

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

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

油野 登梧

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 金久保利之

2021年 3月

## 論文概要

現存する多くの鉄筋コンクリート（RC）造構造物は建設から年数が経過し、経年劣化による性能低下が危惧されている。構造物の長期供用を図るためには劣化の度合いに見合ったメンテナンスが必要となる。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が減少すること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り、コンクリートにひび割れが生じる。本研究では、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れが RC 部材の構造性能に及ぼす影響を検討することを目的とし、加力前ひび割れ幅を変動因子とした梁試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を実施した。実験は曲げ降伏先行型とせん断破壊型の 2 シリーズで、鉄筋腐食によるひび割れを模擬する方法として、試験体内部に埋設された中空パイプに静的破砕剤を充填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、曲げ降伏先行型試験体に対して破砕剤によるひび割れ導入実験および逆対称繰返し曲げせん断加力を実施し、加力前ひび割れが部材の曲げ性状および曲げ降伏後の靱性に及ぼす影響を検討した。破砕剤充填後の経過時間の増大に伴ってひび割れ幅は大きくなり、切断面にはコーナースプリット型とサイドスプリット型のひび割れが発生した。加力前ひび割れ幅は試験体の最大耐力に影響を及ぼさなかったが、部材角  $1/100\text{rad}$  までの剛性低下および最大耐力時の部材角の増大をもたらした。最大耐力実験値と断面解析結果を比較すると、正側実験値は破砕剤充填パイプを考慮した解析結果、負側実験値は破砕剤充填パイプを考慮していない解析結果に近い傾向がみられた。

第 3 章では、せん断破壊型試験体の逆対称繰返し曲げせん断加力を実施し、加力前ひび割れが部材のせん断性能に及ぼす影響を検討した。加力前ひび割れ幅と試験体の最大耐力に明瞭な関係はみられなかったが、曲げ降伏先行型試験体の場合と同様に剛性の低下、最大耐力時の部材角の増大がみられた。加力前ひび割れ幅が大きい場合、主筋に沿ったひび割れの拡幅により顕著なせん断ひび割れの発生が抑制され、コンクリート有効圧縮強度の低下が小さくなり、ひび割れ幅が小さい試験体と同程度以上の耐力およびエネルギー吸収性能を発揮したと考えられる。

第 4 章では、本論文の結論を述べた。

# 目次

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第1章 序論                   | 6  |
| 1.1 研究背景                 | 6  |
| 1.2 研究目的                 | 8  |
| 1.3 鉄筋腐食によるひび割れの模擬方法     | 9  |
| 第2章 曲げ降伏先行型試験体の曲げせん断実験   | 11 |
| 2.1 はじめに                 | 11 |
| 2.2 破砕剤充填パイプによるひび割れ導入実験  | 12 |
| 2.2.1 実験概要               | 12 |
| 2.2.2 実験結果               | 14 |
| 2.3 実験概要                 | 17 |
| 2.3.1 試験体概要              | 17 |
| 2.3.2 使用材料               | 20 |
| 2.3.3 加力方法               | 23 |
| 2.3.4 計測方法               | 24 |
| 2.4 実験結果                 | 25 |
| 2.4.1 試験体破壊状況            | 25 |
| 2.4.2 せん断力－部材角関係         | 29 |
| 2.4.3 主筋およびせん断補強筋ひずみ     | 31 |
| 2.4.4 包絡線の比較             | 35 |
| 2.4.5 累積エネルギー吸収量の比較      | 36 |
| 2.5 断面解析                 | 37 |
| 2.5.1 解析方法               | 37 |
| 2.5.2 解析結果               | 41 |
| 2.6 まとめ                  | 42 |
| 第3章 せん断破壊型試験体の曲げせん断実験    | 43 |
| 3.1 はじめに                 | 43 |
| 3.2 実験概要                 | 44 |
| 3.2.1 試験体概要              | 44 |
| 3.2.2 使用材料               | 47 |
| 3.2.3 加力方法               | 50 |
| 3.2.4 計測方法               | 50 |
| 3.3 実験結果                 | 51 |
| 3.3.1 Monitor 試験体のひび割れ状況 | 51 |
| 3.3.2 試験体破壊状況            | 53 |
| 3.3.3 せん断力－部材角関係         | 57 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 3.3.4 主筋およびせん断補強筋のひずみ | 58 |
| 3.3.5 最大耐力            | 62 |
| 3.3.6 包絡線の比較          | 64 |
| 3.3.7 累積エネルギー吸収量の比較   | 65 |
| 3.4 まとめ               | 66 |
| 第4章 結論                | 67 |
| 謝辞                    | 68 |
| 参考文献                  | 69 |



## 図表目次

|          |                                          |    |
|----------|------------------------------------------|----|
| 図 1.1.1  | 腐食ひび割れが付着強度に与える影響の例 <sup>[2]</sup> ..... | 7  |
| 図 1.3.1  | 破砕剤充填パイプのメカニズム .....                     | 10 |
| 図 1.3.2  | 破砕剤充填パイプによるひび割れの例 .....                  | 10 |
| 図 2.2.1  | ひび割れ導入実験試験体配筋図 .....                     | 13 |
| 図 2.2.2  | 変位計設置状況 .....                            | 13 |
| 図 2.2.3  | 破砕剤充填から 300 時間経過後の試験体 .....              | 14 |
| 図 2.2.4  | 試験体中央部の切断面 .....                         | 15 |
| 図 2.2.5  | ひび割れ幅－経過時間関係 .....                       | 16 |
| 図 2.3.1  | 曲げ降伏先行型試験体配筋図 .....                      | 17 |
| 図 2.3.2  | 曲げ降伏先行型試験体における鉄筋の応力－ひずみ関係 .....          | 21 |
| 図 2.3.3  | 曲げ降伏先行型試験体におけるアルミパイプの応力－ひずみ関係 .....      | 22 |
| 図 2.3.4  | 加力装置図 .....                              | 23 |
| 図 2.3.5  | 加力履歴 .....                               | 23 |
| 図 2.3.6  | 変位計設置位置（単位：mm） .....                     | 24 |
| 図 2.3.7  | 曲げ降伏先行型試験体のひずみゲージ貼付位置 .....              | 24 |
| 図 2.4.1  | 曲げ降伏先行型試験体のひび割れ状況（BF-Lv.1） .....         | 26 |
| 図 2.4.2  | 曲げ降伏先行型試験体のひび割れ状況（BF-Lv.2） .....         | 27 |
| 図 2.4.3  | 曲げ降伏先行型試験体のひび割れ状況（BF-Lv.3） .....         | 28 |
| 図 2.4.4  | 曲げ降伏先行型試験体のせん断力－部材角関係 .....              | 29 |
| 図 2.4.5  | BF-Lv.1 部材角－主筋ひずみ関係 .....                | 32 |
| 図 2.4.6  | BF-Lv.1 せん断補強筋ひずみ分布 .....                | 32 |
| 図 2.4.7  | BF-Lv.2 主筋ひずみ .....                      | 33 |
| 図 2.4.8  | BF-Lv.2 せん断補強筋ひずみ分布 .....                | 33 |
| 図 2.4.9  | BF-Lv.3 主筋ひずみ .....                      | 34 |
| 図 2.4.10 | BF-Lv.3 せん断補強筋ひずみ分布 .....                | 34 |
| 図 2.4.11 | 曲げ降伏先行型試験体の包絡線 .....                     | 35 |
| 図 2.4.12 | 曲げ降伏先行型試験体の累積エネルギー吸収量 .....              | 36 |
| 図 2.4.13 | 曲げ降伏先行型試験体の累積エネルギー吸収量比 .....             | 36 |
| 図 2.5.1  | コンクリートモデル .....                          | 37 |
| 図 2.5.2  | 鉄筋のモデル .....                             | 38 |
| 図 2.5.3  | 引張側破砕剤充填パイプのモデル .....                    | 39 |
| 図 2.5.4  | 圧縮側破砕剤充填パイプのモデル .....                    | 40 |
| 図 2.5.5  | 曲げモーメント曲率関係 .....                        | 41 |
| 図 3.1.1  | アーチ・トラス機構のイメージ .....                     | 43 |
| 図 3.1.2  | 腐食ひび割れがアーチ機構に及ぼす影響のイメージ .....            | 43 |

|          |                                    |    |
|----------|------------------------------------|----|
| 図 3.1.3  | 腐食ひび割れがトラス機構に及ぼす影響のイメージ .....      | 43 |
| 図 3.2.1  | せん断破壊型試験体の配筋図 .....                | 44 |
| 図 3.2.2  | せん断破壊型試験体における鉄筋の応力-ひずみ関係 .....     | 48 |
| 図 3.2.3  | せん断破壊型試験体におけるアルミパイプの応力-ひずみ関係 ..... | 49 |
| 図 3.2.4  | せん断破壊型試験体のひずみゲージ貼付位置 .....         | 50 |
| 図 3.3.1  | Monitor 試験体ひび割れ状況 .....            | 51 |
| 図 3.3.2  | Monitor 試験体切断面の様子 (単位: mm) .....   | 52 |
| 図 3.3.3  | せん断破壊型試験体のひび割れ状況 (SF-Lv.1) .....   | 54 |
| 図 3.3.4  | せん断破壊型試験体のひび割れ状況 (SF-Lv.2) .....   | 55 |
| 図 3.3.5  | せん断破壊型試験体のひび割れ状況 (SF-Lv.3) .....   | 56 |
| 図 3.3.6  | せん断破壊型試験体のせん断力-部材角関係 .....         | 57 |
| 図 3.3.7  | SF-Lv.1 主筋ひずみ .....                | 59 |
| 図 3.3.8  | SF-Lv.1 せん断補強筋ひずみ分布 .....          | 59 |
| 図 3.3.9  | SF-Lv.2 主筋ひずみ .....                | 60 |
| 図 3.3.10 | SF-Lv.2 せん断補強筋ひずみ分布 .....          | 60 |
| 図 3.3.11 | SF-Lv.3 主筋ひずみ .....                | 61 |
| 図 3.3.12 | SF-Lv.3 せん断補強筋ひずみ分布 .....          | 61 |
| 図 3.3.13 | 加力前ひび割れ幅-最大耐力関係 .....              | 63 |
| 図 3.3.14 | 加力前ひび割れ幅-最大耐力時部材角関係 .....          | 63 |
| 図 3.3.15 | ひび割れ状況のイメージ図 .....                 | 63 |
| 図 3.3.16 | せん断破壊型試験体の包絡線 .....                | 64 |
| 図 3.3.17 | せん断破壊型試験体の累積エネルギー吸収量 .....         | 65 |
| 図 3.3.18 | せん断破壊型試験体の累積エネルギー吸収量比 .....        | 65 |
| 表 1.1.1  | 腐食ひび割れ幅と付着強度比 .....                | 7  |
| 表 1.3.1  | 腐食ひび割れ模擬方法一覧 .....                 | 9  |
| 表 2.2.1  | ひび割れ導入実験試験体一覧 .....                | 12 |
| 表 2.3.1  | 曲げ降伏先行型試験体一覧 .....                 | 17 |
| 表 2.3.2  | 曲げ降伏先行型試験体の耐力計算結果 .....            | 18 |
| 表 2.3.3  | 曲げ降伏先行型試験体におけるコンクリートの調合表 .....     | 20 |
| 表 2.3.4  | 曲げ降伏先行型試験体におけるコンクリートの材料試験結果 .....  | 20 |
| 表 2.3.5  | 曲げ降伏先行型試験体における検討用コンクリート強度 .....    | 20 |
| 表 2.3.6  | 曲げ降伏先行型試験体における鉄筋の引張試験結果 .....      | 21 |
| 表 2.3.7  | 曲げ降伏先行型試験体におけるアルミパイプの引張試験結果 .....  | 22 |
| 表 2.4.1  | 曲げ降伏先行型試験体の最大耐力実験結果 .....          | 30 |
| 表 3.2.1  | せん断破壊型試験体一覧 .....                  | 44 |
| 表 3.2.2  | せん断破壊型試験体の耐力計算 .....               | 44 |
| 表 3.2.3  | せん断破壊型試験体におけるコンクリートの調合表 .....      | 47 |

|         |                                  |    |
|---------|----------------------------------|----|
| 表 3.2.4 | せん断破壊型試験体におけるコンクリートの材料試験結果 ..... | 47 |
| 表 3.2.5 | せん断破壊型試験体における検討用コンクリート強度 .....   | 47 |
| 表 3.2.6 | せん断破壊型試験体における鉄筋の引張試験結果 .....     | 48 |
| 表 3.2.7 | せん断破壊型試験体におけるアルミパイプに引張試験結果 ..... | 49 |
| 表 3.3.1 | せん断破壊型試験体の最大耐力実験結果 .....         | 62 |

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

1960年代に始まった建設ラッシュによって、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 40～50 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供用していくためには、経年劣化を早急に発見し、適切な維持管理を図っていくことが必要となる。劣化の度合いに見合った補修を行うためには、構造物の劣化における構造性能の低下を定量的に評価し、指針を設けることが重要である。

RC 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が減少すること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り、コンクリートにひび割れが生じて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 部材の構造性能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のひび割れ（以下、腐食ひび割れと称する）と構造性能低下に注目した研究は少ない。既往の研究<sup>[1]</sup>では、暴露した試験体に逆対称繰返し曲げせん断加力を行った結果、基準試験体に比べて最大耐力およびエネルギー吸収性能が低下したと報告され、これらの性能低下は引張鉄筋の断面減少が原因であると考察されている。

腐食ひび割れは鉄筋とコンクリート間の付着性能を低下させることが報告されている。例えば、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<sup>[2]</sup>において、腐食ひび割れ幅と付着強度比（腐食していない鉄筋に対する、腐食した場合の付着強度の比）の関係が整理されている（図 1.1.1<sup>[2]</sup>）。同図中の「補強筋あり」（せん断補強筋に該当）の腐食ひび割れ幅－付着強度比関係の近似曲線に注目すると、ひび割れ幅が 0.2mm 以下で付着強度比が 70%以上、0.2～0.8mm で 30～70%、0.8mm 超で 30%以下となっている。この関係を大まかにまとめた一覧を表 1.1.1 に示す。

付着性能の低下は、部材の破壊モードが付着割裂破壊に移行して靱性が低下する現象や、変形および破壊の局所化を招き曲げ性能が低下する現象を引き起こす恐れがある。また、腐食ひび割れによる付着劣化は、RC 部材のせん断性能にも影響を及ぼすと考えられる。一般的に RC 部材が曲げモーメントおよびせん断力を受け終局状態に達するとき、部材内部の応力伝達機構は部材両端の圧縮領域を対角線上に結ぶアーチ機構と、部材端の圧縮力がせん断補強筋の引張力に変換されてから伝わるトラス機構で構成されていると考えられている<sup>[3]</sup>。トラス機構は主筋とコンクリート間の付着が十分に存在する場合に成り立つとされているため、腐食ひび割れによる付着劣化は RC 部材のせん断性能に影響を及ぼすと予想される。

以上の背景より、鉄筋腐食が RC 部材の構造性能に及ぼす影響を検討する上で、腐食ひび割れの影響を無視することはできないと考えられる。

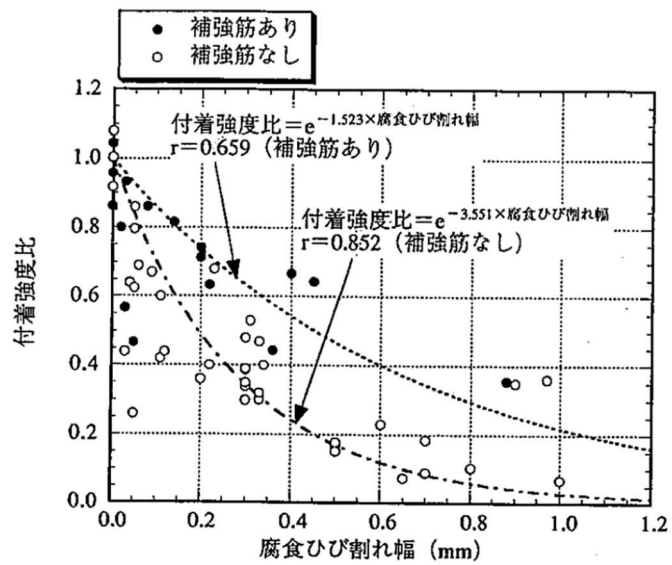


図 1.1.1 腐食ひび割れが付着強度に与える影響の例<sup>[2]</sup>

表 1.1.1 腐食ひび割れ幅と付着強度比

| 腐食ひび割れ幅                                        | 付着強度比（補強筋あり） |
|------------------------------------------------|--------------|
| $\omega_{cr} \leq 0.2\text{mm}$                | 70%以上        |
| $0.2\text{mm} < \omega_{cr} \leq 0.8\text{mm}$ | 30～70%       |
| $0.8\text{mm} < \omega_{cr}$                   | 30%以下        |

## 1.2 研究目的

本研究では、鉄筋腐食によって発生したコンクリートのひび割れが RC 部材の構造性能に及ぼす影響を検討することを目的とし、曲げ降伏先行型試験体とせん断破壊型試験体の 2 シリーズについて、建研式の逆対称繰返し曲げせん断加力を実施する。腐食ひび割れを模擬する方法として、コンクリート中に埋設した中空パイプに静的破砕剤を充填する手法（1.3 で詳述）を採用する。

第 2 章では、腐食ひび割れが繰返し加力下における RC 部材の曲げ性状および曲げ降伏後の付着性状に及ぼす影響を検討するために、曲げ降伏先行付着割裂破壊型試験体の逆対称繰返し曲げせん断加力を実施し、部材の最大耐力評価、エネルギー吸収性能の検討を行う。耐力評価に関しては、曲げ断面解析も行い、実験結果と比較する。

第 3 章では、腐食ひび割れが繰返し加力下における RC 部材のせん断性状に及ぼす影響を検討するために、せん断破壊型試験体で同様の加力実験を行い、最大耐力の検討、エネルギー吸収性能の検討を行う。

### 1.3 鉄筋腐食によるひび割れの模擬方法

鉄筋腐食によるひび割れを模擬する方法として既往の研究では、暴露試験<sup>例えば[1]</sup>、電食実験<sup>例えば[4]</sup>およびスリット<sup>例えば[5]</sup>を用いた手法が挙げられる。それぞれの手法ごとの特徴を表 1.3.1 に示す。暴露試験に比べて実験が容易で、実供用下の鉄筋腐食に近い現象を引き起こすことができる電食実験が、鉄筋腐食を模擬する方法として最も利用されている。しかし電食実験の特性上、鉄筋を通電させるため鉄筋に貼付されたひずみゲージが損傷してしまう恐れがあり、例えば部材の曲げ降伏やせん断破壊の判断が困難になる。また、ひび割れが発生した箇所で電気抵抗が減少し、通電および腐食が局所化してしまうことが指摘されている<sup>[6]</sup>。

Syll らは、鉄筋腐食によるひび割れを模擬する方法として、コンクリート中に埋設した中空パイプに静的破砕剤を充填し、腐食生成物による場合と同様の内圧によってひび割れを生じさせ、実験を行う方法を提案した<sup>[7]</sup> (図 1.3.1)。静的破砕剤とは酸化カルシウムを主成分とする粉末で、水と反応して生成する水酸化カルシウムの結晶化膨張圧を利用して、岩盤やコンクリートの破壊を行うために用いられる材料である。破砕剤充填パイプを用いた手法では電食と比較して短期間でひび割れを発生させることが可能で、通電によるひずみゲージ損傷の恐れがない特徴を持つ。さらに、破砕剤による膨張圧によってひび割れを発生させるため、鉄筋自体の腐食の影響を考慮せずコンクリートのひび割れの影響のみに注目することができる。破砕剤充填パイプを主筋の代わりに用いた RC 柱試験体の中心圧縮実験<sup>[8]</sup>では、破砕剤充填後の時間をコントロールすることで、試験体表面に幅が 0.05mm～0.80mm のひび割れが発生したことが報告されている (図 1.3.2)。

以上より、本研究では鉄筋腐食によるひび割れを模擬する方法として破砕剤充填パイプを用いる手法を採用した。

表 1.3.1 腐食ひび割れ模擬方法一覧

| 模擬方法 | メリット                                                                                        | デメリット                                                                                                        |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 暴露試験 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実構造物と同一条件</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 暴露期間が数年以上かかる可能性がある</li> <li>・ ひび割れの位置や量をコントロールしづらい</li> </ul>       |
| 電食実験 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 暴露に近いひび割れ性状</li> </ul>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ひび割れの位置や量をコントロールしづらい</li> <li>・ 鉄筋に貼付されたひずみゲージが損傷する恐れがある</li> </ul> |
| スリット | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ひび割れの位置や量をコントロールできる</li> <li>・ 実験が容易である</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実際のひび割れとの関連性が不明である</li> </ul>                                       |

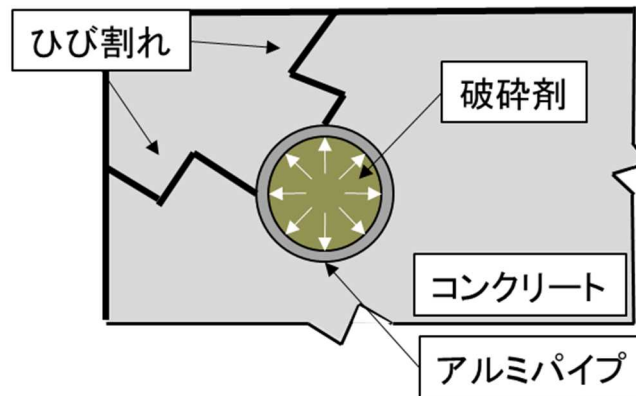


図 1.3.1 破砕剤充填パイプのメカニズム

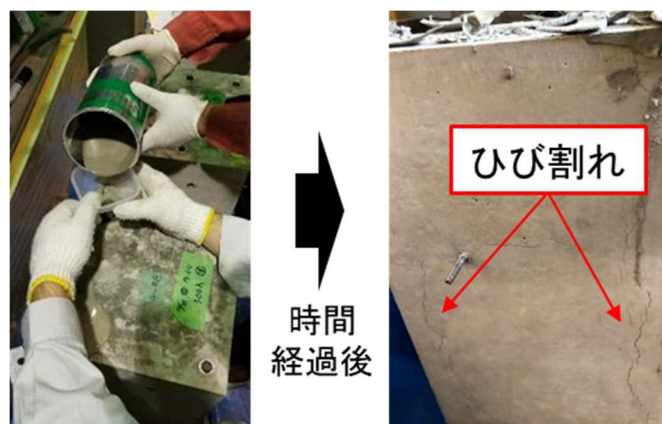


図 1.3.2 破砕剤充填パイプによるひび割れの例



## 第2章 曲げ降伏先行型試験体の曲げせん断実験

### 2.1 はじめに

腐食ひび割れは主筋とコンクリート間の付着性能を劣化させると考えられる。既往研究<sup>[1]</sup>では、暴露期間の増大に伴って、部材の曲げ耐力および曲げ降伏後の靱性の低下が報告されている。曲げ耐力および曲げ降伏後の靱性の低下は、いずれも鉄筋腐食がもたらす鉄筋自体の断面減少による負担荷重の低下が要因とされ、腐食ひび割れによる影響についての明確な記述はない。一方で、電食実験により鉄筋腐食を模擬した RC 梁の繰返し載荷実験<sup>[9]</sup>では、鉄筋腐食による主筋の付着性能劣化が曲げ変形の局所化を引き起こし曲げ耐力に影響を及ぼすこと、および主筋の付着性能劣化が部材の靱性に影響を及ぼすことが指摘されている。

本章では、腐食ひび割れが RC 部材の曲げ性状および曲げ降伏後の靱性に及ぼす影響を検討することを目的とする。はじめに加力試験体と同一の断面を有するひび割れ導入実験試験体により、破砕剤充填パイプによって発生するひび割れの観察およびひび割れ性状の確認を実施した。続いて、破砕剤充填パイプによってひび割れを生じさせた試験体の曲げせん断加力実験を実施し、腐食ひび割れが RC 部材の加力時ひび割れ状況、荷重－変形関係、剛性、耐力およびエネルギー吸収性能に及ぼす影響を検討した。

