

博 士 論 文

拘束型重ね継手によるプレキャスト部材接合部の
構造性能の評価に関する研究

2023年3月

前橋工科大学大学院 工学研究科
環境・生命工学専攻

飯塚 豊

拘束型重ね継手によるプレキャスト部材接合部の 構造性能の評価に関する研究

要 旨

建設現場におけるコンクリート工の生産性向上が課題となっており、現場打ちコンクリート構造物のプレキャスト化が推進されている。プレキャスト化による工期短縮は、周辺交通への影響や安全に対するリスク低減、現場での建設機械の稼働日数の減少による CO₂ 排出量の削減など、社会環境へ与える影響は大きいといえる。しかし、それを数値化できる具体的な評価指標が明確化されていないこともあり、ボックスカルバートや擁壁類において、特に大型構造物のプレキャスト化が進んでいない。そのため、設計段階において経済性以外のメリットを適正に評価できる指標の策定について、i-Construction 委員会では短期的な検討事項とされており、その指標が早期に示され運用されることが望まれる。また、大型構造物のプレキャスト化を推進するためには、必ず発生する接合部の確実な接合法と、一般に割高といわれるプレキャスト部材のコスト改善が求められる。これまでもプレキャスト部材の接合法は実用化されているが、継手部材のコスト改善と継手施工の合理化に検討の余地があった。

そこで、従来から採用されている鉄筋継手において、最も経済的で特殊な施工技能が不要な重ね継手に着目し、プレキャスト部材同士を接合できる鉄筋継手に応用することを考えた。重ね継手の応力伝達機構を応用した本継手は、突き合せた主鉄筋に対し、主鉄筋と重ね合わせる添筋を内部に配置したスパイラル鉄筋により重ね合わせ部を拘束し、継手周囲の充填材にはモルタルを採用した。モルタルを用いることでスパイラル鉄筋のピッチを密にして拘束効果を高め、一般の重ね継手に対し重ね長さを 1/4 程度まで短縮させた拘束型重ね継手である。継手を構成する鋼材を異形棒鋼のみとすることでコストを抑え、接合時の締付工と施工技能を不要とすることで継手施工の合理化を図った。

本研究では、拘束型重ね継手に関する種々の実験的検討を行い、プレキャスト部材接合部の構造性能を評価した。そして、その結果をもとにプレキャスト部材の設計法と施工法を提案し、継手施工の合理化を評価した。本研究の内容を要約すると以下のとおりである。

- (1) 従来から採用されているプレキャスト部材接合用の鉄筋継手について事例をまとめ、さらに重ね継手を応用した接合法に関する既往の研究について紹介し、経済性、施工性および安全性について改善の余地があることを述べた。また、スパイラル鉄筋の拘束効果に関する既往の研究より、拘束鉄筋の端部閉合の有無による影響は、1 リング分であることを紹介した。
- (2) 拘束型重ね継手単体の引張性能を評価し、継手の基本構成を決定するため、重ね長さ、スパイラル鉄筋のピッチに着目して実施した、継手単体の引張試験について述べた。継手の種類は、対象とする主鉄筋を D13 から D25 の 5 タイプとした。その結

果、D13 は重ね長さを主鉄筋径の 8 倍、D16、D19、D22、および D25 は 9 倍とし、スパイラル鉄筋の補強筋比を 6.2%とすることで、SD345 の鉄筋継手の性能を発揮することがわかった。

- (3) 実用化する最小サイズ(D13 タイプ)と最大サイズ(D25 タイプ)の継手を用いて、部材の中央で接合したはりに曲げ载荷を行い、一体成形の部材と同等の曲げ性能を有するか評価するために実施した、はりの曲げ実験について述べた。継手は、SD345 の鉄筋継手の性能を発揮する継手を用いた。その結果、継手を用いて接合した部材の曲げ耐力、剛性、変位性状、およびひずみ性状は、いずれのタイプも一体成形の部材と同等であることがわかった。
- (4) 曲げ実験と同じ D13 および D25 タイプの継手を用いて、せん断スパンの中央で接合したはりにせん断载荷を行い、一体成形の部材と同等のせん断性能を有するか評価するために実施した、はりのせん断実験について述べた。その結果、D13 タイプは曲げ耐力がせん断耐力を上回る設計ができず曲げ破壊したが、接合部にせん断力が作用しても、一体成形の部材と同等の構造性能であることがわかった。また、D25 タイプのせん断耐力、変位性状、およびひずみ性状は、一体成形の部材と同等であることがわかった。
- (5) はり実験と同じ D13 および D25 タイプの継手を用いて接合した実物大壁試験体に正負繰り返し载荷を行い、一体成形の部材と同等のじん性を有するか評価するために実施した、壁試験体の曲げじん性実験について述べた。試験体は、ボックスカルバートの底版と側版の接合部を再現した壁試験体であり、壁部材厚と断面幅を実物大とした。継手を同一断面に配置し、接合部は塑性ヒンジ区間に設けないことを前提とした。また、本継手の性能に大きく影響する継手開口部のモルタル充填性状について、実施工と同様に施工した試験体の接合部を载荷実験後にスライスし、モルタルの充填性状と継手の健全性を確認した。その結果、継手を用いて接合した部材の最大荷重とじん性率は、いずれのタイプも一体成形の部材と同等であることがわかった。また、モルタルは十分な充填性状を得られており、载荷実験後の継手の健全性も確認できた。
- (6) 拘束型重ね継手を用いたプレキャスト部材の設計法と施工法について、継手単体の引張試験と実物大壁試験体を作製したときの結果をもとに整理し述べた。D13 から D25 のいずれのタイプも重ね長さを主鉄筋径の 10 倍とし、継手施工の誤差を管理することで、実験で確認した重ね長さを担保できることを示した。また、継手施工の合理化の評価として、ボックスカルバートを例とした本継手と従来のカプラー式継手との比較では、プレキャスト部材の材料費で約 20%、施工費で約 10%、施工日数で約 13%の改善が図れる可能性があることがわかった。
- (7) 本研究において得られた結論を示し、実用化に向けた課題について整理した。

目 次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 拘束型重ね継手の概要	3
1.3 本論文の構成	7

第2章 鉄筋継手工法と既往の研究

2.1 鉄筋継手工法	10
2.2 プレキャスト部材同士の接合工法	12
2.3 プレキャスト部材接合用機械式継手の実用例	13
2.4 重ね継手を応用したプレキャスト部材の接合に関する研究	15
2.5 スパイラル鉄筋による重ね継手の拘束効果に関する研究	19
2.6 第2章のまとめ	20

第3章 拘束型重ね継手の引張性能評価

3.1 序節	23
3.2 試験概要	23
3.2.1 試験のシリーズ	23
3.2.2 試験体の概要	25
3.2.3 使用材料	30
3.2.4 載荷方法	32
3.2.5 計測項目	32
3.3 試験結果および考察	33
3.3.1 シリーズ1	33
3.3.2 シリーズ2	42
3.4 第3章のまとめ	44

第4章 拘束型重ね継手を用いたはりの曲げ性能評価

4.1 序節	45
4.2 実験概要	45
4.2.1 試験体の形状および諸元	45
4.2.2 使用材料	47
4.2.3 載荷方法	49
4.2.4 計測項目	50

4.3	実験結果および考察	50
4.3.1	破壊形態	50
4.3.2	降伏荷重と破壊荷重	52
4.3.3	ひび割れ幅	53
4.3.4	変位性状	54
4.3.5	ひずみ性状	56
4.4	第4章のまとめ	57

第5章 拘束型重ね継手を用いたはりのせん断性能評価

5.1	序節	58
5.2	実験概要	58
5.2.1	試験体の形状および諸元	58
5.2.2	試験体の設計	59
5.2.3	使用材料	62
5.2.4	載荷方法	64
5.2.5	計測項目	64
5.3	実験結果および考察	65
5.3.1	破壊形態	65
5.3.2	破壊荷重	67
5.3.3	ひび割れ幅	67
5.3.4	変位性状	68
5.3.5	ひずみ性状	69
5.4	第5章のまとめ	70

第6章 拘束型重ね継手を用いた実物大壁試験体の曲げじん性評価

6.1	序節	71
6.2	実験概要	71
6.2.1	試験体の形状および諸元	71
6.2.2	使用材料	78
6.2.3	載荷方法	80
6.2.4	計測項目	82
6.2.5	試験体耐力の計算	83
6.3	実験結果および考察	85
6.3.1	主鉄筋降伏までの性状	85
6.3.2	各載荷サイクルにおける試験体の状況	87
6.3.3	ひび割れの進展状況および破壊性状	113

6.3.4	ひずみ性状	114
6.3.5	最大荷重と変形性能および履歴曲線	119
6.3.6	モルタルの充填性状と継手の損傷状況	124
6.4	第6章のまとめ	126

第7章 拘束型重ね継手を用いたプレキャスト部材の設計法と施工法および 継手施工の合理化

7.1	序節	127
7.2	継手の構造細目	127
7.2.1	継手の適用範囲	127
7.2.2	継手の強度規格	128
7.2.3	継手の形状規格	129
7.2.4	継手の配筋基準	131
7.3	プレキャスト部材の設計法	134
7.3.1	許容応力度設計法	134
7.3.2	限界状態設計法	135
7.4	プレキャスト部材の施工法	136
7.4.1	使用材料の諸元	136
7.4.2	継手の施工手順	137
7.4.3	継手の接合作業における管理事項	138
7.5	継手施工の合理化	139
7.5.1	継手材料の価格推移	139
7.5.2	材料費の比較	140
7.5.3	標準的な施工費	141
7.5.4	施工性の比較	142
7.5.5	施工費と施工日数の比較	145
7.6	第7章のまとめ	148

第8章 結論

8.1	本研究のまとめ	150
8.2	実用化における今後の課題	152

謝 辞

第1章 序論

1.1 研究の背景

今後の建設現場において、熟練技能者の高齢化や生産年齢人口の減少傾向をみても、技能者不足となることが明らかであり、国土交通省は建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設現場の実現を目的とし、2015年にi-Construction¹⁾委員会を設置した。その委員会における取り組みの1つとして、コンクリート工における生産性向上が課題となっており、現場打ちコンクリート構造物のプレキャスト化が推進されている。

土木構造物におけるプレキャスト化の現状として、主に道路や河川の新設・改良工事に用いられるボックスカルバートや擁壁類では、一体成形で製造・運搬可能な範囲の小型構造物については、標準的な形状寸法が明示²⁾されるなど、比較的プレキャスト化が進んでいる。一方で、大型構造物は小型構造物と比べプレキャスト化が進んでいない。その要因として、これまでの土木構造物における技術指針等は、主に現場打ちコンクリート構造物を対象とした発注者や設計者向けの指針等であり、プレキャスト構造物に関する適切な技術指針等がなかったことがあげられる。しかし、近年のプレキャスト化推進の中で、プレキャスト部材の製造に関する内容も含めた指針等^{3)~5)}も発刊されるようになってきている。またプレキャスト部材は、現場打ち構造物に対し工期の短縮が大きなメリットであるが、直接工事費比較では割高となることから、予備設計の段階で採用されないケースが多い。そのため、i-Constructionで検討しているVfM (Value for Money)の考えにもとづく評価指標を早急に確立し、予備設計の段階で適切な工法選定を行えるようにする必要がある。

また、大型構造物のプレキャスト化には、製造・運搬の問題から分割されたプレキャスト鉄筋コンクリート部材（以下PCa部材という）を施工現場に搬入し、現場打ちコンクリートと接合するか、PCa部材同士を接合して構築する必要がある。そのため、大型構造物のプレキャスト化を推進していくためには、必ず発生する接合部について、安全性・経済性・施工性を担保できる確実な接合工法が必要であり、PCa部材の製造者が発注者や施工者に提案できることが重要といえる。

従来から、PCa部材を接合する鉄筋継手^{6)~8)}として、重ね継手、溶接継手、機械式継手が用いられている。PCa部材と現場打ちコンクリートの接合では、PCa部材から突出させる鉄筋長に制約がない場合は、重ね継手が最も経済的であるため採用されることが多く、突出長に制約がある場合には、フレア溶接継手が一般に用いられている。また、鉄筋突出に制約がある場合などは、機械式継手が用いられている。機械式継手としては、モルタル充填継手、ねじ節鉄筋継手、摩擦圧接ねじ継手等があるが、ねじ節鉄筋や端部がねじ加工された鉄筋を直接カプラーと勘合させる継手は、PCa部材同士の接合には一般に適用できない。一方PCa部材同士の接合では、主に機械式継手が用いられており、モルタル充填継手やカプラー式継手が採用されている。プレキャスト化の推進において、特殊車両で運搬できる部材であれば

プレキャストの採用が原則化される中で、オールプレキャストに対応できる PCa 部材同士の接合法がより重要である。

PCa 部材同士の接合で用いられるモルタル充填継手は、PCa 部材の一方にスリーブを埋設しておき、もう一方の部材からは、スリーブ内に挿入する鉄筋を突出させておく。スリーブ内に突出鉄筋を挿入して接合した際に、接合面同士には 20mm 程度の隙間ができるように接合する。接合面同士の隙間と、スリーブ内の鉄筋との隙間に、専用の高強度モルタルを充填して接合する工法である。この接合法は、全数継手ではあるが比較的経済的である。しかし、接合部の形状が異なる 2 種類の PCa 部材となり、さらに片方の PCa 部材からは鉄筋が突出していることが、製造時や施工時における取扱い上の課題といえる。一方、PCa 部材同士を接合する継手として、ねじ式構造のカプラー式継手を実用化している。その継手は、主鉄筋 3 本に対し 1 本以上の割合でアンカー鉄筋を添わせ、ねじ式のカプラーで勘合する継手である。全数継手に対し、接合箇所が 1/3 程度に減少できることが特徴であるが、材料費の高騰によるコスト改善が課題となっており、カプラーの勘合に高トルクを導入する必要があることも、施工性において改善の余地がある。

既往の研究では、PCa 部材同士の接合を目的とし、経済的で施工技能が不要な、重ね継手を応用した研究が報告されている。この研究では、突き合せた主鉄筋に軸方向鉄筋を添わせ、周囲をスパイラル鉄筋で拘束し、コンクリートを充填して接合した試験体を作製し、継手単体とはりの実験結果を報告している。しかし、重ね長さが主鉄筋径の 25 倍前後の研究報告であり、実用には継手長の短縮が課題といえる。

本研究は、PCa 部材同士を接合する継手のこれらの課題に着目し、コンクリート工の生産性向上の対策である、現場打ちコンクリート構造物のプレキャスト化の推進につなげるため、PCa 部材同士の継手施工の合理化を目的とした継手の研究を行うこととした。

1.2 拘束型重ね継手の概要

本継手は、写真-1.1に示すようなPCa部材同士の接合を対象としている。特殊な材料と施工技能が不要な重ね継手を応用し、突き合わせた主鉄筋同士に4本の添筋を重ね合わせ、その周囲をスパイラル鉄筋で拘束した拘束型重ね継手である。継手周囲の充填材にモルタルを採用し、スパイラル鉄筋のピッチを密にして拘束効果を高め、重ね長さを一般の重ね継手の1/4程度まで短縮させた。

拘束型重ね継手の一例を写真-1.2に、継手の構造を図-1.1に示す。継手は、添筋の両端



写真-1.1 継手の適用例

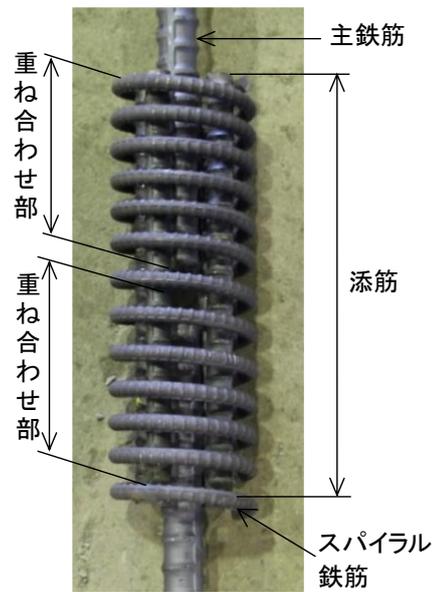


写真-1.2 拘束型重ね継手

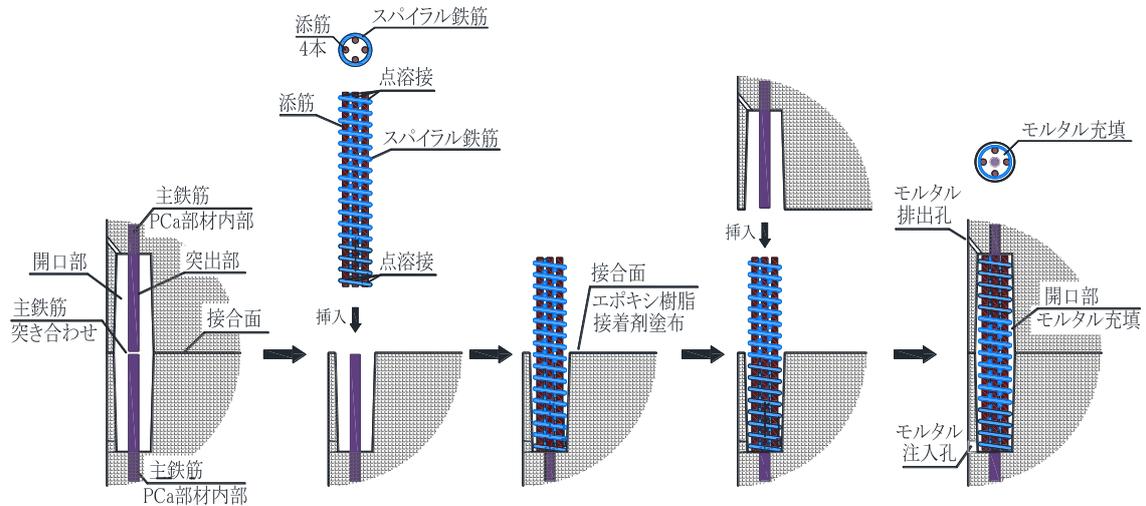


図-1.1 継手の構造

部をスパイラル鉄筋に溶接固定されており、鉄筋カゴ状になっている。継手を用いて接合する PCa 部材は、主鉄筋の端部が突出した開口部を全数の主鉄筋に対し設けておく。PCa 部材の上下接合では、下部材の突出鉄筋が鉄筋カゴに挿入されるように、鉄筋カゴを開口内にセットする。そして、上部材の開口内に突出した主鉄筋が、鉄筋カゴに挿入されるように突き合わせて接合する。上下部材の接合面には、止水性能を向上させるためエポキシ樹脂接着剤^{9),10)}を塗布し、開口部に無収縮モルタルを充填して一体化させる。

本継手の構造詳細を図-1.2 に示す。PCa 部材の主鉄筋に作用する引張力は、スパイラル鉄筋の内部にある添筋に伝達される。そして、主鉄筋に作用する引張力によって発生するモルタルの膨張圧は、スパイラル鉄筋と添筋により拘束される。

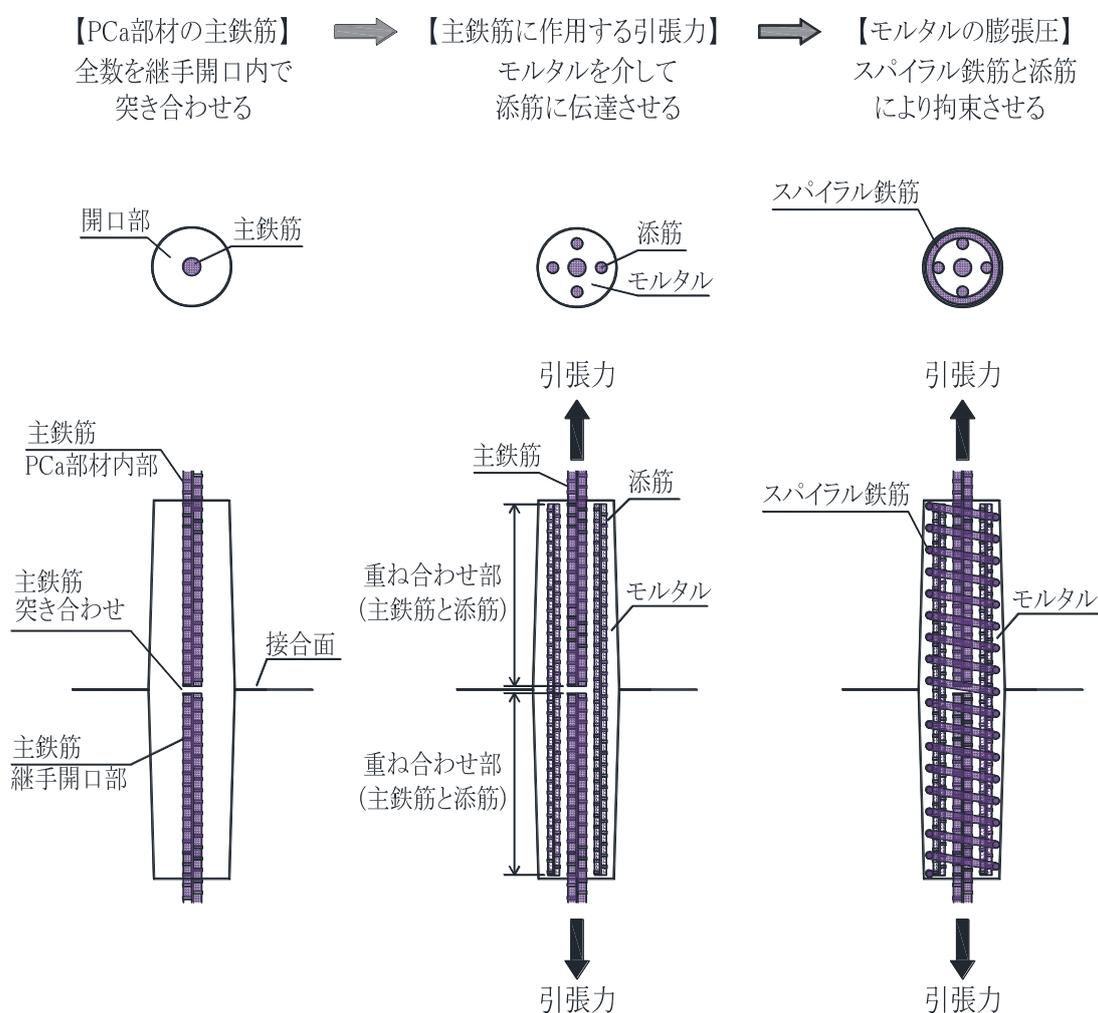


図-1.2 継手の構造詳細

本継手の応力伝達機構を図-1.3 に示す。主鉄筋と添筋の応力伝達機構は、一般の重ね継手と同様であり、主鉄筋と添筋間のモルタルを介して伝達される。重ね継手の応力伝達機構は鉄筋の定着と似ているため、土木学会コンクリート標準示方書¹¹⁾では、重ね合わせ長は鉄筋の基本定着長をもとに算出され、同一断面に継手を配置する場合は、一般に主鉄筋径の40倍程度となる。

主鉄筋に作用する引張力は、主鉄筋の節と添筋の節を連結する方向でモルタルを介して添筋に伝達される¹²⁾。この部分のモルタルは、主鉄筋と添筋の間で、圧縮を受けるストラットの役割をしている。この伝達方向の力は、主鉄筋軸方向の付着力と、軸直角方向の拘束圧で構成されている¹³⁾。また、主鉄筋の引張によって発生するモルタルの膨張圧は、添筋の外周に配置されたスパイラル鉄筋により拘束される。

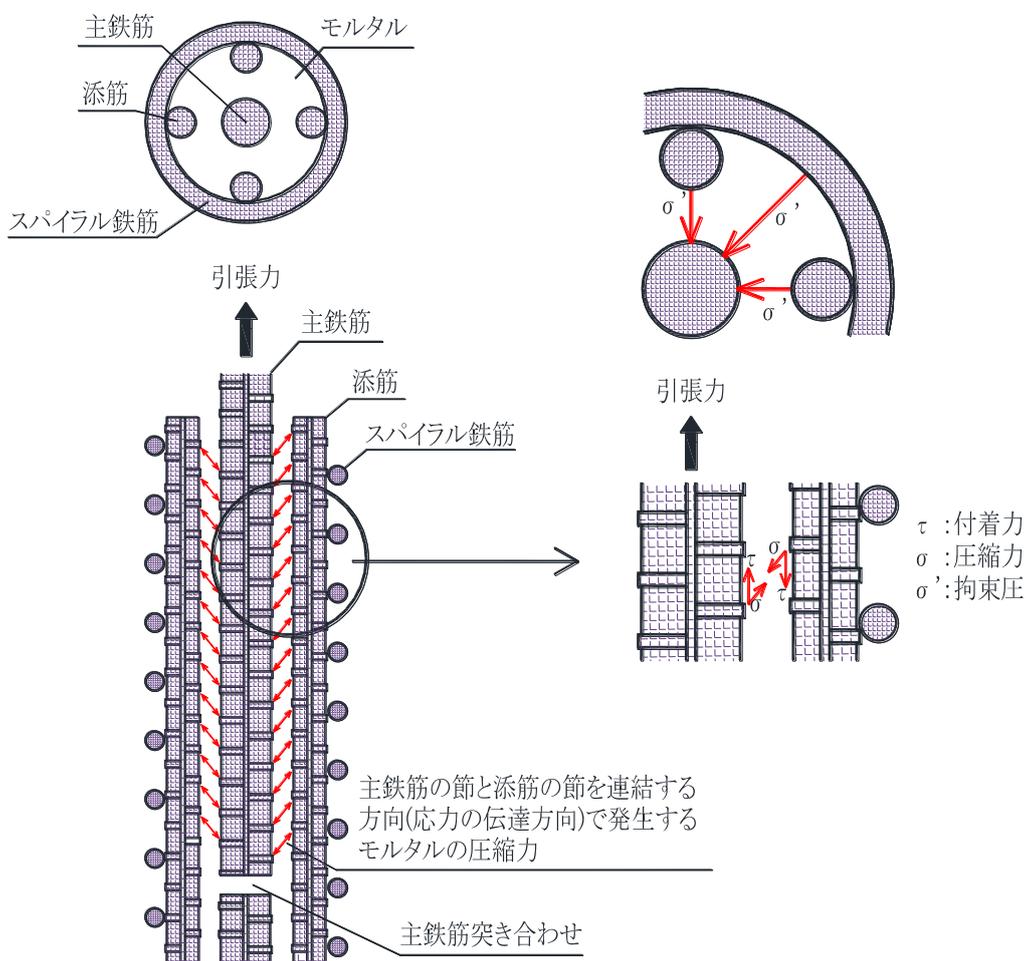


図-1.3 継手の応力伝達機構(模式図)

本継手は以下の優位性をもつ。

- 継手材料は、一般に使用されている材料だけで構成されている。
 - 鋼材は、一般の異形棒鋼であり特殊な加工を必要としない。
 - 充填材は、一般のセメント系無収縮モルタルである。
 - 接着剤は、一般のプレキャストコンクリート用樹脂系接着剤である。
- 重ね長さは、一般の重ね継手の 1/4 程度である。
- 接合面に突出鉄筋がなく、PCa 部材の取扱いや施工性がよい。
- 接合時の施工技能や施工工具が不要である。
- 接合確認が容易である。
- PCa 部材同士の接合全般に適用できる。

1.3 本論文の構成

本論文は、図-1.4 に示すとおり第1章「序論」から第8章「結論」まで、本章を含め全8章で構成されている。

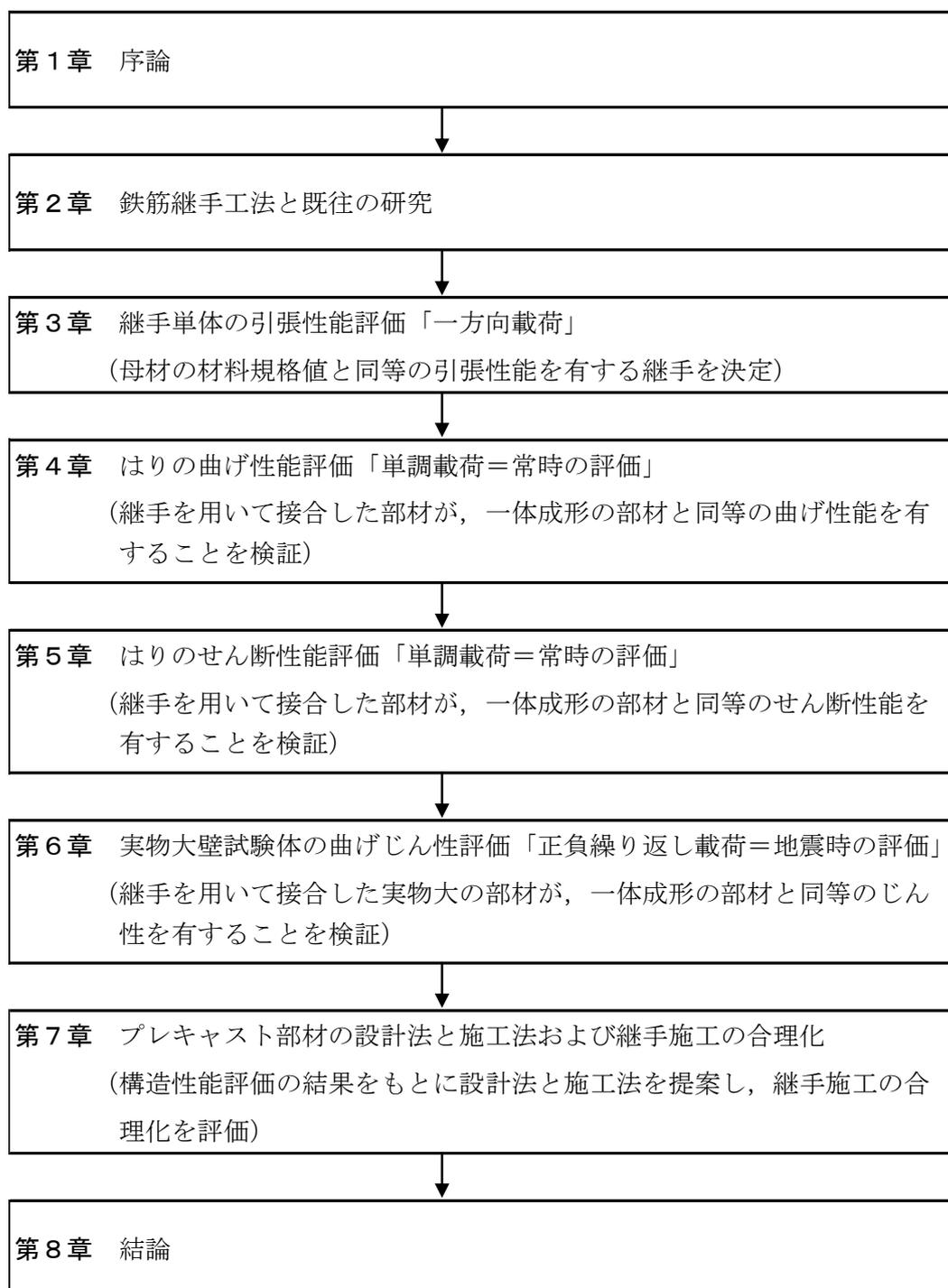


図-1.4 本論文の内容と構成

第1章では、本研究の背景と拘束型重ね継手の概要、および本論文の構成を述べる。継手の概要では、本継手の構造と応力伝達機構、および優位性を示した。

第2章では、鉄筋継手工法と既往の研究について述べる。従来から採用されている鉄筋継手工法と PCa 部材の接合工法について概要を整理し、さらに本研究と同様の重ね継手を応用した接合工法に関する既往の研究について紹介し、それぞれの課題について示した。また、スパイラル鉄筋の拘束効果に関する既往の研究より、拘束鉄筋の端部閉合の有無が拘束効果に及ぼす影響について解析した研究報告を紹介した。

第3章では、拘束型重ね継手単体の引張性能について述べる。継手の基本構成を決定するため、重ね長さ、スパイラル鉄筋のピッチに着目し、継手単体の引張試験を実施した。継手の種類は、対象とする主鉄筋を D13, D16, D19, D22, および D25 とした 5 タイプである。この試験の目的は、SD345 の鉄筋継手の性能を発揮する継手の仕様を決定することである。

第4章では、一体成形の部材と継手を用いて接合した部材の曲げ性能について述べる。第3章で得られた結果から、D13 タイプ（最小サイズ）と D25 タイプ（最大サイズ）の継手を用いて部材の中央で接合したはりに単調載荷による曲げ載荷を行い、一体成形の部材と同等の曲げ性能を有するか評価するため、はりの曲げ実験を実施した。継手は、D13 および D25 タイプとも、SD345 の鉄筋継手として性能を発揮でき、最も経済的な仕様の継手を第3章の結果から選定して用いた。この実験の目的は、常時における部材の曲げ性能の評価であり、一体成形の部材と比較することで、従来の設計法の適用を想定している。

第5章では、一体成形の部材と継手を用いて接合した部材のせん断性能について述べる。第4章と同じ D13 および D25 タイプの継手を用いてせん断スパンの中央で接合したはりに単調載荷によるせん断載荷を行い、一体成形の部材と同等のせん断性能を有するか評価するため、はりのせん断実験を実施した。この実験の目的は、常時における部材のせん断性能の評価であり、一体成形の部材と比較することで、従来の設計法の適用を想定している。

第6章では、一体成形の部材と継手を用いて接合した実物大壁部材のじん性について述べる。第4章と同じ D13 および D25 タイプの継手を用いて接合した実物大壁試験体に正負繰り返し載荷を行い、一体成形の部材と同等のじん性を有するか評価するため、壁試験体の曲げじん性実験を実施した。試験体は、ボックスカルバートの底版と側版の接合部を再現した壁試験体であり、壁部材厚と断面幅を実物大とした。継手は同一断面に配置し、接合部は塑性ヒンジ区間に設けないことを前提とした。また、本継手の性能に大きく影響する継手開口部のモルタル充填性状について、実施工と同様に施工した試験体の接合部を載荷実験後にスライスし、モルタルの充填性状と継手の健全性を確認した。この実験の目的は、地震時における部材のじん性の評価であり、一体成形の部材と比較することで、従来の設計法の適用を想定している。

第7章では、拘束型重ね継手を用いた PCa 部材の設計法と施工法および継手施工の合理化について整理し述べる。設計法では、第3章の継手単体の引張試験と第6章で実物大壁試験体を作製したときの接合部の実測値をもとに、SD345 の鉄筋継手として性能を発揮で

きるための安全率を定め、実用化する継手の仕様を提案した。施工法では、継手の性能を担保するための施工手順と、接合工程における管理事項を示した。また、本継手と従来のカバー式継手を用いたボックスカルバートの材料費と施工費、および施工日数を試算して比較し、継手施工の合理化について評価した。

第8章では、本研究の結論と実用化に向けた課題について述べる。

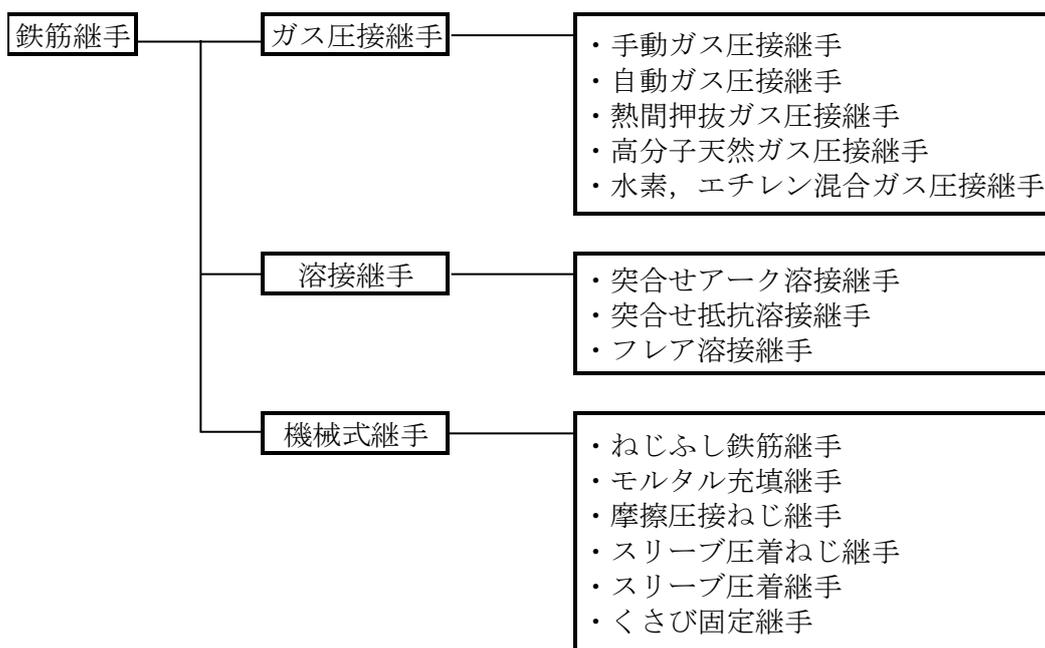
第1章の参考文献

- 1) i- Construction コンクリート工生産性向上検討協議会：国土交通省，2016.
- 2) 国土交通省：土木工事におけるプレキャストコンクリート製品の設計条件明示要領（案），2016.3
- 3) 道路プレキャストコンクリート製品技術協会：道路プレキャストコンクリート工指針，2017.10
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー158 プレキャストコンクリートを用いた構造物の構造計画・設計・製造・施工・維持管理指針（案），2021.
- 5) 日本コンクリート工学会：接合部を有するプレキャスト・プレストレストコンクリート構造の設計法研究委員会報告書，2021.3
- 6) 日本鉄筋継手協会：鉄筋継手工事標準仕様書機械式継手工事（2017年），2017.
- 7) 土木学会：コンクリートライブラリー156 鉄筋定着・継手指針 [2020年版]，2020.
- 8) 日本鉄筋継手協会：鉄筋継手統計調査報告書（1996年度～2020年度），2021.10
- 9) 池田正志，武田敏充，小谷洋，辻幸和：1液性エポキシ樹脂接着剤を用いたプレキャストコンクリートの接着強度，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp.1345-1350，1999.7
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書 規準編 [2018年制定]，プレキャストコンクリート用樹脂系接着剤（橋げた用）品質規格（JSCE-H 101-2013），pp.453-456，2018.
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編 [2017年制定]，2017.
- 12) 後藤幸正，尾坂芳夫，鈴木基行：コンクリート工学（Ⅱ）設計，彰国社，1997.9
- 13) 岡野素之，大内一，田中浩一：リブ付鋼管による重ね継手の応力伝達性能，第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.185-190，1995.

第2章 鉄筋継手工法と既往の研究

2.1 鉄筋継手工法

鉄筋継手工法は、鉄筋相互を接合する工法とコンクリートとの付着を介して接合する工法があり、土木学会鉄筋定着・継手指針¹⁾では、図-2.1に示す継手を対象として、設計と施工に関する考え方が示されている。これらの継手のうち、ガス圧接継手と溶接継手は、主に現場打ちコンクリートの鉄筋継手として用いられており、溶接継手の一種であるフレア溶接継手は、PCa部材と現場打ちコンクリートを接合する際に、継手長の短縮を目的に用いられることがある。機械式継手は多くの継手が実用化されており、その分類を図-2.2に示す。機械式継手のうち、ねじ筋鉄筋継手や摩擦圧接ねじ継手など、端部がねじ加工された鉄筋を直接カップラーと勘合させる継手は、PCa部材同士の接合には一般に適用できない。また、PCa部材と現場打ちコンクリートの接合に機械式継手を用いることはあるが、PCa部材からの鉄筋突出に制約がない場合は、最も経済的で施工技能が不要な重ね継手²⁾を用いることが多く、PCa部材同士の接合には、モルタル充填継手を採用するケースが増えている。



※出典：土木学会 鉄筋定着・継手指針 [2020年版]

図-2.1 鉄筋継手工法の一覧

機械式継手の名称		継手の構成	備考
ねじ節鉄筋継手	トルク固定方式		鉄筋または両側のナットを締め付けて固定
	グラウト固定方式		カプラーと鉄筋の隙間にグラウトを充填し固定 ・有機系グラウト ・無機系グラウト
モルタル充填継手			スリーブと鉄筋の隙間にモルタルを充填し固定
摩擦圧接ねじ継手 (端部ねじ加工継手)			鉄筋端部にねじ部品を摩擦圧接で接続 カプラーとナットを締め付けて固定
スリーブ圧着ねじ継手 (端部ねじ加工継手)			雌ねじ加工したスリーブを鉄筋に圧着し、接続ボルトで接続
スリーブ圧着継手	断続圧着方式		スリーブを断続圧着
くさび固定継手			鉄筋重ね部にスリーブをセットし、スリーブの挿入孔にウェッジを圧入し固定
カプラー式継手 (KTジョイント)			鉄筋の先端がねじ加工されたアンカー鉄筋を雄雌カプラーに取り付け、カプラーと両側のナットを締め付けて固定

※出典：土木学会 鉄筋定着・継手指針 [2020年版] (カプラー式継手は除く)

図-2.2 機械式継手の分類

2.2 プレキャスト部材同士の接合工法

PCa 部材同士の接合工法としては、従来から一般的に採用されている工法と、PCa 部材メーカーが独自に研究開発を行っている工法があり、その実用例を図-2.3 に示す。PC 鋼棒を用いた PC 緊張工法は、従来から一般的に採用されている工法である。PCa 部材の設計法として、例えば道路用のボックスカルバートでは、内幅 5,000×内高 2,500mm までのサイズについては、既往の被災事例から大きな被害が生じた事例がないため、従来型ボックスカルバートとして、地震動の作用による照査を省略してよいとされている。しかし、その範囲を大きく超える場合や特殊形式のカルバートについては、地震動に対する照査が要求されるようになった³⁾。PC 鋼棒により圧着された接合部は、一般に常時の作用に対しフルプレストレッシング状態の剛結合として設計されている。しかし、地震動の作用に対する照査において、接合部のフルプレストレッシング設計について検討の必要性があり、松田ら⁴⁾、井形ら⁵⁾による実験的研究が行われている。

ボックスカルバート等の隅角部を接合する工法として、松田ら⁶⁾、松本ら⁷⁾による高強度鉄筋とナットを用いた鉄筋圧着工法や、佐川ら⁸⁾によるループ継手を用いた接合工法が提案されている。鉄筋圧着工法は、内部鉄筋と重ね合わせた高強度鉄筋を片方の部材から突出させておき、もう一方の部材の貫通孔を通してナットで固定する工法である。ループ継手による接合工法は、プレキャスト床版の接合同様の工法を隅角部に応用した工法であり、重ね合わせたループ内に鉄筋を配置し、コンクリートを打設して一体化する工法である。いずれの工法も塑性化が想定される部位で接合されることから、松本ら⁹⁾、片山ら¹⁰⁾により、正負交番載荷実験による耐震性能評価に関する研究が実用化と並行して行われている。

近年、採用例が多い接合工法がモルタル充填継手^{11,12)}であり、PCa 部材に適用する機械式鉄筋継手のガイドライン¹³⁾において対象とされている。また本研究を行う背景となり、実用化されている継手がカプラー式継手（以下 K T ジョイントという）^{14)~19)}である。2017 年制定の土木学会コンクリート標準示方書²⁾からは、これらの機械式継手による接合工法に関して、設計法における考え方が記述されるようになった。次節では、これまで実用化してきた K T ジョイントと、採用例が増えているモルタル充填継手について概要と課題を述べる。

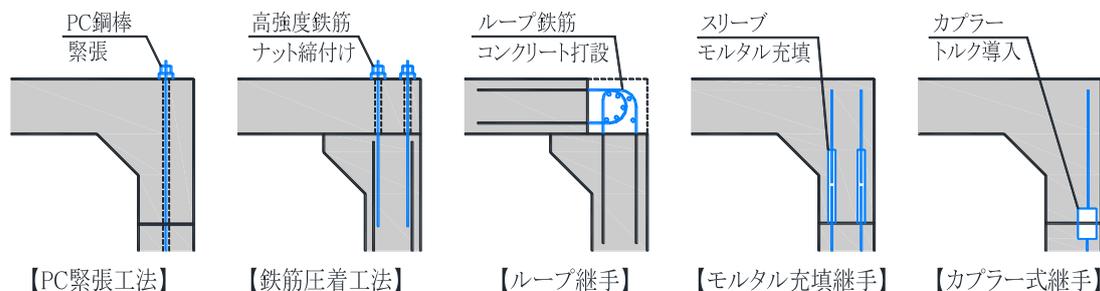


図-2.3 PCa 部材同士の接合工法（実用例）

2.3 プレキャスト部材接合用機械式継手の実用例

KTジョイントを図-2.4 に、モルタル充填継手を図-2.5 に、これらの継手の概要を表-2.1 に示す。KTジョイントの最大の特徴は、PCa 部材の内部主鉄筋 3 本に対し、1 箇所接合できることである。しかし、ロックナットと固定ナット以外は、端部がねじ加工されたアンカー鉄筋も含め、すべてがオリジナルの部材であり、継手コストの高騰が最大の課題である。また、施工時の誤差を吸収するためのクリアランスを設けてはいるが、PCa 部材の製

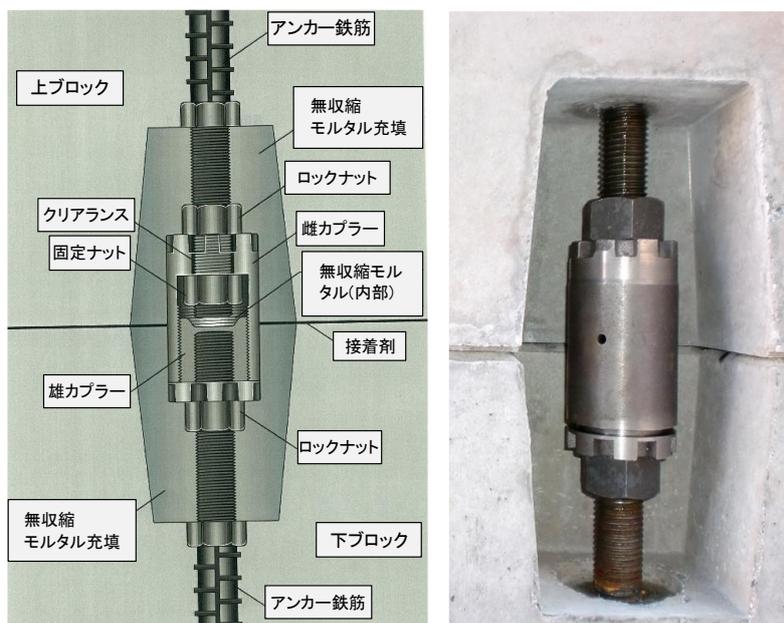
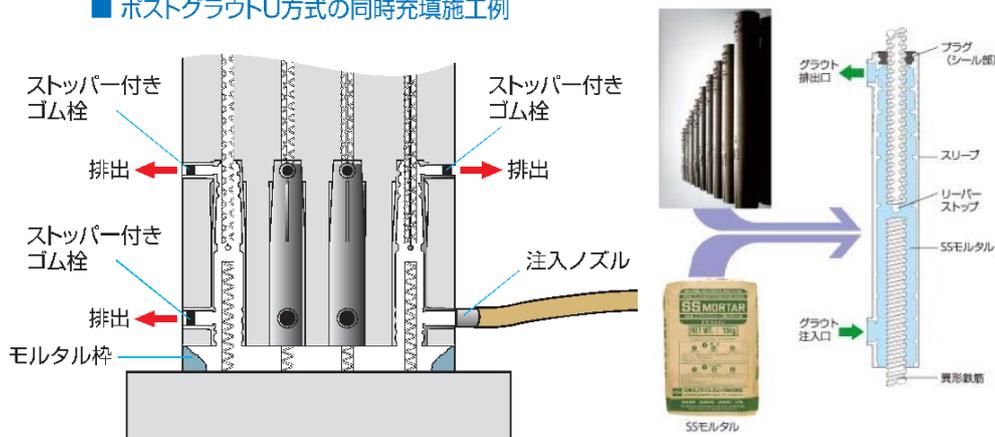


図-2.4 カプラー式継手（KTジョイント）

■ ポストグラウトU方式の同時充填施工例



※日本プライススリーブ株式会社の HP より引用

図-2.5 モルタル充填継手

表-2.1 PCa 部材接合用機械式継手の種類と概要

工法名称	KTジョイント	モルタル充填継手
継手概要	接合するプレキャスト部材の両端部の開口部に主鉄筋3本に1本以上の割合で添寄せたアンカー鉄筋のボルト部を突出させておく。片側の部材のボルトにロックナットと雌カプラー、もう一方の部材のボルトにロックナットと雄カプラーを取り付ける。接合面にエポキシ樹脂接着剤を塗布し、カプラーとロックナットにトルクを導入して接合する。	接合するプレキャスト部材の片側に、主鉄筋の先端が挿入されたスリーブを埋設しておく。接合するもう一方の部材は、主鉄筋の先端を部材から突出させておく。スリーブ内に突出鉄筋を挿入し空隙部と接合面に専用モルタルを充填して接合する。
継手材料	カプラー(鑄鉄製)、ねじ付きアンカー鉄筋、ロックナット、エポキシ樹脂接着剤、無収縮モルタル(圧縮強度:30N/mm ² 以上)	スリーブ(鑄鉄製) 専用モルタル(圧縮強度:70N/mm ² ,120N/mm ² 以上)
接合工具	専用締付け工具	無し
鉄筋の材質	SD295, SD345	SD295, SD345, SD490
および呼び名	D10~D25(継手タイプ: D19, D25, D32, D38)	D16~D51
施工許容誤差	1.5~2.5mm	8~11.5mm
接合面	エポキシ樹脂接着剤塗布	専用モルタル充填
継手内部	無収縮モルタル充填	専用モルタル充填
開口部	無収縮モルタル充填	開口部無し
利点	<ul style="list-style-type: none"> ・接合箇所が少ない(主鉄筋本数の1/3) ・組立て直後の製品移動が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ローコスト ・施工時の許容誤差が大きい
欠点(課題)	<ul style="list-style-type: none"> ・コスト高 ・クリアランス(施工許容誤差)が小さい ・トルクの導入が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・接合する部材同士が異なる形状 ・主鉄筋が製品から突出している ・専用モルタルが必要

作と施工の際には、精度の高い作業が要求される。さらに、カプラーとロックナットに高トルクを導入する必要があることも、作業性や安全性の上で課題といえる。

モルタル充填継手の最大の特徴は、スリーブ内に主鉄筋を挿入してモルタルを充填するだけであり、全数継手ではあるが比較的経済的である。しかし、接合する部材同士の接合部はそれぞれ形状が異なり、PCa 部材の製作には異なる部材と作業工程が必要となる。また、片方の部材から主鉄筋が突出していることも、PCa 部材の製作や施工工程において、取り扱いや安全性に注意を要する。さらに接合面は粗面仕上げによる加工処理が必要であり、充填モルタルが高強度の専用モルタルであることも、コストや資材の汎用性を考えると課題といえる。

2.4 重ね継手を応用したプレキャスト部材の接合に関する研究^{20,21)}

野村らの研究では、PCa部材の接合用として、重ね継手を応用した接合工法の研究が報告されている。図-2.6に示すように、突き合わせた主鉄筋同士に添筋を添わせ、スパイラル鉄筋により重ね合わせ部を補強し、コンクリートを充填する工法である。この研究では、図-2.7に示すような角柱試験体による一方向引張試験を実施している。試験体に使用した鉄筋の材料試験値を表-2.2に、試験体の概要と引張試験結果を表-2.3に示す。主鉄筋はD19とし、重ね長さは主鉄筋径の15.8、21.1、26.3倍の3種類とし、添筋はD10とD13の2種類である。

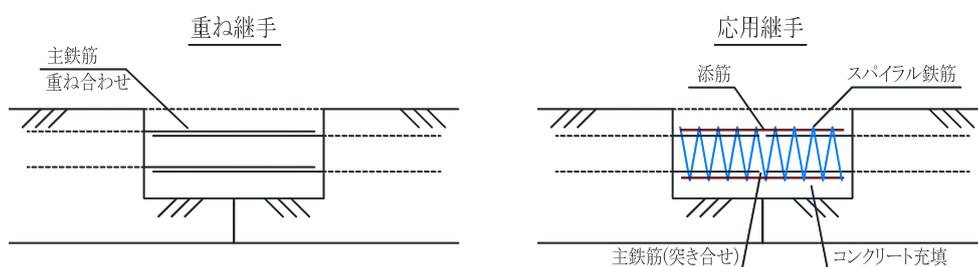


図-2.6 重ね継手の応用イメージ

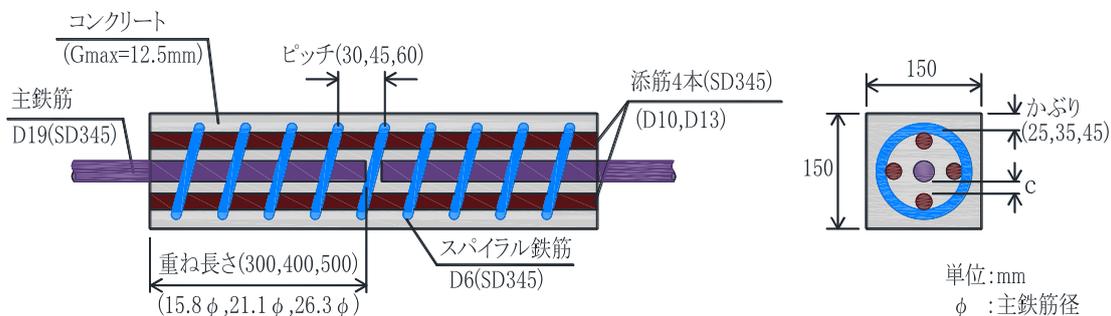


図-2.7 引張試験用の試験体概要図

表-2.2 使用鉄筋の材料試験値

呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	材質
D19	430	580	189	SD345
D13	389	555	179	SD345
D10	443	585	195	SD345

