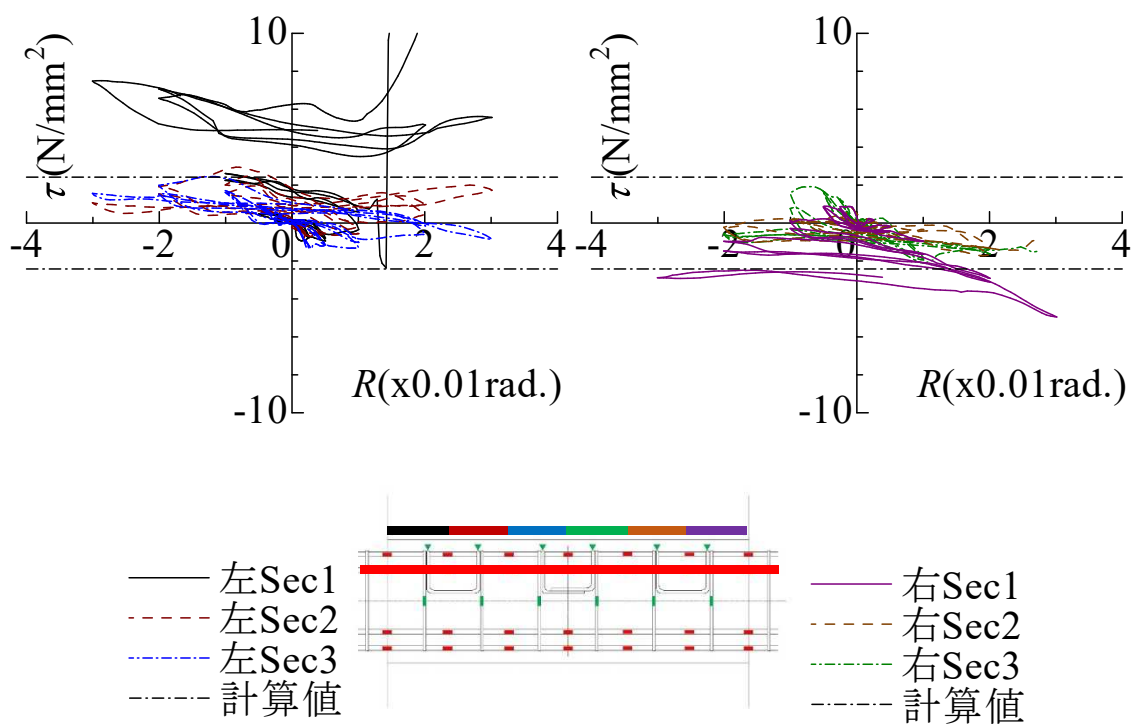


図 3-32 試験体 F18-D16 上端 2 段目主筋の付着応力-部材角関係

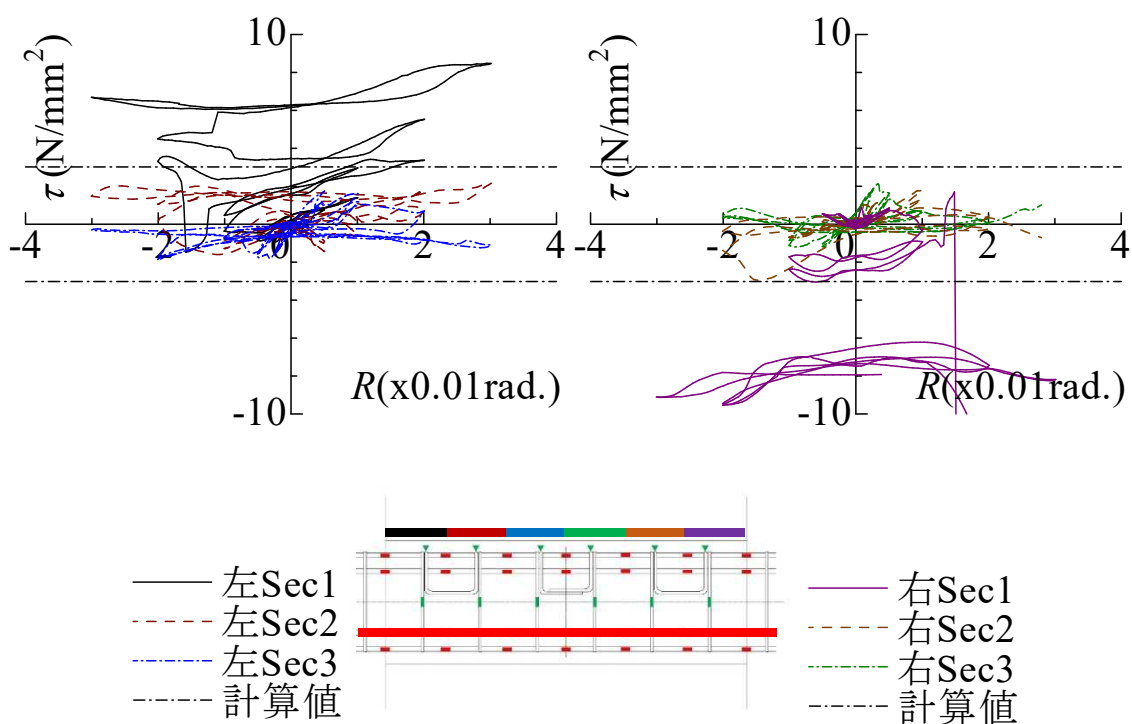


図 3-33 試験体 F18-D16 下端 2 段目主筋の付着応力一部材角関係

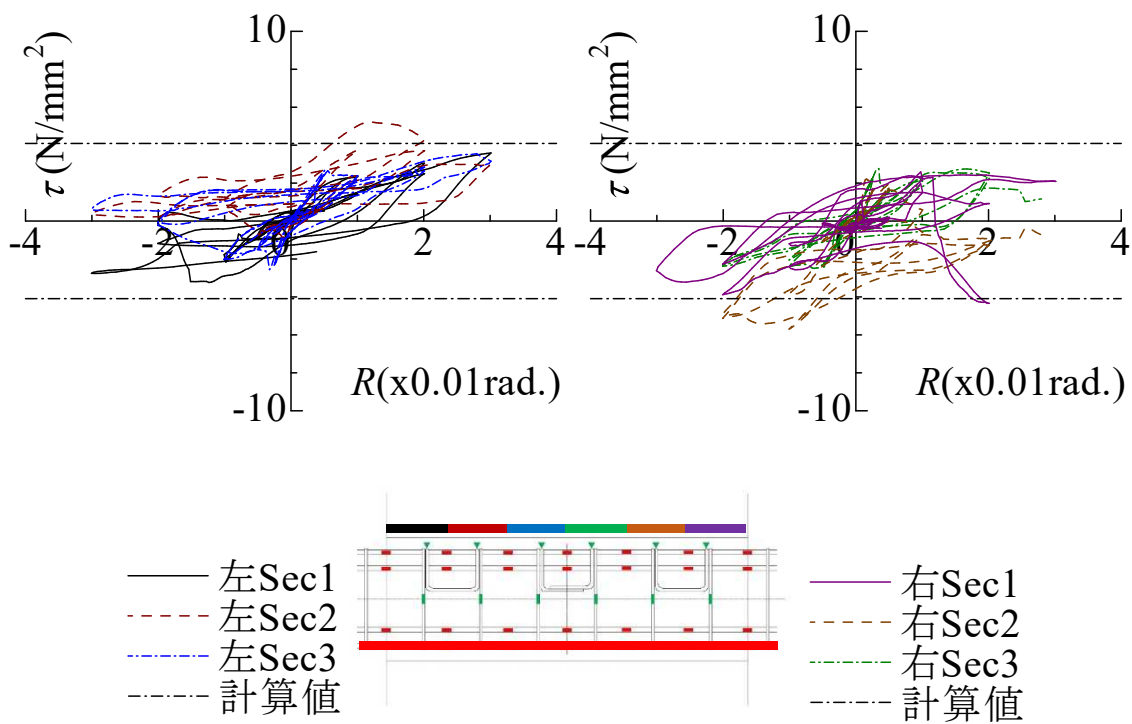


図 3-34 試験体 F18-D16 下端 1 段目主筋の付着応力一部材角関係

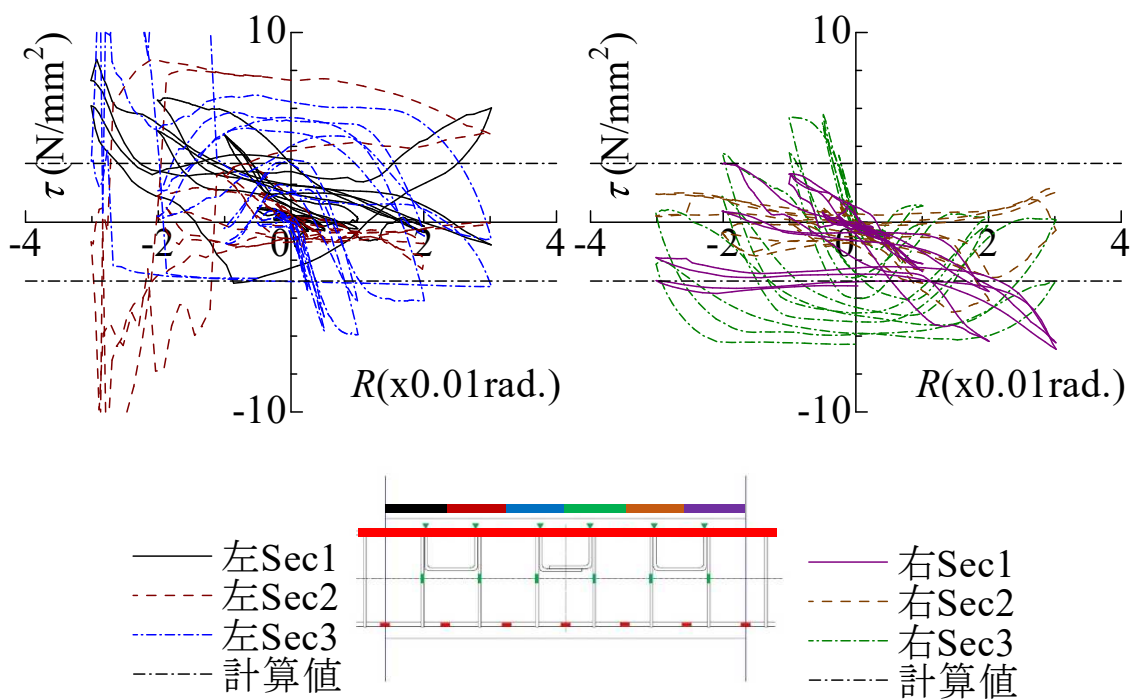


図 3-35 試験体 F30-D19 上端主筋の付着応力一部材角関係

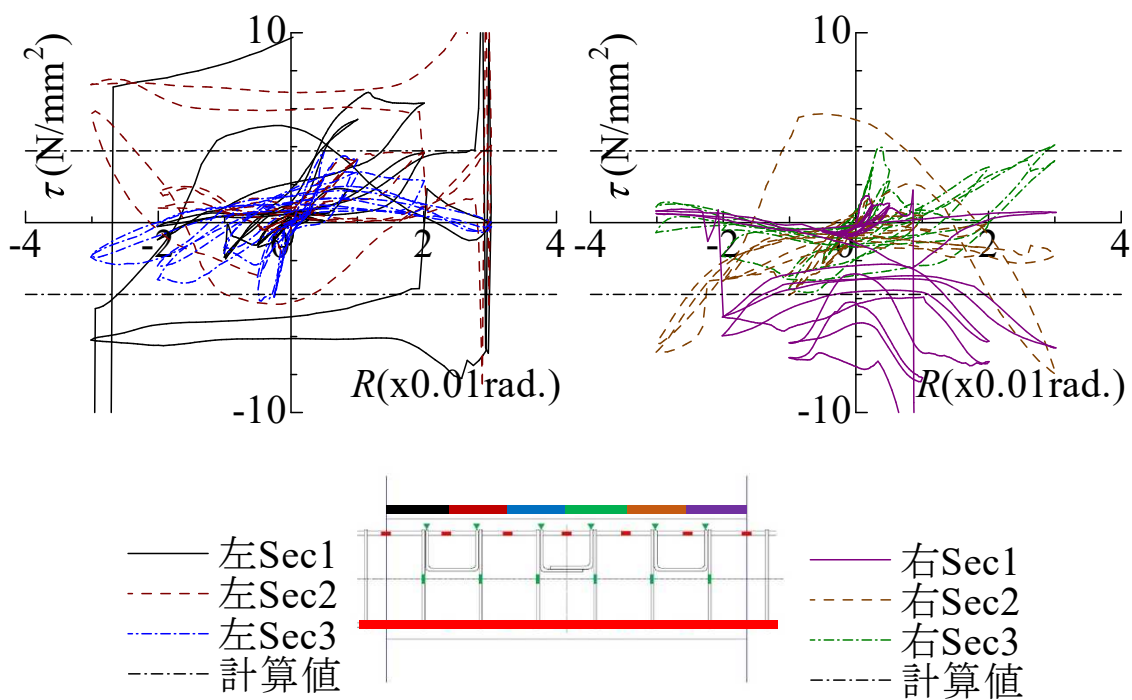


図 3-36 試験体 F30-D19 下端主筋の付着応力一部材角関係