## 2.2 破砕剤充填パイプによるひび割れ導入実験

### 2.2.1 実験概要

試験体一覧を表 2.2.1 に、試験体配筋を図 2.2.1 に示す。試験体は全 4 体である。試験体断面は幅  $b \times$  せい  $D$  を  $220\text{mm} \times 420\text{mm}$  とした。試験体の四隅に外径  $22\text{mm}$ 、肉厚  $1\text{mm}$  のアルミパイプを配置し、断面上部と下部に異形鉄筋 D19 を 2 本配置した。試験体両端部は肋筋 (D10@60) を配し補強した。試験体長を  $840\text{mm}$ 、 $1260\text{mm}$  の 2 種とし、 $1260\text{mm}$  は後述する逆対称曲げせん断実験試験体の内法スパンと同一とした。コンクリートには、目標強度を  $18\text{MPa}$  とした最大骨材寸法  $20\text{mm}$  の普通コンクリートを使用した。

ひび割れ状況を目視およびクラックスケールで確認した S シリーズ試験体、ひび割れ発生箇所を設置した  $\pi$  型変位計によりひび割れ幅を計測した P シリーズ試験体の合計 4 体の実験を実施した。試験体は脱型後材齢 4 週時に建て起こし、パイプの上部から静的破砕剤を充填して静置した状態でひび割れの観察、測定を行った。静的破砕剤の材齢は、S シリーズでは 54 日、P-126 では 68 日、P-84 では 97 日である。破砕剤充填時にはいずれの試験体においても上端筋位置では  $0.2\text{mm}$  程度の沈みひび割れが見られた。なお、材齢 52 日および 66 日におけるコンクリートの圧縮強度の平均は  $26.1\text{MPa}$  であった。

S シリーズでは、肋筋のない試験体中央部を 3 等分し、それぞれの区間でアルミパイプに沿って生じたひび割れについてクラックスケールを用いてひび割れ幅を計測した。P シリーズでは、 $\pi$  型変位計を 1 つのひび割れについて試験体をおおよそ 3 分割する位置に 2 ヶ所、表裏上端下端筋位置の計 8 ヶ所に取り付けて、ひび割れ幅の計測を行った (図 2.2.2)。

表 2.2.1 ひび割れ導入実験試験体一覧

| 試験体名  | ひび割れ計測方法          | 試験体長(mm) |
|-------|-------------------|----------|
| S-84  | 目視および<br>クラックスケール | 840      |
| S-126 |                   | 1260     |
| P-84  | $\pi$ 型変位計        | 840      |
| P-126 |                   | 1260     |

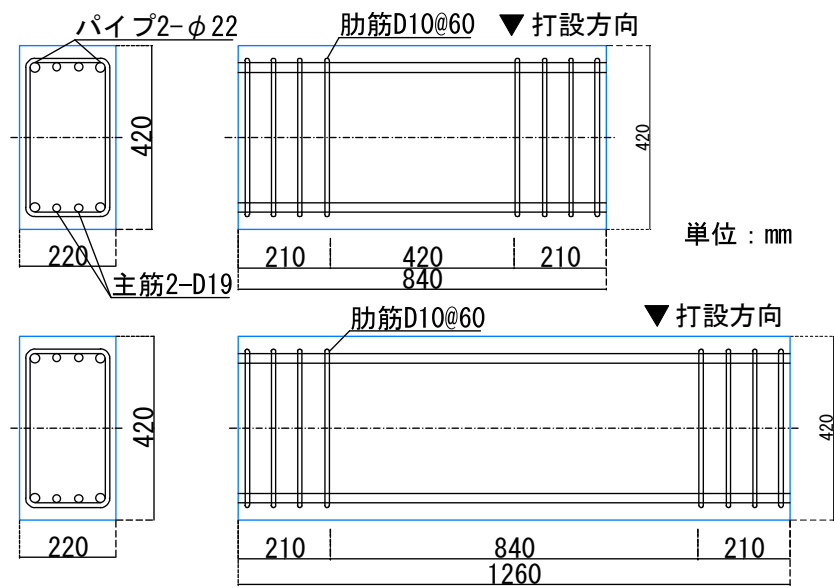


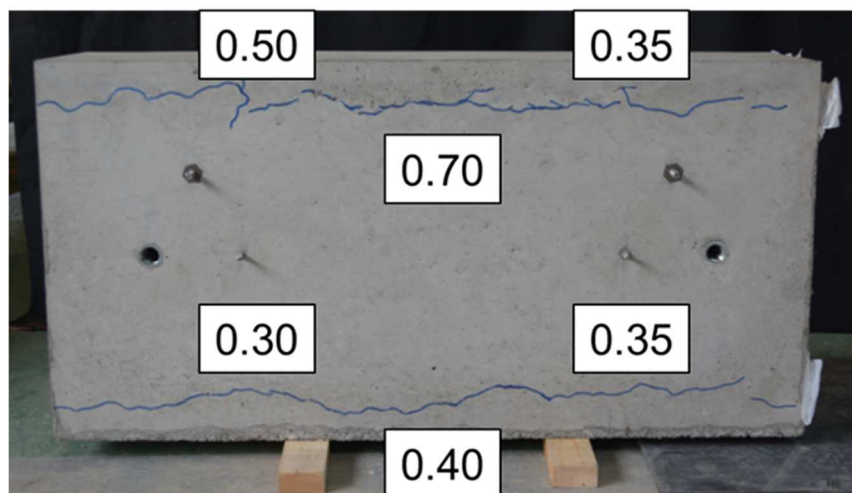
図 2.2.1 ひび割れ導入実験試験体配筋図



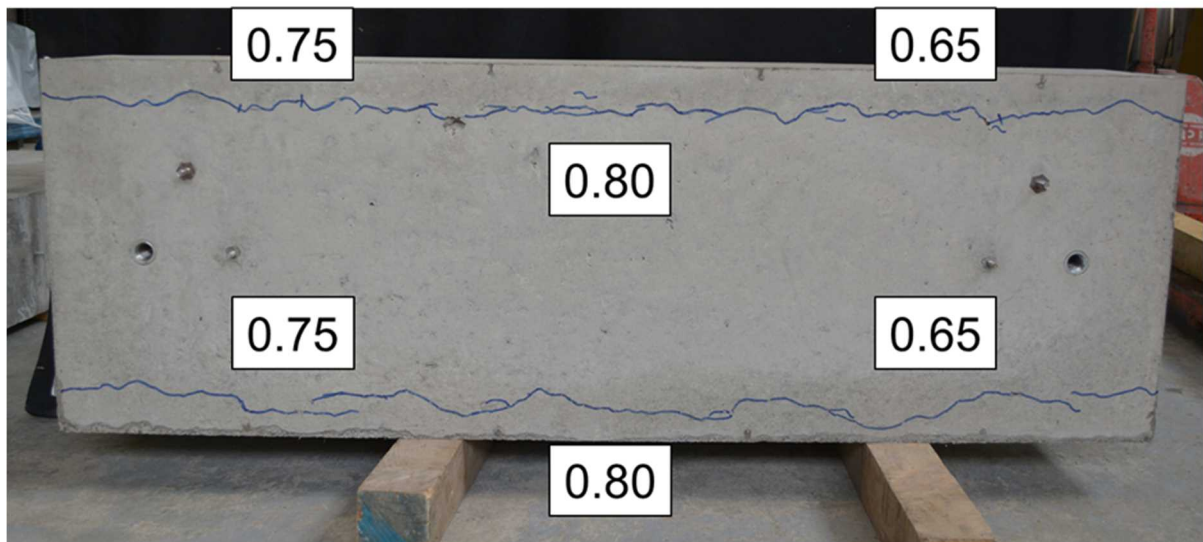
図 2.2.2 変位計設置状況

### 2.2.2 実験結果

破砕剤を充填してから 300 時間経過後の試験体のひび割れ発生状況を図 2.2.3 に示す。図中の値はそれぞれの区間で計測したひび割れ幅のうち最大となる値を示した。いずれの試験体も破砕剤の充填によって、パイプに沿ったひび割れが生じた。試験長が長い試験体では上端筋と下端筋でひび割れ幅にほとんど違いがみられなかった。試験長が短い試験体では、下端筋よりも上端筋の位置でひび割れ幅が大きくなった。上端筋位置でのコンクリートの沈降による沈みひび割れの影響であると考えられる。



S-84 (単位：mm)



S-126 (単位：mm)

図 2.2.3 破砕剤充填から 300 時間経過後の試験体

S-84 および S-126 試験体ではひび割れ幅を計測後、試験体中央部で切断し断面を観察した。それぞれの試験体の切断面を図 2.2.4 に示す。いずれの試験体も破砕剤充填パイプによって、試験体内部にもひび割れが発生していることがわかった。S-84 では上下端筋ともにサイドスプリット型のひび割れが生じた。S-126 では上端筋でサイドスプリット型、下端筋でコーナースプリット型のひび割れが生じた。



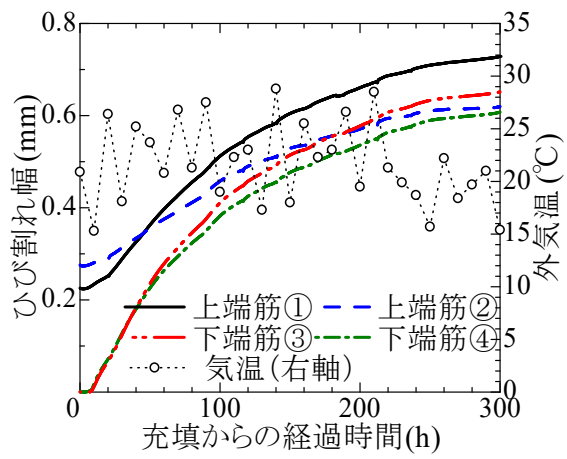
S-84



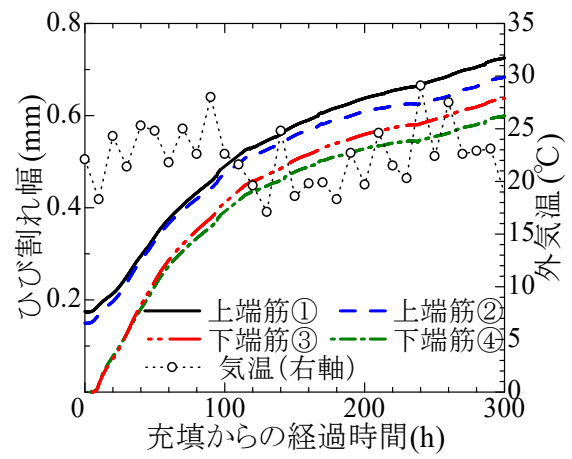
S-126

図 2.2.4 試験体中央部の切断面

P シリーズ試験体における、破砕剤充填から 300 時間経過までのひび割れ幅の計測結果を図 2.2.5 に示す。グラフには同一主筋位置で計測した 2 つの  $\pi$  型変位計による計測値の平均値をプロットした。なお、図 2.2.5 に示す気温は、気象庁地域気象観測システム（アメダス）つくば観測所による 10 時間ごとのデータである。上端筋には沈みひび割れが発生していたため、破砕剤充填時にクラックスケールで計測したひび割れ幅から測定を開始した。破砕剤充填からおよそ 50 時間までにひび割れ幅が大きく増大する傾向が見られ、特に下端筋位置においてグラフの勾配が大きい。沈みひび割れが発生していた上端筋よりも下端筋位置でコンクリートが密に充填されており、破砕剤による膨張圧の影響を大きく受けたためと考えられる。気温の影響は明瞭ではなく、また試験体長の違いによる影響も大きくなかった。



P-84



P-126

▼ 打設方向

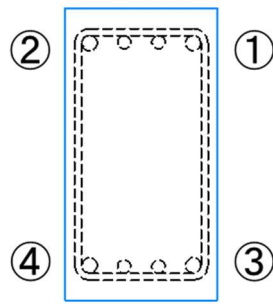


図 2.2.5 ひび割れ幅－経過時間関係



## 2.3 実験概要

### 2.3.1 試験体概要

曲げ降伏先行型試験体の一覧を表 2.3.1 に、試験体配筋を図 2.3.1 に示す。試験体は全 3 体である。断面はひび割れ導入実験試験体と同一であり、幅  $b \times$  せい  $D$  は  $220\text{mm} \times 420\text{mm}$  である。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  $1260\text{mm}$  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  $18\text{MPa}$  で、変動因子は破砕剤によって生じる目標最大ひび割れ幅とした。加力前目標ひび割れ幅の設定は腐食ひび割れ幅－付着強度比関係<sup>[2]</sup>を参考にし、付着強度比が 70%以上である  $0.2\text{mm}$  以下 (Lv.1)、同 30～70%の  $0.2\text{mm} \sim 0.8\text{mm}$  (Lv.2) および 30%以下となる  $0.8\text{mm}$  超 (Lv.3) 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流し込んだ。

表 2.3.1 曲げ降伏先行型試験体一覧

| 試験体名    | 共通事項                                                                | 加力前目標ひび割れ幅                                     |
|---------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| BF-Lv.1 | 主筋：SD345(D19)<br>せん断補強筋：SD295A(D10)<br>せん断スパン比：1.5<br>せん断補強筋比：0.32% | $\omega_{cr} \leq 0.2\text{mm}$                |
| BF-Lv.2 |                                                                     | $0.2\text{mm} < \omega_{cr} \leq 0.8\text{mm}$ |
| BF-Lv.3 |                                                                     | $0.8\text{mm} < \omega_{cr}$                   |

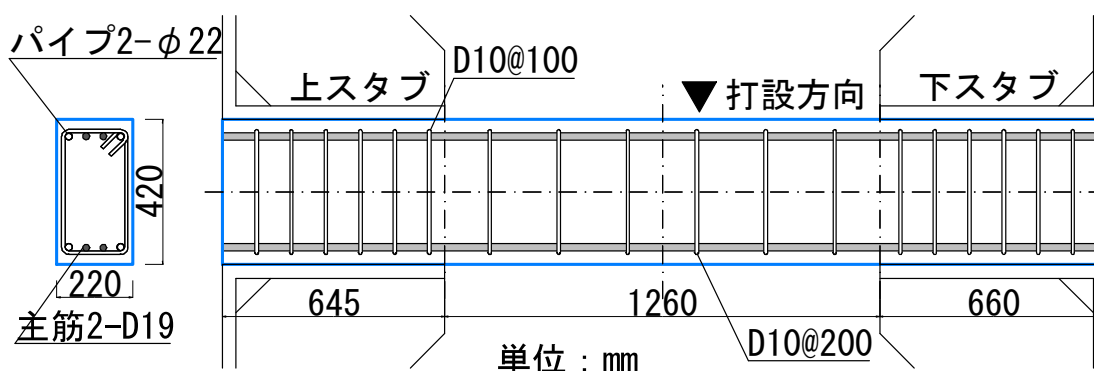


図 2.3.1 曲げ降伏先行型試験体配筋図

ひび割れ発生を考慮しない場合の耐力計算結果を表 2.3.2 に示す。試験体は、部材の曲げ性状および付着割裂性状の確認のため、曲げ降伏後に付着割裂破壊が起こるように設計した。曲げ強度の計算には梁の終局曲げ強度略算式<sup>[10]</sup>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」<sup>[11]</sup>によるせん断強度式 A 法で算出した。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」<sup>[3]</sup>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。曲げ強度算出においては破砕剤充填パイプの負担荷重はないものとした。付着強度算出においては、サイドスプリット型の割裂線長さ比を求める際に主鉄筋を一段に並ぶ鉄筋とパイプの総和とし、せん断信頼強度を求める際にはパイプの負担付着力はないものとした。

表 2.3.2 曲げ降伏先行型試験体の耐力計算結果

| 曲げ強度<br>$Q_{Mu}$ (kN) | せん断強度<br>$V_u$ (kN) | 付着耐力<br>$V_{bu}$ (kN) | せん断余裕度<br>$V_u/Q_{Mu}$ | 付着余裕度<br>$V_{bu}/Q_{Mu}$ |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| 111                   | 220                 | 179                   | 1.99                   | 1.62                     |

(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  
 $\sigma_y$  : 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）

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

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  
 $\sigma_{wy}$  : せん断補強筋の降伏強度  
 $\phi$  : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度  
 $\quad = \min\{2.0, j_t/(D \cdot \tan \theta), \sqrt{\nu \cdot \sigma_B / (p_w \cdot \sigma_{wy})} - 1.0\}$   
 $\theta$  :  $\tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$   
 $\beta$  :  $= (1 + \cot^2 \varphi) p_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B$   
 $D$  : 梁せい  
 $L$  : 内法スパン  
 $\nu$  :  $\nu_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$  ( $\sigma_B$  の単位は  $\text{kgf/cm}^2$ )  
 $\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度

(3) 付着耐力（靱性保証型指針式）

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

$$T_x = \tau_{bu} \sum \psi_1 \quad (2-4)$$

ここで、

$V_{bu}$  : 付着耐力  
 $T_x$  : 付着強度  
 $j_e$  : トラス機構に関与する有効せい  
 $\nu$  :  $\nu_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$  ( $\sigma_B$  の単位は  $\text{kgf/cm}^2$ )



|                |                                            |
|----------------|--------------------------------------------|
| $\sigma_B$     | : コンクリート圧縮強度                               |
| $\lambda$      | : 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                                      |
| $\theta$       | : $\tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$ |
| $L$            | : 内法スパン                                    |
| $\tau_{bu}$    | : 主筋の付着信頼強度                                |
| $\Sigma\psi_l$ | : 主筋の周長の合計                                 |

## 2.3.2 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 2.3.3 に示す。

表 2.3.3 曲げ降伏先行型試験体におけるコンクリートの調合表

| $W/C$<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |      | 備考 |
|--------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|----|
|              | $C$                      | $W$ | $S$ | $G$ | $Ad$ |    |
| 78.5         | 245                      | 192 | 942 | 852 | 2.45 |    |

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。試験体の加力期間の前後で材料試験を行った。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 2.3.4 に、本実験における検討用コンクリート強度を表 2.3.5 に示す。検討用コンクリート強度は、加力期間前後の試験結果の平均値とした。

表 2.3.4 曲げ降伏先行型試験体におけるコンクリートの材料試験結果

| 材齢   | 番号 | 圧縮強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(GPa) | 割裂強度<br>(MPa) | 備考 |
|------|----|---------------|---------------|---------------|----|
| 49 日 | 1  | 23.2          | 19.0          | 2.14          |    |
|      | 2  | 22.8          | 19.2          | 2.14          |    |
|      | 3  | 23.8          | 19.3          | 2.49          |    |
|      | 平均 | 23.3          | 19.2          | 2.25          |    |
| 69 日 | 4  | 24.5          | 19.4          | 2.33          |    |
|      | 5  | 24.0          | 19.2          | 2.20          |    |
|      | 6  | 24.6          | 19.9          | 2.33          |    |
|      | 平均 | 24.3          | 19.5          | 2.29          |    |

表 2.3.5 曲げ降伏先行型試験体における検討用コンクリート強度

| 目標強度  | 圧縮強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(GPa) | 割裂強度<br>(MPa) |
|-------|---------------|---------------|---------------|
| 18MPa | 23.8          | 19.4          | 2.27          |

(2) 異形鉄筋

主筋には異形鉄筋 D19 (SD345)、せん断補強筋には異形鉄筋 D10 (SD295A) を用いた。引張試験結果を表 2.3.6 に、応力－ひずみ関係を図 2.3.2 に示す。

表 2.3.6 曲げ降伏先行型試験体における鉄筋の引張試験結果

| 鉄筋            | 番号 | 降伏強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(GPa) | 降伏ひずみ<br>(%) | 引張強度<br>(MPa) | 破断伸び<br>(%) | 備考     |
|---------------|----|---------------|---------------|--------------|---------------|-------------|--------|
| D19<br>SD345  | 1  | 364           | 196           | 0.20         | 531           | 24.8        |        |
|               | 2  | 369           | 194           | 0.19         | 531           | 25.2        |        |
|               | 3  | 370           | 195           | 0.19         | 541           | 26.2        |        |
|               | 平均 | 366           | 195           | 0.19         | 535           | 25.4        |        |
| D10<br>SD295A | 1  | 343           | 191           | 0.21         | 509           | 26.8        |        |
|               | 2  | 360           | 186           | 0.22         | 536           | 27.7        |        |
|               | 3  | 352           | 189           | 0.22         | 530           | 21.1        | 標点間外破断 |
|               | 平均 | 349           | 190           | 0.22         | 525           | 25.2        |        |

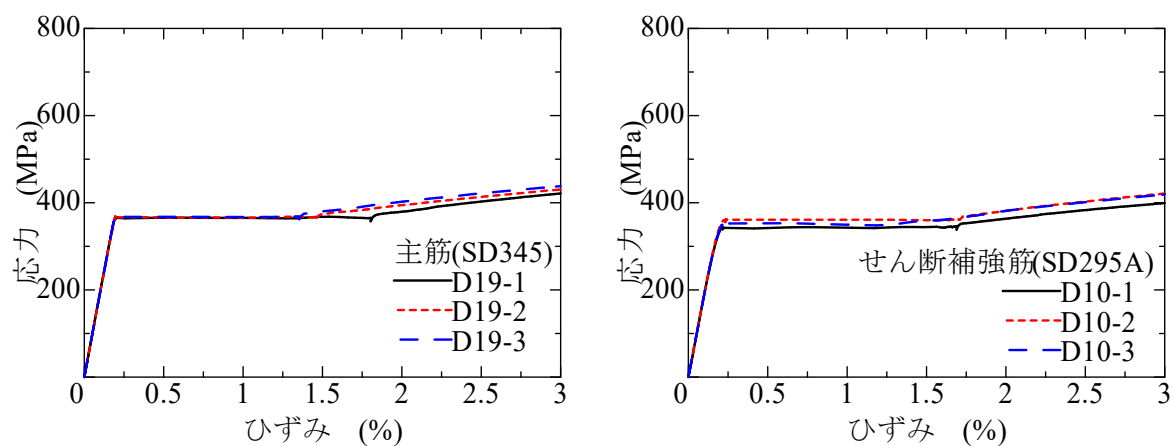


図 2.3.2 曲げ降伏先行型試験体における鉄筋の応力－ひずみ関係

### (3) アルミパイプ

破砕剤充填用パイプには外径 22mm、肉厚 1mm のアルミパイプを用いた。アルミパイプ単体の引張試験結果を表 2.3.7 に、応力－ひずみ関係を図 2.3.3 に示す。なお、降伏強度は 0.2% オフセット耐力とした。

表 2.3.7 曲げ降伏先行型試験体における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     |
|----------------|----|------------|------------|------------|----------|-------|--------|
| φ22mm<br>t=1mm | 1  | 171        | 58.4       | 194        | 6.25     | -     | 標点間外破断 |
|                | 2  | 181        | 61.5       | 202        | 6.24     | 0.329 | 標点間外破断 |
|                | 3  | 177        | 61.8       | 200        | 5.56     | 0.328 | 標点間外破断 |
|                | 平均 | 176        | 60.6       | 199        | 6.02     | 0.329 |        |

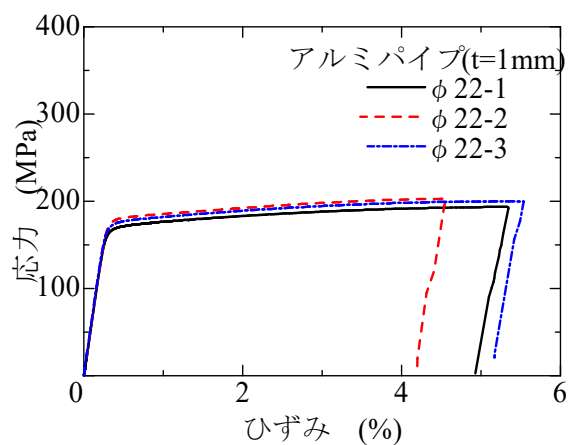
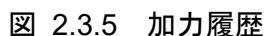