表-2.3 試験体の概要と引張試験結果

試験体 番号	重ね 長さ *1	ピッチ *2 (mm)	添筋	圧縮 強度 *3 (N/mm ²)	c (mm)	かぶり (mm)	降伏点		最大荷重		破壊形態
							応力度 (N/mm ²)	試験値 との比 *4	応力度 (N/mm ²)	試験値 との比 *5	
1	15.8 φ	45	D10	46.7	17.5	35	417	0.97	554	0.96	コンクリート破壊
2			D13		14.5		433	1.01	558	0.96	主鉄筋抜け
3	21.1 φ	30	D10	46.7	17.5	35	423	0.98	554	0.96	コンクリート破壊
4		45		22.5	17.5		424	0.99	524	0.90	コンクリート破壊
5				46.7	27.5		25	331	0.77	510	0.88
6	21.1 φ	45	D10	46.7	17.5	35	420	0.98	568	0.98	コンクリート破壊
7	21.1 φ	45	D10	46.7	7.5	45	391	0.91	565	0.97	添筋破断
8				49.6	17.5	35	429	1.00	549	0.95	添筋破断
9		60		46.7	17.5		384	0.89	576	0.99	主鉄筋抜け
10	21.1 φ	45	D13	46.7	14.5	35	413	0.96	581	1.00	主鉄筋抜け
11	26.3 φ	45	D10	46.7	17.5	35	443	1.03	564	0.97	添筋破断
12			D13		14.5		442	1.03	582	1.00	主鉄筋抜け

*1：φは主鉄筋径，*2：スパイラル鉄筋のピッチ，*3：コンクリートの圧縮強度

*4：主鉄筋降伏点=430N/mm²との比，*5：主鉄筋引張強さ=580N/mm²との比

破壊形態は、3つの形態に分類している。まず「コンクリート破壊」とは、継手のコンクリートが中央部分の主鉄筋突き合わせ部で鉄筋に垂直方向に完全に破壊した後、主鉄筋の抜け出し部でコンクリートが割裂破壊を起こし、主鉄筋が抜け出して破壊する形態である。「主鉄筋抜け」とは、コンクリートが破壊に至る前に割裂破壊を起こして主鉄筋が抜け始める破壊形態である。「添筋破断」とは、コンクリートの破壊後に主鉄筋とコンクリートとの付着強度が添筋の耐力を上回り、添筋が破断する破壊形態である。

スパイラル鉄筋のピッチとコンクリートの圧縮強度、およびかぶりを共通とし、添筋径と重ね長さをパラメーターとした、試験体 No1 と No2, No6 と No10, および No11 と No12 の結果について比較する。降伏点と最大荷重をみると、降伏点はいずれの試験体も主鉄筋とほぼ同等であり、重ね長さや添筋径の違いによる差は明確でない。最大荷重を主鉄筋の試験値と比較すると、重ね長さが 15.8φではいずれもやや低く、21.1φと 26.3φでは主鉄筋と同等であるが、添筋 D10 が D13 よりやや低い傾向である。破壊形態は、添筋 D13 の試験体はいずれも主鉄筋の抜けであり、添筋 D10 の試験体は、15.8φと 21.1φがコンクリート破壊、26.3φが添筋の破断である。主鉄筋と添筋の公称断面積の関係は、主鉄筋 D19 が 286.5mm²に対し、添筋 4 本の合計は、D10 が 285.32mm²、D13 が 506.8mm²である。このように添筋 D10 の試験体は、主鉄筋より添筋の断面積がわずかに下回る。このため 15.8φの No1 と 21.1φの No6 は、鉄筋量が少ない主鉄筋突き合わせ部でコンクリートが破壊した後に、重ね長さが短いことで主鉄筋が抜け出したと考えられる。一方 26.3φの No11 は、重ね長さが長いこと添筋の耐力を主鉄筋の付着耐力を上回り、添筋が破断したと考えられる。また添筋 D13 の試験体は、添筋の耐力が主鉄筋の付着耐力を上回り、主鉄筋の抜けにより破壊したといえ

る。

この研究では、**図-2.8** に示すように鉄筋端部にナットを設け、定着力を向上させた継手の引張耐力も検討している。No12 試験体と同様の条件での試験結果では、No12 の主鉄筋抜けによる破壊に対し、ナットによる付着耐力の向上により、主鉄筋の破断により破壊する結果を得ている。

さらに、**図-2.9** に示すようなはりの高応力繰返し载荷実験を実施し、破壊耐力とたわみ性状について検討している。载荷方法は、下限応力を主鉄筋の規格降伏点 (σ_{sy}) の 2% ($0.02\sigma_{sy}$)、上限応力を 50% ($0.5\sigma_{sy}$)、70% ($0.7\sigma_{sy}$)、および 95% ($0.95\sigma_{sy}$) とし、それぞれ静的に 30 回の繰返し载荷後、破壊まで载荷している。試験体は一体成形の部材と、No12 の継手により接合した部材、および**図-2.8** に示したナットにより補強した継手を用いた部材を作製して比較している。破壊荷重は**表-2.4** に示すとおり、ナットの補強有無に関わらず、いずれも一体成形の部材を上回る結果を得ている。

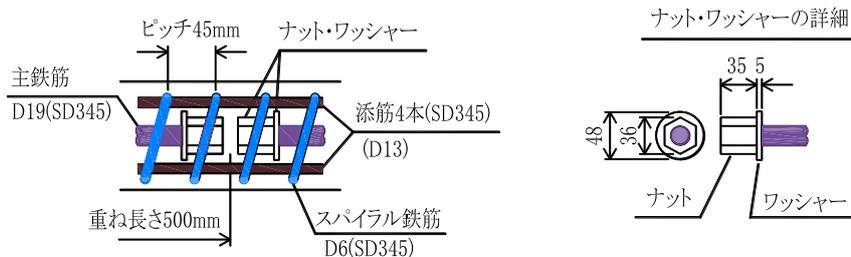


図-2.8 ナット・ワッシャーによる定着力の向上

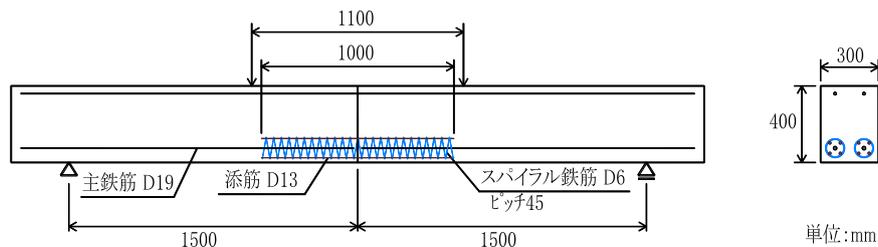


図-2.9 試験体の概要図

表-2.4 はりの実験結果

試験体	破壊荷重 (kN)	コンクリートの 圧縮強度 (N/mm^2)
一体成形	165	32.7
ナットなし	170	40.7
ナットあり	181	39.5

このように継手単体の引張試験では、D13の添筋を4本配置し、重ね長さを 21.1ϕ 以上として、D6のスパイラル鉄筋をピッチ45mmで配置することで、主鉄筋と同程度の引張耐力が得られている。また、破壊形態は主鉄筋の抜け出しによる付着破壊であるが、同様の組合せにおいて、ナットとワッシャーを用いて定着力を向上させることで、破壊形態は主鉄筋の破断となる結果を得ている。

はりの実験では、図-2.9に示した接合部を有する部材と一体成形の部材、および図-2.8に示したように、主鉄筋の端部をナットとワッシャーを用いて定着力を向上させた部材の合計3体について、高応力繰返し載荷実験を実施している。破壊耐力とたわみ性能について、接合部を有する部材は、一体成形の部材と同等の性能が得られている。また、ナットとワッシャーを主鉄筋端部に配置することで定着力が増し、破壊耐力と軸方向剛性の向上が認められている。

しかし、この研究は主鉄筋をD19に限定した実験であり、重ね長さは土木学会コンクリート標準示方書²⁾にもとづいて算出した、主鉄筋径の約40倍より短縮されているものの、PCa部材同士を接合する継手として実用化するためには、重ね長さをさらに短縮する必要がある。また、土木学会コンクリート標準示方書²⁾では、重ね継手はコンクリートのゆきわたりが不十分となった場合、継手の強度が大きく低下することが示されており、文献(23)、(24)の研究においても、重ね継手部をスパイラル鉄筋により拘束させた場合には、継手強度に対するコンクリートのゆきわたりの影響を指摘している。この研究でも充填材にコンクリートを採用しているが、コンクリートを用いた継手周囲の充填性について、実用化に至る十分な報告はされていない。

2.5 スパイラル鉄筋による重ね継手の拘束効果に関する研究²²⁾

本継手を構成する鋼材は異形棒鋼のみであり，スパイラル鉄筋の加工費が継手材料費に占める割合として高い．そのため，スパイラル鉄筋の端部は写真-2.1 に示すように開放したままの状態とし，端部加工を行わないことでコストを低減させている．一方で，拘束効果を目的としたスパイラル鉄筋の端部が開放されていることで，継手端部付近の拘束効果の低下が考えられる．しかし，その影響範囲は明らかになっていない．



写真-2.1 スパイラル鉄筋

佐々木らの研究では，スパイラル鉄筋の端部が開放された状態と，帯筋により端部が閉じた状態の拘束効果の違いについて，FEM 解析による比較を行っている．パラメーターは表-2.5 に一例を示すように，スパイラル鉄筋径とピッチ，およびスパイラル鉄筋の直径とし，図-2.10 に示すような開放モデルと閉合モデルについて，モルタルを膨張させたときの鉄筋の拘束効果を比較している．

表-2.5 モデルの一例

モデル名	スパイラル鉄筋		
	呼び名	ピッチ (mm)	直径 (mm)
D0620MM	D6	20	100
D0630MM			
D0630SM		30	70
D0630LM			
D1020MM	D10	20	100
D1320MM	D13		
D1620MM	D16		

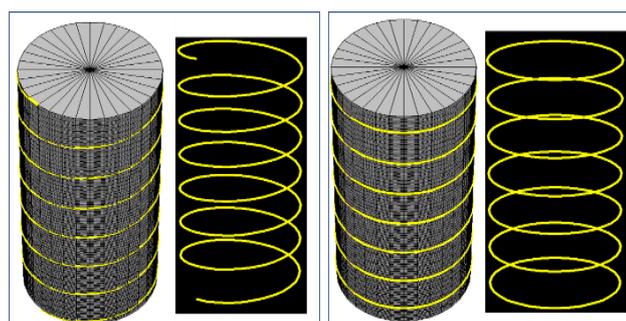


図-2.10 モデル例（左：開放、右：閉合）

開放モデルと閉合モデルにおいて，モルタルを 2000μ 膨張させたときの膨張量の鉛直方向分布の一例を図-2.11 に示す．図-2.11 をみると，端部以外では膨張量が一致し，端部以外での拘束効果は両モデルとも同程度である結果が得られている．また，Z 座標値をピッチで除した値を縦軸とし，開放モデル (S_{\max}) と閉合モデル (S_{\min}) の膨張量の差を横軸とした代表的なモデルにおける解析結果を図-2.12 に示す．図-2.12 をみると，開放モデルと閉合

モデルの膨張量の差が著しいのは、いずれのモデルも上端から 1 リング分である結果が得られている。このように、スパイラル鉄筋の端部が開放していることによる拘束効果の影響範囲は、1 リング分であると思われる。なお、ここに示した図-2.10~2.12 については、文献 22)より引用して示した。

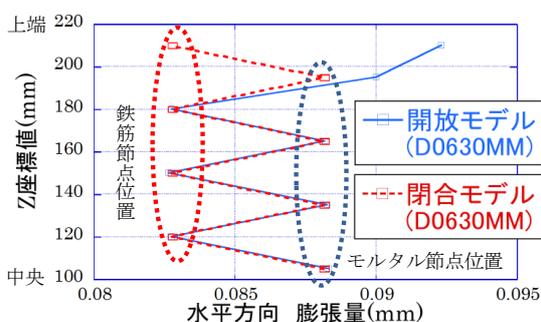


図-2.11 モルタル節点と鉄筋節点の膨張量

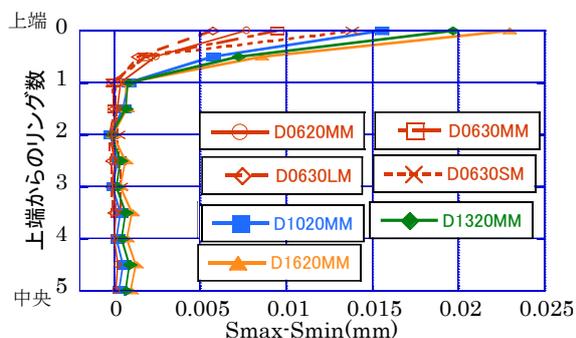


図-2.12 各リングの膨張量の差

2.6 第 2 章のまとめ

PCa 部材同士を接合するための継手は実用化されているが、経済性や施工性、および安全性については改善の余地がある。これらの課題を改善できる可能性がある重ね継手を用いた既往の研究では、重ね継手部をスパイラル鉄筋により拘束することで、一般的な重ね長さである主鉄筋径の 40 倍に対し、25 倍前後まで短縮できる可能性が示されている。しかし、主鉄筋の適用範囲が限定されており、重ね長さについては、PCa 部材同士の接合として実用的な範囲には至っていない。また、充填材としてコンクリートを採用しているが、PCa 部材同士の接合用充填材として、コンクリートを使用することは実用的でないといえる。したがって、流動性を有するモルタルを充填材として用いることでスパイラル鉄筋のピッチを密にでき、そのことで拘束効果を向上させ継手長の短縮が図れることから、PCa 部材同士の接合では、モルタルが最適な材料であるといえる。

また、スパイラル鉄筋の拘束効果に関する既往の研究では、本継手と同様にスパイラル鉄筋をらせん状に巻いて端部を開放状態にした場合と、帯筋を同様に配置し端部を閉じた場合では、その拘束効果の差は端部から 1 リング分であることが報告されている。この解析の範囲では、本継手に採用したスパイラル鉄筋端部の拘束効果を再現しているといえる。

2章の参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー156 鉄筋定着・継手指針 [2020年版]，2020.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編 [2017年制定]，2017.
- 3) 日本道路協会：道路土工 カルバート工指針（平成21年度版），2009.
- 4) 松田学，日野伸一，山口浩平，松本康資，久野俊文，渡邊允弘：PC圧着工法によるプレキャストコンクリート部材接合部の力学的挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.62A，pp.873-884，2016.3
- 5) 井形友彦，村上聖，武田浩二，松田学：PC圧着工法によるプレキャストRCスラブの曲げ性状，セメント・コンクリート論文集，Vol.73，pp.471-477，2019.
- 6) 松田学，日野伸一，松本康資，畠山繁忠：分割式PCaボックスカルバートの隅角部に圧着力を導入した接合工法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.397-402，2017.7
- 7) 松本康資，松田学，井形友彦，日野伸一：圧着式接合工法を用いた分割式PCaボックスカルバート隅角部の正負交番載荷試験に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.577-582，2019.7
- 8) 佐川康貴，片山強，堤俊人，松下博通：ループ継手構造によるプレキャストコンクリート製斜角大型ボックスカルバートの開発，コンクリート工学，Vol.49，No.3，pp.13-20，2011.3
- 9) 松本康資，山口浩平，松田学，日野伸一：正負交番載荷を受ける圧着式接合工法を用いた分割式プレキャストボックスカルバート隅角部の耐荷性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，pp.307-312，2021.7
- 10) 片山強，梶田幸秀，坂井義彰，山崎智彦：ループ継手構造によるプレキャストコンクリート製大型ボックスカルバートの正負交番載荷実物大実験による耐震性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，pp.301-306，2021.7
- 11) 小林研太，大窪一正，松本智夫，二羽淳一郎：モルタル充てん継手を有するプレキャストRCはりの曲げ破壊挙動に及ぼす目地の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.559-564，2019.7
- 12) 櫻庭浩樹，古賀裕久，高松芳徳，井上幸一：同一断面に機械式継手を用いたプレキャスト部材接合部の曲げ挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.613-618，2019.7
- 13) 道路プレキャストコンクリート製品技術協会：プレキャストコンクリート構造物に適用する機械式鉄筋継手工法ガイドライン，2018.10
- 14) Carlos.A, Y.Tsuji, T.Morita, Y.Iizuka：Flexural Behavior of Precast Rc Beams Joined by Cast Iron Couplers, Cement Science and Concrete Technology, Vol.57, pp.683-690, 2003.

- 15) 森田俊哉, 萩原淳弘, 飯塚豊, 辻幸和: 鑄鉄製接合具で接合したプレキャスト RC はりの曲げ・せん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.601-606, 2008.7
- 16) 岡野素之, 飯塚豊, 森田俊哉, 辻幸和: 実物大プレキャスト RC 部材における接合部の曲げ性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.481-486, 2012.7
- 17) 飯塚豊, 辻幸和, 森田俊哉, 岡野素之: 異なる定着方法のカップラー接合具により垂直接合した RC 部材の力学的性状, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.260-267, 2015.
- 18) 飯塚豊, 辻幸和, 森田俊哉, 岡野素之: カップラー接合具により垂直接合した RC 部材の静的力学性状と低サイクル疲労性状, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.295-302, 2016.
- 19) 土木研究センター: 建設技術審査証明報告書 (建技審証 第 0435 号) プレキャスト RC 部材接合材料「KT ジョイント」, 2020.3
- 20) 野村和嗣, 原夏生, 睦好宏史, 町田篤彦: プレキャスト型枠コンクリート工法における鉄筋の接合方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.2, pp.259-264, 1993.7
- 21) 野村和嗣, 原夏生, 睦好宏史, 町田篤彦: プレキャスト型枠工法における重ね継手の応用利用に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.16, No.2, pp.253-258, 1994.7
- 22) 佐々木裕明, 岡野素之: スパイラル筋による重ね継手の拘束効果に関する解析, 前橋工科大学大学院令和 3 年度修士論文要旨, 2022.3
- 23) 樋口芳朗, 辻正哲, 出雲淳一, 山尾芳秀, 浅野研一: 重ね継手の緊結および補強方法と強度の関係, セメント技術年報, pp.537-540, 1979.
- 24) 辻正哲, 奥津一俊, 出雲淳一, 浅野研一: 重ね継手の新しい補強方法および緊結方法, セメント技術年報, pp.382-384, 1980.

第3章 拘束型重ね継手の引張性能評価

3.1 序節

主鉄筋と添筋の重ね長さ、およびスパイラル鉄筋のピッチの最適な組み合わせを見出し、SD345の鉄筋継手として性能を発揮できる継手の仕様を決定するため、継手単体の引張性能を評価した。

3.2 試験概要

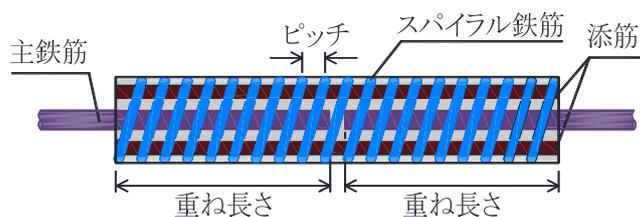
3.2.1 試験のシリーズ

本研究では、表-3.1に示すように2シリーズに分けて引張試験を行った。シリーズ1では、まずケース1として実用化する継手の最大サイズD25について引張試験を行い、その結果をもとにケース2のD25と、最小サイズD13について行った。そして、シリーズ1の結果をもとに、シリーズ2ではD16, D19, およびD22について引張試験を行った。

表-3.1 試験のシリーズと試験体概要

シリーズ	主鉄筋	添筋	重ね長さ	スパイラル鉄筋ピッチ (mm)
1	D25(ケース1)	D16	5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 φ	20
	D25(ケース2)	D16	7, 8, 9, 10 φ	20, 25, 30
	D13	D10	5, 7, 8, 9, 10 φ	12, 18, 21
2	D16,D19,D22	D13	9 φ	16

※1) φ：主鉄筋径



各シリーズについて、重ね長さとスパイラル鉄筋のピッチの関係を図-3.1 に示す。図中には、第2章で述べた野村ら¹⁾の試験範囲も示した。野村らの研究では、継手開口部の充填は粗骨材の最大寸法が 12.5mm のコンクリートを採用しており、コンクリートの充填性を考慮し、スパイラル鉄筋 (D6) のピッチは 30, 45, 60mm と広く設定している。また、重ね長さは主鉄筋 D19 に対し、15.8, 21.1, 26.3φ (主鉄筋径) の3ケースで検討している。

まず、シリーズ1のケース1では、実用化する継手の最大主鉄筋 D25 を対象とした。重ね長さの範囲は、前述した野村らの研究と実用性を考え最大長さを 17.5φ とし、モルタル充填継手²⁾の鉄筋挿入長さ (6φ 程度) を参考とし、最小長さは 5φ として 2.5φ 間隔に設定した。スパイラル鉄筋のピッチは 20mm に固定し、必要最小重ね長さを見出すことを試みた。ケース2では、ケース1の結果をもとに、重ね長さを 10φ 以下で 1φ 間隔に設定し、スパイラル鉄筋のピッチを 20, 25, 30mm として、重ね長さとピッチの最適な組み合わせを見出すことを試みた。さらに最小主鉄筋の D13 について、D25 の結果をもとに重ね長さを 5~10φ の範囲とし、スパイラル鉄筋のピッチを3種類設定して引張試験を行った。そしてシリーズ2では、中間サイズの D16, D19, および D22 について、シリーズ1の結果をもとに重ね長さとスパイラル鉄筋のピッチを決定し引張試験を行った。

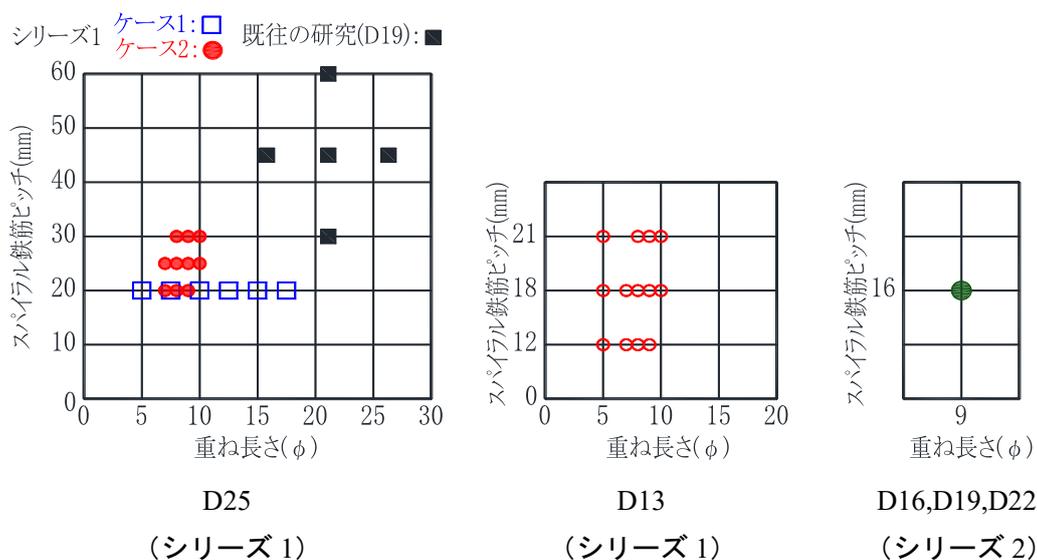


図-3.1 重ね長さとスパイラル鉄筋のピッチの関係

3.2.2 試験体の概要

試験体の概要図を図-3.2に示す。図-3.2の下段には、実物のPCa部材における継手開口部の形状を示した。部材の継手開口形状は、接合面に対し左右それぞれ円錐台の形状となるが、試験体は簡易的に角柱形状の試験体とした。

主鉄筋と添筋の関係は、添筋に対し主鉄筋が先行して降伏するように添筋を設定した。そして、PCa部材の接合時の誤差を吸収するためのクリアランスとして、主鉄筋と添筋のあきをD13, D22, D25タイプは5mmとした。D16, D19タイプは、添筋およびスパイラル鉄筋とスパイラル鉄筋の外径をD22タイプと共通とし、クリアランスをそれぞれ8mmと6.5mmとした。

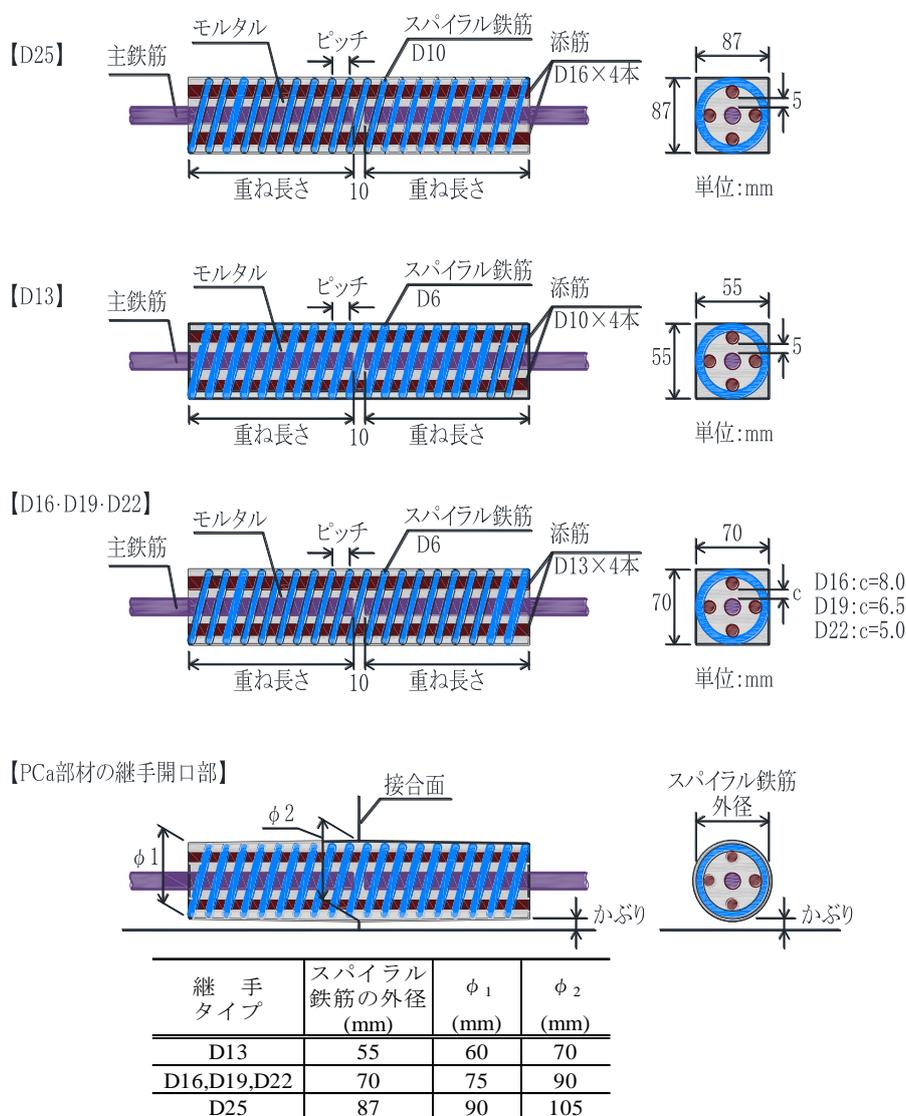


図-3.2 試験体の概要図

(1) シリーズ 1 の試験体

主鉄筋 D25 の試験体の種類とパラメーターを整理し、表-3.2 に示す。ケース 1 では、6 種類の試験体を各 3 体作製し合計 18 体、ケース 2 では、写真-3.1 に示す 12 種類の試験体を各 2 体作製し、合計 24 体とした。スパイラル鉄筋はすべての試験体とも D10 を使用し、添筋は D16 を 4 本とした。なお、試験体番号の表記について、例えば N05204 では、N は主鉄筋 D25、05 は重ね長さ 5φ、20 はピッチ 20mm、4 は添筋本数 4 本を示している。

表-3.2 試験体の一覧 (D25)

ケース	試験体番号	パラメーター	
		重ね長さ	スパイラル鉄筋ピッチ(mm) (補強筋比 p_{sp})
1	N05204	5φ	20 (9.3%)
	N07204	7φ	20 (9.3%)
2	N07254		25 (7.4%)
	N07254f		25 (7.4%)
1	N7.5204	7.5φ	20 (9.3%)
2	N08204	8φ	20 (9.3%)
	N08254		25 (7.4%)
	N08304		30 (6.2%)
	N09204	9φ	20 (9.3%)
	N09254		25 (7.4%)
	N09304		30 (6.2%)
1	N10204	10φ	20 (9.3%)
2	N10254	10φ	25 (7.4%)
	N10254f		25 (7.4%)
	N10304		30 (6.2%)
1	N12.5204	12.5φ	20 (9.3%)
	N15204	15φ	
	N17.5204	17.5φ	



N07204 → N09304

※写真は表-3.2の試験体番号順



N10254 → N10304

※写真は表-3.2の試験体番号順

写真-3.1 試験体の種類 (ケース 2 : 12 種類)

ここで、表-3.2 中に示す補強筋比とは、図-3.3 に示ようにスパイラル鉄筋の断面積に対し、スパイラル鉄筋のピッチと直径の関係から求まる値であり、次式(式 3-1)により算出する。

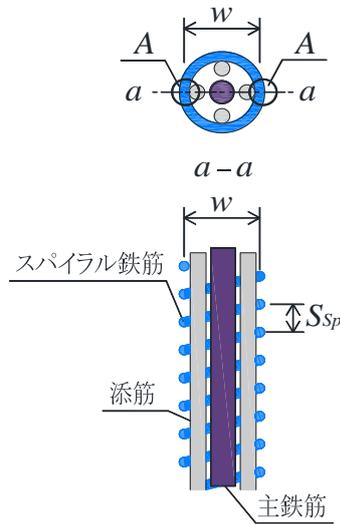


図-3.3 補強筋比

$$p_{sp} = \frac{2 \cdot A}{w \cdot s_{sp}} \quad (3-1)$$

ここに、 p_{sp} : 補強筋比(%)

A : スパイラル鉄筋の断面積(mm²)

w : スパイラル鉄筋の中心直径(mm)

S_{sp} : スパイラル鉄筋のピッチ(mm)

主鉄筋 D13 の試験体の種類とパラメーターを表-3.3 に、試験体の種類を写真-3.2 に示す。試験体は、主鉄筋径に対する重ね長さの割合と補強筋比を D25 と同等に設定し、15 種類の試験体を各 2 体作製し、合計 30 体とした。スパイラル鉄筋はすべての試験体とも D6 を使用し、添筋は D10 を 4 本とした。なお、試験体番号の表記は D25 シリーズと同様であり、表-3.3 に示した S は主鉄筋 D13 を示している。

表-3.3 試験体の一覧 (D13)

試験体番号	パラメーター	
	重ね長さ	スパイラル鉄筋ピッチ(mm) (補強筋比 p_{sp})
S05124	5 φ	12 (10.8%)
S05184		18 (7.2%)
S05214		21 (6.2%)
S07124	7 φ	12 (10.8%)
S07184		18 (7.2%)
S07184f		18 (7.2%)
S08124	8 φ	12 (10.8%)
S08184		18 (7.2%)
S08214		21 (6.2%)
S09124	9 φ	12 (10.8%)
S09184		18 (7.2%)
S09214		21 (6.2%)
S10184	10 φ	18 (7.2%)
S10184f		18 (7.2%)
S10214		21 (6.2%)



S05124 → S10214

※写真は表-3.3の試験体番号順

写真-3.2 試験体の種類 (15 種類)

また、スパイラル鉄筋の端部拘束力を高めるため、写真-3.3 に示すようにスパイラル鉄筋の両端部をフレア溶接で閉合した試験体を作製した。表-3.2 に示した D25 では N07254f と N10254f、表-3.3 の D13 では S07184f と S10184f である。なお、溶接長はスパイラル鉄筋径の 3 倍の長さに統一した。



写真-3.3 端部閉合の例 (D25)

(2) シリーズ 2 の試験体

シリーズ 2 で作製した試験体の一覧を表-3.4 に、試験体の種類を写真-3.4 に示す。中間サイズの主鉄筋 D16, D19, および D22 について、シリーズ 1 の試験結果をもとに、重ね長さは 9φ とし、補強筋比を 6.2% に統一して、各主鉄筋とも 3 体作製した。試験体の番号表記はシリーズ 1 と同様であり、末尾が主鉄筋の呼び名である。

表-3.4 試験体の一覧 (シリーズ 2)

試験体番号	主鉄筋	スパイラル鉄筋			添筋 径*本数
		呼び名	重ね 長さ	ピッチ(mm) (補強筋比 p_{sp})	
09164(D16)	D16	D6	9φ	16 (6.2%)	D13*4
09164(D19)	D19				
09164(D22)	D22				



D16 D19 D22

写真-3.4 試験体の種類

シリーズ 1 とシリーズ 2 で作製した各主鉄筋の試験体について、スパイラル鉄筋のピッチと補強筋比の関係を整理して図-3.4 に示す。D25 のピッチ 30mm と D13 のピッチ 21mm, および D16, D19, D22 のピッチ 16mm は、いずれも補強筋比が 6.2% である。

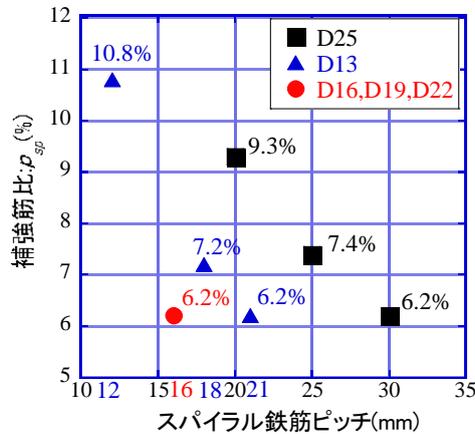


図-3.4 各試験体の補強筋比

3.2.3 使用材料

(1) 鉄筋

主鉄筋と添筋，およびスパイラル鉄筋に使用した異形棒鋼の諸元を表-3.5～3.6に，主鉄筋と添筋の応力-ひずみ曲線を図-3.5～3.6示す。

表-3.5 鉄筋の諸元値（シリーズ1）

使用箇所	主鉄筋	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	材質
主鉄筋	D25 (ケース1)	D25	371	545	—	SD345
添筋		D16	378	573	—	SD345
スパイラル鉄筋		D10	352	485	—	SD295
主鉄筋	D25 (ケース2)	D25	374	549	192	SD345
添筋		D16	362	549	182	SD345
スパイラル鉄筋		D10	356	489	181	SD295
主鉄筋	D13	D13	348	549	192	SD345
添筋		D10	351	487	193	SD295
スパイラル鉄筋		D6	488	590	202	SD295

表-3.6 鉄筋の諸元値（シリーズ2）

使用箇所	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	材質
主鉄筋	D16	369	546	188	SD345
	D19	369	539	179	SD345
	D22	376	553	180	SD345
添筋	D13	375	543	180	SD345
スパイラル鉄筋	D6	464	547	191	SD295

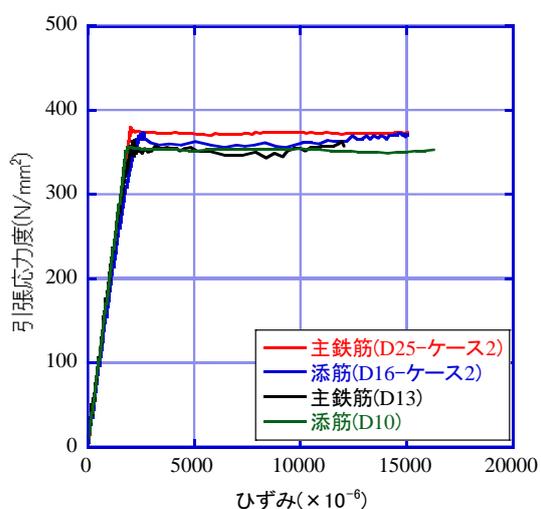


図-3.5 応力-ひずみ曲線（シリーズ1）

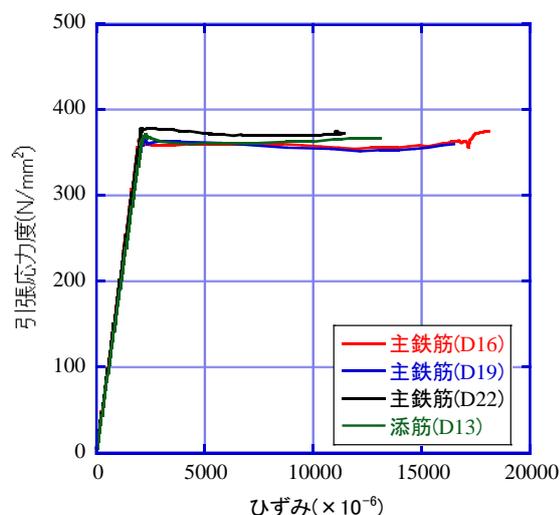


図-3.6 応力-ひずみ曲線（シリーズ2）

(2) モルタル

モルタルは、プレミックスタイプのセメント系無収縮モルタル^{3),4)}を使用した。使用材料は宇部興産建材社製のU-グラウト一般用であり、水セメント比は16~17%の範囲で練り混ぜ時のフレッシュ性状を確認し、水量を調整して作製した。試験体はモルタルを充填した翌日に脱型し、その後は屋内での気中養生とした。

試験体の引張試験を実施した当日の材料試験値を表-3.7に、応力-ひずみ曲線を図-3.7に示す。なお、圧縮強度試験用の供試体は、引張試験用の試験体と同一条件で養生した。

表-3.7 モルタルの諸元値

No	シリーズ1 (D25)									
	ケース1					ケース2				
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	作製日 2016/	試験日 2016/	材令	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	作製日 2017/	試験日 2017/	材令
1体目	47.7	—	8/23	9/6	14日	61.9	—	8/8	8/21	13日
2体目	52.7	—	8/24	9/7	14日	68.6	32	8/9	8/22	13日
3体目	61.5	26	8/25	9/8	14日	—	—	—	—	—

No	シリーズ1 (D13)					シリーズ2 (D16,D19,D22)				
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	作製日 2017/	試験日 2017/	材令	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	作製日 2020/	試験日 2020/	材令
	1体目	65.6	—	10/24	11/7	14日	51.3	25	11/5	11/12
2体目	66.9	26	10/25	11/8	14日					
3体目	—	—	—	—	—					

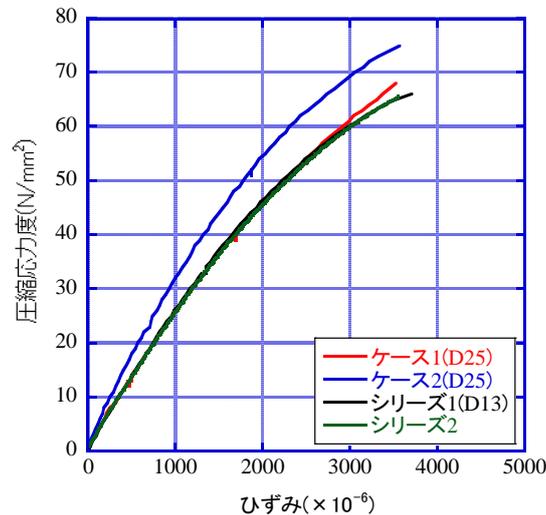


図-3.7 応力-ひずみ曲線

3.2.4 載荷方法

載荷状況を写真-3.5に、計測方法を図-3.8に示す。載荷速度は、主鉄筋 D13 は 0.33kN/s ， D16～D25 は 1kN/s を目安とし、万能試験機を用いて単調載荷の一軸引張試験として実施した。なお、高感度変位計の破損を考慮して、シリーズ1の D25 は 250kN， D13 は 65kN，シリーズ2の D16 は 100kN， D19 は 140kN， D22 は 190kN で変位計を外し、最大荷重を示したのち荷重の降下を確認してから除荷した。



写真-3.5 載荷状況

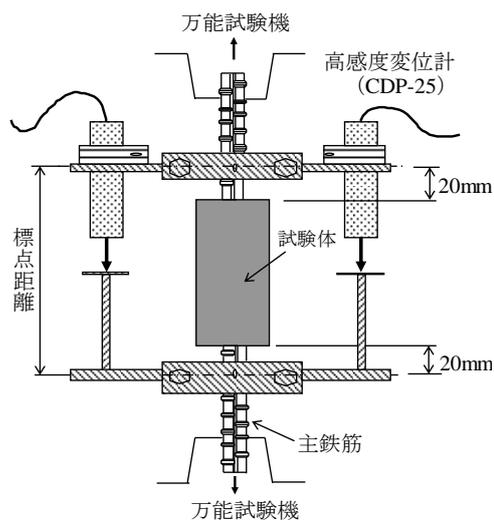


図-3.8 計測方法

3.2.5 計測項目

試験体の変位量は、図-3.8 に示したように、試験体の上下の主鉄筋上に治具を用いて高感度変位計を取り付け、主鉄筋の抜け出し量も含めた変位量を計測した。

3.3 試験結果および考察

3.3.1 シリーズ1

試験結果の一覧について、主鉄筋 D25 を表-3.8~3.9 に、D13 を表-3.10~3.11 に示す。

表-3.8 試験結果の一覧 (D25 タイプ)

試験体 番号	重ね 長さ	スパイラル鉄筋 ピッチ(mm) (補強筋比 p_{sp})	降伏点		引張強さ			破壊 形態	ケース
			応力度 (N/mm^2)	試験値 との比 *1	応力度 (N/mm^2)	試験値 との比 *2	規格値 との比 *3		
N05204-1	5φ	20 (9.3%)	375	1.011	419	0.770	0.855	YC	1
-2			371	0.999	400	0.734	0.816	YC	
-3			372	1.004	414	0.759	0.844	YC	
平均値			373	1.00	411	0.75	0.84	—	
N07204-1	7φ	20 (9.3%)	381	1.020	504	0.918	1.027	YC	2
-2			381	1.020	526	0.958	1.073	YC	
平均値			381	1.02	515	0.94	1.05	—	
N07254-1	7φ	25 (7.4%)	379	1.015	461	0.840	0.941	YC	2
-2			381	1.020	511	0.931	1.042	YC	
平均値			380	1.02	486	0.89	0.99	—	
N07254f-1	7φ	25 (7.4%)	379	1.015	450	0.819	0.918	YC	2
-2			376	1.007	486	0.886	0.992	YC	
平均値			377	1.01	468	0.85	0.96	—	
N7.5204-1	7.5φ	20 (9.3%)	375	1.010	512	0.939	1.044	YC	1
-2			370	0.997	513	0.941	1.047	YC	
-3			374	1.007	522	0.957	1.064	YC	
平均値			373	1.00	515	0.95	1.05	—	
N08204-1	8φ	20 (9.3%)	383	1.026	478	0.870	0.975	YC	2
-2			381	1.020	548	0.998	1.117	YC	
平均値			382	1.02	513	0.93	1.05	—	
N08254-1	8φ	25 (7.4%)	379	1.015	498	0.907	1.016	YC	2
-2			379	1.015	527	0.960	1.075	YC	
平均値			379	1.02	512	0.93	1.05	—	
N08304-1	8φ	30 (6.2%)	381	1.020	463	0.844	0.945	YC	2
-2			379	1.015	520	0.947	1.060	YC	
平均値			380	1.02	491	0.90	1.00	—	

*1：主鉄筋降伏点=371 N/mm^2 (ケース1), 374 N/mm^2 (ケース2)との比

*2：主鉄筋引張強さ=545 N/mm^2 (ケース1), 549 N/mm^2 (ケース2)との比

*3：引張強さ規格値=490 N/mm^2 との比

表-3.9 試験結果の一覧 (D25 タイプ)

試験体 番号	重ね 長さ	スパイラル鉄筋 ピッチ(mm) (補強筋比 p_{sp})	降伏点		引張強さ			破壊 形態	ケース
			応力度 (N/mm^2)	試験値 との比 *1	応力度 (N/mm^2)	試験値 との比 *2	規格値 との比 *3		
N09204-1 -2 平均値	9φ	20 (9.3%)	385	1.031	501	0.914	1.023	YC	2
			381	1.020	540	0.984	1.102	YC	
			383	1.03	521	0.95	1.06	—	
N09254-1 -2 平均値	9φ	25 (7.4%)	383	1.026	537	0.978	1.096	YC	2
			383	1.026	553	1.008	1.129	YC	
			383	1.03	545	0.99	1.11	—	
N09304-1 -2 平均値	9φ	30 (6.2%)	383	1.026	521	0.949	1.062	YC	2
			383	1.026	557	1.014	1.136	YC	
			383	1.03	539	0.98	1.10	—	
N10204-1 -2 -3 平均値	10φ	20 (9.3%)	375	1.011	553	1.014	1.128	YC	1
			373	1.006	543	0.996	1.107	YC	
			370	0.998	549	1.008	1.121	YB	
N10254-1 -2 平均値	10φ	25 (7.4%)	385	1.031	508	0.925	1.036	YC	2
			361	0.968	520	0.948	1.062	YC	
			373	1.00	514	0.94	1.05	—	
N10254f-1 -2 平均値	10φ	25 (7.4%)	389	1.042	493	0.899	1.007	YC	2
			383	1.026	561	1.023	1.145	YC	
			386	1.03	527	0.96	1.08	—	
N10304-1 -2 平均値	10φ	30 (6.2%)	393	1.052	502	0.915	1.025	YC	2
			361	0.968	545	0.993	1.112	YC	
			377	1.01	524	0.95	1.07	—	
N12.5204-1 -2 -3 平均値	12.5φ	20 (9.3%)	377	1.016	553	1.015	1.129	YC	1
			372	1.003	545	1.000	1.112	YC	
			375	1.010	547	1.004	1.116	YC	
N15204-1 -2 -3 平均値	15φ	20 (9.3%)	378	1.019	556	1.019	1.134	YB	1
			370	0.998	544	0.999	1.110	YB	
			377	1.015	549	1.008	1.121	YC	
N17.5204-1 -2 -3 平均値	17.5φ	20 (9.3%)	369	0.993	554	1.015	1.130	YB	1
			374	1.007	545	1.000	1.112	YB	
			373	1.005	549	1.008	1.120	YB	
平均値			372	1.00	549	1.01	1.12	—	

*1 : 主鉄筋降伏点=371 N/mm^2 (ケース1), 374 N/mm^2 (ケース2)との比

*2 : 主鉄筋引張強さ=545 N/mm^2 (ケース1), 549 N/mm^2 (ケース2)との比

*3 : 引張強さ規格値=490 N/mm^2 との比

表-3.10 試験結果の一覧 (D13 タイプ)

試験体 番号	重ね 長さ	スパイラル鉄筋 ピッチ(mm) (補強筋比 p_{sp})	降伏点		引張強さ			破壊 形態
			応力度 (N/mm ²)	試験値 との比 *1	応力度 (N/mm ²)	試験値 との比 *2	規格値 との比 *3	
S05124-1 -2 平均値	5φ	12 (10.8%)	344	0.989	507	0.924	1.033	YC
			356	1.023	483	0.880	0.985	YC
			350	1.01	495	0.90	1.01	—
S05184-1 -2 平均値	5φ	18 (7.2%)	347	0.995	439	0.800	0.896	YC
			352	1.011	431	0.785	0.888	YC
			349	1.00	435	0.79	0.89	—
S05214-1 -2 平均値	5φ	21 (6.2%)	352	1.012	408	0.743	0.832	YC
			348	1.000	413	0.752	0.842	YC
			350	1.01	410	0.75	0.84	—
S07124-1 -2 平均値	7φ	12 (10.8%)	356	1.023	544	0.992	1.109	YC
			359	1.030	545	0.993	1.112	YB
			357	1.03	544	0.99	1.11	—
S07184-1 -2 平均値	7φ	18 (7.2%)	351	1.010	517	0.942	1.055	YC
			354	1.016	540	0.984	1.102	YC
			353	1.01	528	0.96	1.08	—
S07184f-1 -2 平均値	7φ	18 (7.2%)	354	1.018	542	0.988	1.106	YC
			356	1.023	542	0.987	1.105	YC
			355	1.02	542	0.99	1.11	—
S08124-1 -2 平均値	8φ	12 (10.8%)	352	1.011	541	0.986	1.104	YB
			354	1.016	544	0.991	1.110	YB
			353	1.01	542	0.99	1.11	—
S08184-1 -2 平均値	8φ	18 (7.2%)	352	1.011	538	0.981	1.098	YC
			360	1.035	538	0.981	1.097	YB
			356	1.02	538	0.98	1.10	—
S08214-1 -2 平均値	8φ	21 (6.2%)	354	1.017	536	0.977	1.094	YC
			353	1.013	539	0.983	1.101	YC
			353	1.02	538	0.98	1.10	—
S09124-1 -2 平均値	9φ	12 (10.8%)	352	1.010	542	0.988	1.105	YB
			350	1.007	545	0.993	1.112	YB
			351	1.01	543	0.99	1.11	—
S09184-1 -2 平均値	9φ	18 (7.2%)	349	1.001	544	0.991	1.110	YB
			355	1.020	544	0.991	1.110	YB
			352	1.01	544	0.99	1.11	—
S09214-1 -2 平均値	9φ	21 (6.2%)	351	1.008	545	0.993	1.112	YC
			352	1.010	542	0.987	1.105	YB
			351	1.01	543	0.99	1.11	—

*1 : 主鉄筋降伏点 = 348N/mm²との比, *2 : 主鉄筋引張強さ = 549N/mm²との比

*3 : 引張強さ規格値 = 490N/mm²との比

表-3.11 試験結果の一覧 (D13 タイプ)

試験体 番号	重ね 長さ	スパイラル鉄筋 ピッチ(mm) (補強筋比 p_{sp})	降伏点		引張強さ			破壊 形態
			応力度 (N/mm ²)	試験値 との比 *1	応力度 (N/mm ²)	試験値 との比 *2	規格値 との比 *3	
S10184-1 -2 平均値	10φ	18 (7.2%)	354	1.018	544	0.992	1.111	YB
			355	1.019	543	0.990	1.108	YB
			355	1.02	544	0.99	1.11	—
S10184f-1 -2 平均値	10φ	18 (7.2%)	351	1.008	541	0.986	1.105	YB
			352	1.010	541	0.986	1.104	YB
			351	1.01	541	0.99	1.10	—
S10214-1 -2 平均値	10φ	21 (6.2%)	350	1.009	544	0.991	1.110	YB
			351	1.005	542	0.987	1.105	YB
			351	1.01	543	0.99	1.11	—

*1 : 主鉄筋降伏点=348N/mm²との比, *2 : 主鉄筋引張強さ=549N/mm²との比

*3 : 引張強さ規格値=490N/mm²との比

(1) 破壊形態の分類

試験体の破壊形態の分類を図-3.9 に示す。破壊形態は、主鉄筋が降伏する前に主鉄筋の拔出しで破壊する C 型、主鉄筋が降伏した後に主鉄筋の拔出しで破壊する YC 型、主鉄筋が破断する YB 型の 3 種類に分類した。

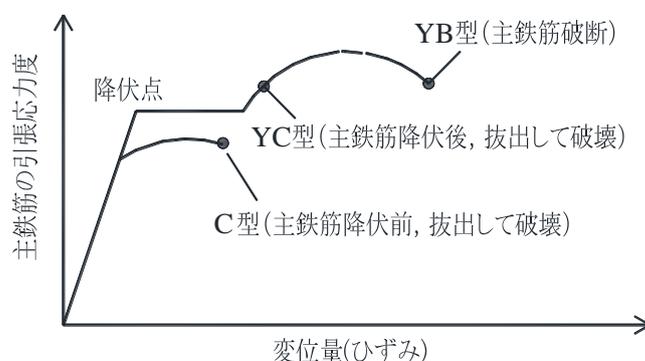


図-3.9 破壊形態の分類

(2) 破壊形態と引張強さについて

1) D25 タイプ

破壊形態の例を写真-3.6に、重ね長さと引張強さの関係について、破壊形態とともに図-3.10に示す。重ね長さが5~15φでは一部の試験体を除きYC型であり、17.5φではすべてYB型であった。

引張強さの平均値と主鉄筋の材料試験値との比較を図-3.11に示す。重ね長さが12.5φ以上では材料試験値と同等であるが、8φ以下では材料試験値より低い試験体がみられ、5φでは明らかに付着力が不足していることがわかる。

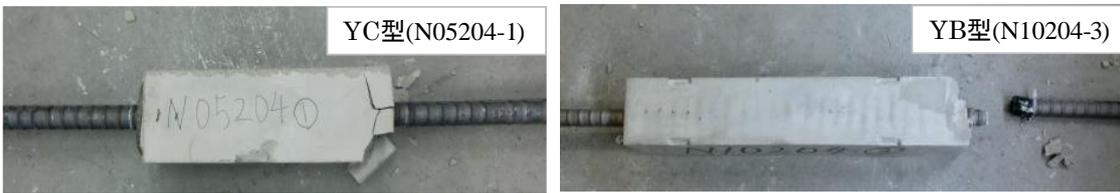


写真-3.6 破壊形態の例

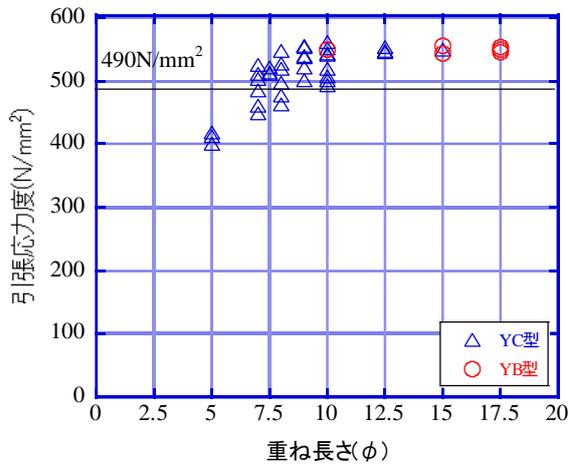


図-3.10 重ね長さと破壊形態の関係

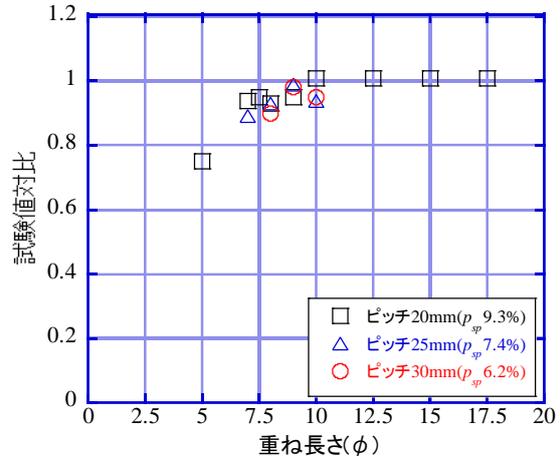


図-3.11 引張強さと試験値の比較

2) D13 タイプ

破壊形態の例を写真-3.7に、重ね長さと引張強さの関係について、破壊形態とともに図-3.12に示す。重ね長さが5φではすべてYC型であり、10φではすべてYB型であった。また7~9φの試験体は、YC型あるいはYB型であるが、表-3.10をみると重ね長さが長いほど、またスパイラル鉄筋のピッチが密なほどYB型の破壊形態を示す試験体が多い傾向であり、重ね長さによる付着力とスパイラル鉄筋による拘束効果を明確に示している。