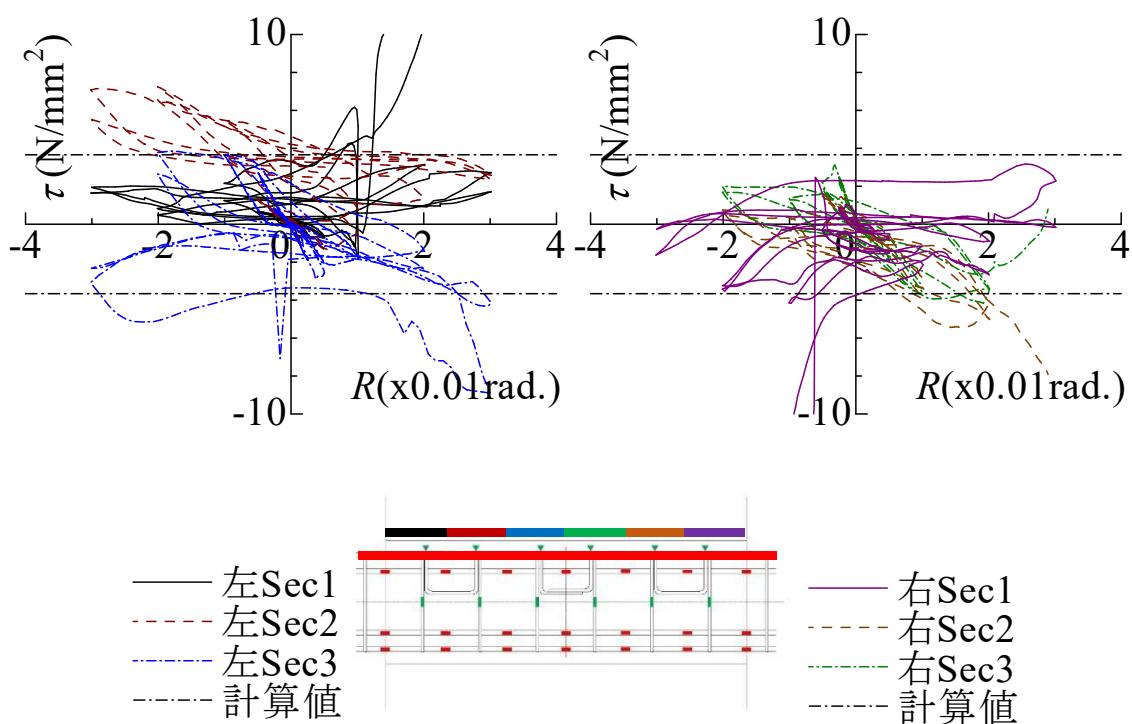


図 3-37 試験体 F30-D16 上端 1 段目主筋の付着応力-部材角関係

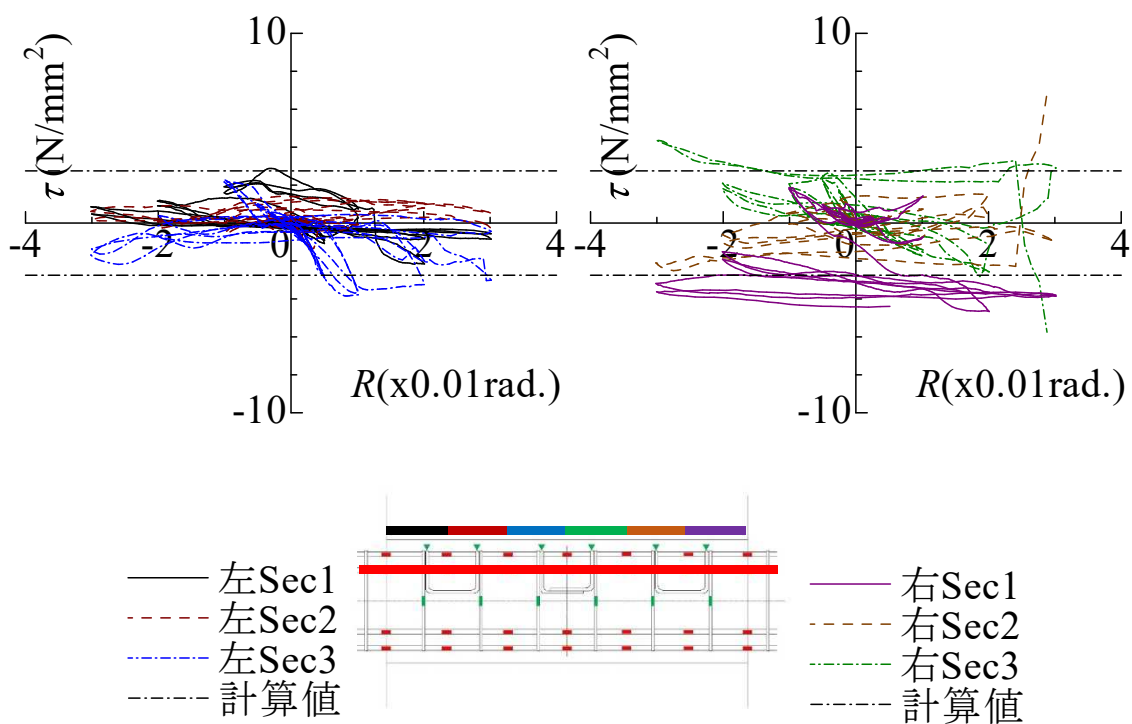


図 3-38 試験体 F30-D16 上端 2 段目主筋の付着応力-部材角関係

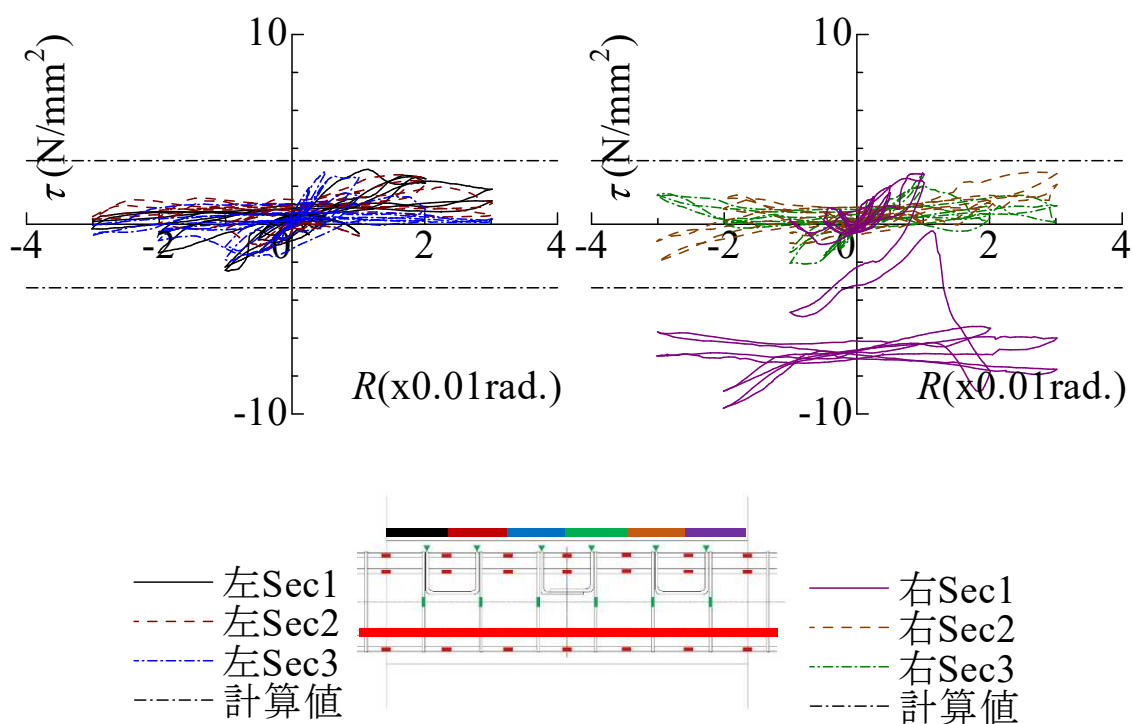


図 3-39 試験体 F30-D16 下端 2 段目主筋の付着応力-部材角関係

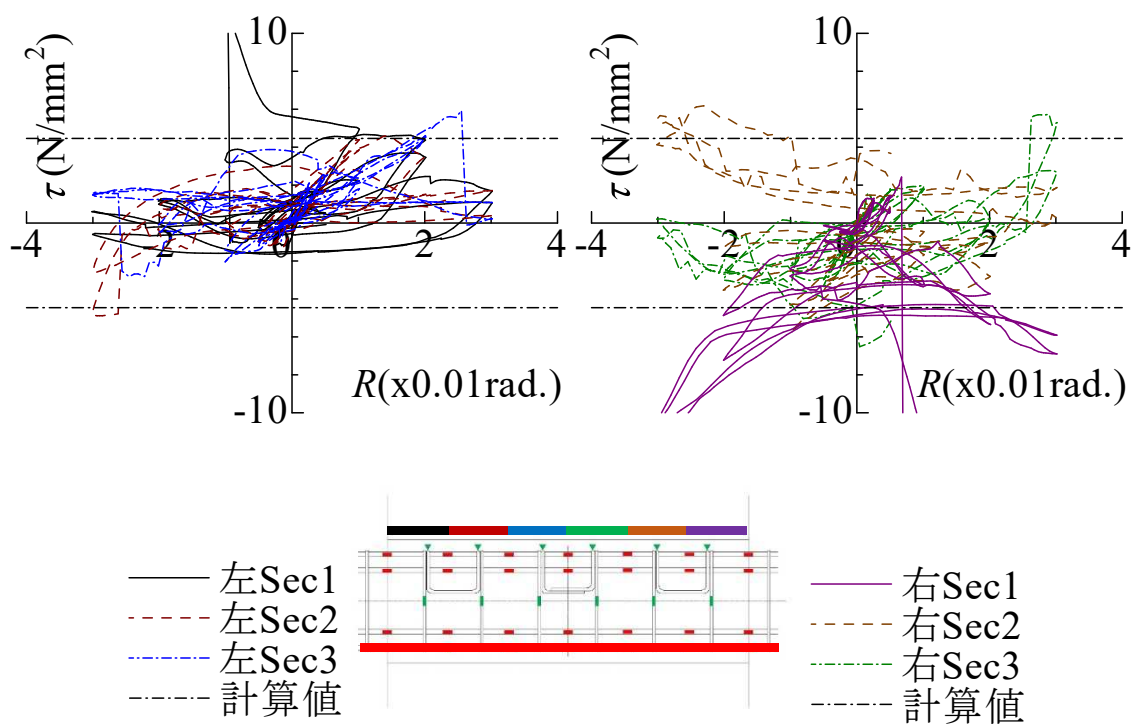


図 3-40 試験体 F30-D16 下端 1 段目主筋の付着応力-部材角関係

3.3 まとめ

本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) すべての試験体で主筋の降伏が先行し、主筋に D19 