

筑波大学大学院博士課程
理工情報生命学術院
システム情報工学研究群修士論文

EAFP導入ひび割れにより付着劣化を 模擬したRC部材の剛性と履歴性状

下河邊大貴

修士（工学）

（構造エネルギー工学学位プログラム）

指導教員 金久保利之

2023年 3月

論文概要

高度経済成長期の建設ラッシュ時に建設された現存する多くの鉄筋コンクリート（以下RC）造構造物が建設から50年以上経過し、塩害や中性化などの環境要因や経年劣化による性能低下が危惧されている。性能低下の代表例である鉄筋腐食は、鉄筋の断面減少とコンクリートのひび割れを引き起こす。鉄筋の断面減少がRC造構造物の構造性能に与える影響については既往の研究で数多く検討がなされているが、コンクリートのひび割れそのものが与える影響に着目した例は少ない。本研究では、腐食ひび割れがRC部材の構造性能に与える影響について検討することを目的とし、付着劣化を模擬したRC梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験および同手法で付着劣化を模擬したプリズム試験体の両引き試験を実施した。逆対称繰返し曲げせん断実験および両引き試験における腐食ひび割れの模擬には、破砕剤充填パイプ（EAFP）導入ひび割れにより付着劣化を模擬する手法を採用した。

第1章では、本研究の背景について整理し、目的を明確にした。

第2章では、EAFP導入ひび割れにより付着劣化を模擬したRC梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を実施し、得られた履歴性状から腐食ひび割れが構造性能に与える影響について検討を行った。加力前ひび割れ幅が大きい試験体において最大耐力の低下がわずかに見られた。また、剛性についても部材角 $1/100 \sim 1/400 \text{ rad}$ 時において加力前ひび割れ幅の増大に伴い低下する傾向が見られた。一方で、加力前ひび割れが比較的小さい試験体で顕著な曲げせん断ひび割れが発生し、包絡線および累積エネルギー吸収量の比較により、最大耐力以降の性能の低下が見られた。

第3章では、EAFP導入ひび割れにより付着劣化を模擬したプリズム試験体の両引き試験を実施し、腐食ひび割れが剛性低下に与える影響について検討を行った。また、プリズム試験体と同一断面試験体の引抜き試験を実施し、実験結果より求めた付着構成則を用いて両引き試験の解析を行い、実験結果との比較検討を行った。加力前ひび割れ幅による剛性低下は全体変形が 0.3 mm 程度までの範囲で顕著に見られ、 1.0 mm 以降では加力前ひび割れ幅による差はほとんど見られなかった。実験結果と解析結果との比較では、総じて解析結果は実験結果の荷重を上回ったが、鉄筋が降伏するまでに発生するひび割れ本数にはある程度対応が見られた。また、鉄筋降伏までで直線回帰した剛性は実験結果と解析結果により対応が見られた。

第4章では、本論文の結論を述べた。

目次

第1章 序論.....	5
1.1 研究背景.....	5
1.2 研究目的.....	6
1.3 EAFP導入ひび割れによる付着劣化模擬.....	7
第2章 繰返し曲げせん断応力下の履歴性状.....	8
2.1 はじめに.....	8
2.2 実験概要.....	9
2.2.1 試験体.....	9
2.2.2 使用材料.....	12
2.2.3 加力方法.....	15
2.2.4 計測方法.....	16
2.3 実験結果.....	18
2.3.1 試験体破壊状況.....	18
2.3.2 せん断力－部材角関係.....	22
2.3.3 最大耐力.....	24
2.3.4 包絡線の比較.....	25
2.3.5 主筋のひずみ分布.....	26
2.3.6 付着応力の検討.....	31
2.3.7 累積エネルギー吸収量の比較.....	36
2.3.8 剛性の比較.....	37
2.4 まとめ.....	38
第3章 腐食ひび割れが剛性に及ぼす影響.....	39
3.1 はじめに.....	39
3.2 実験概要.....	40
3.2.1 試験体.....	40
3.2.2 使用材料.....	43
3.2.3 加力・計測方法.....	45
3.3 実験結果.....	46
3.3.1 両引き試験体のひび割れ発生状況.....	46
3.3.2 両引き試験体の引張荷重－全体変形関係.....	49
3.3.3 腐食ひび割れによる剛性低下.....	51

3.4 両引き試験の解析	52
3.4.1 引抜き試験の結果と付着構成則のモデル化	52
3.4.2 解析方法	53
3.4.3 実験結果と解析結果の比較	55
3.5 まとめ	58
第4章 結論	59
謝辞	60
参考文献	61

図表目次

図 2.2.1	試験体配筋図	9
図 2.2.2	せん断余裕度-付着余裕度関係	10
図 2.2.3	鉄筋の応力-ひずみ関係	13
図 2.2.4	グラウト充填アルミパイプの応力-ひずみ関係	14
図 2.2.5	加力装置図	15
図 2.2.6	加力履歴	15
図 2.2.7	変位計設置位置 (単位: mm)	16
図 2.2.8	ひずみゲージ貼付位置	17
図 2.3.1	ひび割れ発生状況 (NC)	18
図 2.3.2	ひび割れ発生状況 (C-Lv.1)	19
図 2.3.3	ひび割れ発生状況 (C-Lv.2)	20
図 2.3.4	ひび割れ発生状況 (C-Lv.3)	21
図 2.3.5	せん断力-部材角関係	23
図 2.3.6	加力前ひび割れ幅-最大耐力関係	24
図 2.3.7	包絡線の比較	25
図 2.3.8	主筋ひずみ分布 (NC)	27
図 2.3.9	主筋ひずみ分布 (C-Lv.1)	28
図 2.3.10	主筋ひずみ分布 (C-Lv.2)	29
図 2.3.11	主筋ひずみ分布 (C-Lv.3)	30
図 2.3.12	ひずみゲージ貼付け位置と区間番号	31
図 2.3.13	主筋の付着応力 (NC)	32
図 2.3.14	主筋の付着応力 (C-Lv.1)	33
図 2.3.15	主筋の付着応力 (C-Lv.2)	34
図 2.3.16	主筋の付着応力 (C-Lv.3)	35
図 2.3.17	累積エネルギー吸収量および累積エネルギー吸収量比	36
図 2.3.18	サイクルピーク時の剛性	37
図 2.3.19	剛性劣化比	37
図 3.2.1	試験体配筋図	40
図 3.2.2	測定する加力前ひび割れ幅 ... エラー! ブックマークが定義されていません。	
図 3.2.3	引抜き試験体	42
図 3.2.4	鉄筋の応力-ひずみ関係	44
図 3.2.5	加力装置	45
図 3.2.6	変位計設置位置	45
図 3.2.7	加力方法および変位計設置位置	45
図 3.3.1	鉄筋降伏時のひび割れ発生状況	48
図 3.3.2	引張荷重-全体変形関係 (各試験体)	49
図 3.3.3	引張荷重-全体変形関係 (各試験体の比較)	50
図 3.3.4	剛性劣化比-全体変形関係	51

図 3.3.5	同一変形時における加力前ひび割れ幅と剛性劣化比の関係	51
図 3.4.1	付着応力—自由端すべり関係	52
図 3.4.2	付着構成則	52
図 3.4.3	微小区間の釣り合い ^[10]	53
図 3.4.4	ひび割れ発生による付着長の変化	54
図 3.4.5	健全試験体の実験結果と解析結果の比較	55
図 3.4.6	加力前ひび割れのある試験体の実験結果と解析結果の比較	56
表 2.2.1	試験体一覧	9
表 2.2.2	試験体の耐力計算結果	10
表 2.2.3	コンクリートの調合計画	12
表 2.2.4	コンクリートの材料試験結果	12
表 2.2.5	検討用コンクリート強度	12
表 2.2.6	鉄筋の引張試験結果	13
表 2.2.7	グラウト充填アルミパイプの引張試験結果	14
表 2.3.1	最大耐力実験結果	24
表 2.3.2	サイクルピーク時の剛性	37
表 3.2.1	試験体一覧	40
表 3.2.2	コンクリートの調合計画	43
表 3.2.3	コンクリートの材料試験結果	43
表 3.2.4	検討用コンクリート強度	43
表 3.2.5	鉄筋の引張試験結果	44
表 3.3.1	加力前ひび割れ幅および鉄筋降伏時のひび割れ本数	46
表 3.4.1	回帰直線の傾きの実験結果と解析結果の比較	57

第1章 序論

1.1 研究背景

高度経済成長期の建設ラッシュによって建設された、現存する多くの鉄筋コンクリート（以下 RC）造構造物が建設から 50 年以上経過し、塩害や中性化など、環境要因や経年劣化による性能低下が危惧されている。これらの構造物を今後も継続的に使用していくためには、劣化箇所の早急な発見と、適切な維持管理を図ることが求められ、劣化の度合いに応じた補修を行うために劣化による構造物の構造性能の低下を定量的に評価できる指針を設けることが重要である。

RC 造構造物の性能低下を引き起こす経年劣化の代表例として鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋腐食は鉄筋の断面減少による鉄筋自体の強度低下とともに、鉄筋表面に生成される腐食生成物により体積膨張が起これ、コンクリートにひび割れが生じることで構造性能の低下を引き起こすと考えられている。現在までに、鉄筋腐食による鉄筋自体の断面減少が RC 造構造物の構造性能の低下に及ぼす影響に着目した研究は幅広く行われているが、腐食生成物によるコンクリート表面のひび割れ（以下、腐食ひび割れ）と構造性能の低下の関係に着目した研究は多くない。しかし、劣化に起因する構造性能の低下について定量的に評価するという観点において、目視での観察が可能な腐食ひび割れと構造性能の低下についての指標は有効であると考えられる。

既往研究^[1]では、腐食ひび割れが構造性能の低下に与える影響を検討する目的で、破砕剤充填パイプ（Expansion Agent Filled Pipe：以下 EAFP）導入ひび割れにより付着劣化を模擬した梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験が実施された。曲げ降伏先行型試験体とせん断破壊先行型試験体の 2 シリーズについて腐食ひび割れ幅を変動因子として実験が行われ、最大耐力、主筋降伏後の靱性等の履歴性状について検討がなされた。両試験体シリーズにおいて、腐食ひび割れ幅の増大は加力初期の剛性低下および最大耐力時の部材角の増大を引き起こしたが、最大耐力との明瞭な関係はみられず、定量的な評価には至らなかった。最大耐力に明瞭な関係が見られなかった要因として、曲げ降伏先行型試験体では付着余裕度が十分に大きく、全ての試験体で曲げ降伏により最大耐力に達したため、腐食ひび割れは最大耐力に影響しなかったと考察された。また、せん断破壊先行型試験体では全ての試験体でせん断破壊が先行したが、最大耐力に影響を与えた要因として、加力に伴い発生したひび割れ状況およびコンクリート有効圧縮強度が支配的であり、曲げ破壊先行型試験体と同様に腐食ひび割れは最大耐力に影響を及ぼさなかったと考察された。以上より、腐食ひび割れにより生じる付着劣化が構造性能の低下に与える影響がより顕著に現れる試験体における履歴性状の検討が必要であると考えられる。

一方で、腐食ひび割れ幅の増大が剛性低下に影響を与えた要因としては、腐食ひび割れにより生じた付着劣化に伴うテンションスティフニング効果の減少が挙げられる。既往研究^[2]において、鉄筋の腐食率の増大に伴うテンションスティフニング効果の減少が報告されているが、腐食ひび割れとテンションスティフニング効果の関係に着目した研究例は見られず、詳細な検討が必要であると考えられる。

1.2 研究目的

本研究では、腐食ひび割れが RC 部材の構造性能に与える影響を検討することを目的とし、EAFP 導入ひび割れにより付着劣化を模擬した RC 梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験および、同様の手法で付着劣化を模擬したプリズム試験体の両引き試験を実施する。

第 2 章では、腐食ひび割れが構造性能の低下に与える影響について検討するため、EAFP 導入ひび割れにより付着劣化を模擬し、加力前ひび割れ幅が大きい場合に付着割裂破壊が先行する梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を行う。実験より得られる履歴性状から、腐食ひび割れによる付着劣化が構造性能に与える影響について検討を行う。

第 3 章では、腐食ひび割れが剛性に与える影響について検討するため、EAFP 導入ひび割れにより付着劣化を模擬したプリズム試験体の両引き試験を実施し、腐食ひび割れがテンションスティフニング効果の減少に伴う剛性低下に与える影響について検討を行う。また、引抜き試験により求めた付着校生息を用いて両引き試験の解析を行い、実験結果との比較検討を行う。

1.3 EAFP 導入ひび割れによる付着劣化模擬

腐食ひび割れの模擬として、EAFP により腐食ひび割れを模擬する手法を採用する。既往研究^[3]において提案された同手法は、コンクリート中に埋設した中空のアルミパイプに静的破砕剤を充填し、鉄筋周辺に腐食ひび割れを模擬する方法である。これまで多くの研究で行われている電食試験や暴露試験と比較し短期間で実験が行える点、電食試験の際に考えられる、通電によるひずみゲージの損傷のリスクが無いといった利点がある。また、破砕剤充填による膨張圧によってひび割れが発生するため、腐食生成物の発生に伴う鉄筋の体積膨張で発生する実際の腐食ひび割れ発生メカニズムと近く、鉄筋自体の腐食を考慮せずひび割れの影響のみに着目することができる。

既往研究^[4]では、同手法により腐食ひび割れを模擬した試験体の引抜き試験が行われ、腐食ひび割れ幅の増大に伴う付着強度の低下が報告されており、同手法で模擬する腐食ひび割れにより付着劣化を模擬できることが確認されている。

以上より、本研究における実験では EAFP 導入ひび割れにより付着劣化を模擬する手法を採用する。

第2章 繰返し曲げせん断応力下の履歴性状

2.1 はじめに

既往研究^[1]においては、腐食ひび割れが構造性能の低下に与える影響に着目し、EAFP 導入ひび割れにより付着劣化を模擬した梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験が実施された。曲げ破壊先行型およびせん断破壊先行型の2シリーズについて実験が行われ、腐食ひび割れ幅の増大に伴う初期剛性の低下および最大耐力時の部材角の増大が確認されたが、最大耐力との明瞭な関係は見られず定量的な評価には至らなかった。腐食ひび割れ幅と最大耐力に関係が見られなかった要因として、曲げ降伏先行型試験体では付着余裕度が十分に大きく、全ての試験体で曲げ降伏により最大耐力に達したため腐食ひび割れは最大耐力に影響しなかったと考察された。また、せん断破壊先行型試験体では全ての試験体でせん断破壊が先行したが、最大耐力に影響を与えた要因として、加力に伴い発生したひび割れ状況およびコンクリート有効圧縮強度が支配的であり、曲げ破壊先行型試験体と同様に腐食ひび割れは最大耐力に影響を与えなかったと考察された。

本研究では、腐食ひび割れによる付着劣化が構造性能に与える影響を検討するため、腐食ひび割れ幅による付着余裕度の変化が大きく、腐食ひび割れ幅が大きい場合に付着割裂破壊が先行する梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を実施し、得られた履歴性状から最大耐力、包絡線、付着応力、エネルギー吸収性能、および剛性について検討を行った。

2.2 実験概要

2.2.1 試験体

試験体一覧を表 2.2.1 に、試験体配筋図を図 2.2.1 に示す。試験体は付着劣化のない健全試験体が 1 体（NC）、静的破砕剤を充填し付着劣化を模擬する試験体が 3 体（C-Lv.1~3）の全 4 体である。断面は幅×せいを 235mm×315mm とした。主筋は 2-D19、せん断補強筋は D10@200 の配筋である。試験体の中央部 1260mm を試験区間とし、両端部は肋筋 D10@100 を配し補強している。コンクリート目標強度は 18MPa で、変動因子は EAFP によって生じる目標最大ひび割れ幅とした。目標最大ひび割れ幅は既往研究^[1]におけるせん断破壊先行型試験体シリーズの加力前最大ひび割れ幅と同一とした。コンクリート打設から 4 週経過後に試験体を立て起こし、静的破砕剤をパイプの上部から充填した。なお、NC 試験体のパイプにはプレミックス無収縮グラウトを充填した。

表 2.2.1 試験体一覧

試験体名	共通事項	目標最大ひび割れ幅
NC	主筋：D19(SD345)	—
C-Lv.1	せん断補強筋：D10(SD295)	0.20mm
C-Lv.2	せん断スパン比：2.0	0.55mm
C-Lv.3	せん断補強筋比：0.32%	1.10mm

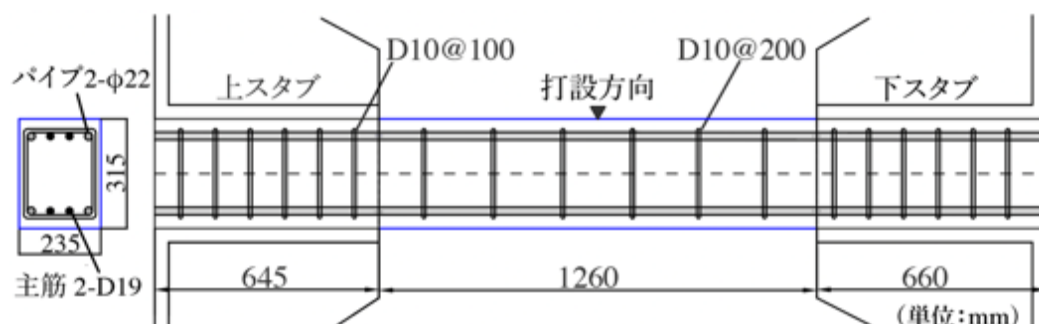


図 2.2.1 試験体配筋図

試験体の耐力計算結果を表 2.2.2 に、試験体のせん断余裕度-付着余裕度関係を図 2.2.2 に示す。曲げ強度は梁の終局曲げ強度略算式^[5]を用いた。せん断強度は日本建築学会「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」^[6]によるせん断強度式 A 法で算出した。付着強度は日本建築学会「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」^[7]による付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度式から算出した。付着劣化を模擬する試験体では、既往の研究^[8]におけるひび割れ幅と付着強度比の関係式により、せん断信頼強度式の付着信頼強度の低減を行い、C-Lv.2 および C-Lv.3 の試験体で付着割裂破壊が先行する設計とした。なお、EAFP が負担する荷重はないものとし、付着信頼強度の割裂線長さを求める際に外径 22mm のアルミパイプが埋設されていることを考慮している。また、耐力計算に用いる各材料強度には、後述する材料試験結果を用いている。

表 2.2.2 試験体の耐力計算結果

試験体	曲げ強度 Q_{Mu} (kN)	せん断強度 V_u (kN)	付着強度 V_{bu} (kN)	せん断余裕度 V_u / Q_{Mu}	付着余裕度 V_{bu} / Q_{Mu}
NC	79	134	100	1.69	1.27
C-Lv.1			86		1.09
C-Lv.2			70		0.88
C-Lv.3			57		0.71