引張強さの平均値と主鉄筋の材料試験値との比較を図-3.13に示す。重ね長さが7φ以上では材料試験値と同等であるが、5φでは明らかに付着力が不足しており、補筋筋比が小さいほど顕著である。



写真-3.7 破壊形態の例

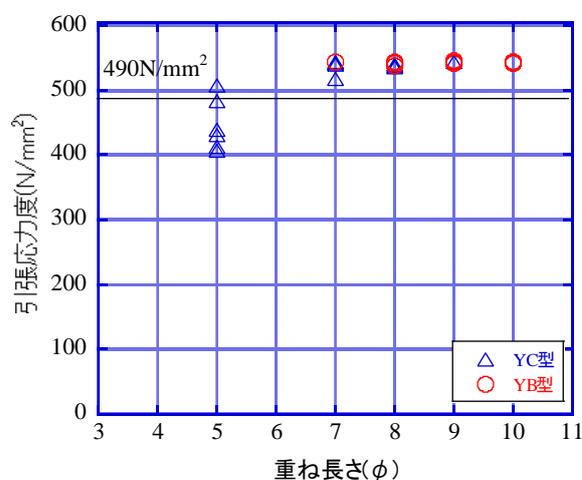


図-3.12 重ね長さと破壊形態の関係

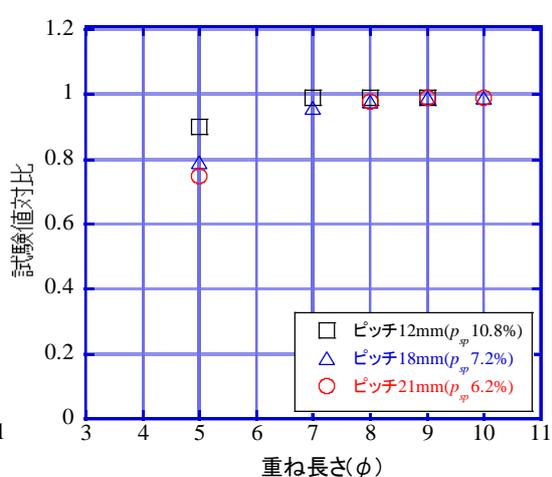


図-3.13 引張強さと試験値の比較

(3) モルタル強度について

表-3.7に示したように、シリーズ1のD25のケース1は、モルタルの圧縮強度が47.7~61.5N/mm²の範囲である。このモルタルの強度差と表-3.8~3.9に示したYC型のN05204, N7.5204, N10204, およびN12.5204における各試験体の引張強さの関係をみると、圧縮強度と引張強さの関係は明確でない。したがって、この圧縮強度の範囲では、モルタルの圧縮強度は引張強さに影響しないといえる。

(4) 補強筋比について

D25 と D13 タイプについて、引張強さの平均値と材料規格値の関係を図-3.14 に示す。D25 は9φ以上、D13 は8φ以上で、補強筋比が最も低い6.2%で規格値を上回っている。

D25 と D13 を比較すると、同程度の補強筋比において主鉄筋径に対する重ね長さの割合が同じでも、引張強さと材料規格値に対する比はD13の方が高い傾向を示している。また、両サイズとも補強筋比が大きいほど引張強さが高い傾向を示し、重ね長さが短いほどその傾向は顕著である。

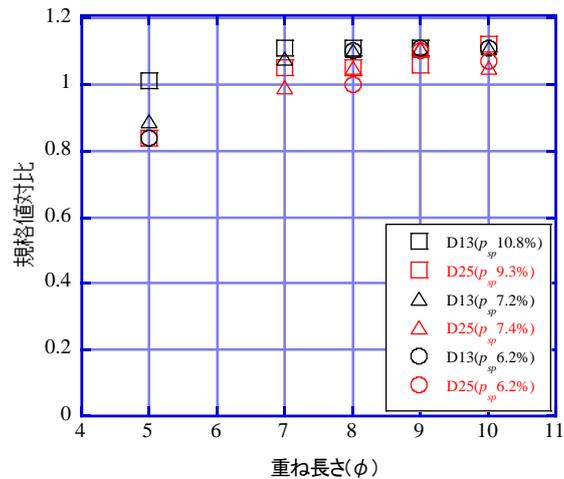


図-3.14 引張強さと補強筋比の関係

(5) 端部閉合について

引張強さと端部閉合の有無の関係を図-3.15～3.16 に示す。破壊形態がYC型の試験体を見ても、端部閉合による拘束効果の向上は期待できない結果であった。

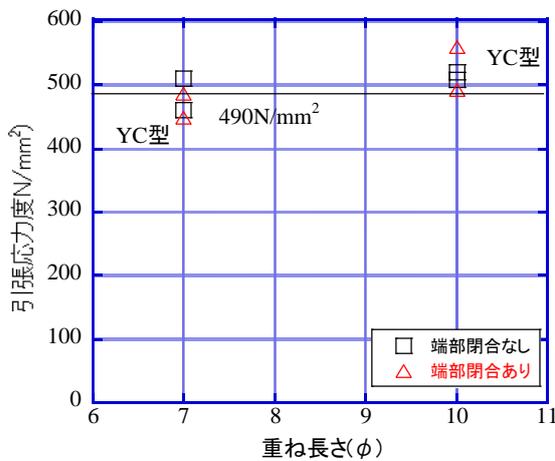


図-3.15 引張強さと端部閉合の関係
(D25 タイプ)

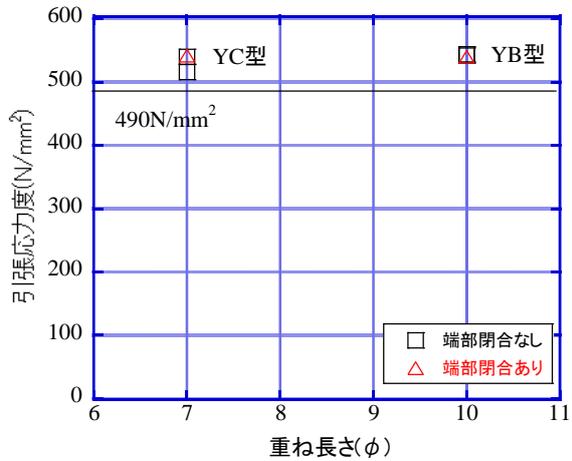


図-3.16 引張強さと端部閉合の関係
(D13 タイプ)

(6) 変位量と降伏点について

引張応力度と変位量の関係について、D25 タイプを図-3.17～3.18 に示す。各試験体の検長が異なるため、横軸はひずみ量に換算して示した。図-3.17 はスパイラル鉄筋のピッチが 20mm ($p_{sp}9.3\%$) の試験体であり、図-3.18 はそれ以外のすべての試験体について示した。図-3.17 をみると、重ね長さが長いほど初期剛性が高く、降伏後の変位量も小さいことがわかる。また、すべての試験体が降伏し、降伏点は主鉄筋の試験値と同等であった。

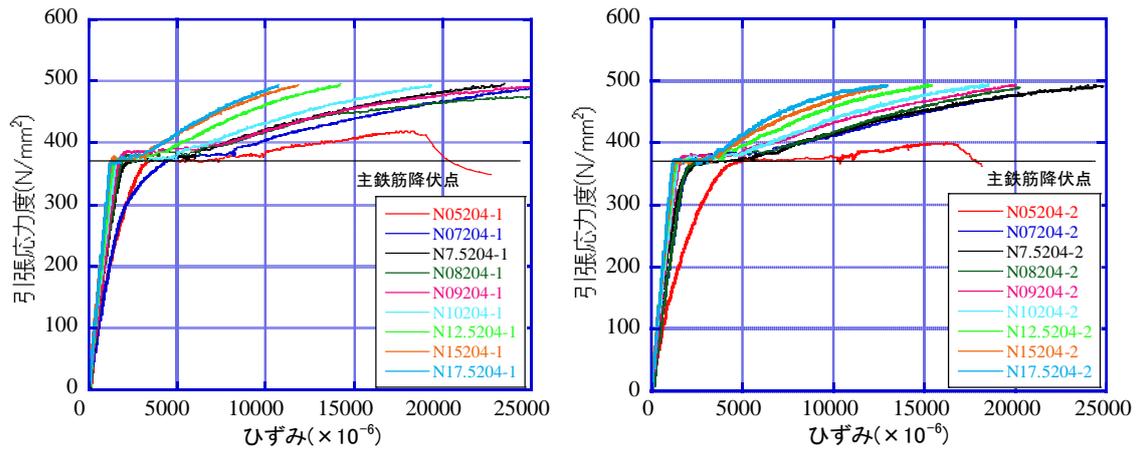


図-3.17 引張応力度と変位量の関係 (D25 タイプ)
ピッチ 20mm ($p_{sp}9.3\%$)

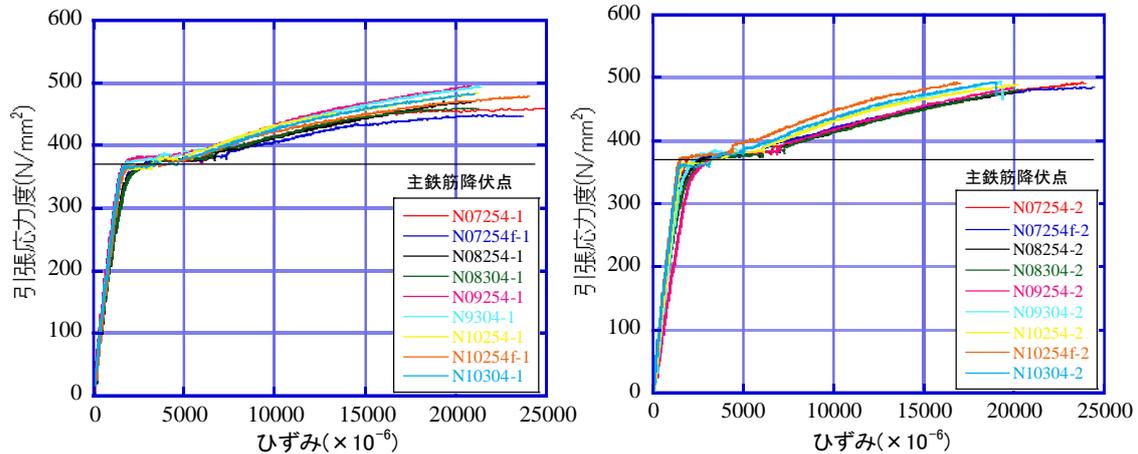


図-3.18 引張応力度と変位量の関係 (D25 タイプ)
ピッチ 25mm ($p_{sp}7.4\%$), ピッチ 30mm ($p_{sp}6.2\%$)

同様に D13 タイプについて図-3.19~3.20 に示す. 図-3.19 はスパイラル鉄筋のピッチが 18mm ($p_{sp}7.2\%$) の試験体であり, 図-3.20 はそれ以外のすべての試験体について示した. 図-3.19 をみると, 重ね長さが 5 ϕ では明らかに剛性は低く, 重ね長さが長いほど初期剛性が高く, 降伏後の変位量も小さいことがわかる. また, D13 タイプもすべての試験体が降伏し, 降伏点は主鉄筋の試験値と同等であり, 降伏後のひずみ降下も明確に表れている.

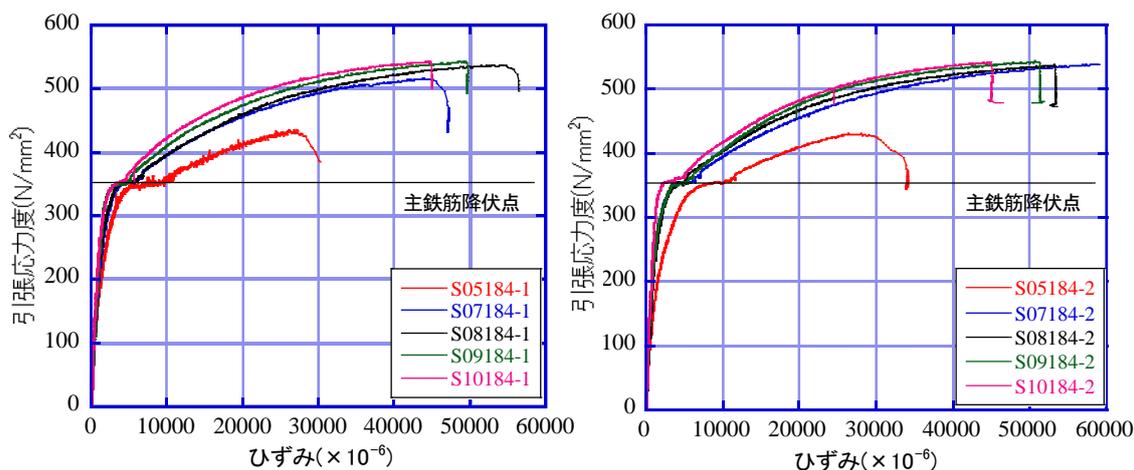


図-3.19 引張応力度と変位量の関係 (D13 タイプ)

ピッチ 18mm ($p_{sp}7.2\%$)

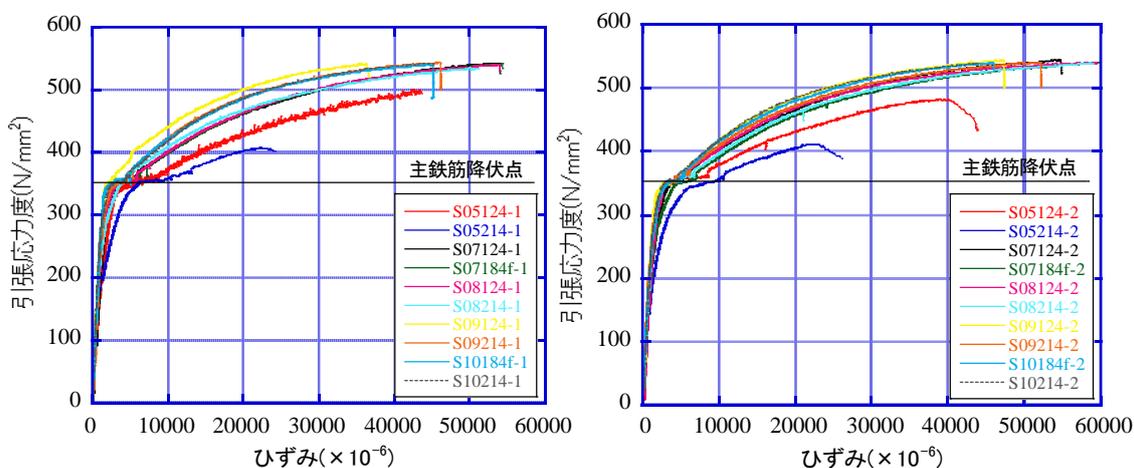


図-3.20 引張応力度と変位量の関係 (D13 タイプ)

ピッチ 12mm ($p_{sp}10.8\%$), ピッチ 21mm ($p_{sp}6.2\%$)

3.3.2 シリーズ2

試験結果の一覧を表-3.12に示す。

表-3.12 試験結果の一覧（シリーズ2）

試験体番号	主鉄筋	重ね長さ	スパイラル鉄筋 ピッチ(mm) (補強筋比 p_{sp})	降伏点		引張強さ			破壊形態
				応力度 (N/mm ²)	試験値 *1 との比	応力度 (N/mm ²)	試験値 *2 との比	規格値 との比 *3	
09164(D16)-1	D16	9φ	16 (6.2%)	381	1.032	564	1.033	1.151	YC
-2				382	1.034	564	1.033	1.151	YC
-3				379	1.028	564	1.033	1.151	YC
平均値				380	1.03	564	1.03	1.15	—
09164(D19)-1	D19	9φ	16 (6.2%)	372	1.008	503	0.932	1.026	YC
-2				370	1.004	510	0.945	1.040	YC
-3				370	1.004	503	0.932	1.026	YC
平均値				370	1.00	506	0.94	1.03	—
09164(D22)-1	D22	9φ	16 (6.2%)	370	0.984	509	0.920	1.039	YC
-2				370	0.983	522	0.944	1.065	YC
-3				370	0.983	504	0.911	1.028	YC
平均値				370	0.98	513	0.93	1.05	—

*1：主鉄筋降伏点=(D16=369N/mm², D19=369N/mm², D22=376N/mm²)との比

*2：主鉄筋引張強さ=(D16=546N/mm², D19=539N/mm², D22=553N/mm²)との比

*3：引張強さ規格値=490N/mm²との比

(1)破壊形態と引張強さについて

破壊形態の例を写真-3.8に示す。D16, D19, および D22 タイプともすべての試験体が YC 型であった。また、引張強さと主鉄筋の材料規格値との比較を表-3.12 からみると、引張強さはすべてのタイプが SD345 の規格値を上回っている。

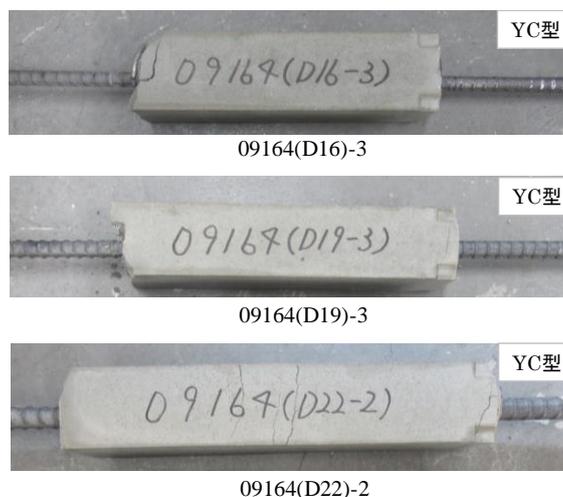


写真-3.8 破壊形態の例

(2) 変位量と降伏点について

引張応力度と変位量の関係を図-3.21～3.23に示す。D16, D19, およびD22タイプともすべての試験体が降伏し、いずれも降伏点は主鉄筋の試験値と同等の値を示した。

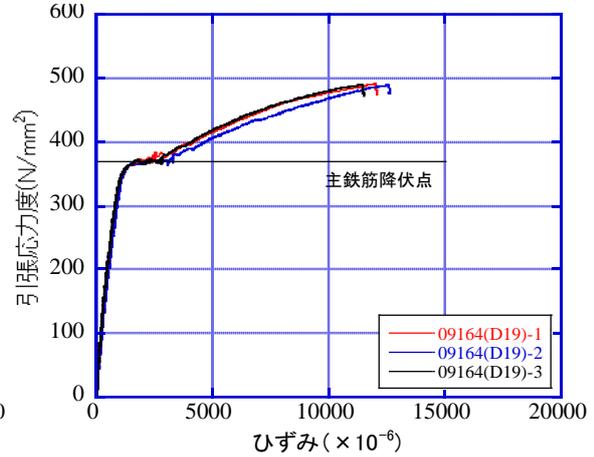
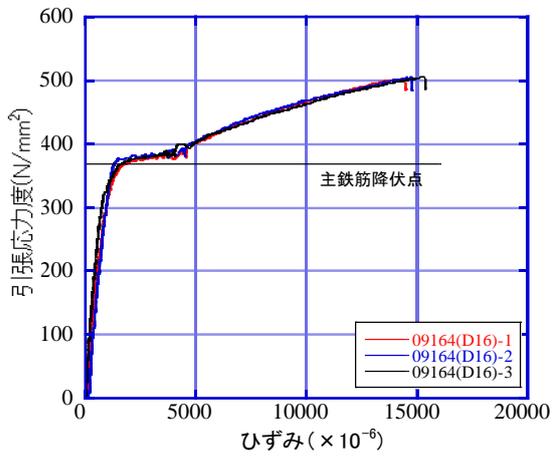


図-3.21 引張応力度と変位量の関係 (D16) 図-3.22 引張応力度と変位量の関係 (D19)

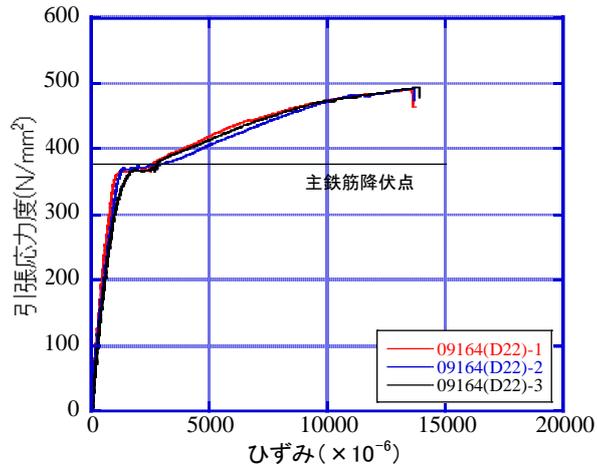


図-3.23 引張応力度と変位量の関係 (D22)

3.4 第3章のまとめ

拘束型重ね継手の引張性能を評価するため、主鉄筋が D13, D16, D19, D22, および D25 の継手について引張試験を実施した。今回の試験の範囲において、以下の結論を得た。

- (1) 降伏点は、D13, D16, D19, D22, および D25 とも母材と同等である。
- (2) 継手の引張強さは、主鉄筋が D13 では重ね長さが 8φ 以上, D25 では 9φ 以上, D16, D19, および D22 では 9φ とし、かつ補強筋比を 6.2%以上とすることで、SD345 の主鉄筋の材料規格値を上回る。
- (3) 破壊形態は、主鉄筋が D13 は 8φ 程度までは主鉄筋が降伏した後に付着破壊し、10φ では主鉄筋が破断する。D16, D19, および D22 は 9φ で主鉄筋が降伏した後に付着破壊する。D25 は 5φ から 12.5φ までは主鉄筋が降伏した後に付着破壊し、17.5φ では主鉄筋が破断する。
- (4) 継手の初期剛性は重ね長さが長いほど高く、引張強さは補強筋比が大きいほど高い。
- (5) モルタルの圧縮強度が 47.7~61.5N/mm² の範囲では、モルタルの圧縮強度は継手の引張強さに影響しない。
- (6) スパイラル鉄筋の端部を閉合して剛性を高めても、継手の拘束効果には影響しない。

このように、主鉄筋と添筋の重ね長さについて、主鉄筋が D13 では 8φ, D16, D19, D22, および D25 では 9φ とし、かつ補強筋比を 6.2%とすることで、SD345 の鉄筋継手としての性能を発揮することがわかった。

第3章の参考文献

- 1) 野村和嗣, 原夏生, 睦好宏史, 町田篤彦: プレキャスト型枠コンクリート工法における鉄筋の接合方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.2, pp.259-264, 1993.7
- 2) 土木学会: コンクリートライブラリー156 鉄筋定着・継手指針 [2020年版], 2020.
- 3) 高速道路総合技術研究所: 構造物施工管理要領 (令和2年7月版), 2020.7
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 規準編 [2018年制定], 充填モルタルの流動性試験方法 (JSCE-F 541-2013), pp.318-319, 2018.

第4章 拘束型重ね継手を用いたはりの曲げ性能評価

4.1 序節

本章では、拘束型重ね継手を用いて接合した部材が、一体成形の部材と同等の曲げ性能を有するか評価するため、単調荷重によるはりの曲げ荷重実験を実施した。試験体に用いた継手は、第3章で述べた継手単体の引張性能評価より、SD345の鉄筋継手としての性能を有する継手とし、実用化する主鉄筋の最小サイズD13と、最大サイズD25に適合する継手を用いた。

4.2 実験概要

4.2.1 試験体の形状および諸元

試験体の形状寸法と配筋を図-4.1～4.2に、試験体の諸元を表-4.1に示す。試験体は、等曲げモーメント区間の中央に接合部を設けた部材と一体成形の部材とし、主鉄筋をD13としたD13シリーズと、D25としたD25シリーズの2種類とした。接合部を設けた部材の接合は、継手が上下方向となるように試験体を立てた状態で接合し、下側開口部の注入孔からポンプを用いてモルタルを注入した。接合面の端面処理は行わず、接合面にはエポキシ樹脂接着剤を塗布した。なお、継手周囲のせん断補強鉄筋による補強は行っていない。

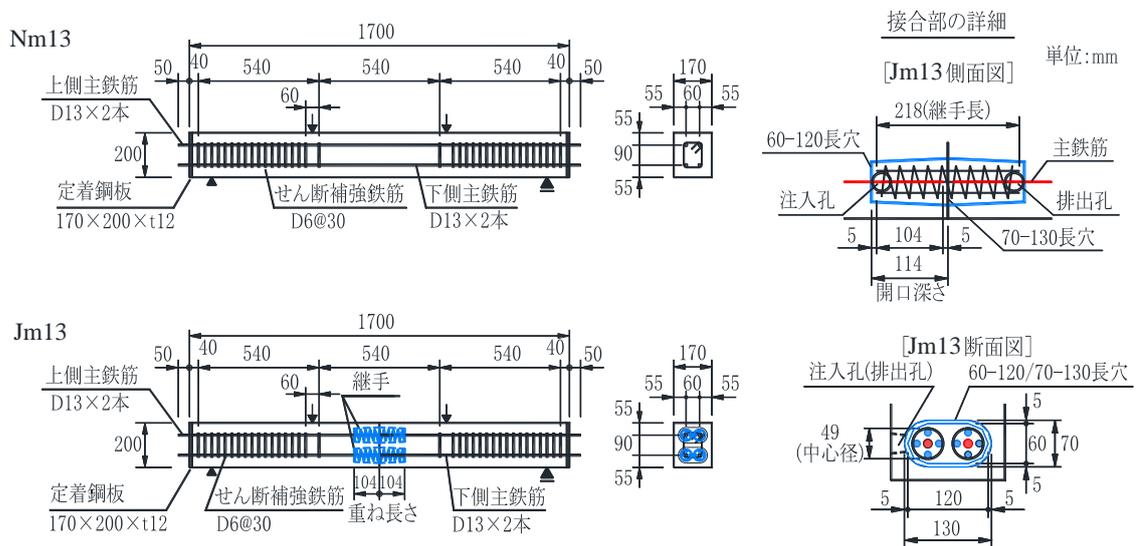


図-4.1 試験体の形状寸法と配筋 (D13 シリーズ)

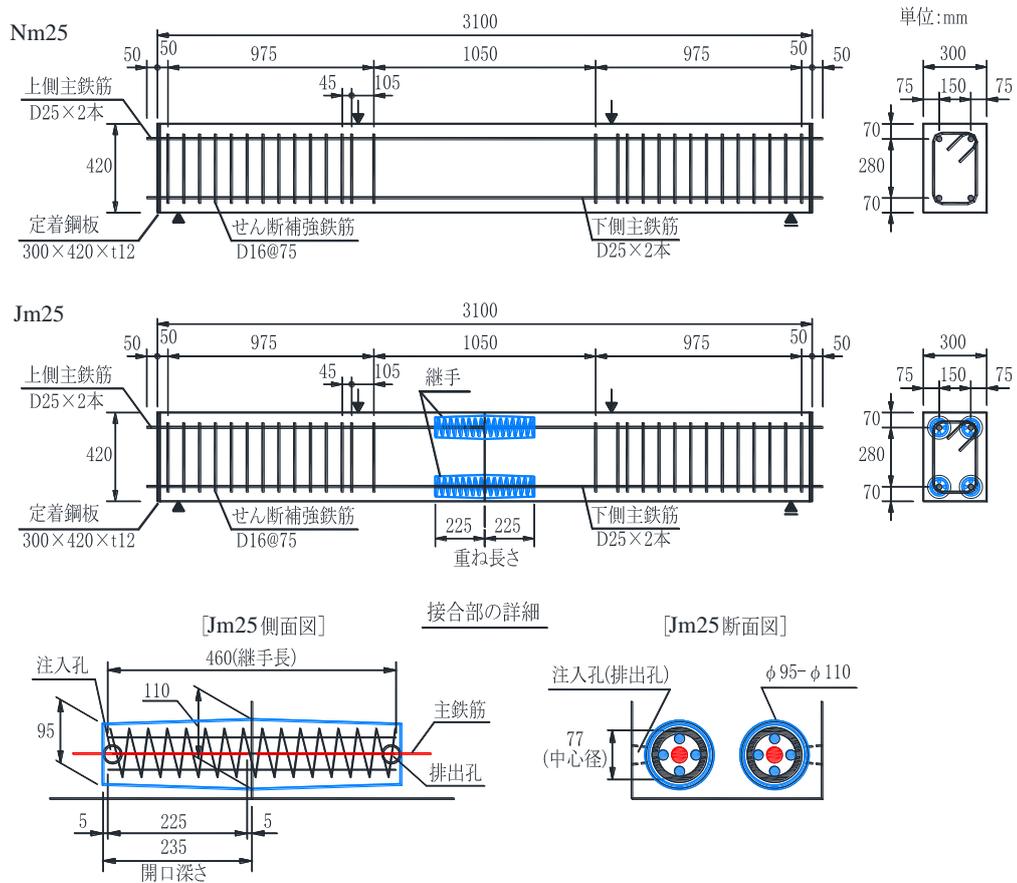


図-4.2 試験体の形状寸法と配筋 (D25 シリーズ)

表-4.1 試験体の諸元

試験体番号	接合部	主鉄筋			重ね長さ	添筋		スパイラル鉄筋		
		呼び名	本数	引張鉄筋比 p_v (%)		呼び名	本数	呼び名	ピッチ (mm)	補強筋比 p_{sp} (%)
Nm13	無し	D13	2本	1.03	—	—	—	—	—	
Jm13	有り				8φ	D10	4本	D6	21	6.2
Nm25	無し	D25	2本	0.97	—	—	—	—	—	
Jm25	有り				9φ	D16	4本	D10	30	6.2

※1) φ : 主鉄筋径

4.2.2 使用材料

(1) 鉄筋

試験体に使用した異形棒鋼の諸元値を表-4.2 に、主鉄筋と添筋の応力-ひずみ曲線を図-4.3~4.4 に示す。材質はD10以下がSD295、D13以上はSD345である。

表-4.2 鉄筋の諸元値

使用箇所	D13シリーズ				D25シリーズ			
	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
主鉄筋	D13	380	543	180	D25	381	554	179
せん断補強鉄筋	D6	469	545	190	D16	375	555	177
添筋	D10	357	460	172	D16	375	555	177
スパイラル鉄筋	D6	453	551	196	D10	355	471	179

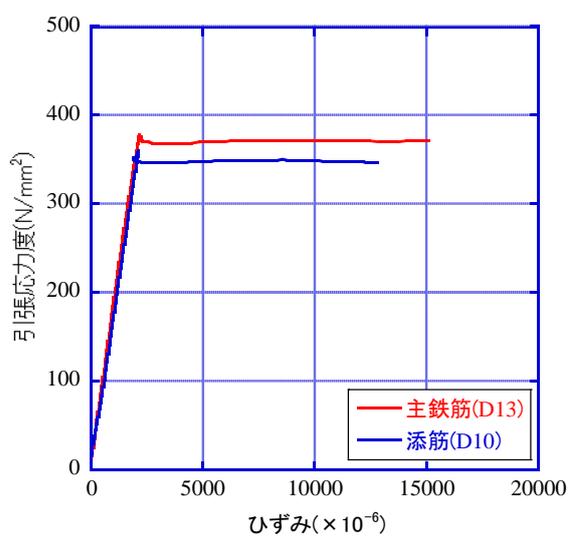


図-4.3 応力-ひずみ曲線 (D13 シリーズ)

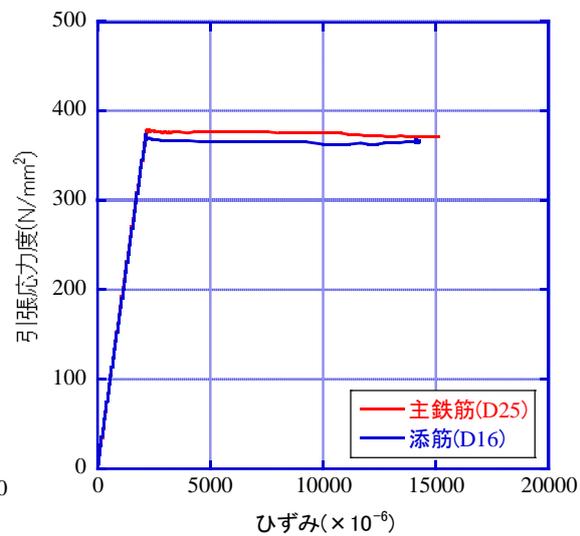


図-4.4 応力-ひずみ曲線 (D25 シリーズ)

(2) コンクリート

試験体の作製に使用したコンクリートの示方配合を表-4.3 に、載荷実験時のコンクリートの諸元値を表-4.4 に、応力-ひずみ曲線を図-4.5 に示す。試験体および圧縮強度用供試体は、初期養生として常圧の蒸気養生^りを行い、翌日に脱型した後は屋内での気中養生とした。なお、コンクリートは普通コンクリートを使用した。

表-4.3 コンクリートの示方配合

試験体番号	設計基準強度 (N/mm ²)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	A E 減水剤
Nm13,Jm13 Nm25,Jm25	50	50.0	44	165	330	796	1,031	1.32

表-4.4 コンクリートの諸元値

試験体番号	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	作製日 2018/	試験日 2018/	材令
Nm13,Jm13	45.1	25	10/30	11/14	15日
Nm25,Jm25	44.9	24	10/10	10/25-Nm,10/26-Jm	15日, 16日

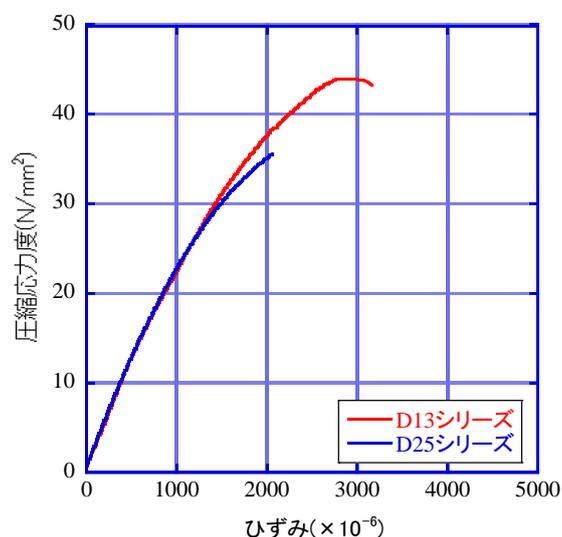


図-4.5 応力-ひずみ曲線

(3) モルタル

モルタルは、プレミックスタイプのセメント系無収縮モルタルを使用した。使用材料は第3章の引張試験と同一であり、水セメント比は16～17%の範囲で練り混ぜ時のフレッシュ性状を確認し、水量を調整した。

載荷実験時の材料試験値を表-4.5に、応力-ひずみ曲線を図-4.6に示す。なお、圧縮強度用供試体はモルタルを充填した翌日に脱型し、その後は屋内での気中養生とした。

表-4.5 モルタルの諸元値

試験体番号	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	作製日 2018/	試験日 2018/	材令
Jm13	64.8	36	11/2	11/14	12日
Jm25	61.3	26	10/13	10/26	13日

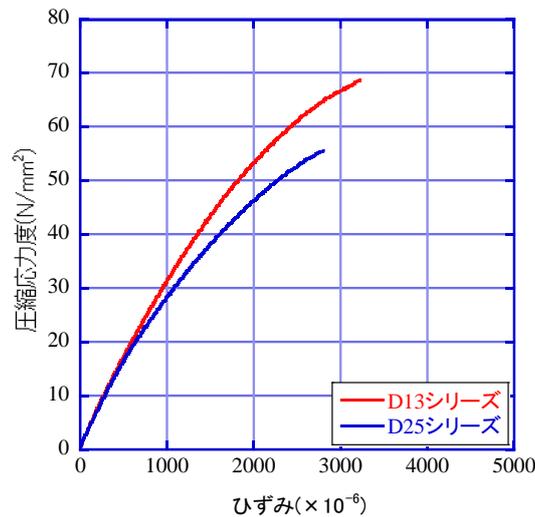


図-4.6 応力-ひずみ曲線

(4) 接着剤

接着剤は、接着強さが6N/mm²以上のプレキャストコンクリート用エポキシ樹脂接着剤²⁾を使用した。

4.2.3 載荷方法

載荷方法は、図-4.7に示すように対称2点載荷とし、一方向の単調載荷であるが、一次載荷として下側主鉄筋の引張応力度が200N/mm²に達するまで載荷し、一旦荷重ゼロ付近まで除荷した。そして二次載荷として下側主鉄筋の引張応力度が300N/mm²に達するまで載荷し、再度除荷した後に試験体が破壊するまで載荷した。なお一次載荷重と二次載荷重は、RC曲げ理論による計算値であり、載荷重値を表-4.6に示す。

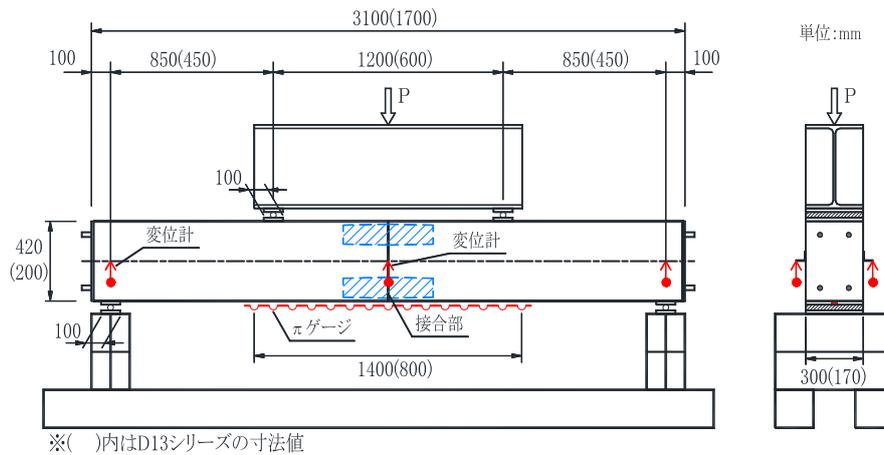


図-4.7 荷重方法

表-4.6 荷重重値の一覧

試験体番号	一次荷重重 (kN)	二次荷重重 (kN)	計算に使用したヤング係数(kN/mm ²)
Nm13,Jm13	30	45	$E_s=200$
Nm25,Jm25	135	225	$E_c=35$

※1) E_s :鉄筋のヤング係数, E_c :コンクリートのヤング係数

4.2.4 計測項目

計測項目は、図-4.7 に示したように、試験体の下面にゲージ長が 100mm の π 型変位計を設置し、接合面の開きとひび割れ幅を計測した。また試験体中央と支点に変位計を設置し、試験体断面高さ中央の変位量を計測した。鉄筋のひずみは、荷重点直下の下側主鉄筋と、下側主鉄筋と同じ高さにおける添筋中央部にストレインゲージを貼付して計測した。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 破壊形態

破壊時におけるひび割れ状況を図-4.8 に、破壊時の状況を写真-4.1 に示す。図-4.8 に示す一次・二次荷重時とは、その荷重段階での最大ひび割れ幅の発生位置を示している。

一体成形の部材は、荷重の増加とともに試験体中央の変位が増加し、下側主鉄筋が降伏した後に圧縮側コンクリートが圧壊する、鉄筋コンクリートの一般的な曲げ破壊形態であった。一方、接合部を設けた部材は、継手端部において鉄筋量と継手開口部により剛性が異なるため、応力集中が懸念された。しかし、Jm13 および Jm25 とも、接合面に対し継手端部のひび割れの進展が顕著ではあったが、一体成形の部材と同様に、下側主鉄筋が降伏した後に圧縮側のコンクリートが圧壊した。

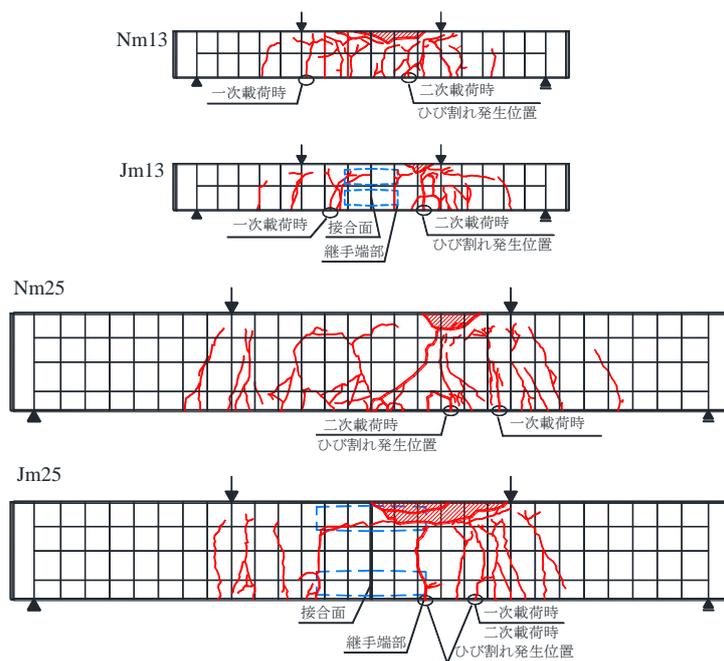


図-4.8 ひび割れ状況図

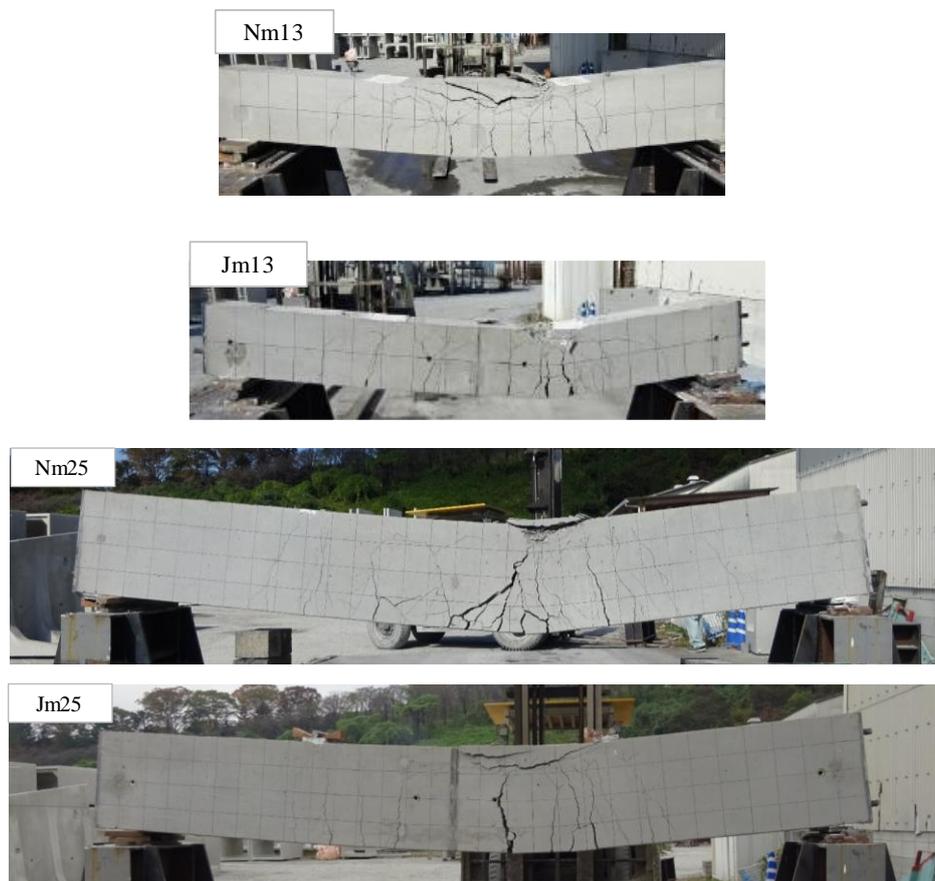


写真-4.1 破壊状況

4.3.2 降伏荷重と破壊荷重

下側主鉄筋降伏荷重と破壊荷重を表-4.7に示す。表中における計算値について、主鉄筋降伏時の荷重は複鉄筋断面で弾性解析により曲げモーメントを算出し、破壊荷重は(式 4-1)³⁾より終局曲げモーメントを求め、いずれも荷重値に換算して求めた。なお計算に使用した材料の特性値は、材料試験値を用いた。

$$M_u = 0.688 \cdot f'_c \cdot b \cdot x \cdot (d - 0.416 \cdot x) + A'_s \cdot f'_{sy} \cdot (d - d') \quad (4-1)$$

- ここに、 M_u : 終局曲げモーメント(N・mm)
 f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)
 b : 部材幅(mm)
 x : 中立軸(mm)
 d : 有効高さ(mm)
 d' : 圧縮鉄筋のかぶり(mm)
 A'_s : 圧縮鉄筋の断面積(mm²)
 f'_{sy} : 圧縮鉄筋の降伏強度(N/mm²)

実測値の計算値に対する比は、主鉄筋降伏荷重が 0.90~0.97 と、実測値がやや低めの値であるが、Nm13 と Jm13, Nm25 と Jm25 の比較では同様の値である。破壊荷重は 1.00~1.07 の範囲であり、全般に実測値と計算値は近い値である。このように、接合部を設けた部材は、一体成形の部材と同等の曲げ耐力を有するといえる。

表-4.7 主鉄筋降伏荷重と破壊荷重

試験体 番号	下側主鉄筋降伏荷重			破壊荷重		
	P_y (kN)	$P_{y\text{cal}}$ (kN)	$P_y/P_{y\text{cal}}$	P_{max} (kN)	P_{maxcal} (kN)	$P_{\text{max}}/P_{\text{maxcal}}$
Nm13	51.6	56.6	0.91	76.7	71.9	1.07
Jm13	50.7	56.6	0.90	74.4	71.9	1.03
Nm25	266.0	282.2	0.94	312.5	311.9	1.00
Jm25	273.0	282.2	0.97	321.8	311.9	1.03

※1) P_y , P_{max} : 実測値 $P_{y\text{cal}}$, P_{maxcal} : 計算値

4.3.3 ひび割れ幅

ひび割れ発生荷重と各載荷段階におけるひび割れ幅の一覧を表-4.8に示す。ひび割れ発生荷重の計算値は、コンクリートの引張縁の曲げ応力度が、曲げひび割れ強度となる荷重を全断面有効とし(式4-2)より求めた。なお計算に使用した材料の特性値は、材料試験値を用いた。

$$P_{c\text{cal}} = \frac{M_{\text{crd}}}{a} \quad (4-2)$$

ここに、 $P_{c\text{cal}}$ ：曲げひび割れ発生荷重(N)

M_{crd} ：断面に曲げひび割れが発生する限界の曲げモーメントで、コンクリートの引張縁の曲げ応力度が設計曲げひび割れ強度となるモーメント(N・mm)

a ：せん断スパン(mm)

表-4.8 ひび割れ発生荷重とひび割れ幅

試験体番号	ひび割れ発生荷重		載荷段階	継手端部 (mm)	接合面 (mm)	最大値 (mm)	平均値 (mm)	総和 (mm)
	P_c (kN)	$P_{c\text{cal}}$ (kN)						
Nm13	14.0	14.6	一次	—	—	0.312	0.265	1.320
			二次	—	—	0.540	0.468	2.340
Jm13	12.1		一次	0.224	0.086	0.337	0.206	1.440
			二次	0.367	0.135	0.606	0.373	2.610
Nm25	66.0	62.4	一次	—	—	0.297	0.207	1.660
			二次	—	—	0.671	0.446	3.570
Jm25	62.3		一次	0.280	0.106	0.309	0.194	1.360
			二次	0.550	0.226	0.696	0.399	2.790

※1) P_c ：実測値 $P_{c\text{cal}}$ ：計算値

ひび割れ発生荷重について実測値と計算値を比較すると、Jm13が計算値よりやや小さい値を示したが、その他の試験体は計算値と同等である。Nm13とJm13、Nm25とJm25の比較では、いずれも接合部を設けた部材の方が、ひび割れ発生荷重がやや小さい。しかし、図-4.8に示したように、ひび割れは継手以外の箇所ですべて最初に発生している。継手が同一断面に集中している場合は、初期段階での接合面の開きが懸念されるが、最初のひび割れ発生段階で接合面の開きは確認できない。これは、接合面に塗布したエポキシ樹脂接着剤が引張に抵抗しているためといえる。

下側主鉄筋の引張応力度が200N/mm²時の一次載荷で最大ひび割れ幅をみると、Nm13が0.312mm、Jm13が0.337mm、Nm25が0.297mm、Jm25が0.309mmである。一方で継手端部

と接合面のひび割れ幅は、Jm13 は 0.224mm と 0.086mm，Jm25 は 0.280mm と 0.106mm あり，最大ひび割れは継手以外の箇所が発生している．これは二次載荷の値をみても同じ傾向であり，荷重が増加しても継手がひび割れを誘発することはない．また，等曲げモーメント区間に発生したひび割れ幅の総和をみると，D13 シリーズでは Jm13 がやや大きい，D25 シリーズでは Nm25 がやや大きく，継手を有することで特筆すべき点はない．

4.3.4 変位性状

荷重と試験体中央での変位量の関係を図-4.9～4.10 に，二次載荷除荷後の荷重と変位量の関係について，下側主鉄筋降伏までの関係を抽出し図-4.11～4.12 に，変形性能と剛性の一覧を表-4.9 に示す．図-4.11～4.12 に示す計算値は，土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に示される換算断面二次モーメント(式 4-3)を用い，各荷重段階におけるスパン中央の変位量として(式 4-4)^{3),5)}より求めた．なお計算に使用した材料の特性値は，材料試験値を用いた．

$$I_e = \left\{ \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right\}^3 \cdot I_g + \left[1 - \left\{ \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right\}^3 \right] \cdot I_{cr} \quad (4-3)$$

- ここに， I_e : 換算断面二次モーメント(mm⁴)
 M_{dmax} : 変位・変形算定時の設計曲げモーメントの最大値(N・mm)
 M_{crd} : 断面に曲げひび割れが発生する限界の曲げモーメントで，コンクリートの引張縁の曲げ応力度が設計曲げひび割れ強度となるモーメント(N・mm)
 I_g : 全断面の断面二次モーメント(mm⁴)
 I_{cr} : 引張応力を受けるコンクリートを除いた断面二次モーメント(mm⁴)

$$\delta = \frac{(P/2) \cdot a}{6 \cdot E_c \cdot I_e} \left[3 \cdot l \cdot \left\{ \frac{l}{2} \right\} - 3 \cdot \left\{ \frac{l}{2} \right\}^2 - a^2 \right] \quad (4-4)$$

- ここに， δ : スパン中央の変位量(mm)
 P : 荷重(kN)
 a : せん断スパン(mm)
 l : スパン(mm)
 E_c : コンクリートのヤング係数(N/mm²)

図-4.9～4.10 をみると、Jm13 と Jm25 の曲げ性状は、Nm13 および Nm25 と同様に一般の鉄筋コンクリート部材の変位性状を示していることがわかる。また図-4.10 をみると、Nm25 は 61.2mm、Jm25 は 43.6mm で圧縮縁側にひび割れが発生し、剛性が低下したことで一旦荷重が降下している。Nm25 は 75mm 付近、Jm25 は 70mm 付近で変位計が外れ、その後の変位量は計測できなかった。しかし荷重はその後にも上昇し、Nm25 は最大荷重付近まで、Jm25 は最大荷重を示した後に、いずれも圧縮縁のコンクリートが圧壊し破壊に至った。

最大荷重時の変位量は、Nm13 が 34.5mm、Jm13 が 29.2mm、Nm25 が 61.2mm、Jm25 が 43.6mm であった。この値に対する部材角は、Nm13 が 4.6%、Jm13 が 3.9%、Nm25 が 4.2%、Jm25 が 3.0%となり、十分な変形性能を有しているといえる。なお D25 シリーズの部材角は、一旦荷重が降下したときの変位量に対する値である。

図-4.11～4.12 をみると、下側主鉄筋降伏までの曲げ剛性は、いずれの試験体も計算値と同等以上であることがわかる。また、Nm13 と Jm13 および Nm25 と Jm25 の比較では、いずれも接合部を設けた Jm13 と Jm25 がやや高い値を示している。

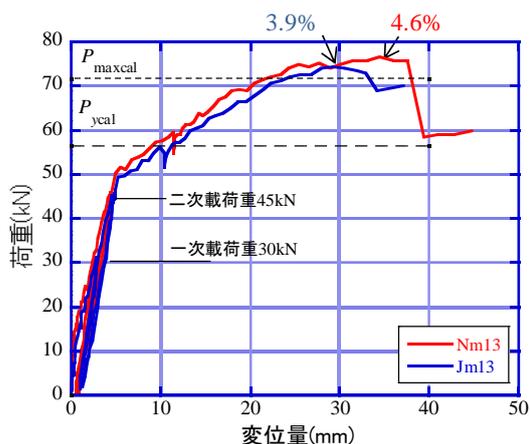


図-4.9 荷重と変位量 (D13 シリーズ)