を用いた試験体（靱性保証型指針による付着余裕度は 1.1～1.3）は付着割裂破壊、D16 を用いた試験体（終局強度型指針によるせん断余裕度は 1.1～1.2）はせん断破壊により耐力が低下した。加力終了後に、肋筋上部溶接部の剥離および底部コーナー部での肋筋破断が確認された。
- (2) 最大荷重はいずれの試験体においても略算式による曲げ強度計算値を上回り、その比は 1.01～1.12 であった。
- (3) いずれの試験体においても、限界変形は 1/50rad.以上であった。
- (4) 主筋、肋筋、キャップタイのいずれも、1/100rad.加力サイクル時から 1/50rad.加力サイクル時において降伏が確認され、特に主筋の降伏は危険断面位置付近に集中した。
- (5) 付着応力は、付着割裂破壊を生じた主筋径が D19 の試験体において大きくなる傾向が見えたが、主筋径が D16 の試験体においても特に梁端部において大きくなった。

第4章 結論

本研究では、溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法ダブル配筋基礎梁の、繰返し荷重下における構造性能を確認することを目的とし、短期荷重下でのせん断性状および曲げ降伏後の破壊性状に着目して、建研式の正負繰返し曲げせん断実験を行った。

せん断性状に着目した梁の繰返し曲げせん断実験では、すべての試験体において 1/100rad. 加力サイクル時に、肋筋の降伏およびせん断破壊により最大荷重が確認された。正側 1/50rad. 加力サイクル時までは、通常 135° フックの肋筋を用いた試験体の荷重よりキャップタイ試験体の荷重が大きい、負側ではほぼ同等となった。タイプ II およびタイプ III のキャップタイを用いた試験体では、大変形時に梁側面定着部のひび割れが拡幅し、耐力低下を伴って梁上端のかぶりコンクリートを押し上げてコアコンクリートの拘束が弱くなっていく様子が伺えた。