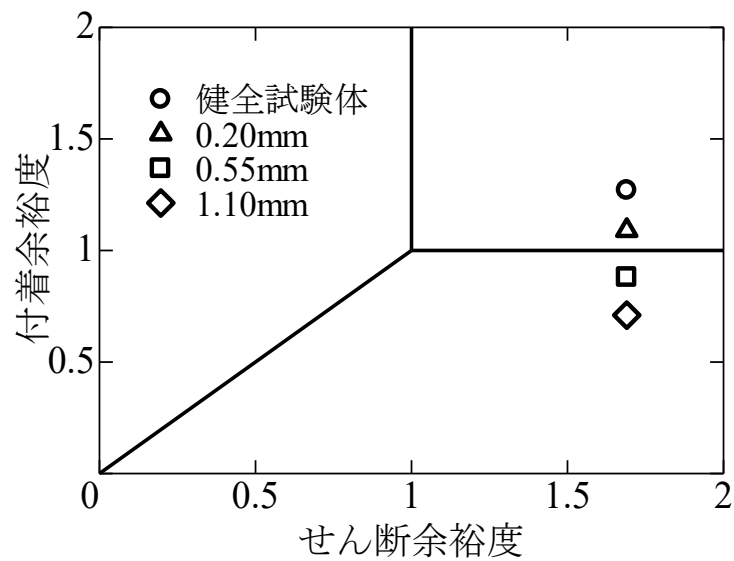


図 2.2.2 せん断余裕度-付着余裕度関係

(1) 曲げ強度 (略算式)

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

ここで、

Q_{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（終局強度型指針式 A 法）

$$V_u = b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \varphi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (2-2)$$

ここで、

V_u : せん断強度

b : 梁幅

j_t : 主筋中心間距離

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

$$= \min\{2.0, j_t/(D \cdot \tan \theta), \sqrt{v \cdot \sigma_B / (p_w \cdot \sigma_{wy})} - 1.0\}$$

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

β : $= (1 + \cot^2 \varphi) p_w \cdot \sigma_{wy} / v \cdot \sigma_B$

D : 梁せい

L : 内法スパン

v : $v_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$ (σ_B の単位は kgf/cm^2)

σ_B : コンクリート圧縮強度

(3) 付着耐力（靱性保証型指針式）

$$V_{bu} = b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \varphi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (2-3)$$

$$T_x = \tau_{bu} \Sigma \psi \quad (2-4)$$

ここで、

V_{bu} : 付着耐力

T_x : 付着強度

j_t : トラス機構に関与する有効せい

v : $v_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$ (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

b_e : トラス機構に関与する有効幅

b : 梁幅

D : 梁せい

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

L : 内法スパン

τ_{bu} : 主筋の付着信頼強度

$\Sigma \psi$: 主筋の周長の合計

2.2.2 使用材料

(1) コンクリート

コンクリートには、目標強度 18MPa、最大骨材寸法 20mm の普通コンクリートを使用した。コンクリートの調合計画を表 2.2.3 に示す。

表 2.2.3 コンクリートの調合計画

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	C	W	S	G	Ad
78.5	243	191	938	845	2.43

コンクリートの材料試験には、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いた。各試験体の加力日毎に計 4 度の材料試験を行った。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実施した。

コンクリートの材料試験結果を表 2.2.4 に、本実験における検討用コンクリート強度を表 2.2.5 に示す。検討用コンクリート強度は、4 回の材料試験結果の平均値とした。

表 2.2.4 コンクリートの材料試験結果

材齢	番号	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
43 日	1	21.2	19.6	2.03
	2	20.9	19.7	2.02
	3	18.9	18.9	1.69
	平均	20.3	19.4	1.92
57 日	4	22.3	19.9	1.85
	5	22.6	19.9	1.89
	6	22.5	19.8	2.21
	平均	22.5	19.9	1.98
64 日	7	22.3	20.0	1.96
	8	23.7	19.9	2.29
	9	23.4	20.1	1.99
	平均	23.1	20.0	2.08
72 日	10	22.0	19.7	2.61
	11	23.7	20.6	2.23
	12	23.4	20.4	2.12
	平均	23.0	20.2	2.32

表 2.2.5 検討用コンクリート強度

目標強度	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
18MPa	22.2	19.9	2.07

(2) 異形鉄筋

主筋には異形鉄筋 D19 (SD345) を、せん断補強筋には異形鉄筋 D10 (SD295) を用いた。引張試験結果を表 2.2.6 に、応力－ひずみ関係を図 2.2.3 に示す。

表 2.2.6 鉄筋の引張試験結果

鉄筋	番号	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏ひずみ (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	備考
D19 SD345	1	343	179	0.19	—	—	チャック部で滑り加力終了
	2	343	180	0.19	509	23.4	
	3	341	180	0.19	512	24.0	
	平均	342	180	0.19	510	23.7	
D10 SD295	1	353	185	0.19	480	25.5	
	2	369	186	0.20	505	26.5	
	3	359	187	0.19	493	25.8	
	平均	360	186	0.19	492	25.9	

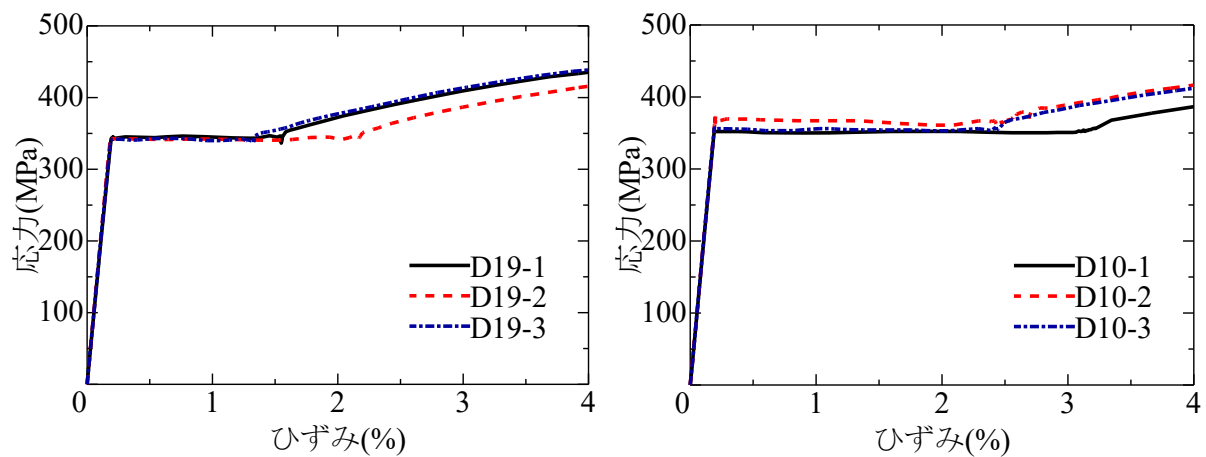


図 2.2.3 鉄筋の応力－ひずみ関係

(3) アルミパイプ

EAFP には外径 $\phi=22\text{mm}$ 、肉厚 $t=1\text{mm}$ のアルミパイプを用い、無収縮グラウトを充填して引張試験を行った。引張試験結果を表 2.2.7 に、応力-ひずみ関係を図 2.2.4 に示す。応力を求める際は外径 22mm の中実パイプの断面とし、降伏強度は 0.2%オフセット耐力とした。

表 2.2.7 グラウト充填アルミパイプの引張試験結果

アルミパイプ	番号	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	ポアソン比	備考
$\phi 22\text{mm}$ $t=1\text{mm}$	1	37.3	12.4	40.2	5.70	0.0780	
	2	40.7	15.0	43.7	4.93	0.0644	標点間外破断
	3	40.1	13.1	43.1	6.19	0.0708	
	平均	39.5	13.5	42.4	5.61	0.0711	

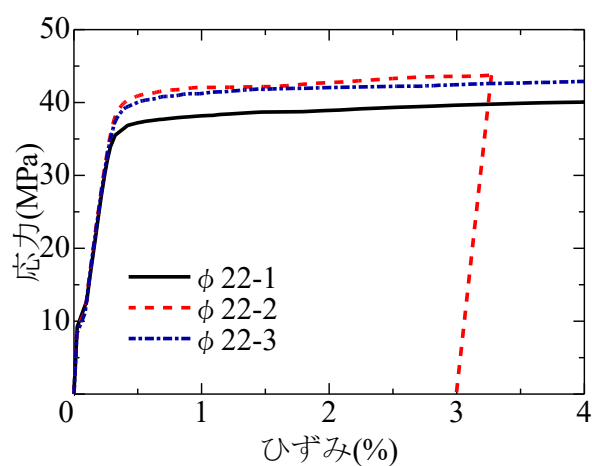


図 2.2.4 グラウト充填アルミパイプの応力-ひずみ関係

2.2.3 加力方法

加力装置を図 2.2.5 に、加力履歴を図 2.2.6 に示す。加力方法は建研式加力で、試験体を縦に起こし、端部を鋼製アングルで固定しスタブとして加力装置に設置し、軸力を 0 に制御し加力梁の並行度を保ちつつ、100t アクチュエーターで曲げせん断加力を行った。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。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 回の正負加力を実施した。

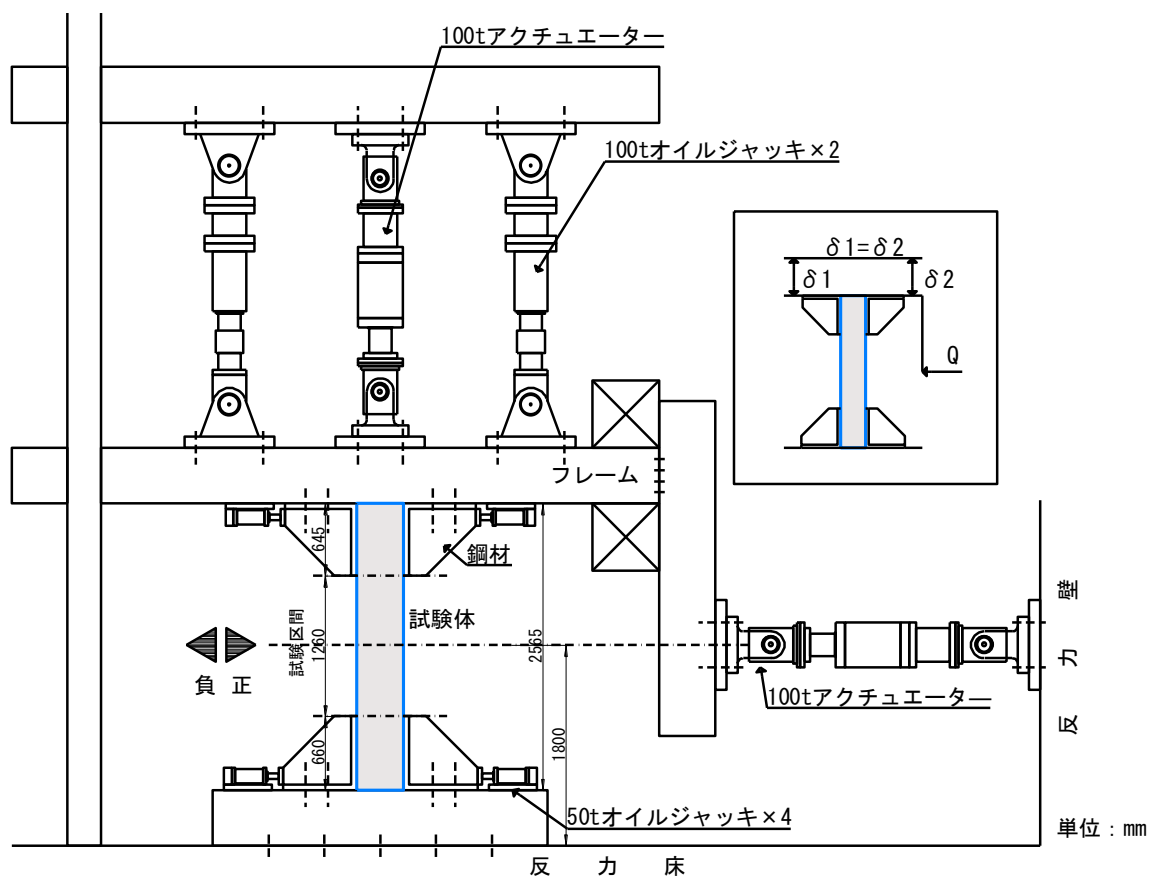


図 2.2.5 加力装置図

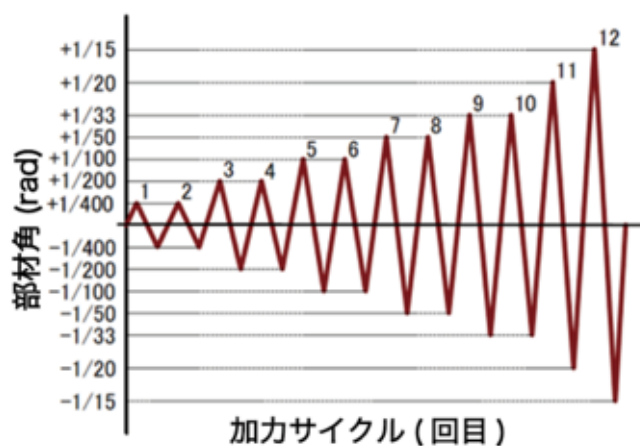


図 2.2.6 加力履歴

2.2.4 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、スタブ間相対変位、スタブ間軸変位、主筋ひずみ、せん断補強筋ひずみ、加力開始時をゼロ点としたアルミパイプのひずみである。

変位計の設置位置を図 2.2.7 に示す。スタブ間変位は D1 と D2 の平均値とした。ひずみゲージの貼付位置を図 2.2.8 に示す。主筋の危険断面位置、せん断補強筋は梁側面中央部、および付着応力の検討のため主筋の D10@200 各区間の中央にひずみゲージを貼付した。

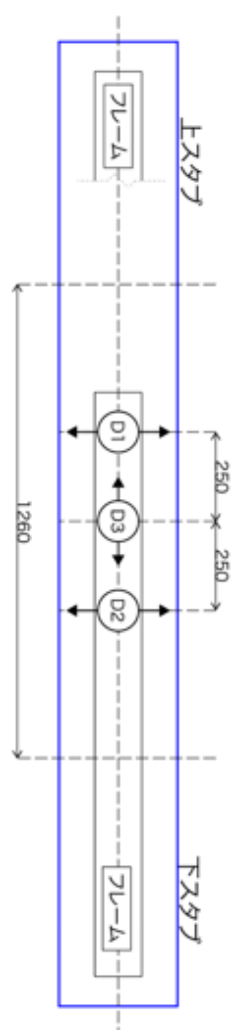


図 2.2.7 変位計設置位置（単位：mm）

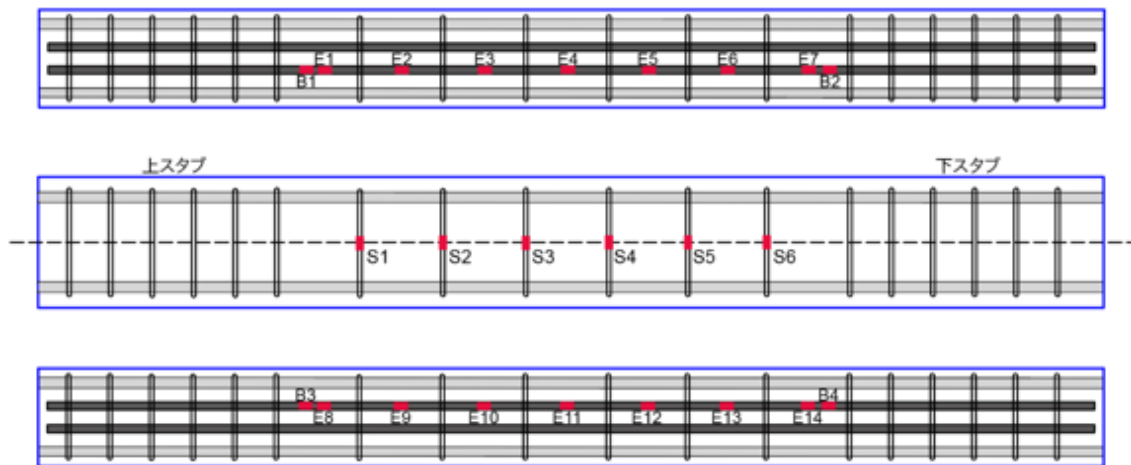


図 2.2.8 ひずみゲージ貼付位置

2.3 実験結果

2.3.1 試験体破壊状況

各試験体の加力前ひび割れ状況、部材角 $1/400 \sim 1/33\text{rad}$ の2サイクル加力終了後、 $1/20$ および $1/15\text{rad}$ 加力終了後のひび割れ状況を図 2.3.1~図 2.3.4 に示す。図中左側が下スタブ、右側が上スタブである。以降に、各試験体の実験時ひび割れ状況を述べる。

NC

正加力時部材角 $1/400\text{rad}$ に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 $1/100\text{rad}$ に至る過程で上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、曲げせん断ひび割れと上下端筋位置の付着割裂ひび割れが拡大して最終的な破壊に至った。

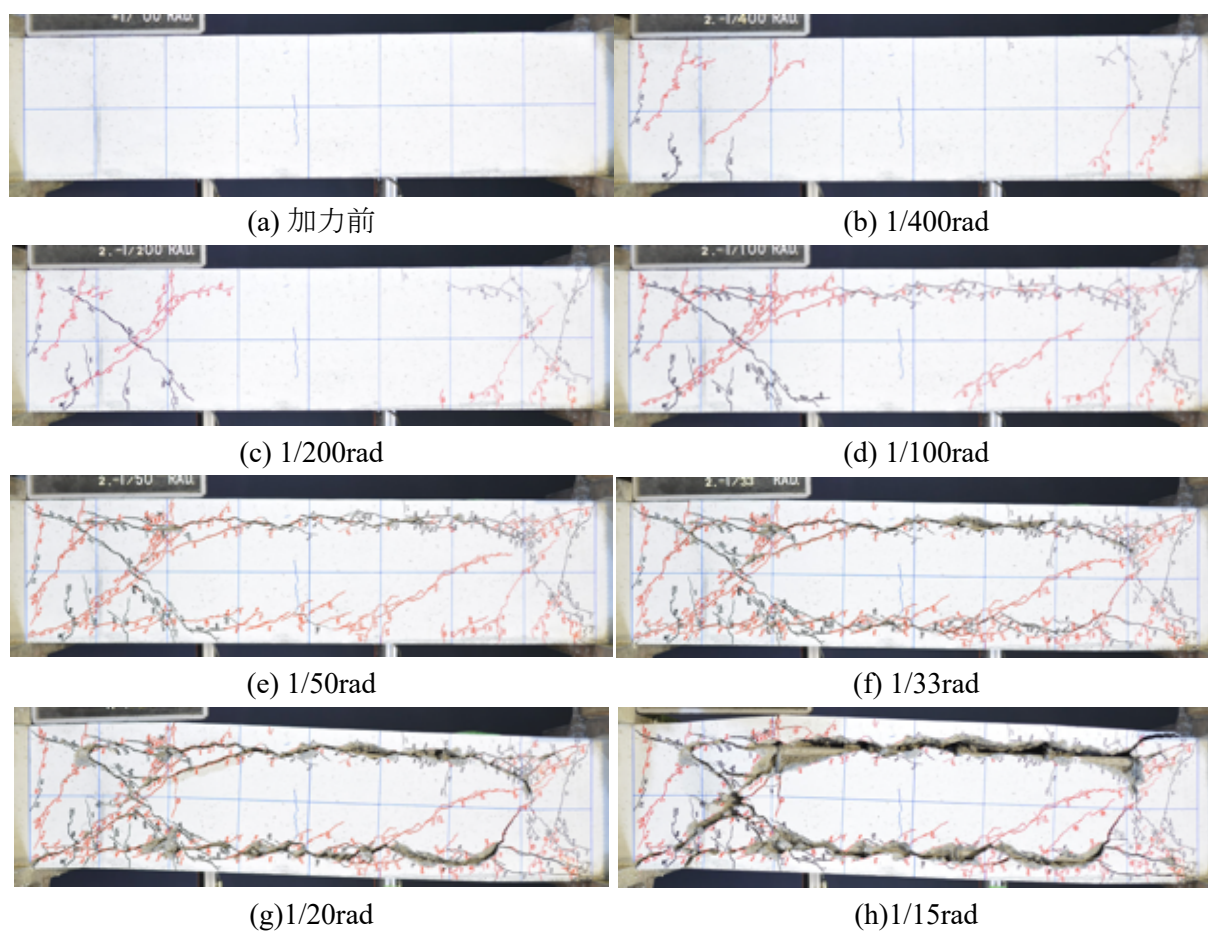


図 2.3.1 ひび割れ発生状況 (NC)