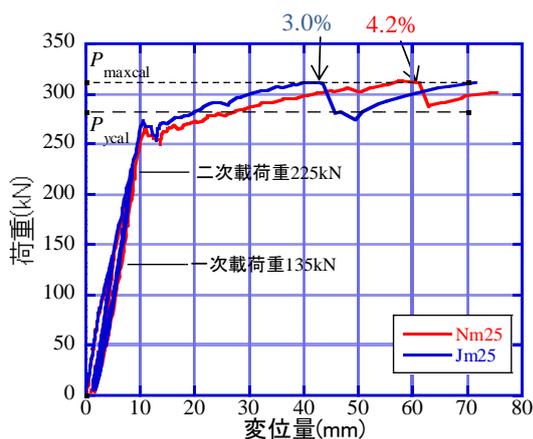


図-4.10 荷重と変位量 (D25 シリーズ)

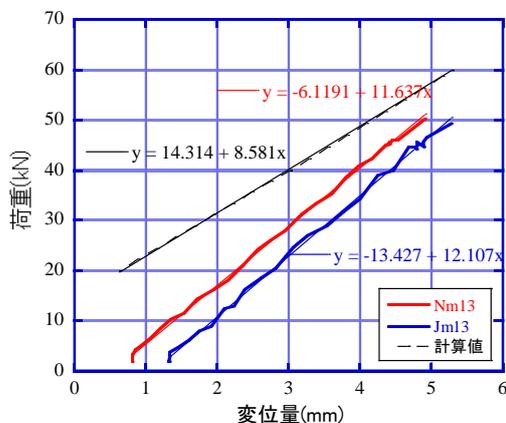


図-4.11 剛性 (D13 シリーズ)

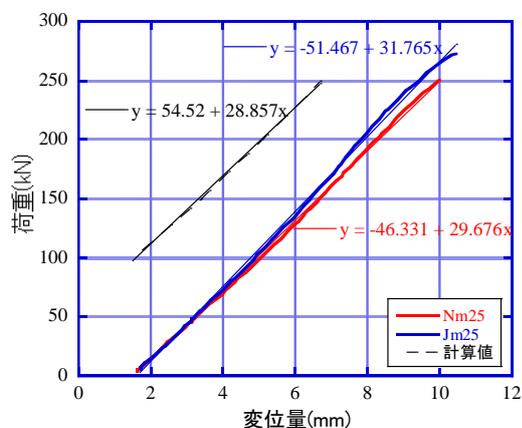


図-4.12 剛性 (D25 シリーズ)

表-4.9 変形性能と剛性

試験体番号	δ_{\max} (mm)	スパン l (mm)	部材角 $\delta_{\max}/l/2$ (%)	荷重と変位量の傾き	
				E_y (kN/mm)	$E_{y\text{cal}}$ (kN/mm)
Nm13	34.5	1,500	4.6	11.637	8.581
Jm13	29.2		3.9	12.107	
Nm25	61.2	2,900	4.2	29.676	28.857
Jm25	43.6		3.0	31.765	

※1) δ_{\max} : 試験体中央の変位量

※2) E_y : 荷重-変位量の傾き(実測値) $E_{y\text{cal}}$: 計算値

4.3.5 ひずみ性状

下側主鉄筋と添筋のひずみを図-4.13~4.14 に示す。Jm13, Jm25 とともに、添筋は降伏していないことが分かる。

D13 シリーズでは、Nm13 は 14kN, Jm13 は 12.1kN でひび割れが発生したため、ひずみ勾配がやや変化している。また、いずれも 20kN の手前で主鉄筋のひずみが急激に増加しているが、これはその荷重レベルにおいて、ひずみ計測点付近にひび割れが発生したためである。Nm13 と Jm13 を比較すると、ひずみ性状は同様の傾向を示しているが、Jm13 のひずみが全般にやや大きい値を示している。これは、Jm13 は主鉄筋のひずみ計測位置と剛性の高い継手の位置が比較的近く、ひずみ計測位置付近のひび割れが卓越していることが影響していると考えられる。

D25 シリーズでは、Nm25, Jm25 とともにひび割れ発生荷重の 65kN 付近でひずみ勾配が変化している。降伏荷重は Jm25 がやや高いが、それ以外は Nm25 と Jm25 の荷重-ひずみ曲線は近似している。

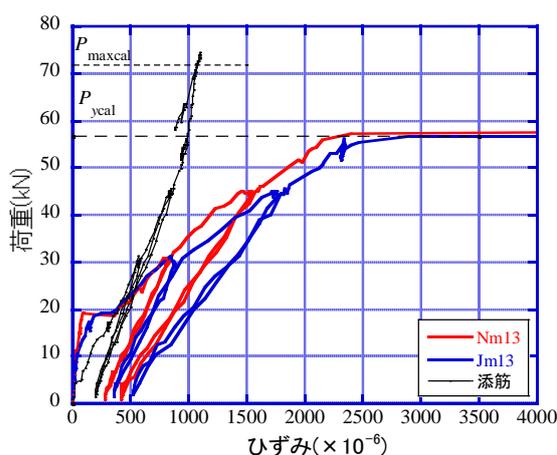


図-4.13 荷重とひずみ (D13 シリーズ)

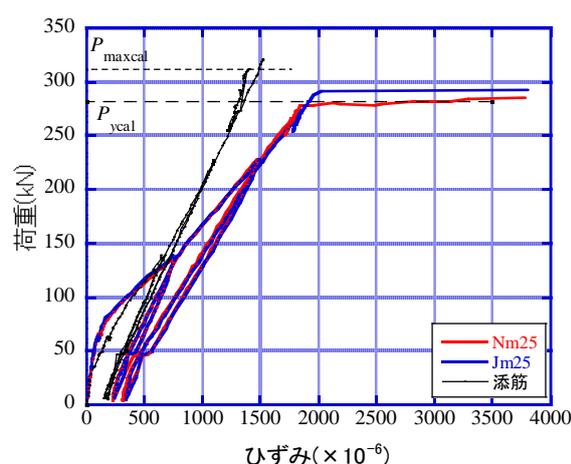


図-4.14 荷重とひずみ (D25 シリーズ)

4.4 第4章のまとめ

拘束型重ね継手を用いて接合した部材の曲げ性能を評価するため、主鉄筋を D13 および D25 とした 2 タイプの部材を作製し、はりの曲げ実験を実施した。今回の実験の範囲において、以下の結論を得た。

- (1) 継手を用いて接合した部材の曲げ耐力、変位性状、およびひずみ性状は、いずれのタイプとも一体成形の部材と同等である。
- (2) 下側主鉄筋が降伏するまでの荷重と変位量の傾きから求めた曲げ剛性は、主鉄筋が D13 および D25 タイプとも、すべての部材が計算値と同等以上であり、継手を用いて接合した部材の方が、一体成形の部材よりやや高い。
- (3) 継手を用いて接合した部材の曲げひび割れは、継手以外の箇所に最初に発生し、荷重が増加しても継手がひび割れを誘発することはない。

第4章の参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編 [2017年制定]，2017.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 規準編 [2018年制定]，プレキャストコンクリート用樹脂系接着剤（橋げた用）品質規格（JSCE-H 101-2013），pp.453-456，2018.
- 3) 町田篤彦，関博，丸山武彦，檜貝勇，斉藤成彦：鉄筋コンクリート工学 改訂3版，オーム社，2018.7
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編 [2017年制定]，2017.
- 5) 木下洋三郎：梁の公式集，理工図書，1997.7

第5章 拘束型重ね継手を用いたはりのせん断性能評価

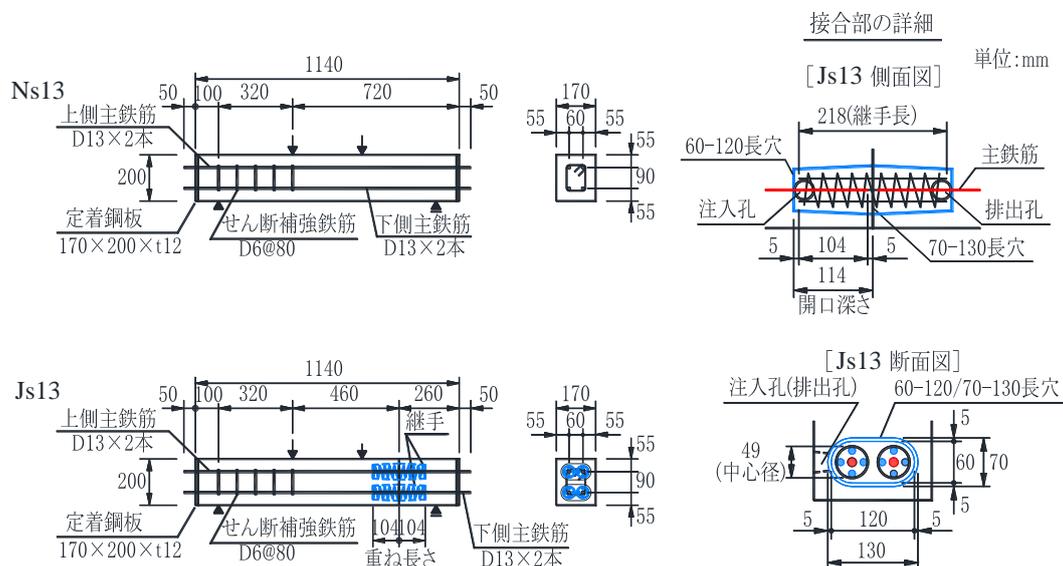
5.1 序節

本章では、拘束型重ね継手を用いて接合した部材が、一体成形の部材と同等のせん断性能を有するか評価するため、単調载荷によるはりのせん断载荷実験を実施した。試験体に用いた継手は、第4章で述べたはりの曲げ性能評価と同じタイプの継手とした。

5.2 実験概要

5.2.1 試験体の形状および諸元

試験体の形状寸法と配筋を図-5.1～5.2に、試験体の諸元を表-5.1に示す。試験体は、せん断スパンの中央に接合部を設けた部材と一体成形の部材とし、主鉄筋をD13としたD13シリーズと、D25としたD25シリーズの2種類とした。接合部を設けた部材の接合方法は、第4章で述べた曲げ実験と同様であり、接合面の端面処理は行わず、接合面にはせん断キヤを設けず、エポキシ樹脂接着剤を塗布した。なお、継手周囲のせん断補強鉄筋による補強は行っていない



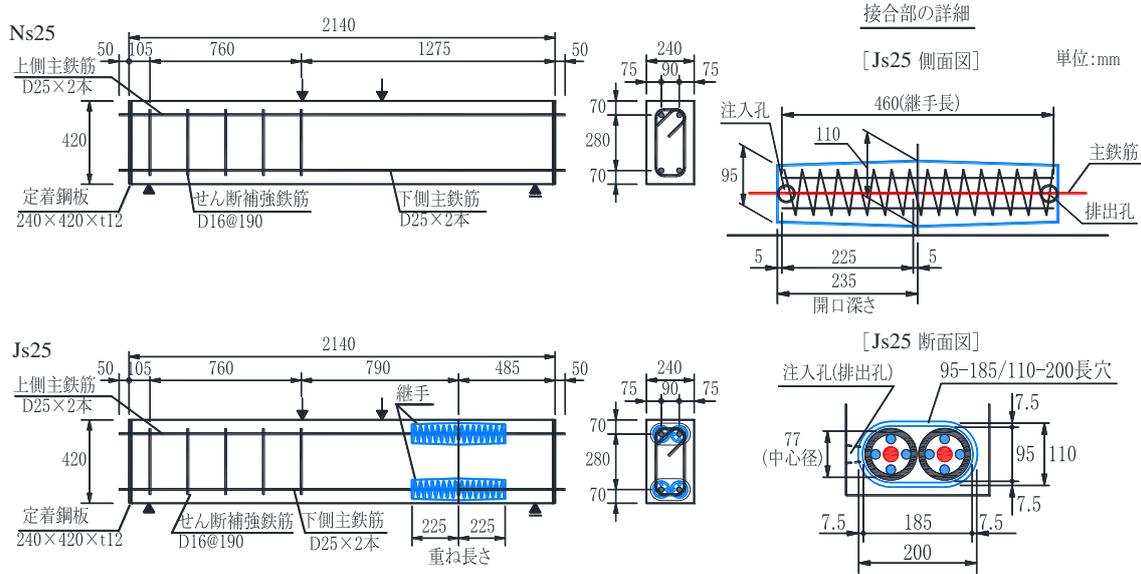


図-5.2 試験体の形状寸法と配筋 (D25 シリーズ)

表-5.1 試験体の諸元

試験体番号	接合部	主鉄筋			重ね長さ	添筋		スパイラル鉄筋		
		呼び名	本数	引張鉄筋比 p_v (%)		呼び名	本数	呼び名	ピッチ (mm)	補強筋比 p_{sp} (%)
Ns13	無し	D13	2本	1.03	—	—	—	—	—	—
Js13	有り				8φ	D10	4本	D6	21	6.2
Ns25	無し	D25	2本	1.21	—	—	—	—	—	—
Js25	有り				9φ	D16	4本	D10	30	6.2

※1) φ : 主鉄筋径

5.2.2 試験体の設計

本実験は、接合部のせん断性能を評価することが目的であるため、試験体の設計においては、接合部を設けたせん断スパン内でせん断破壊させることを前提とした。また、主鉄筋を曲げ降伏させず、せん断スパン内のせん断力が最大となるように設計した。せん断破壊に導くには、曲げ耐力を向上させる必要がある。曲げ耐力は、鉄筋量を増やし鉄筋の材質を高強度とすることで向上できる。そのため、継手を配置できる範囲で主鉄筋の間隔を狭くした。一方で、材質については実用化する材質を優先することにした。さらに、コンクリートの設計基準強度は、実用化するPCa部材の下限強度である 30N/mm^2 を使用し、せん断破壊に導くように試みた。曲げ耐力は(式 5-1)¹⁾より終局曲げモーメントを求め、せん断圧縮耐力と斜めひび割れ耐力は、既往の評価式^{2),3)}(式 5-2)～(式 5-3)より求めた。なお、コンクリートの圧縮強度は設計基準強度、鉄筋の降伏強度は規格値を用いて求めた。

$$M_u = 0.688 \cdot f'_c \cdot b \cdot x \cdot (d - 0.416 \cdot x) + A'_s \cdot f'_{sy} \cdot (d - d') \quad (5-1)$$

$$V_u = \frac{0.244 \cdot f'_c \cdot \frac{2}{3} \cdot (1 + \sqrt{100 \cdot p_v}) \cdot (1 + 3.33 \cdot \gamma / d)}{1 + (a/d)^2} \cdot b \cdot d \quad (5-2)$$

$$V_c = 0.2 \cdot f'_c \cdot \frac{1}{3} \cdot (100 \cdot p_v)^{\frac{1}{3}} \cdot (1000/d)^{\frac{1}{4}} \cdot (0.75 + 1.4 \cdot d/a) \cdot b \cdot d \quad (5-3)$$

- ここに、 M_u : 終局曲げモーメント(N・mm)
 f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)
 b : 部材幅(mm)
 x : 中立軸(mm)
 d : 有効高さ(mm)
 d' : 圧縮鉄筋のかぶり(mm)
 A'_s : 圧縮鉄筋の断面積(mm²)
 f'_{sy} : 圧縮鉄筋の降伏強度(N/mm²)
 V_u : せん断圧縮破壊耐力(N)
 V_c : 斜めひび割れ耐力(N)
 p_v : 引張鉄筋比
 a : せん断スパン(mm)
 γ : 支圧板の部材軸方向長さ(100mm)

(式 5-1)～(式 5-3)より求めた耐力を荷重値に換算し、せん断スパン比 a/d と破壊モードの関係について、D25 シリーズを図-5.3 に示す。D25 シリーズは、試験体の有効高さ d を第4章の曲げ実験と同じ 350mm とし、主鉄筋は継手の外径 87mm に対し、鉄筋量が最大となるように 90mm 間隔で 2 本配置した。そして、曲げ耐力がせん断耐力を上り、せん断スパンに作用するせん断力が最大となるように、せん断スパンを 770mm ($a/d=2.2$) とした。

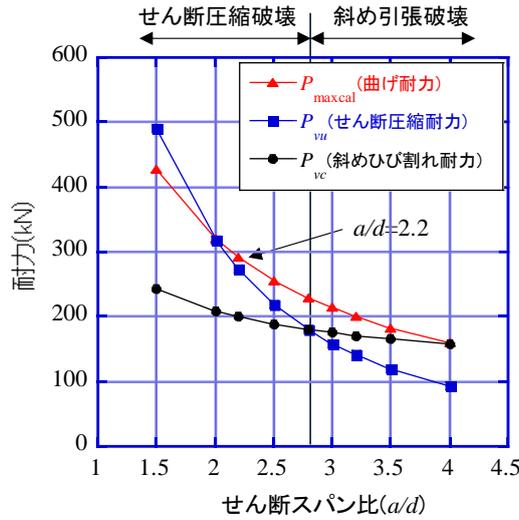


図-5.3 せん断スパンと破壊モード (D25)

一方、D13 シリーズのせん断スパン比と破壊モードの関係を図-5.4~5.5 に示す。D25 シリーズと同様に、主鉄筋の間隔を継手の外径 55mm に対し、鉄筋量が最大となるように 60mm 間隔で 2 本配置して設計した値が図-5.4 である。図中には、鉄筋の材質を SD490 とした値も示した。図-5.4 をみると、材質を SD490 としても、曲げ耐力がせん断耐力をわずかに上回る程度である。そのため、同じ部材幅で主鉄筋を 40mm 間隔とし、4 本配置したときの値を図-5.5 に示した。図のように、材質が SD345 ではわずかに上回る程度であり、SD490 を 40mm 間隔で配置することでせん断破壊に導ける。しかし、実用化する主鉄筋の材質は SD345 であり、外径 55mm の継手を 40mm 間隔で配置することは不可能である。このように、D13 シリーズは曲げ耐力がせん断耐力を上回る設計ができないことがわかる。そのため、D13 シリーズは a/d を D25 シリーズと同一とし、試験体の設計を行った。

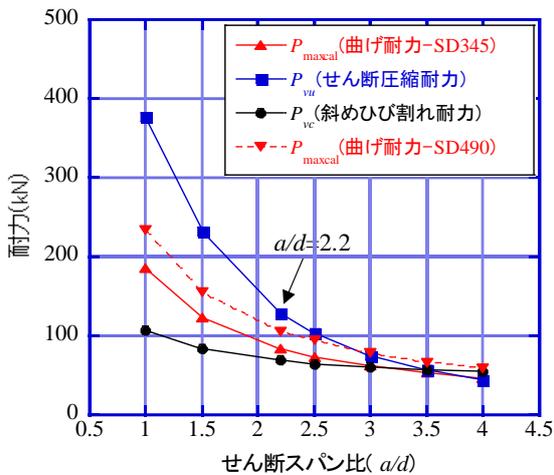


図-5.4 せん断スパンと破壊モード (D13-主鉄筋 2 本)

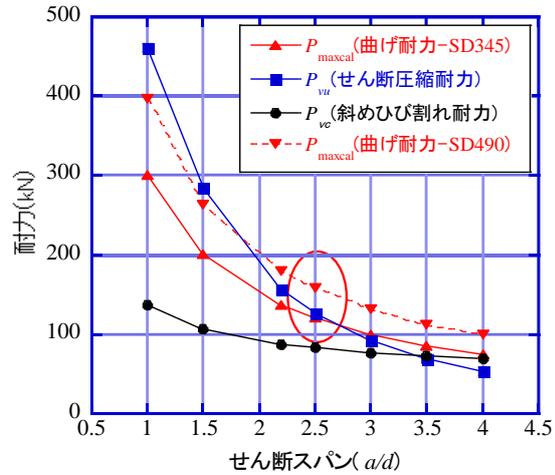


図-5.5 せん断スパンと破壊モード (D13-主鉄筋 4 本)

5.2.3 使用材料

(1) 鉄筋

試験体に使用した異形棒鋼の諸元値を表-5.2に示す。使用材料は第4章の曲げ実験と同一であり、材質はD10以下がSD295、D13以上はSD345である。

表-5.2 鉄筋の諸元値

使用箇所	D13シリーズ				D25シリーズ			
	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
主鉄筋	D13	380	543	180	D25	381	554	179
せん断補強鉄筋	D6	469	545	190	D16	375	555	177
添筋	D10	357	460	172	D16	375	555	177
スパイラル鉄筋	D6	453	551	196	D10	355	471	179

(2) コンクリート

試験体の作製に使用したコンクリートの示方配合を表-5.3に、載荷実験時のコンクリートの諸元値を表-5.4に、応力-ひずみ曲線を図-5.6に示す。試験体および圧縮強度用供試体は、初期養生として常圧の蒸気養生⁴⁾を行い、翌日に脱型した後は屋内での気中養生とした。なお、コンクリートは普通コンクリートを使用した。

表-5.3 コンクリートの示方配合

試験体番号	設計基準 強度 (N/mm ²)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				水	セメント	石灰石 微粉末	細骨材	粗骨材	A E 減水剤
Ns13,Js13 Ns25,Js25	30	75.0	44	165	220	110	789	1,023	1.32

表-5.4 コンクリートの諸元値

試験体番号	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	作製日 2018/	試験日 2018/	材令
Ns13,Js13	27.9	21	10/30	11/13	14日
Ns25,Js25	29.7	20	10/10	10/23-Ns,10/24-Js	13日,14日

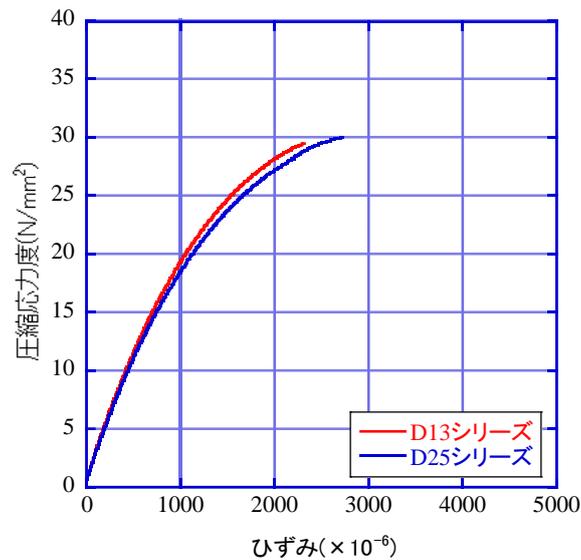


図-5.6 応力-ひずみ曲線

(3) モルタル

モルタルは、プレミックスタイプのセメント系無収縮モルタルを使用した。使用材料は第3章の引張試験と同一であり、水セメント比は16～17%の範囲で練り混ぜ時のフレッシュ性状を確認し、水量を調整した。

載荷実験時の材料試験値を表-5.5に示す。なお、圧縮強度用供試体はモルタルを充填した翌日に脱型し、その後は屋内での気中養生とした。

表-5.5 モルタルの諸元値

試験体番号	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	作製日 2018/	試験日 2018/	材令
Js13	76.4	36	11/2	11/13	11日
Js25	56.1	26	10/13	10/24	11日

(4) 接着剤

接着剤は、第4章の曲げ実験と同一のエポキシ樹脂接着剤を使用した。

5.2.4 載荷方法

載荷方法は、**図-5.7**に示すように対称2点載荷とし、一方向の単調載荷であるが、一次載荷として下側主鉄筋の引張応力度が 200N/mm^2 に達するまで載荷し、一旦荷重ゼロ付近まで除荷した。そして二次載荷として下側主鉄筋の引張応力度が 300N/mm^2 に達するまで載荷し、再度除荷した後に試験体が破壊するまで載荷した。なお一次載荷重と二次載荷重は、RC曲げ理論による計算値であり、載荷重値を**表-5.6**に示す。

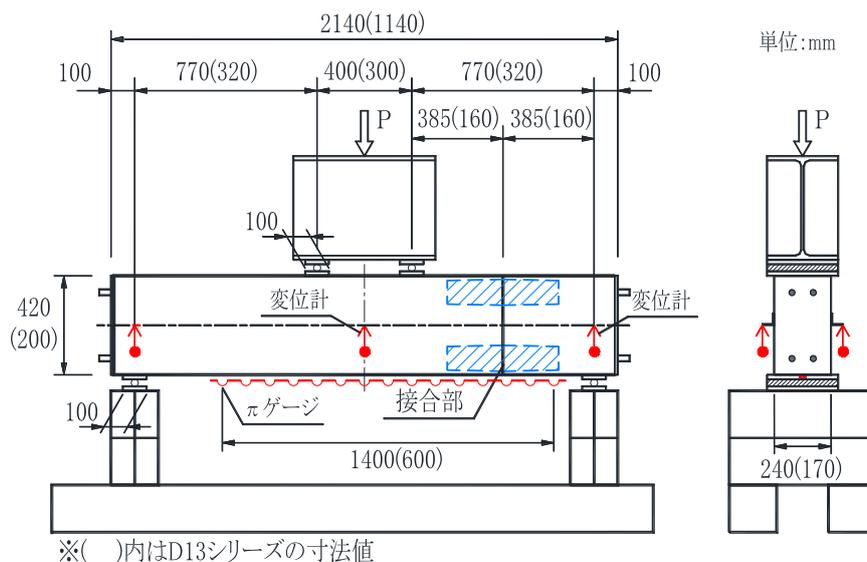


図-5.7 載荷方法

表-5.6 載荷重値の一覧

試験体番号	一次載荷重 (kN)	二次載荷重 (kN)	計算に使用したヤング係数 (kN/mm^2)
Ns13,Js13	42	63	$E_s=200$
Ns25,Js25	162	244	$E_c=28$

※1) E_s :鉄筋のヤング係数, E_c :コンクリートのヤング係数

5.2.5 計測項目

計測項目は、**図-5.7**に示したように、試験体の下面にゲージ長が 100mm の π 型変位計を設置し、接合面の開きとひび割れ幅を計測した。また試験体中央と支点に変位計を設置し、試験体断面高さ中央の変位量を計測した。鉄筋のひずみは、載荷点直下の下側主鉄筋にストレインゲージを貼付して計測した。

5.3 実験結果および考察

5.3.1 破壊形態

各試験体のひび割れ図を図-5.8 に、破壊時の状況を写真-5.1 に示す。図-5.8 に示す一次・二次荷重時とは、その荷重段階での最大ひび割れ幅の発生位置を示している。

D13 シリーズは、Ns13, Js13 とも曲げ圧縮破壊を示した。これは、前述のとおり曲げ耐力がせん断耐力を上回る試験体の設計ができず、設計にもとづいた破壊形態である。すなわち、D13 シリーズの継手を使用した場合は、設計上は曲げ破壊が先行することになる。

D25 シリーズの Ns25 は、一次荷重時に発生したせん断スパン内の曲げひび割れが、二次荷重の段階で斜めひび割れに発達した。そして荷重の増加とともに斜めひび割れが卓越し、最終的には斜めひび割れ上部のコンクリートが圧壊するせん断圧縮破壊を示した。一方 Js25 は、一次荷重の段階で継手側せん断スパン内にひび割れは確認できず、接合面の開きがせん断スパン内の最大幅であったものの、その開き量は 0.054mm であり、目視で確認できる最少幅程度であった。二次荷重時には、支点側の継手端部にひび割れが発生し、荷重の増加とともに斜めひび割れに発達した。そして最終的には、斜めひび割れの下側主鉄筋端部が付着破壊を示した。これは、付着破壊した付近に、継手端部と支点が隣接していることで、主鉄筋の付着長が短く、そのことが影響したと考えられる。また図-5.8 に示す斜めひび割れの位置をみると、Ns25 と Js25 の斜めひび割れの発生形態が異なることがわかる。Js25 は継手の剛性が高いため、斜めひび割れが継手を避けて発達しているためである。

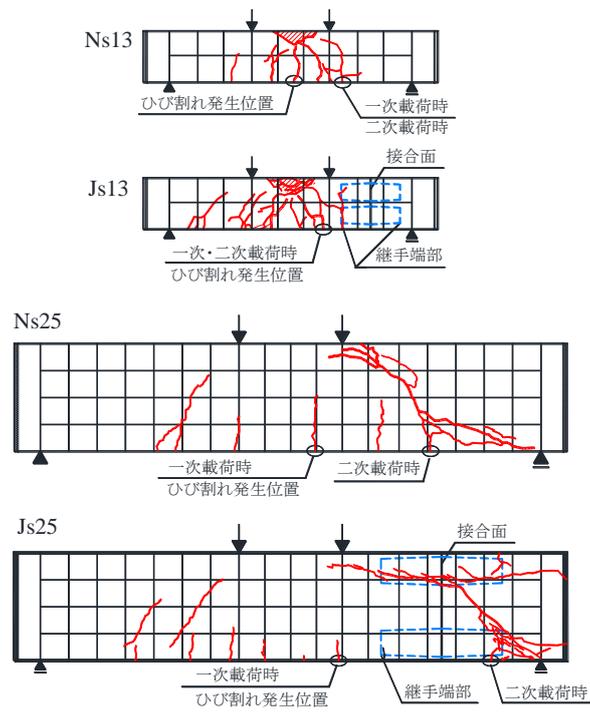


図-5.8 ひび割れ状況図

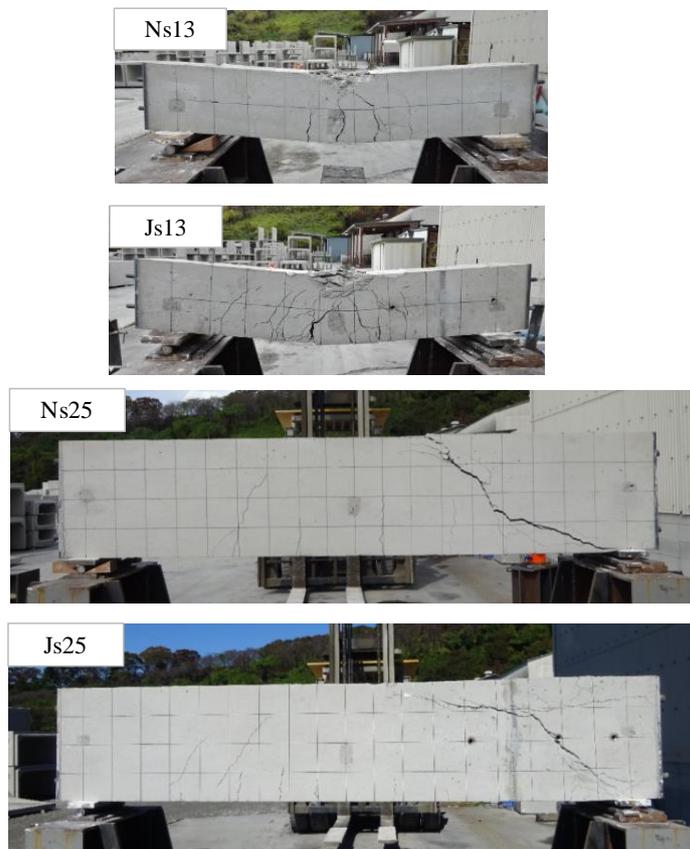


写真-5.1 破壊状況

5.3.2 破壊荷重

破壊荷重の実測値と計算値を表-5.7に示す。表中の計算値は、前述した(式 5-1)～(式 5-3)より求めた。なお計算に使用した材料の特性値は、いずれも材料試験値を用いた。

実測値の計算値に対する比は、D13 シリーズは曲げ破壊を示したため、曲げ耐力の計算値と比較すると、1.13～1.14 とやや高めであった。また、Jm13 の破壊荷重は Nm13 と同等であり、接合部にせん断力が作用しても、一体成形の部材と同等の耐力がある。

D25 シリーズの破壊荷重をみると、せん断圧縮破壊を示した Ns25 の破壊荷重は 279.5kN であり、計算値の 270.8kN とほぼ一致した。一方、付着破壊を示した Js25 の破壊荷重は 272.5kN であり、破壊形態は異なるものの、接合部を設けた部材は、一体成形の部材と同等のせん断耐力を有するといえる。

また、機械式継手を用いて接合した RC 部材に関する既往の研究⁵⁾では、接合面におけるせん断キーの有効性が報告されている。今回の実験では、接合面にせん断キーを設けていないが接合面のズレも確認されず、せん断耐力は一体成形の部材と同等であった。

表-5.7 破壊荷重

試験体 番号	破壊荷重	計算値			P_{\max}/P_{vc}	P_{\max}/P_{vu}	$\frac{P_{\max}}{P_{\maxcal}}$
	P_{\max} (kN)	P_{vc} (kN)	P_{vu} (kN)	P_{\maxcal} (kN)			
Ns13	98.1	67.1	122.2	86.7	1.46	0.80	1.13
Js13	98.6	67.1	122.2	86.7	1.47	0.81	1.14
Ns25	279.5	199.3	270.8	317.6	1.40	1.03	0.88
Js25	272.5	199.3	270.8	317.6	1.37	1.01	0.86

※1) P_{\max} : 実測値 ※2) P_{vc} : 斜めひび割れ耐力 P_{vu} : せん断圧縮耐力
 P_{\maxcal} : 曲げ耐力

5.3.3 ひび割れ幅

ひび割れ発生荷重と各載荷段階におけるひび割れ幅の一覧を表-5.8に示す。D13, D25 シリーズとも、継手を用いて接合した部材の方がひび割れ発生荷重はやや小さい。しかし図-5.8に示したように、ひび割れは継手以外の箇所ですべて最初に発生している。

Js13 と Js25 の一次載荷時の最大ひび割れ幅は、図-5.8に示したように等曲げモーメント区間に発生しており、継手端部および接合面のひび割れは、反対側せん断スパン内の最大ひび割れ幅より小さい。また、せん断破壊を示した Ns25 および Js25 は、二次載荷の過程においてせん断スパン内に斜めひび割れが発生し、二次載荷時では Js25 は継手端部の 0.590mm が最大である。しかし、Ns25 におけるせん断スパン内のひび割れ幅 1.006mm より小さい。このように、接合部にせん断力が作用しても、ひび割れに対し継手が弱点になるとはいえない。

表-5.8 ひび割れ発生荷重とひび割れ幅

試験体番号	ひび割れ発生荷重 (kN)	載荷段階	継手端部 (mm)	接合面 (mm)	最大値 (mm)	*1 (mm)
Ns13	24.2	一次	—	—	0.269	—
		二次	—	—	0.544	—
Js13	23.7	一次	0.007	0.039	0.338	0.277
		二次	0.075	0.069	0.543	—
Ns25	74.4	一次	—	—	0.297	—
		二次	—	—	1.006	—
Js25	70.2	一次	0.021	0.054	0.289	0.230
		二次	0.590	0.169	0.590	—

*1：反対側せん断スパン内の最大ひび割れ幅

5.3.4 変位性状

荷重と試験体中央の変位量の関係を図-5.9～5.10 に示す。図をみると、D13 シリーズは曲げ破壊であることから、一般の鉄筋コンクリート部材の変位性状を示しており、Ns13 と Js13 は同様の変位曲線を示している。

D25 シリーズをみると、Ns25 と Js25 は同様の変位性状を示しているが、初期剛性においてやや異なる傾向がみられた。変位量は、図-5.7 に示したように断面の表裏で計測し、その値の平均値を示しているが、Js25 の片側のみ初期変位量が異なる傾向であり、その影響で Ns25 との初期剛性に差が表れている。初期剛性の差については、0.4mm 程度の変位量が影響していることから、試験体の接合時における接合精度が影響した可能性が考えられる。また、Ns25 は 240kN、Js25 は 220kN 付近で変位曲線に変化がみられるが、これは二次載荷の過程でせん断スパン内のひび割れが、斜めひび割れに発達したことを表している。

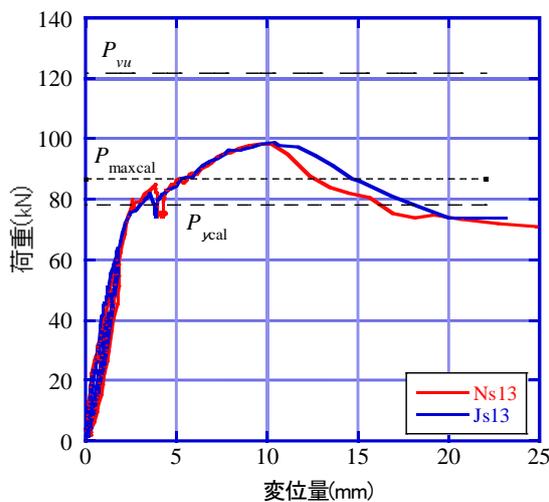


図-5.9 荷重と変位量 (D13 シリーズ)

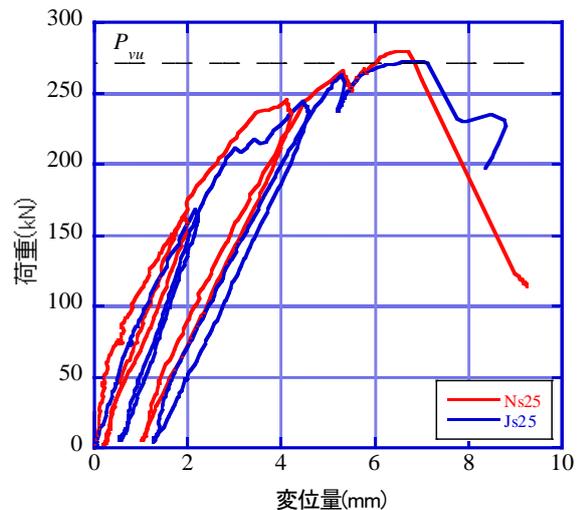


図-5.10 荷重と変位量 (D25 シリーズ)

5.3.5 ひずみ性状

下側主鉄筋のひずみを図-5.11~5.12に示す。D13 シリーズをみると、Ns13 と Js13 は全般に同じ傾向であり、いずれも曲げひび割れが発生した 25kN 前後でひずみ曲線に変化点が表れ、計算上の降伏荷重 ($P_{ycal}=78\text{kN}$) 付近で主鉄筋が降伏している。

D25 シリーズをみると、全般に Js25 の方がひずみは大きく、70kN 付近でひずみが増加している。これは、Js25 がストレインゲージの貼付箇所にひび割れが最初に発生したのに対し、Ns25 のひび割れは、貼付箇所より左右両側に 100mm 程度離れた箇所に発生したためであると考えられる。このように、ひび割れとひずみ計測位置の影響による差はみられるが、Ns25 と Js25 のひずみ性状は、全般に同様の傾向である。また、計算上の降伏荷重 ($P_{ycal}=305\text{kN}$) に対し、せん断破壊時の最大荷重は、Ns25 が 279.5kN、Js25 が 272.5kN であり、主鉄筋の降伏前に破壊していることは図-5.12 からわかる。

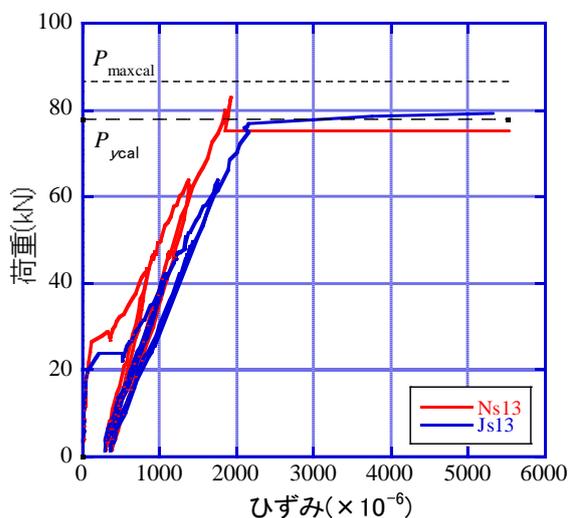


図-5.11 荷重とひずみ (D13 シリーズ)

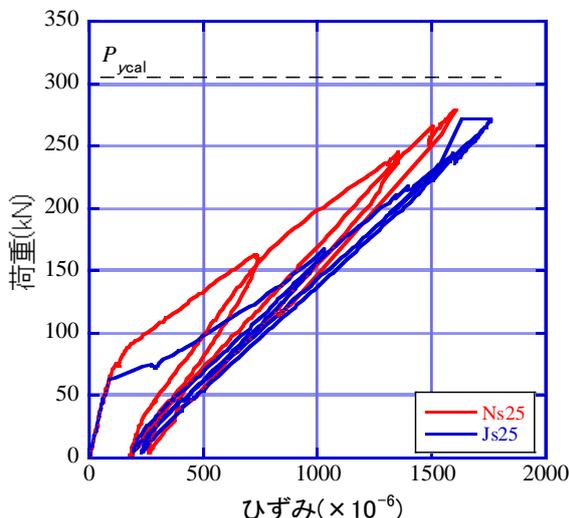


図-5.12 荷重とひずみ (D25 シリーズ)

5.4 第5章のまとめ

拘束型重ね継手を用いて接合した部材のせん断性能を評価するため、主鉄筋を D13 および D25 とした 2 タイプの部材を作製し、はりのせん断実験を実施した。今回の実験の範囲において、以下の結論を得た。

- (1) 主鉄筋が D13 の場合は、せん断力が接合部に作用しても、一体成形の部材と同等の耐力がある。
- (2) 主鉄筋が D25 の場合は、継手を用いて接合した部材のせん断耐力、変位性状、およびひびき性状は、一体成形の部材と同等である。
- (3) 主鉄筋を D13 とする継手の鉄筋量と材質では、曲げ耐力がせん断耐力を上回る部材の設計が難しく、直接的にせん断耐力を評価することはできなかった。しかし、少なくとも接合部材とすることで、せん断性能が低下する状況は認められない。
- (4) 主鉄筋が D25 の場合は、継手を用いて接合した部材の斜めひび割れは、継手を避けて卓越する。
- (5) 接合面にせん断キーを設けなくても、破壊時において接合面のズレは認められない。

第5章の参考文献

- 1) 町田篤彦，関博，丸山武彦，檜貝勇，斉藤成彦：鉄筋コンクリート工学 改訂3版，オーム社，2018.7
- 2) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8
- 3) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式，第2回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp.119-126，1983.10
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編 [2017年制定]，2017.
- 5) 栖原健太郎，片平千明，森田俊哉，辻幸和：鑄鉄製カップラーで接合した RC はりの力学的性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.3，pp.637-642，1998.7

第6章 拘束型重ね継手を用いた実物大壁試験体の曲げじん性評価

6.1 序節

本章では、拘束型重ね継手を用いて接合した部材が、一体成形の部材と同等のじん性を有するか評価するため、正負繰り返し载荷による実物大壁試験体の载荷実験を実施した。試験体に用いた継手は、第4章および第5章で述べたはりの性能評価と同じタイプの継手とした。また、実施工と同様に施工した試験体の接合部を载荷実験後にスライスし、モルタルの充填性状と継手の健全性を確認した。

6.2 実験概要

6.2.1 試験体の形状および諸元

試験体の諸元を表-6.1に示す。試験体は、図-6.1に示すようにボックスカルバートの底版と側版の接合部を再現した実物大の試験体であり、壁部材厚と断面幅を実物大とし、接合部を設けた部材と、一体成形の部材を作製した。試験体は、主鉄筋をD13としたD13シリーズと、D25としたD25シリーズの2種類とした。D13シリーズのND13AとND13B、およびJD13AとJD13Bは、それぞれ試験体の形状寸法と配筋は同じであり、正負の繰り返し载荷サイクルが異なる試験体である。

接合部を設けた部材の接合部の位置は、図-6.1に示すように、D13およびD25シリーズとも、継手下端部が壁部付根から $0.5D$ (D =側壁厚)の位置になるように設定した。すなわち、 $0.5D$ の範囲を塑性ヒンジ部と想定し、その領域には継手を用いないことを前提としている。塑性ヒンジ長は、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾にしたがい(式6-1)より算出すると、D13シリーズは $0.52D$ 、D25シリーズは $0.55D$ となる。したがって、いずれのシリーズとも、この算出値より厳しい条件となる $0.5D$ の位置に継手下端部を設定している。

表-6.1 試験体の諸元

試験体番号	接合部	主鉄筋			重ね長さ	添筋		スパイラル鉄筋			せん断スパン比 a/d	
		呼び名	本数	引張鉄筋比 $p_v(\%)$		呼び名	本数	呼び名	ピッチ (mm)	補強筋比 $p_{sp}(\%)$		
ND13A	無し	D13	6本	0.41	—	—	—	—	—	—	3.5	
JD13A	有り				8φ	D10	4本	D6	21	6.2		
ND13B	無し				—	—	—	—	—	—		—
JD13B	有り				8φ	D10	4本	D6	21	6.2		
ND25A	無し	D25	6本	1.01	—	—	—	—	—	4.7		
JD25A	有り				9φ	D16	4本	D10	30		6.2	

$$L_p = 0.5 \cdot d + 0.05 \cdot a \quad (6-1)$$

ここに、 L_p : 塑性ヒンジ長さ(mm)
 d : 有効高さ(mm)
 a : せん断スパン(mm)

試験体の形状寸法と配筋を図-6.2~6.5 に、試験体の配筋状況を写真-6.1~6.4 に示す。試験体の壁部材厚と配筋は、D13 シリーズでは内幅 2,500mm×内高 2,500mm、D25 シリーズでは内幅 6,000mm×内高 5,000mm 程度の道路用ボックスカルバートに採用される実製品をもとに設定した。D13 シリーズは、継手部周辺にせん断補強鉄筋を配置せず、一般に用いられている U 形の幅止め鉄筋を配置し、D25 シリーズは、継手周辺に閉合型のせん断補強鉄筋を配置した。

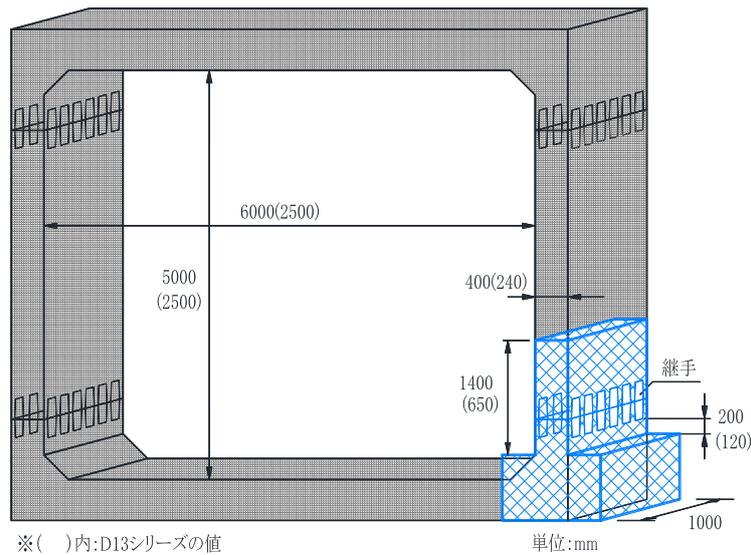


図-6.1 ボックスカルバートの例

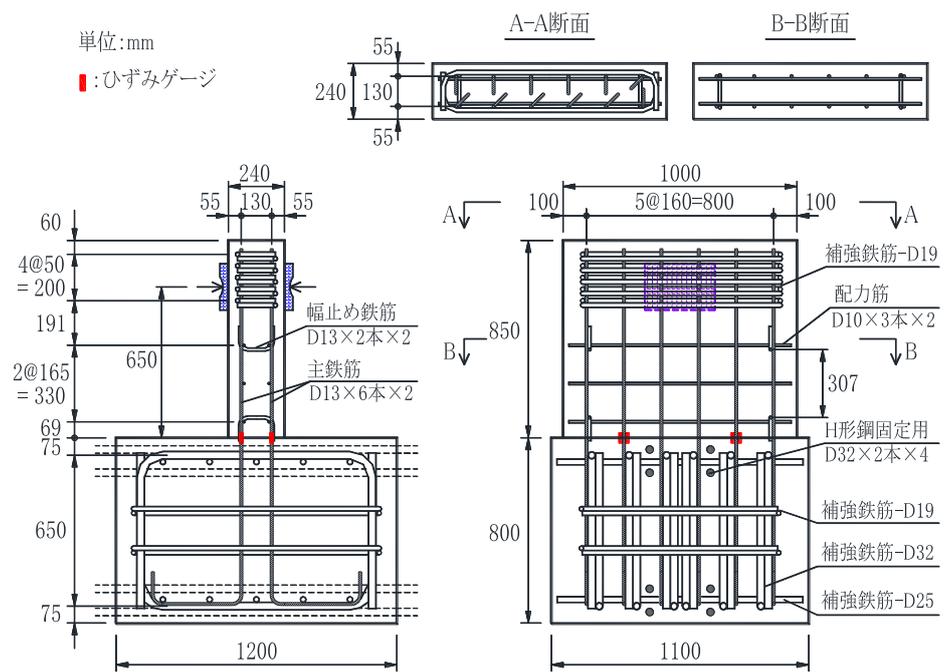


図-6.2 試験体の形状寸法と配筋 (ND13A, ND13B)



写真-6.1 配筋状況 (ND13A)

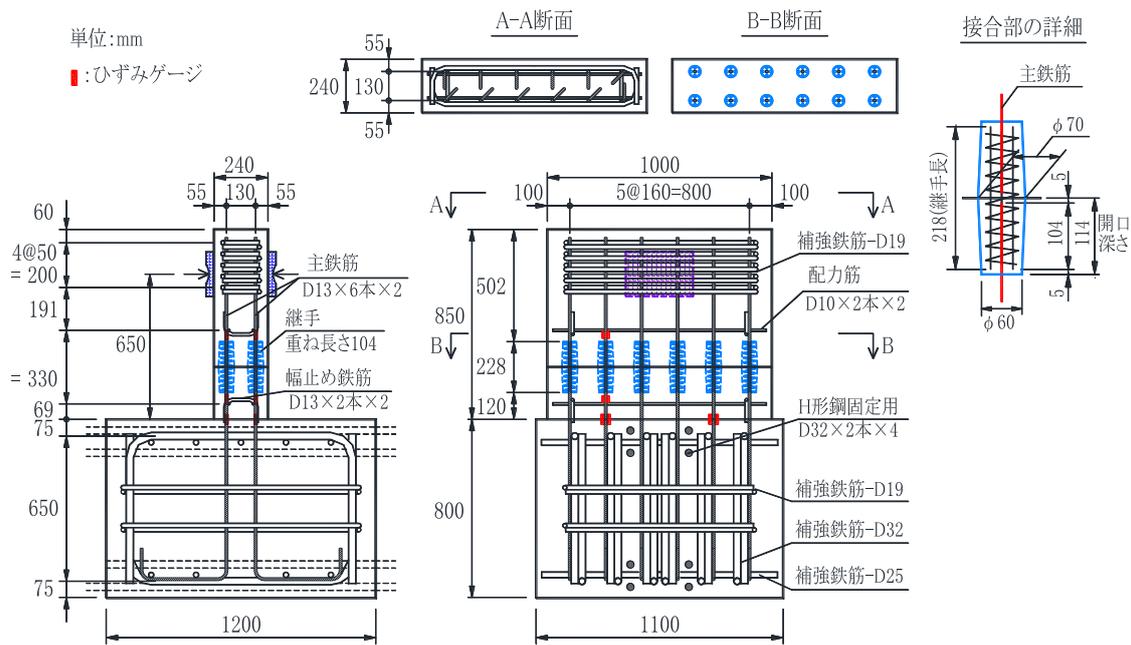


図-6.3 試験体の形状寸法と配筋 (JD13A, JD13B)



写真-6.2 配筋状況 (JD13A)

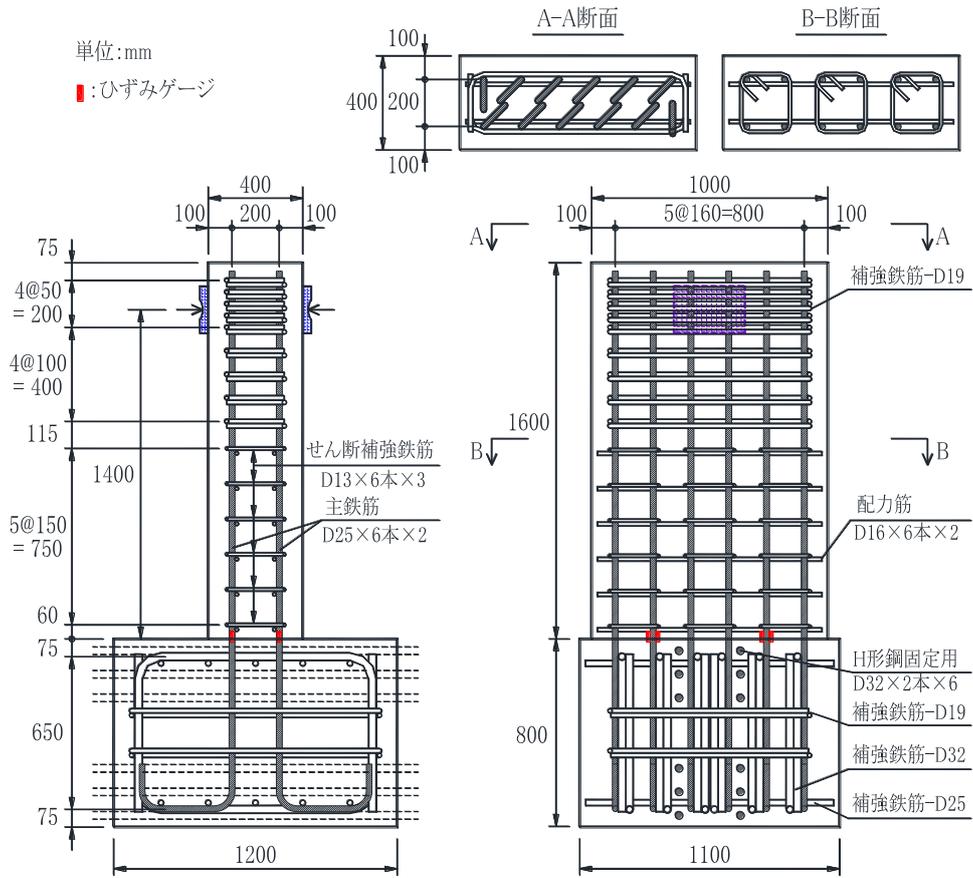


図-6.4 試験体の形状寸法と配筋 (ND25A)