図 2.3.3 曲げ降伏先行型試験体におけるアルミパイプの応力－ひずみ関係

加力装置を図 2.3.4 に、加力履歴を図 2.3.5 に示す。加力方法は建研式加力で試験体を縦に起こして端部を鋼製アングルで固定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。



### 2.3.4 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 2.3.6 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 2.3.7 に示す。主筋およびアルミパイプは危険断面位置、せん断補強筋は梁側面中央部に貼付した。

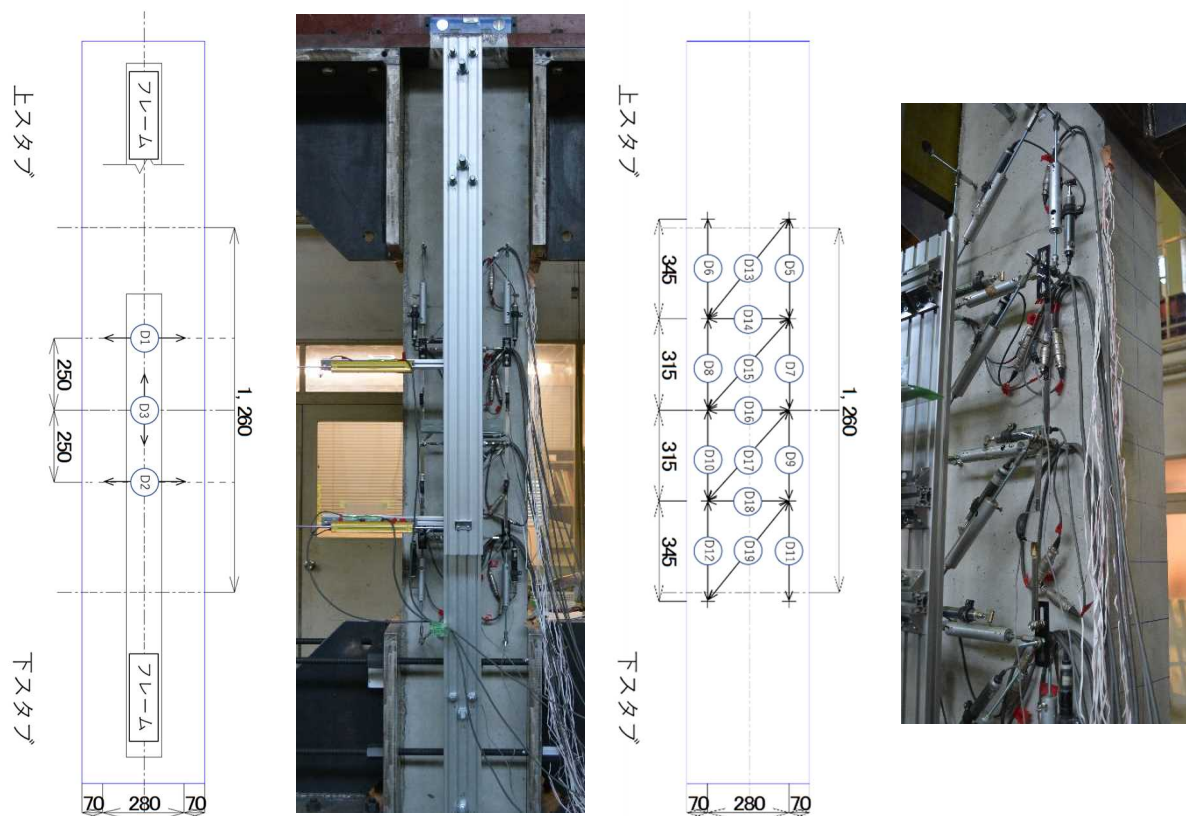


図 2.3.6 変位計設置位置（単位：mm）

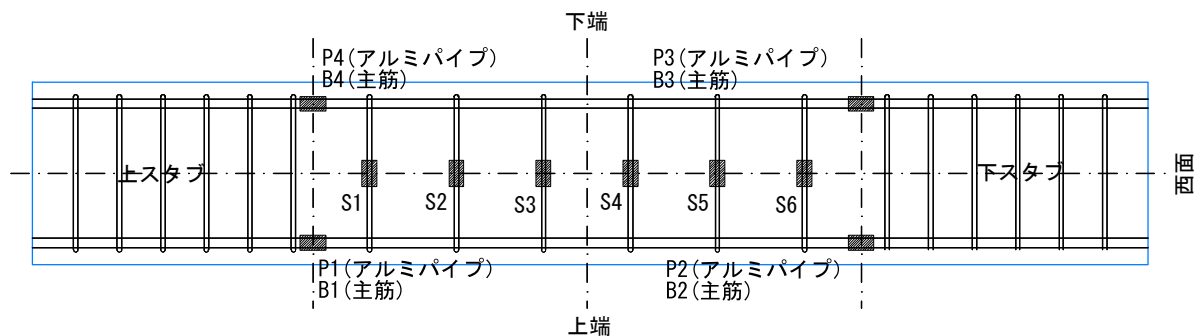


図 2.3.7 曲げ降伏先行型試験体のひずみゲージ貼付位置

## 2.4 実験結果

### 2.4.1 試験体破壊状況

加力前のひび割れ状況、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 2.4.1、図 2.4.2 および図 2.4.3 に示す。図中の左側が試験体配筋における下スタブ、右側が上スタブに該当する。以降に、各試験体の実験時ひび割れ状況を述べる。

### BF-Lv.1

破砕剤充填パイプによって、最大で 0.05mm 幅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付着割裂ひび割れが拡大して最終破壊に至った。加力終了後に試験体の観察を行ったところ、危険断面位置付近でパイプの破断が見られた。

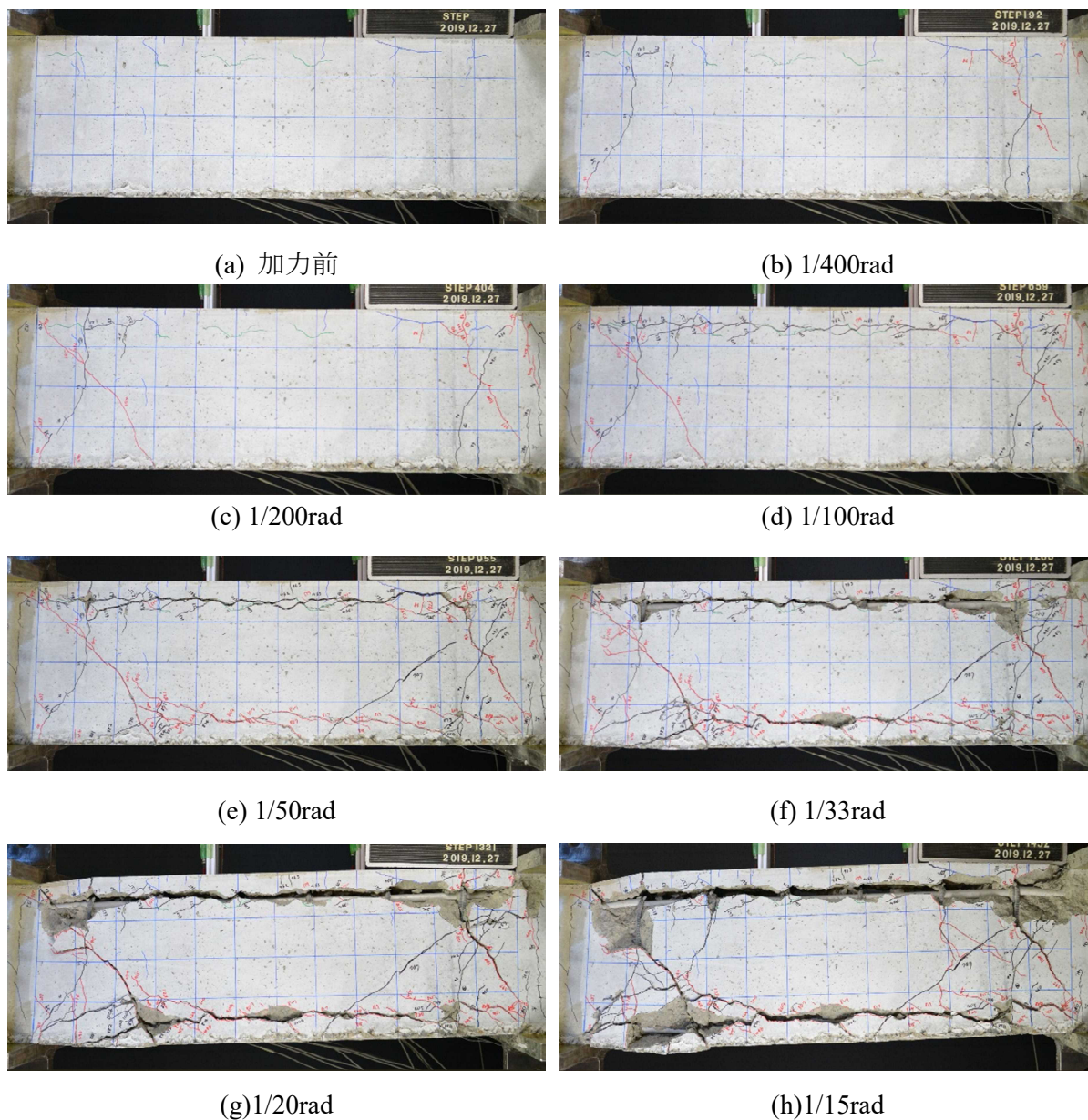
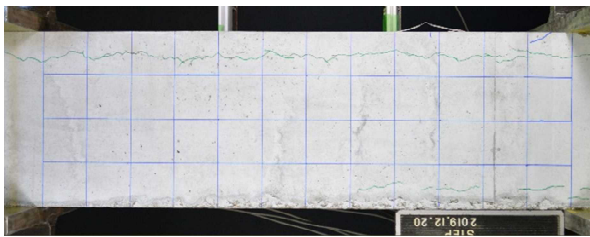


図 2.4.1 曲げ降伏先行型試験体のひび割れ状況 (BF-Lv.1)

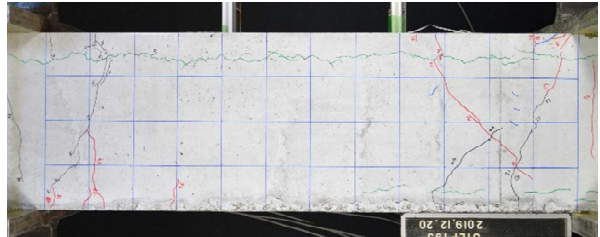


## BF-Lv.2

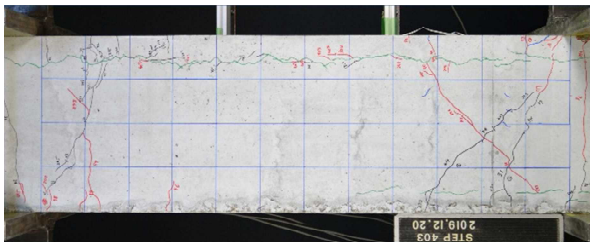
破砕剤充填パイプによって、最大で 0.4mm 幅のひび割れが発生した。正加力時部材角  $1/400\text{rad}$  に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角  $1/200\text{rad}$  に至る過程で上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、部材角  $1/100\text{rad}$  に至る過程で曲げせん断ひび割れ、下端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。曲げせん断ひび割れと付着割裂ひび割れが拡大して最終破壊に至った。加力終了後に試験体の観察を行ったところ、危険断面位置付近でパイプの座屈および破断が見られた。



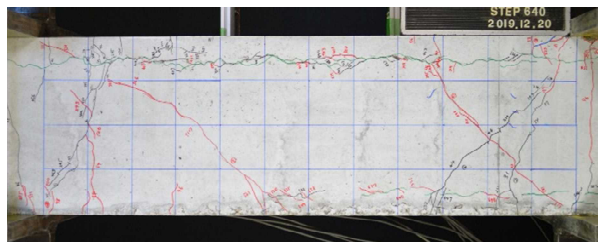
(a) 加力前



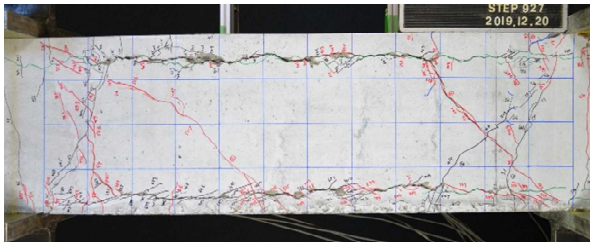
(b)  $1/400\text{rad}$



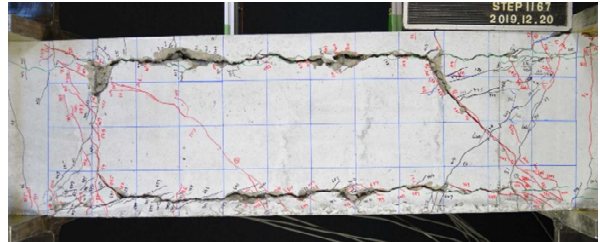
(c)  $1/200\text{rad}$



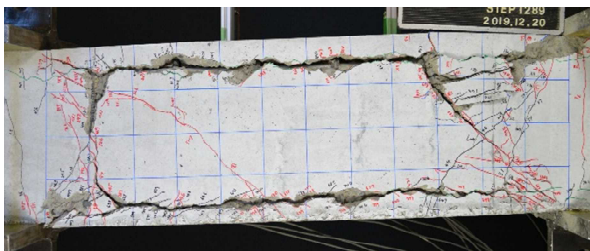
(d)  $1/100\text{rad}$



(e)  $1/50\text{rad}$



(f)  $1/33\text{rad}$



(g)  $1/20\text{rad}$

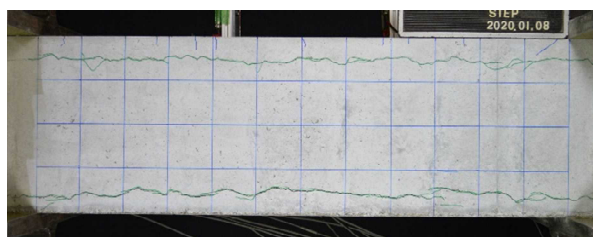


(h)  $1/15\text{rad}$

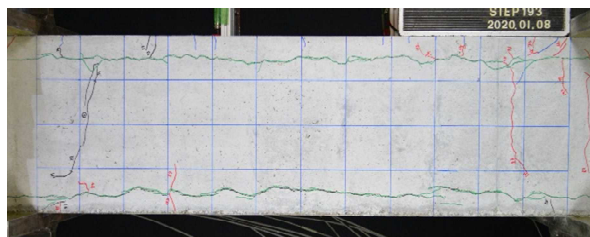
図 2.4.2 曲げ降伏先行型試験体のひび割れ状況 (BF-Lv.2)

### BF-Lv.3

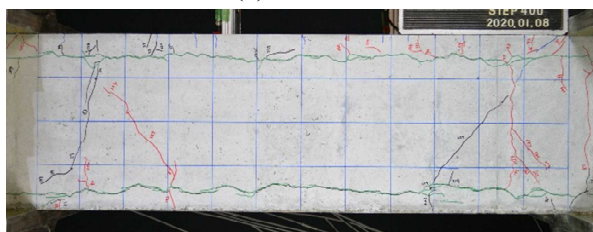
破砕剤充填パイプによって、最大で 1.6mm 幅のひび割れが発生した。正加力時部材角  $1/400\text{rad}$  に至る過程で曲げひび割れが発生した。部材角  $1/200\text{rad}$  に至る過程で、曲げせん断ひび割れと上端筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。加力前ひび割れ幅が 0.8mm を超える区間では、新たな付着割裂ひび割れは発生せず、加力前ひび割れの拡幅がみられた。加力終了後に試験体の観察を行ったところ、危険断面位置付近でパイプの破断が見られた。



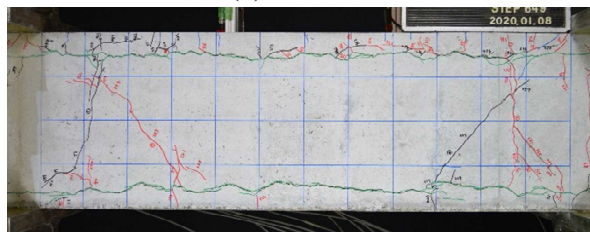
(a) 加力前



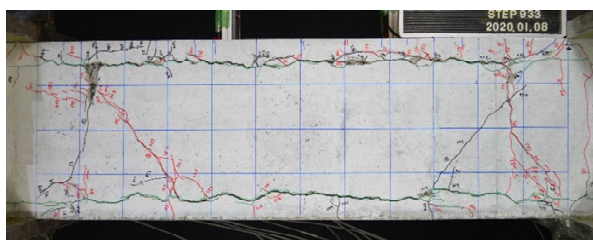
(b)  $1/400\text{rad}$



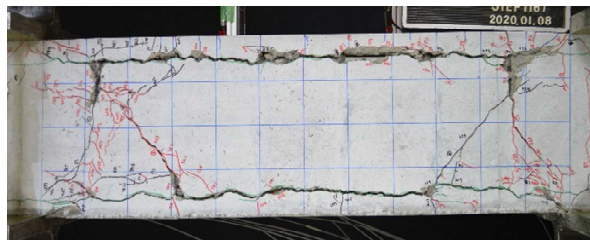
(c)  $1/200\text{rad}$



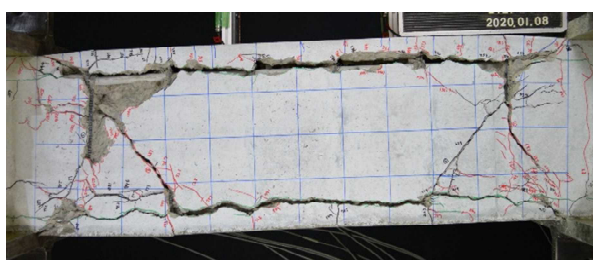
(d)  $1/100\text{rad}$



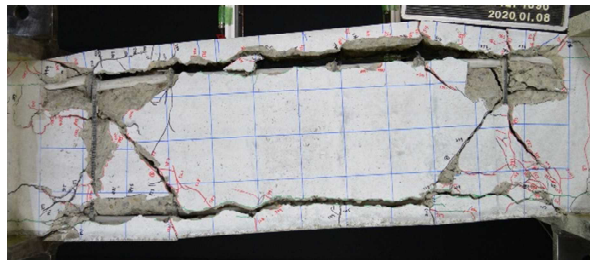
(e)  $1/50\text{rad}$



(f)  $1/33\text{rad}$



(g)  $1/20\text{rad}$



(h)  $1/15\text{rad}$

図 2.4.3 曲げ降伏先行型試験体のひび割れ状況 (BF-Lv.3)



### 2.4.2 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 2.4.4 に示す。直線は曲げ強度計算値を示す。以下に、各試験体の状況を述べる。

#### BF-Lv.1

正加力時部材角  $1/100\text{rad}$  に至る過程で、最大耐力  $139\text{kN}$  に達した。負加力時も同サイクルで最大耐力  $121\text{kN}$  に達した。部材角  $1/50\text{rad}$  まで耐力低下がなかったことから、曲げ降伏が先行したと考えられる。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、主筋の滑りによる逆 S 字型の履歴が顕著に表れた。

#### BF-Lv.2

正加力時部材角  $1/100\text{rad}$  に至る過程で、最大耐力  $141\text{kN}$  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  $118\text{kN}$  に達した。BF-Lv.1 と同様に曲げ降伏が先行し付着割裂破壊が起こったと考えられる。逆 S 字型の履歴も BF-Lv.1 と同様にみられた。

#### BF-Lv.3

正加力時部材角  $1/50\text{rad}$  に至る過程で、最大耐力  $132\text{kN}$  に達した。負加力時も同加力サイクルで最大耐力  $115\text{kN}$  に達した。その後、耐力一定の区間はなく、すぐに耐力が低下した。BF-Lv.1、BF-Lv.2 と最大耐力の差が大きいことから、曲げ降伏後ただちに付着割裂破壊が起こったと考えられる。逆 S 字型の履歴は他の試験体と同様な傾向がみられた。

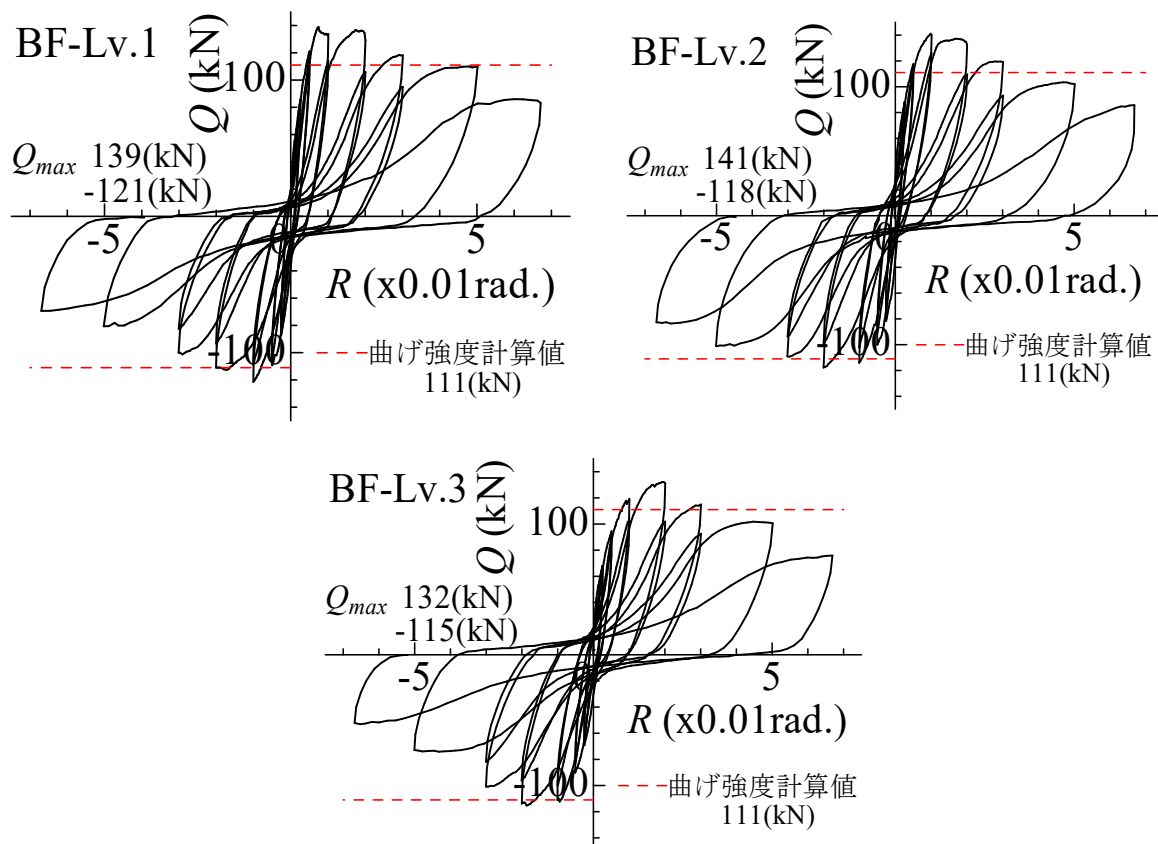


図 2.4.4 曲げ降伏先行型試験体のせん断力一部材角関係

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 2.4.1 に示す。加力前ひび割れ幅の違いは、最大耐力に大きな影響を及ぼさなかった。各試験体は引張鉄筋の降伏によって最大耐力に達したため、加力前ひび割れ幅は最大耐力に影響を及ぼさないと考えられる。加力前ひび割れ幅の増大に伴って、最大耐力時の部材角が増大する傾向がみられた。主筋の付着劣化により滑りが増大し、危険断面位置における曲げひび割れの開口や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 2.4.1 曲げ降伏先行型試験体の最大耐力実験結果

| 試験体     | 正側<br>最大耐力<br>(kN) | 正側<br>最大耐力時の<br>部材角<br>( $\times 0.01\text{rad}$ ) | 負側<br>最大耐力<br>(kN) | 負側<br>最大耐力時の<br>部材角<br>( $\times 0.01\text{rad}$ ) | 正負平均<br>最大耐力<br>(kN) | 正負平均<br>部材角<br>( $\times 0.01\text{rad}$ ) |
|---------|--------------------|----------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------|
| BF-Lv.1 | 139                | 0.75                                               | 121                | 0.98                                               | 130                  | 0.87                                       |
| BF-Lv.2 | 141                | 0.98                                               | 118                | 2.01                                               | 130                  | 1.50                                       |
| BF-Lv.3 | 132                | 1.95                                               | 115                | 1.91                                               | 124                  | 1.93                                       |