C-Lv.1

EAFP によって、幅が最大で 0.20mm のひび割れが発生した。正加力時部材角 $1/400\text{rad}$ に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れ発生した。部材角 $1/100\text{rad}$ に至る過程で上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、曲げせん断ひび割れと上端筋位置の付着割裂ひび割れが拡大して最終的な破壊に至った。

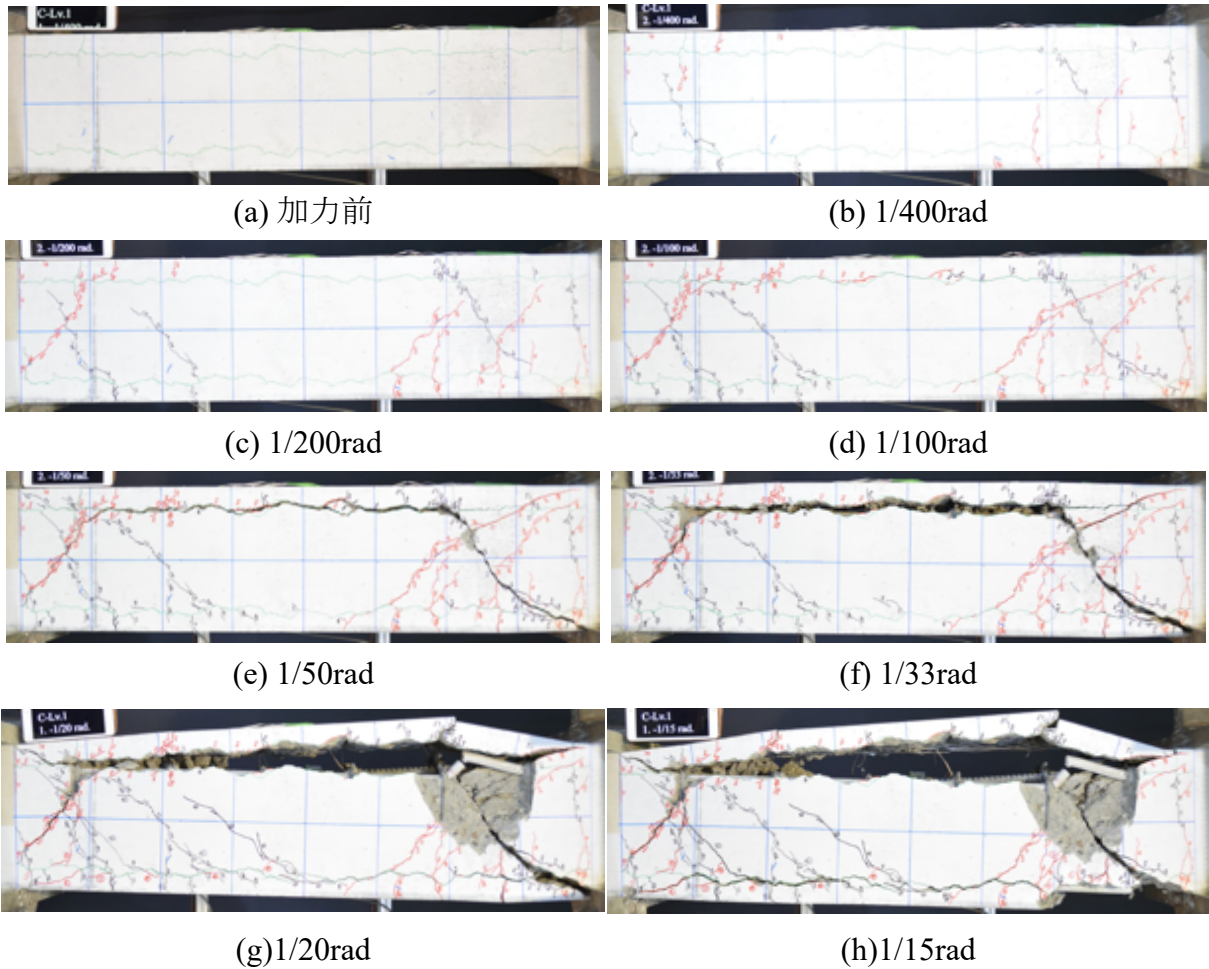


図 2.3.2 ひび割れ発生状況 (C-Lv.1)

C-Lv.2

EAFP によって、幅が最大で 0.60mm のひび割れが発生した。正加力時部材角 $1/400\text{rad}$ に至る過程で曲げひび割れが発生した。負加力時部材角 $1/400\text{rad}$ に至る過程で曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 $1/100\text{rad}$ に至る過程で上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、上下端筋位置の付着割裂ひび割れが拡大して最終的な破壊に至った。

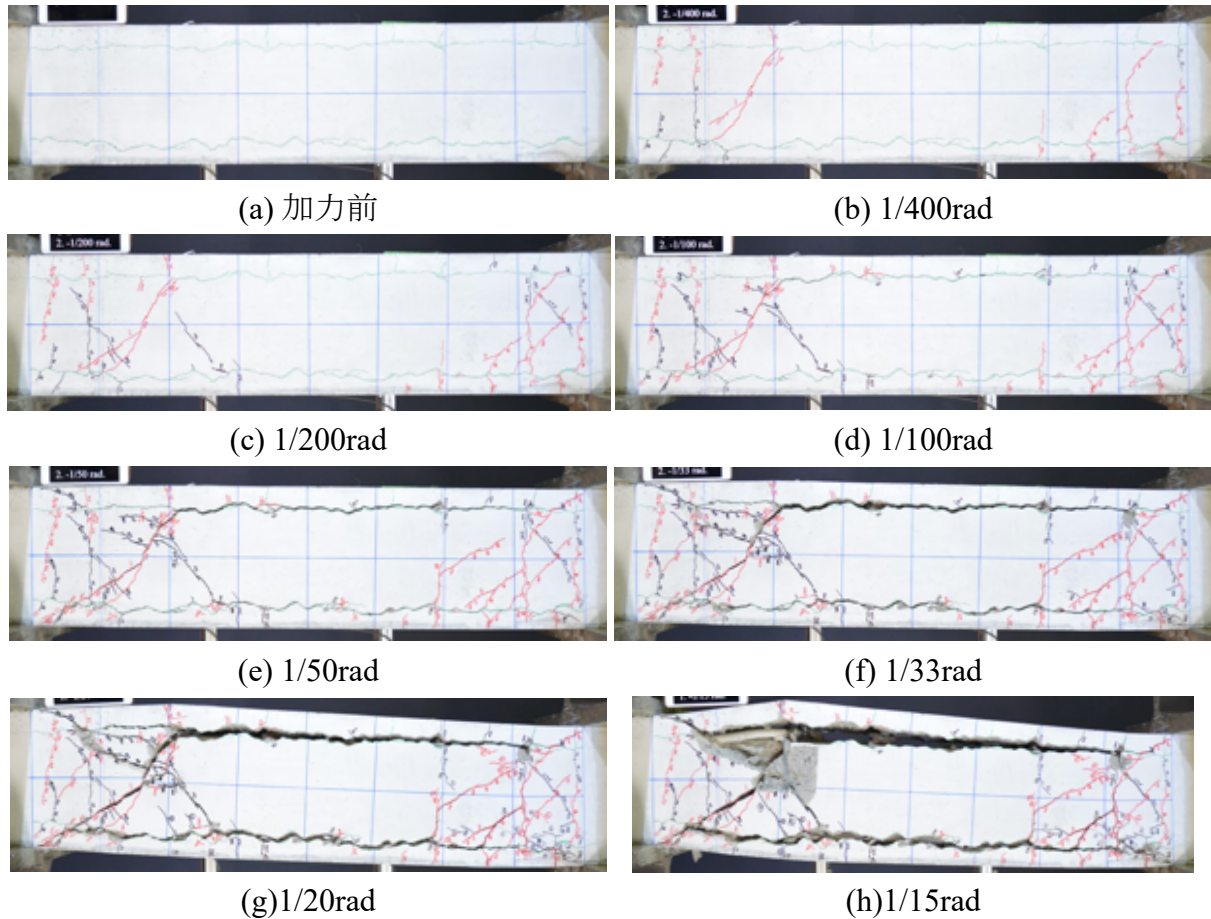


図 2.3.3 ひび割れ発生状況 (C-Lv.2)

C-Lv.3

EAFP によって、幅が最大で 1.30mm のひび割れが発生した。正加力時部材角 $1/400\text{rad}$ に至る過程で曲げひび割れが発生した。負加力時部材角 $1/400\text{rad}$ に至る過程で曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 $1/100\text{rad}$ に至る過程で上下端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、加力前ひび割れが拡大して最終的な破壊に至った。

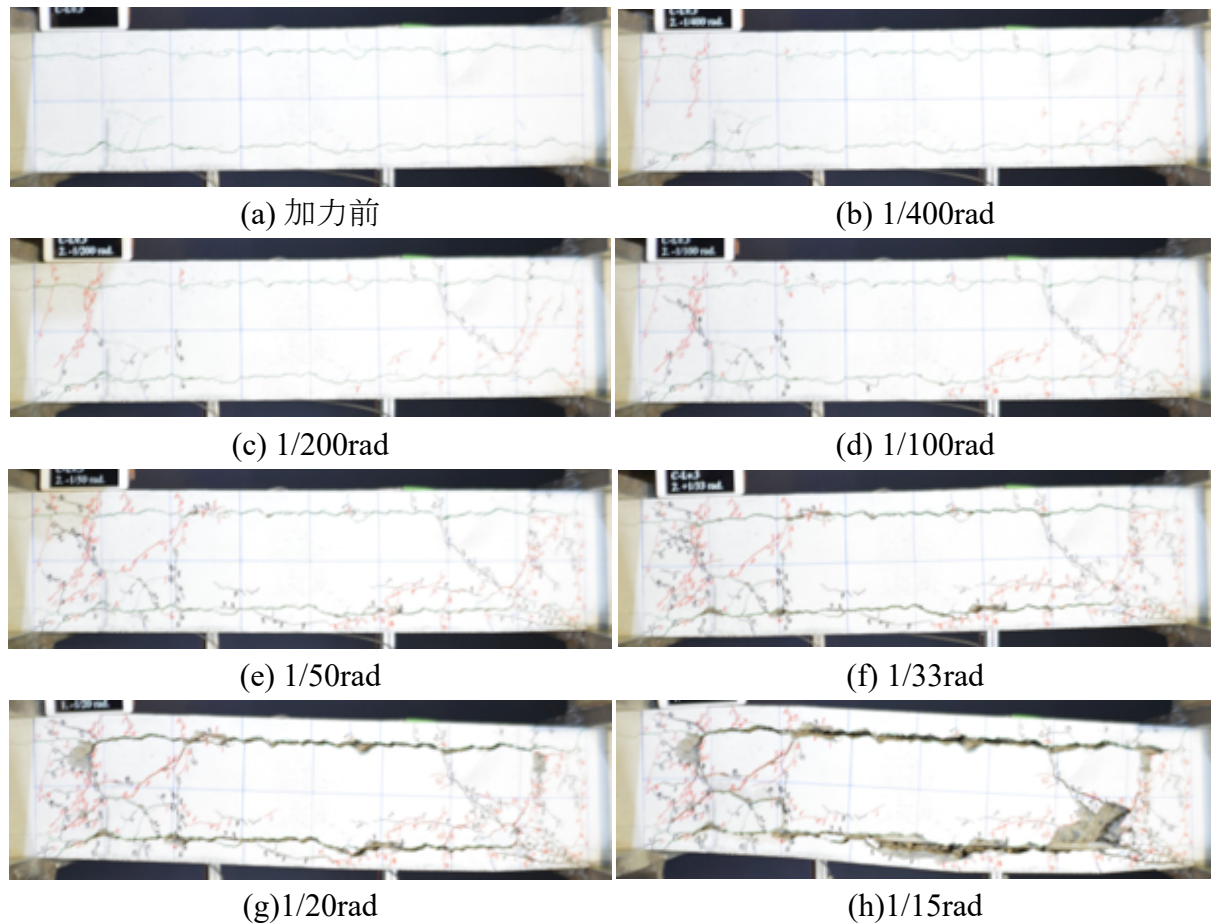


図 2.3.4 ひび割れ発生状況 (C-Lv.3)

2.3.2 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を図 2.3.5 に示す。以下に、各試験体の状況を述べる。

NC

正加力時部材角 $1/100\text{rad}$ 時に最大耐力 99kN に達した。負加力時は部材角 $1/50\text{rad}$ に至る過程で最大耐力 91kN に達した。その後、付着割裂破壊により耐力が徐々に低下し、部材角 $1/50\text{rad}$ の加力サイクル以降、主筋のすべりによる逆 S 字型の履歴が顕著に現れた。

C-Lv.1

正加力時部材角 $1/100\text{rad}$ 時に最大耐力 96kN に達した。負加力時も同様に最大耐力 102kN に達した。その後、付着割裂破壊と曲げせん断ひび割れの拡大により耐力が急激に低下した。逆 S 字型の履歴も NC 試験体と同様に現れた。

C-Lv.2

正加力時部材角 $1/100\text{rad}$ に至る過程で、最大耐力 90kN に達した。負加力時も同様に最大耐力 89kN に達した。逆 S 字型の履歴は NC 試験体、C-Lv.1 試験体と同様に現れた。

C-Lv.3

正加力時部材角 $1/50\text{rad}$ 時に最大耐力 90kN に達した。負加力時は部材角 $1/100\text{rad}$ 時に最大耐力 93kN に達した。他の試験体と比較して最大耐力以降の耐力低下が小さいことが確認できる。これは付着劣化により主筋がすべり、最終破壊に至る過程でのひび割れの拡大が NC、C-Lv.1 および C-Lv.2 試験体と比較して小さいためと考えられる。逆 S 字型の履歴は他の試験体と同様な傾向が見られた。

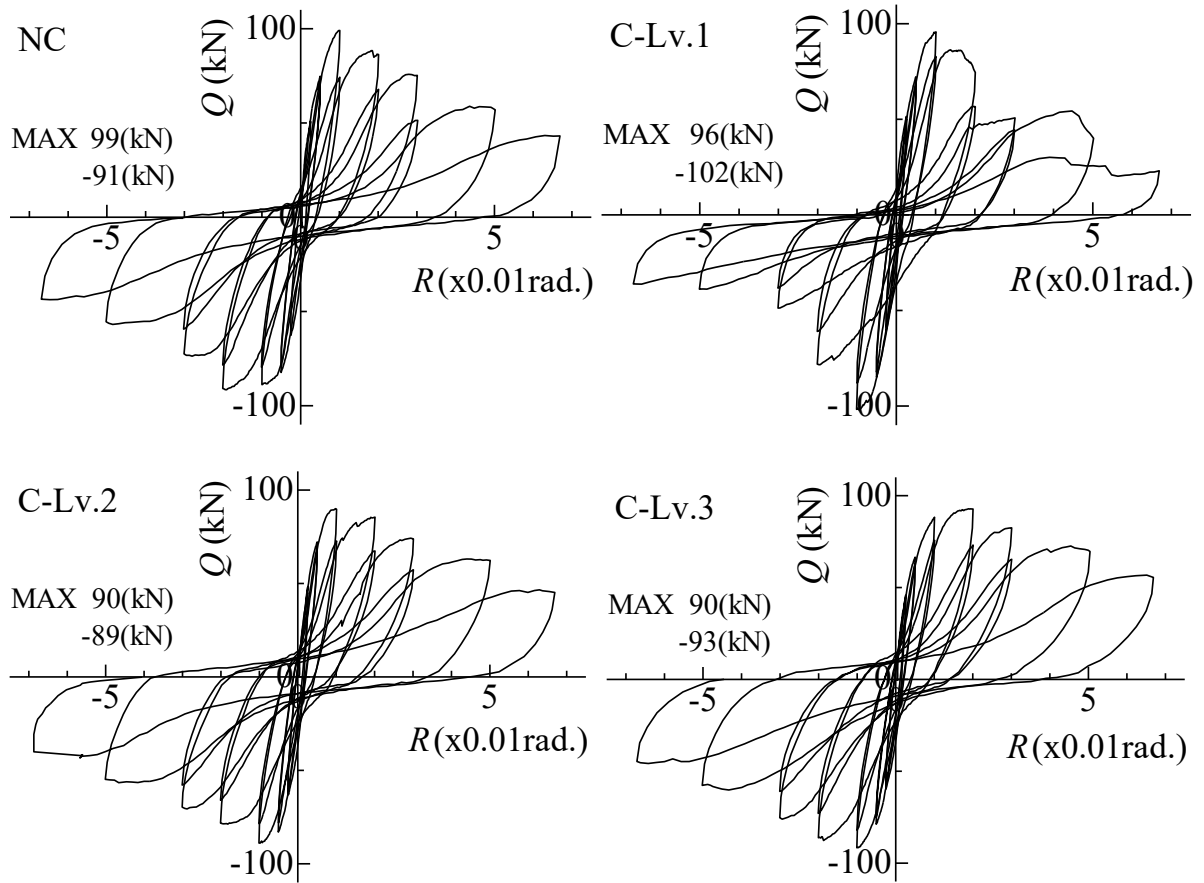


図 2.3.5 せん断力-変角関係

2.3.3 最大耐力

各試験体の正負それぞれの最大耐力と最大耐力時の部材角およびそれら正負の平均を表 2.3.1 に示す。加力前ひび割れ幅と試験体最大耐力の関係を図 2.3.6 に示す。

加力前ひび割れ幅の増大により付着割裂破壊が先行したと考えられる C-Lv.2、C-Lv.3 試験体で最大耐力が低下した。しかしながら耐力の低下はわずかで、NC 試験体の最大耐力の 0.95~0.97 である。加力前ひび割れ幅が最も大きい C-Lv.3 試験体において最大耐力時の部材角が増大する傾向が見られた。加力前ひび割れにより主筋のすべりが増大し、主筋の全体伸びが大きくなることによるものと考えられる。

表 2.3.1 最大耐力実験結果

試験体	正側最大 耐力(kN)	正側最大 耐力時の 部材角 ($\times 0.01\text{rad}$)	負側最大 耐力(kN)	負側最大 耐力時の 部材角 ($\times 0.01\text{rad}$)	正負平均 最大耐力(kN)	正負平均 部材角 ($\times 0.01\text{rad}$)
NC	99	1.01	91	1.91	95	1.46
C-Lv.1	96	1.01	102	0.95	99	0.98
C-Lv.2	90	0.98	89	0.98	90	0.98
C-Lv.3	90	1.90	93	1.01	92	1.46