写真-6.3 配筋状況 (ND25A)

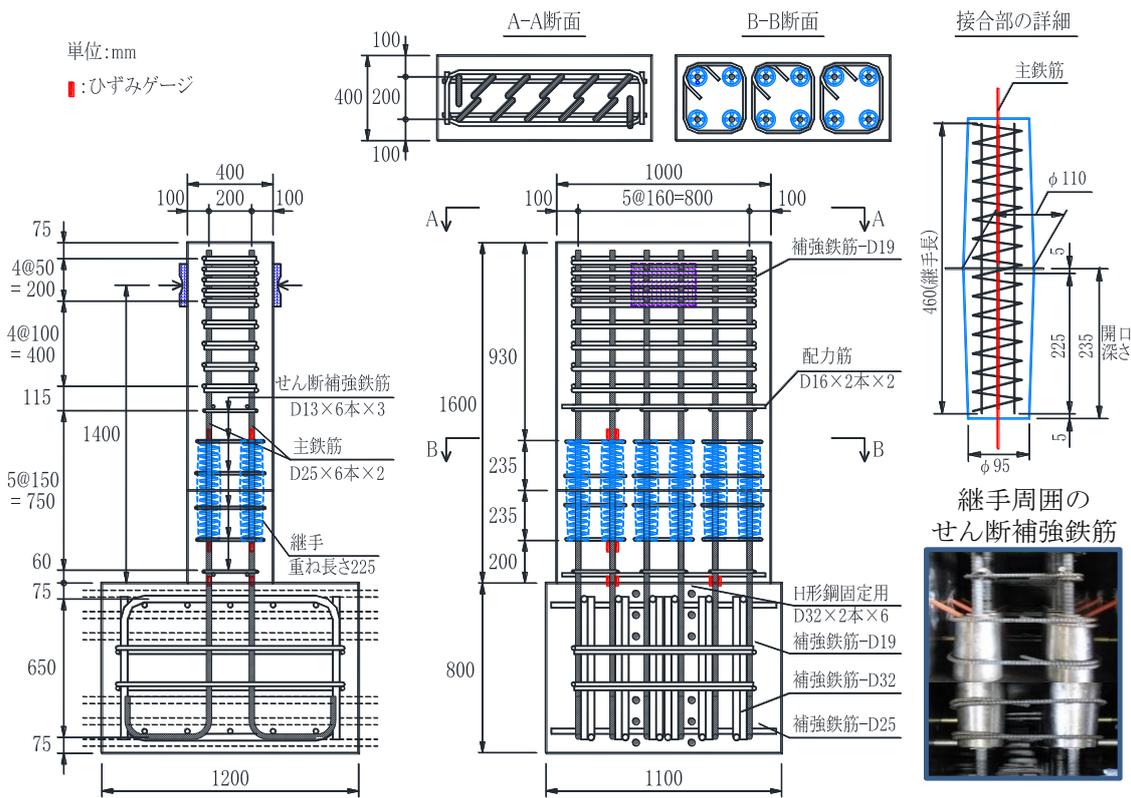


図-6.5 試験体の形状寸法と配筋 (JD25A)

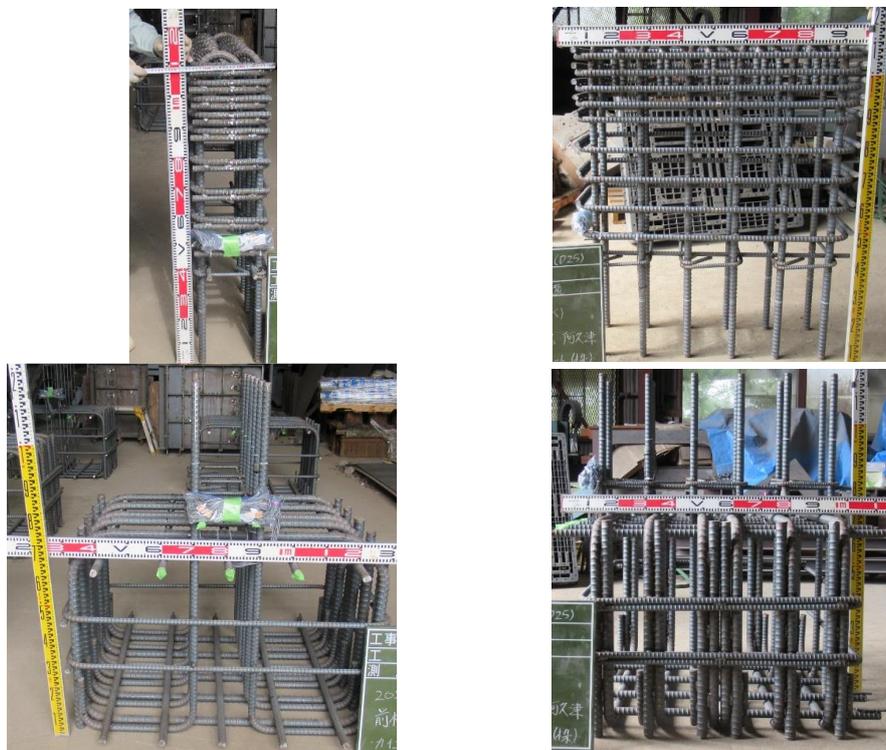


写真-6.4 配筋状況 (JD25A)

JD13A と JD25A の接合部の状況を写真-6.5 に、継手開口部のモルタル充填状況を写真-6.6 に示す。接合面は端面処理を行わず、接合面にエポキシ樹脂接着剤を塗布し、モルタルは開口部下側の注入孔からポンプを用いて充填した。



JD13A



JD25A

写真-6.5 接合部の状況



写真-6.6 モルタル充填状況 (JD25A)

6.2.2 使用材料

(1) 鉄筋

試験体に使用した異形棒鋼の諸元値を表-6.2 に、主鉄筋と添筋の応力-ひずみ曲線を図-6.6~6.7 に示す。材質はD10以下がSD295、D13以上はSD345である。

表-6.2 鉄筋の諸元値

使用箇所	D13シリーズ				D25シリーズ			
	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
主鉄筋	D13	375(376)	543(541)	180(174)	D25	372	549	186
配力筋	D10	349(363)	483(465)	179(173)	D16	369	546	188
せん断補強鉄筋	D6	375(376)	543(541)	180(174)	D13	375	543	180
添筋	D10	349(363)	483(465)	179(173)	D16	369	546	188
スパイラル鉄筋	D6	464(478)	547(554)	191(185)	D10	333	470	181
補強鉄筋(側版)	D19	369(371)	539(533)	179(175)	D19	369	539	179
補強鉄筋(底版)	D25	372(383)	549(542)	186(178)	D25	372	549	186
補強鉄筋(底版)	D32	405(372)	571(549)	184(181)	D32	405	571	184

※1) ()内：ND13B, JD13Bの値

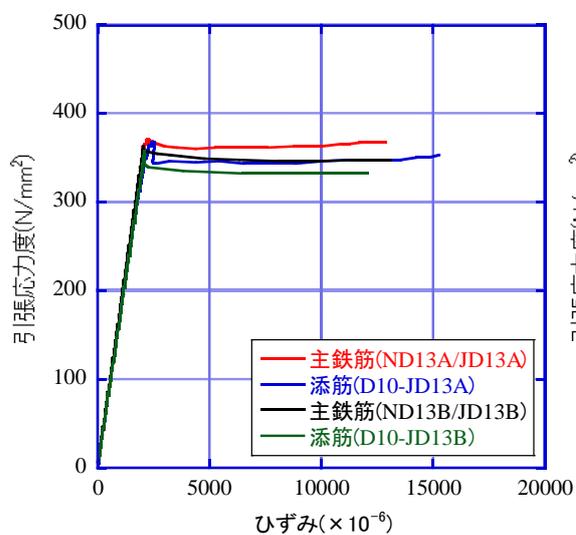


図-6.6 応力-ひずみ曲線 (D13 シリーズ)

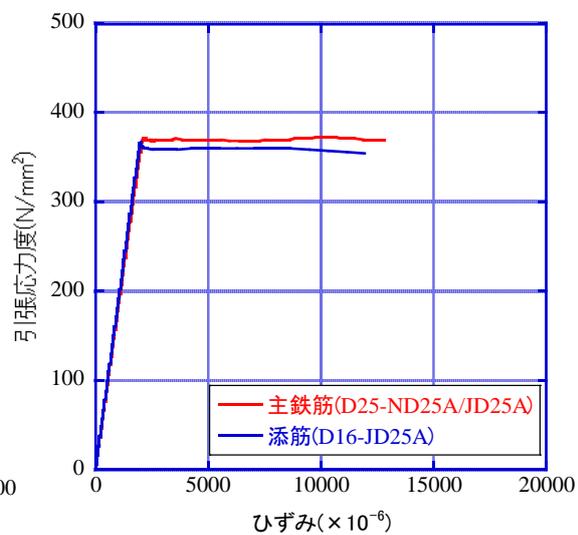


図-6.7 応力-ひずみ曲線 (D25 シリーズ)

(2) コンクリート

試験体の作製に使用したコンクリートの示方配合を表-6.3 に、載荷実験時のコンクリートの諸元値を表-6.4 に、応力-ひずみ曲線を図-6.8 に示す。試験体および圧縮強度用供試体は、初期養生として常圧の蒸気養生²⁾を行い、翌日に脱型した後は屋内での気中養生とした。なお、コンクリートは高流動コンクリートを使用した。

表-6.3 コンクリートの示方配合

試験体番号	設計基準強度 (N/mm ²)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				水	セメント	石灰石微粉末	細骨材	粗骨材	A E 減水剤
ND13A,JD13A ND25A,JD25A	50	50.0	40	168	336	312	592	905	4.5
ND13B,JD13B	50	50.0	40	168	336	312	597	913	4.4

表-6.4 コンクリートの諸元値

試験体番号	圧縮強度 (N/mm ²)	作製日	試験日	材令	試験体番号	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	作製日	試験日	材令
ND13A	55.2	2020/10/13	2020/10/26	13日	ND25A	48.2	-	2020/9/16	2020/9/29	13日
JD13A	52.0	2020/10/13	2020/10/29	16日	JD25A	50.6	26	2020/9/16	2020/10/5	19日
ND13B	55.8	2019/11/26	2019/12/10	14日	-	-	-	-	-	-
JD13B	52.2	2019/11/26	2019/12/16	20日	-	-	-	-	-	-

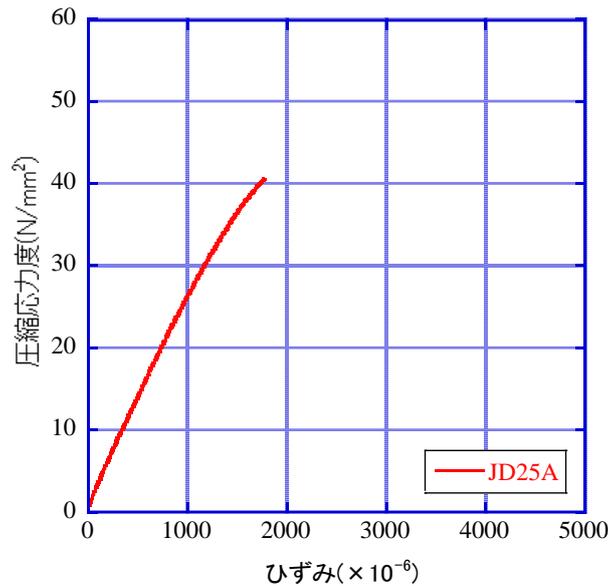


図-6.8 応力-ひずみ曲線

(3) モルタル

モルタルは、プレミックスタイプのセメント系無収縮モルタルを使用した。使用材料は第3章の引張試験と同一であり、水セメント比は16～17%の範囲で練り混ぜ時のフレッシュ性状を確認し、水量を調整した。

載荷実験時の材料試験値を表-6.5に、応力-ひずみ曲線を図-6.9に示す。なお、圧縮強度用供試体はモルタルを充填した翌日に脱型し、その後は屋内での気中養生とした。

表-6.5 モルタルの諸元値

試験体番号	圧縮強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)	作製日	試験日	材令
JD13A	48.6	-	2020/10/19	2020/10/29	10日
JD13B	61.5	-	2019/12/7	2019/12/16	9日
JD25A	50.8	25	2020/9/23	2020/10/5	12日

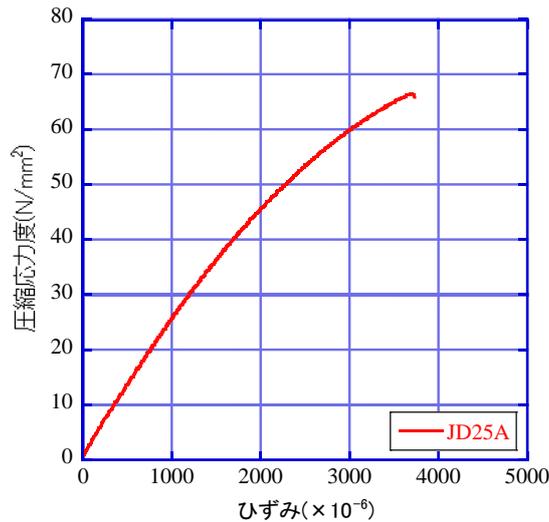


図-6.9 応力-ひずみ曲線

(4) 接着剤

接着剤は、第4章および第5章のほり実験と同一のエポキシ樹脂接着剤を使用した。

6.2.3 載荷方法

載荷方法を図-6.10に、載荷状況を写真-6.7に示す。載荷装置は、試験体底板部に埋設したねじ節鉄筋を用いて反力受けのH形鋼を固定し、そのH形鋼に取付けた。載荷方法は、載荷位置における水平変位制御による正負繰り返し載荷とした。水平力は油圧ジャッキを用いて載荷し、荷重は油圧ジャッキと載荷板の間にロードセルを設置して計測した。なお、使用した油圧ジャッキの能力は、ND13AとJD13Aは500kN、ND13BとJD13B、およびD25

シリーズは 1,000kN であり、同様にロードセルの能力は 300kN と 1,000kN である。

載荷位置は、設計条件によりボックスカルバートのせん断スパンは異なるため、一般的な荷重条件における常時の曲げモーメントの反曲点を考慮し、壁部付根より D13 シリーズは 650mm, D25 シリーズは 1,400mm の位置とした。したがって、せん断スパン比 a/d は、D13 シリーズは 3.5, D25 シリーズは 4.7 となる。軸力については、活荷重 (T-25) と想定している土被り 1m を考慮しても、約 0.03N/mm^2 と小さい値であることから、本実験では考慮せず載荷していない。

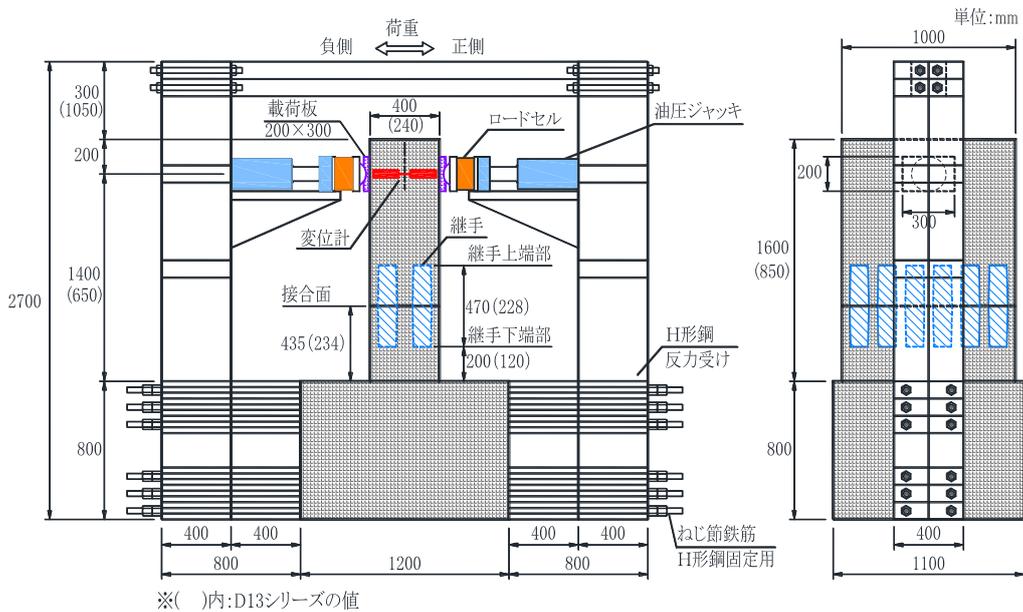


図-6.10 載荷方法



写真-6.7 載荷状況 (JD25A)

荷重サイクルを図-6.11に示す。まず、正荷重により曲げひび割れが発生するまで荷重し、一旦除荷した。次に、正荷重により引張鉄筋が降伏するまで荷重し、この時の水平変位を正の基準変位 δ_y と定め、除荷後、負荷重により引張鉄筋が降伏するまで荷重し、この時の変位を負の基準変位 δ_y' とした。この正負の荷重を合計3回繰り返して1サイクルとし、2サイクル目は正負の基準変位の2倍まで荷重し、3サイクル以降も同様に繰り返し荷重を行った。ND13AとJD13A、およびND25AとJD25Aは、最終サイクルまで正負3回の繰り返し荷重を行った。ND13BとJD13Bは、4サイクルまでは同様に正負3回の繰り返し荷重を行い、5サイクル以降は正負1回の繰り返し荷重として、ND13A、JD13Aの前段実験として行った。なお主鉄筋の降伏は、壁部付根に貼付したひずみゲージの値をもとに判断し、基準変位は試験体ごとに定めた。

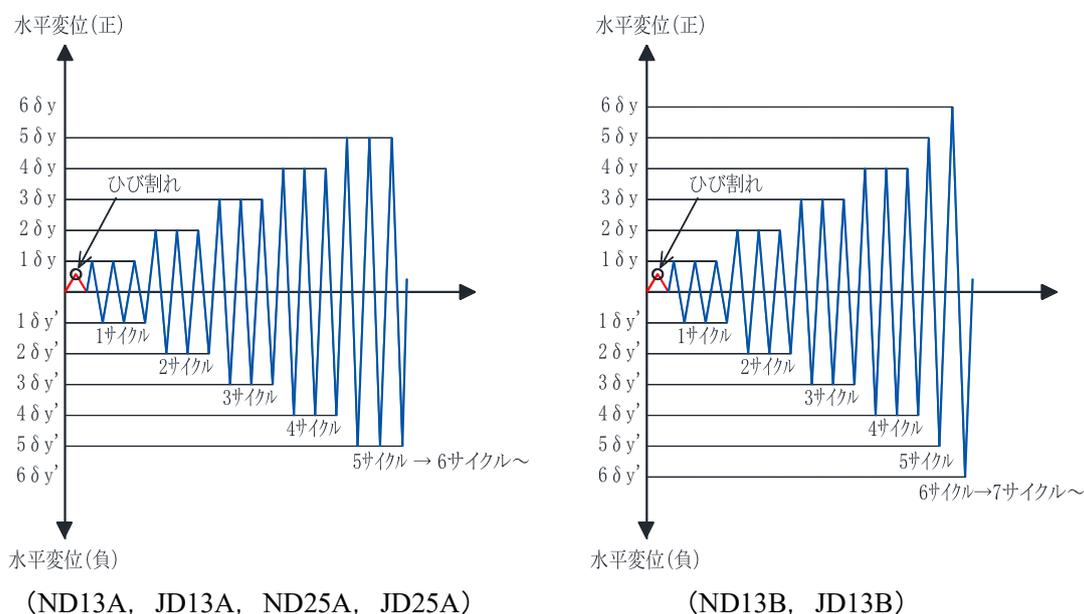


図-6.11 荷重サイクル

6.2.4 計測項目

計測項目は、図-6.10に示したように、荷重点高さの試験体中央に変位計を設置し、水平変位量を計測した。鉄筋のひずみは、図-6.2～6.5に示したように、主鉄筋にストレインゲージを貼付して計測した。

6.2.5 試験体耐力の計算

試験体の曲げ耐力とせん断耐力の計算結果を表-6.6に示す。曲げ耐力は(式6-2)³⁾より終局曲げモーメントを求め、せん断耐力は修正トラス理論(式6-3)³⁾により求めた。また、D13シリーズの V_s は、U形の幅止め鉄筋に対し求めた値である。表-6.6のとおり、D25シリーズのせん断余裕度は1.13であり、せん断破壊することが考えられるため、図-6.4~6.5および写真-6.3~6.4に示したように、閉合型のせん断補強鉄筋を配置した。なお計算値は、材料試験値を用いて求めた。

表-6.6 曲げ耐力とせん断耐力の計算値

試験体番号	有効高 d (mm)	せん断スパン a (mm)	計算値				せん断余裕度	
			P_{\maxcal} (kN)	V_c (kN)	V_s (kN)	V_y $V_c + V_s$ (kN)	V_c / P_{\maxcal}	V_y / P_{\maxcal}
ND13A	185	650	100	182	50	232	1.82	2.32
JD13A			99	178	50	228	1.80	2.30
ND13B			100	182	50	232	1.82	2.32
JD13B			100	178	50	228	1.78	2.28
ND25A	300	1400	274	310	496	806	1.13	2.94
JD25A			279	315	496	811	1.13	2.91

※1) P_{\maxcal} : 曲げ耐力

$$M_u = 0.688 \cdot f'_c \cdot b \cdot x \cdot (d - 0.416 \cdot x) + A'_s \cdot f'_{sy} \cdot (d - d') \quad (6-2)$$

$$V_y = V_c + V_s \quad (6-3)$$

$$= 0.2 \cdot f'_c \cdot \frac{1}{3} \cdot (100 \cdot p_v)^{\frac{1}{3}} \cdot (1000/d)^{\frac{1}{4}} \cdot (0.75 + 1.4 \cdot d/a) \cdot b \cdot d + A_w \cdot f_{wy} \cdot j \cdot d/s$$

ここに、 M_u : 終局曲げモーメント(N・mm)

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

b : 部材幅(mm)

x : 中立軸(mm)

d : 有効高さ(mm)

d' : 圧縮鉄筋のかぶり(mm)

A'_s : 圧縮鉄筋の断面積(mm²)

f'_{sy} : 圧縮鉄筋の降伏強度(N/mm²)

V_y : せん断耐力(N)

- V_c : 斜めひび割れ耐力(N)
 V_s : せん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力(N)
 p_v : 引張鉄筋比
 A_s : 引張鉄筋の断面積(N/mm²)
 A_w : せん断補強鉄筋の総断面積(mm²)
 f_{wy} : せん断補強鉄筋の降伏点(N/mm²)
 $j = 1/1.15$
 s : せん断補強鉄筋の配置間隔(mm)

6.3 実験結果および考察

6.3.1 主鉄筋降伏までの性状

主鉄筋の降伏荷重と基準変位，およびひび割れ発生荷重を表-6.7に示す．表-6.7中における計算値について，主鉄筋降伏時の荷重は複鉄筋断面で弾性解析により曲げモーメントを算出し，荷重値に換算して求めた．また，ひび割れ発生荷重の計算値は，コンクリートの引張縁の曲げ応力度が，曲げひび割れ強度となる荷重を全断面有効とし，(式6-4)により求めた．なお計算に使用した材料の特性値は，材料試験値を用いた．

$$P_{ccal} = \frac{M_{crd}}{a} \quad (6-4)$$

ここに， P_{ccal} ：曲げひび割れ発生荷重(N)

M_{crd} ：断面に曲げひび割れが発生する限界の曲げモーメントで，コンクリートの引張縁の曲げ応力度が設計曲げひび割れ強度となるモーメント(N・mm)

a ：せん断スパン(mm)

表-6.7 主鉄筋降伏までの性状

試験体番号	荷重方向	主鉄筋降伏時					ひび割れ発生荷重	
		P_y (kN)	$P_{y cal}$ (kN)	$P_y/P_{y cal}$ (kN/mm)	$\delta_y, \delta_{y'}$ (mm)	$P_y/\delta_y(\delta_{y'})$ (kN/mm)	P_c (kN)	$P_{c cal}$ (kN)
ND13A	正	89	77	1.16	1.6	55.6	64	51
	負	84		1.09	1.9	44.2	—	—
JD13A	正	93		1.21	2.2	42.3	64	49
	負	82		1.06	1.7	48.2	—	—
ND13B	正	91	77	1.18	1.7	53.5	62	51
	負	76		0.99	1.7	44.7	—	—
JD13B	正	86		1.12	1.7	50.6	57	49
	負	72		0.94	1.7	42.4	—	—
ND25A	正	246	218	1.13	10.7	23.0	70	63
	負	242		1.11	9.3	26.0	—	—
JD25A	正	254		1.17	9.5	26.7	77	65
	負	240		1.10	8.5	28.2	—	—
ND25B	正	303	285	1.06	8.1	37.4	85	82
	負	301		1.06	7.0	43.0	—	—

※1) P_y, P_c ：実測値 $P_{y cal}, P_{c cal}$ ：計算値

※2) δ_y ：正側基準変位 $\delta_{y'}$ ：負側基準変位

(1) D13 シリーズ

降伏荷重の実測値の計算値に対する比は、正側と負側において ND13A が 1.16 と 1.09, JD13A が 1.21 と 1.06, ND13B が 1.18 と 0.99, JD13B が 1.12 と 0.94 であり、正側で実測値がやや高めの値であった。また、JD13A と JD13B の平均値を ND13A と ND13B の平均値と比較すると、正側で 1.00, 負側で 0.96 であり、いずれも同等であった。

降伏時の剛性について、主鉄筋降伏時の荷重を降伏時の水平変位で除した値で比較すると、ND13A, ND13B の平均値の JD13A, JD13B の平均値との比較では、正側で 54.6 と 46.5, 負側で 44.5 と 45.3 であり、接合部の有無による降伏剛性の傾向は明らかではなかった。これは、降伏時の水平変位が非常に小さいため、わずかな変位量の差でも降伏剛性に大きく影響するためである。

ひび割れ発生荷重は、ND13A と JD13A が 64kN, ND13B が 62kN, JD13B が 57kN であり、いずれも壁部付根に最初に発生した。また、計算値と実測値を比較すると、いずれも計算値よりやや高めの荷重でひび割れの発生が認められた。

(2) D25 シリーズ

降伏荷重の実測値の計算値に対する比は、正側と負側において ND25A が 1.13 と 1.11, JD25A が 1.17 と 1.10 であり、いずれも実測値が計算値よりやや高めの値であった。また、JD25A の ND25A との比較では、正側で 1.03, 負側で 0.99 であり、いずれも同等の値であった。

降伏時の剛性について、主鉄筋降伏時の荷重を降伏時の水平変位で除した値で比較すると、正側と負側において、ND25A が 23.0 と 26.0, JD25A が 26.7 と 28.2 であり、降伏剛性は JD25A の方がやや高い傾向を示した。

ひび割れ発生荷重は、ND25A が 70kN, JD25A が 77kN と同等であり、いずれも壁部付根に最初に発生した。また、計算値と実測値を比較すると、いずれも計算値よりやや高めの荷重でひび割れの発生が認められた。

6.3.2 各載荷サイクルにおける試験体の状況

各載荷サイクルにおける試験体の状況とひび割れ状況について、D13 シリーズを表-6.8 ~6.9 と写真-6.8~6.12 および図-6.12~6.21 に、D25 シリーズを表-6.10 と写真-6.13~6.16 および図-6.22~6.26 に示す。なお図中に示すひび割れは、正側載荷で発生したひび割れを青色、負側載荷で発生したひび割れを赤色で示している。

表-6.8 各載荷サイクルにおける試験体の状況 (ND13A,JD13A)

載荷ステップ	正負	変 状	D13シリーズ		
			ND13A	JD13A	
0→曲げひび割れ	正側	ひび割れ	64kN時 壁部付根にひび割れ発生	64kN時 壁部付根にひび割れ発生	
0→ δ_y	正側	ひび割れ	—	88kN時 接合面のひび割れ発生	
		降伏荷重 基準変位	89kN 1.6mm	93kN 2.2mm	
0→ $\delta_{y'}$	負側	降伏荷重 基準変位	84kN 1.9mm	82kN 1.7mm	
1	$1\delta_{y'}$ (2回目)	負側	ひび割れ	62kN時 接合面にひび割れ発生	
8	$8\delta_y$ (1回目)	正側	ひび割れ	90kN時 継手下端部にひび割れ発生	
9	$9\delta_y$	正側	剥離	かぶりコンクリートの剥離	
10	$10\delta_y$	正側	剥落 ひび割れ	かぶりコンクリートの剥落	継手下端部のひび割れが拡大
	$10\delta_{y'}$	負側	剥離 ひび割れ	かぶりコンクリートの剥離	70kN時(3回目載荷) 継手下端部にひび割れ発生
11	$11\delta_y$ (3回目)	正側	荷重降下	主鉄筋の破断→約20%荷重降下 (断面方向手前から1本目)	—
	$11\delta_{y'}$	負側	剥落	かぶりコンクリートの剥落	—
12	$12\delta_y$ (2回目)	正側	荷重降下	—	主鉄筋の破断→約15%荷重降下 (位置不明)
13	$13\delta_y$	正側	剥離	—	かぶりコンクリートの剥離 (継手下端部の下側)
14	$14\delta_y$ (1回目)	正側	荷重降下	主鉄筋の破断→約20%荷重降下 (断面方向手前から6本目)	—
	$14\delta_{y'}$	負側	剥離	—	かぶりコンクリートの剥離 (継手下端部の下側)
15	$15\delta_y$ (2回目)	正側	荷重降下	—	主鉄筋の破断→約20%荷重降下 (位置不明)
	$15\delta_{y'}$	負側	剥落	—	かぶりコンクリートの剥落 (継手下端部の下側)
16	$16\delta_{y'}$	負側	荷重降下	荷重降下	—
17	$17\delta_y$ (3回目)	正側	破壊	主鉄筋すべて破断	主鉄筋すべて破断

表-6.9 各載荷サイクルにおける試験体の状況 (ND13B,JD13B)

載荷ステップ	正負	変 状	D13シリーズ	
			ND13B	JD13B
0→曲げひび割れ	正側	ひび割れ	62kN時 壁部付根にひび割れ発生	57kN時 壁部付根にひび割れ発生
0→ δ_y	正側	ひび割れ	—	82kN時 継手下端部にひび割れ発生
		降伏荷重 基準変位	91kN 1.7mm	86kN 1.7mm
0→ δ_y'	負側	ひび割れ	—	72kN時 継手下端部にひび割れ発生
		降伏荷重 基準変位	76kN 1.7mm	72kN 1.7mm
2	$2\delta_y$ (1回目)	正側	ひび割れ	90kN時 接合面にひび割れ発生
	$2\delta_y'$ (1回目)	負側	ひび割れ	75kN時 接合面にひび割れ発生
9	$9\delta_y$	正側	ひび割れ	継手下端部のひび割れが拡大
11	$11\delta_y'$	負側	剥離	かぶりコンクリートの一部剥離
13	13回目載荷	正側	荷重降下	主鉄筋の破断→約10%荷重降下 (断面方向手前から6本目)
16	$16\delta_y'$	負側	剥落	かぶりコンクリートの一部剥落
17	17回目載荷	正側	荷重降下	主鉄筋の破断→約20%荷重降下 (断面方向手前から6本目)

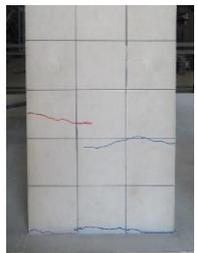
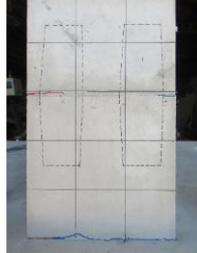
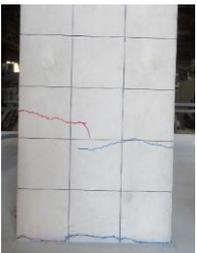
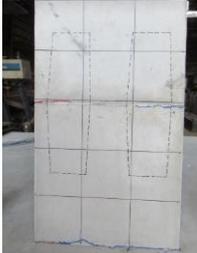
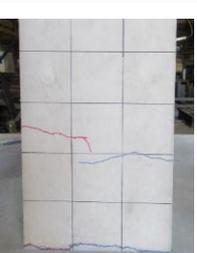
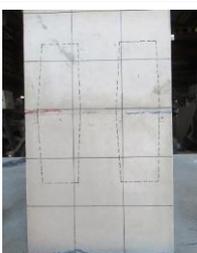
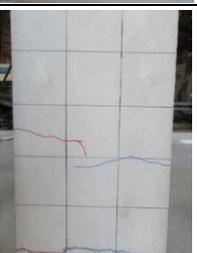
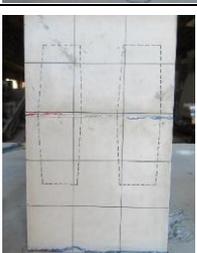
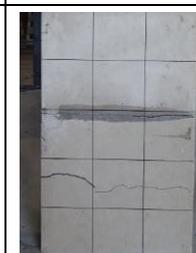
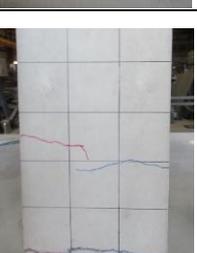
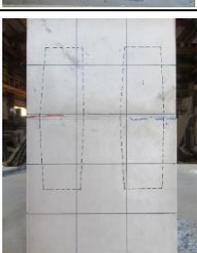
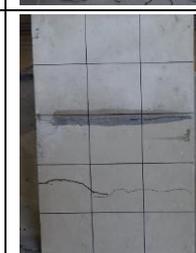
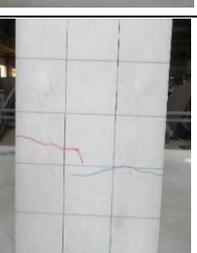
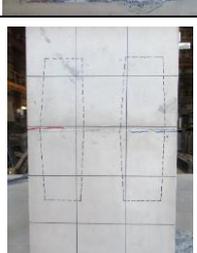
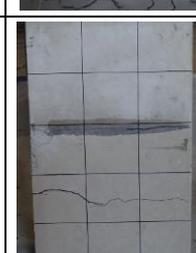
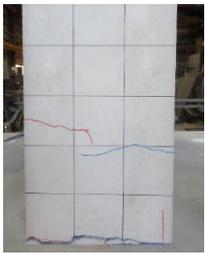
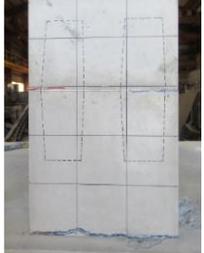
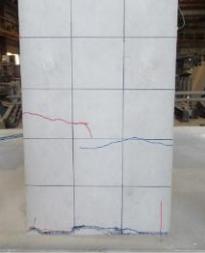
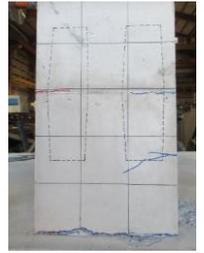
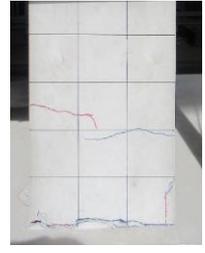
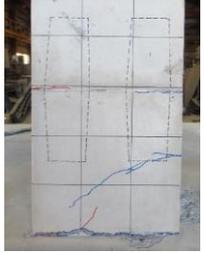
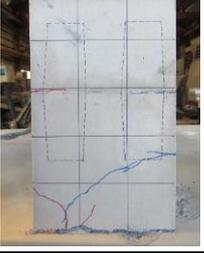
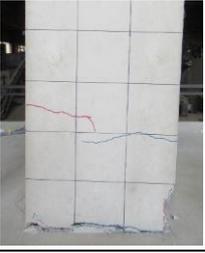
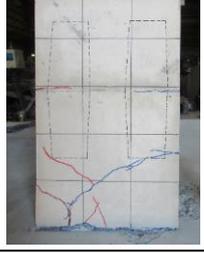
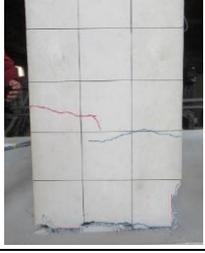
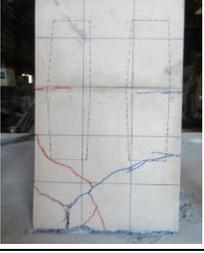
載荷サイクル	ND13A	JD13A	ND13B	JD13B
1 δ_y (δ_y') 終了時				
2 δ_y (δ_y') 終了時				
3 δ_y (δ_y') 終了時				
4 δ_y (δ_y') 終了時				
5 δ_y (δ_y') 終了時				
6 δ_y (δ_y') 終了時				

写真-6.8 D13 シリーズ 試験体の状況 (1 δ_y ~6 δ_y)

载荷サイクル	ND13A	JD13A	ND13B	JD13B
7 δ_y (δ_y) 終了時				
8 δ_y (δ_y) 終了時				
9 δ_y (δ_y) 終了時				
10 δ_y (δ_y) 終了時				
11 δ_y (δ_y) 終了時				
12 δ_y (δ_y) 終了時				

ND13B 17回目破壊時 JD13B 13回目破壊時

写真-6.9 D13 シリーズ 試験体の状況 (7 δ_y ~12 δ_y)

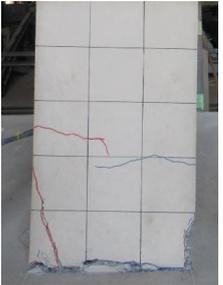
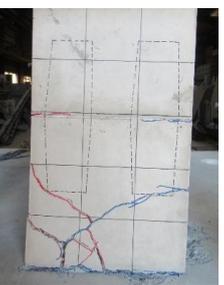
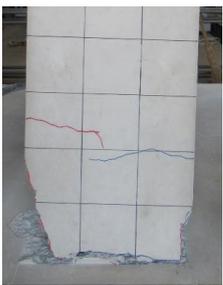
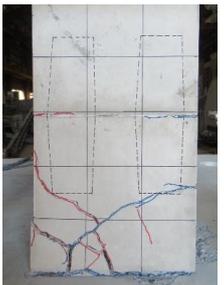
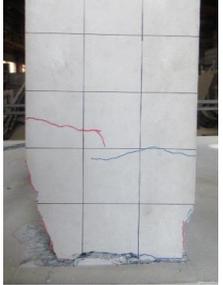
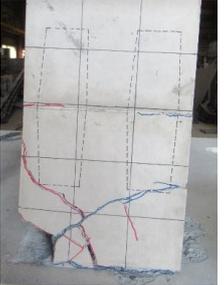
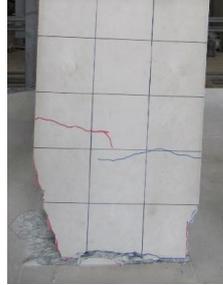
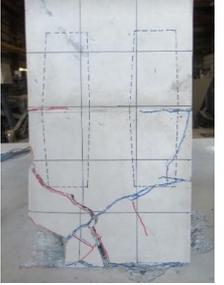
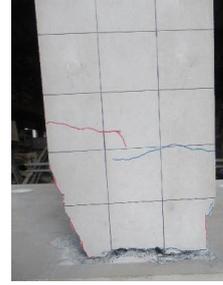
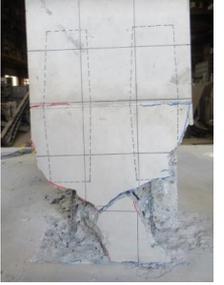
載荷サイクル	ND13A	JD13A
13 δ_y (δ_y') 終了時		
14 δ_y (δ_y') 終了時		
15 δ_y (δ_y') 終了時		
16 δ_y (δ_y') 終了時		
17 δ_y -3回目 載荷		

写真-6.10 D13 シリーズ 試験体の状況 (13 δ_y ~17 δ_y)

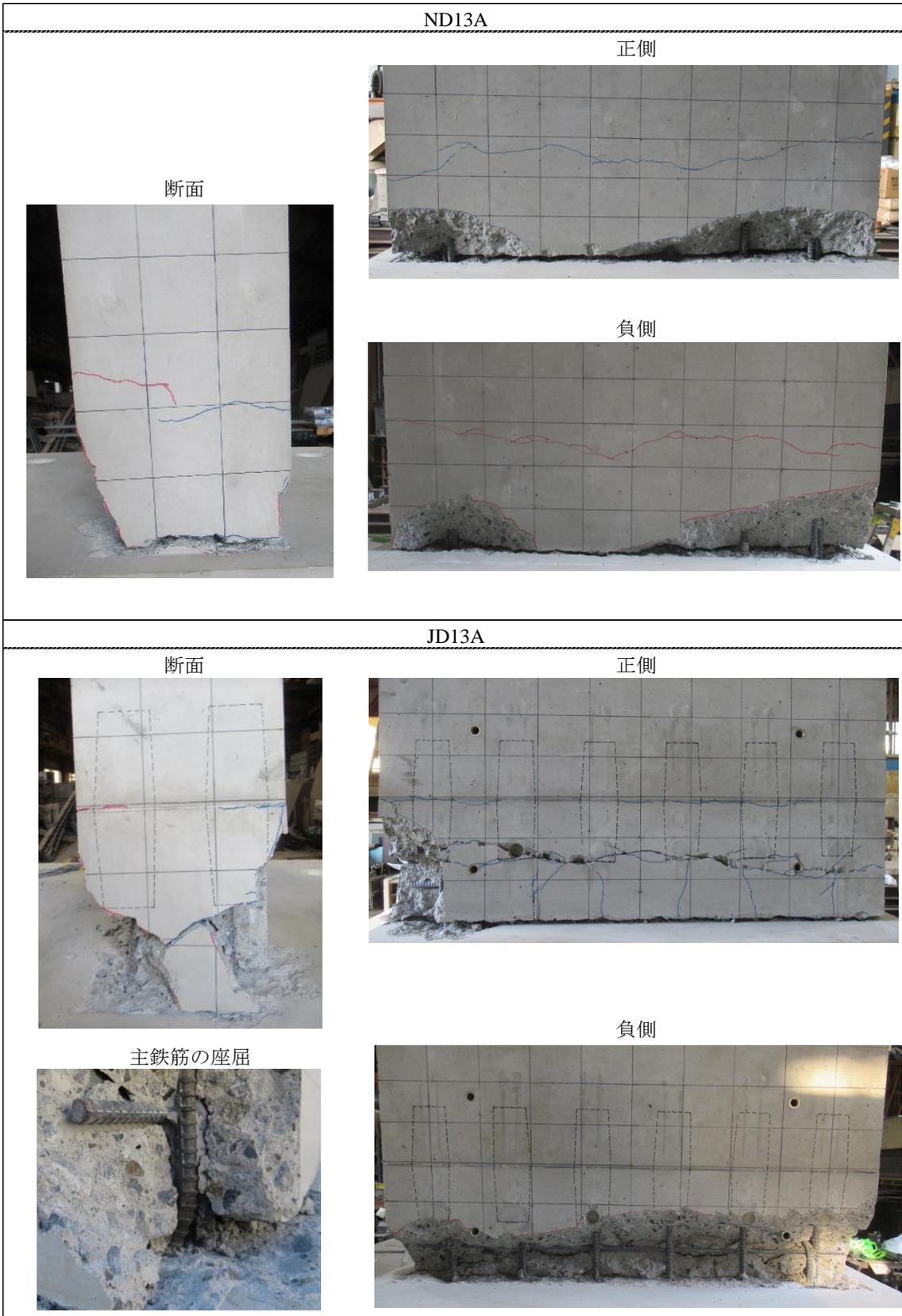


写真-6.11 D13 シリーズ (ND13A,JD13A) 破壊時の状況

ND13B

正側



断面



負側



JD13B

正側



断面



負側



写真-6.12 D13 シリーズ (ND13B,JD13B) 破壊時の状況

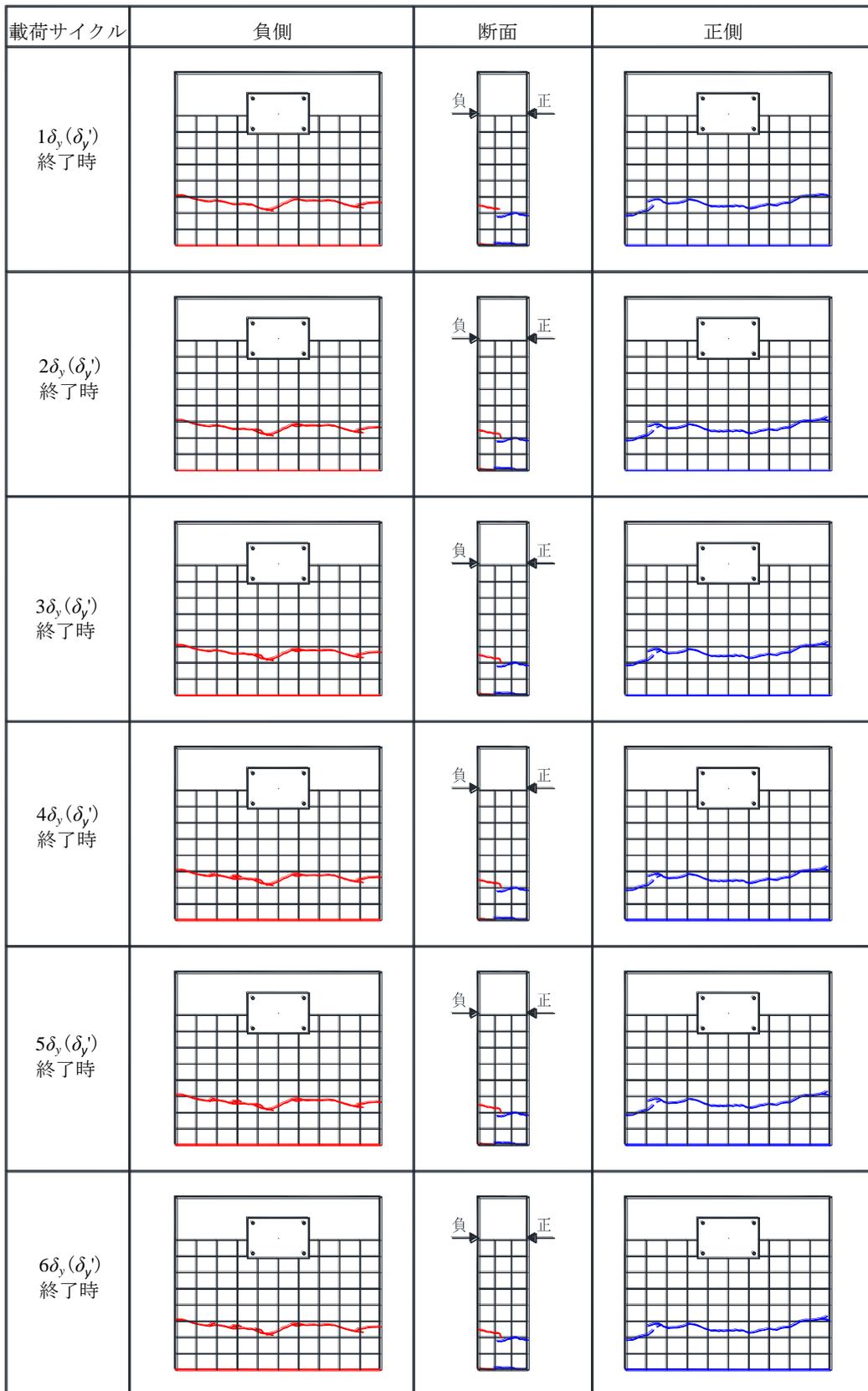


図-6.12 ND13A 試験体ひび割れ図 ($1\delta_y \sim 6\delta_y$)

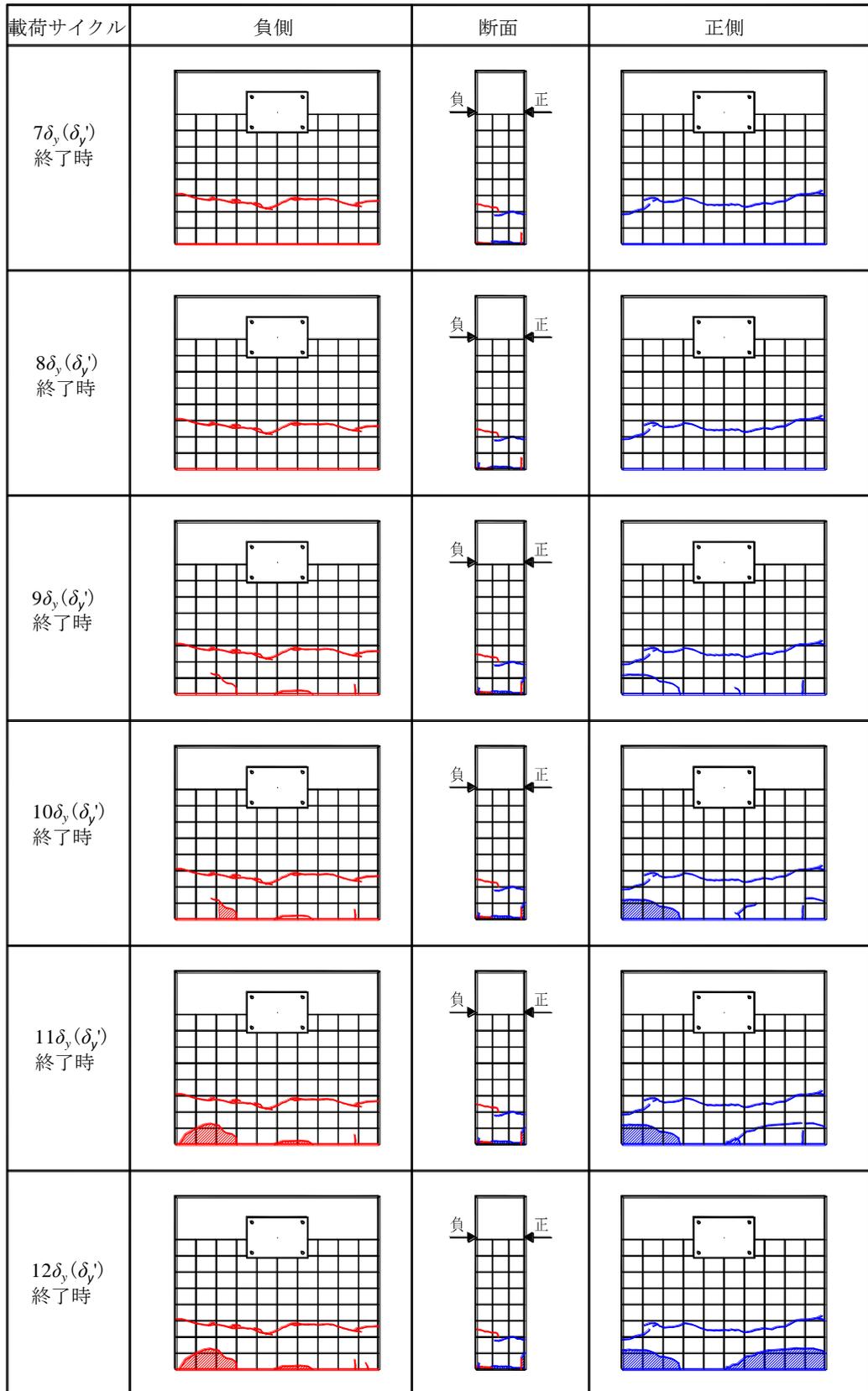


図-6.13 ND13A 試験体ひび割れ図 ($7\delta_y \sim 12\delta_y$)

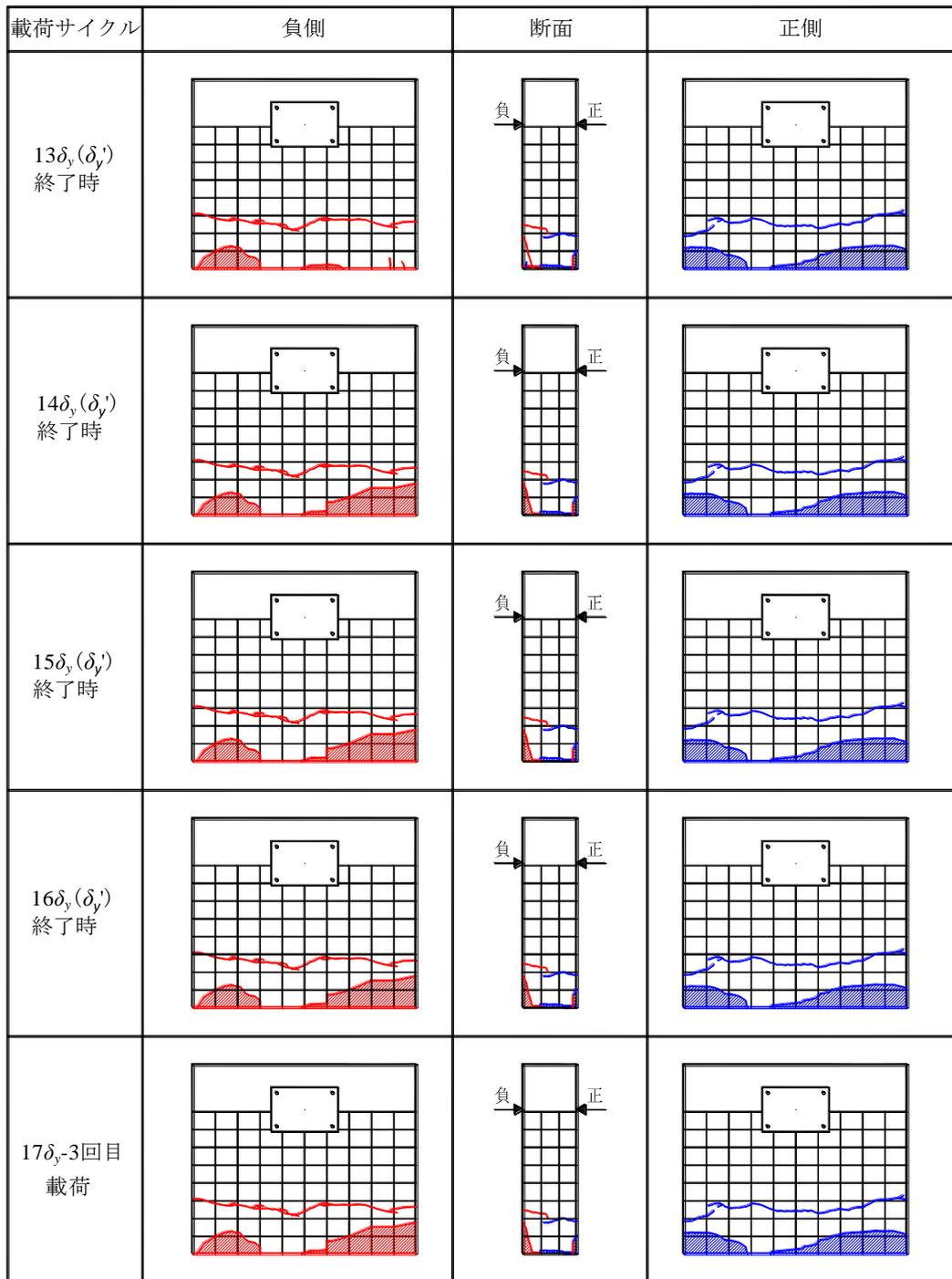


図-6.14 ND13A 試験体ひび割れ図 (13 δ_y ~17 δ_y)