### 2.4.3 主筋およびせん断補強筋ひずみ

各試験体の部材角－主筋ひずみ関係および  $1/50\text{rad}$  時までのせん断補強筋ひずみ分布を図 2.4.5～図 2.4.10 に示す。以降に、各試験体のひずみ状況を述べる。

## BF-Lv.1

主筋ひずみについて、正側加力時に引張側となる B1 と B3 (図中黒実線) が部材角  $1/100\text{rad}$  時に降伏に達した。負加力時に引張側となる B2 (図中赤一点鎖線) が部材角  $-1/50\text{rad}$  時に降伏に達した。部材角  $1/50\text{rad}$  および  $-1/50\text{rad}$  時にせん断補強筋の一部が降伏した。

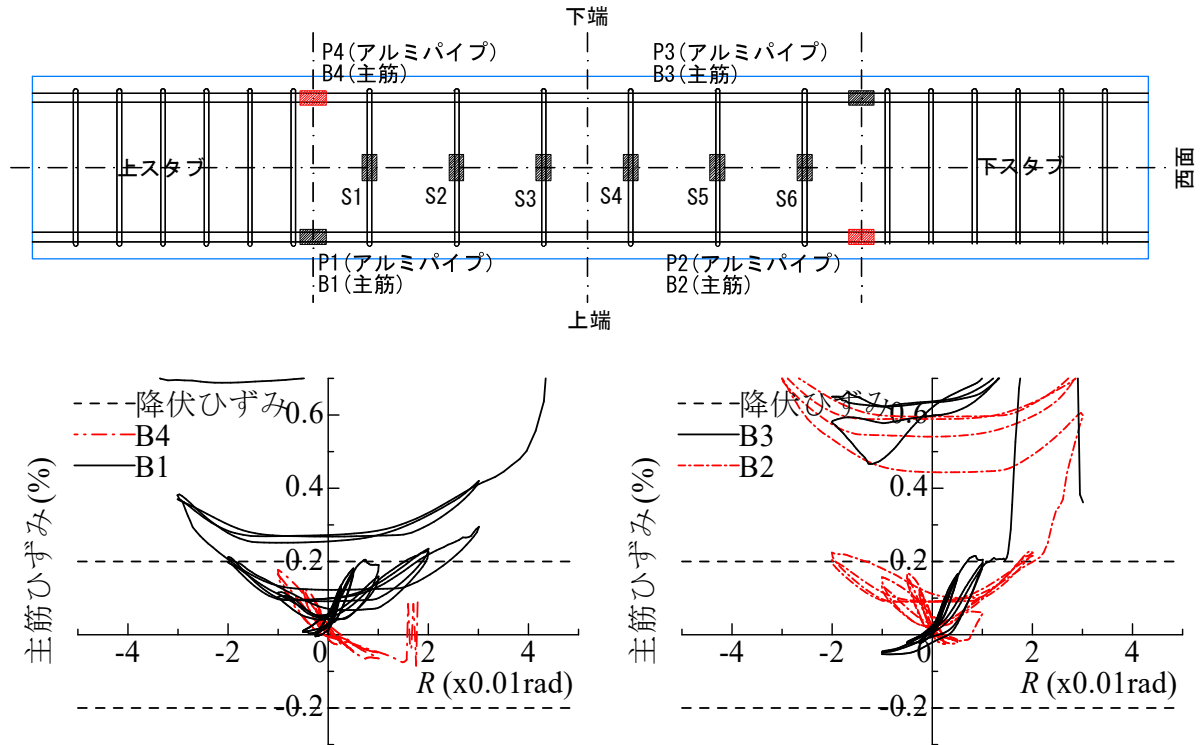


図 2.4.5 BF-Lv.1 部材角—主筋ひずみ関係

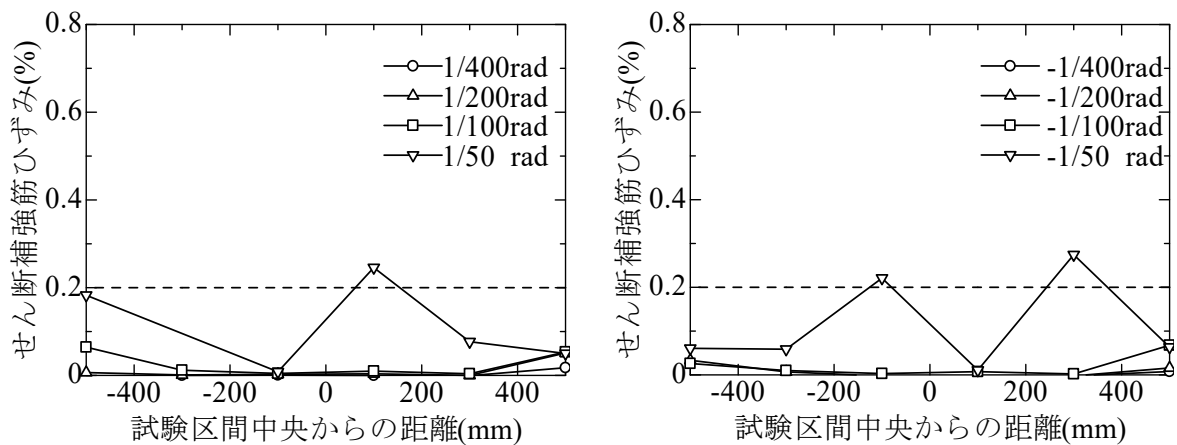


図 2.4.6 BF-Lv.1 せん断補強筋ひずみ分布

## BF-Lv.2

主筋ひずみについて、BF-Lv.1 と同様に正加力時に引張側となる B3（図中黒実線）が部材角  $1/100\text{rad}$  時に、B1 が部材角  $1/50\text{rad}$  時に降伏に達した。負加力時に引張側となる B4（図中赤一点鎖線）が部材角  $-1/50\text{rad}$  時に降伏に達した。正側加力時にはせん断補強筋の降伏はみられなかったが、 $-1/50\text{rad}$  時に一部が降伏した。

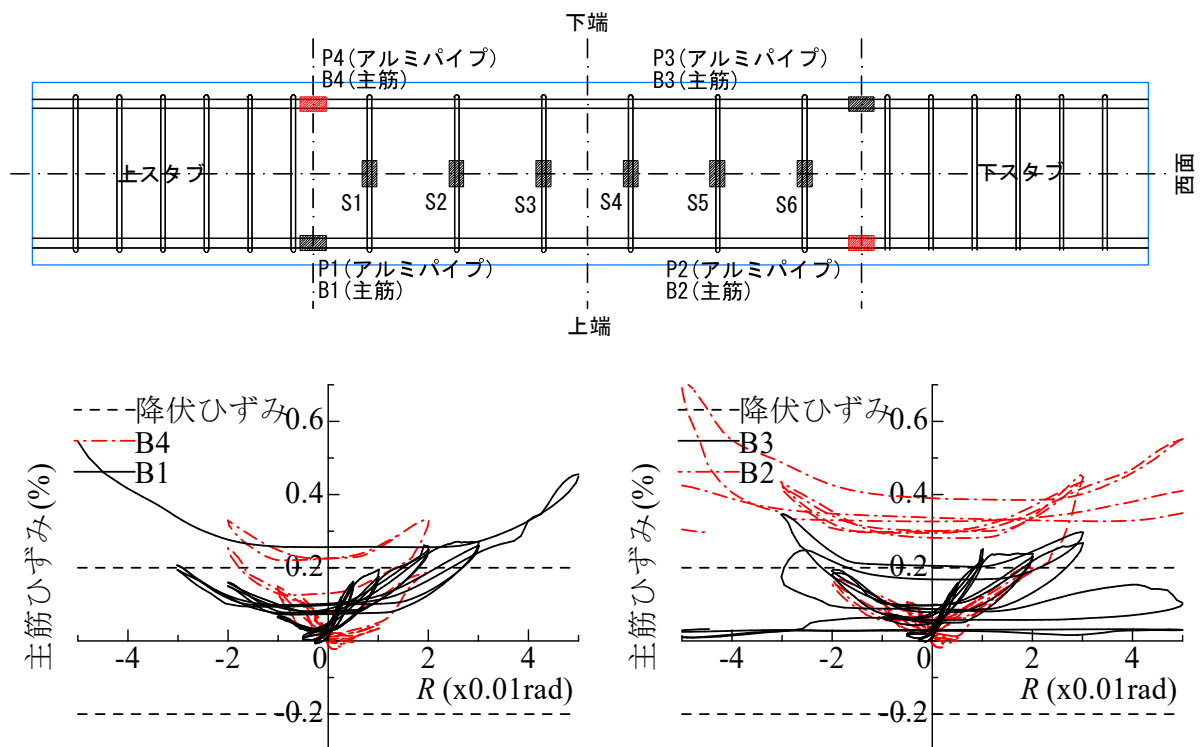


図 2.4.7 BF-Lv.2 主筋ひずみ

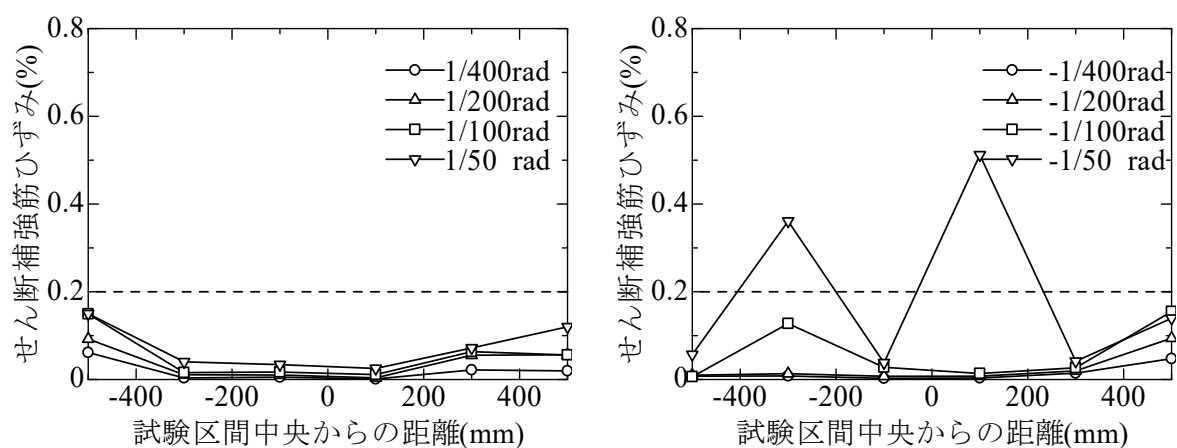


図 2.4.8 BF-Lv.2 せん断補強筋ひずみ分布

### BF-Lv.3

主筋ひずみについて、正加力時に引張側となる B1 と B3 (図中黒実線) が部材角  $1/50\text{rad}$  時に降伏に達した。負加力時に引張側となる B2 と B4 (図中赤一点鎖線) が部材角  $-1/50\text{rad}$  時に降伏に達した。正側加力時にはせん断補強筋の降伏はみられなかったが、 $-1/50\text{rad}$  時に一部が降伏した。

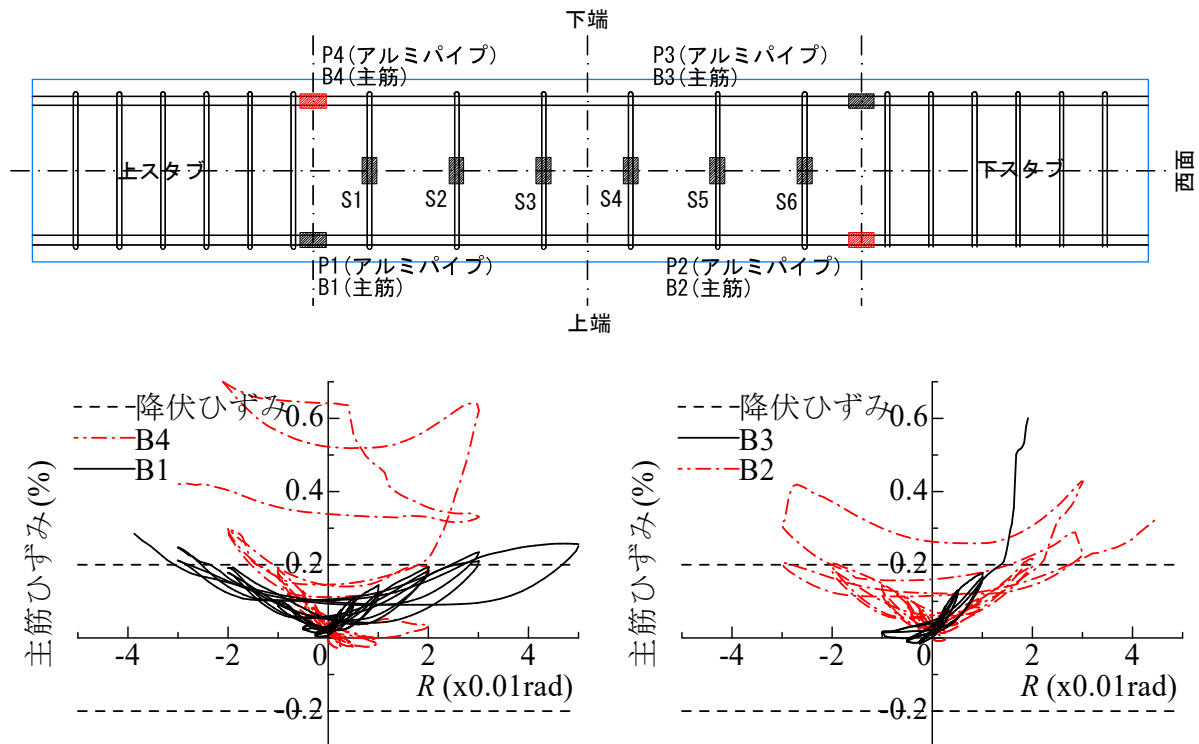


図 2.4.9 BF-Lv.3 主筋ひずみ

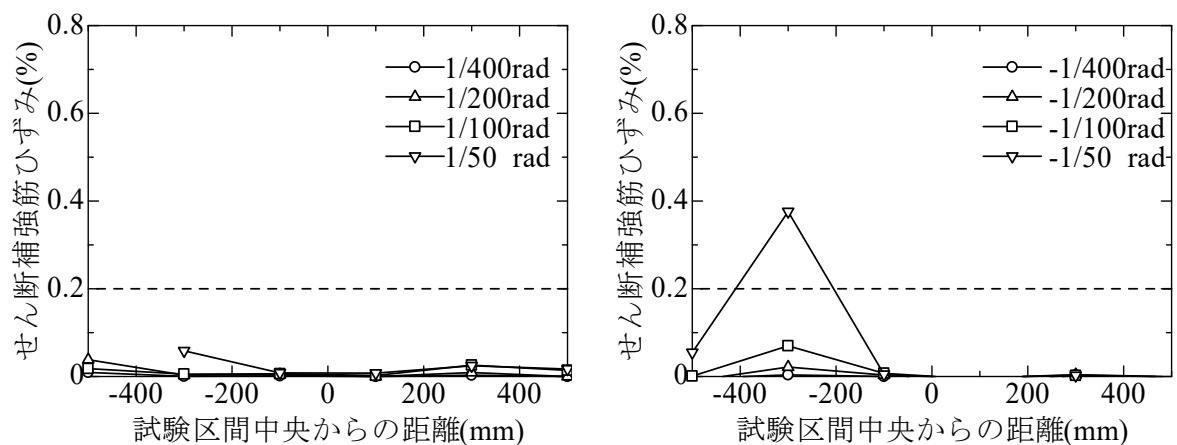


図 2.4.10 BF-Lv.3 せん断補強筋ひずみ分布



#### 2.4.4 包絡線の比較

各試験体の包絡線を図 2.4.11 に示す。左図は部材角 1/50rad まで、右図は加力終了時までの全体の包絡線を示す。部材角 1/100rad までの包絡線を比較すると、BF-Lv.3 は BF-Lv.1、BF-Lv.2 に比べて剛性低下の割合が顕著に大きいことがわかる。主筋の付着劣化によるものと考えられる。部材角 1/100rad から 1/33rad において、BF-Lv.2 の耐力低下の割合が小さくなる傾向がみられた。既往の研究<sup>[2]</sup>によると、電食鉄筋の腐食減量率が 3%程度までは健全鉄筋と比較して付着強度が上昇する場合も散見され、腐食生成物による噛み合い効果によるものとされている。本研究においても、BF-Lv.2 程度のひび割れであれば破砕剤による膨張圧の影響でコンクリートの拘束が増大し、耐力低下が抑制される可能性が考えられる。

部材角 1/50rad 以降の包絡線では正加力と負加力で違いがみられた。正加力時では、部材角の増大に伴って耐力が低下し、加力前ひび割れ幅が大きい試験体ほど耐力低下の割合が大きい。負加力時では、部材角の増大に伴って耐力は低下するが、耐力低下の割合は大きい順に BF-Lv.3、BF-Lv.1、BF-Lv.2 と加力前ひび割れ幅の大きさとの関係性がみられなかった。変形が大きい領域では、加力前ひび割れよりも加力によって発生したひび割れの影響が大きくなったと考えられる。

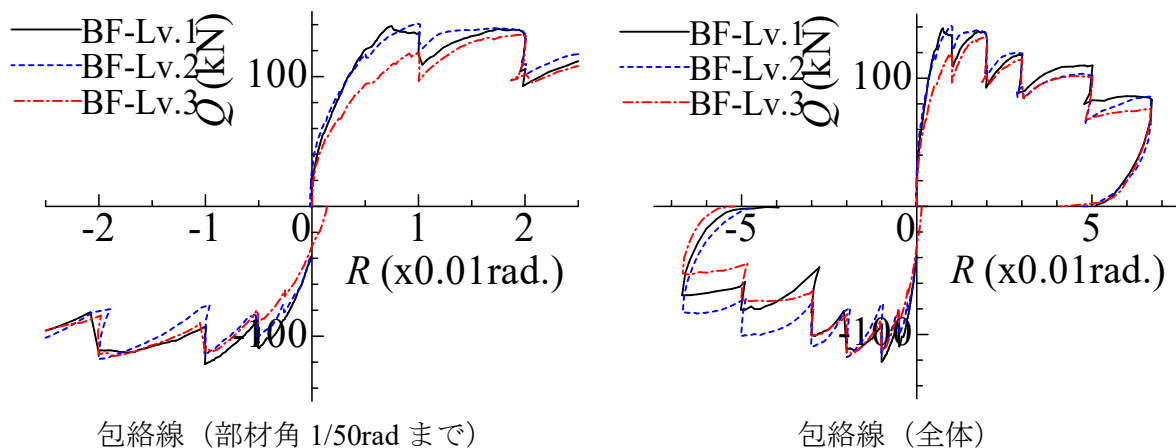


図 2.4.11 曲げ降伏先行型試験体の包絡線

#### 2.4.5 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を図 2.4.12 に、各試験体の BF-Lv.1 を基準とした累積エネルギー吸収量比を図 2.4.13 に示す。BF-Lv.2 のエネルギー吸収量に注目すると、部材角  $1/200\text{rad}$  までは、BF-Lv.1 よりも累積エネルギー吸収量が多い。部材角  $1/200\text{rad}$  以降は、BF-Lv.1 と BF-Lv.2 の間で、累積エネルギー吸収量に大きな差は見られなかった。

BF-Lv.3 に注目すると、部材角  $1/100\text{rad}$  までの累積エネルギー吸収量が低下している傾向がみられた。加力前ひび割れ幅が  $1.5\text{mm}$  程度の試験体では、主筋の付着劣化に伴う剛性低下が大きく影響したと考えられる。部材角  $1/33\text{rad}$  以降は、いずれの試験体も同程度のエネルギー吸収性能である傾向がみられた。加力進行によって、各試験体のひび割れ状況に違いがなくなったためと考えられる。

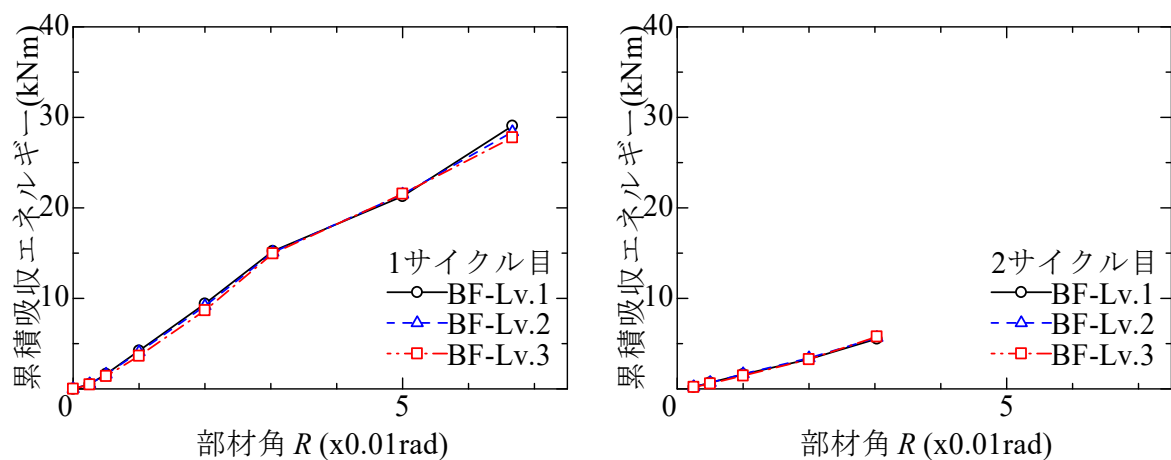


図 2.4.12 曲げ降伏先行型試験体の累積エネルギー吸収量

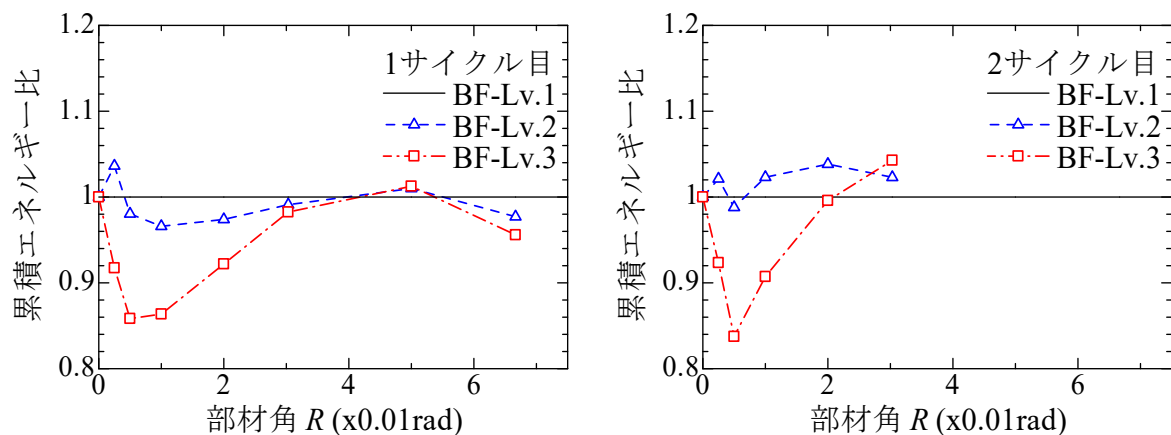


図 2.4.13 曲げ降伏先行型試験体の累積エネルギー吸収量比

## 2.5 断面解析

### 2.5.1 解析方法

最大耐力を検討するために、平面保持仮定に基づくファイバーモデルによる断面解析を行った。解析は簡易化のため一方向単調で実施した。解析に用いた材料の構成則モデルを以下に述べる。