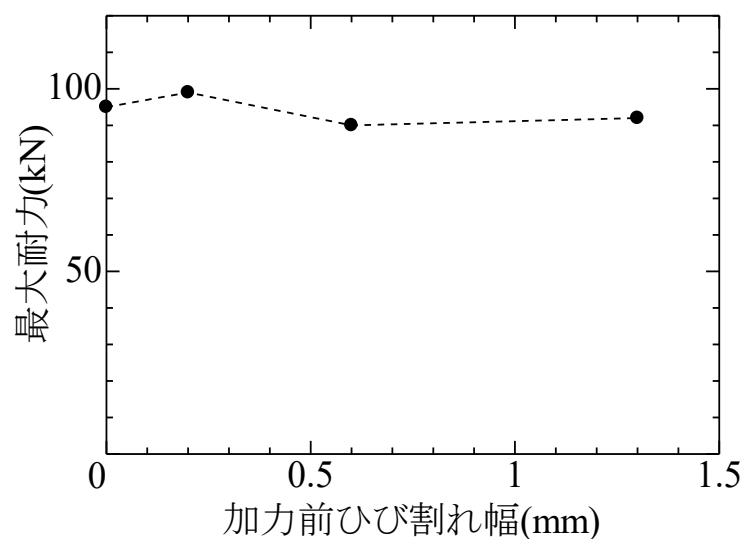


図 2.3.6 加力前ひび割れ幅－最大耐力関係

2.3.4 包絡線の比較

各試験体のせん断力-部材角関係の包絡線を図 2.3.7 に示す。左図が部材角 $1/50\text{rad}$ までの、右図が最終加力サイクルまでの包絡線を示す。部材角 $1/100\text{rad}$ までの包絡線を比較すると、腐食ひび割れ幅が大きい試験体ほど剛性が低下する傾向が見られ、主筋の付着劣化によるものと考えられる。部材角 $1/100\text{rad}$ 以降に注目すると、他の試験体と比較して、C-Lv.1 試験体の耐力低下が顕著に見られる。2.3.1 試験体破壊状況で述べた、曲げせん断ひび割れの拡大が耐力に与える影響が大きいと考えられる。一方加力前ひび割れ幅が最も大きい C-Lv.3 試験体の耐力低下は他の試験体と比較して最も小さかった。最終破壊状況におけるひび割れの拡大が最も小さかったためと考えられ、破壊経過やひび割れは耐力低下に大きく影響するが、必ずしも加力前のひび割れの大きさには関係しないことがわかる。

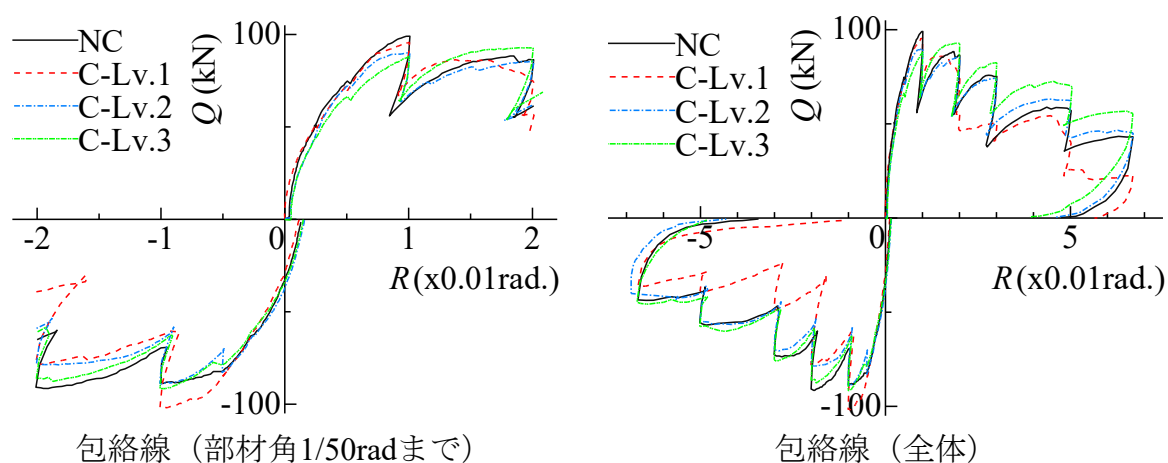


図 2.3.7 包絡線の比較

2.3.5 主筋のひずみ分布

各試験体の部材角 $1/400 \sim 1/50\text{rad}$ における 1 サイクル目のサイクルピーク時の主筋ひずみ分布を図 2.3.8～図 2.3.11 に示す。以下に、各試験体のひずみ状況を述べる。

NC

上端では部材角 $1/100\text{rad}$ 時に上スタブ側の一部、部材角 $1/50\text{rad}$ 時に試験体中央部の主筋が降伏に至った。下端では部材角 $-1/100\text{rad}$ 時に試験体中央部および下スタブ側の一部で主筋が降伏に至った。

C-Lv.1

上端では部材角 $1/100\text{rad}$ 時上スタブ側で、 $-1/100\text{rad}$ 時に下スタブ側で主筋が降伏に至った。下端では部材角 $1/50 \sim -1/50\text{rad}$ 時にかけて試験体中央部から上スタブ側の主筋が降伏に至った。

C-Lv.2

上端では主筋はいずれの箇所も降伏には至らなかった。下端では $1/100\text{rad}$ 時に下スタブ側で、 $-1/100\text{rad}$ 時に上スタブ側で主筋が降伏に至った。

C-Lv.3

上端では主筋はいずれの箇所も降伏には至らなかった。下端では $-1/100\text{rad}$ 時にしたスタブ側の主筋が降伏に至った。

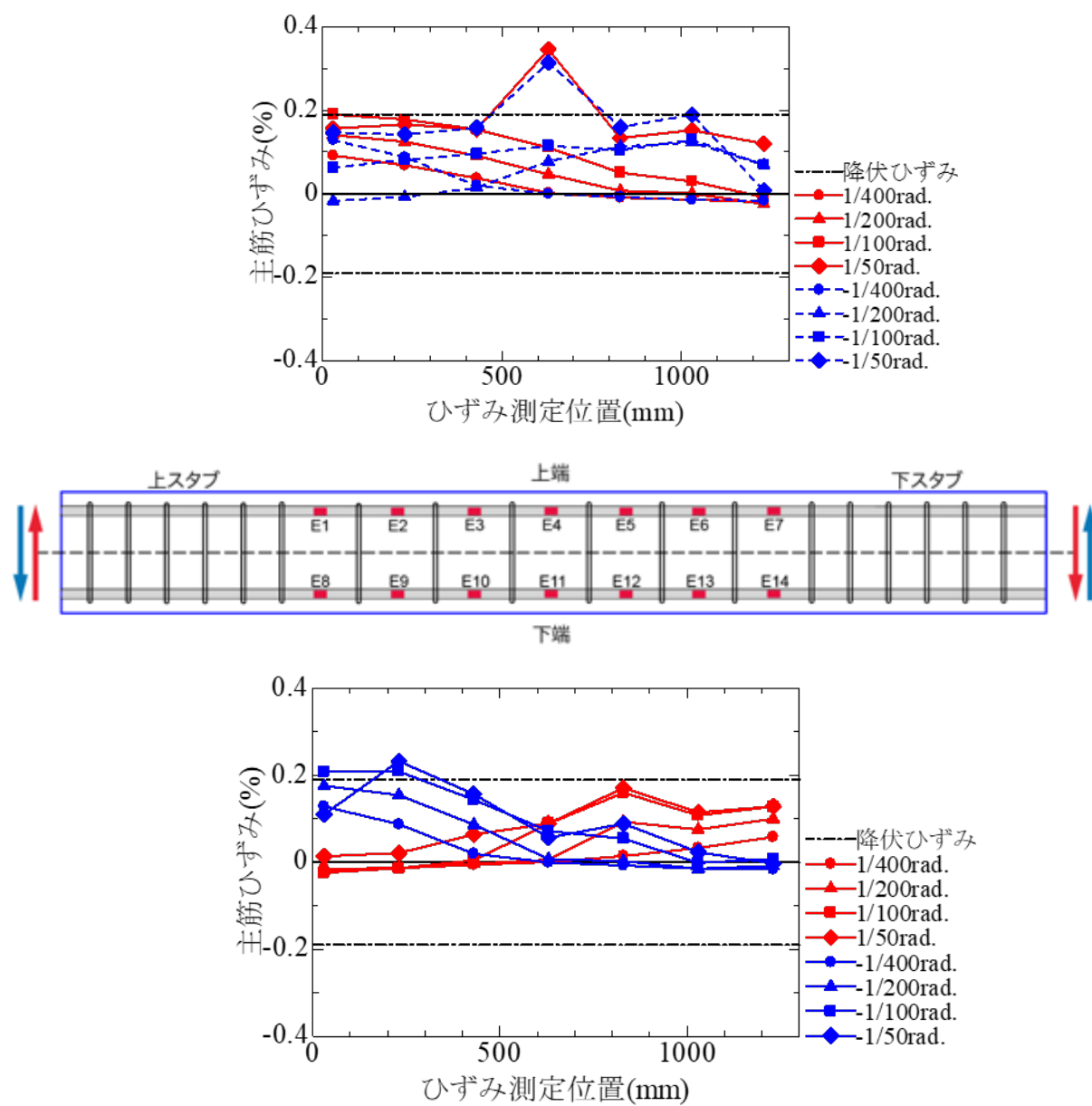


図 2.3.8 主筋ひずみ分布 (NC)

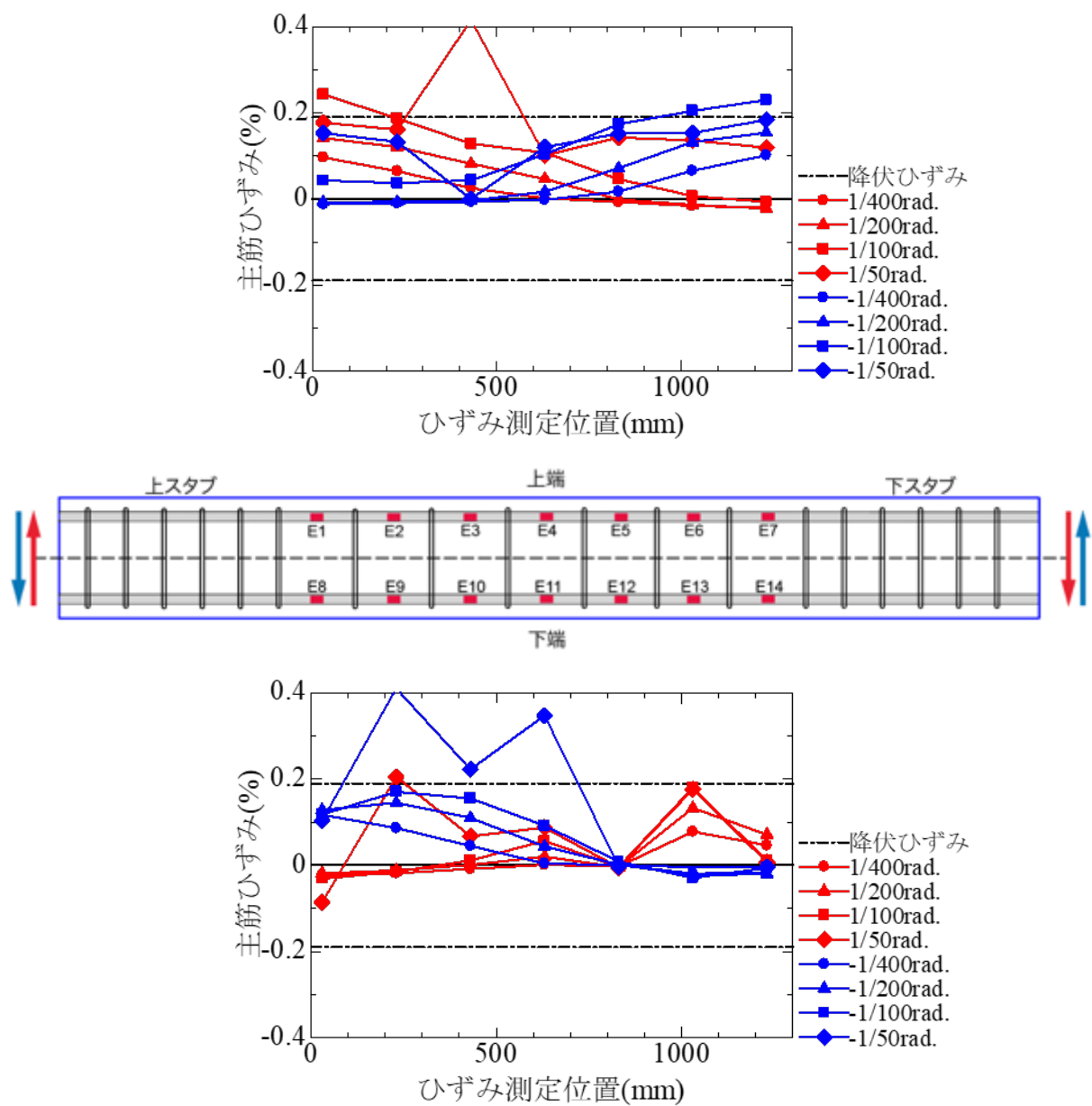


図 2.3.9 主筋ひずみ分布 (C-Lv.1)

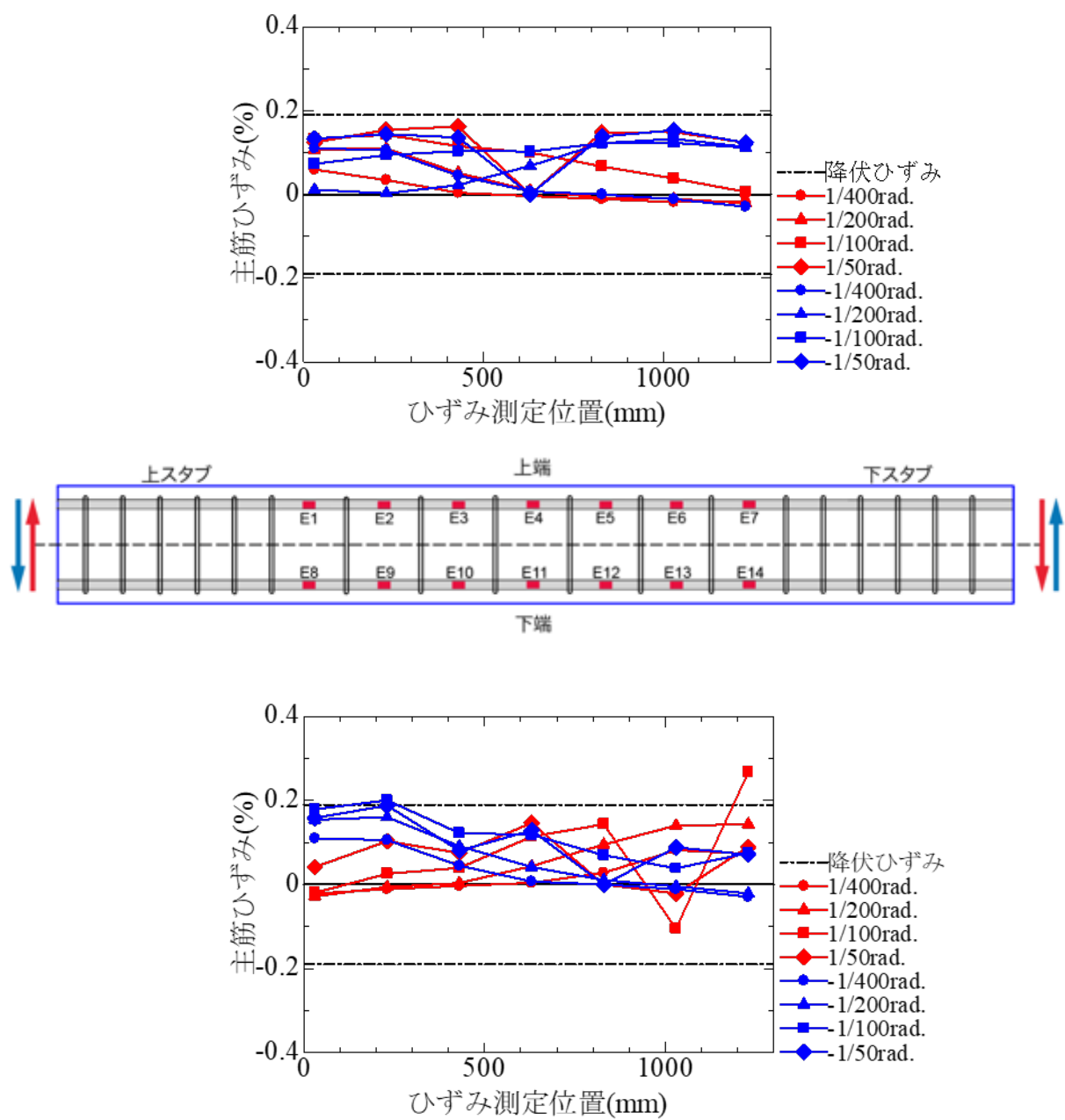


図 2.3.10 主筋ひずみ分布 (C-Lv.2)

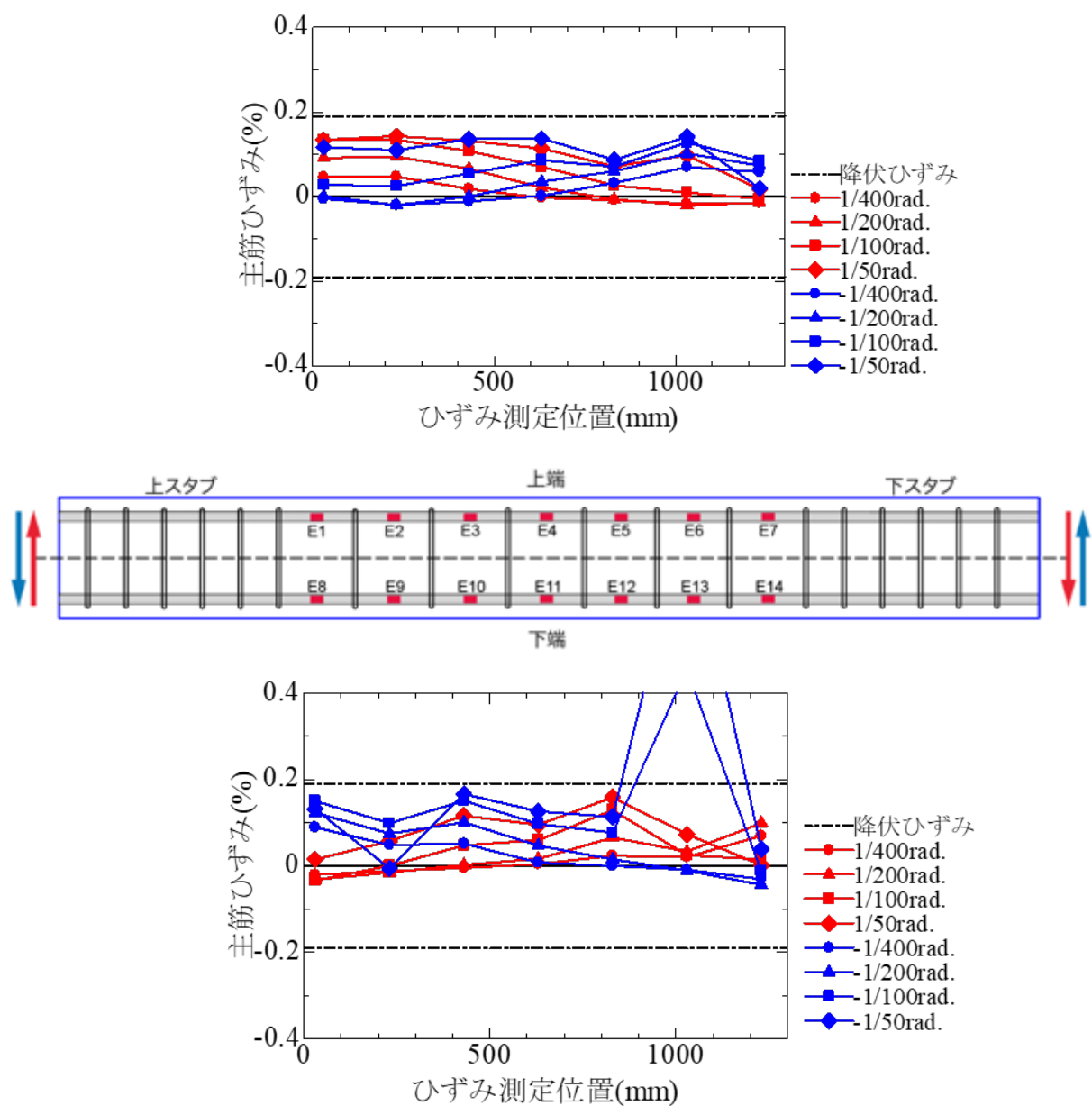


図 2.3.11 主筋ひずみ分布 (C-Lv.3)