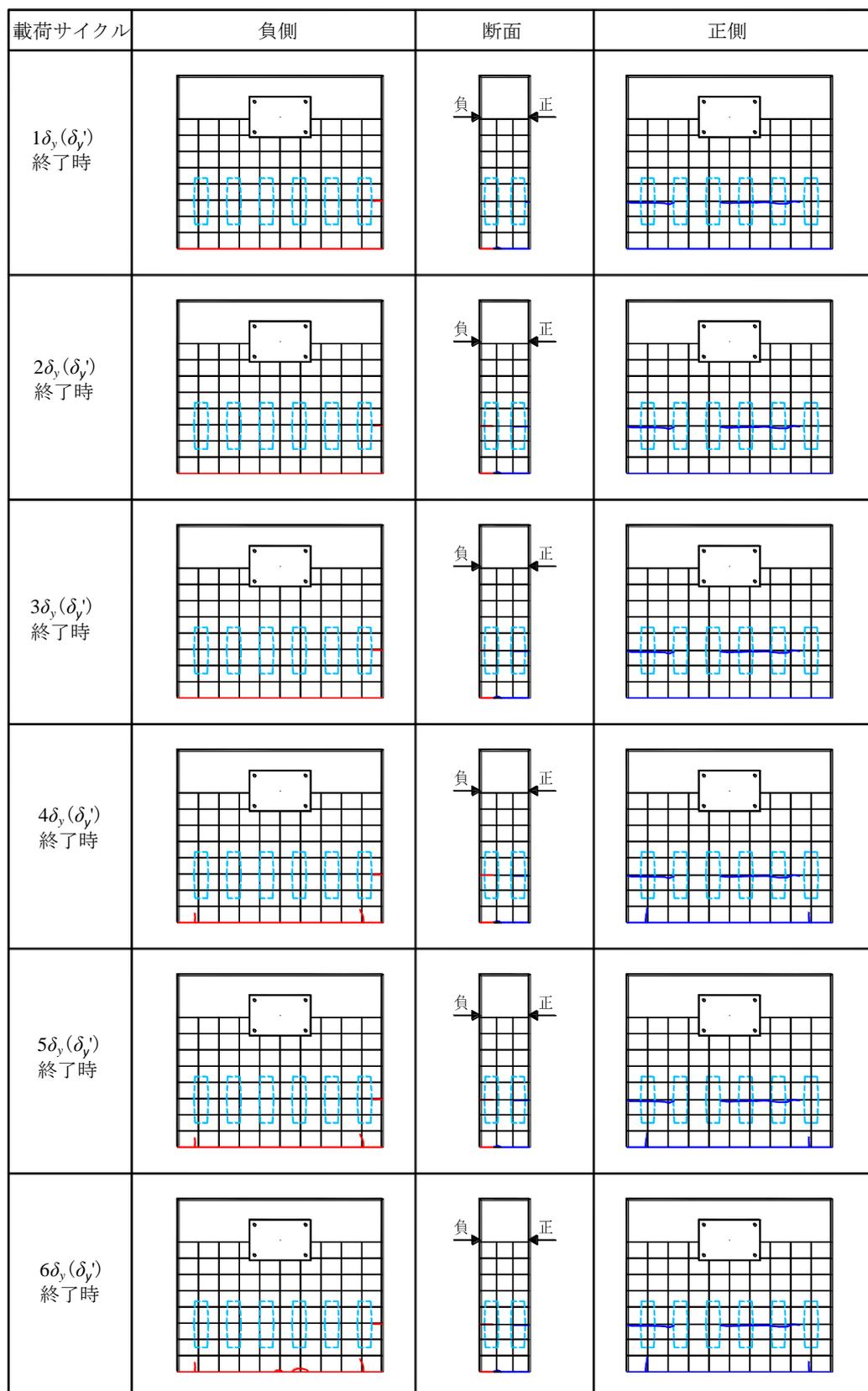


図-6.15 JD13A 試験体ひび割れ図 ($1\delta_y \sim 6\delta_y$)

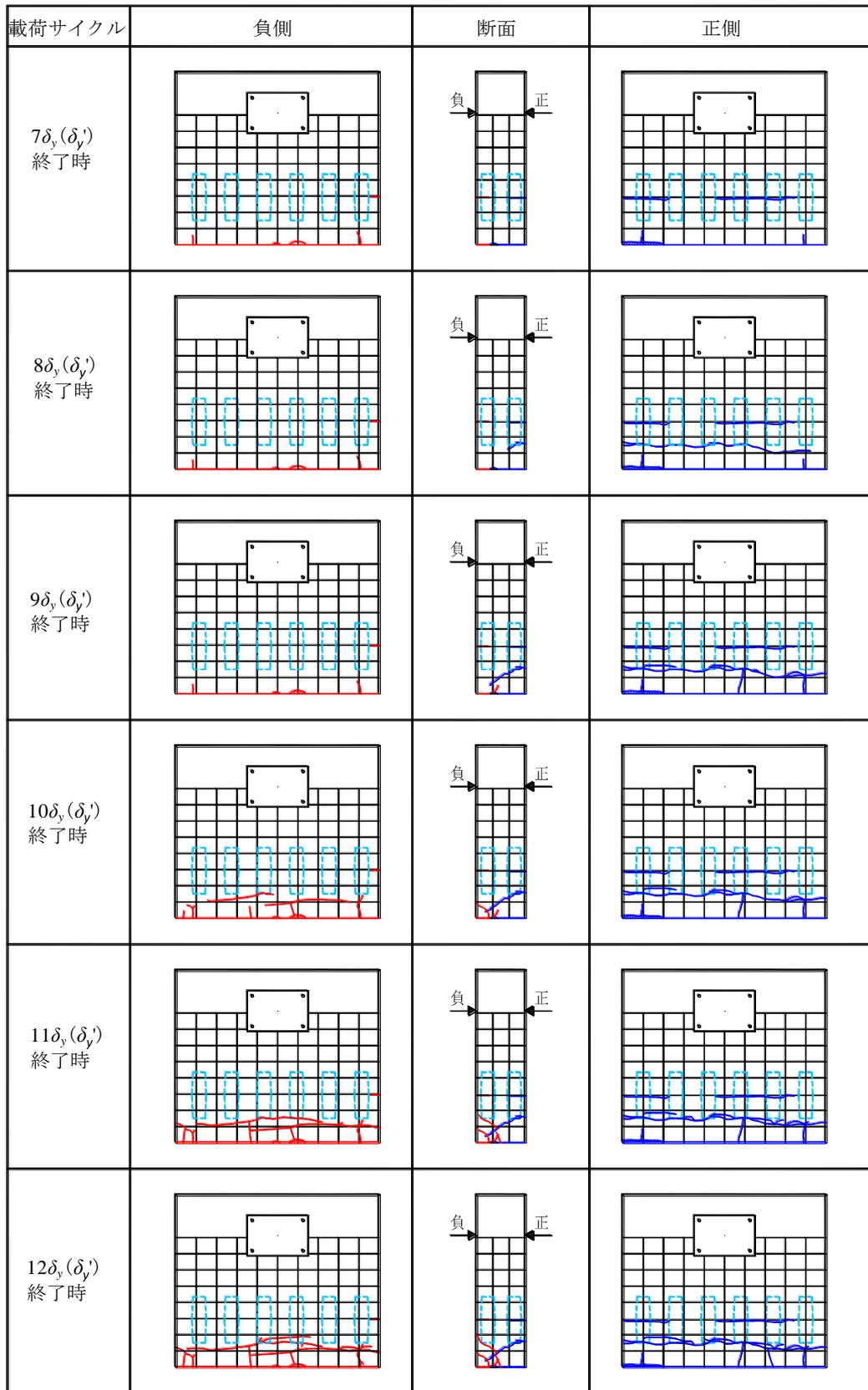


図-6.16 JD13A 試験体ひび割れ図 ($7\delta_y \sim 12\delta_y$)

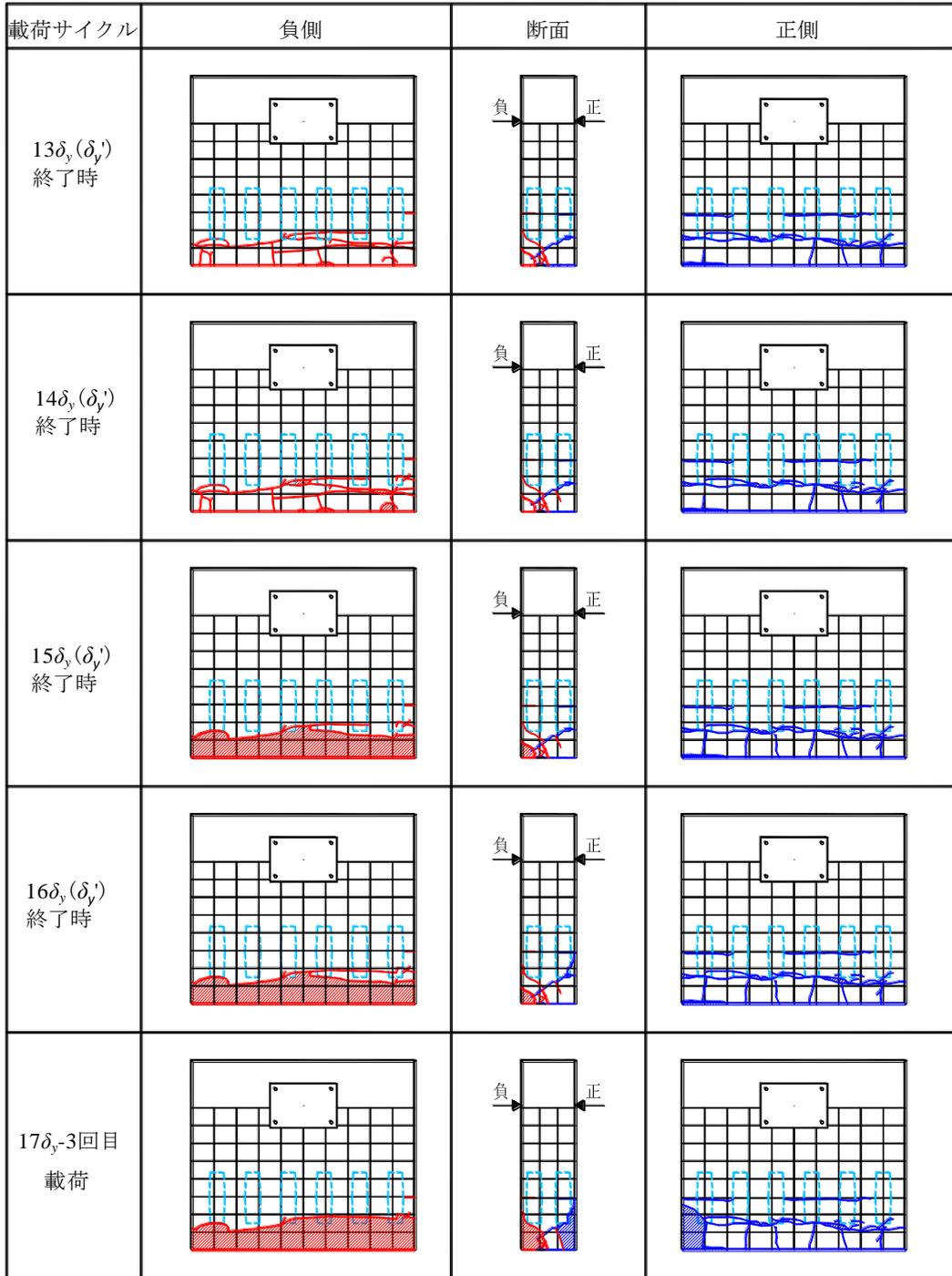


図-6.17 JD13A 試験体ひび割れ図 (13 δ_y ~17 δ_y)

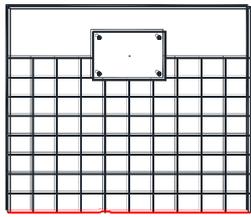
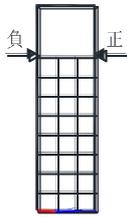
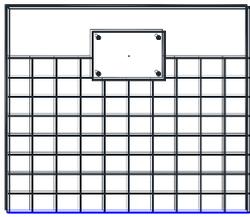
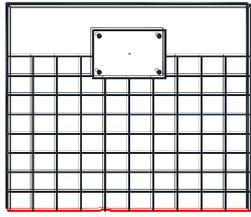
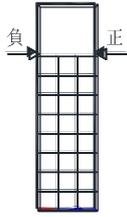
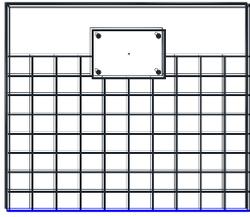
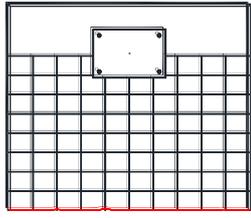
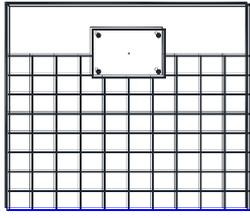
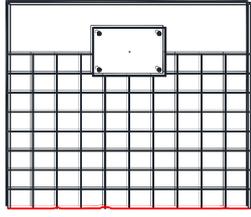
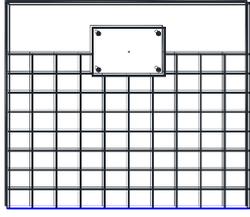
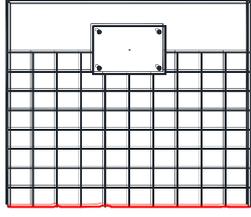
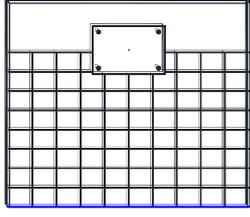
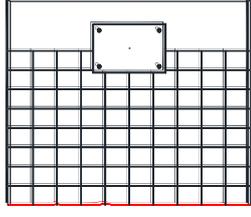
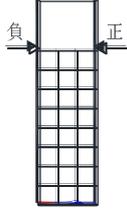
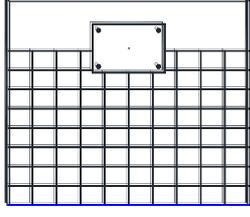
載荷サイクル	負側	断面	正側
$1\delta_y (\delta_y')$ 終了時			
$2\delta_y (\delta_y')$ 終了時			
$3\delta_y (\delta_y')$ 終了時			
$4\delta_y (\delta_y')$ 終了時			
$5\delta_y (\delta_y')$ 終了時			
$6\delta_y (\delta_y')$ 終了時			

図-6.18 ND13B 試験体ひび割れ図 ($1\delta_y \sim 6\delta_y$)

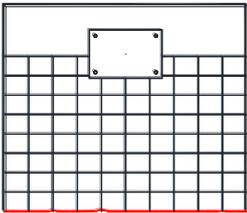
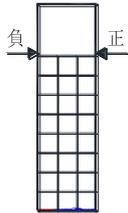
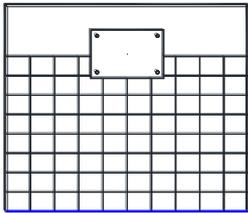
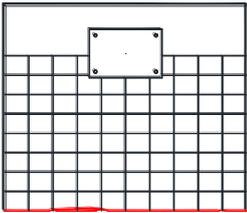
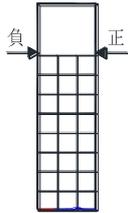
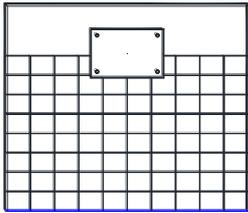
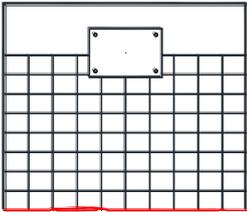
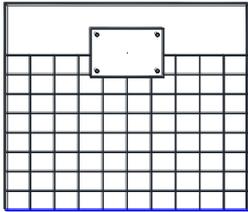
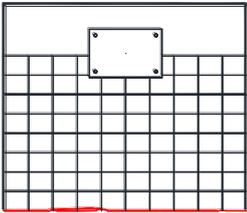
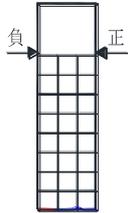
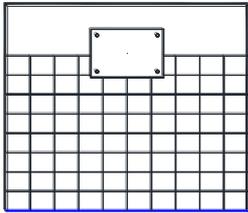
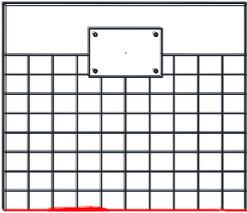
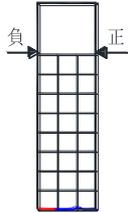
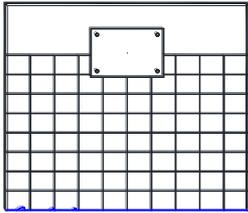
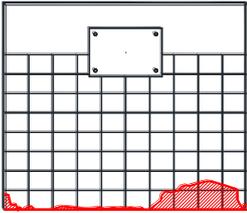
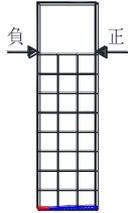
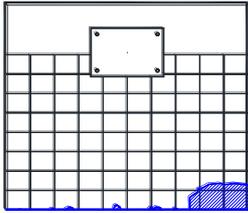
載荷サイクル	負側	断面	正側
$7\delta_y(\delta_y')$ 終了時			
$8\delta_y(\delta_y')$ 終了時			
$9\delta_y(\delta_y')$ 終了時			
$10\delta_y(\delta_y')$ 終了時			
$11\delta_y(\delta_y')$ 終了時			
17回目正側 破壊時			

図-6.19 ND13B 試験体ひび割れ図 ($7\delta_y \sim 17$ 回目正側破壊時)

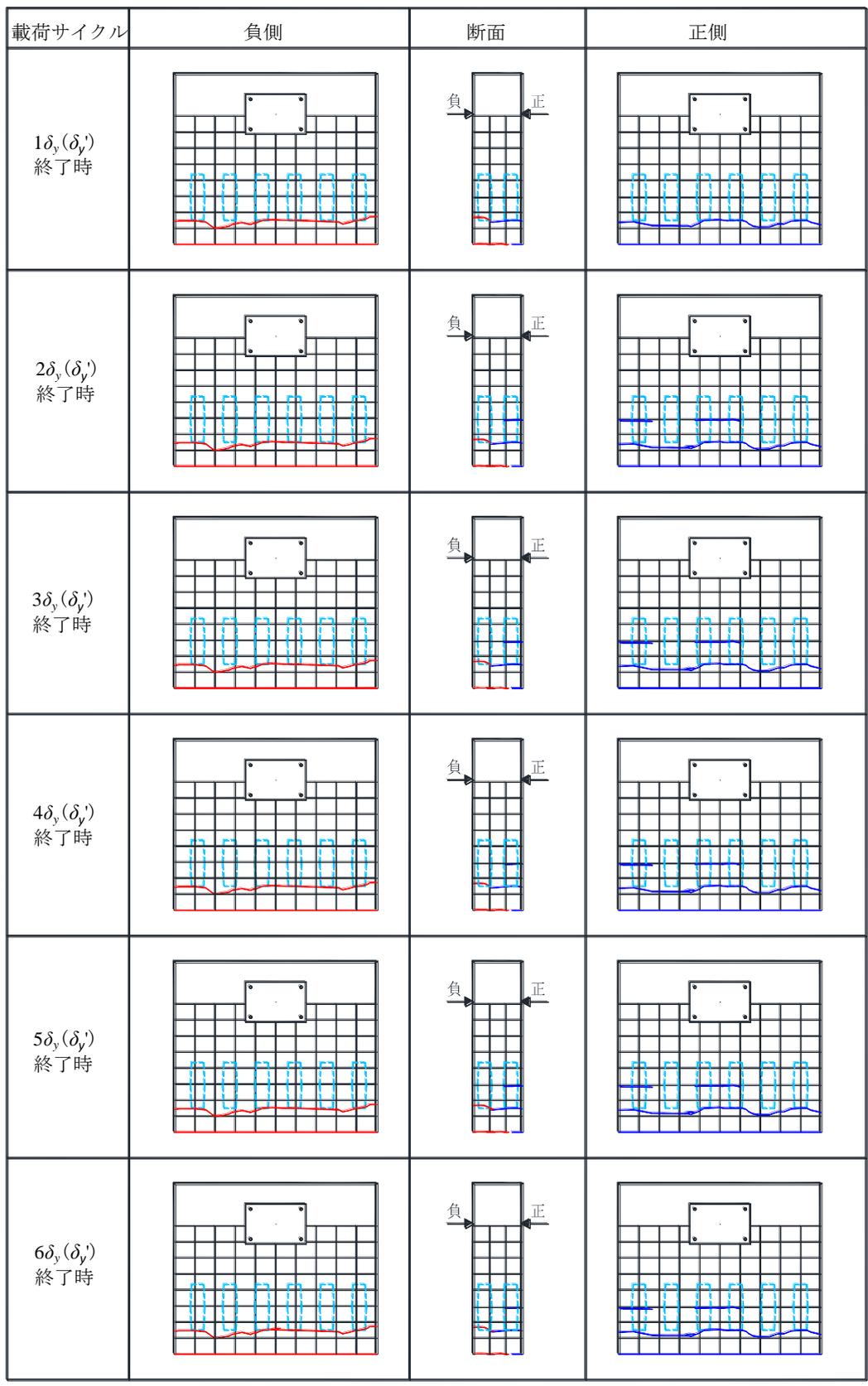


図-6.20 JD13B 試験体ひび割れ図 ($1\delta_y \sim 6\delta_y$)

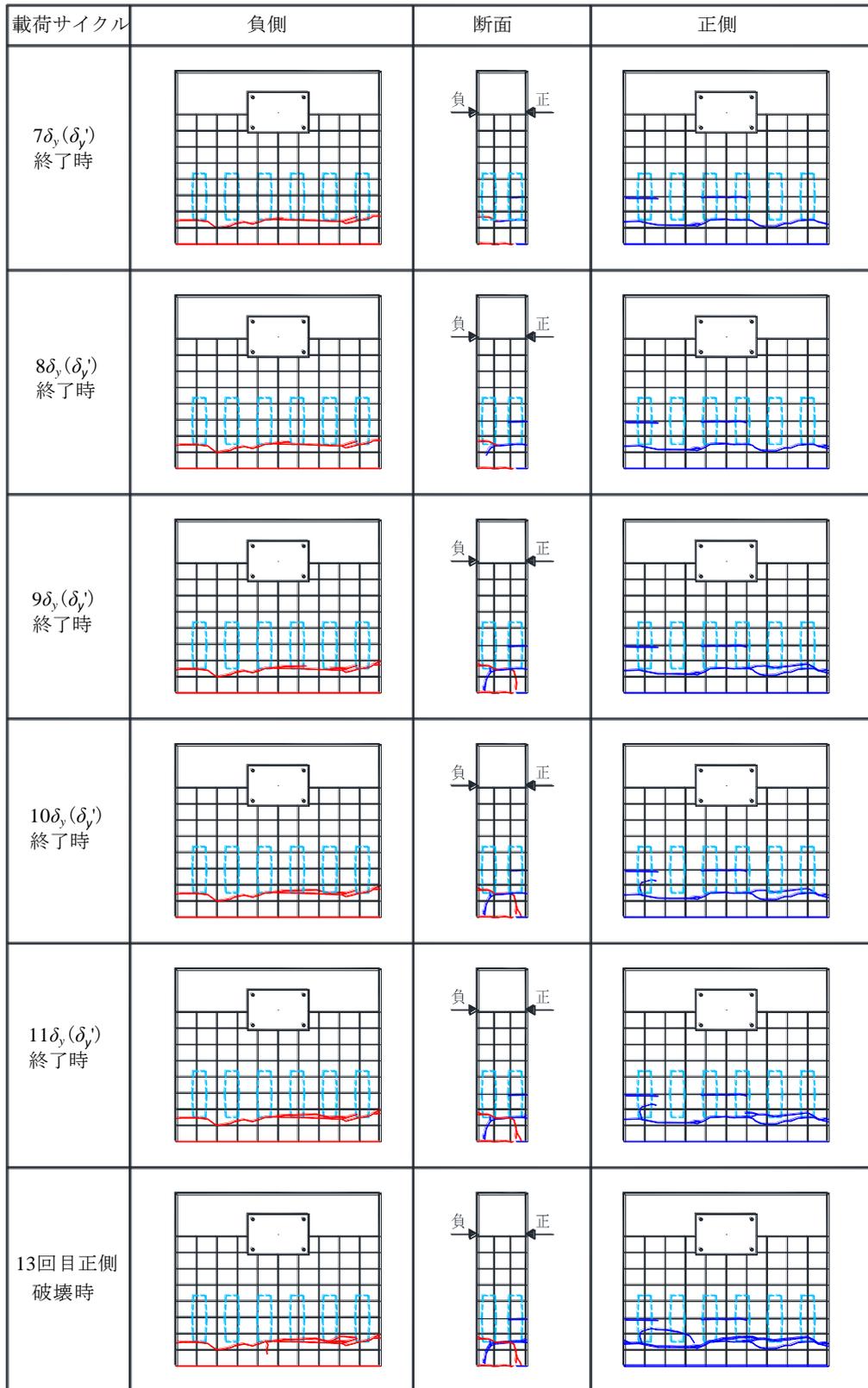


図-6.21 JD13B 試験体ひび割れ図 ($7\delta_y \sim 13$ 回目正側破壊時)

表-6.10 各載荷サイクルにおける試験体の状況 (ND25A, JD25A)

載荷サイクル	正負	変 状	D25シリーズ	
			ND25A	JD25A
0→曲げひび割れ	正側	ひび割れ	70kN時 壁部付根にひび割れ発生	77kN時 縦壁付根にひび割れ発生
0→ δ_y	正側	ひび割れ	壁部付根から上方 800mm間に4本発生	99kN時 継手下端部にひび割れ発生
				160kN時 接合面にひび割れ発生
				165kN時 継手上端部にひび割れ発生
		降伏荷重 基準変位	246kN 10.7mm	254kN 9.5mm
0→ δ_y'	負側	ひび割れ	壁部付根から上方 1000mm間に3本発生	86kN時 継手下端部にひび割れ発生
				134kN時 接合面にひび割れ発生
				153kN時 継手上端部にひび割れ発生
		降伏荷重 基準変位	242kN 9.3mm	240kN 8.5mm
3	3 δ_y	正側	ひび割れ発生 (壁部付根から50mm付近)	ひび割れ発生 (壁部付根から50mm付近)
	3 δ_y'	負側	ひび割れ発生 (壁部付根から50mm付近)	かぶりコンクリートの剥落 (壁部付根から50mm付近)
4	4 δ_y (2回目)	正側	主鉄筋の破断→約20%荷重降下 (断面方向手前から3本目)	—
	4 δ_y'	負側	かぶりコンクリートの剥落 (壁部付根から50mm付近)	—
5	5 δ_y	正側	剥落	かぶりコンクリートの剥落 (壁部付根から50mm付近)
6	6 δ_y	正側	剥落	コンクリートの剥落 (継手下端部付近)
	6 δ_y'	負側	剥落	コンクリートの剥落 (継手下端部付近)
7	7 δ_y (2回目)	正側	荷重降下	主鉄筋の破断→約20%荷重降下 (断面方向手前から2本目)
	7 δ_y' (2回目)	負側	載荷終了	—
8	8 δ_y	正側	剥落	かぶりコンクリートの剥落 (継手下端部の下側)
	8 δ_y'	負側	剥落	かぶりコンクリートの剥落 (継手下端部の下側)
9	9 δ_y (1回目)	正側	載荷終了	載荷終了

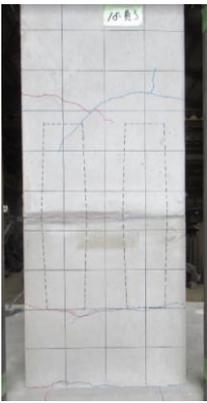
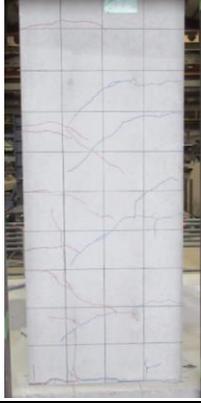
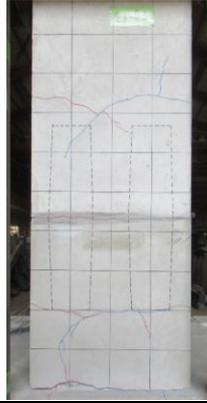
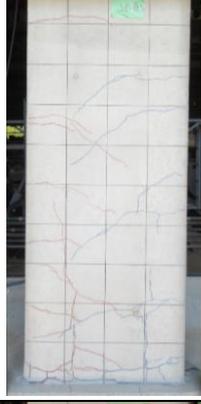
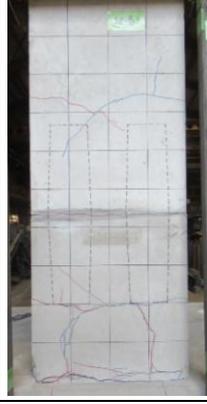
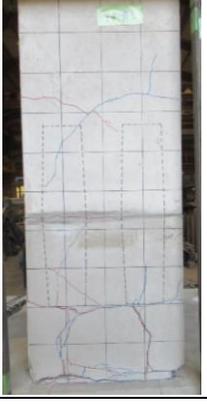
载荷サイクル	ND25A	JD25A
1 δ_y (δ_y') 終了時		
2 δ_y (δ_y') 終了時		
3 δ_y (δ_y') 終了時		
4 δ_y (δ_y') 終了時		

写真-6.13 D25 シリーズ 試験体の状況 (1 δ_y ~4 δ_y)

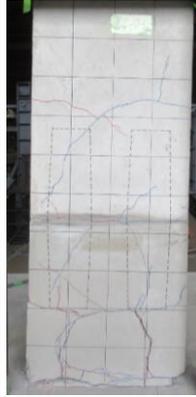
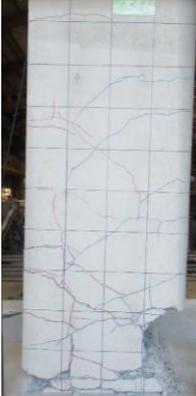
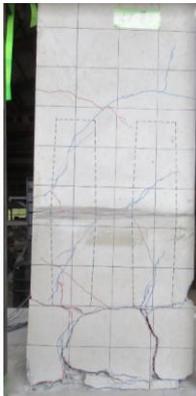
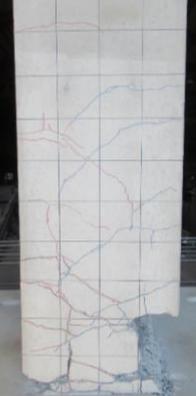
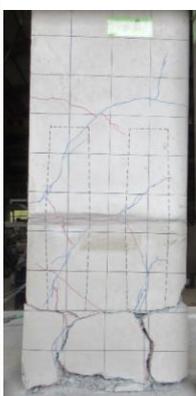
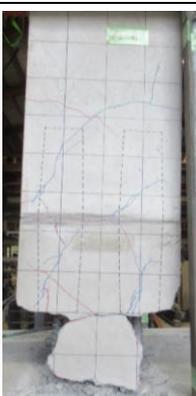
载荷サイクル	ND25A	JD25A
5 δ_y (δ_y') 終了時		
6 δ_y (δ_y') 終了時		
7 δ_y -2目回 終了時 (ND25A) 7 δ_y (δ_y') 終了時 (JD25A)		
8 δ_y (δ_y') 終了時	7 δ_y -2目回 で载荷終了	

写真-6.14 D25 シリーズ 試験体の状況 (5 δ_y ~8 δ_y)

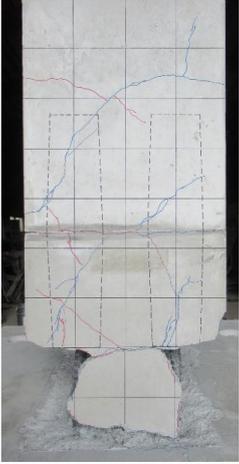
载荷サイクル	ND25A	JD25A
<p data-bbox="491 528 595 584">9δ_y-1目回 終了時</p>	<p data-bbox="683 528 799 584">7δ_y-2目回 で载荷終了</p>	

写真-6.15 D25 シリーズ 試験体の状況 (9 δ_y)

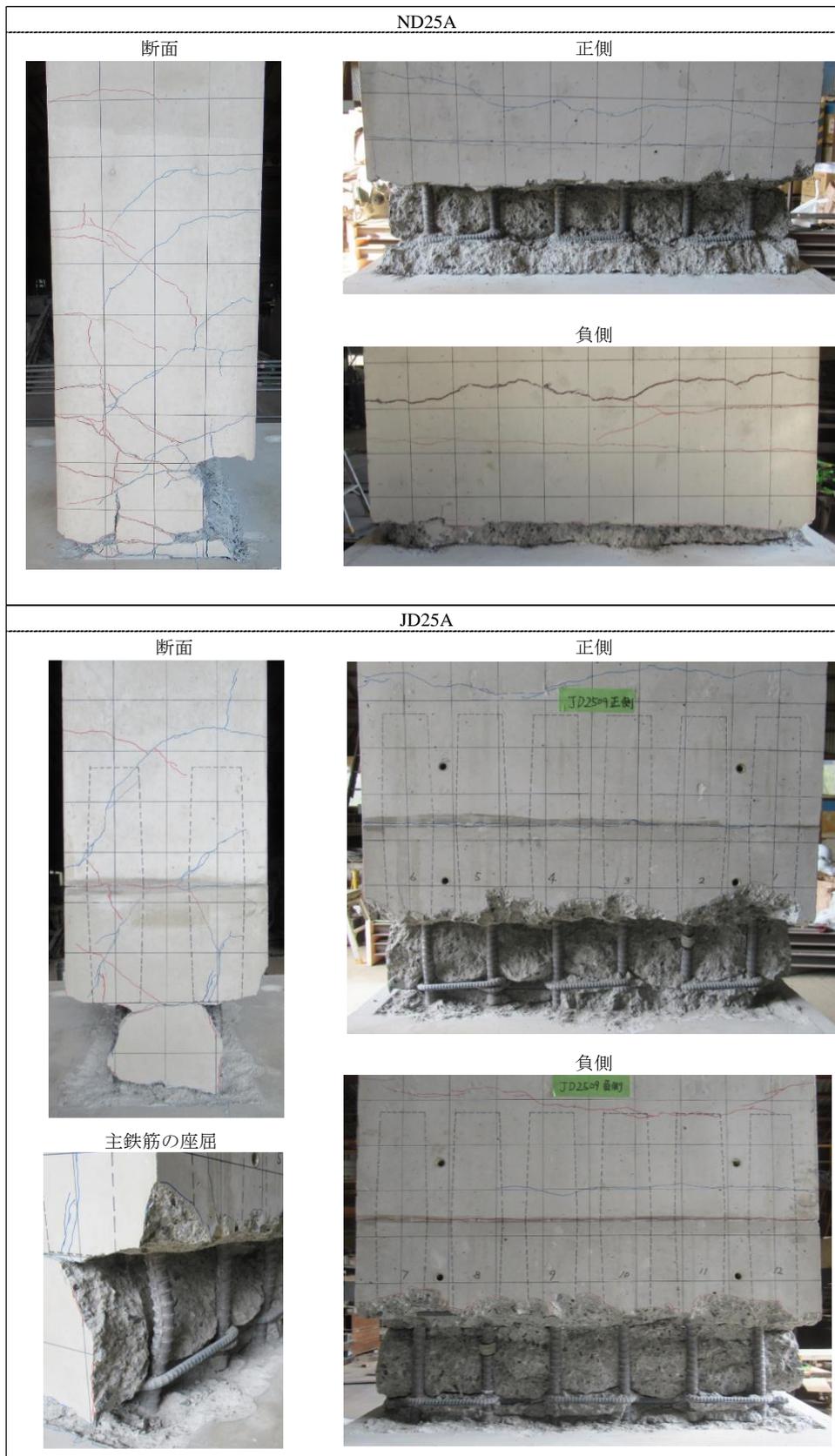


写真-6.16 D25 シリーズ (ND25A,JD25A) 破壊時の状況

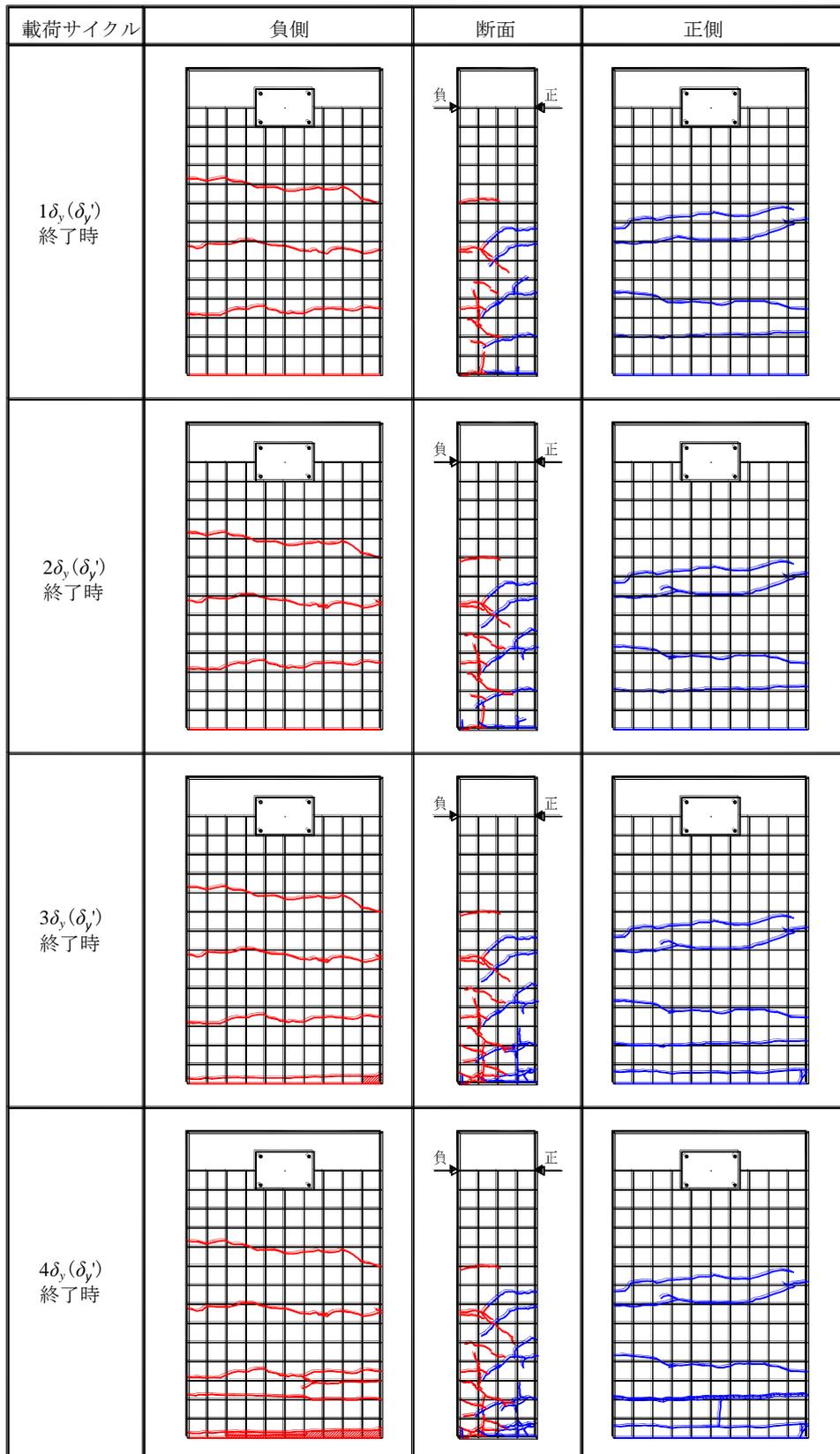


図-6.22 ND25A 試験体ひび割れ図 ($1\delta_y \sim 4\delta_y$)

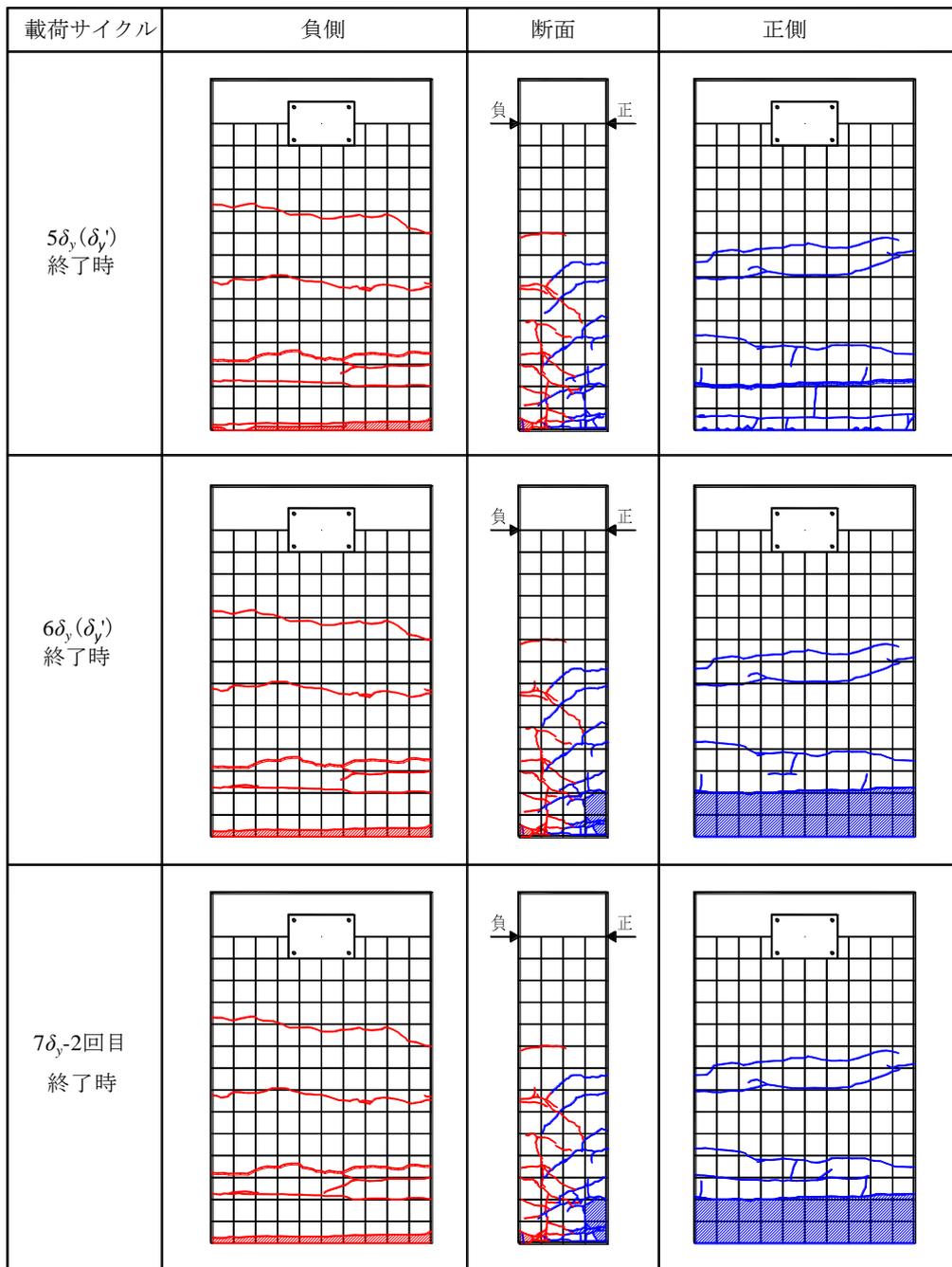


図-6.23 ND25A 試験体ひび割れ図 (5 δ_y ~7 δ_y)

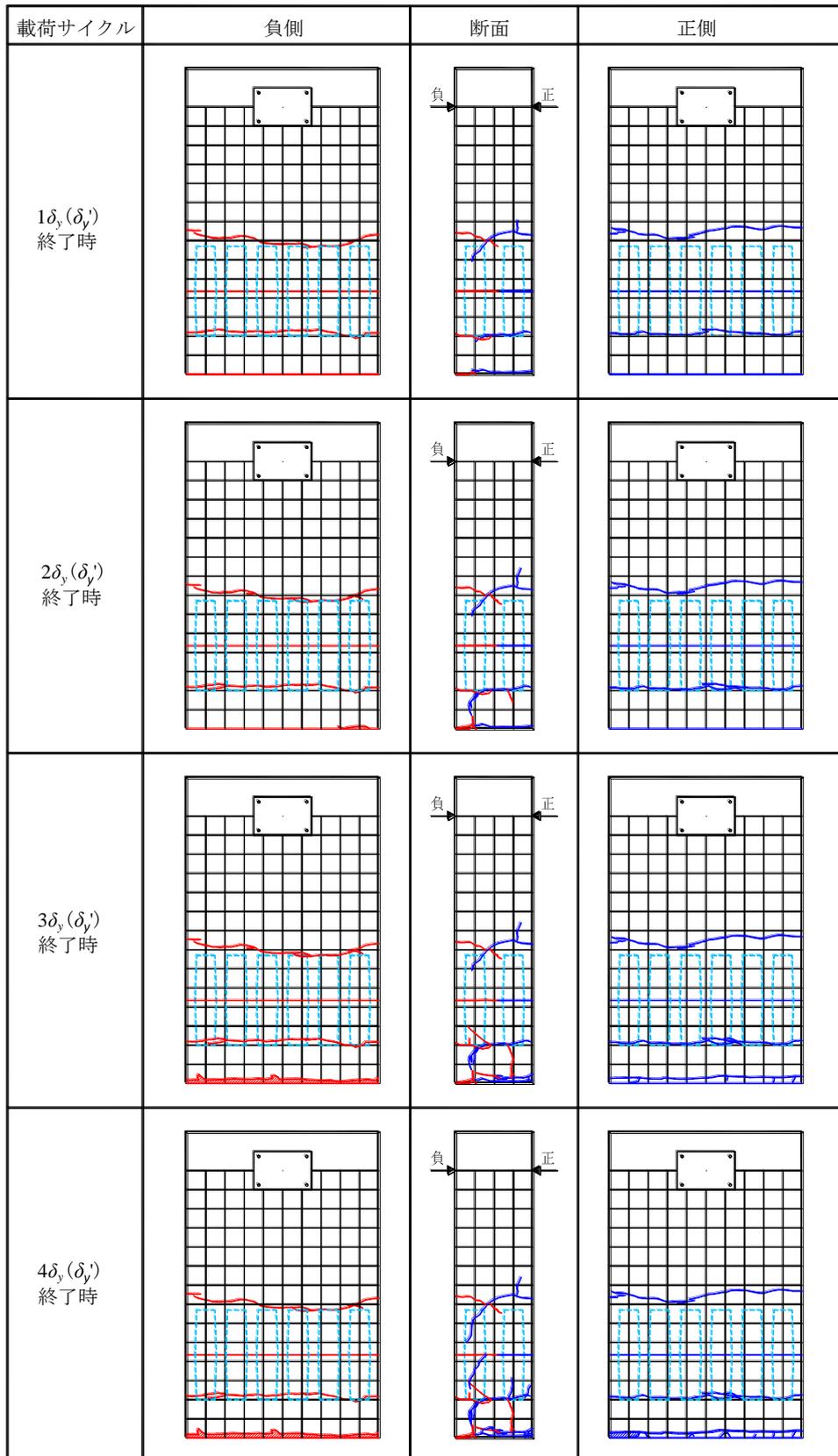


図-6.24 JD25A 試験体ひび割れ図 ($1\delta_y \sim 4\delta_y$)

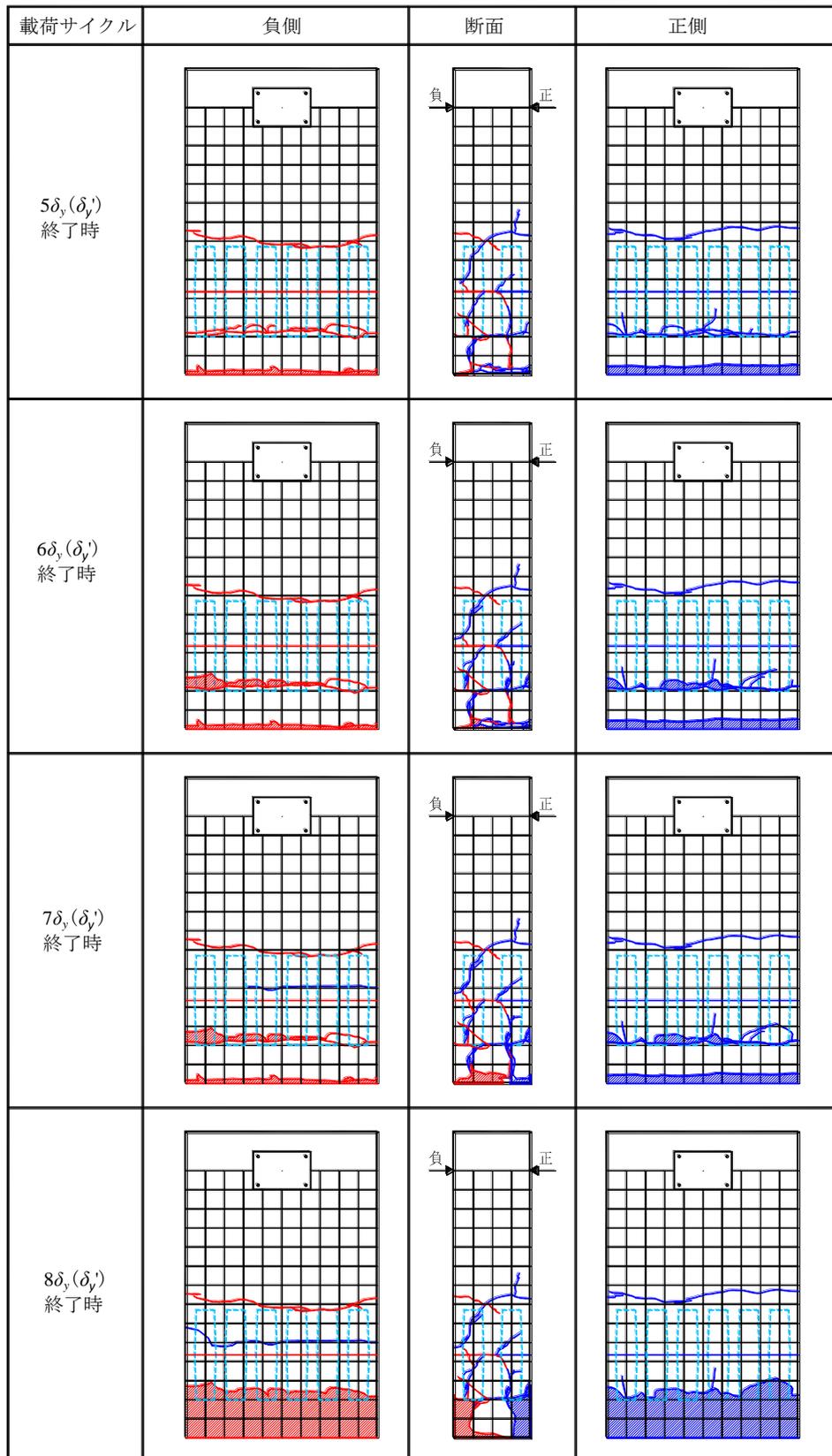


図-6.25 JD25A 試験体ひび割れ図 ($5\delta_y \sim 8\delta_y$)

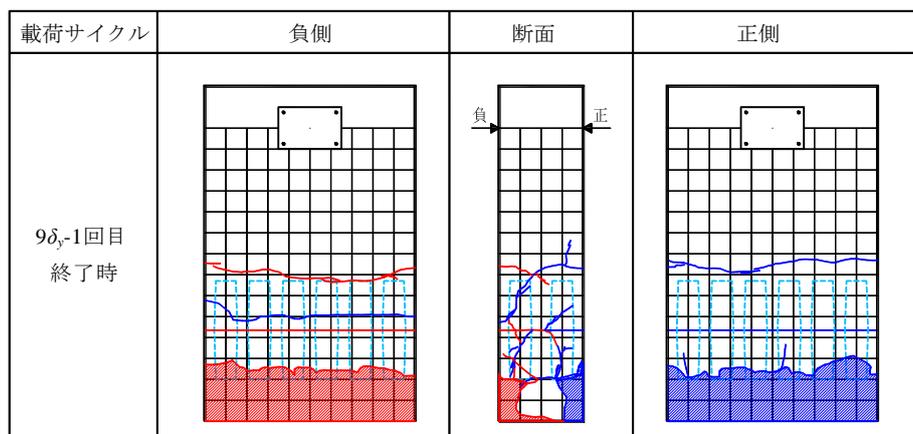


図-6.26 JD25A 試験体ひび割れ図 (9 δ_y)