#### (1) コンクリートモデル

コンクリートの応力-ひずみ関係には、Popovics モデル<sup>[12]</sup>を用いた。Popovics モデルはコンクリートの圧縮強度、圧縮強度時のひずみおよび実験係数で表される。実験係数  $n$  はコンクリート圧縮強度で与えられる。Popovics モデルによる基準化応力-基準化ひずみ関係を図 2.5.1 に示す。

$$\sigma_c = \sigma_{cmax} \times \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cmax}} \times \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cmax}}\right)^n} \quad (2-5)$$

$$n = (0.0582 \times \sigma_{cmax}) + 1 \quad (2-6)$$

ここで、 $\sigma_{cmax}$ :コンクリート圧縮強度(MPa)、 $\varepsilon_{cmax}$ :最大応力時のひずみ、 $n$ :実験係数、

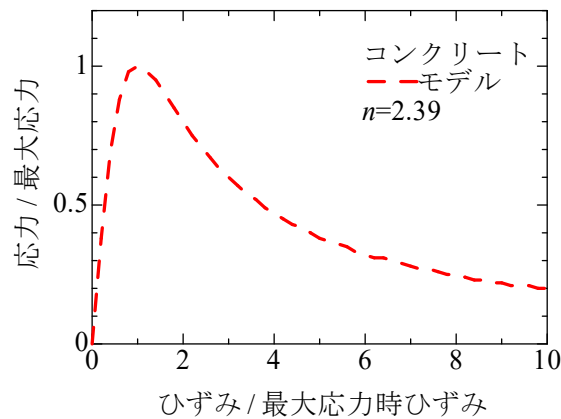


図 2.5.1 コンクリートモデル

## (2) 鉄筋モデル

鉄筋の応力－ひずみ関係には、完全弾塑性モデルを用いた。弾性係数および降伏強度は、材料試験結果を用いた。材料試験で得られた鉄筋の応力－ひずみ関係とモデルを比較して図 2.5.2 に示す。

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (0 \leq \sigma \leq \sigma_y) \quad (2-7)$$

ここで、 $E = 195$  : 弾性係数(MPa)、 $\sigma_y = 366$  : 降伏強度(MPa)

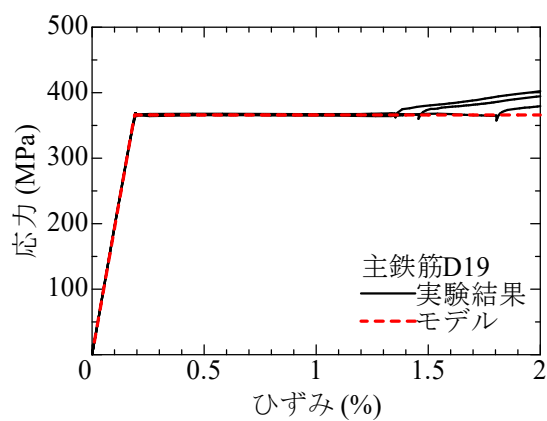


図 2.5.2 鉄筋のモデル

### (3) 引張側破砕剤充填パイプ

破砕剤充填パイプの引張側の応力-ひずみ関係には、完全弾塑性モデルを使用した。パイプ外径と肉厚が同一であり、破砕剤充填から 300 時間経過した破砕剤充填パイプの引張試験を実施した既往研究<sup>[13]</sup>の結果を利用した。応力-ひずみ関係の実験結果とモデルを図 2.5.3 に示す。

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (0 \leq \sigma \leq \sigma_y) \quad (2-8)$$

ここで、 $E = 99.6$  : 弾性係数(MPa)、 $\sigma_y = 202$  : 降伏強度(MPa)

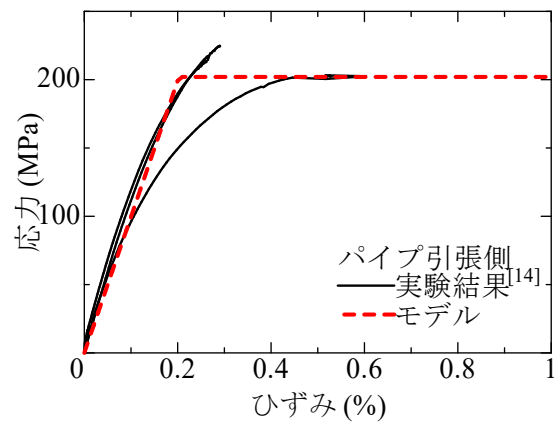


図 2.5.3 引張側破砕剤充填パイプのモデル

#### (4) 圧縮側破砕剤充填パイプモデル

破砕剤充填パイプの圧縮側の応力－ひずみ関係には、最大応力までを式(2-9)に示す放物線、最大応力以降は式(2-10)に示す直線のモデル<sup>[8]</sup>を使用した。パイプ外径と肉厚が同一であり、破砕剤充填から 300 時間経過した破砕剤充填パイプの圧縮試験を実施した既往研究<sup>[13]</sup>の結果を利用した。応力－ひずみ関係の実験結果とモデルを図 2.5.4 に示す。

$$\sigma = \sigma_p \{2 \varepsilon / \varepsilon_{max} - (\varepsilon / \varepsilon_{max})^2\} \quad (2-9)$$

$$\sigma = \sigma_p \left(1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{max}}{2m\varepsilon_{max}}\right) \quad (2-10)$$

ここで、 $\sigma_p$ :最大応力(MPa)、 $\varepsilon_{max}$ :最大応力時のひずみ、 $m$ :軟化勾配を表す係数

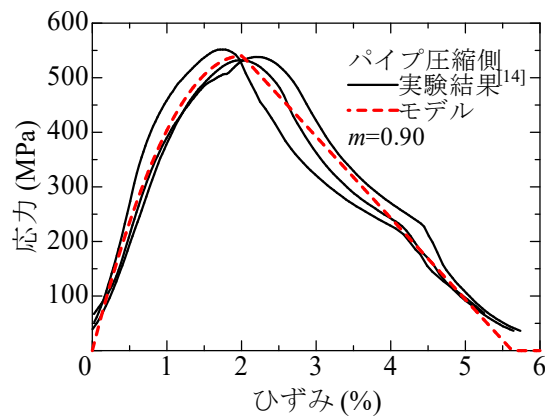


図 2.5.4 圧縮側破砕剤充填パイプのモデル

### 2.5.2 解析結果

曲げモーメントー曲率関係の解析結果を、実験結果と比較して図 2.5.5 に示す。実験結果の曲げモーメントは、危険断面位置のモーメントとした。曲率は部材端部 345mm 区間に軸方向に設置した 2 台の変位計の測定値から算出した平均ひずみの差を、変位計の間隔で除して求めた。なお、試験体両端部それぞれで算出した曲率の平均とした。解析は破砕剤充填パイプを考慮した場合と考慮しない場合の 2 通りを行った。

解析結果より、破砕剤充填パイプは最大曲げモーメント時に 1 割程度曲げモーメントを負担している。正側の最大曲げモーメント実験値は、いずれも破砕剤充填パイプを考慮した解析結果を上回った。負側の実験値は、破砕剤充填パイプを考慮していない解析結果に近い傾向がみられた。BF-Lv.3 に着目すると、負側の実験値が破砕剤充填パイプを考慮していない解析結果よりも下回る傾向がみられた。付着割裂ひび割れによって主筋の付着劣化が生じ、解析値に至っていないと考えられる。

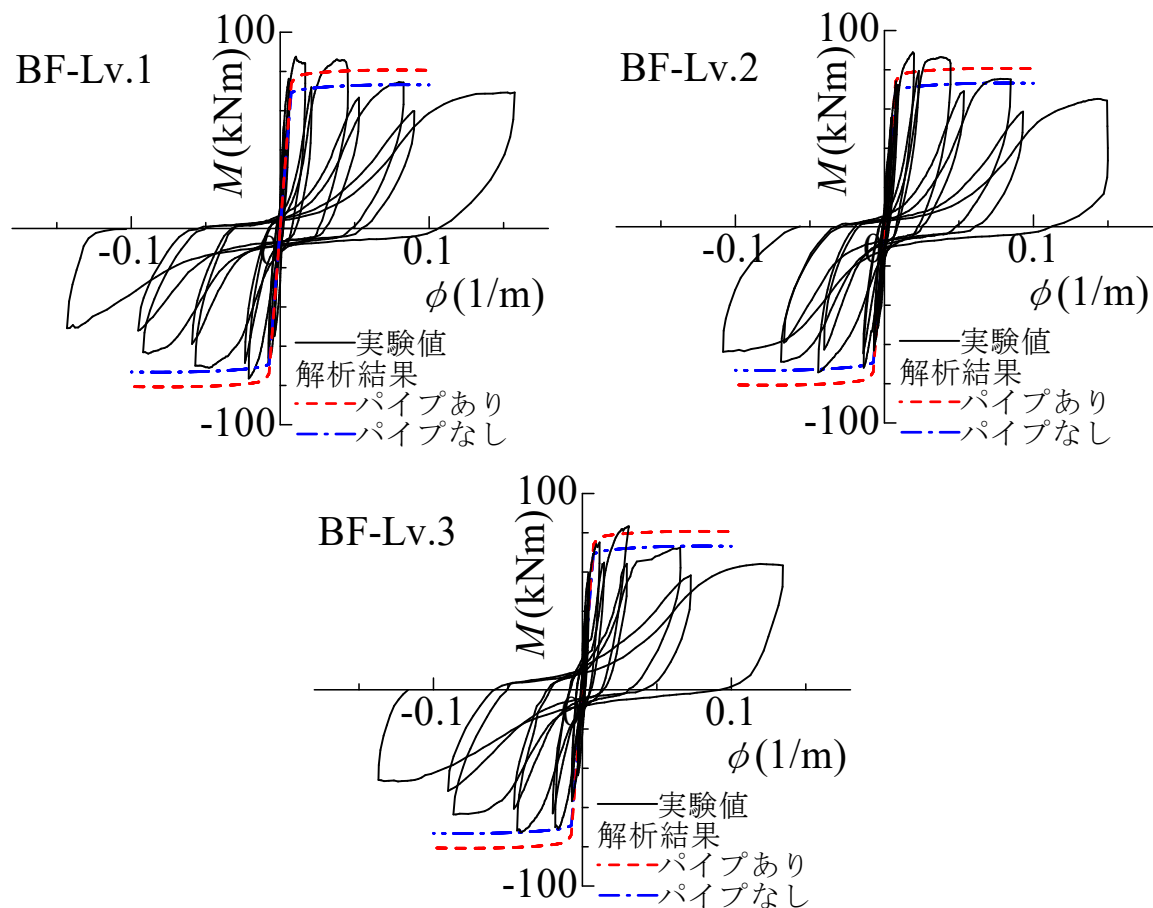


図 2.5.5 曲げモーメント曲率関係

## 2.6 まとめ

破砕剤充填パイプを用いて腐食ひび割れを模擬した RC 部材のひび割れ導入実験を行い、ひび割れ性状の検討を行った。また、曲げ先行型試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を行いコンクリートのひび割れが RC 部材の曲げ性状および曲げ降伏後の靱性に及ぼす影響を検討した。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 破砕剤充填後の経過時間の増大に伴って、ひび割れ幅が大きくなる傾向がみられた。
- ② 破砕剤充填パイプを用いることによって、試験体内部の断面にコーナースプリット型およびサイドスプリット型のひび割れが発生した。
- ③ 加力前ひび割れは試験体の最大耐力に大きな影響を及ぼさなかったが、部材角  $1/100\text{rad}$  までの剛性および最大耐力時の部材角に影響を及ぼした。
- ④ 加力前最大ひび割れ幅が  $1.6\text{mm}$  の試験体では、部材角  $1/100\text{rad}$  までのエネルギー吸収性能が低下した。部材角  $1/33\text{rad}$  以降のエネルギー吸収性能は、加力前ひび割れ幅が  $0.05\text{mm}$  の試験体と比べてほとんど変化しなかった。
- ⑤ 最大耐力実験値と断面解析結果を比較すると、正側実験値は破砕剤充填パイプを考慮した解析結果、負側実験値は破砕剤充填パイプを考慮していない解析結果に近い傾向がみられた。
- ⑥ 加力前最大ひび割れ幅が  $1.6\text{mm}$  の試験体では、負側の最大耐力実験値が破砕剤充填パイプを考慮していない解析値よりも小さかった。



## 第3章 せん断破壊型試験体の曲げせん断実験

### 3.1 はじめに

健全な RC 部材のせん断耐力は、引張鉄筋の引張力とコンクリートの斜め圧縮力により形成されるアーチ機構と、引張鉄筋の付着力とコンクリートの斜め圧縮力、せん断補強筋の引張力により形成されるトラス機構により負担されると考えられている<sup>[3]</sup> (図 3.1.1)。

主筋の腐食が部材のせん断耐力に及ぼす影響を検討した既往研究<sup>[4]</sup>によると、主筋に沿った腐食ひび割れによって引張鉄筋とコンクリートの付着性状が劣化し、加力点と支点を結ぶ圧縮ストラットゾーンにおけるひび割れ性状が変化するため、腐食ひび割れはせん断性能に影響を及ぼすことが指摘されている (図 3.1.2)。また、腐食ひび割れはトラス機構を形成する引張鉄筋の付着力を変化させ、せん断性状に影響を及ぼすことも予想される (図 3.1.3)。

本章では、腐食ひび割れによる付着性能劣化がせん断性能に及ぼす影響を検討するために、せん断破壊型試験体の逆対称繰返し曲げせん断加力を実施し、加力時ひび割れ状況、荷重－変形関係、最大耐力および累積エネルギー吸収量の検討を行った。

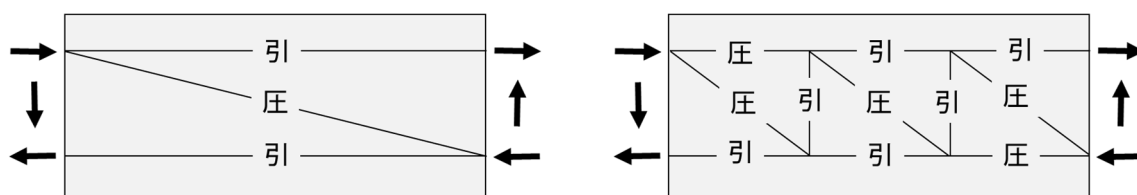
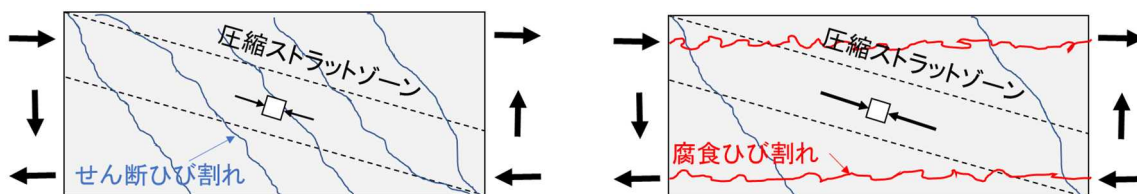


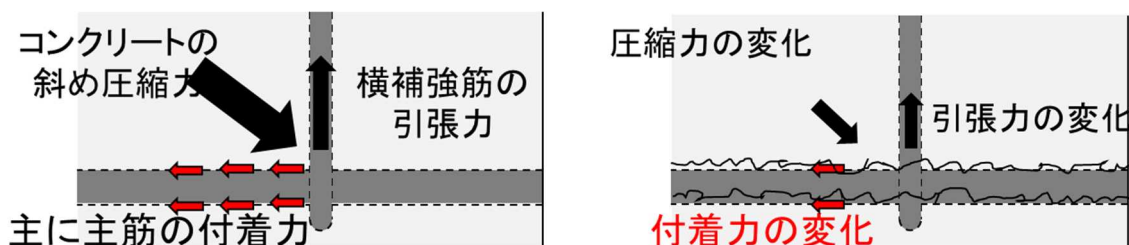
図 3.1.1 アーチ・トラス機構のイメージ



健全試験体

腐食試験体

図 3.1.2 腐食ひび割れがアーチ機構に及ぼす影響のイメージ



健全試験体

腐食試験体

図 3.1.3 腐食ひび割れがトラス機構に及ぼす影響のイメージ

## 3.2 実験概要

### 3.2.1 試験体概要

せん断破壊型試験体一覧を表 3.2.1 に、試験体配筋図を図 3.2.1 に示す。試験体は加力試験体が 3 体、静的破砕剤によるひび割れ性状を観測する試験体が 1 体の全 4 体である。断面は幅  $b \times$  せい  $D$  を  $220\text{mm} \times 420\text{mm}$  とした。主筋は 4-D16 の二段配筋、せん断補強筋は  $D10@200$  の配筋である。試験体の中央部  $1260\text{mm}$  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  $18\text{MPa}$  で、変動因子は破砕剤によって生じる目標最大ひび割れ幅とした。加力前目標ひび割れ幅の設定方法は、第 2 章の試験体と同様に腐食ひび割れ幅－付着強度比関係<sup>[2]</sup>を参考にし、付着強度比が 70%以上である  $0.2\text{mm}$  以下 (Lv.1)、同 30～70%の  $0.2\text{mm} \sim 0.8\text{mm}$  (Lv.2) および 30%以下となる  $0.8\text{mm}$  超 (Lv.3) 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流し込んだ。

| 試験体名    | 共通事項                                                               | 加力前目標ひび割れ幅                                     |
|---------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| SF-Lv.1 | 主筋：SD490(D16)<br>せん断補強筋：SD345(D10)<br>せん断スパン比：1.5<br>せん断補強筋比：0.32% | $\omega_{cr} \leq 0.2\text{mm}$                |
| SF-Lv.2 |                                                                    | $0.2\text{mm} < \omega_{cr} \leq 0.8\text{mm}$ |
| SF-Lv.3 |                                                                    | $0.8\text{mm} < \omega_{cr}$                   |
| Monitor |                                                                    | SF-Lv.3 と同等                                    |

表 3.2.1 せん断破壊型試験体一覧

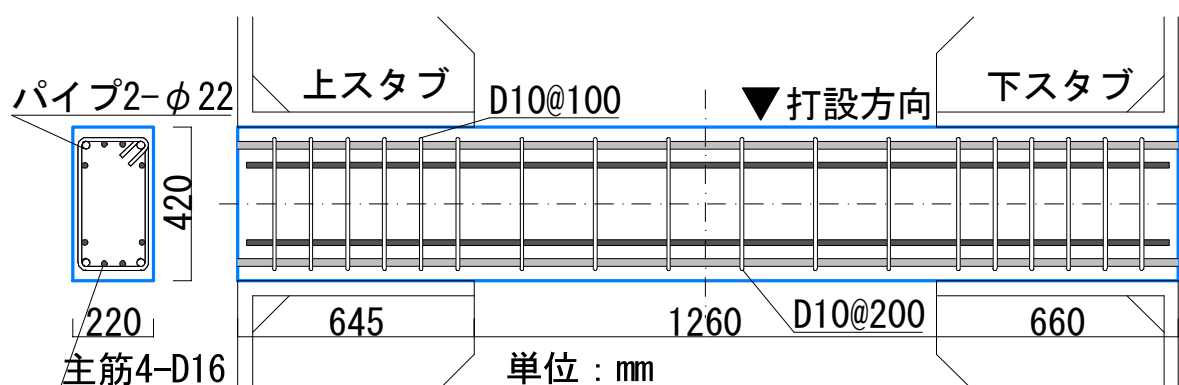


図 3.2.1 せん断破壊型試験体の配筋図

ひび割れ発生を考慮しない場合の耐力計算結果を表 3.2.2 に示す。試験体は RC 部材のせん断性状の確認のため、せん断破壊が起こるように設計した。各強度は 2.3.1 で述べた方法により算出した。

表 3.2.2 せん断破壊型試験体の耐力計算

| 曲げ強度<br>$Q_{Mu}$ (kN) | せん断強度<br>$V_u$ (kN) | 付着耐力<br>$V_{bu}$ (kN) | せん断余裕度<br>$V_u/Q_{Mu}$ | 付着余裕度<br>$V_{bu}/Q_{Mu}$ |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| 204                   | 180                 | 251                   | 0.88                   | 1.23                     |

(1) 曲げ強度（略算式）

$$Q_{mu} = 0.9 \sum a_t \cdot \sigma_y \cdot d / (L_0/2) \quad (3-1)$$

ここで、

$Q_{mu}$  : 曲げ強度  
 $a_t$  : 引張鉄筋断面積  
 $\sigma_y$  : 引張鉄筋の降伏強度  
 $d$  : 有効せい  
 $L_0$  : 内法スパン

(2) セン断強度（終局強度型指針式 A 法）

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

ここで、

$V_u$  : セン断強度  
 $b$  : 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）  
 $p_w$  : セン断補強筋比  
 $\sigma_{wy}$  : セン断補強筋の降伏強度  
 $\phi$  : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度  
 $\quad = \min\{2.0, j_t / (D \cdot \tan \theta), \sqrt{\nu \cdot \sigma_B / (p_w \cdot \sigma_{wy})} - 1.0\}$   
 $\theta$  :  $\tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$   
 $\beta$  :  $= (1 + \cot^2 \varphi) p_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B$   
 $D$  : 梁せい  
 $L$  : 内法スパン  
 $\nu$  :  $\nu_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$  ( $\sigma_B$  の単位は  $\text{kgf/cm}^2$ )  
 $\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度

(3) 付着耐力（靱性保証型指針式）

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

$$T_x = \tau_{bu} \sum \psi_1 + \tau_{bu2} \sum \psi_2 \quad (3-4)$$

ここで、

$V_{bu}$  : 付着耐力  
 $T_x$  : 付着強度  
 $j_e$  : トラス機構に關与する有効せい  
 $\nu$  :  $\nu_0 = 0.7 - \sigma_B / 2000$  ( $\sigma_B$  の単位は  $\text{kgf/cm}^2$ )  
 $\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度  
 $\lambda$  : トラス機構の有効係数  
 $b_e$  : トラス機構に關与する有効幅  
 $b$  : 梁幅  
 $D$  : 梁せい

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

$L$  : 内法スパン

$\tau_{bu}$  : 1 段目主筋の付着信頼強度

$\tau_{bu2}$  : 2 段目主筋の付着信頼強度

$\Sigma\psi_1$  : 1 段目主筋の周長の合計

$\Sigma\psi_2$  : 2 段目主筋の周長の合計

### 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 3.2.3 に示す。

表 3.2.3 せん断破壊型試験体におけるコンクリートの調合表

| W/C<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |      | 備考 |
|------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|----|
|            | C                        | W   | S   | G   | Ad   |    |
| 78.5       | 248                      | 195 | 930 | 840 | 2.48 |    |

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。試験体の加力期間中に材料試験を行った。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 3.2.4 に、本実験においての検討用コンクリート強度を表 3.2.5 に示す。検討用コンクリート強度は、加力期間中に行った 5 回の材料試験結果の平均値とした。