2.3.6 付着応力の検討

各試験体の上下端それぞれ 1 本の主筋について、図 2.3.12 に示すひずみゲージ貼付け位置の 6 区間でひずみゲージの計測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。付着応力の算出にあたっては、各区間で弾性域内にあるひずみゲージの計測値を用いた。各試験体の付着応力と部材角の関係を図 2.3.13~図 2.3.16 に示す。なお、グラフ中の計算値は、日本建築学会靱性保証型耐震設計指針式^[7]による付着強度の計算値を表しており、加力前ひび割れ幅に対応する付着強度比^[8]を乗じて計算値を低減している。

NC試験体は曲げせん断ひび割れと上下端筋の付着割裂ひび割れが拡大して最終破壊に至っており、その過程で付着応力が最大に達している。付着強度計算値との対応が見られ、上端筋では計算値より大きい。

C-Lv.1試験体は上端筋の付着割裂ひび割れから繋がる曲げせん断ひび割れが大きく拡幅して最終破壊に至っており、上端筋の付着応力の低下が顕著である。付着応力の最大値と計算値との対応はよい。破壊に起因する付着割裂ひび割れの拡幅が見られない下端筋では、大きな付着応力を示している。

C-Lv.2、C-Lv.3試験体では、加力前ひび割れが拡幅することによって付着割裂破壊を起こしているが端部のコンクリートの損傷も大きく、付着応力は小さくない。いずれも付着応力が增大する過程にあるように見られ、加力前ひび割れにより付着剛性は低下するものの、付着割裂破壊時に見られるような付着応力の低下がない。これらの付着応力の推移性状は各試験体の包絡線における1/100~1/50rad時の性状に対応しており、付着応力の低下が部材の耐力低下に影響を及ぼしていると考えられる。

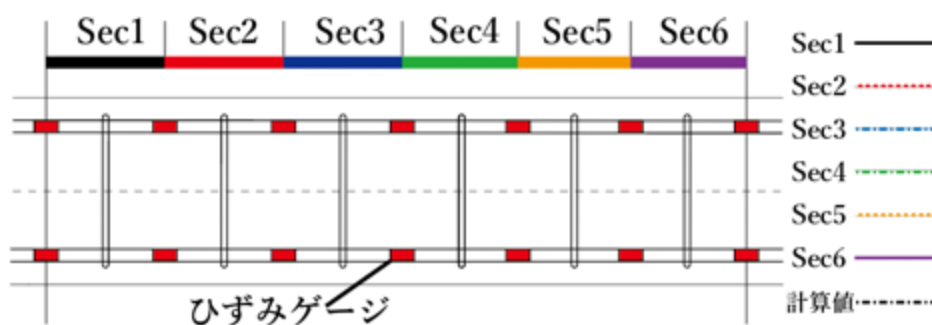


図 2.3.12 ひずみゲージ貼付け位置と区間番号

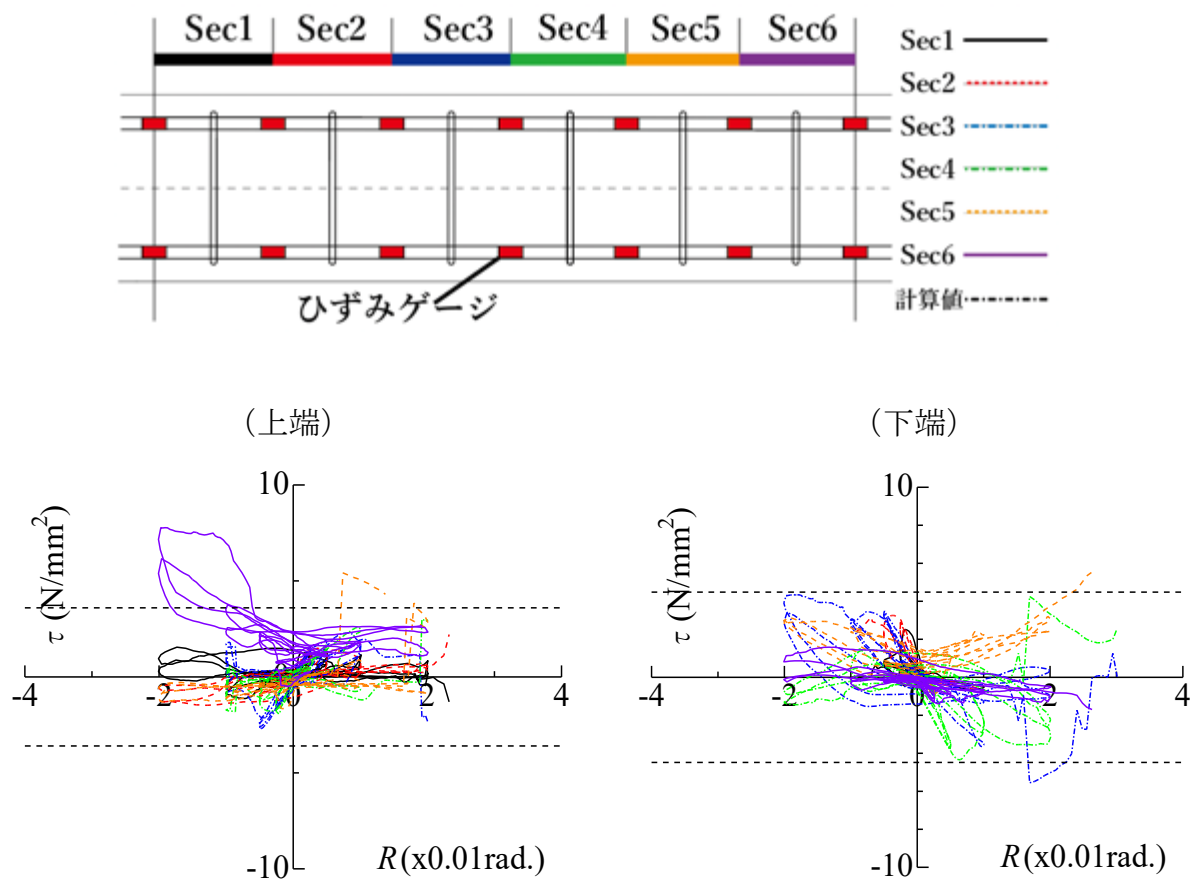


図 2.3.13 主筋の付着応力 (NC)

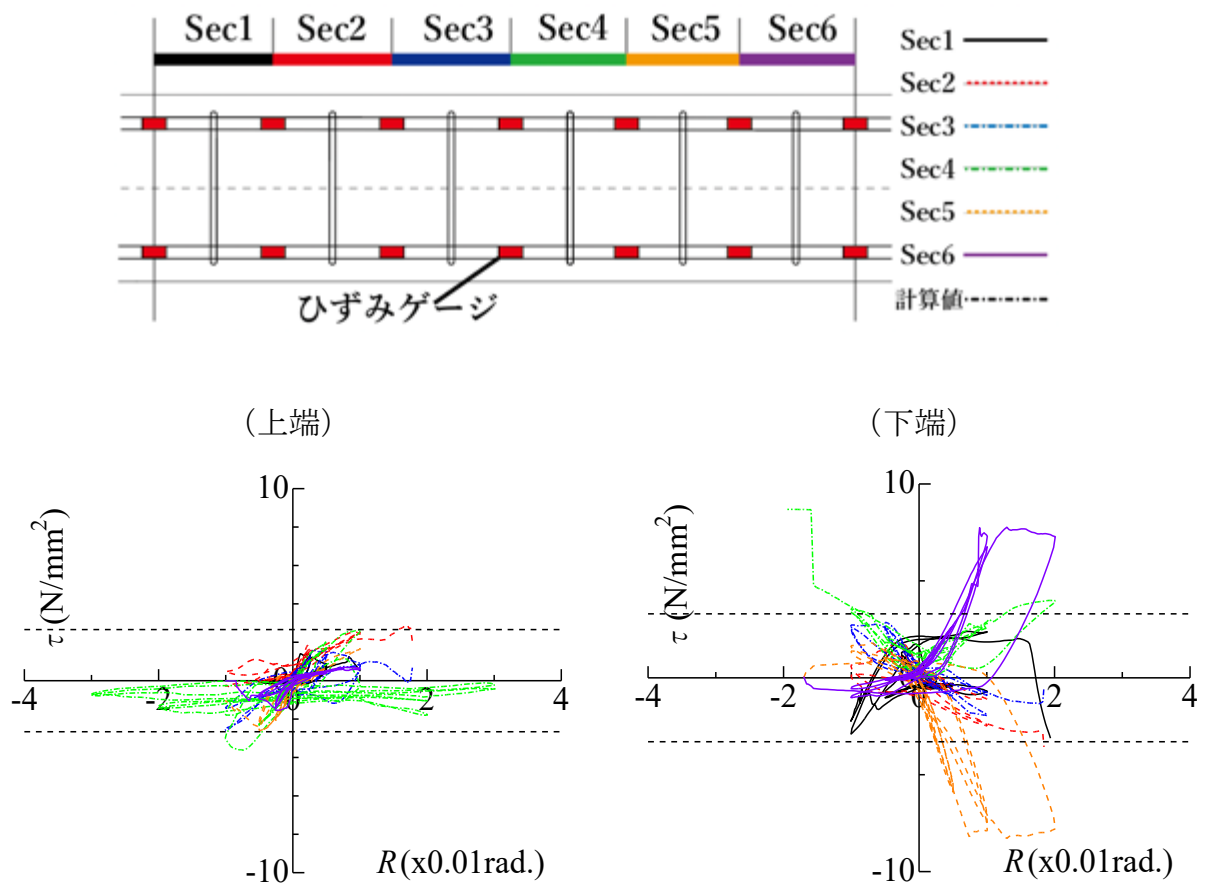


図 2.3.14 主筋の付着応力 (C-Lv.1)

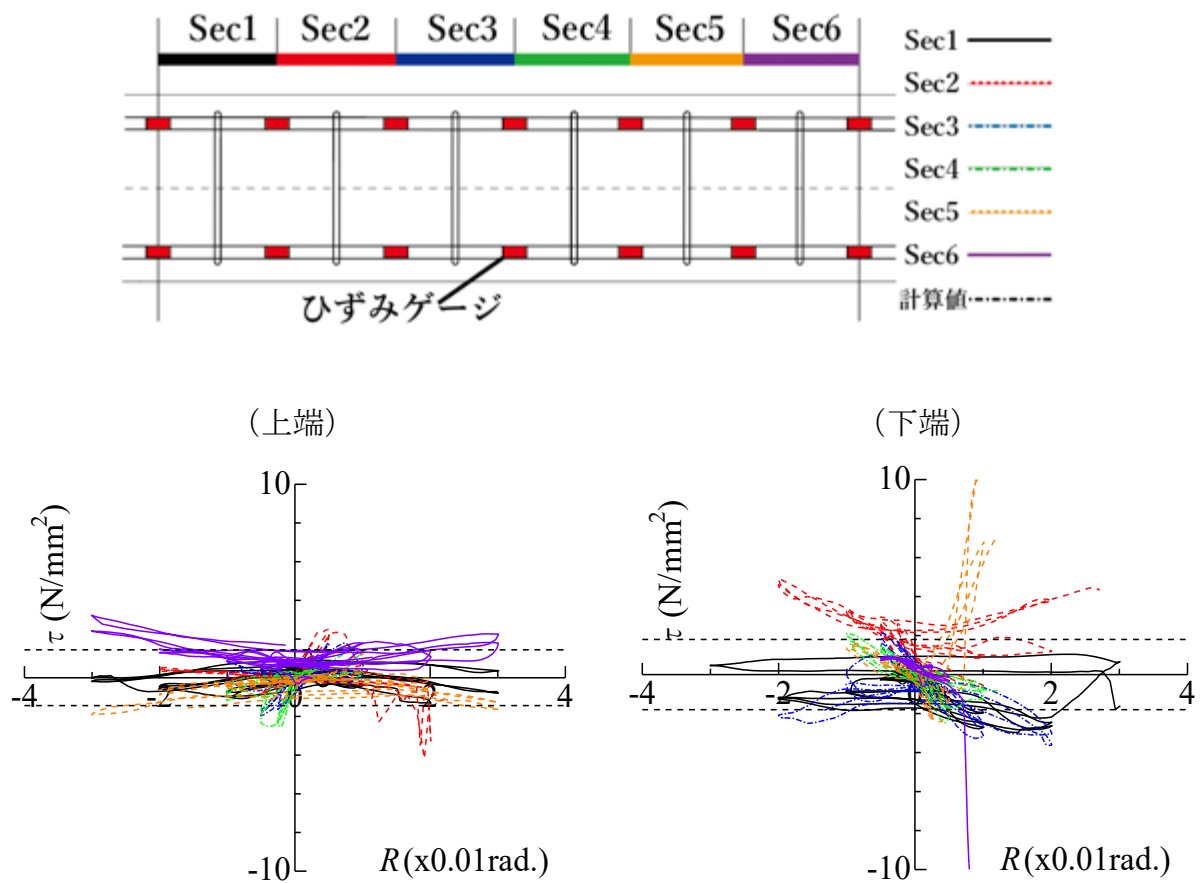


図 2.3.15 主筋の付着応力 (C-Lv.2)

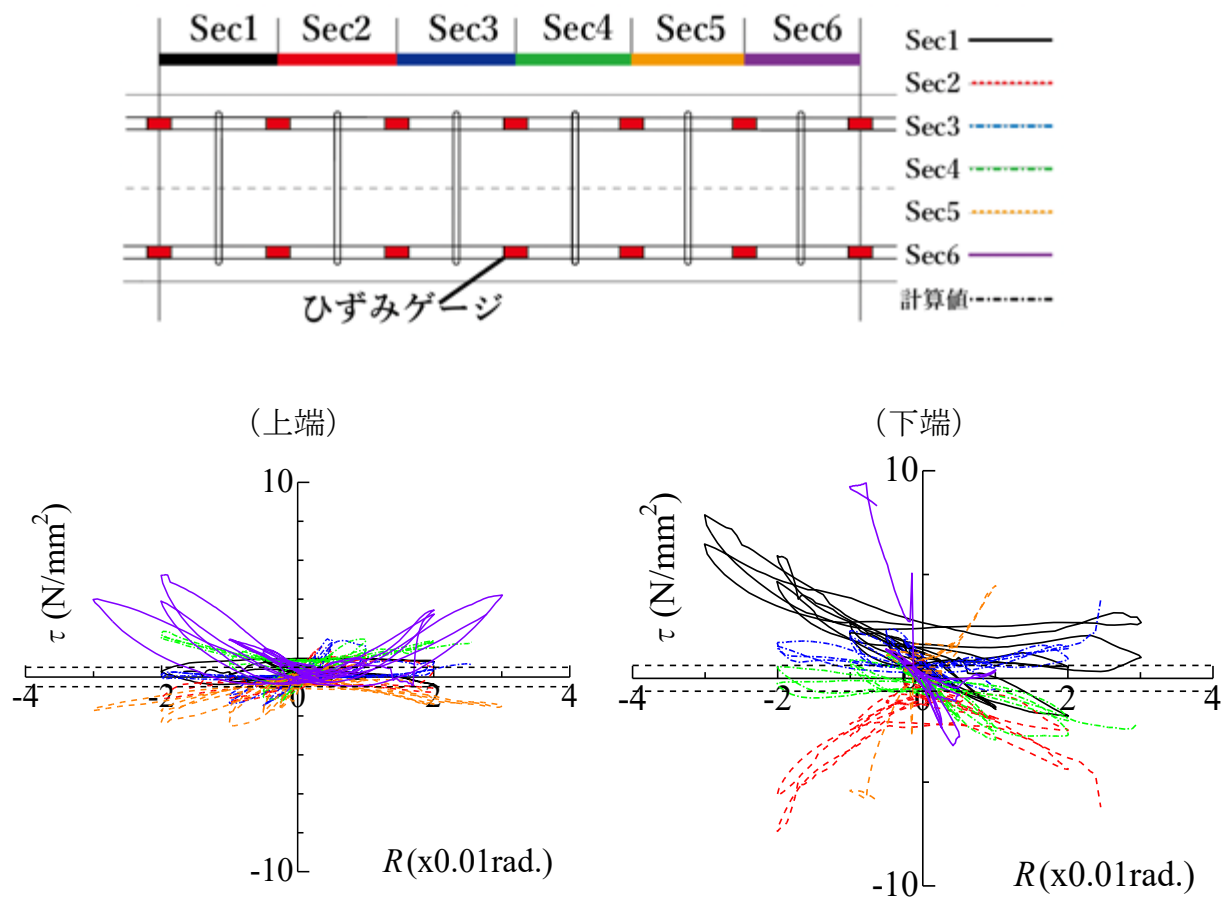


図 2.3.16 主筋の付着応力 (C-Lv.3)

2.3.7 累積エネルギー吸収量の比較

各試験体の累積エネルギー吸収量および NC 試験体を基準とした累積エネルギー吸収量比を図 2.3.17 に示す。C-Lv.2 試験体以外の全ての試験体で部材角 $1/100\text{rad}$ までのエネルギー吸収量が小さい傾向が、累積エネルギー吸収量比より確認できた。これは主筋の付着劣化に伴う剛性低下の影響と考えられる。ひび割れが最終破壊の状態近くまで進行した $1/33\text{rad}$ 以降に注目すると、エネルギー吸収量は NC 試験体と比較して C-Lv.1 試験体は低下し、C-Lv.2、C-Lv.3 試験体はわずかに増大する傾向が見られた。最終破壊に至る過程では、全ての試験体で付着割裂ひび割れの拡大が見られたが、C-Lv.1 試験体で特に顕著であった曲げせん断ひび割れの拡大の影響と考えられる。