6.3.3 ひび割れの進展状況および破壊性状

6.3.2 に示した各载荷サイクルにおける試験体の状況から、ひび割れの進展状況と破壊性状を記述する。

(1)D13 シリーズ

ND13A について、1 δ_y 終了時には、壁部付根と付根から 160mm 付近にひび割れが発生した。7 δ_y までには他にひび割れは認められず、载荷ステップが進むとともに、壁部付根のひび割れが拡大した。正側では 10 δ_y 、負側では 11 δ_y にかぶりコンクリートの剥落がみられた。11 δ_y では、3 回目载荷時にかぶりコンクリートが剥落した試験体端部の主鉄筋が破断し、20% 程度の荷重降下がみられた。14 δ_y の 1 回目载荷時には、もう一方の端部主鉄筋が破断し、さらに 20% 程度の荷重降下がみられた。そして、17 δ_y の 3 回目载荷時において、すべての主鉄筋が破断し、試験体の破壊に至った。一方 JD13A は、1 δ_y 終了時には、壁部付根と接合面にひび割れが発生した。7 δ_y までには他にひび割れは認められず、8 δ_y で正側継手下端部にひび割れが発生し、10 δ_y には同様に負側にもひび割れが発生した。12 δ_y の 2 回目と 15 δ_y の 2 回目载荷時にそれぞれ 1 本の主鉄筋が破断し、12 δ_y では 15% 程度、15 δ_y ではさらに 20% 程度の荷重降下がみられた。継手下端部から発生したひび割れは、载荷ステップが進むとともに進展し、負側では 15 δ_y に継手下端部から下方のかぶりコンクリートが剥落した。そして、17 δ_y の 3 回目载荷時において、すべての主鉄筋が破断し試験体の破壊に至った。また、破壊時においても正側・負側ともに継手上端部にひび割れの発生は認められず、接合面のひび割れも破壊時まで進展することはない。

ND13B について、1 δ_y 終了時には、壁部付根にひび割れが発生した。負側の 11 δ_y でかぶりコンクリートの一部が剥離したが、付根以外にひび割れは認められず、载荷ステップが進むとともに、壁部付根のひび割れが拡大した。負側の 16 δ_y でかぶりコンクリートの一部が剥落したが、正側ではかぶりコンクリートの剥落はみられなかった。16 δ_y 終了時において、正側・負側とも荷重を維持した状態であったが、17 回目の正荷重で加圧を継続し、試験体

端部の主鉄筋が破断し、20%程度の荷重降下がみられた時点で載荷を終了した。一方 JD13B は、 $1\delta_y$ 終了時には壁部付根と継手下端部に、正側の $2\delta_y$ では接合面にひび割れが発生した。載荷ステップが進むとともに付根のひび割れのみが進展し、継手下端部のひび割れは $8\delta_y$ まで進展はみられず、 $9\delta_y$ の載荷でやや拡大した。 $12\delta_y$ 終了時において、正側・負側とも荷重を維持した状態であったが、13 回目の正荷重で加圧を継続し、試験体端部の主鉄筋が破断し、10%程度の荷重降下がみられた時点で載荷を終了した。また、破壊時においても正側・負側ともに継手上端部にひび割れの発生は認められず、接合面のひび割れも破壊時まで進展することはない、継手下端部のひび割れが卓越したものの、かぶりコンクリートの剥落には至らなかった。

(2) D25 シリーズ

ND25A について、 $1\delta_y$ 終了時では、正側は壁部付根と上方に 4 本、負側は壁部付根と上方に 3 本のひび割れが発生した。ひび割れ発生位置は、いずれもせん断補強鉄筋を配置した付近であり、 $2\delta_y$ まで大きな進展はなかった。 $3\delta_y$ では、せん断補強鉄筋が配置されている壁部付根から 50mm 付近に発生したひび割れと、 $1\delta_y$ に発生した壁部付根のひび割れが卓越した。 $4\delta_y$ の 2 回目載荷時に断面方向手前から 3 本目の主鉄筋が破断し、20%程度の荷重降下がみられた。 $6\delta_y$ では、正側の壁部付根から 200mm 程度かぶりコンクリートが剥落し、安全性を考慮して $7\delta_y$ で載荷を終了した。一方 JD25A は、 $1\delta_y$ で壁部付根と継手下端部、接合面、継手上端部にひび割れが発生し、 $2\delta_y$ まで大きな進展はなかった。 $3\delta_y$ では、せん断補強鉄筋が配置されている壁部付根から 50mm 付近にひび割れが発生し、負側ではかぶりコンクリートが剥落した。 $6\delta_y$ では、正側・負側のいずれも継手下端部付近のコンクリートが剥落し、 $7\delta_y$ の 2 回目載荷時に断面方向手前から 2 本目の主鉄筋が破断し、20%程度の荷重降下がみられた。 $8\delta_y$ では、正側・負側とも継手下端部より下方のかぶりコンクリートが剥落し、安全性を考慮して $9\delta_y$ の 1 回目を載荷した後に終了した。また、 $1\delta_y$ 時に発生した接合面と継手上端部のひび割れは、破壊時まで進展することはない。

6.3.4 ひずみ性状

JD13A について、各載荷サイクルにおける主鉄筋のひずみ分布を図-6.27~6.28 に、主鉄筋が降伏するまでのひずみ分布を抽出して図-6.29 に示す。同様に JD25A について図-6.30~6.31 と図-6.32 に示す。図-6.27~6.28 と図-6.30~6.31 における計算値は、材料試験値を用いて主鉄筋降伏時の値を示している。JD13A のひずみは、壁部付根は正側・負側ともに $1\delta_y$ (δ_y') まで、継手下端部は正側で $6\delta_y$ 、負側で $4\delta_y$ までの値である。一方 JD25A では、壁部付根は正側・負側ともに $1\delta_y$ (δ_y') まで、継手下端部は正側・負側ともに $3\delta_y$ (δ_y') まで示している。これは、それ以降の載荷サイクルでは、主鉄筋が降伏していることで計測値の信頼性がないため図示していない。なお、ストレインゲージによるひずみ計測位置は、JD13A は図-6.3、JD25A は図-6.5 に示したとおり、継手下端部のひずみとは下端部より 30mm 下方、継手上端部とは上端部より 30mm 上方の位置のひずみである。また、各載荷サイクルに

おけるひずみは、3回目载荷時の値を採用している。

(1)D13 シリーズ

各载荷サイクルとも、壁部付根、継手下端部、継手上端部の順でひずみが小さくなることを確認した。また、継手上端部はひずみが小さいため明確ではないが、継手下端部は载荷ステップが進むとともにひずみが大きくなっていることがわかる。

主鉄筋降伏時のひずみを計算値と実測値とで比較すると、継手下端部と継手上端部は実測値が小さい値を示している。これは、主鉄筋降伏時では、ひび割れは壁部付根と接合面のみに発生しており、継手下端部と継手上端部付近にはひび割れが発生していないため、ひずみの値が計算値より小さい値を示したといえる。図-6.29をみると、主鉄筋降伏時に継手下端部においてひび割れは確認できないものの、壁部付根にひび割れが発生した荷重(64kN)付近でひずみが増加していることがわかる。

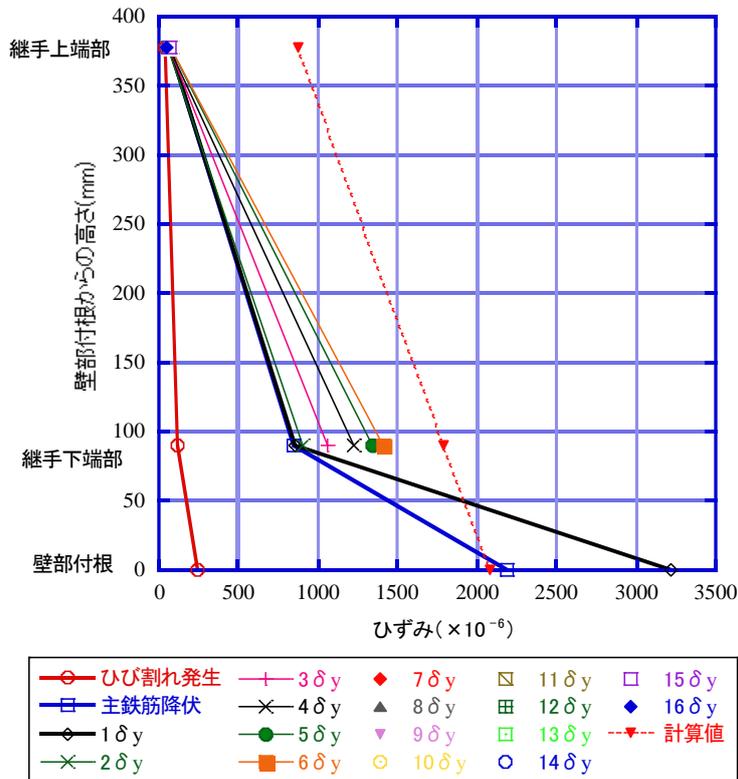


図-6.27 主鉄筋のひずみ (JD13A-正側载荷)

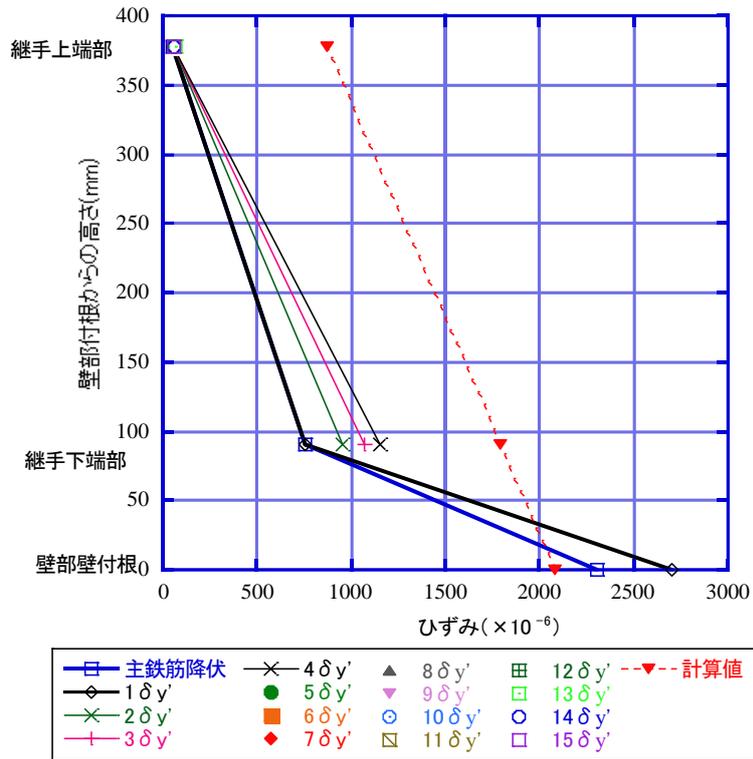


図-6.28 主鉄筋のひずみ (JD13A-負側載荷)

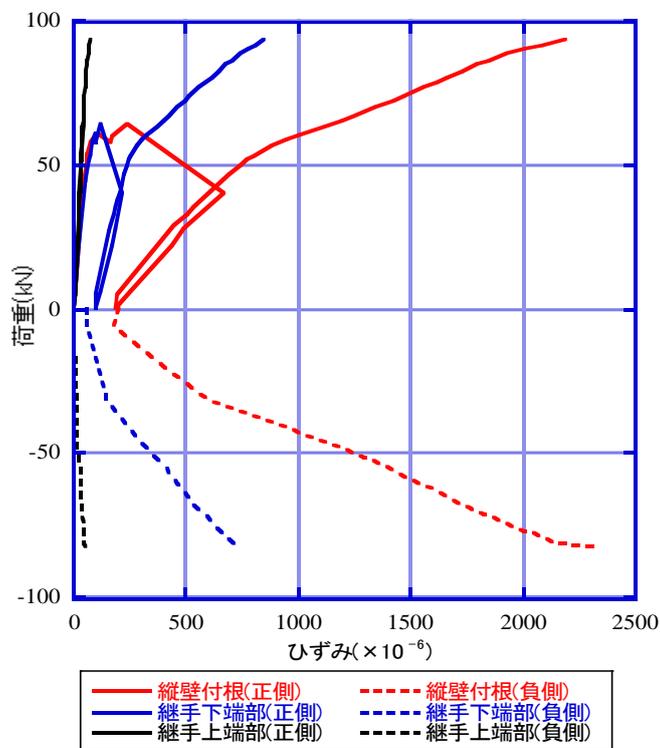


図-6.29 主鉄筋降伏までのひずみ (JD13A)

(2)D25 シリーズ

各载荷サイクルとも、壁部付根、継手下端部、継手上端部の順でひずみが小さくなることを確認した。また、継手下端部および継手上端部とも、载荷ステップが進むとともにひずみが大きくなっていることがわかる。ただし、継手下端部の降伏荷重時と $1\delta_y$ (δ_y') の比較では、わずかに降伏荷重時の方がひずみの値が大きい。これは、正側・負側とも降伏荷重時である $1\delta_y$ (δ_y') の1回目载荷時と、 $1\delta_y$ (δ_y') のひずみとして採用している3回目载荷時の荷重をみると、正側・負側とも3回目载荷時の荷重が約40kN小さく、そのことが影響していると考えられる。

主鉄筋降伏時のひずみを計算値と実測値で比較すると、正側・負側ともほぼ等しい値を示している。これは、主鉄筋が降伏するまでの間に、継手下端部と継手上端部付近にもひび割れが発生していることから、計算値とほぼ等しい値を示したといえる。これは、**図-6.32**に示した主鉄筋降伏までのひずみ分布をみると、継手下端部および継手上端部とも、ひび割れが発生した後に壁部付根と同様のひずみ増加勾配を示していることからわかる。このように、主鉄筋に作用する応力が接合部の継手を介し、上部材の主鉄筋に伝達されていることが確認できた。

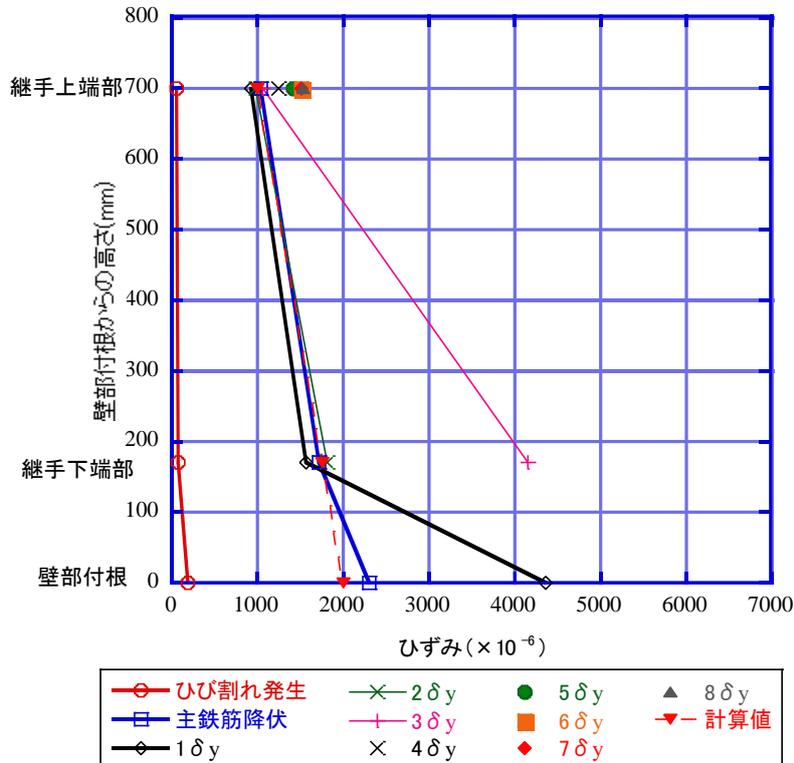


図-6.30 主鉄筋のひずみ (JD25A-正側载荷)

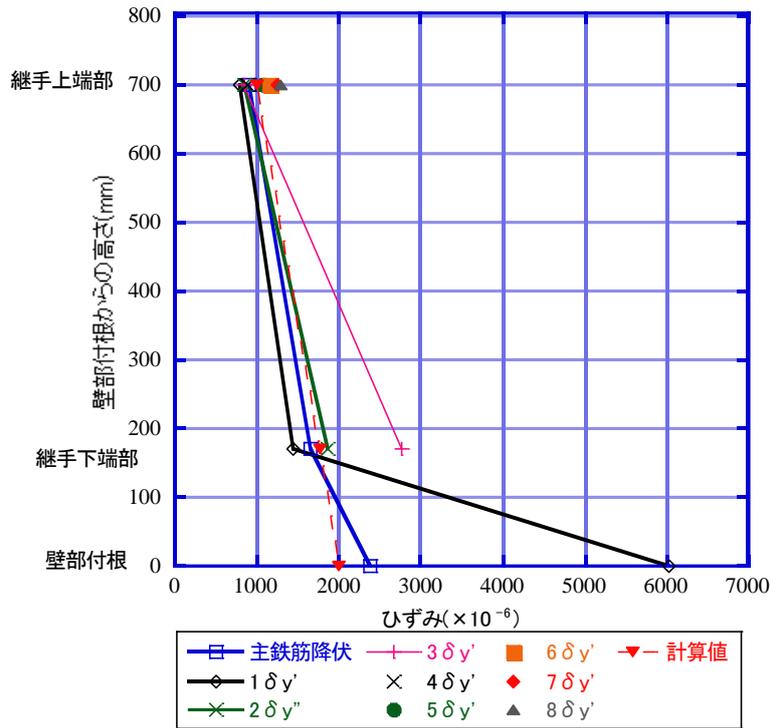


図-6.31 主鉄筋のひずみ (JD25A-負側載荷)

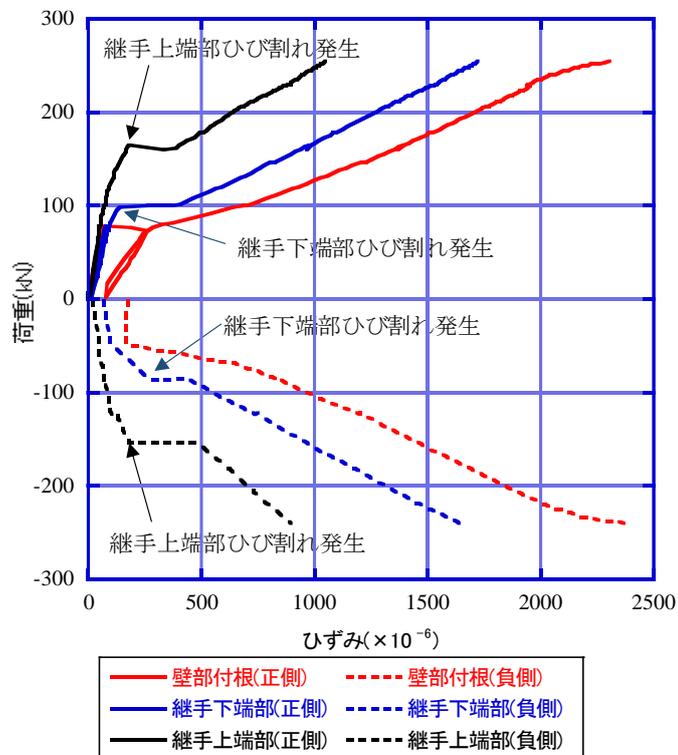


図-6.32 主鉄筋降伏までのひずみ (JD25A)

6.3.5 最大荷重と変形性能および履歴曲線

最大荷重と最大荷重時の変位量を表-6.11 に、履歴曲線と包絡線について、D13 シリーズを図-6.33~6.38 に、D25 シリーズを図-6.39~6.41 に示す。表-6.11 中に示す計算値は、前述した(式 6-2)より終局曲げモーメントを算出し、荷重値に換算して求めた。また、表中に示す最大荷重時の変位量は、最後に計算上の降伏点に達した時の水平変位として比較した。なお計算に使用した材料の特性値は、材料試験値を用いた。

表-6.11 最大荷重と変形性能

試験体番号	荷重方向	最大荷重時						
		荷重サイクル	P_{max} (kN)	P_{maxcal} (kN)	P_{max}/P_{maxcal}	δ_{max} (mm)	δ_{max}/δ_y (δ_y)	δ_{max}/a (%)
ND13A	正	1 δ_y 1回目	89	100	0.89	17.6	11.0	2.7
	負	9 δ_y 1回目	89		0.89	28.5	15.0	4.4
JD13A	正	2 δ_y 1回目	97	99	0.98	26.4	12.0	4.1
	負	1 δ_y 1回目	82		0.83	27.2	16.0	4.2
ND13B	正	17回目	91	100	0.91	27.2	16.0	4.2
	負	15 δ_y	93		0.93	27.2	16.0	4.2
JD13B	正	13回目	113	100	1.13	20.4	12.0	3.1
	負	7 δ_y	85		0.85	20.4	12.0	3.1
ND25A	正	2 δ_y 1回目	277	274	1.01	42.8	4.0	3.1
	負	1 δ_y 1回目	245		0.89	55.8	6.0	4.0
JD25A	正	2 δ_y 1回目	267	279	0.96	57.0	6.0	4.1
	負	1 δ_y 1回目	240		0.86	59.5	7.0	4.3
ND25B	正	2 δ_y 1回目	327	328	1.00	24.3	3.0	2.0
	負	3 δ_y 2回目	319		0.97	21.0	3.0	1.8

※1) P_{max} : 実測値 P_{maxcal} : 計算値

※2) δ_{max} : 最大変位 a : せん断スパン

(1) D13 シリーズ

最大荷重を計算値と比較すると、正側と負側において ND13A がいずれも 0.89, JD13A が 0.98 と 0.83, ND13B が 0.91 と 0.93, JD13B が 1.13 と 0.85 であり、JD13A と JD13B の正荷重以外は計算値よりやや低く、負側の最大荷重が低めの傾向であった。また、同じ荷重サイクルの ND13A と JD13A を比較すると、正側と負側において最大荷重は同等であった。

最大変位量をせん断スパンで除した部材角をみると、正側と負側において ND13A が 2.7 と 4.4, JD13A が 4.1 と 4.2, ND13B が 4.2 と 4.2, JD13B が 3.1 と 3.1 であった。また、変形性能として最大荷重時の変位量を表-6.7 に示した降伏荷重時の変位量で除したじん性率 (δ_{max}/δ_y) で比較すると、正側と負側において ND13A が 11.0 と 15.0, JD13A が 12.0 と 16.0, ND13B が 16.0 と 16.0, JD13B が 12.0 と 12.0 であり、いずれも十分な変形性能を有

しているといえる。

履歴曲線を見ると、ND13A の正側は $1\delta_y$ の 1 回目最大荷重 89kN に達し、 $11\delta_y$ の 3 回目載荷で主鉄筋が 1 本破断するまで荷重を維持し、 $12\delta_y$ で荷重が降下した。負側は $9\delta_y$ の 1 回目最大荷重 89kN に達し、 $15\delta_y$ まで荷重を維持した。JD13A の正側は $2\delta_y$ の 1 回目最大荷重 97kN に達し、 $12\delta_y$ の 2 回目載荷で主鉄筋が 1 本破断するまで荷重を維持し、 $13\delta_y$ で荷重が降下した。負側は $1\delta_y$ の 1 回目最大荷重 82kN に達し、 $17\delta_y$ まで大きく荷重が降下することはなかった。一方、5 サイクル以降の正負繰り返しを 1 回とした ND13B は、正側は $16\delta_y$ まで荷重を維持し、17 回目の載荷で加圧を継続し、最大荷重 91kN に達し主鉄筋が 1 本破断して荷重が降下した。負側は $15\delta_y$ で最大荷重 93kN に達し、 $16\delta_y$ まで荷重が降下することはなかった。JD13B は、正側は $12\delta_y$ まで荷重を維持し、13 回目の載荷で加圧を継続し、最大荷重 113kN に達し主鉄筋が 1 本破断して荷重が降下した。負側は $7\delta_y$ で最大荷重 85kN に達し、 $12\delta_y$ まで荷重が降下することはなかった。このように履歴曲線を見ると、いずれもエネルギー吸収性能が高い紡錘型の履歴曲線を示している。

最大荷重について繰り返し回数の違いで比較すると、終局まで 3 回の繰り返し載荷を行った ND13A は $11\delta_y$ 、JD13A は $12\delta_y$ で主鉄筋の破断により荷重が降下したが、ND13B は $16\delta_y$ でも荷重を維持し、17 回目の載荷では最大荷重と同等の 91kN まで上昇して破壊している。また JD13B は、13 回目の載荷で最大荷重の 113kN まで上昇し破壊に至っている。このように、繰り返し回数が異なるものの、同じ 17 回の載荷を行った ND13A と ND13B の比較、および載荷サイクル数が異なる ND13B と JD13B の比較からも、繰り返し載荷の回数が部材耐力に与える影響の大きいことが分かる。また ND13B と JD13B は、いずれも正側の載荷で破壊させたが、負側も荷重を維持した状態であることから、負側の載荷で同様に破壊させても、正側と同程度の荷重まで上昇することが考えられる。これらのことから、最大荷重の実測値と計算値の差、および負側がやや低めの傾向であったことは、繰り返し載荷による部材耐力の低下、および正側と負側における壁部付根付近のコンクリートの損傷程度の差による影響が考えられる。

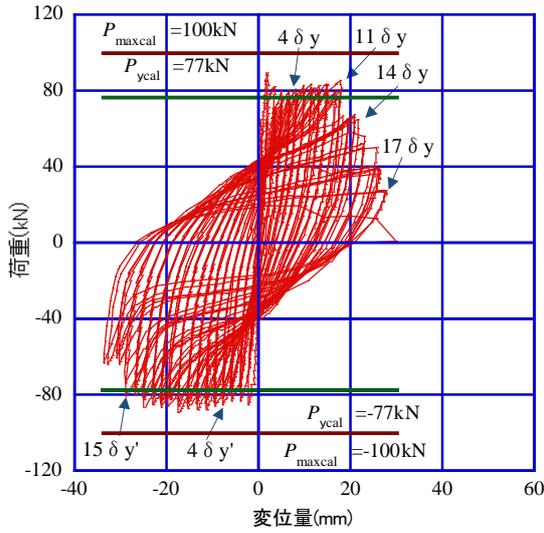


図-6.33 荷重と変位量の関係 (ND13A)

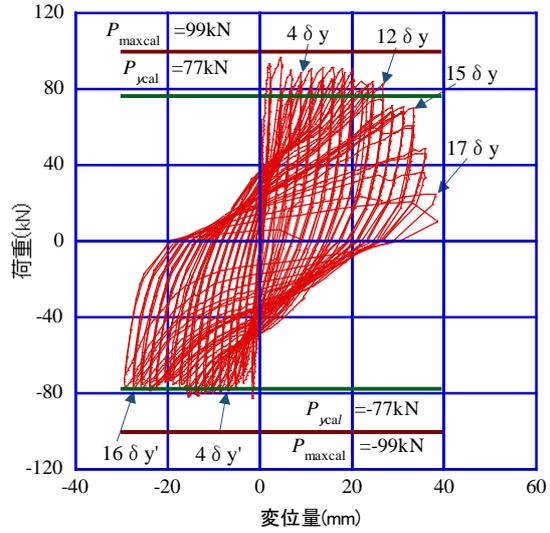


図-6.34 荷重と変位量の関係 (JD13A)

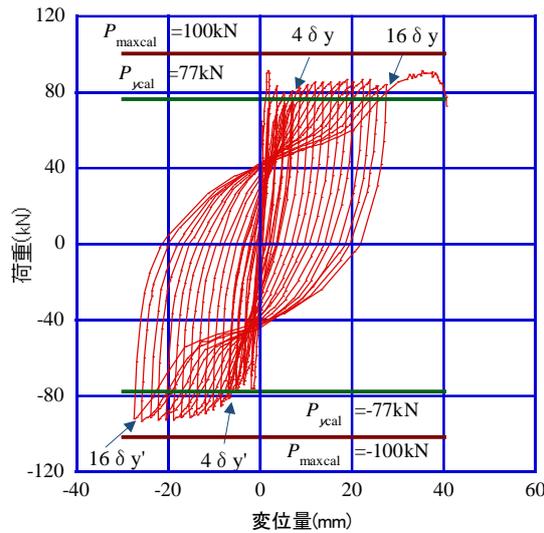


図-6.35 荷重と変位量の関係 (ND13B)

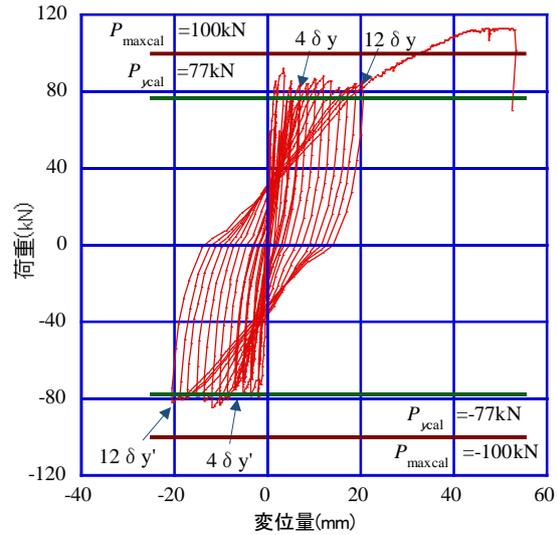


図-6.36 荷重と変位量の関係 (JD13B)

包絡線を見ると、ND13A と JD13A ではやや異なる傾向を示している。しかし、降伏荷重と最大変位時の荷重差を比較すると、ND13A が正側で 9kN (89kN→80kN)、負側で 4kN (84kN→80kN)、JD13A が正側で 11kN (93kN→82kN)、負側で 4kN (82kN→78kN) であり、剛性低下量は同等である。また ND13A と ND13B では、正側・負側とも $11\delta_y$ まで、JD13A と JD13B では、正側・負側とも $12\delta_y$ まで同様の傾向を示している。

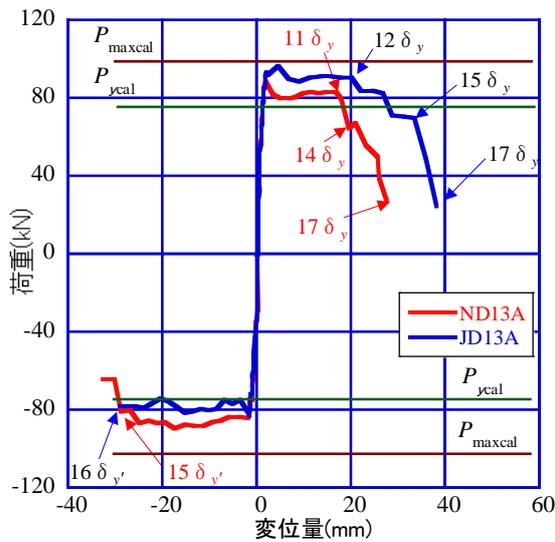


図-6.37 包絡線 (ND13, JD13A)

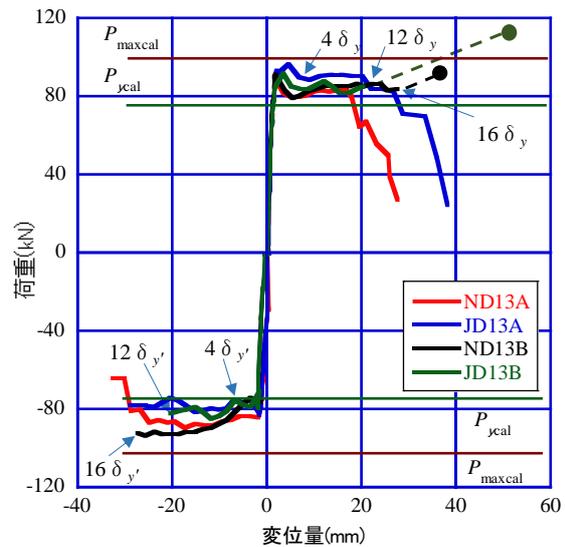


図-6.38 包絡線 (D13 シリーズ)

(2) D25 シリーズ

最大荷重を計算値と比較すると、正側と負側において ND25A が 1.01 と 0.89, JD25A が 0.96 と 0.86 であり、正側はいずれも計算値と同程度であったが、負側でやや低めであった。また、ND25A と JD25A を比較すると、正側と負側において最大荷重は同等であった。

最大荷重時の変位量をせん断スパンで除した部材角をみると、正側と負側において ND25A が 3.1 と 4.0, JD25A が 4.1 と 4.3 であった。また、じん性率 (δ_{max}/δ_y) を比較すると、正側と負側において ND25A が 4.0 と 6.0, JD25A が 6.0 と 7.0 であり、いずれも JD25A の方が大きい値を示しており、十分な変形性能を有しているといえる。

履歴曲線をみると、ND25A の正側は $2\delta_y$ の 1 回目最大荷重 277kN に達し、 $4\delta_y$ の 2 回目載荷で主鉄筋が 1 本破断するまで荷重を維持し、 $5\delta_y$ で荷重が降下した。負側は $1\delta_y'$ の 1 回目最大荷重 245kN に達し、 $6\delta_y'$ まで荷重を維持した。JD25A の正側は $2\delta_y$ の 1 回目最大荷重 267kN に達し、 $7\delta_y$ の 2 回目載荷で主鉄筋が 1 本破断するまで荷重を維持し、 $8\delta_y$ で荷重が降下した。負側は $1\delta_y'$ の 1 回目最大荷重 240kN に達し、 $7\delta_y'$ まで荷重を維持した。このように履歴曲線をみると、いずれもエネルギー吸収性能が高い紡錘型の履歴曲線を示している。

包絡線をみると、ND25A が $4\delta_y$ で主鉄筋が破断したことでその違いがみられるが、全般に同じ傾向を示している。

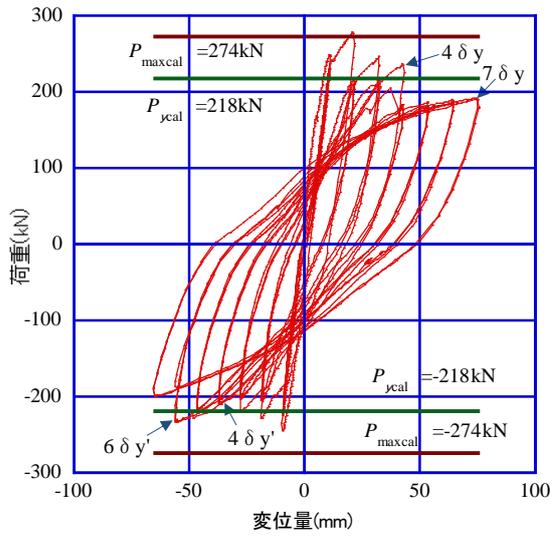


図-6.39 荷重と変位量の関係 (ND25A)

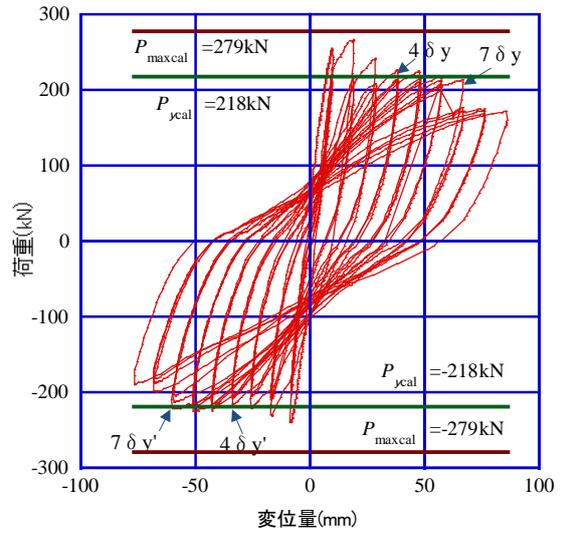


図-6.40 荷重と変位量の関係 (JD25A)

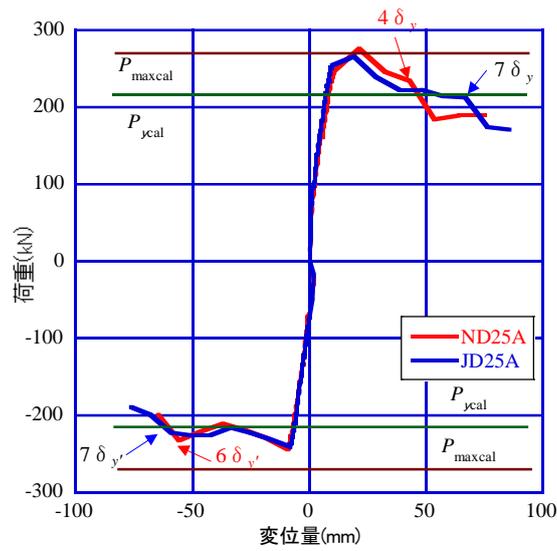
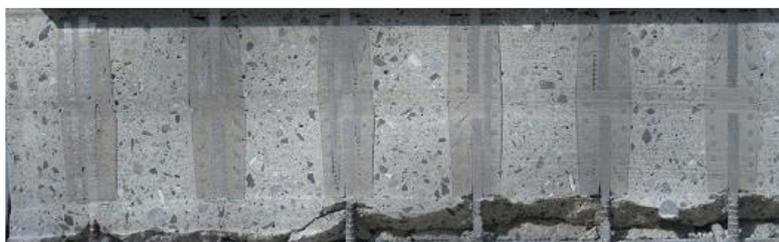


図-6.41 包絡線 (D25 シリーズ)

6.3.6 モルタルの充填性状と継手の損傷状況

継手の性能は、モルタルの充填性状に大きく影響を受ける。そのため、載荷実験を行った後に試験体の接合部をスライスし、継手開口部のモルタル充填状況と損傷状況を目視確認した。JD13A を写真-6.17 に、JD25A を写真-6.18 に示す。モルタルの充填状況を見ると、開口の上端部に多少の気泡はみられるが、いずれの試験体とも鉄筋の周辺やスパイラル鉄筋の周辺にも空隙はなく、継手が上下接合の場合でも、ポンプで注入することにより、十分な充填性状を得られることが確認できた。

継手の損傷状況として、載荷実験後に継手下端部の損傷が最も大きかった、JD25A の負側左端部の状況も写真-6.18 に示した。継手開口部の内面が滑面のため、モルタルとコンクリートの界面剥離が懸念されたが、モルタルの内部で剥落している。しかし、同じ箇所の継手の内部状況を見ると、主鉄筋の節とモルタル間の付着切れはみられるが、モルタルの損傷は確認できない。このように、継手の損傷は、主鉄筋の抜け出しによる主鉄筋とモルタルの付着切れや、モルタルに微細なひび割れが発生している箇所はあったが、じん性実験後の継手は、ほぼ健全な状態であることが確認できた。



左側端部



右側端部

写真-6.17 破壊時の継手部の状況 (JD13A)



左側端部 継手の損傷 左側端部 右側端部

写真-6.18 破壊時の継手部の状況 (JD25A)

6.4 第6章のまとめ

拘束型重ね継手を用いて接合した部材に正負繰り返し荷重が作用したときのじん性を評価するため、主鉄筋を D13 および D25 とした 2 タイプの部材を作製し、壁試験体の正負繰り返し載荷実験を実施した。今回の実験の範囲において、以下の結論を得た。

- (1) 継手を用いて接合した部材の降伏荷重，最大荷重，およびじん性率は，いずれのタイプとも一体成形の部材と同等である。
- (2) 降伏荷重と最大荷重の実測値の計算値との比較では，降伏荷重はやや高く，最大荷重は負側において全般にやや低い。
- (3) 正負の繰り返し載荷を 5 サイクル以降も 3 回で継続すると，1 回の繰り返し載荷より早いサイクルで荷重が降下する。
- (4) 繰り返し載荷により，一体成形の部材は継手を用いて接合した部材より早いステップで最初の荷重降下がみられ，荷重降下は主鉄筋の破断によるものである。
- (5) 接合部の曲げひび割れは，断面力が最も大きい継手下端部に最初に発生し，繰り返し荷重により継手下端部のひび割れは卓越するが，接合面と継手上端部のひび割れは，破壊時までほとんど進展しない。
- (6) 継手を断面力が最も大きい箇所から $0.5D$ (D =側壁厚) 以上離れた位置に設けることにより，継手の損傷は継手下端部の限定的な剥落程度に抑えることが可能である。
- (7) 継手開口部のモルタル充填は，継手が上下接合の場合でも，ポンプで注入することにより，十分な充填性状を得られる。

第6章の参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編 [2017 年制定]，2017.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編 [2017 年制定]，2017.
- 3) 町田篤彦，関博，丸山武彦，檜貝勇，斉藤成彦：鉄筋コンクリート工学 改訂 3 版，オーム社，2018.7

第7章 拘束型重ね継手を用いたプレキャスト部材の設計法と施工法および継手施工の合理化

7.1 序節

本章では、第3章から第6章の構造性能の評価をもとに継手の構造詳細を決定し、拘束型重ね継手を用いたPCa部材の設計法と施工法を提案する。そして、本継手と従来のカップラー式継手を用いたボックスカルバートの材料費と施工費、および施工日数を試算して比較し、継手施工の合理化について評価する。

7.2 継手の構造細目

7.2.1 継手の適用範囲

継手を用いたPCa部材の適用例を図-7.1に、接合位置を図-7.2に示す。継手の適用範囲は、ボックスカルバートの頂底版と側版の接合、擁壁等の底版と側版の接合、あるいは底版同士の接合等とする。接合位置は、第6章で述べた実験で検証した位置であり、継手端部を部材厚の0.5倍以上離れた箇所とし、耐震設計を行うPCa部材では、塑性ヒンジ区間には継手を設けない。

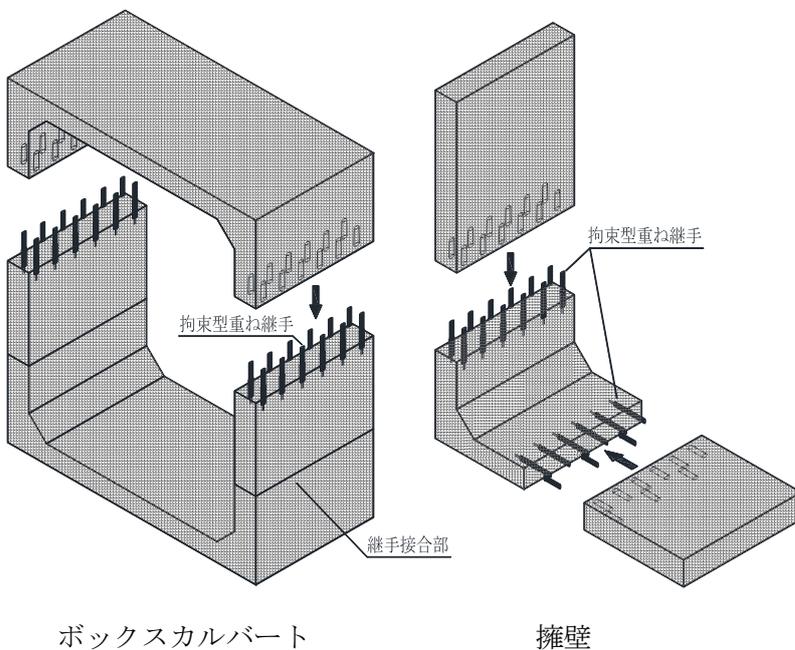


図-7.1 PCa部材への適用例

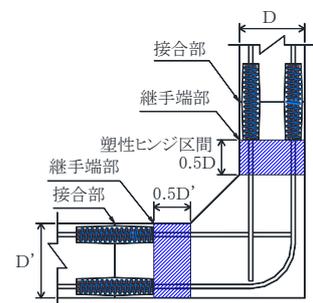


図-7.2 継手の接合位置

7.2.2 継手の強度規格

継手に用いる鉄筋の材質規格を表-7.1 に示す。本研究では、継手に用いる主鉄筋の材質をSD345に限定して構造性能を評価している。そのため、継手の強度は主鉄筋の材料規格値(490N/mm²)と比較する必要がある。第3章で述べた継手単体の引張試験の結果をもとに、継手の引張強さと材料規格値の関係について、D13~D22タイプを図-7.3に、D25タイプを図-7.4に示す。補強筋比が最も小さい6.2%の場合でも、D13タイプでは重ね長さが8φ以上、D25タイプでは9φ以上、D16、D19、およびD22タイプでは9φで材料規格値を上回っている。したがって、この重ね長さを確保することで、SD345の鉄筋継手として十分に性能を発揮できるといえる。

また、主鉄筋と添筋の規格降伏荷重を表-7.2に示す。規格降伏荷重をみると、添筋4本の最小値は、主鉄筋の最大値を上回っている。このように、添筋に対し主鉄筋が先行して降伏する設定であるため、PCa部材の断面照査は、主鉄筋に対して安全性を照査すればよい。

表-7.1 継手の材質規格

継手タイプ	主鉄筋		添筋			スパイラル鉄筋	
	呼び名	材質	呼び名	本数	材質	呼び名	材質
D13	D13	SD345	D10	4	SD295	D6	SD295
D16	D16		D13		SD345		
D19	D19		D13				
D22	D22		D13				
D25	D25		D16			D10	

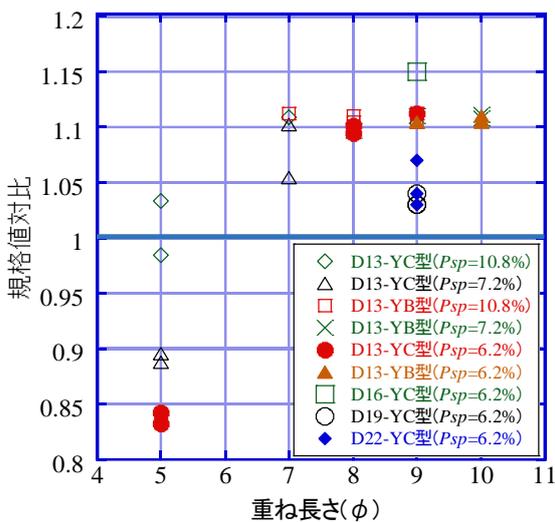


図-7.3 引張強さと材料規格値
(D13,D16,D19,D22タイプ)

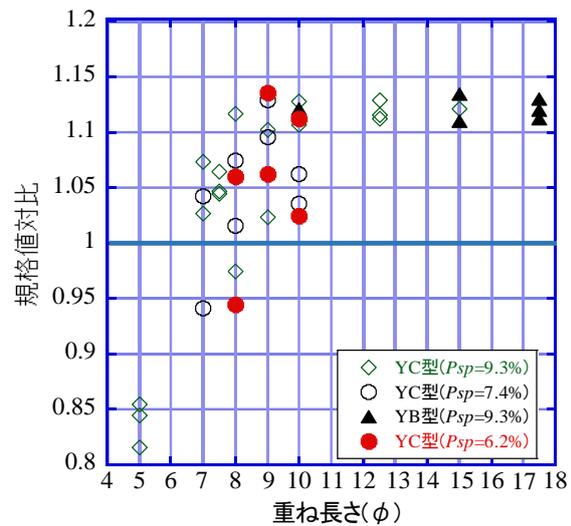


図-7.4 引張強さと材料規格値
(D25タイプ)

表-7.2 主鉄筋と添筋の規格降伏荷重

継手 タイプ	主鉄筋		添筋			規格降伏荷重	
	呼び名	公称 断面積 (mm ²)	呼び名	本数	合計 公称断面積 (mm ²)	主鉄筋	添筋
						(kN)	(kN)
D13	D13	126.7	D10	4	285.32	56	84
D16	D16	198.6	D13	4	506.8	87	175
D19	D19	286.5	D13	4	506.8	126	175
D22	D22	387.1	D13	4	506.8	170	175
D25	D25	506.7	D16	4	794.4	223	274

※1) 降伏点の規格値：SD295 = 295N/mm²以上，SD345 = 345～440N/mm²

7.2.3 継手の形状規格

実験結果を実際の PCa 部材の設計へ反映させるためには、安全率を定める必要がある。本研究では、第6章で述べた実物大壁試験体の作製時の実測値をもとに、PCa 部材の製造・施工の過程において生じる誤差として考慮し、安全率を定め継手の構造細目へ反映させた。

実物の PCa 部材では、継手と重ね合わせる主鉄筋は、大きなメッシュ状の金網の端部となる。そのため、金網の製作誤差や型枠へのセット時の誤差により、PCa 部材の開口内に突出する主鉄筋が、設計値に対しマイナスされる可能性が高い。すなわち、継手の性能を発揮できる重ね長さが確保できないことになる。実物大壁試験体を作製した際の主鉄筋の突出長さは、設計値に対し D13 タイプは -7～-13mm，D25 タイプでは -8～-14mm であった（写真-7.1）。したがって、規格する継手の重ね長さは、実験で採用した重ね長さに対し、安全率を D13 タイプは 2φ (26mm)，D25 タイプは 1φ (25mm) 考慮した長さとする。また D16，D19，および D22 タイプは、最大誤差が D25 タイプの -14mm であることから、D25 タイプと同様に 1φ とした。このように、D13 から D25 のいずれのタイプも、重ね長さの規格値は 10φ とする。

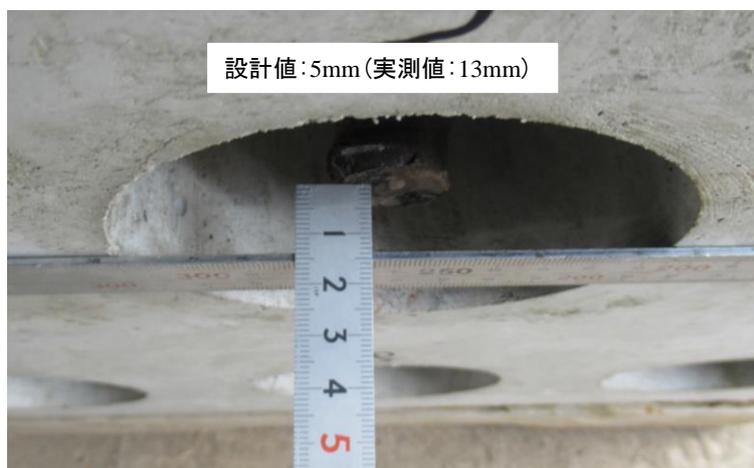


写真-7.1 継手開口内の主鉄筋 (JD25A)

継手の形状寸法規格と許容誤差を表-7.3 に、接合部の寸法規格と許容誤差を表-7.4 に、製造および施工時の誤差が最大のときの最小重ね長さを表-7.5 に示す。PCa 部材の製造時と施工時において、継手と接合部の寸法を表-7.3～7.4 に示した許容範囲内に管理すること

表-7.3 継手の形状寸法規格と許容誤差

継手タイプ	重ね長さ(φ)	継手(添筋)の長さ		スパイラル鉄筋				すき間 c (mm)
		規格値 (mm)	許容差 (mm)	ピッチ (mm)	巻き数	中心直径(mm)		
						規格値	許容差	
D13	10	270	+5,-0	21	12~13	49	±3	5
D16		330		16	20~21			64
D19		390		16	23~24	6.5		
D22		450		16	27~28	5		
D25		510		30	16~17	77		5

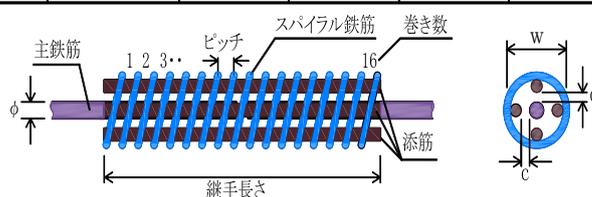
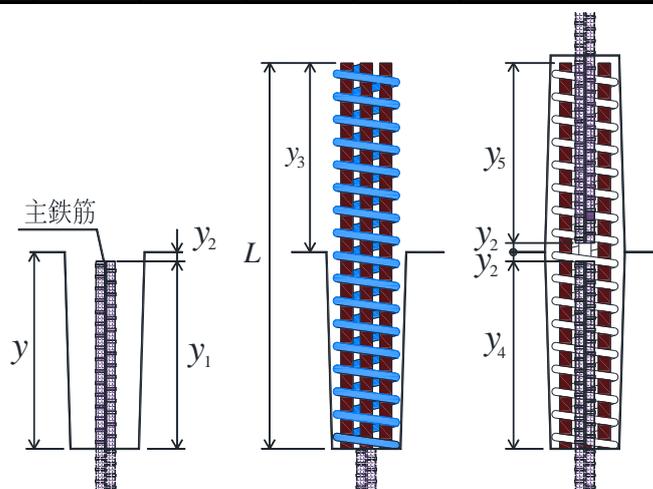


表-7.4 接合部の規格寸法と許容誤差

継手タイプ	開口部の深さ y (mm)	継手長さ		主鉄筋の突出長さ		主鉄筋先端までの寸法		接合面からの継手長さ	
		L 規格値 (mm)	許容誤差 (mm)	y ₁ 規格値 (mm)	許容誤差 (mm)	y ₂ 規格値 (mm)	許容誤差 (mm)	y ₃ 規格値 (mm)	許容誤差 (mm)
D13	140	270	+5,-0	135	+0,-21	5	+21,-0	130	+5,-0
D16	170	330		165	+0,-11		+11,-0	160	
D19	200	390		195	+0,-14		+14,-0	190	
D22	230	450		225	+0,-17		+17,-0	220	
D25	260	510		255	+0,-20		+20,-0	250	



で、主鉄筋と継手の重ね長さが最も短い場合であっても、D13 タイプでは8φ、D16、D19、D22、およびD25 タイプでは9φの重ね長さとなり、実験で確認した継手の重ね長さを担保できることになる。

表-7.5 最小重ね長さ

継手 タイプ	継手下側		継手上側			
	$y_{4=}$ y_{1min} (mm)	y_4 /直径	y_{2max} (mm)	y_{3min} (mm)	$y_5=y_{3min}$ - y_{2max} (mm)	y_5 /直径
D13	114	8.7φ	26	130	104	8.0φ
D16	154	9.6φ	16	160	144	9.0φ
D19	181	9.5φ	19	190	171	9.0φ
D22	208	9.5φ	22	220	198	9.0φ
D25	235	9.4φ	25	250	225	9.0φ