最大荷重実験値は、すべての試験体において荒川 mean 式および終局強度型指針式 A 法の双方でせん断強度を安全側に評価することができ、キャップタイを用いた試験体の最大荷重は通常 135° フックの肋筋を用いた試験体と同等、もしくはそれ以上であった。既往の実験による単調加力実験の試験体のせん断力-部材角関係との比較を行い、繰返し加力の試験体のせん断力-部材角関係が、正側加力では単調加力の試験体と同等の性状を示し、負側加力では性能が低下する様子を確認した。

梁の曲げ降伏後の破壊性状に着目した繰返し曲げせん断実験では、すべての試験体で主筋の降伏が先行し、主筋に D19 を用いた試験体は付着割裂破壊、D16 を用いた試験体はせん断破壊により耐力が低下した。最大荷重は 1/100rad. 加力サイクル時もしくは 1/50rad. 加力サイクル時に確認され、いずれの試験体においても略算式による曲げ強度計算値を上回った。限界変形はいずれの試験体でも 1/50rad. 以上を示し、主筋、肋筋、キャップタイのいずれも、1/100rad. 加力サイクル時から 1/50rad. 加力サイクル時において降伏がみられ、特に主筋の降伏は危険断面位置付近に集中した。付着応力は、付着割裂破壊を生じた主筋径が D19 の試験体において大きくなる傾向が見えたが、主筋径が D16 の試験体においても特に梁端部において大きくなった。

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。研究テーマ設定から実験およびその準備、論文作成にいたるまで懇切丁寧なご指導を賜りました、指導教員である筑波大学教授金久保利之先生をはじめ、実験材料、情報の提供ならびに種々の助言を賜りました三栄商事株式会社の皆様、アフェクト設計事務所岡田健良氏、試験体製作に当たりご協力いただきました山田建物株式会社の皆様、アシス株式会社の皆様、実験において数多くの助言およびご協力をいただきました筑波大学技術職員小島篤志氏、研究遂行にあたり助言およびご協力いただきました筑波大学助教八十島章先生、所属研究室の同期の友人および後輩達、そして大学生活を支えてくださった家族に、この場を借りてお礼申し上げます。

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、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
- [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（案）・同解説、1997
- [5] 堺淳一、川島一彦：部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案、土木学会論文集、No.738/I-64、pp.159-169、2003.7