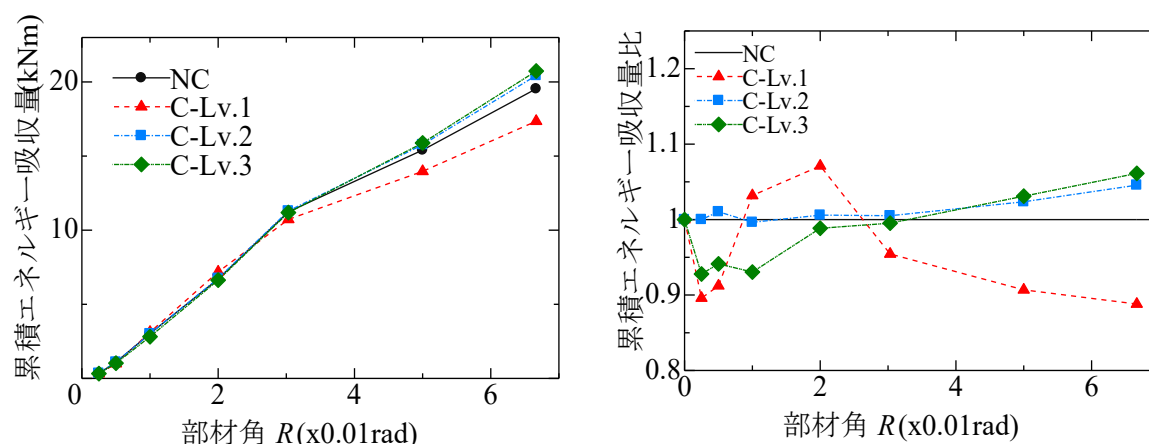


図 2.3.17 累積エネルギー吸収量および累積エネルギー吸収量比

2.3.8 剛性の比較

各試験体の部材角 1/400~1/50rad 加力サイクル正負ピーク時における剛性（正負平均）を表 2.3.2 に、部材角 1/400~1/100rad 加力サイクル正負ピーク時における剛性を図 2.3.18 に示した、NC 試験体を基準とした各試験体の剛性の比を剛性劣化比として図 2.3.19 に示す。1/400~1/100rad 時において、加力前ひび割れの増大により剛性が低下する傾向が見られ、腐食ひび割れは剛性の低下に影響を及ぼすと考えられる。

表 2.3.2 サイクルピーク時の剛性

部材角(rad.)	ピーク時剛性(NCとの比) (kN/mm)			
	NC	C-Lv.1	C-Lv.2	C-Lv.3
1/400	17.56	17.32(0.99)	16.78(0.96)	16.02(0.91)
1/200	12.34	12.42(1.01)	12.17(0.99)	11.40(0.92)
1/100	7.41	7.78(1.05)	7.02(0.95)	7.08(0.96)
1/50	3.50	3.01(0.86)	3.23(0.92)	3.54(1.01)

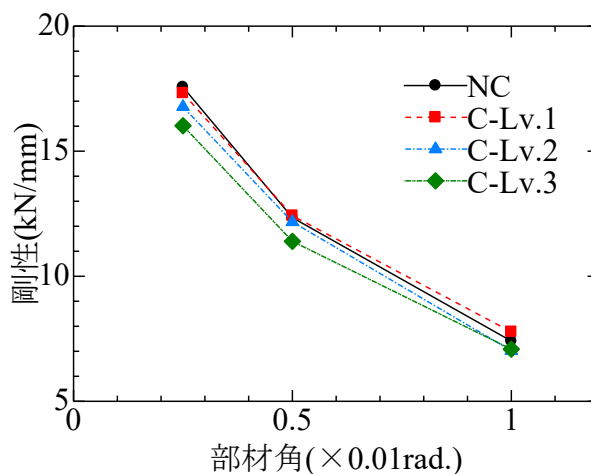


図 2.3.18 サイクルピーク時の剛性

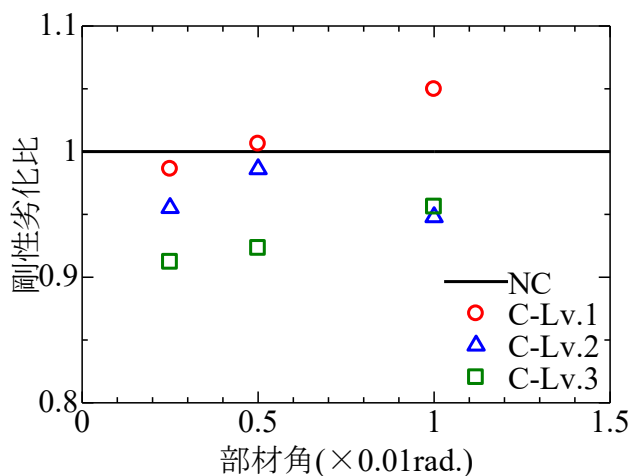


図 2.3.19 剛性劣化比

2.4 まとめ

付着余裕度の変化が大きく、加力前ひび割れ幅が大きい場合に付着割裂破壊が先行する梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を実施し、得られた履歴性状から腐食ひび割れにより生じる付着劣化が構造性能に与える影響について検討を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 加力前ひび割れ幅が大きい C-Lv.2、C-Lv.3 試験体で最大耐力が低下する傾向が見られた。
- ② EAFP 導入ひび割れにより 1.30mm のひび割れが生じた C-Lv.3 試験体の耐力低下は他の試験体と比較して最も小さかった。
- ③ 累積エネルギー吸収量は NC 試験体と比較して顕著な曲げせん断ひび割れの拡幅が生じた C-Lv.1 試験体は低下し、腐食ひび割れの拡幅が小さい C-Lv.2、C-Lv.3 試験体はわずかに増大する傾向が見られた。
- ④ 加力前ひび割れ幅の増大に伴い、部材角 $1/400 \sim 1/100 \text{rad}$ 時までの剛性が低下する傾向が見られた。

第3章 腐食ひび割れが剛性に及ぼす影響

3.1 はじめに

第2章の逆対称繰返し曲げせん断実験において、腐食ひび割れ幅の増大に伴い部材角 $1/400 \sim 1/100 \text{rad}$ 時の剛性が低下する傾向が見られた。同様の傾向は既往研究^[1]においても報告されており、EAFP導入ひび割れにより生じる付着劣化が剛性低下に与える影響について、より詳細な検討の必要性が考えられる。

既往研究^[4]では、EAFPにより模擬した腐食ひび割れ幅の増大に伴う付着強度の低下が報告されており、第2章および既往研究^[1]で見られた剛性低下の要因として、腐食ひび割れにより生じた付着劣化に伴うテンションスティフニング効果の減少が考えられる。

本章では、腐食ひび割れが剛性低下に与える影響について把握するため、EAFP導入ひび割れにより付着劣化を模擬したプリズム試験体の両引き試験を実施し、得られた引張荷重-変形関係から腐食ひび割れがテンションスティフニング効果の減少に伴う剛性低下に与える影響について検討を行った。また、プリズム試験体と同一断面の試験体の引抜き試験を実施し、得られた付着応力-すべり関係から決定した付着構成則を用いて両引き試験の解析を行い、実験結果との比較検討を行った。

3.2 実験概要

3.2.1 試験体

(1) 両引き試験体

試験体一覧を表 3.2.1 に、試験体配筋図を図 3.2.1 に示す。試験体は付着劣化のない健全試験体が 3 体 (NC)、静的破砕剤を充填し付着劣化を模擬する試験体が 12 体 (C-x.xx) の全 15 体である。長さは 1600mm、断面は 123mm×123mm であり、断面寸法の設計はひび割れ幅算定式 (ACI318-05) ^[9]において、第 2 章の試験体と設計用最大ひび割れ幅が同等となるようにした。鉄筋 D19 (SD345) を断面中央に 1 本、その両脇に外径 $\phi=18\text{mm}$ 、肉厚 $t=1\text{mm}$ のアルミパイプを 2 本配して静的破砕剤の充填を行った。コンクリート目標強度は 18MPa、変動因子は EAFP 導入ひび割れにより模擬する加力前ひび割れ幅で、0.08~2.00mm とした。ここで、加力前ひび割れ幅は試験体表面に発生した最大のひび割れ幅とした。

表 3.2.1 試験体一覧

試験体名	共通事項	目標最大ひび割れ幅	試験体数
NC	鉄筋 : D19 (SD345) 断面 : 123mm×123mm	—	3
C-x.xx (x.xx : 腐食ひび割れ幅)	長さ : 1600mm 目標強度 : 18MPa	0.08~2.00mm	12

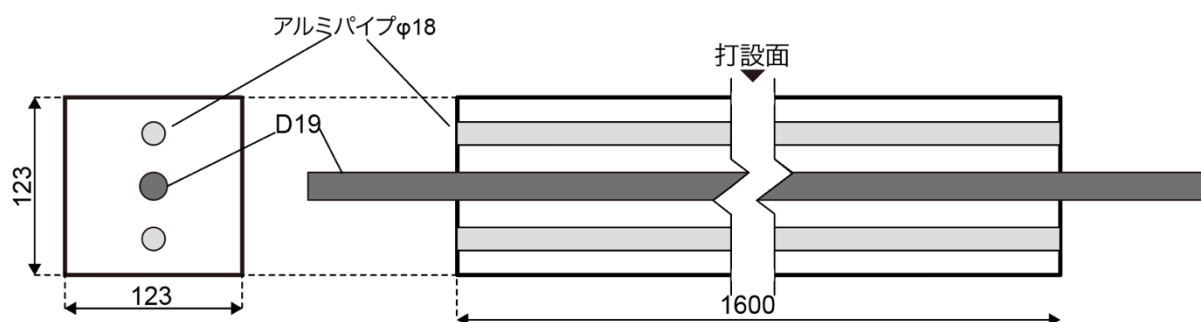


図 3.2.1 試験体配筋図

ひび割れ幅算定式（ACI 318-05）

$$w = 1.08 \times 10^{-6} \cdot \beta \cdot f_s \cdot \sqrt[3]{d_c A_c} \quad (3-1)$$

ここで、

w : 設計用最大ひび割れ幅

β : 中立軸と引張縁間の長さ/中立軸と引張鉄筋重心間の長さ

f_s : 引張鉄筋の降伏強度

d_c : 引張鉄筋重心より引張縁までのかぶり厚

A_c : 引張鉄筋群と重心が一致するコンクリート引張部分の断面積で鉄筋 1 本当たりの面積

(2) 引抜き試験体

両引き試験の解析に用いる付着構成則を把握するため、プリズム試験体と同一断面試験体の引抜き試験を実施した。試験体配筋図を図 3.2.3 に示す。引抜き鉄筋は両引き試験体に用いる D19(SD345)を使用し、付着長は呼び径の 4 倍の 76mm で、付着区間外は塩ビ管で非付着部分とした。試験体は全 5 体であり、計測項目は荷重および自由端すべりとした。

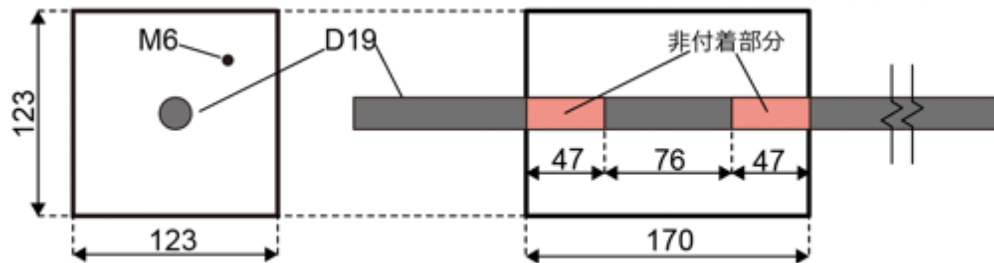


図 3.2.2 引抜き試験体

3.2.2 使用材料

(1) コンクリート

コンクリートには、目標強度 18MPa、最大骨材寸法 20mm の普通コンクリートを使用した。コンクリートの調合計画を表 3.2.2 に示す。

表 3.2.2 コンクリートの調合計画

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	C	W	S	G	Ad
78.5	248	195	930	845	2.43

コンクリートの材料試験には、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いた。加力開始日から終了日までに計 4 度の材料試験を行った。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実施した。

コンクリートの材料試験結果を表 3.2.3 に、本実験における検討用コンクリート強度を表 3.2.4 に示す。検討用コンクリート強度は、4 回の材料試験結果の平均値とした。

表 3.2.3 コンクリートの材料試験結果

材齢	番号	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
34日	1	19.0	18.2	2.15
	2	19.5	18.7	2.19
	3	19.9	18.8	2.24
	平均	19.5	18.6	2.19
47日	4	22.3	19.0	2.31
	5	22.2	18.6	2.19
	6	20.9	17.9	2.47
	平均	21.8	18.5	2.32
67日	7	22.7	18.4	2.51
	8	22.1	18.5	2.55
	9	22.4	18.9	2.67
	平均	22.4	18.6	2.58
83日	10	22.3	18.6	2.08
	11	22.2	18.5	2.44
	12	22.4	19.2	2.25
	平均	22.3	18.8	2.26

表 3.2.4 検討用コンクリート強度

目標強度	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
18MPa	21.5	18.6	2.34

(2) 異形鉄筋

引張鉄筋には異形鉄筋 D19 (SD345) を用いた。引張試験結果を表 3.2.5 に、応力-ひずみ関係を図 3.2.4 に示す。

表 3.2.5 鉄筋の引張試験結果

鉄筋	番号	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏ひずみ (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)
D19 SD345	1	366	197	0.19	561	25.4
	2	365	198	0.20	561	25.1
	3	368	197	0.20	560	24.5
	平均	366	197	0.20	560	24.8

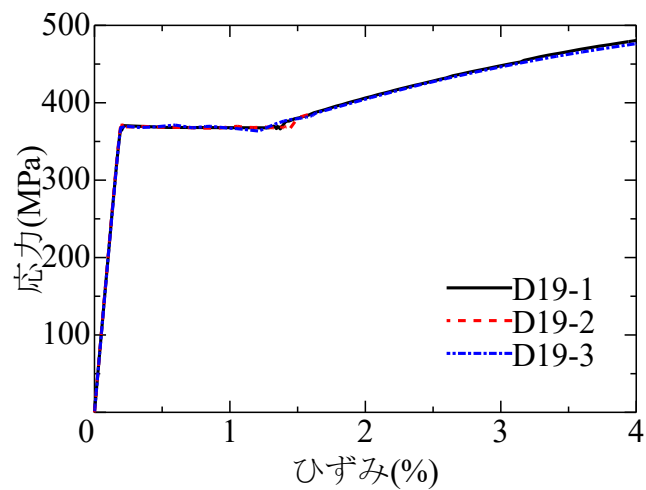


図 3.2.3 鉄筋の応力-ひずみ関係

3.2.3 加力・計測方法

(1) 両引き試験体

加力装置を図 3.2.5 に、計測に用いる変位計設置位置を図 3.2.6 に示す。加力には 2MN 万能試験機を用い、単調引張加力を行った。計測項目は荷重および全体変形であり、全体変形は 2 本の変位計の平均値とし、コンクリート外側の鉄筋部分の伸びを除いたコンクリート部分における全体変形となるように計測値の補正を行った。



図 3.2.4 加力装置

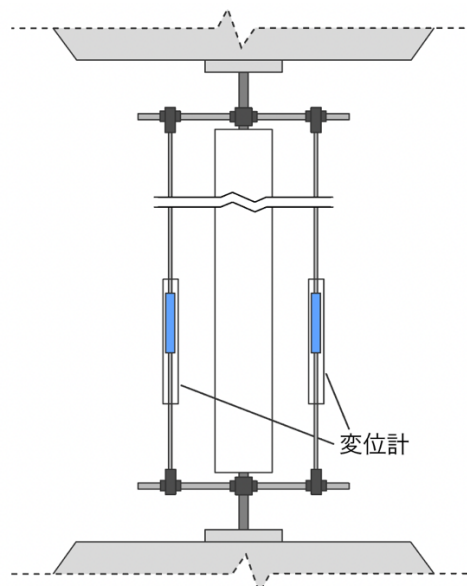


図 3.2.5 変位計設置位置

(2) 引抜き試験

加力方法および変位計設置位置を図 3.2.7 に示す。主筋周辺コンクリートの面内および面外変形を拘束しないように孔を設けた加力版の上にテフロンシートを介して試験体を設置し、2MN 万能試験機を用いて単調引抜き加力を行った。計測項目は引抜き荷重、引抜き鉄筋自由端すべりである。

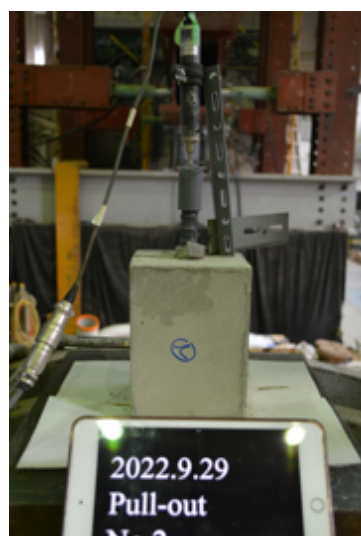
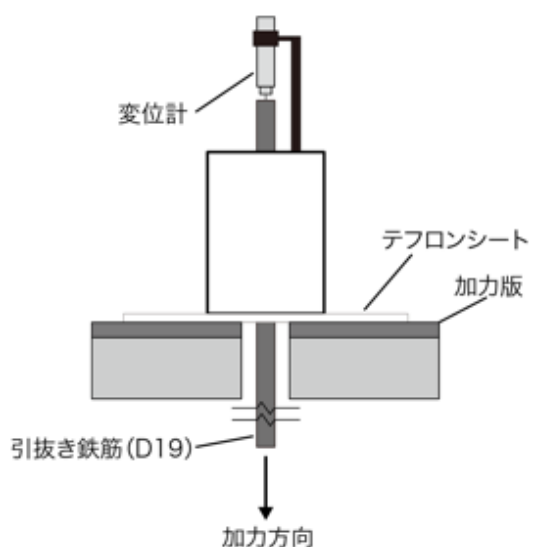