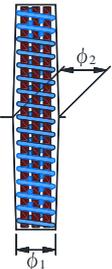
7.2.4 継手の配筋基準

(1) 継手のかぶり

鉄筋カゴと開口部の寸法を表-7.6に、継手の最小かぶりの例を図-7.5に示す。図のように、継手の最小かぶりは開口部の寸法を考慮した上で、スパイラル鉄筋とせん断補強鉄筋に対し満足するように配筋する。設計するPCa部材に対し、準拠すべき示方書または設計指針が定められている場合は、それらに規定されている最小かぶりを継手においても確保する。なお図-7.5の例は、最小かぶりを25mm以上とした場合の主鉄筋のかぶりを示している。

表-7.6 鉄筋カゴと開口部の寸法

継手 タイプ	スパイラル鉄筋		開口部の径	
	外径 (mm)	許容誤差 (mm)	ϕ_1 (mm)	ϕ_2 (mm)
D13	55	±3	60	70
D16	70		75	90
D19	70		75	90
D22	70		75	90
D25	87		90	105



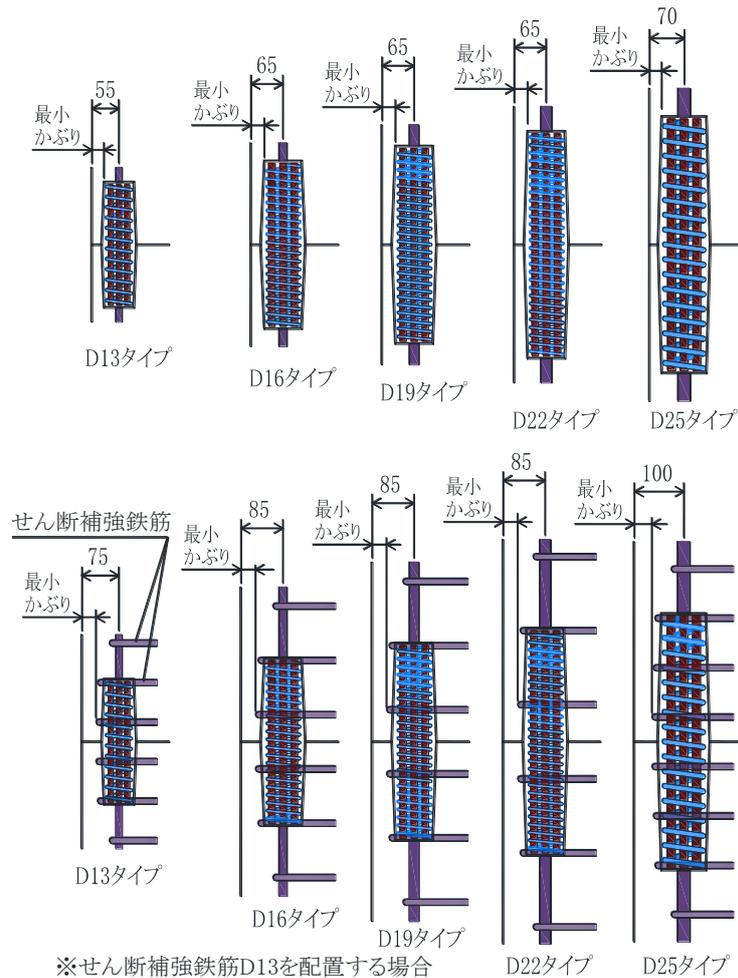


図-7.5 かぶりの例

(2) せん断補強鉄筋

擁壁やボックスカルバート等の面部材では、せん断補強鉄筋を用いない設計が多く、設計上でせん断補強鉄筋を考慮しない場合は不要である。しかし、本継手を用いて接合したPCa部材において、耐震設計を行う場合は継手周囲にせん断補強鉄筋を配置することを標準とする。継手周囲のせん断補強鉄筋の配置例を図-7.6に示す。ただし、D13タイプについては、第6章で述べた実物大壁試験体の曲げじん性評価において、せん断補強鉄筋を配置しないで性能評価しているため、せん断補強鉄筋の配置は不要である。なお、せん断補強鉄筋を配置する場合の配置間隔は、部材有効高さ (d) の1/2以下とする。

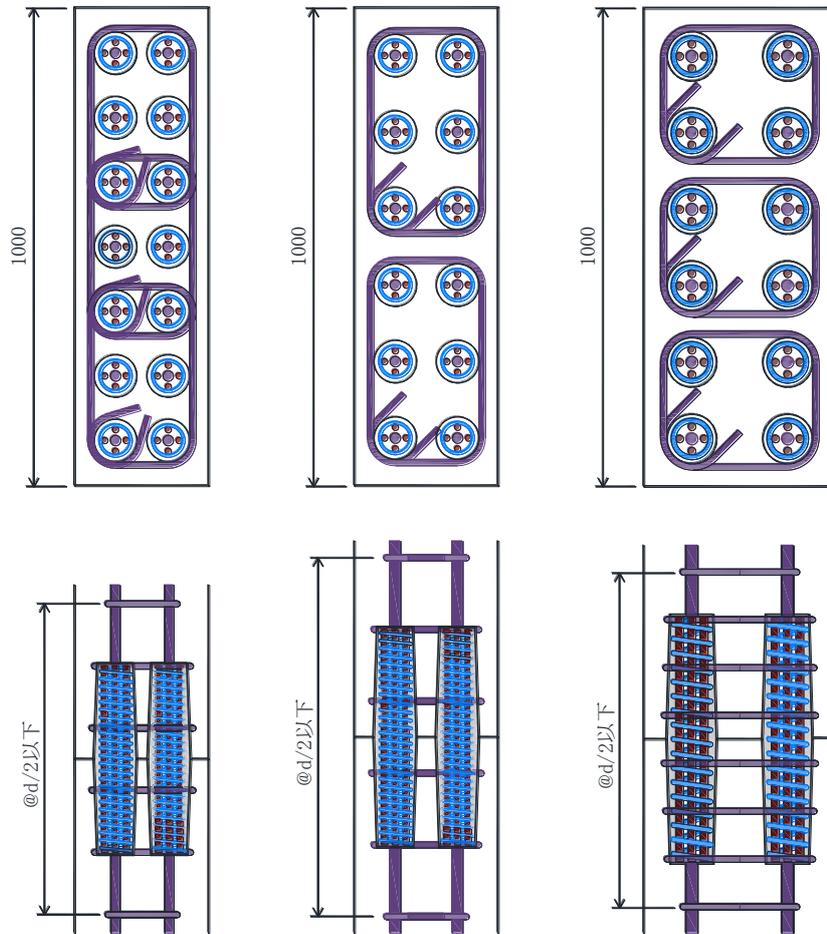


図-7.6 せん断補強鉄筋の配置例

(3) 継手のあき

継手のあきの例を図-7.7 に示す。継手間のあきは、鉄筋カゴを挿入する開口部同士の間隔をあきとする。あきの規格値は、継手を用いる PCa 部材と同一とする。

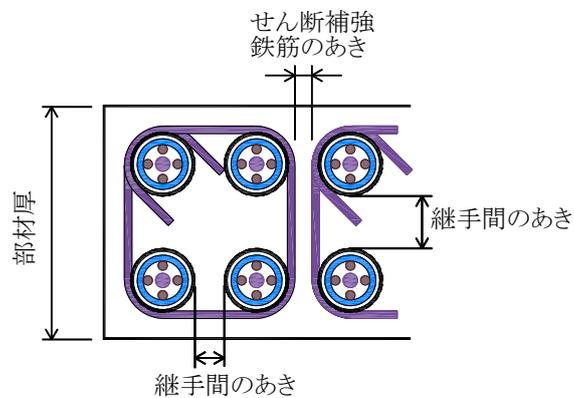


図-7.7 継手部のあきの例

7.3 プレキャスト部材の設計法

本研究における構造実験では、継手を用いて接合した部材について、接合部がない一体成形の部材と同等の構造性能(曲げ,せん断およびじん性)を有していることを確認している。したがって,本継手を用いた PCa 部材の設計法は,前述の継手配筋基準にもとづいたうえで,従来の設計法により設計することができる。

本継手を用いる PCa 部材は,ボックスカルバートや擁壁等を対象としており,これらの構造物で一般に採用されている設計法¹⁾²⁾を表-7.7に示す。このように,常時での設計法は許容応力度設計法であり,擁壁では,レベル1地震動およびレベル2地震動においても許容応力度設計法が採用されている。一方ボックスカルバートでは,耐震設計におけるレベル1地震動に対して許容応力度設計法,レベル2地震動に対して終局限界状態設計法が採用されている。したがって,本章では許容応力度設計法と終局限界状態設計法について述べる。

表-7.7 設計法

構造物	擁 壁		ボックスカルバート			
	常 時	地震時		常 時	地震時	
設計状態	—	レベル1	レベル2	—	レベル1	レベル2
設計方法	許容応力度設計法			許容応力度設計法	限界状態設計法	

7.3.1 許容応力度設計法

許容応力度設計法による設計フローを図-7.8に示す。本継手を用いて接合された PCa 部材を許容応力度設計法により設計する場合は,土木学会コンクリート標準示方書 構造的照査編³⁾を参考に設計するものとする。なお照査する設計断面力は,曲げモーメントおよびせん断力とする。

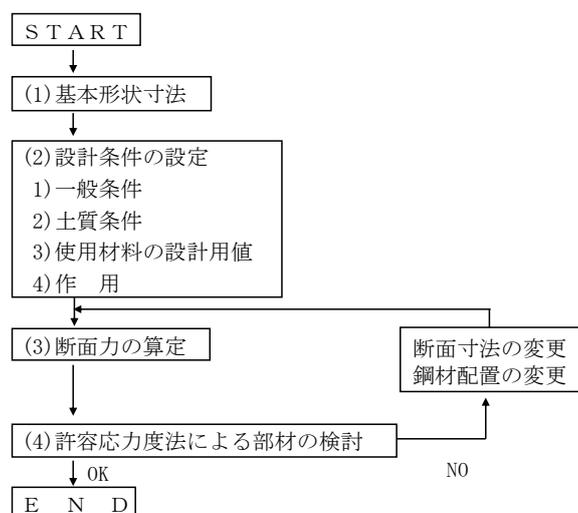


図-7.8 許容応力度設計法による設計フロー

7.3.2 限界状態設計法

ボックスカルバートのレベル 2 地震動に対して検討する場合は、限界状態設計法により照査することを基本とする。限界状態設計法による設計フローを図-7.9 に示す。ボックスカルバートについて限界状態設計法により設計する場合は、土木学会コンクリート標準示方書 設計編⁴⁾、日本下水道協会下水道施設の耐震対策指針と解説⁵⁾および下水道施設耐震計算例 管路施設編⁶⁾を参考に設計するものとする。なお照査は終局限界状態とし、曲げ耐力とせん断耐力を照査する。

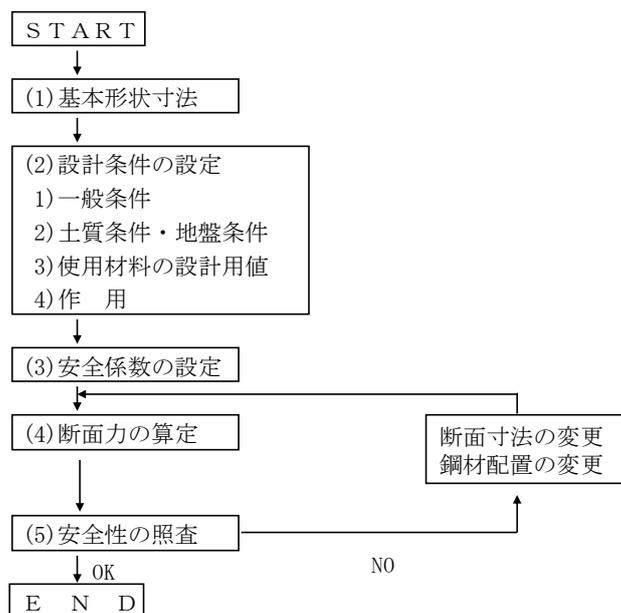


図-7.9 限界状態設計法による設計フロー

7.4 プレキャスト部材の施工法

7.4.1 使用材料の諸元

(1) 接着剤

接合面は粗面仕上げ等の処理は不要であるが、継手開口部以外の接合面には、接合面を密着させ水密性を保持するためにエポキシ樹脂接着剤^{7,8)}を塗布する。接着剤は、1液性あるいは2液性とし、品質は表-7.8に示す性能を標準とする。なお、PCa部材の要求性能として防水性能を重要視する場合は、接合部の止水方法について別途検討する必要がある。

表-7.8 接着剤の品質と塗布厚

品質項目	品質規格
比重	1.1～1.7
引張強さ (N/mm ²)	12.5以上
圧縮強さ (N/mm ²)	60.0以上
引張せん断接着強さ (N/mm ²)	12.5以上
接着強さ (N/mm ²)	6.0以上
標準塗布厚 (mm)	1以上

(2) 無収縮モルタル

継手開口部に使用する無収縮モルタルは、プレミックスタイプのセメント系無収縮モルタル^{9),10)}を使用する。無収縮モルタルの仕様の一例を表-7.9に示す。

表-7.9 無収縮モルタルの仕様

標準配合(袋配合)			圧縮強度 (N/mm ²)	J14漏斗 流下時間 (秒)
モルタル材 (kg)	水 (kg)	練上がり量 (ℓ)		
25	4.2	13	45以上	8±2

7.4.2 継手の施工手順

本継手の標準的な施工手順を図-7.10に示す。まず下側部材の接合面に対し、約1mm厚にエポキシ樹脂接着剤を均一に塗布する。次に、下側部材の開口部に鉄筋カゴを挿入し、上側部材の主鉄筋が鉄筋カゴに挿入されるように密着させ、すき間のないことを確認する。PCa部材の部材寸法が許容範囲内であることを確認し、補助プレートを用いてPCa部材同士を固定する。そして、下側開口部の注入孔からポンプを用いて無収縮モルタルを注入し、上側開口部の排出孔からモルタルが吐出されるのを確認した後に注入孔を止栓する。補助プレートは、モルタルが設計強度に達したことを確認し取り外す。

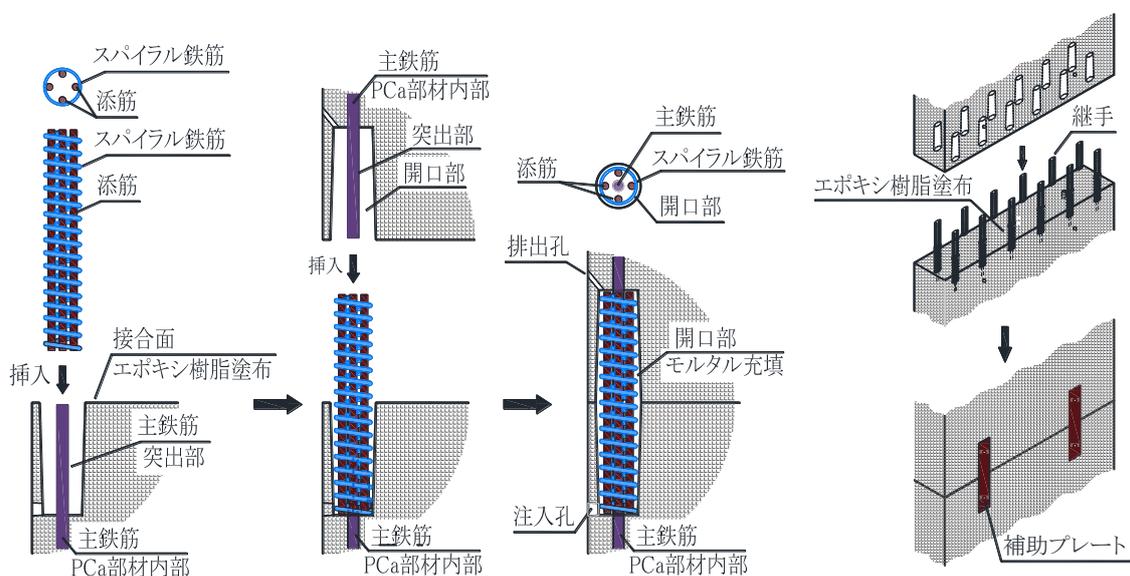


図-7.10 継手の標準的な施工手順

7.4.3 継手の接合作業における管理事項

継手の接合作業における管理事項を表-7.10に示す。接合作業時における継手の管理項目は、接合面から継手先端までの継手長を計測し、表-7.4に示した寸法値 (y_3) に管理すればよい。

表-7.10 接合作業における管理事項

作業内容	管理項目	管理方法	管理頻度
継手の取付け	継手長の確認	接合面から継手(添筋)先端までの寸法をスケールにより計測する。	全数
接着剤の塗布	均一な塗布状態の確認	目視により確認する。	全数
部材接合	接合面のすき間	目視により確認する。	全数
接合後の部材寸法計測	PCa部材の寸法計測	接合後のPCa部材について、幅・高さなど管理に必要な箇所をスケールにより計測する。	全数
充填モルタルの練り混ぜ	モルタルの配合 モルタルの圧縮強度	J14漏斗により流下時間を計測する。 テストピース(φ5×10)により圧縮強度を測定する。	施工日ごとに最初の1バッチ
充填モルタルの注入	開口部のモルタル充填状況の確認	モルタル注入孔から注入し、排出孔から吐出されたことを確認する。	全数

7.5 継手施工の合理化

PCa 部材の材料費と施工費および施工日数について、従来のKTジョイント¹¹⁾と拘束型重ね継手を用いたボックスカルバートを例として比較を行い、継手施工の合理化を評価する。

7.5.1 継手材料の価格推移

KTジョイントについて、継手開発時からの材料単価の推移を図-7.11に示す。継手のタイプは、アンカー鉄筋の径を呼び名として、D19、D25、D32、およびD38の4種類である。開発時に対し現状でのアップ率は、D19が2.6倍、D25が2.7倍、D32が4.4倍、D38が3.9倍であり、太径(D32、D38)のアップ率が高い。部材ごとのアップ率は、オリジナルのカプラーがいずれのタイプも4倍以上であり、端部にねじ加工を行うアンカー鉄筋は、細径(D19、D25)が約2倍、太径は4.5倍以上となっている。このように、大型構造物に使用する太径の材料費の高騰が著しい。これは、カプラーやアンカー鉄筋などオリジナルの部材を製作し、さらにねじ加工などの二次加工が必要であることが影響しているといえる。

また、本継手を構成する異形棒鋼について、設計単価¹²⁾の推移を図-7.12に示す。異形棒鋼の価格は、社会情勢等の変化による鉄スクラップの価格変動に影響されるが、市場の動向を見据えて材料調達を行うことで、継手材料費の変動を抑えていくことは可能といえる。

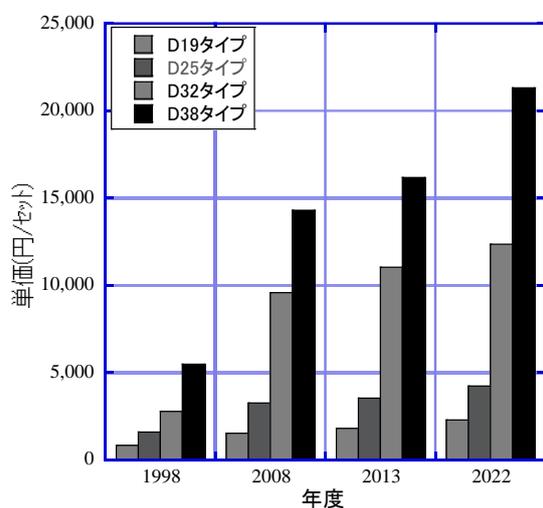


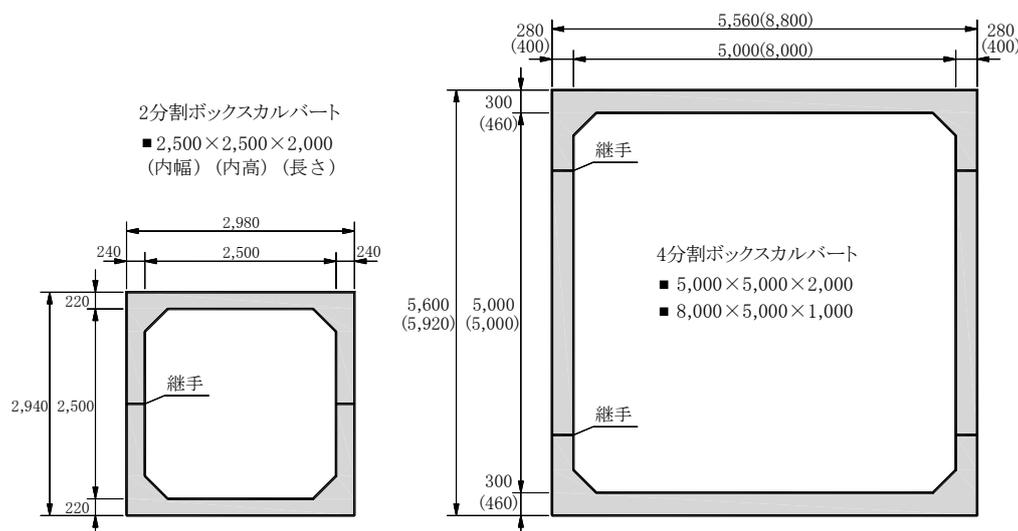
図-7.11 KTジョイントの材料費の推移



図-7.12 異形棒鋼の単価推移

7.5.2 材料費の比較

本継手を用いた場合のコスト改善効果として、**図-7.13**に示す3断面の分割型ボックスカルバートについて比較した。ボックスカルバート1組当りの材料費を**表-7.11**に示す。材料費の試算は、コンクリートと鉄筋は公共工事の積算で使用される設計単価^{12),13)}を用いた。継手の材料費は、本継手はスパイラル鉄筋と添筋、KTジョイントはカップラーとロックナット、およびアンカー鉄筋について、それぞれの継手を構成する鋼材の総質量を算出した。そして、一般的な材料を用いる本継手の現状における加工費を含む鋼材単価の実績をもとに、それぞれの継手材料費として試算した。断面-1の2分割ボックスカルバートでは、継手箇所数が少ないため低減効果はやや小さいが、平均では約20%の低減効果がある。また、すべての材料費に占める継手材料費の割合を比較すると、断面-1では23%から10%、断面-2では26%から17%、断面-3では27%から11%まで低減され、平均では25%から13%までに約半減される。



継手タイプ	項目	継手および躯体使用鉄筋		
		断面-1 2,500×2,500×2,000	断面-2 5,000×5,000×2,000	断面-3 8,000×5,000×1,000
KT ジョイント	継手×本数(外側)	D25×6本	D32×6本	D38×3本
	継手鋼材質量(kg)	128	532	467
	使用鉄筋 鉄筋総質量(kg)	D10~D19 592	D10~D25 2,675	D10~D29 2,081
拘束型 重ね継手	継手×本数(外側)	D13×12本	D22×12本	D25×6本
	継手×本数(内側)	D13×12本	D13×12本	D13×6本
	継手鋼材質量(kg)	49	274	149
	使用鉄筋 鉄筋総質量(kg)	D10~D19 552	D10~D25 2,324	D10~D32 1,963
躯体容積(m ³ /組)		5.382	12.632	12.276
躯体質量(kg/組)		13,456	31,580	30,690

※1) 継手本数は、1接合部当りの本数

※2) 継手鋼材質量と鉄筋総質量は、躯体1組当りの質量

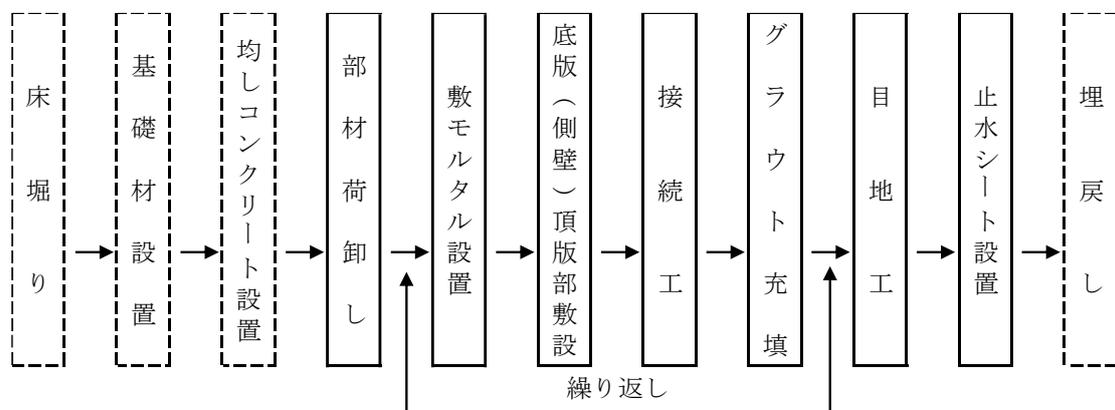
図-7.13 ボックスカルバートの断面形状および諸元

表-7.11 材料費の比較

材 料	積算単価	継手タイプ	断面-1 内幅2,500 (円)	断面-2 内幅5,000 (円)	断面-3 内幅8,000 (円)
コンクリート	18,000円/m ³	K Tジョイント	100,100	235,000	228,300
		拘束型重ね継手			
鉄 筋	156円/kg	K Tジョイント	92,400	417,300	324,600
		拘束型重ね継手	86,100	362,500	306,200
継 手	440円/kg	K Tジョイント	56,300	234,100	205,500
		拘束型重ね継手	21,600	120,600	65,600
合 計		K Tジョイント	248,800	886,400	758,400
		拘束型重ね継手	207,800	718,100	600,100
差 額(円/組)			-41,000	-168,300	-158,300
低減効果			0.84	0.81	0.79

7.5.3 標準的な施工費

分割型プレキャストボックスカルバートの直接工事費の算出において、これまで標準化された施工歩掛がなく、各 PCa 部材メーカーによる自社歩掛を採用していた。しかし、現場打ち構造物の PCa 化を推進する中で、国土交通省土木工事積算基準¹⁴⁾（以下積算基準という）において、2019 年度版より標準的な歩掛が設定された。その歩掛で対応している範囲は図-7.14 に示す実線部分であり、内幅が 3,750~10,000mm、内高が 1,500~6,000mm の範囲において、2 分割もしくは 4 分割ボックスカルバートを対象として設定されている。歩掛には部材荷卸し、敷モルタル、底版部・側壁部・頂版部敷設、PC 鋼棒等接続・緊張・グラウト充填、切欠部充填および目地設置等を含んでいる。この歩掛を用いて、図-7.13 に示した 3 断面のボックスカルバートについて、施工延長 10m 当りの施工費を試算した結果を表-7.12 に示す。この歩掛は、接合方法を PC 鋼棒等として設定しており、接合工法が異なっても、施工費には直接反映されない。したがって、接合部材と充填材の材料費は、ボック



※国土交通省土木工事積算基準より引用

図-7.14 分割型プレキャストボックスカルバートの施工フロー

スカルバートの材料費に含まれるため、ボックスカルバートの材料費の差が直接工事費の差となり、表-7.12に示した施工費は接合法によらず共通となる。

表-7.12 施工費の試算結果

名 称	単 位	単価(円)	数 量			金 額(円)		
			断面-1	断面-2	断面-3	断面-1	断面-2	断面-3
土木一般世話役	人	23,200	1.7	2.4	5.7	39,440	55,680	132,240
とび工	人	23,100	1.6	2.3	5.4	36,960	53,130	124,740
特殊作業員	人	21,700	2.3	3.2	7.6	49,910	69,440	164,920
普通作業員	人	20,100	4.0	5.5	13.0	80,400	110,550	261,300
高所作業車	日	15,470	3.4	4.8	11.4	52,598	74,256	176,358
諸 雑 費	%		25	37	27	64,827	134,331	232,081
クレーン運転	日		1.69	2.38	5.56	152,100	535,500	1,723,600
計						477,000	1,033,000	2,816,000

※1) 断面-1の歩掛は、標準歩掛の設定外であるため、内空断面積から歩掛区分を選定した。

したがって、3.75m<内幅≤4.25m、1.5m<内高≤2.0mの歩掛である。

※2) クレーンの能力および単価：断面-1(ラフテレーンクレーン45t吊り、90,000円/日)

断面-2(トラッククレーン120t吊り、225,000円/日)

断面-3(トラッククレーン160t吊り、310,000円/日)

7.5.4 施工性の比較

前述のとおり、一般に採用される施工歩掛では、接合法の違いによる継手施工の合理化の評価ができない。そのため、本継手とKTジョイントについて、ボックスカルバートの実際の接合工程における相違点に対し評価した。両接合法の接合工程を図-7.15に、KTジョイントの部材構成を写真-7.2に示す。KTジョイントは、あらかじめ製造工場においてカプラーとロックナットを取付けて施工現場へ納入する必要がある。また、雌カプラー内の固定ナットについては、溶接により固定する必要がある。一方で本継手は、製造工場における継手部材の取付け作業はなく、継手を付属部品として管理し施工現場に納入するだけである。

本継手を用いることで、KTジョイントに対し最も合理化が図れるのは、施工現場における継手の接合作業である。KTジョイントは、写真-7.3に示すような専用工具を用いて、カプラーとロックナットにトルクを導入して接合する必要がある。締付工は、手動締めと動力締めが可能であるが、高トルク(550N・m～1100N・m)を導入する必要があるため、手動締めでは作業効率・作業労力に対して課題がある。その改善策として動力締め用の電動工具を開発したが、専用工具のため非常に高価でありながら汎用性がなく、作業の安全性を考慮して、取り扱う作業者は熟練技能者に限定している。

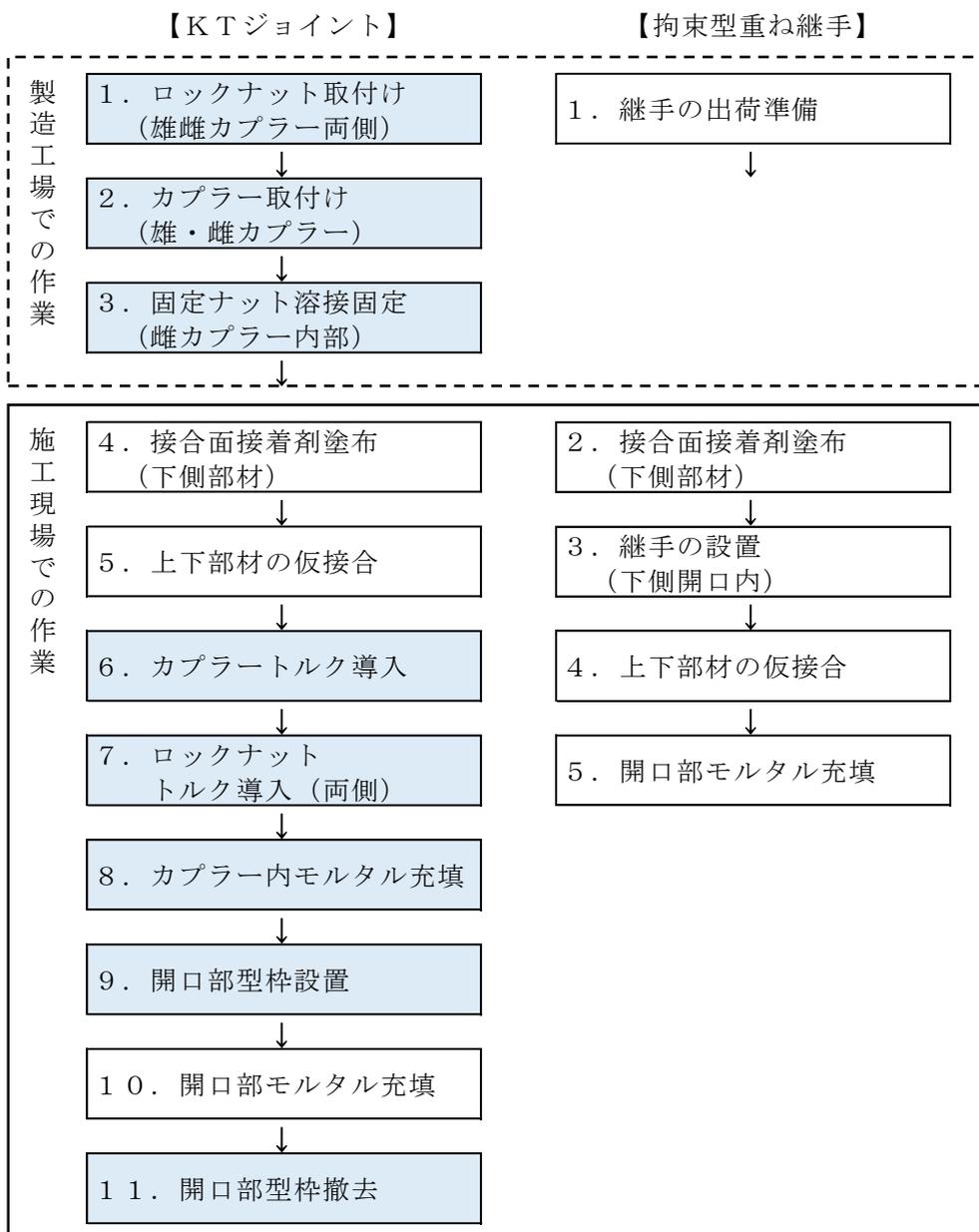


図-7.15 接合工程

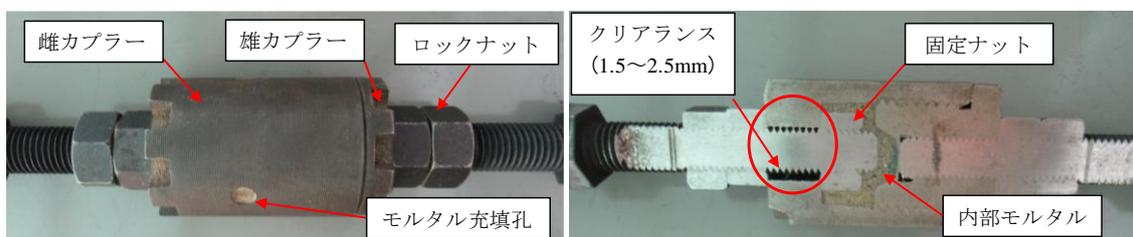


写真-7.2 KTジョイントの部材構成



専用電動工具による締付



トルクレンチによるトルク確認

写真-7.3 K Tジョイントの締付状況

次に、両接合工法の相違点として、継手開口部のモルタル充填工があげられる。モルタル充填工は、いずれの継手も同様の無収縮モルタルを開口部に充填する必要がある。しかし、本継手は開口部が PCa 部材の内部であるため、写真-7.4 に示すようにあらかじめ PCa 部材に設けられた注入孔からモルタルを充填すればよい。一方で K T ジョイントは、写真-7.2 に示したように、最初にカップラー内部にモルタルを注入する必要がある。そして、充填部が PCa 部材の表面まで開口しているため、写真-7.5 に示すような型枠を設置する必要がある。このように、モルタル充填工においても継手施工の合理化が図れる。

また、K T ジョイントは雄雌のねじ構造であるが、1.5~2.5mm の製造・施工誤差を吸収できるように、写真-7.2 に示したように雌カップラーと PCa 部材から突出するアンカーボルトにクリアランスを設けている。このクリアランスにより勘合を行うことは可能であるが、



写真-7.4 注入孔と排出孔



写真-7.5 開口部の型枠設置

PCa 部材の寸法精度と施工時の精度が非常に高く求められる。一方で本継手は、このクリアランスを5~8mmとしているため、接合時の作業効率を大きく改善することができる。(写真-7.6)



写真-7.6 部材の接合状況 (試験体 JD13B-第6章)

7.5.5 施工費と施工日数の比較

前述した施工性の相違点に対し、図-7.13に示した3断面のボックスカルバートについて経済比較を行った。製造工場における作業工程は含まず、施工現場における接合作業について比較した。カプラーとロックナットの締付時間は、実際の締付作業における実績値(7分/1箇所)を用いた。締付作業員は、積算基準のボックスカルバート据付工歩掛りに計上される、4名の普通作業員が同時に作業すると仮定した。またクレーン待機¹²⁾は、締付作業時間の5割を待機時間として計上した。モルタル充填工は、6章で述べた実物大壁試験体の作製時における実測値をもとに表-7.13のとおり算出した。モルタル充填工は、いずれの継手も

表-7.13 モルタル充填工の実測値

試験体 番号	試験体1体(開口12箇所当り)				練り混ぜ+充填時間		
	開口内 充填量 (l)	練り混ぜ量 (120/袋) 袋	練り混ぜ 時間 (分)	充填時間 (分)	12箇所当り (分)	10当り	
						(分)	平均(分)
JD13A	8	1	3	5	8	1.0	0.9
JD25A	33	3	9	18	27	0.8	

※1) 上表は、普通作業員2名による実測値

同様の作業手順となるため、共通単価として試算した。開口部の型枠工は、一般的な歩掛がないため積算基準における均しコンクリートの歩掛を用いて試算した。なお、材料費および労務費は設計単価¹²⁾を使用した。

施工延長 10m 当りの施工費の比較結果を表-7.14 に示す。本継手とKTジョイントについて、それぞれの接合作業における実際の施工費の差をみると、その差はボックスカルバートの施工費に対する割合として、断面-1 では8%、断面-2 では11%、断面-3 では10%程度の減となり、実際には施工費では10%程度の低減効果となる可能性がある。

表-7.14 施工費（接合作業）の比較

工種	項目	断面-1 内幅2,500		断面-2 内幅5,000		断面-3 内幅8,000	
		KTジョイント	拘束型重ね継手	KTジョイント	拘束型重ね継手	KTジョイント	拘束型重ね継手
継手 締付工	箇所数(個/10m)	60	240	120	480	120	480
	締付時間(分/箇所)	7	—	7	—	7	—
	締付工(時間/1人工)	7	—	14	—	14	—
	締付工(日/4人工)	0.22	—	0.44	—	0.44	—
	普通作業員(円/日)	20,200	—	20,200	—	20,200	—
	クレーン賃料(円/日)	90,000	—	225,000	—	310,000	—
	締付工(円/10m)	17,800	—	35,600	—	35,600	—
	クレーン待機(円/10m)	9,900	—	49,500	—	68,200	—
	小計(円/10m)	27,700	0	85,100	0	103,800	0
モルタル 充填工	充填量(l)	140	185	770	865	1,270	900
	充填時間(分/l)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	充填工(時間/2人工)	2.10	2.78	11.55	12.98	19.05	13.50
	充填工(日/2人工)	0.26	0.35	1.44	1.62	2.38	1.69
	モルタル材料費(円)	31,800	42,000	174,800	196,400	288,300	204,300
	開口部型枠面積(m ²)	5.4	—	14.4	—	16.2	—
	普通作業員(円/日)	20,200		20,200		20,200	
	型枠工単価(円/m ²)	4,175	—	4,175	—	4,175	—
	充填工(円/10m)	42,300	56,100	233,000	261,800	384,500	272,600
	型枠工(円/10m)	22,500	—	60,100	—	67,600	—
	小計(円/10m)	64,800	56,100	293,100	261,800	452,100	272,600
合計(円/10m)	92,500	56,100	378,200	261,800	555,900	272,600	
差額(円/10m)：*1	-36,400		-116,400		-283,300		
施工費(円/10m)：*2	477,000		1,033,000		2,816,000		
低減効果(*1/*2)	-8%		-11%		-10%		

※1)モルタル充填工は、モルタルの材料費を含む

次に、施工延長を 50m とした場合の施工日数の比較を表-7.15 に示す。表中の標準日当たり作業量は、図-7.14 に示した部材荷卸しから目地工までの作業を含んでおり、積算基準から引用した値である。一方で締付工と充填工は、表-7.14 に示した値をもとに施工延長 50m 当りに換算した値である。施工延長 50m 当りの施工日数と本継手を用いることにより低減される作業日数は、断面-1 は 8.5 日に対し 0.9 日、断面-2 は 11.9 日に対し 1.7 日、部材長が 1m の断面-3 は 27.8 日に対し 4.0 日の減となる。また、50m 当りの施工日数に対し、K

Tジョイントの締付工と充填工，および本継手の充填工の作業日数が占める割合をみると，KTジョイントと本継手では，断面-1は21%と11%，断面-2は49%と34%，断面-3は29%と15%となる．したがって，接合工法の違いを施工日数で比較すると，断面-1では10%，断面-2では15%，断面-3では14%程度の減となり，施工日数に換算しても13%程度の低減効果となる可能性がある．

表-7.15 施工日数の比較

項目	断面-1 内幅2,500		断面-2 内幅5,000		断面-3 内幅8,000	
	KTジョイント	拘束型重ね継手	KTジョイント	拘束型重ね継手	KTジョイント	拘束型重ね継手
標準日当たり作業量(m)	5.9		4.2		1.8	
施工日数(日/50m)	8.5		11.9		27.8	
締付工日数(日/50m)	1.1	—	2.2	—	2.2	—
充填工日数(日/50m)	0.7	0.9	3.6	4.1	6.0	4.2
作業日数計(日/50m)	1.8	0.9	5.8	4.1	8.2	4.2
差(日/50m)	-0.9		-1.7		-4.0	
施工日数に占める締付工と充填工の割合	21%	11%	49%	34%	29%	15%
低減効果	-10%		-15%		-14%	

※1) 締付工，充填工は，4人工による作業日数

このように，継手施工の合理化について，材料費と施工費，および施工日数で評価した結果を整理すると，図-7.16に示すとおりとなる．

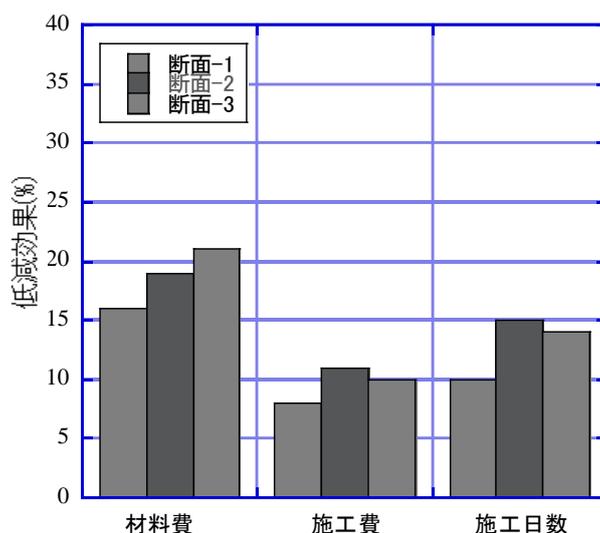


図-7.16 継手施工の合理化

7.6 第7章のまとめ

本継手を用いた PCa 部材の設計法と施工法について、第3章で述べた引張試験および第6章で述べた実物大壁試験体による実験結果をもとに提案した。また、継手施工の合理化を評価するため、本継手とKTジョイントについて、ボックスカルバートを例として材料と施工に関する低減効果を比較した。今回の研究の範囲において、以下の結論を得た。

- (1) D13, D16, D19, D22, および D25 タイプとも、重ね長さを主鉄筋径の10倍とし、継手施工の誤差を管理することで、実験で確認した重ね長さを担保できる。
- (2) 本継手を用いた PCa 部材の断面照査は、主鉄筋に対し安全性を照査すればよい。
- (3) 本継手を用いた PCa 部材の設計は、従来の RC 部材に関する設計法を用いることができる。
- (4) 本継手とKTジョイントとの比較では、PCa 部材の材料費で約20%、施工費で約10%、施工日数では約13%の改善が図れる可能性がある。

PCa 部材の設計は、本章でも述べたように土木学会や日本道路協会、または日本下水道協会等の各種指針にもとづいて設計している。これまでの指針等は、基本的に現場打ち構造物を対象とした内容が主であったが、PCa 化推進の中で新たな指針の策定や、内容の改定が考えられる。本章で述べた設計法についても、最新の指針等に準拠した内容に改定することが必要である。また施工法については、施工実績を重ねる中で、より安全で適切な施工法に改定していく必要がある。

継手施工の合理化の評価として、本継手を採用する優位性が検証できた。また、継手の締付工が不要となることは、施工費の低減はもとより、作業上の安全性に対するリスク改善効果も大きいといえる。

第7章の参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工 カルバート工指針（平成21年度版），2009.
- 2) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針（平成24年度版），2012.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編 [2002年制定]，2002.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編 [2017年制定]，2017.
- 5) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説（2014年版），2014.
- 6) 日本下水道協会：下水道施設耐震計算例－管路施設編前編－（2015年版），2015.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 規準編 [2018年制定]，プレキャストコンクリート用樹脂系接着剤（橋げた用）品質規格（JSCE-H 101-2013），pp.453-456，2018.
- 8) 辻幸和, 栖原健太郎, 森田俊哉: 鋳鉄製カップラー接合具で接合したプレキャストRC部材の水密性状, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.239-242, 2000.5
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 規準編 [2018年制定]，充填モルタルの流動性試験方法（JSCE-F 541-2013），pp.318-319，2018.
- 10) 高速道路総合技術研究所：構造物施工管理要領（令和2年7月版），2020.7
- 11) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書（建技審証 第 0435 号）プレキャストRC部材接合材料「KT ジョイント」，2020.3
- 12) 建設物価調査会：建設物価，2022.4
- 13) 建設物価調査会：土木コスト情報，2022.4
- 14) 建設物価調査会：国土交通省土木工事積算基準（令和3年度版），pp.93-100，2021.5

第 8 章 結論

8.1 本研究のまとめ

本研究では、重ね継手の応力伝達機構を応用した拘束型重ね継手に関する種々の実験的検討を行い、プレキャスト部材接合部の構造性能を評価した。そして、その継手を用いて接合する PCa 部材の設計法と施工法を提案し、継手施工の合理化について評価した。本研究において得られた結論は、以下のとおりである。

第 3 章では、拘束型重ね継手の引張性能を評価するため、主鉄筋が D13, D16, D19, D22, および D25 の継手について、継手単体の引張試験を実施した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

- (1) 降伏点は、D13, D16, D19, D22, および D25 とともに母材と同等である。
- (2) 継手の引張強さは、主鉄筋が D13 では重ね長さが 8φ 以上, D25 では 9φ 以上, D16, D19, および D22 では 9φ とし、かつ補強筋比を 6.2%以上とすることで、SD345 の主鉄筋の材料規格値を上回る。
- (3) 破壊形態は、主鉄筋が D13 は 8φ 程度までは主鉄筋が降伏した後に付着破壊し、10φ では主鉄筋が破断する。D16, D19, および D22 は 9φ で主鉄筋が降伏した後に付着破壊する。D25 は 5φ から 12.5φ までは主鉄筋が降伏した後に付着破壊し、17.5φ では主鉄筋が破断する。
- (4) 継手の初期剛性は重ね長さが長いほど高く、引張強さは補強筋比が大きいほど高い。
- (5) モルタルの圧縮強度が 47.7~61.5N/mm² の範囲では、モルタルの圧縮強度は継手の引張強さに影響しない。
- (6) スパイラル鉄筋の端部を閉合して剛性を高めても、継手の拘束効果には影響しない。

第 4 章では、拘束型重ね継手を用いて接合した部材の曲げ性能を評価するため、主鉄筋を D13 および D25 とした 2 タイプの部材を作製し、はりの曲げ実験を実施した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

- (1) 継手を用いて接合した部材の曲げ耐力、変位性状、およびひずみ性状は、いずれのタイプとも一体成形の部材と同等である。
- (2) 下側主鉄筋が降伏するまでの荷重と変位量の傾きから求めた曲げ剛性は、主鉄筋が D13 および D25 タイプとも、すべての部材が計算値と同等以上であり、継手を用いて接合した部材の方が、一体成形の部材よりやや高い。
- (3) 継手を用いて接合した部材の曲げひび割れは、継手以外の箇所に最初に発生し、荷重が増加しても継手がひび割れを誘発することはない。

第 5 章では、拘束型重ね用いて接合した部材のせん断性能を評価するため、主鉄筋を D13 および D25 とした 2 タイプの部材を作製し、はりのせん断実験を実施した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

- (1) 主鉄筋が D13 の場合は、せん断力が接合部に作用しても、一体成形の部材と同等の耐力がある。
- (2) 主鉄筋が D25 の場合は、継手を用いて接合した部材のせん断耐力、変位性状、およびひずみ性状は、一体成形の部材と同等である。
- (3) 主鉄筋を D13 とする継手の鉄筋量と材質では、曲げ耐力がせん断耐力を上回る部材の設計が難しく、直接的にせん断耐力を評価することはできなかった。しかし、少なくとも接合部材とすることで、せん断性能が低下する状況は認められない。
- (4) 主鉄筋が D25 の場合は、継手を用いて接合した部材の斜めひび割れは、継手を避けて卓越する。
- (5) 接合面にせん断キーを設けなくても、破壊時において接合面のズレは認められない。

第 6 章では、拘束型重ね継手を用いて接合した部材に正負繰り返し荷重が作用したときのじん性を評価するため、主鉄筋を D13 および D25 とした 2 タイプの部材を作製し、実物大壁試験体の正負繰り返し載荷実験を実施した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

- (1) 継手を用いて接合した部材の降伏荷重、最大荷重、およびじん性率は、いずれのタイプとも一体成形の部材と同等である。
- (2) 降伏荷重と最大荷重の実測値の計算値との比較では、降伏荷重はやや高く、最大荷重は負側において全般にやや低い。
- (3) 正負の繰り返し載荷を 5 サイクル以降も 3 回で継続すると、1 回の繰り返し載荷より早いサイクルで荷重が降下する。
- (4) 繰り返し載荷により、一体成形の部材は継手を用いて接合した部材より早いステップで最初の荷重降下がみられ、荷重降下は主鉄筋の破断によるものである。
- (5) 接合部の曲げひび割れは、断面力が最も大きい継手下端部に最初に発生し、繰り返し荷重により継手下端部のひび割れは卓越するが、接合面と継手上端部のひび割れは、破壊時までほとんど進展しない。
- (6) 継手を断面力が最も大きい箇所から $0.5D$ (D =側壁厚) 以上離れた位置に設けることにより、継手の損傷は継手下端部の限定的な剥落程度に抑えることが可能である。
- (7) 継手開口部のモルタル充填は、継手が上下接合の場合でも、ポンプで注入することにより、十分な充填性状を得られる。

第 7 章では、拘束型重ね継手を用いた PCa 部材の設計法と施工法を提案し、継手施工の合理化について評価した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

- (1) D13, D16, D19, D22, および D25 タイプとも、重ね長さを主鉄筋径の 10 倍とし、

継手施工の誤差を管理することで、実験で確認した重ね長さを担保できる。

- (2) 本継手を用いた PCa 部材の断面照査は、主鉄筋に対し安全性を照査すればよい。
- (3) 本継手を用いた PCa 部材の設計は、従来の RC 部材に関する設計法を用いることができる。
- (4) 本継手と K T ジョイントとの比較では、PCa 部材の材料費で約 20%、施工費で約 10%、施工日数では約 13%の改善が図れる可能性がある。

8.2 実用化における今後の課題

- (1) 実物大壁試験体の作製において、継手開口部内に突出する主鉄筋長が製作誤差によりマイナスすることがわかった。本継手を用いる PCa 部材を製造するうえで、継手開口部内に突出する必要主鉄筋長の確保が最も重要である。鉄筋金網の製作方法や型枠へのセット方法については、量産体制において工夫する課題である。
- (2) 実物大壁試験体の作製において、接合面に塗布した接着剤により接合面が滑りやすく、継手開口部のモルタルが硬化するまでは不安定な状態であることが確認できた。補助プレート等を用いて安定性を保つ方法は考えられるが、PCa 部材の形状や施工現場の条件に応じた施工法については、実施工において工夫する課題である。

謝 辞

本論文は、現場打ちコンクリート構造物のプレキャスト化推進を図るため、プレキャスト部材同士を接合する継手施工の合理化を目的とし、重ね継手を応用した拘束型重ね継手について、種々の実験的検討を行った研究をまとめたものです。本論文のとりまとめにあたり、多くの方々からご指導、ご協力を賜りました。

本研究において実施した構造実験、および論文のとりまとめにあたり、懇切丁寧にご指導を賜りました前橋工科大学社会環境工学科教授 岡野素之博士には、心より深く感謝申し上げます。

本論文の審査にあたり、審査委員をお受けいただきました前橋工科大学社会環境工学科教授 土倉泰博士、前橋工科大学生命情報学科教授 中村建介博士、前橋工科大学建築学科教授 北野敦則博士、学外の委員をお受けいただきました日本大学工学部土木工学科教授 岩城一郎博士には、学位論文としての質を高めるための貴重なご助言、ご指導を賜りました。心より深く感謝申し上げます。

本研究は、2015年度より前橋市新製品・新技術開発費の援助を受け、数年にわたる研究となりましたが、研究の継続を承認していただいた、共和コンクリート工業株式会社代表取締役社長 本間丈士氏、役員の皆様には、心より深く感謝申し上げます。また、本研究における実験を行うにあたり、前橋工科大学 岡野研究室の学部生、院生、有限会社村上製作所専務取締役 村上潤氏には、多くのご協力を賜りました。心より深く感謝申し上げます。

筆者は、1995年に現在の勤務先であるカイエー共和コンクリート株式会社の前身となる株式会社カイエーテクノに入社し、技術開発業務に携わってきました。入社当初からご指導をいただいている代表取締役 森田俊哉博士、また、本研究においても多くのご協力をいただいた技術開発部のメンバー、安中工場の皆様には、心より深く感謝申し上げます。

そして、筆者が博士課程に進むことを導いてくださった、群馬大学・前橋工科大学名誉教授 辻幸和博士には、これまで多くのご指導を賜りました。ここに記して心より深く感謝申し上げます。

最後に、私事ではありますが、本論文の執筆にあたり多くの休日を費やしましたが、見守り続けてくれた妻 佳子、娘 麻衣、息子 拓麻、圭太に感謝し、本論文の謝辞といたします。

2023年3月

飯塚 豊