表 3.2.4 せん断破壊型試験体におけるコンクリートの材料試験結果

| 材齢   | 番号 | 圧縮強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(GPa) | 割裂強度<br>(MPa) | 備考 |
|------|----|---------------|---------------|---------------|----|
| 32 日 | 1  | 19.8          | 18.2          | -             |    |
|      | 2  | 20.9          | 18.9          | 2.07          |    |
|      | 3  | 20.3          | 18.2          | 2.05          |    |
|      | 平均 | 20.3          | 18.4          | 2.06          |    |
| 43 日 | 4  | 20.1          | 18.3          | 2.12          |    |
|      | 5  | 19.4          | 18.5          | 2.20          |    |
|      | 6  | 20.3          | 17.6          | 2.19          |    |
|      | 平均 | 20.1          | 18.1          | 2.17          |    |
| 49 日 | 7  | 20.3          | 17.9          | 2.14          |    |
|      | 8  | 19.9          | 18.1          | 2.09          |    |
|      | 9  | 20.2          | 18.2          | 2.14          |    |
|      | 平均 | 20.2          | 18.1          | 2.12          |    |
| 55 日 | 10 | 21.2          | 18.3          | 1.60          |    |
|      | 11 | 19.4          | 17.4          | 1.99          |    |
|      | 12 | 20.5          | 18.3          | 2.07          |    |
|      | 平均 | 20.4          | 18.0          | 1.89          |    |
| 63 日 | 13 | 22.6          | 18.5          | 2.30          |    |
|      | 14 | 21.0          | 18.1          | 2.02          |    |
|      | 15 | 21.6          | 18.8          | 1.95          |    |
|      | 平均 | 21.7          | 18.5          | 2.09          |    |

表 3.2.5 せん断破壊型試験体における検討用コンクリート強度

| 目標強度  | 圧縮強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(GPa) | 割裂強度<br>(MPa) |
|-------|---------------|---------------|---------------|
| 18MPa | 20.5          | 18.2          | 2.07          |

## (2) 異形鉄筋

主筋には異形鉄筋 D16 (SD490)、せん断補強筋には異形鉄筋 D10 (SD345) を用いた。引張試験結果を表 3.2.6 に、応力－ひずみ関係を図 3.2.2 に示す。

表 3.2.6 せん断破壊型試験体における鉄筋の引張試験結果

| 鉄筋           | 番号 | 降伏強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(GPa) | 降伏ひずみ<br>(%) | 引張強度<br>(MPa) | 破断伸び<br>(%) | 備考     |
|--------------|----|---------------|---------------|--------------|---------------|-------------|--------|
| D16<br>SD490 | 1  | 529           | 197           | 0.27         | 701           | 10.8        | 標点間外破断 |
|              | 2  | 528           | 200           | 0.27         | 704           | 17.9        |        |
|              | 3  | 522           | 179           | 0.29         | 704           | 15.7        |        |
|              | 平均 | 526           | 192           | 0.27         | 703           | 14.8        |        |
| D10<br>SD345 | 1  | 353           | 191           | 0.19         | 482           | 32.0        |        |
|              | 2  | 348           | 188           | 0.18         | 480           | 29.9        |        |
|              | 3  | 355           | 192           | 0.19         | 481           | 29.4        |        |
|              | 平均 | 352           | 190           | 0.19         | 481           | 30.4        |        |

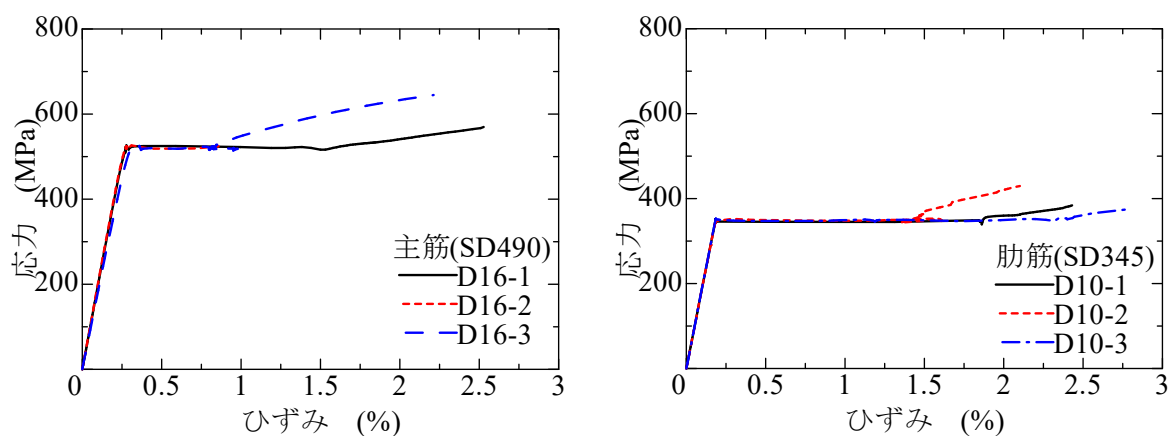


図 3.2.2 せん断破壊型試験体における鉄筋の応力－ひずみ関係

### (3) アルミパイプ

破砕剤充填用パイプには外径 22mm、肉厚 1mm のアルミパイプを用いた。アルミパイプ単体の引張試験結果を表 3.2.7 に、応力－ひずみ関係を図 3.2.3 に示す。なお、降伏強度は 0.2% オフセット耐力とした。

表 3.2.7 せん断破壊型試験体におけるアルミパイプに引張試験結果

| 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     |
|----------------|----|------------|------------|------------|----------|-------|--------|
| φ22mm<br>t=1mm | 1  | 201        | 63.8       | 210        | 6.97     | 0.327 | 標点間外破断 |
|                | 2  | 217        | 52.9       | 247        | 5.17     | 0.317 | 標点間外破断 |
|                | 3  | 203        | 63.3       | 248        | 4.79     | 0.372 |        |
|                | 平均 | 207        | 60.0       | 235        | 5.64     | 0.338 |        |

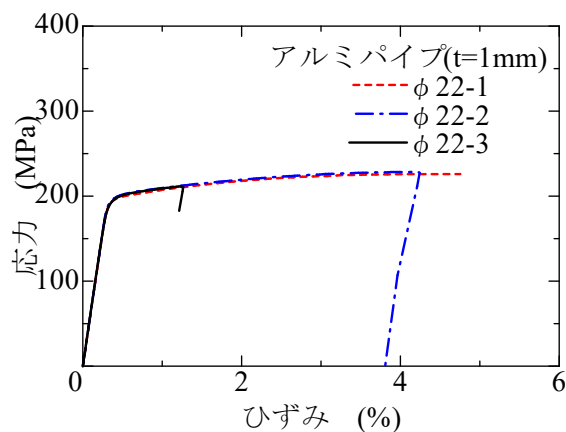


図 3.2.3 せん断破壊型試験体におけるアルミパイプの応力－ひずみ関係

### 3.2.3 加力方法

加力方法は2.3.3 で述べた方法と同様である。

### 3.2.4 計測方法

計測方法はひずみゲージ貼付位置を除いて、2.3.4 で述べたものと同様である。ひずみゲージの貼付位置を図 3.2.4 に示す。主筋およびアルミパイプは危険断面位置、せん断補強筋は梁側面中央部に貼付した。

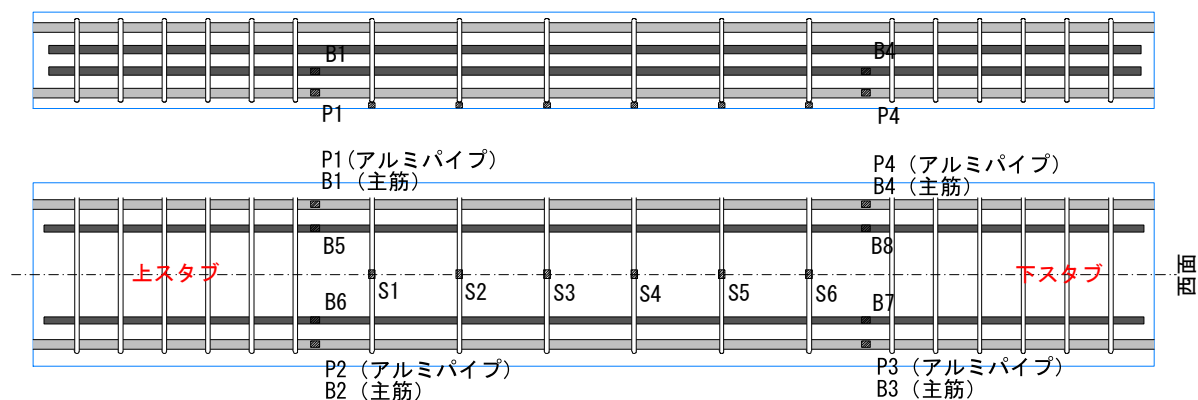


図 3.2.4 せん断破壊型試験体のひずみゲージ貼付位置



### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 Monitor 試験体のひび割れ状況

Monitor 試験体の破砕剤は SF-Lv.3 と同一時期に充填し、SF-Lv.3 の加力終了日に試験体表面ひび割れの観察を実施した。Monitor 試験体のひび割れ状況を図 3.3.1 に示す。図中の試験体上部は加力試験体の上スタブに相当し、3.2.1 で述べたように試験体上部から破砕剤を充填した。図中の値は、それぞれの区間で計測したひび割れ幅のうち最大となる値を示す。

試験区間において、破砕剤充填方向の高さの違いはひび割れ幅の値に影響を及ぼさなかった。コンクリート打設方向に注目すると、下端筋位置で発生したひび割れ幅は上端筋位置で発生したひび割れ幅よりも大きい傾向がみられた。養生中に発生したコンクリートの沈みひび割れの影響により、上端筋位置のパイプ周りに空隙が発生し、破砕剤充填パイプとコンクリート間で膨張圧の伝達が低下したためと考えられる。

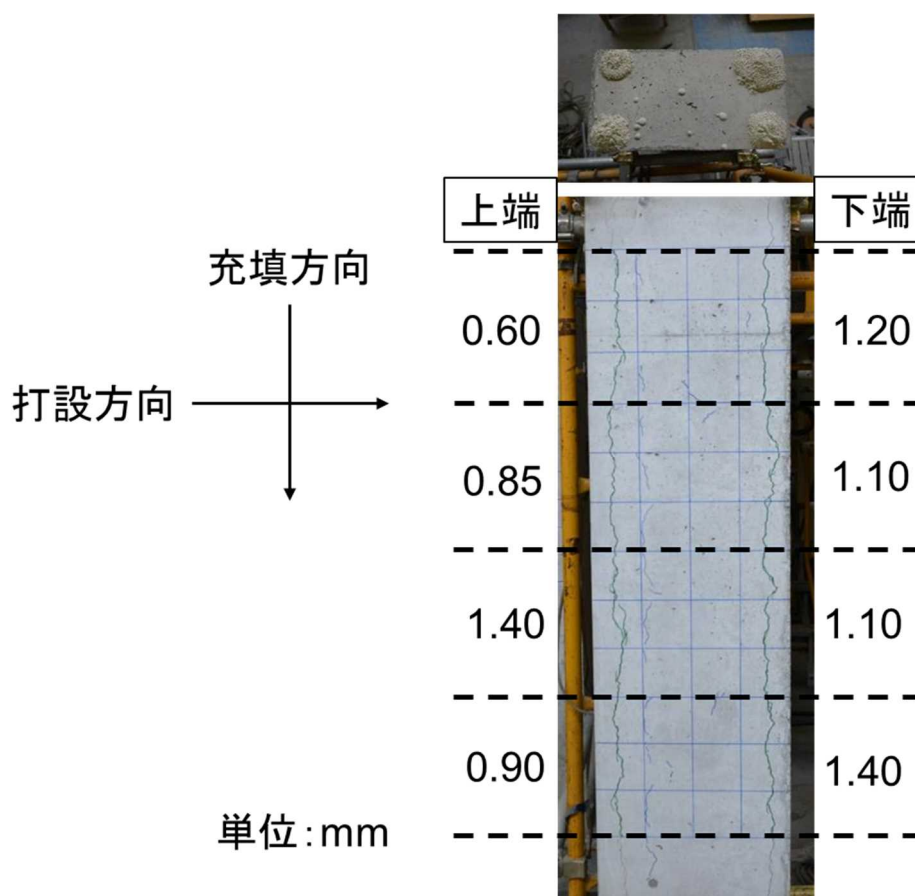


図 3.3.1 Monitor 試験体ひび割れ状況

試験体表面のひび割れの観察終了後、試験区間両端部と試験区間中央部で試験体を切断し、切断面のひび割れ状況の観察を行った。試験体の切断位置および切断面のひび割れ状況を図 3.3.2 に示す。図中の値は切断面位置における試験体の表面において計測したひび割れ幅である。

上端筋ではサイドスプリット型、下端筋ではコーナースプリット型のひび割れが目立つが、切断面位置によってサイドスプリット型とコーナースプリット型が同時に発生する箇所もみられた。一部では二段目主筋位置にもひび割れが到達している箇所がみられた。

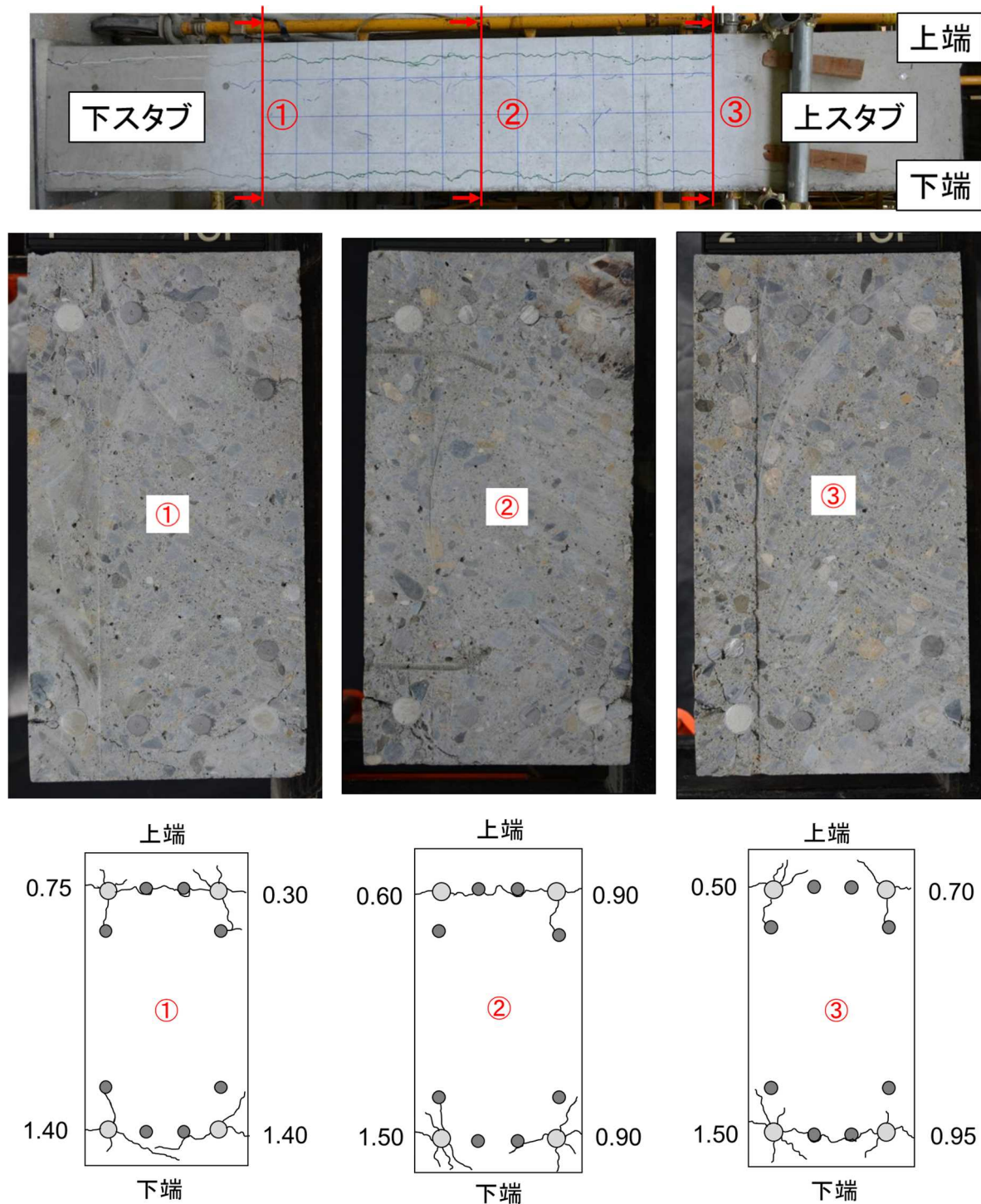


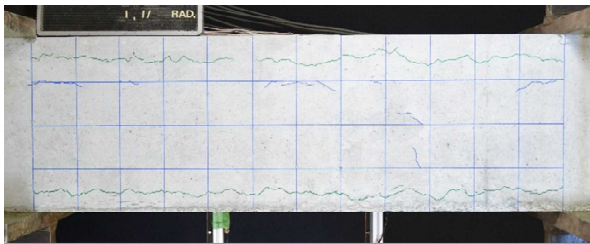
図 3.3.2 Monitor 試験体切断面の様子 (単位 : mm)

### 3.3.2 試験体破壊状況

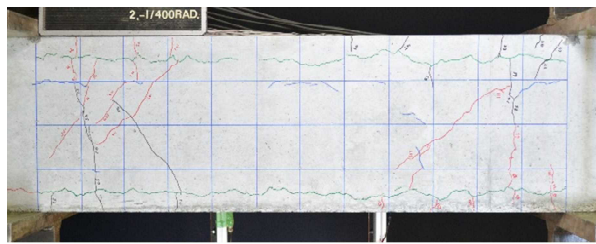
加力試験体の加力前ひび割れ状況、部材角  $1/400 \sim 1/33\text{rad}$  の 2 サイクル加力終了後、 $1/20$  および  $1/15\text{rad}$  加力終了後のひび割れ状況を図 3.3.3、図 3.3.4 および図 3.3.5 に示す。図中の左側が試験体配筋における下スタブ、右側が上スタブに該当する。以降に、各試験体の実験時ひび割れ状況を述べる。

# SF-Lv.1

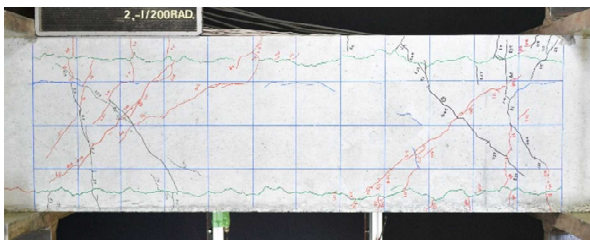
破砕剤充填パイプによって、最大で 0.20mm 幅のひび割れが発生した。正加力時部材角  $1/400\text{rad}$  に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角  $1/200\text{rad}$  に至る過程で一段目主筋位置に付着割裂ひび割れおよびせん断ひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れと付着割裂ひび割れが拡大して最終破壊に至った。



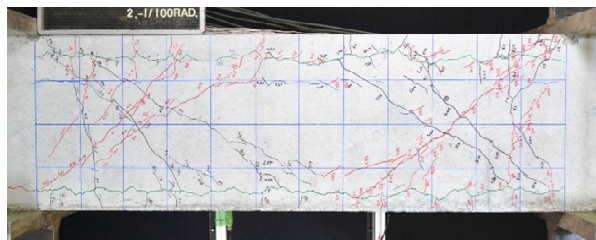
(a) 加力前



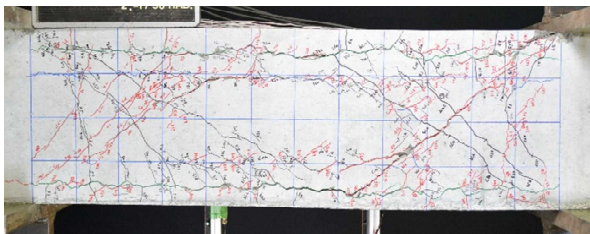
(b)  $1/400\text{rad}$



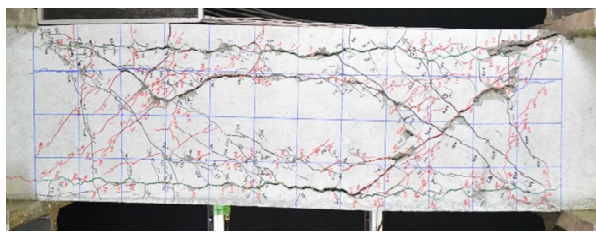
(c)  $1/200\text{rad}$



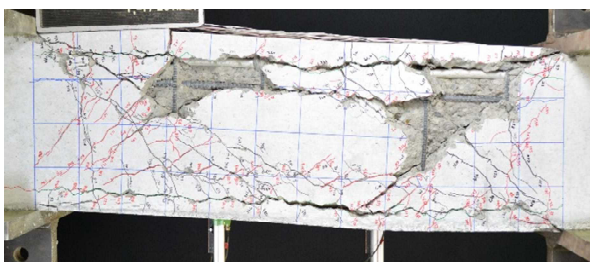
(d)  $1/100\text{rad}$



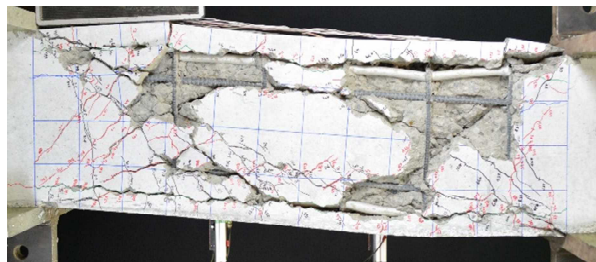
(e)  $1/50\text{rad}$



(f)  $1/33\text{rad}$



(g)  $1/20\text{rad}$



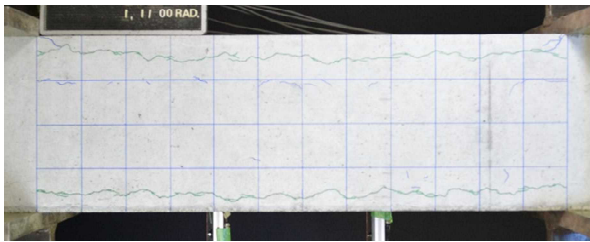
(h)  $1/15\text{rad}$

図 3.3.3 せん断破壊型試験体のひび割れ状況 (SF-Lv.1)

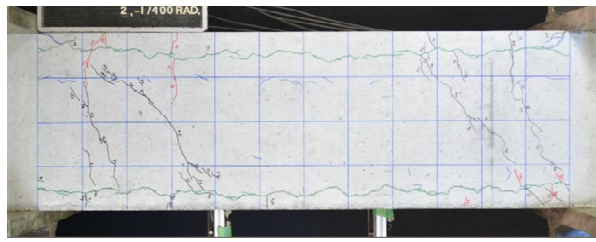


## SF-Lv.2

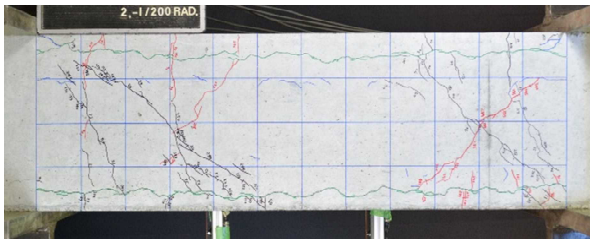
破砕剤充填パイプによって、最大で 0.55mm 幅のひび割れが発生した。正加力時部材角  $1/400\text{rad}$  に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角  $1/200\text{rad}$  に至る過程でせん断ひび割れが発生した。正側部材角  $1/100\text{rad}$  に達する直前に、写真左側黒実線のせん断ひび割れが急激に拡幅する現象がみられた。部材角  $1/50\text{rad}$  に至る過程で、二段目主筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れ、付着割裂ひび割れの順に破壊が進行して最終破壊に至った。