図 3.2.6 加力方法および変位計設置位置

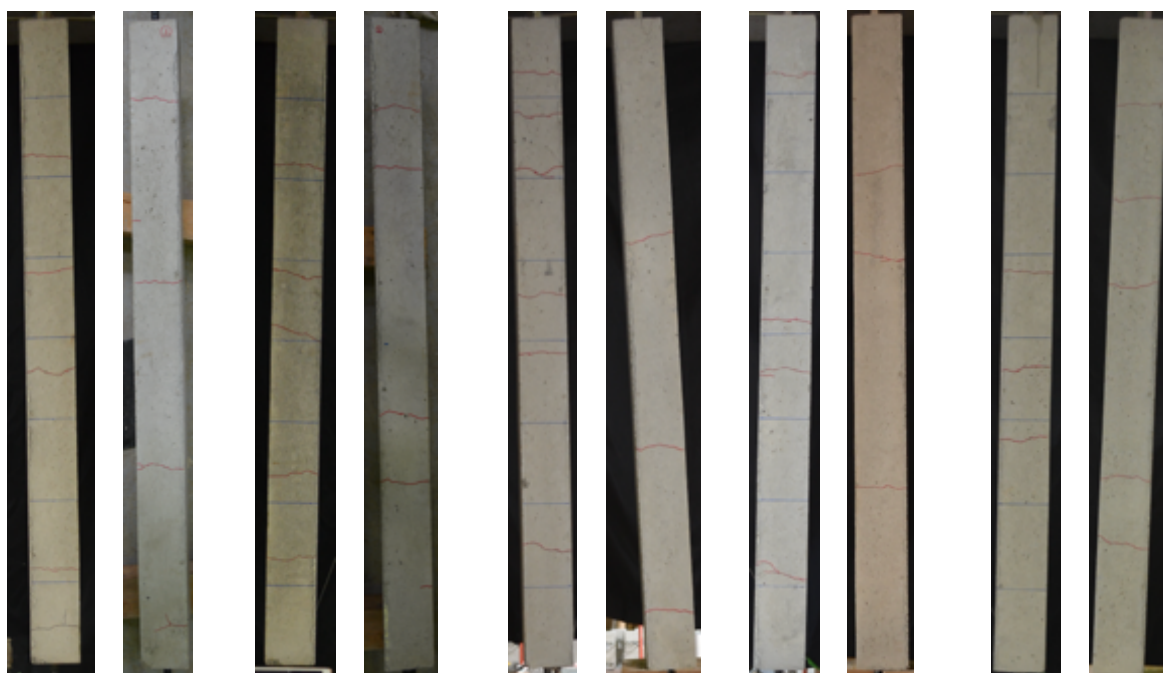
3.3 実験結果

3.3.1 両引き試験体のひび割れ発生状況

EAFP によって生じた各試験体の加力前ひび割れ幅および両引き試験鉄筋降伏時におけるひび割れ発生本数を表 3.3.1 に、鉄筋降伏時のひび割れ発生状況を図 3.3.1 に示す。破砕剤の充填により、0.08~2.00mm のひび割れが発生した。加力前ひび割れ幅の増大に伴い鉄筋降伏時のひび割れ本数は減少する傾向が見られ、加力前ひび割れ幅が 0.80mm 以上の試験体ではいずれも試験体中央部付近でひび割れが 2 本発生した。

表 3.3.1 加力前ひび割れ幅および鉄筋降伏時のひび割れ本数

試験体	加力前ひび割れ幅(mm)	鉄筋降伏時の ひび割れ本数
NC-1	－	7
NC-2	－	7
NC-3	－	9
C-0.08	0.08	7
C-0.10	0.10	7
C-0.20	0.20	5
C-0.30(1)	0.30	5
C-0.30(2)	0.30	5
C-0.50	0.50	1
C-0.60	0.60	3
C-0.80	0.80	2
C-1.20	1.20	2
C-1.30	1.30	2
C-1.90	1.90	2
C-2.00	2.00	2



正面 背面

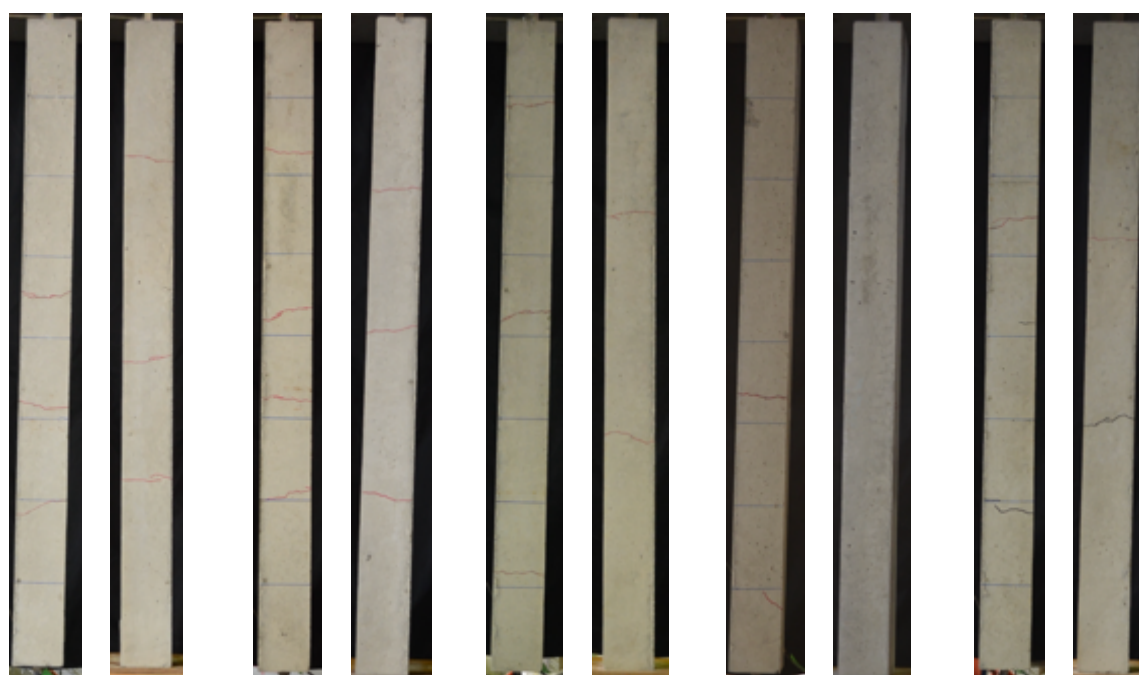
NC-1

NC-2

NC-3

C-0.08

C-0.10



正面 背面

C-0.20

C-0.30(1)

C-0.30(2)

C-0.50

C-0.60

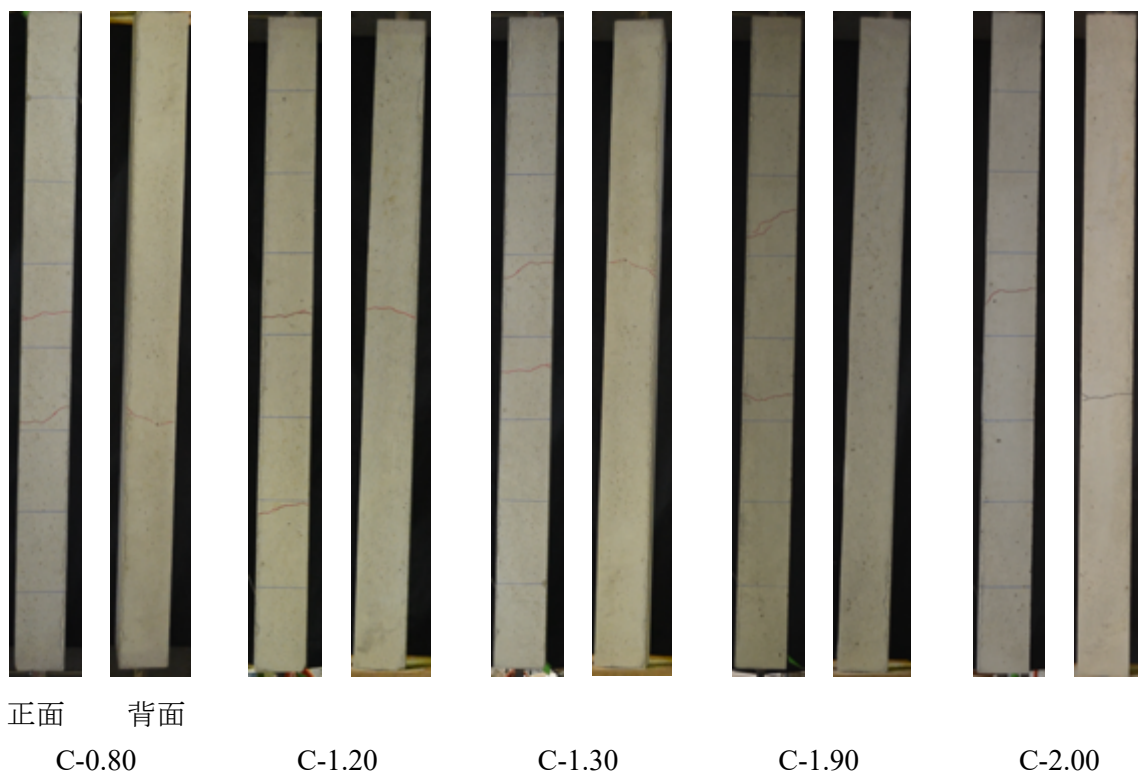


図 3.3.1 鉄筋降伏時のひび割れ発生状況

3.3.2 両引き試験体の引張荷重-全体変形関係

両引き試験から得られた各試験体の引張荷重-全体変形関係を図 3.3.2 に示す。また、第 2 章の試験体 (NC~C-Lv.3) と同等の加力前ひび割れ幅が生じた試験体の引張荷重-全体変形関係の比較を図 3.3.3 に示す。図中には D19 単体の引張荷重-変形関係および解析値も示す。

健全試験体と比較して腐食ひび割れを模擬した試験体では同一変形時における荷重の低下が見られ、加力前ひび割れ幅の増大に伴いテンションスティフニング効果が減少する傾向がある。全体変形 0.4mm 程度までの範囲で特に顕著である。

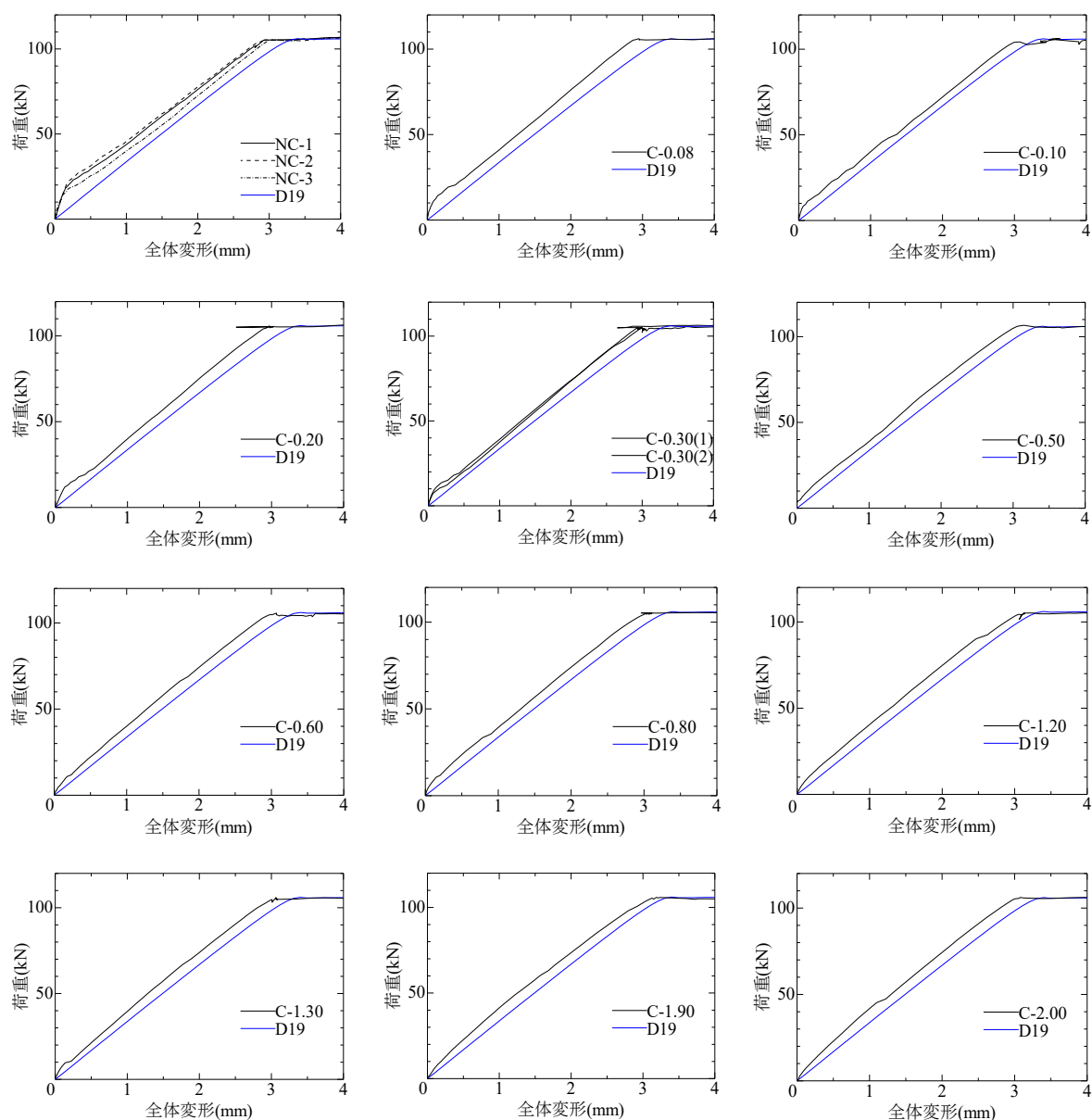


図 3.3.2 引張荷重-全体変形関係 (各試験体)

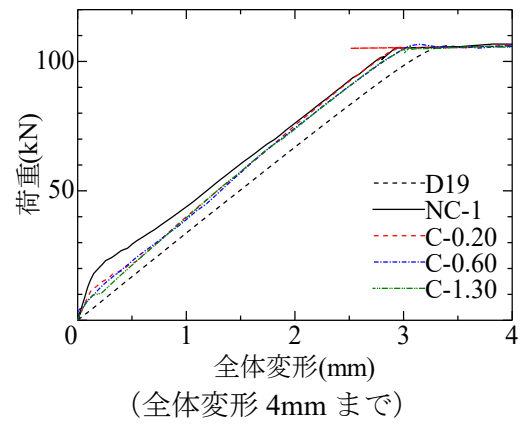
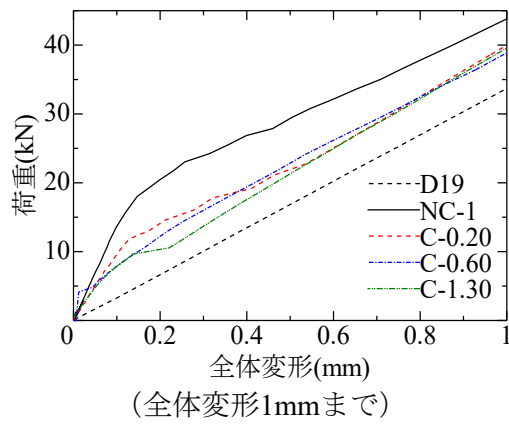


図 3.3.3 引張荷重－全体変形関係（各試験体の比較）

3.3.3 腐食ひび割れによる剛性低下

腐食ひび割れによる剛性低下を定量的に評価するため、同一変形時において各試験体の荷重を健全試験体の荷重で除した値を剛性劣化比として検討を行った。健全試験体の荷重-全体変形関係には、3体の試験体の平均化曲線（同一変形時の荷重を平均した曲線）を用いた。各試験体の剛性劣化比-全体変形関係を図 3.3.4 に示す。また、同一変形時における加力前ひび割れ幅と剛性劣化比の関係を図 3.3.5 に示す。

全体変形が 0.1~0.2mm の時点で最も劣化の度合いが大きく、加力前ひび割れ幅の増大に伴い剛性劣化比が小さくなる傾向が見られる。全体変形が 1.0mm 以降では、C-0.30 を除く全ての試験体で剛性劣化比は 0.9 より大きくなり、加力前ひび割れ幅の違いによる剛性劣化比の差も小さくなった。

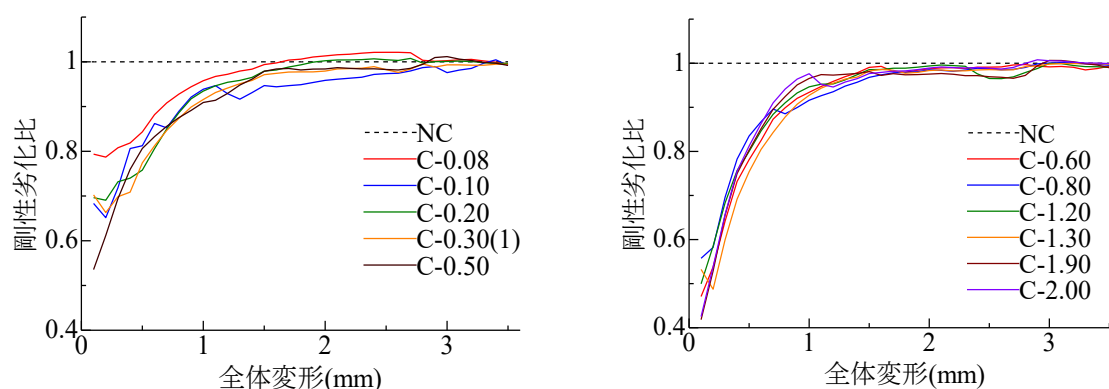


図 3.3.4 剛性劣化比-全体変形関係

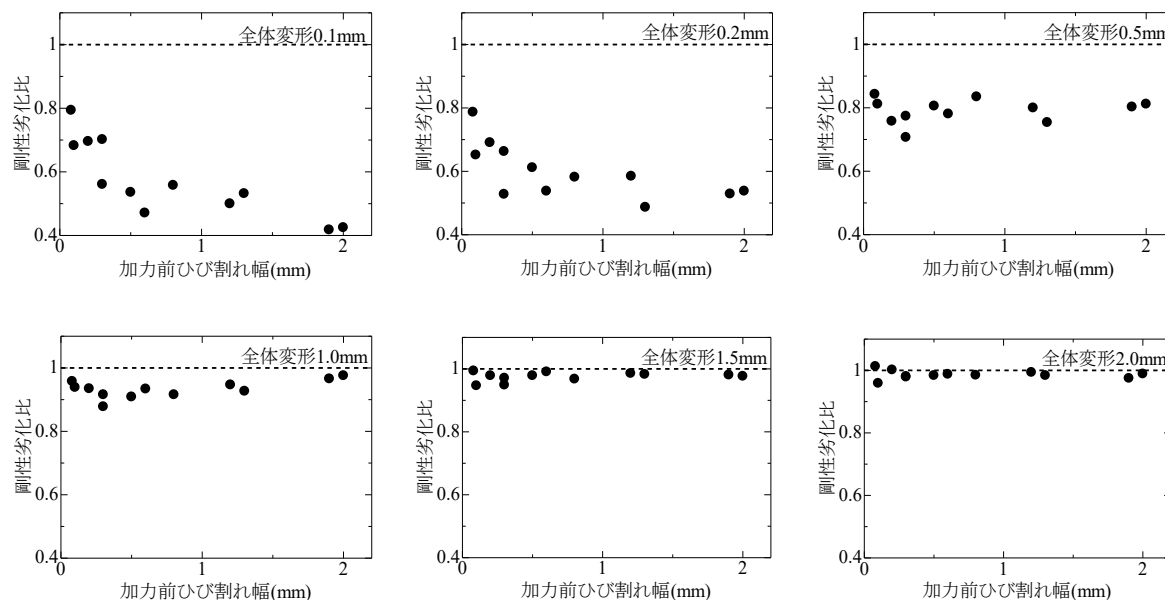


図 3.3.5 同一変形時における加力前ひび割れ幅と剛性劣化比の関係

3.4 両引き試験の解析

3.4.1 引抜き試験の結果と付着構成則のモデル化

引抜き試験より得られた付着応力-自由端すべり関係を図 3.4.1 に示す。付着構成則には、(3-2)式に示す既往研究^[10]で提案された Popovics モデルを用いる。最大付着応力および最大付着応力時のすべり量は引抜き試験体 5 体の平均化曲線から求めた値とし、それぞれ $\tau_{b,max}=8.03\text{MPa}$ 、 $s_{max}=0.55\text{mm}$ とした。解析に用いる付着構成則を図 3.4.2 に示す。