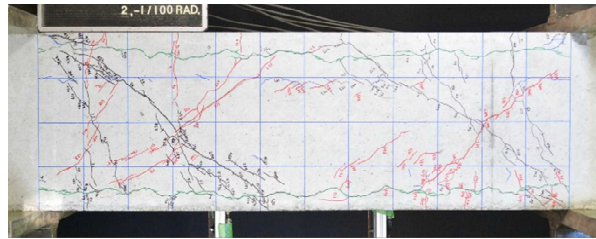
(a) 加力前



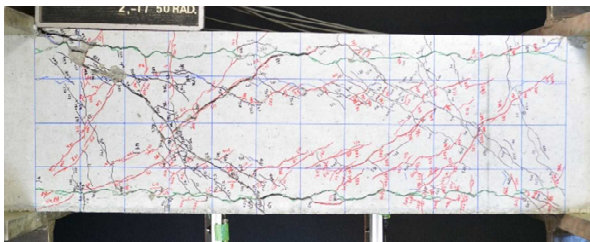
(b)  $1/400\text{rad}$



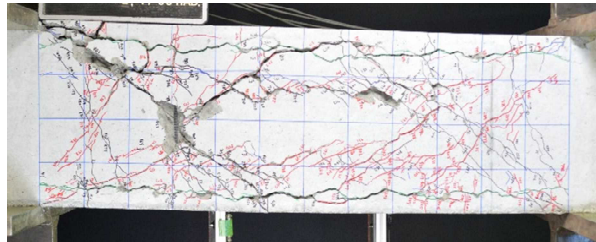
(c)  $1/200\text{rad}$



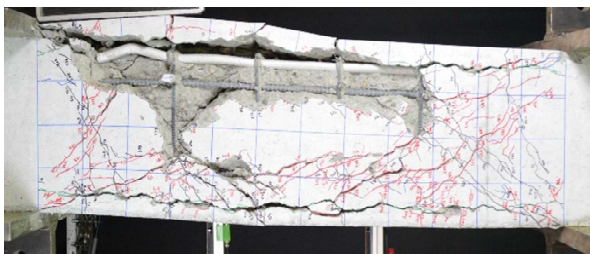
(d)  $1/100\text{rad}$



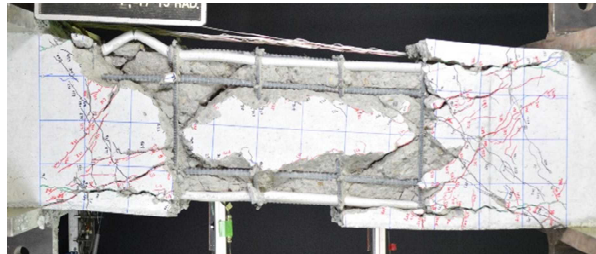
(e)  $1/50\text{rad}$



(f)  $1/33\text{rad}$



(g)  $1/20\text{rad}$



(h)  $1/15\text{rad}$

図 3.3.4 せん断破壊型試験体のひび割れ状況 (SF-Lv.2)

### SF-Lv.3

破砕剤充填パイプによって、最大で 1.10mm 幅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が発生した。部材角  $1/100\text{rad}$  に至る過程で一段目主筋に付着割裂ひび割れが発生した。 $1/50\text{rad}$  までに二段目主筋で付着割裂が発生した。その後、付着割裂ひび割れ箇所で破壊が進行して最終破壊に至った。

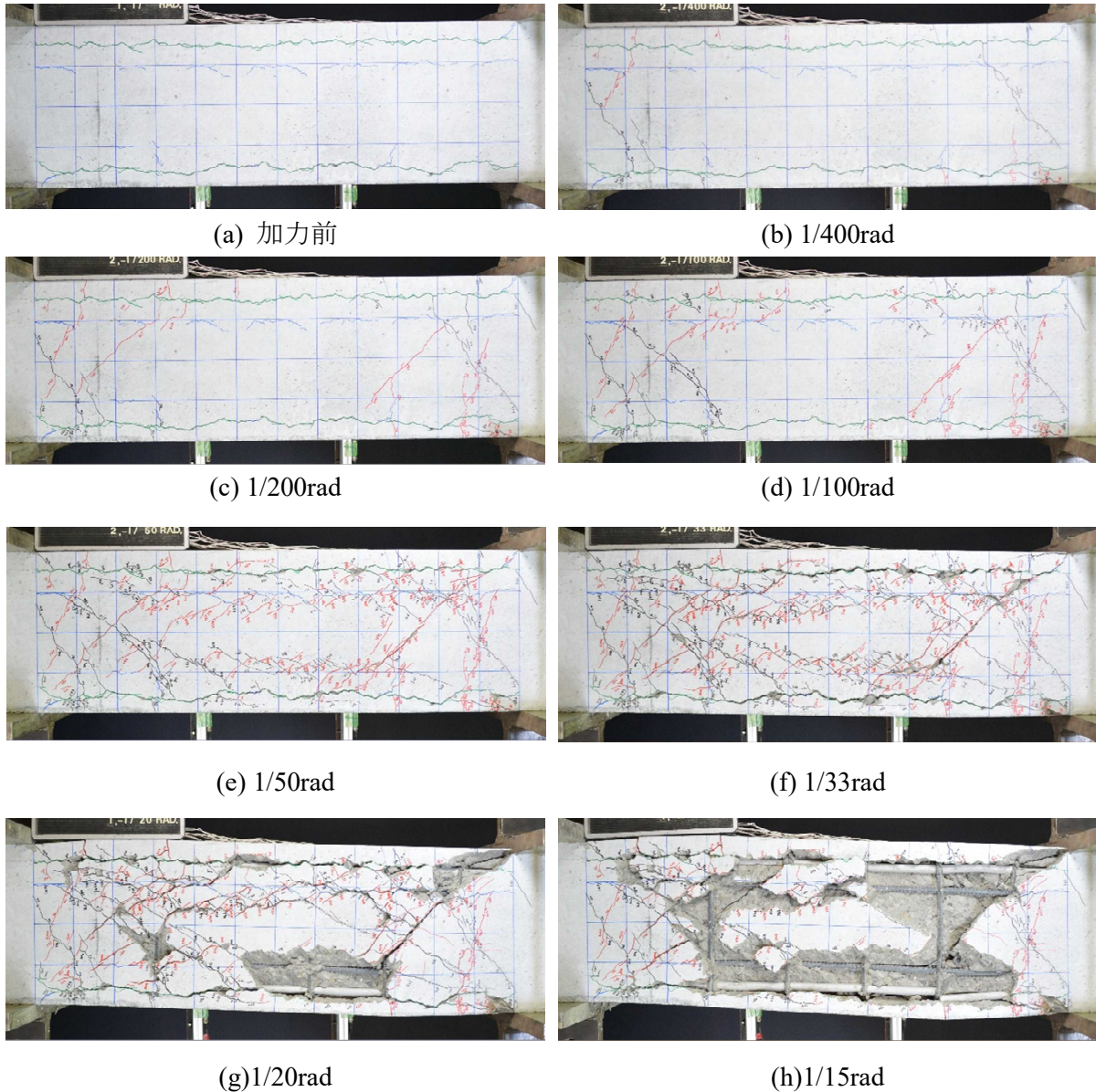


図 3.3.5 せん断破壊型試験体のひび割れ状況 (SF-Lv.3)

### 3.3.3 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 3.3.6 に示す。以下に、各試験体の状況を述べる。

#### SF-Lv.1

正加力時部材角  $1/50\text{rad}$  に至る過程で、最大耐力  $172\text{kN}$  に達した。負加力時は  $1/100\text{rad}$  で最大耐力  $170\text{kN}$  に達した。最大耐力以降、耐力が急激に低下する傾向がみられた。履歴は逆 S 字型を示しており、主筋の付着劣化が原因と考えられる。

#### SF-Lv.2

正加力時部材角  $1/100\text{rad}$  に至る過程で、最大耐力  $160\text{kN}$  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  $146\text{kN}$  に達した。正側において最大耐力以降は耐力が急激に低下したが、負側では耐力低下の割合が小さい傾向がみられた。逆 S 字型の履歴は SF-Lv.1 と同様な傾向がみられた。

#### SF-Lv.3

正加力時部材角  $1/50\text{rad}$  に至る過程で、最大耐力  $180\text{kN}$  に達した。負加力時も同加力サイクルで最大耐力  $174\text{kN}$  に達した。SF-Lv.1 と同様に最大耐力以降、耐力が急激に低下する傾向がみられた。逆 S 字型の履歴は他の試験体と同様な傾向がみられた。

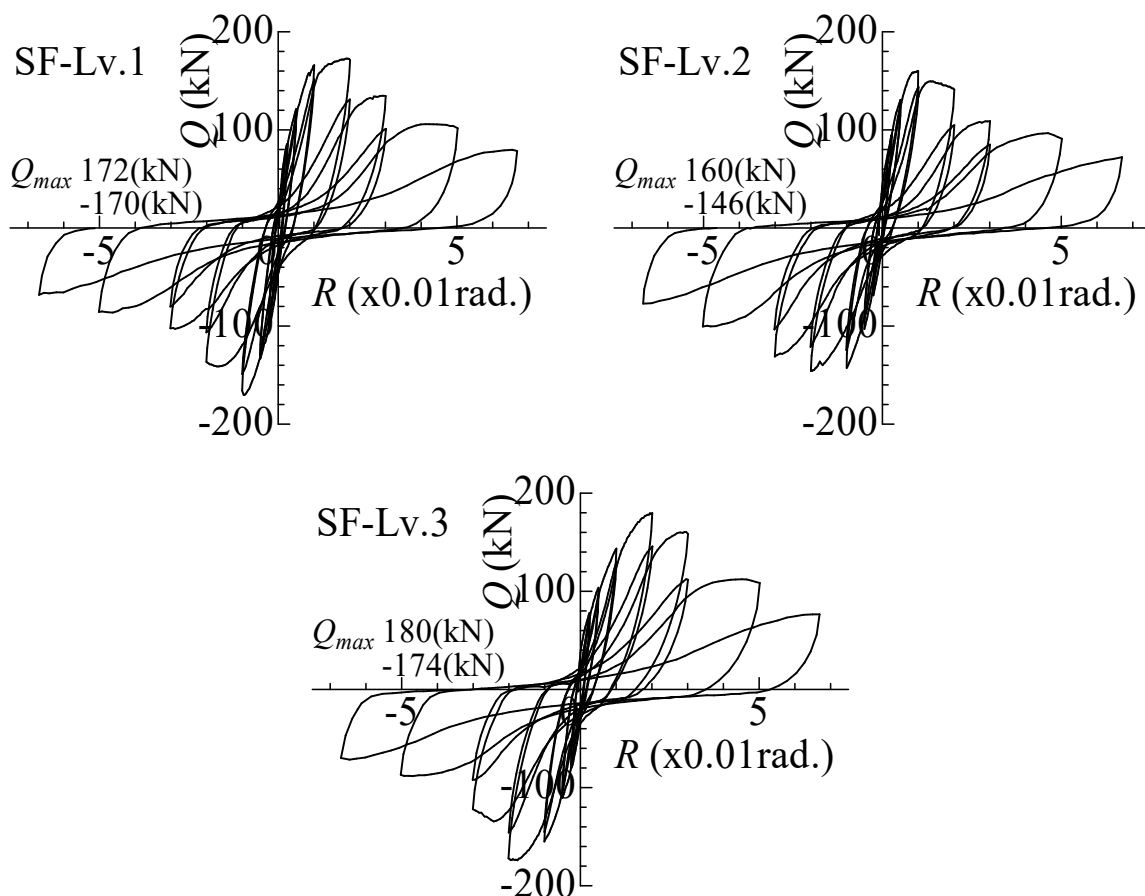


図 3.3.6 せん断破壊型試験体のせん断力一部材角関係

### 3.3.4 主筋およびせん断補強筋のひずみ

各試験体の部材角－主筋ひずみ関係およびせん断補強筋ひずみ分布を図 3.3.7～図 3.3.12 に示す。以下に、各試験体のひずみ状況を述べる。

#### SF-Lv.1

部材角  $1/100\text{rad}$  以降において主筋の一部が降伏に達した。正側最大耐力時である部材角  $1/50\text{rad}$  および負側最大耐力時である部材角  $-1/100\text{rad}$  において、試験体中央部から  $300\text{mm}$  の位置のせん断補強筋が降伏した。

#### SF-Lv.2

部材角  $1/100\text{rad}$  以降に、主筋の一部が降伏に達した。降伏に達した主筋は B1、B3 および B7 といずれも正側加力で引張側（図中黒実線）となる箇所であった。図 3.3.10 中の凡例に示した部材角  $1/130\text{rad}$  では、正側最大耐力に達する前に発生したせん断ひび割れの急激な拡幅時のひずみ分布を示している。せん断ひび割れの急激な拡幅時および負側最大耐力時である  $-1/50\text{rad}$  時において、せん断補強筋が降伏に達した。他の試験体と比較して、試験体中央部から  $500\text{mm}$  の位置におけるせん断補強筋のひずみが小さい傾向がみられた。

#### SF-Lv.3

部材角  $1/100\text{rad}$  以降に、主筋の一部が降伏に達した。正側最大耐力時である部材角  $1/50\text{rad}$  でせん断補強筋の一部で降伏に達したが、負側加力で降伏はみられなかった。



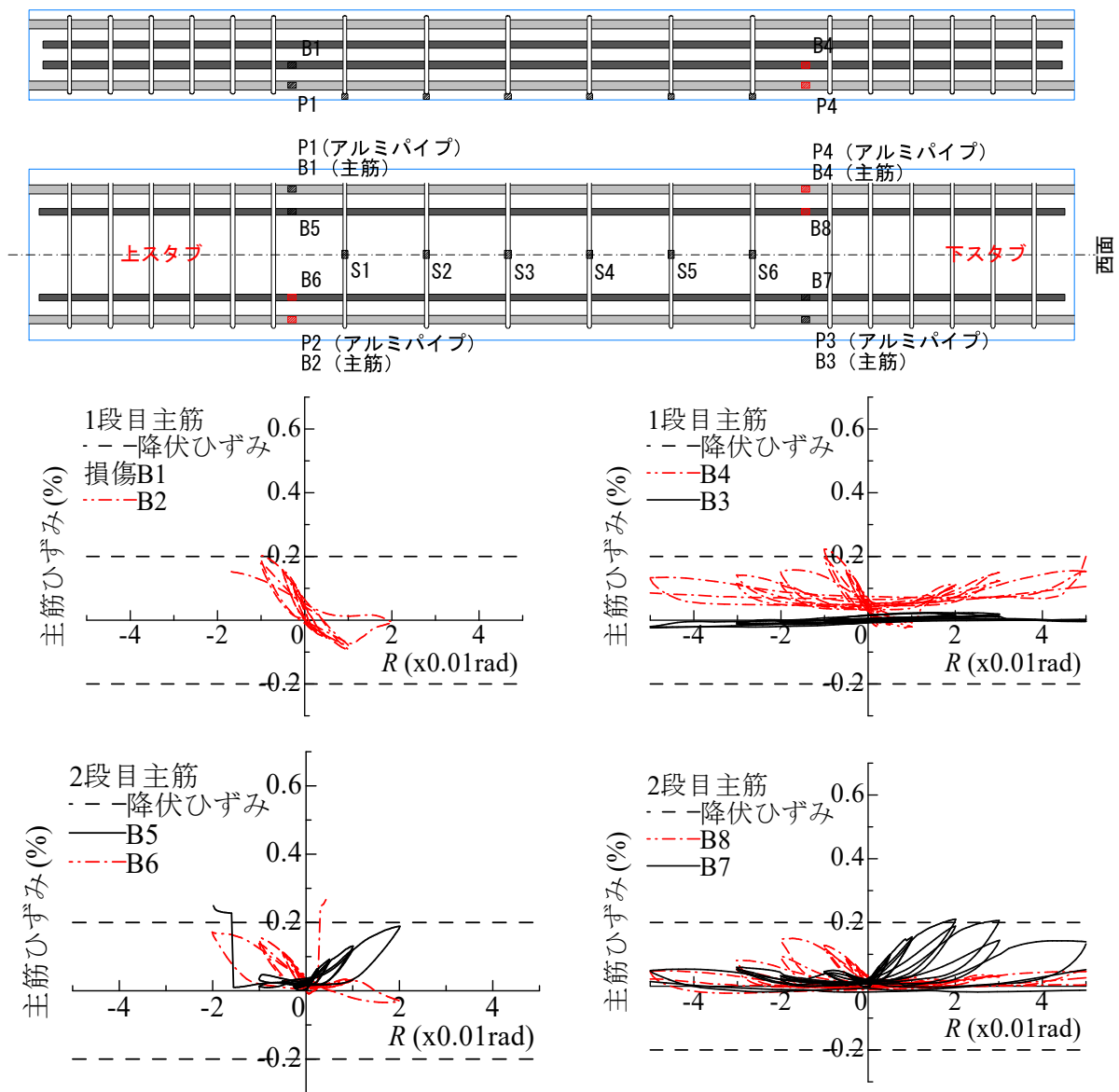


図 3.3.7 SF-Lv.1 主筋ひずみ

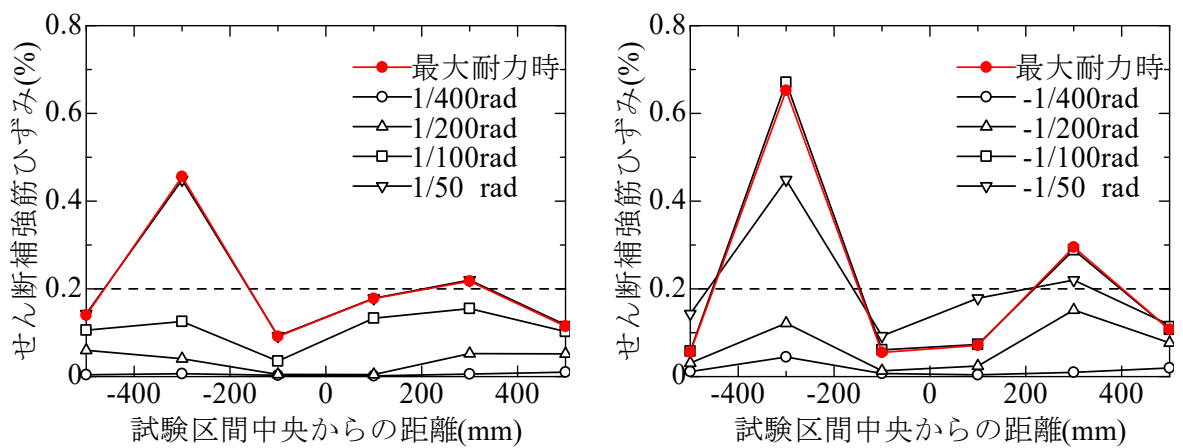


図 3.3.8 SF-Lv.1 せん断補強筋ひずみ分布

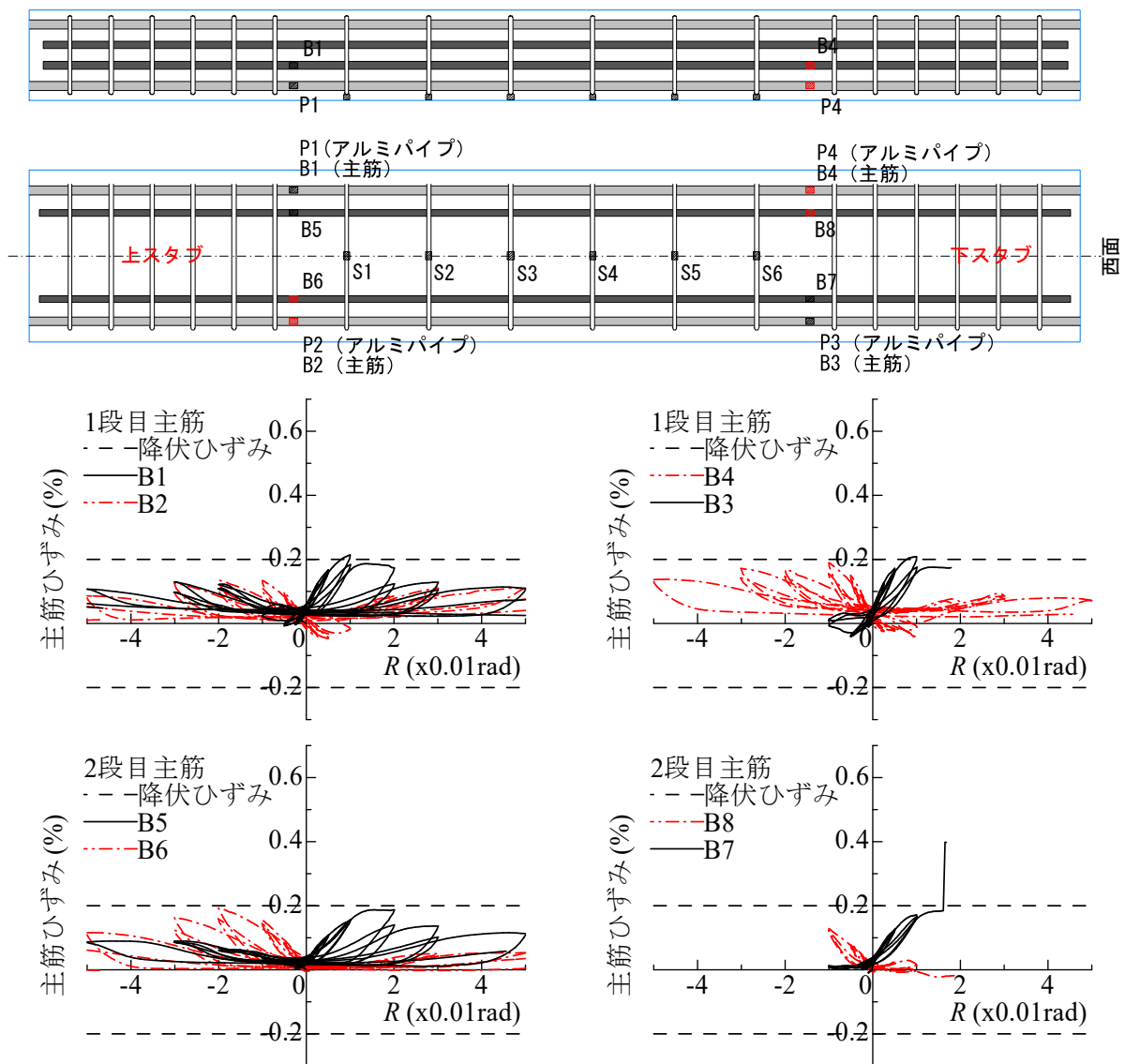


図 3.3.9 SF-Lv.2 主筋ひずみ

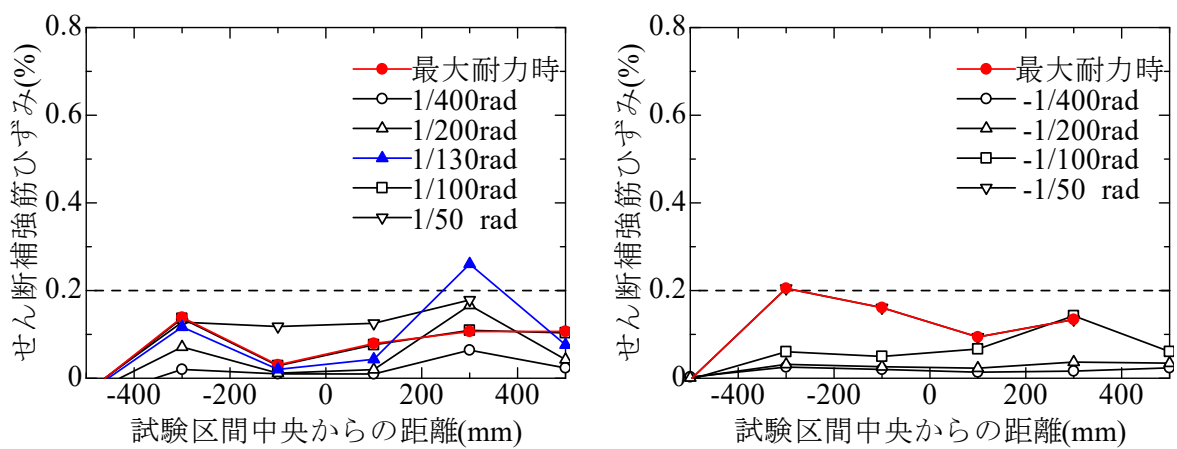


図 3.3.10 SF-Lv.2 せん断補強筋ひずみ分布

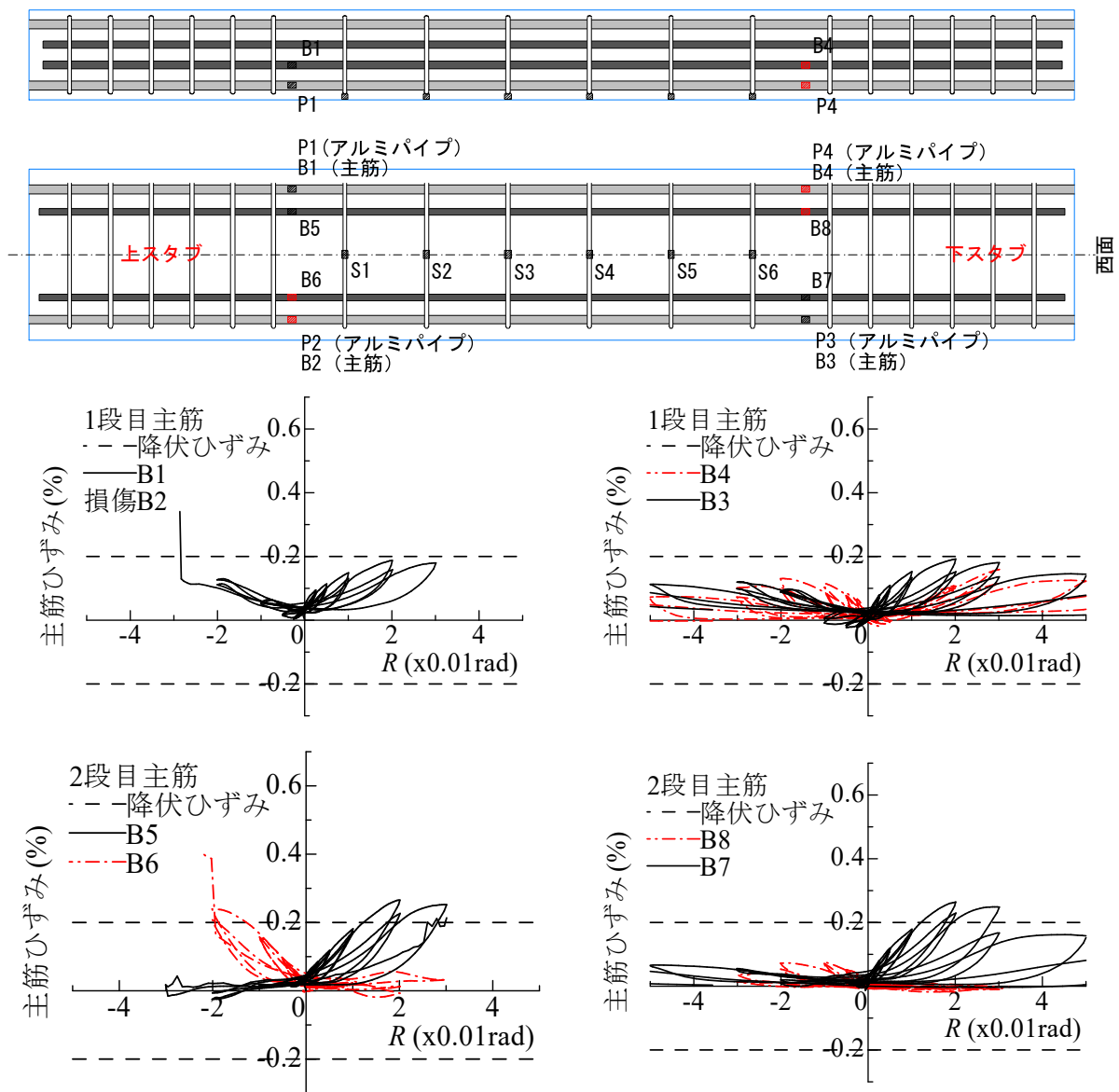


図 3.3.11 SF-Lv.3 主筋ひずみ

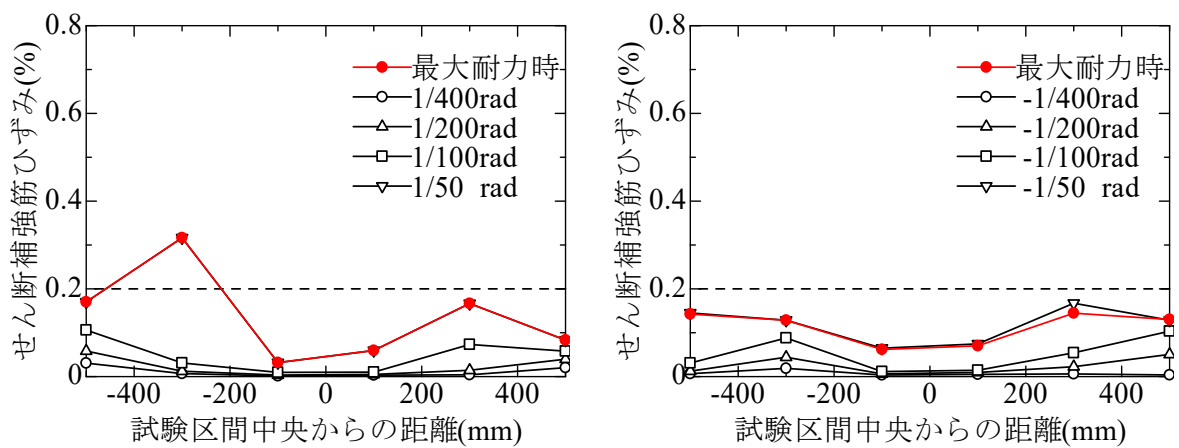


図 3.3.12 SF-Lv.3 せん断補強筋ひずみ分布

### 3.3.5 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 3.3.1 に示す。加力前ひび割れ幅と試験体最大耐力の関係を図 3.3.13 に、加力前ひび割れ幅と最大耐力時部材角の関係を図 3.3.14 に示す。図中に終局強度型指針式 A 法によるせん断強度計算値、靱性保証型指針による付着耐力計算値を示す。

加力前ひび割れ幅と最大耐力に明瞭な関係はみられず、いずれの試験体の最大耐力も終局強度型指針式 A 法によるせん断強度計算値と同程度となった。SF-Lv.2 の最大耐力は SF-Lv.1 よりも小さく、SF-Lv.3 の最大耐力は SF-Lv.1 よりも大きい。最大耐力時のせん断抵抗機構が、終局強度型指針で仮定するアーチ機構とトラス機構によるものであると考えると、いずれの試験体においてもせん断補強筋は降伏しており、トラス機構によるせん断力負担分は同一であると考えられる。トラス機構の力のつり合いによるコンクリートの斜め圧縮力を、コンクリート有効圧縮強度から差し引いた分がアーチ機構によって負担される力であり、各試験体の最大耐力の違いはコンクリート有効圧縮強度の差によるものであると考えることができる。

SF-Lv.2 では、最大耐力前に発生したせん断ひび割れによる部材端部の局所破壊がコンクリートの有効圧縮強度の低下を引き起こし、最大耐力値が低下したと考えられる(図 3.3.15)。

一方、SF-Lv.3 では、主筋に沿った加力前ひび割れの拡幅により顕著なせん断ひび割れの発生が逆に抑制され、アーチ機構におけるコンクリート有効圧縮強度の低下が小さくなり、SF-Lv.1 と同程度以上の耐力を発揮したと考えられる。さらに、破砕剤の膨張圧に対するせん断補強筋の拘束効果により、コアコンクリートに側圧が生じ、コンクリートの有効圧縮強度が増大したことも考えられる(図 3.3.15)。

最大耐力時の部材角は加力前ひび割れ幅の増大に伴って増加しており、主筋の付着劣化により滑りが増大して剛性が低下したためと考えられる。

表 3.3.1 せん断破壊型試験体の最大耐力実験結果

| 試験体     | 正側<br>最大耐力<br>(kN) | 正側<br>最大耐力時の<br>部材角<br>( $\times 0.01\text{rad}$ ) | 負側<br>最大耐力<br>(kN) | 負側<br>最大耐力時の<br>部材角<br>( $\times 0.01\text{rad}$ ) | 正負平均<br>最大耐力<br>(kN) | 正負平均<br>部材角<br>( $\times 0.01\text{rad}$ ) |
|---------|--------------------|----------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------|
| SF-Lv.1 | 172                | 1.94                                               | 170                | 0.91                                               | 171                  | 1.43                                       |
| SF-Lv.2 | 160                | 1.01                                               | 146                | 1.94                                               | 153                  | 1.48                                       |
| SF-Lv.3 | 180                | 2.01                                               | 174                | 1.92                                               | 177                  | 1.97                                       |

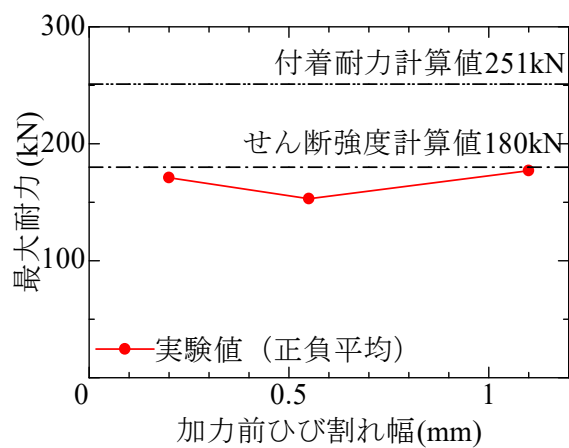


図 3.3.13 加力前ひび割れ幅－最大耐力関係

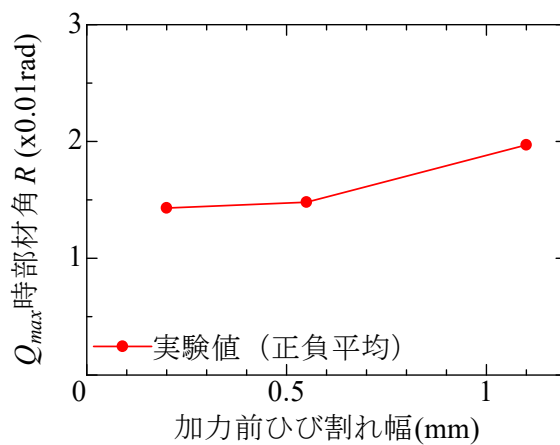


図 3.3.14 加力前ひび割れ幅－最大耐力時部材角関係

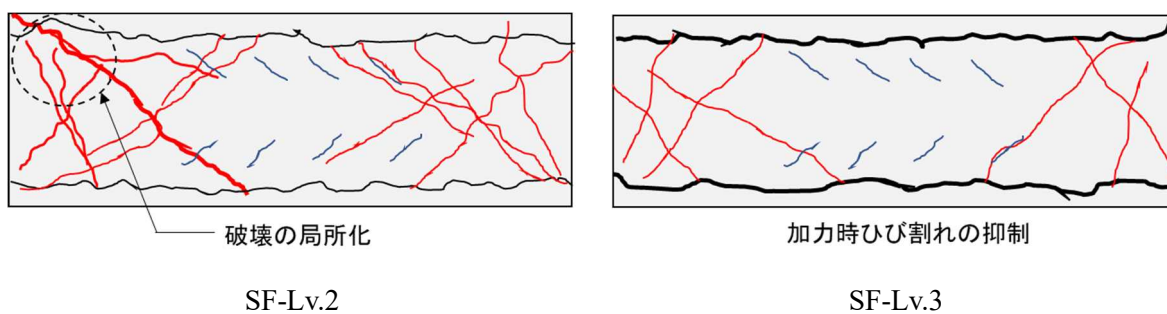


図 3.3.15 ひび割れ状況のイメージ図

### 3.3.6 包絡線の比較

各試験体の包絡線を図 3.3.16 に示す。左図は部材角  $1/50\text{rad}$  まで、右図は加力終了時までの全体の包絡線を示す。部材角  $1/100\text{rad}$  までの包絡線を比較すると、SF-Lv.3 は SF-Lv.1、SF-Lv.2 に比べて剛性低下の割合が顕著に大きいことがわかる。主筋の付着劣化によるものと考えられる。部材角  $1/100\text{rad}$  から  $1/33\text{rad}$  に注目すると、SF-Lv.3 の耐力が最も大きく、次いで、正側では SF-Lv.1 が、負側では SF-Lv.2 の耐力が大きい。前節で述べたコンクリート有効圧縮強度に係るひび割れ状況の差異が最大耐力以降の履歴性状にも表れていると考えられる。

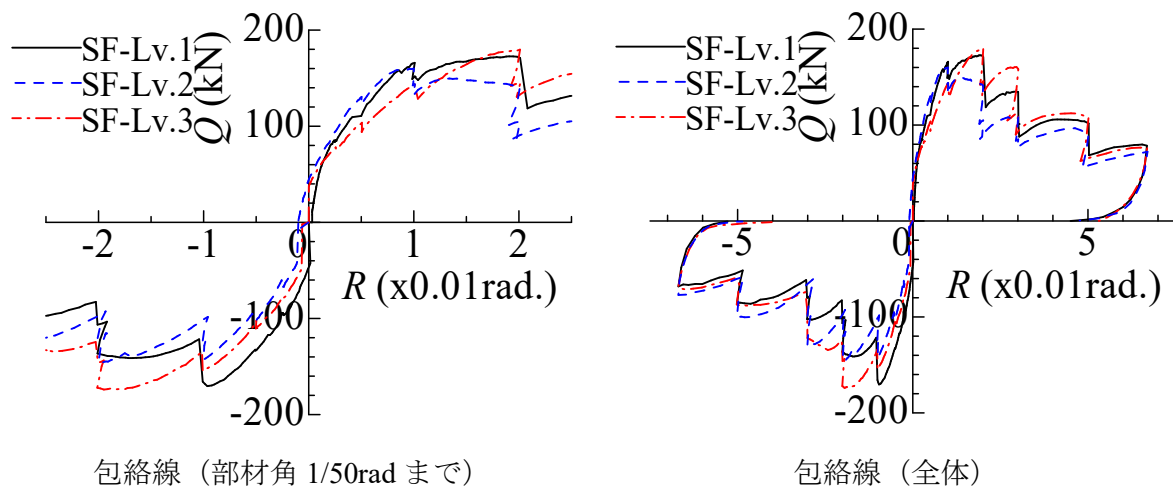


図 3.3.16 セン断破壊型試験体の包絡線

### 3.3.7 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を図 3.3.17 に、各試験体の SF-Lv.1 を基準とした累積エネルギー吸収量比を図 3.3.18 に示す。SF-Lv.2 は SF-Lv.1 に比べて累積エネルギー吸収量が小さい。最大耐力および最大耐力以降の耐力が SF-Lv.1 と比較して小さいためと考えられる。SF-Lv.3 では、部材角  $1/50\text{rad}$  までは加力前ひび割れによって剛性が低下したことにより吸収量が小さいが、部材角  $1/50\text{rad}$  以降は耐力低下が少なく、吸収量が多い。

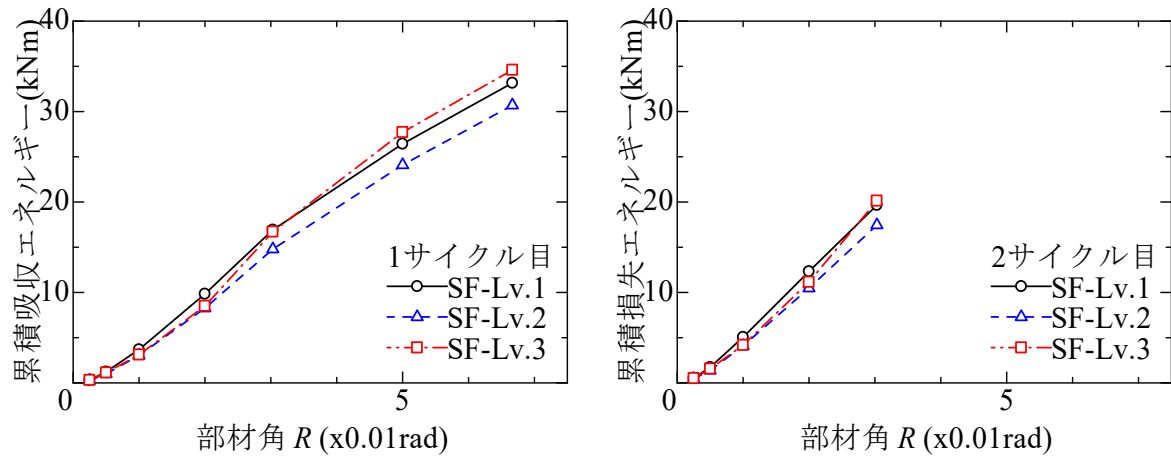


図 3.3.17 せん断破壊型試験体の累積エネルギー吸収量

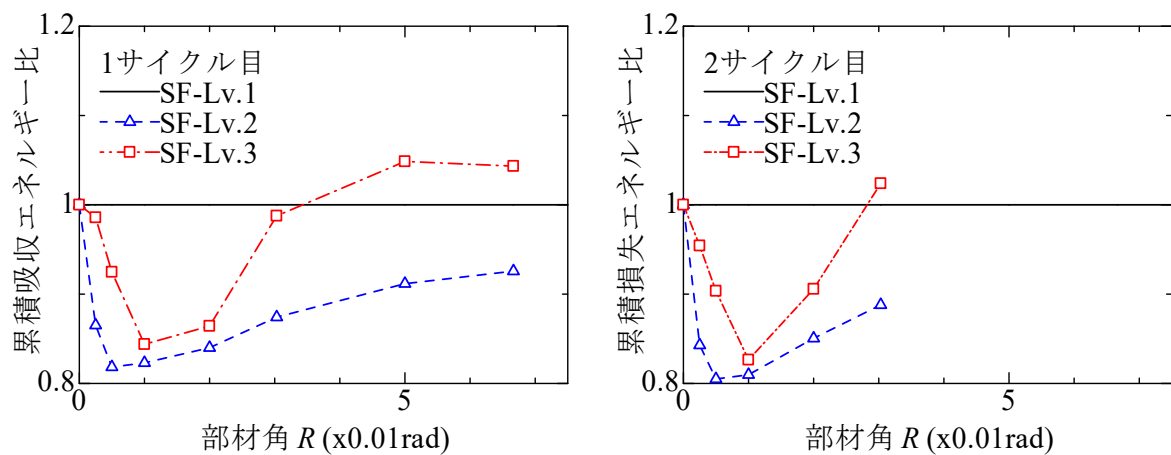


図 3.3.18 せん断破壊型試験体の累積エネルギー吸収量比

### 3.4 まとめ

せん断破壊型試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を行い、コンクリートのひび割れが RC 部材のせん断性能に及ぼす影響を検討した。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 加力前ひび割れ幅と試験体の最大耐力に明瞭な関係はみられなかった。
- ② 加力前ひび割れは、部材角  $1/100\text{rad}$  までの剛性および最大耐力時の部材角に影響を及ぼした。
- ③ 加力前ひび割れ幅が大きい場合、主筋に沿った加力前ひび割れの拡幅により顕著なせん断ひび割れの発生が抑制され、コンクリート有効圧縮強度の低下が小さくなり、ひび割れ幅が小さい試験体と同程度以上の耐力およびエネルギー吸収性能を発揮したと考えられる。



## 第4章 結論

本研究では、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れが RC 部材の構造性能に及ぼす影響を実験的に検討することを目的とし、曲げ降伏先行型試験体およびせん断破壊型試験体の 2 シリーズについて、加力前ひび割れ幅を変動因子とした逆対称繰返し曲げせん断実験を実施した。

曲げ降伏先行型試験体において、加力前ひび割れ幅は試験体の最大耐力に影響を及ぼさなかったが、部材角  $1/100\text{rad}$  までの剛性および最大耐力時の部材角に影響を及ぼした。加力前最大ひび割れ幅が  $1.6\text{mm}$  の試験体では、幅が  $0.05\text{mm}$  の試験体と比較して部材角  $1/100\text{rad}$  までのエネルギー吸収性能は小さく、部材角  $1/33\text{rad}$  以降のエネルギー吸収性能は同程度であった。最大耐力実験値と断面解析結果を比較すると、正側実験値は破砕剤充填パイプを考慮した解析結果、負側実験値は破砕剤充填パイプを考慮していない解析結果に近い傾向がみられた。加力前最大ひび割れ幅が  $1.6\text{mm}$  の試験体では、負側の最大耐力実験値が破砕剤充填パイプを考慮していない解析値よりも小さかった。

せん断破壊型試験体において、加力前ひび割れ幅と試験体の最大耐力に明瞭な関係はみられなかった。加力前ひび割れは、部材角  $1/100\text{rad}$  までの剛性および最大耐力時の部材角に影響を及ぼした。加力前ひび割れ幅が大きい場合、主筋に沿ったひび割れの拡幅により顕著なせん断ひび割れの発生が抑制され、コンクリート有効圧縮強度の低下が小さくなり、ひび割れ幅が小さい試験体と同程度以上の耐力およびエネルギー吸収性能を発揮したと考えられる。

曲げ降伏先行型試験体およびせん断破壊型試験体の両者において、加力前ひび割れ幅は部材の剛性低下および最大耐力時の部材角の増大をもたらしたが、定量的な評価には至っておらず未解明な点が多い。今後の課題として、加力前ひび割れ幅の影響を考慮した最大耐力の定量的な評価が挙げられる。加力前ひび割れによる付着劣化の程度をパラメータとした試験体による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、および論文推敲に至るまで終始親身に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、研究において的確な助言、丁寧なご指導および試験体製作工程の助言を賜りました。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 SYLLAMADOU SAKHIR 氏、上山泰輝氏、越前沙紀氏、大塚雅高氏、高橋優太氏、並木啓恭氏、安田卓氏、同期である須永大揮氏、山田恒平氏、浅山智氏、後輩である藤原海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] 船木裕之、山川哲雄、中田幸造：沖縄の西海岸で暴露した大型 RC 柱の耐久性能と耐震性能に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.76、No.666、pp.1479-1488、2011.8
- [2] 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
- [3] 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、1999
- [4] 中山耕一、山川哲雄、伊良波繁雄、枇杷田篤：電食試験により腐食した RC 柱の弾塑性挙動に関する実験的挙動、コンクリート工学会年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.883-888、1995
- [5] 藻川哲平、金久保利之、八十島章、大屋戸理明：鉄筋腐食によってひび割れが生じた RC 柱の中心圧縮性状、コンクリート工学会年次論文集、Vol.38、No.2、pp.151-156、2016.7
- [6] 松島学、横田優、関博：鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量、コンクリート工学会年次論文集、Vol.26、No.2、pp.1669-1674、2004
- [7] Syll, A. S., Kawamura, Y., Kanakubo, T., Simulation of Concrete Cracks due to Bar Corrosion by Aluminum Pipe Filled with An Expansion Agent, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure IV, pp.55-56, 2018.9
- [8] 油野登梧、金久保利之、Syll Amadou Sakhir：破砕剤充填パイプにより腐食ひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状、コンクリート工学会年次論文集、Vol.41、No.2、pp.109-114、2019.7
- [9] 加藤絵万、岩波光保、伊藤始、横田弘：繰返し荷重を受ける RC はりの曲げ耐力に及ぼす鉄筋腐食の影響、コンクリート工学会年次論文集、Vol.25、No.2、pp.1849-1854、2003
- [10] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、2010
- [11] 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
- [12] Popovics, S : A numerical Approach to the Complete Stress – Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973
- [13] 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
- [14] 佐藤吉孝、山本貴士、服部篤史、宮川豊章：せん断補強筋および主筋の腐食が RC 部材のせん断耐荷特性に与える影響、コンクリート工学会年次論文集、Vol.25、No.1、pp.821-826、2003.7