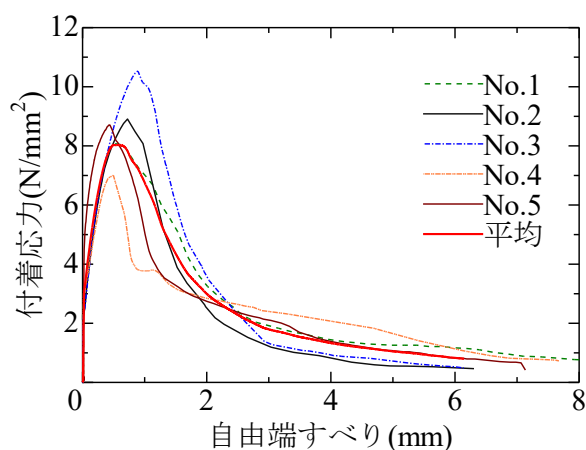


図 3.4.1 付着応力—自由端すべり関係

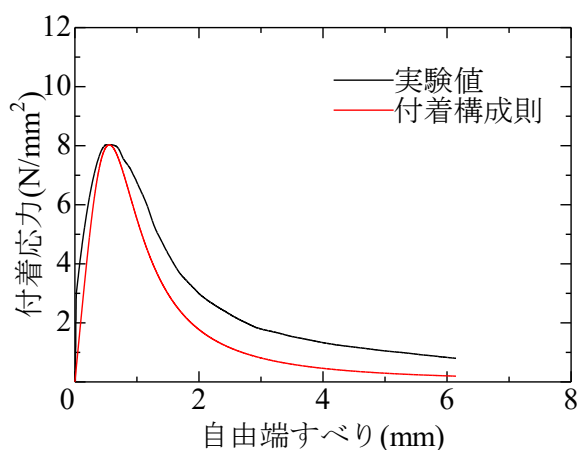


図 3.4.2 付着構成則

(Popovics モデル)

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{max})^a} \quad (3-2)$$

ここで、

τ_b : 局所付着応力(MPa)

s : すべり量(mm)

$\tau_{b,max}$: 最大付着応力(MPa)

s_{max} : 最大付着応力時のすべり量(mm)

a : 定数 3

3.4.2 解析方法

プリズム試験体について、両引き試験による引張荷重-変形関係の解析を行った。解析では既往研究^[11]で示されている、引張力が作用するコンクリート中の鉄筋の微小区間の釣り合い（図 3.4.3^[11]）を用いて計算を行った。本研究のプリズム試験体における計算手順を以下に示す。

- ① 試験体長さ $L_0 = 1600\text{mm}$ の中心から荷重端までを付着長 $L_b = 800\text{mm}$ とする。中心を原点 $x = 0$ とし、 i 番目の微小区間 Δx （本解析では 1mm とする）を考え、任意の鉄筋引張力 P_{i-1} を与える。
- ② 十分に小さい Δx の区間内において付着応力 τ_{bi} を一定とみなし、微小区間での引張力の変化量 ΔP_i 、鉄筋の伸び量 Δs_i を次式により求める。

$$\Delta P_i = \tau_{bi} \cdot \Delta x \cdot \varphi \quad (3-3)$$

$$\Delta s_i = \left(\frac{P_{i-1}}{E_s A_s} + \frac{\Delta P_i}{2 E_s A_s} \right) \Delta x \quad (3-4)$$

ここで、

E_s : 鉄筋の弾性係数

A_s : 鉄筋の断面積

- ③ コンクリートの軸方向変形を無視し、その区間終端におけるすべり s_i 、引張力 P_i を次式で求める。

$$P_i = P_{i-1} + \Delta P_i \quad (3-5)$$

$$s_i = s_{i-1} + \Delta s_i \quad (3-6)$$

- ④ 両引き試験における境界条件として、原点 $x = 0$ におけるすべりは 0 であり、任意の引張力を与えて原点から荷重端まで①～③を順次計算する。全体変形は荷重端すべり量の 2 倍とする。
- ⑤ 原点におけるコンクリート引張応力が引張強度以上になった時点で試験体中心にひび割れが発生するとし、計算を行う試験体の付着長 L_b を図 3.4.4 のようにひび割れ発生前の $1/2$ とする。この時の全体変形は、荷重端すべり量の 4 倍となる。荷重端の引張荷重が鉄筋の降伏荷重に達するまで、同様の計算を繰り返し行う。

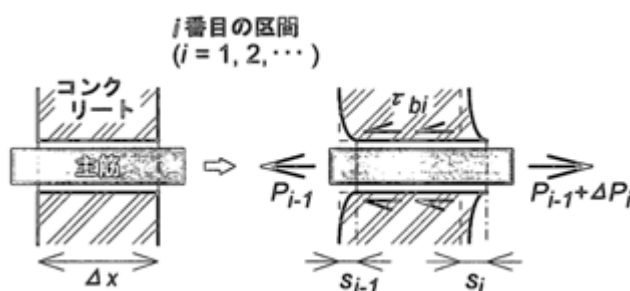


図 3.4.3 微小区間の釣り合い^[10]

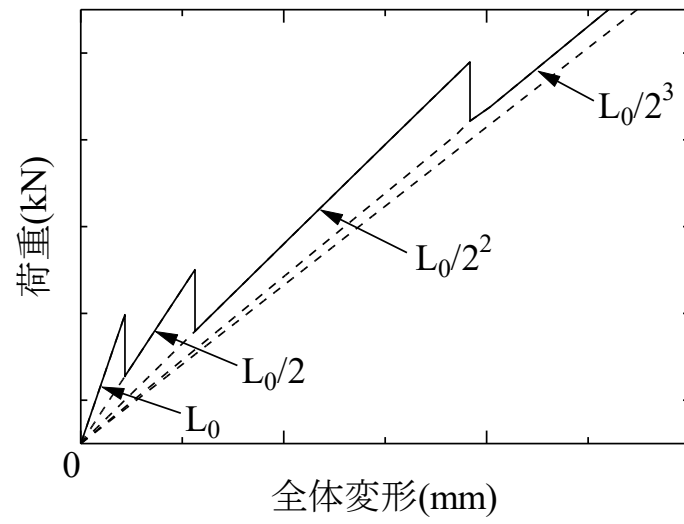


図 3.4.4 ひび割れ発生による付着長の変化

3.4.3 実験結果と解析結果の比較

健全試験体の解析結果を、実験結果と比較して図 3.4.5 に示す。図中の健全試験体の実験結果 (NC) は、3 体 (NC-1~3) の平均化曲線である。解析結果と実験結果により対応が見られた。解析結果では鉄筋降伏までに計 7 本のひび割れが発生しており、健全試験体 (NC-1~3) で発生したひび割れ本数 (7 本~9 本) との対応が見られた。

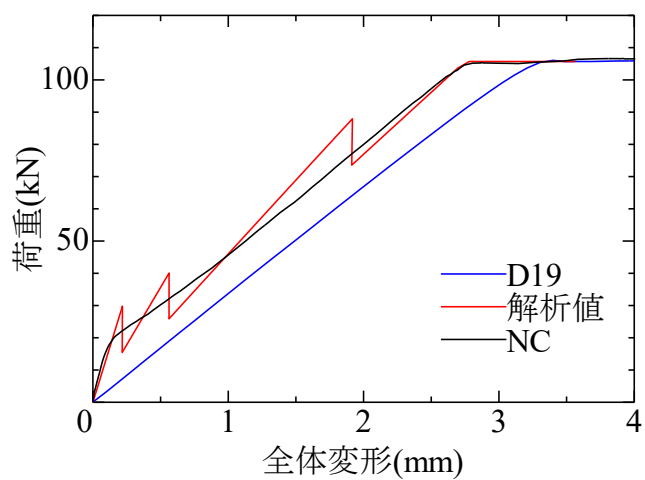


図 3.4.5 健全試験体の実験結果と解析結果の比較

加力前ひび割れのある試験体について、Popovics モデルの最大付着応力 $\tau_{b,max}$ を既往研究^[4]で提案されたひび割れ幅と付着強度比の関係式 ((3-7) 式) を乗じて低減し、解析を行った。加力前ひび割れのある各試験体 (C-0.08~C-2.00) の実験結果と解析結果の比較を図 3.4.6 に示す。鉄筋降伏までに発生するひび割れ本数は、解析結果では C-0.08~C-0.10 試験体で 7 本、C-0.20~C-1.20 試験体で 3 本、C-1.30~C-2.00 試験体で 1 本となり、実験結果とある程度の対応が見られる。解析結果は、総じて実験結果の荷重を上回った。

$$R_b = 1 - a(1 - (e^{b w_{cr}})) \quad (3-7)$$

ここで、

R_b : 付着強度比

a : 定数 0.84

b : 定数 -1.89

w_{cr} : ひび割れ幅(mm)

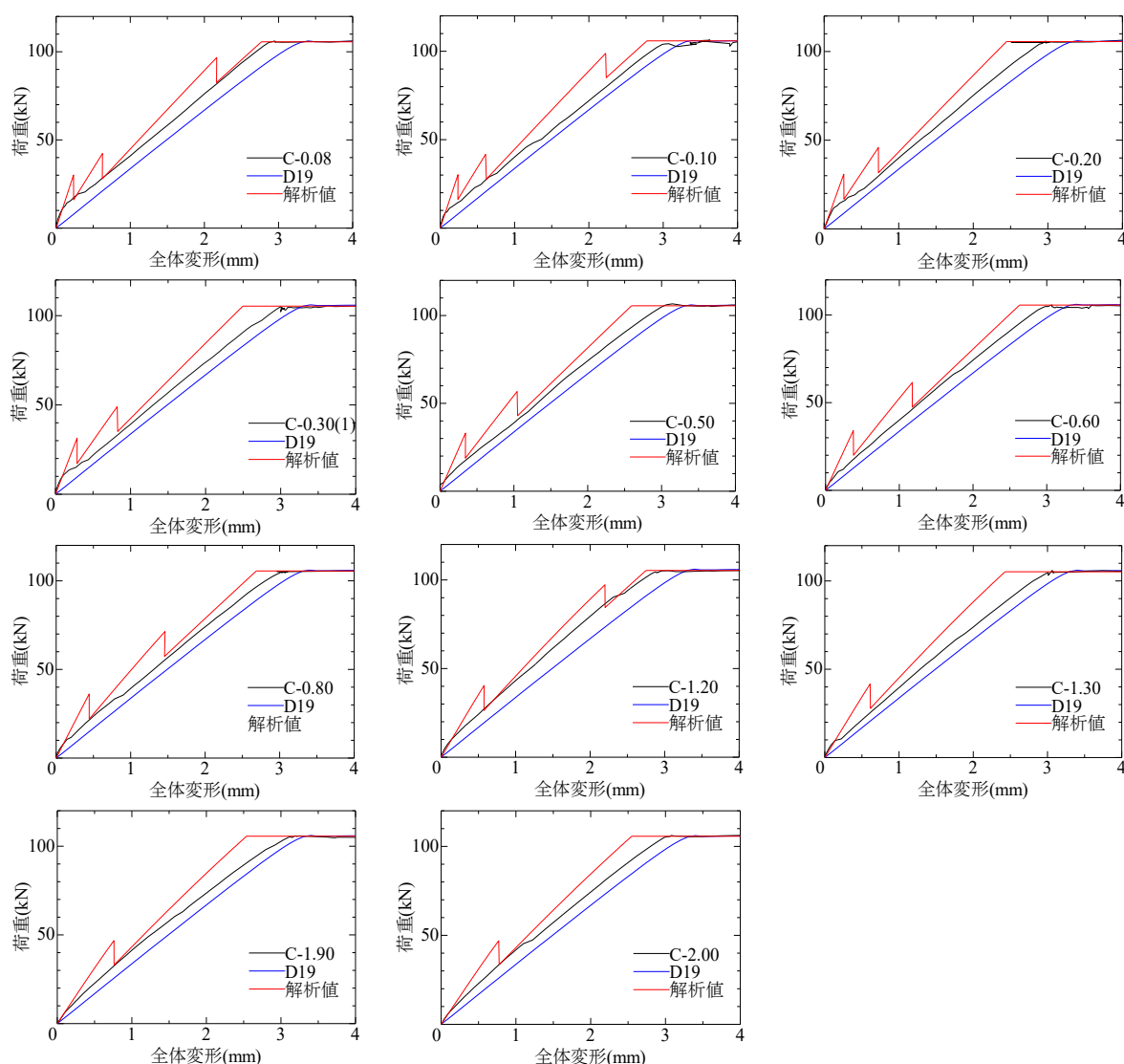


図 3.4.6 加力前ひび割れのある試験体の実験結果と解析結果の比較

鉄筋降伏までの引張荷重-全体変形関係について最小二乗法による直線回帰を行い、得られた直線の傾きの解析結果と実験結果の比較を行った。各試験体の回帰直線の傾きと、解析値に対する実験値の比を表 3.4.1 に示す。健全試験体（NC）の実験値は、3 体の平均化曲線から求めた値である。C-0.08 および C-0.60 試験体を除く全ての試験体で解析値の傾きが実験値より大きくなったが、誤差は最大で 10%程度と、全ての試験体を通じて実験結果と解析結果はよい対応を示した。なお、鉄筋降伏までで直線回帰した剛性は、必ずしも加力前ひび割れ幅の増大に伴って小さくなるわけではなく、逆にひび割れ本数が少ない場合には剛性が大きくなる場合もある。

表 3.4.1 回帰直線の傾きの実験結果と解析結果の比較

試験体名	実験値 (kN/mm)	解析値 (kN/mm)	実験値/解析値
NC	33.7	37.1	0.908
C-0.08	36.5	35.9	1.015
C-0.10	34.7	36.0	0.965
C-0.20	36.0	38.2	0.942
C-0.30(1)	35.9	37.8	0.949
C-0.50	35.6	36.5	0.975
C-0.60	36.3	36.2	1.002
C-0.80	35.5	36.1	0.985
C-1.20	35.5	38.1	0.931
C-1.30	36.6	40.5	0.904
C-1.90	35.1	38.7	0.907
C-2.00	36.0	38.8	0.929

3.5 まとめ

腐食ひび割れが剛性低下に与える影響について把握するため、EAFP 導入ひび割れにより付着劣化を模擬したプリズム試験体の両引き試験を実施し、得られた引張荷重-変形関係から腐食ひび割れがテンションスティフニング効果の減少に伴う剛性低下に与える影響について検討を行った。また、プリズム試験体と同一断面の試験体の引抜き試験を実施し、実験結果より求めた付着構成則を用いて両引き試験の解析を行い、実験結果との比較検討を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 加力前ひび割れ幅の増大に伴い鉄筋降伏時のひび割れ本数が減少した。
- ② 加力前ひび割れ幅の増大に伴いテンションスティフニング効果が減少する傾向が見られ、全体変形 0.4mm 程度までの範囲で特に顕著であった。
- ③ 剛性は全体変形が 0.1~0.2mm の時点で最も劣化の度合いが大きく、加力前ひび割れ幅の増大に伴い剛性劣化比が小さくなった。全体変形が 1.0mm 以降では、加力前ひび割れ幅の違いによる剛性低下の違いはほとんど見られなかった。
- ④ 解析結果は総じて実験結果の荷重を上回ったが、鉄筋の降伏までに発生するひび割れ本数にはある程度の対応が見られた。
- ⑤ 鉄筋降伏までで直線回帰した剛性は、必ずしも加力前ひび割れ幅の増大に伴って小さくなるわけではなく、逆にひび割れ本数が少ない場合には剛性が大きくなる場合もある。

第4章 結論

本研究では、腐食ひび割れが RC 部材の構造性能に与える影響を検討することを目的とし、EAFP 導入ひび割れにより付着劣化を模擬した RC 梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験、および同手法で付着劣化を模擬したプリズム試験体の両引き試験を実施した。

逆対称繰返し曲げせん断実験では、繰返し応力下の RC 梁部材の履歴性状について検討を行い、加力前ひび割れ幅が大きい試験体の最大耐力の低下がわずかに見られた。また、剛性についても部材角 $1/100 \sim 1/400 \text{rad}$ 時において加力前ひび割れ幅の増大に伴い低下する傾向が見られた。一方で、加力前ひび割れ幅が比較的小さい C-Lv.1 試験体で顕著な曲げせん断ひび割れが発生し、包絡線および累積エネルギー吸収量の比較により、最大耐力以降の性能の低下が見られた。

両引き試験では、腐食ひび割れが剛性低下に与える影響についての検討を行い、加力前ひび割れ幅の増大に伴うテンションスティフニング効果の減少および剛性低下を確認した。加力前ひび割れ幅による剛性低下は全体変形が 0.3mm 程度までの範囲で顕著に見られ、 1.0mm 以降では加力前ひび割れ幅による差はほとんど見られなかった。実験結果と解析結果との比較では、総じて解析結果は実験結果の荷重を上回ったが、鉄筋が降伏するまでに発生するひび割れ本数にはある程度対応が見られた。また、鉄筋降伏までで直線回帰した剛性は実験結果と解析結果により対応が見られた。

両実験より、加力前ひび割れ幅の増大が、テンションスティフニング効果の減少に伴う剛性低下に影響を及ぼすことを確認したが、最大耐力以降の靱性能については、加力前ひび割れ幅以上に加力の進行に伴い発生するひび割れによる影響が支配的であった。劣化した RC 造構造物の性能低下を腐食ひび割れ幅により評価する指標を構築する上では、性能低下に直接影響を与えるようなひび割れの発生を誘引する加力前ひび割れ幅についての検討は無視できず、今後の詳細な検討が必要であると考えられる。

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頂きました。筑波大学システム情報工学系教授金久保利之先生には、本研究における相談から実験の実施、および論文執筆に至るまで多くのご指導を賜りました。筑波大学システム情報系准教授の八十島章先生には、試験体製作および実験の実施において的確な助言、丁寧なご指導を賜りました。筑波大学技術専門職員の小島篤志氏には、実験時に試験体の製作、特殊な治具の製作および実験方法の助言など多大なる便宜を図って頂きました。心より感謝いたします。また、研究室の先輩であるSYLL AMADOU SAKHIR氏、油野登梧氏、藤原海氏、同期である小林寛弥氏、後輩である永井聖人氏、三谷龍世氏には実験の補助や論文指導など多くの支援を頂きました。皆様に心より感謝致します。

参考文献

- [1] 油野登梧：破砕剤充填パイプにより鉄筋腐食ひび割れを模擬したRC部材の構造性能、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、2021.3
- [2] 松尾豊史、松村卓郎、金津努：引張力を受ける鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に伴う材料劣化、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.1、2011
- [3] 川村佳弘：破砕剤充填パイプによるコンクリートの鉄筋腐食時ひび割れの模擬、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、2018.3
- [4] Syll,A.S., Shimokobe,H., Kanakubo,T：Effect of Stirrup on Bond Strength Degradation in Concrete Cracked by Expansion Agent Filled Pipes, applied sciences, 11-19, 8874 (16pp.), 2021.9
- [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] 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
- [7] 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，1997
- [8] 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書、pp.47-49、1998
- [9] American Concrete Institute：Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)，2005
- [10] 金久保利之、吉田智基、福山洋：等価付着ストレスブロックによる連続繊維シートとコンクリートの付着強度算定式、コンクリート工学論文集、第12巻第3号、2001.9
- [11] 金久保利之、小島浩一、米丸啓介、福山洋：補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究 その2 補強筋のない場合の性状に与える構造因子の影響、日本建築学会構造系論文集、第506号、163-169、1998.4