

論文 モルタル充填継手の耐荷性能に及ぼす各種パラメータの影響に関する実験的検討

村上 力也*1・森本 健斗*2・下野 聖也*3・尾上 幸造*4

要旨：プレキャストコンクリート部材の鉄筋同士を接続する機械式継手（モルタル充填継手）のコンパクト化を目的に、機械式継手のスリーブ形状、充填材および挿入側鉄筋の先端形状に着目した引張試験を実施した。その結果、スリーブ先端内部にすばみを設ける構造とすることや、挿入側鉄筋の先端に突起を施すヘッド加工とすることにより継手構造の耐荷性能が向上することを確認した。また、高い膨張性能を有する充填材とヘッド加工を設けた挿入側鉄筋を組み合わせた構造とすることにより、短い定着長（ $3.5 \times$ 鉄筋径）でも鉄筋の母材破断に至る耐力を確保できることが明らかとなった。

キーワード：プレキャスト部材、モルタル充填継手、スリーブ形状、充填材、ヘッド加工、膨張性能

1. はじめに

近年、建設業界では担い手不足が深刻化しており、2015年時点で約340万人であった技能労働者が、10年後の2025年には高齢者の離職により、全体の約3割に相当する110万人が減少することが予測されている¹⁾。国土交通省では、建設生産システム全体の生産性向上を目指してi-Constructionと銘打った生産性革命プロジェクトを2016年度から本格的に推し進めている。建設現場での1人あたりの生産性を上げるための有効な手段として、プレキャストコンクリートの活用が奨励されている。プレキャスト部材を用いることで、建設現場での鉄筋・型枠・コンクリート打設作業が大幅に削減され、省力化・省人化に繋がり、1人あたりの生産性を向上させることが可能となる。

プレキャスト部材を現地で接合する際、部材同士を一体化させるために鉄筋同士を継ぐ機構が必要となるが、プレキャスト部材の鉄筋継手には、一般にはモルタル充填継手を用いることが多い。現在、流通しているモルタル充填継手は一定の定着長を確保するため、スリーブの長さが比較的大きく、小規模な構造や薄肉部材への適用は不向きな面がある^{2) 3)}。また、スリーブ長が長くなると、せん断補強筋はスリーブ範囲を避けて配置するため、せん断補強筋の配置間隔が大きくなるため、構造上せん断に対する耐力は不利になる⁴⁾。

そこで、本研究ではスリーブ形状をコンパクト化するために、必要定着長の低減手法として、スリーブの内部形状や充填材種類、挿入側鉄筋の先端形状に着目し、それらをパラメータとしてケーススタディを行い、各パラメータが継手構造の耐荷性能に及ぼす影響を確認した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究では、異形鉄筋(SD345)を対象に実験を実施した。使用する径は、構造鉄筋の最小径として一般的に広く用いられるD13とした。供試体の外観を写真-1に示すが、定着長を最小限とするため、スリーブと片側の鉄筋の接合は摩擦圧接により接合した。

スリーブ形状について、本研究における加工形状の概要を図-1に示す。スリーブ形状は、内面を凹凸状に加工したものとスリーブ孔内先端にすばみを設けた構造、および凹凸加工と先端すばみ加工の両方を併せ持つ構造について検討した。スリーブの長さは、一般的なせん断補強筋の配置間隔である150mm間隔⁵⁾の間に収まる長さとなるように検討を行い、定着長が $3.5 \times$ 鉄筋径となる長さに設定した。

本研究で使用した充填材には、エポキシ樹脂系およびセメント系のものを用いた。エポキシ樹脂系は主成分がエポキシアクリレート樹脂性で圧縮降伏強度190N/mm²程度、圧縮弾性率2900N/mm²程度を有する材料を使用した。



写真-1 継手供試体の外観

*1 極東興和(株) 営業本部技術企画部技術企画課 修士(工学)(正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学教育部 (学生会員)

*3 極東興和(株) 福岡支店技術部技術課 修士(工学)

*4 熊本大学大学院 先端科学研究部(工学系) 社会基盤環境部門准教授 博士(工学)(正会員)

セメント系については、充填性を考慮して骨材径が小さいものを選定し、材齢 28 日で 60 N/mm^2 程度の圧縮強度を発現する普通強度タイプと、材齢 28 日で 120 N/mm^2 程度の圧縮強度を発現する高強度タイプについて実験を行った。また、充填材の膨張によるスリーブ内拘束効果により引張耐力の向上が期待できるため、充填材の膨張性にも着目した。使用材料は、静的破碎材と同様のメカニズムで膨張する充填材として、石灰および珪酸塩を主成分とするセメント系の粉末材料とした。本材料は、養生温度が $20\sim 30^\circ\text{C}$ で管理された場合、材齢 2~3 日で 40 N/mm^2 以上の膨張圧を発現する。⁶⁾

挿入側鉄筋の先端形状については、図-2 のように鉄筋の先端に突起を設けたヘッド付タイプおよびヘッド加工なしの通常タイプの 2 種類とした。ヘッドと異形鉄筋は摩擦圧接にて接合した。

各ケースの供試体数は表-1 に示すとおりとした。

2.2 スリーブ材質

スリーブと異形鉄筋を摩擦圧接する際、摩擦圧接接合部に局所的な応力が発生する。図-3 に汎用有限要素法プログラム「FEMLEEG ver.8」による解析諸元および解析結果のコンター図を示す。モデルは 1/2 モデルで解析を行った。D13 鉄筋の引張強度相当となる 70 kN の引張荷重（約 550 N/mm^2 ）を与えた際にスリーブ接合部付近に発生する引張応力は 322 N/mm^2 であり、一般的に広く使用されている SS400（降伏点： 235 N/mm^2 以上）ではスリーブが鉄筋母材破断より前に降伏してしまう。このため、スリーブの材質は SD345 よりも高強度な S45C（降伏点： 490 N/mm^2 以上）とした。なお、スリーブ材質を SS400 とした場合は、写真-2 に示すように摩擦圧接接合部付近のスリーブが解析結果から予想されたとおり、鉄筋母材破断前に破断することが確認された。

2.3 検討内容

(1) シリーズ 1：スリーブ形状の比較

本研究で検討した供試体の一覧を表-1 に示す。シリーズ 1 では、スリーブの内面形状を凹凸加工、先端すぼみ加工、凹凸+先端すぼみ加工とした場合の引張耐力力を比較した。スリーブの内面形状の違いによる差異を確認するため、充填材の種別としてエポキシ樹脂系を用い、挿入側鉄筋はヘッド加工なしで統一した。

(2) シリーズ 2：エポキシ樹脂系とセメント系の比較

シリーズ 2 では、充填材の種別のうち、エポキシ樹脂系とセメント系（普通強度）の引張耐力力を比較した。充填材の違いによる差異を確認するため、表-1 のとおり、スリーブ形状等、充填材以外の要素は統一した条件で実験を行った。

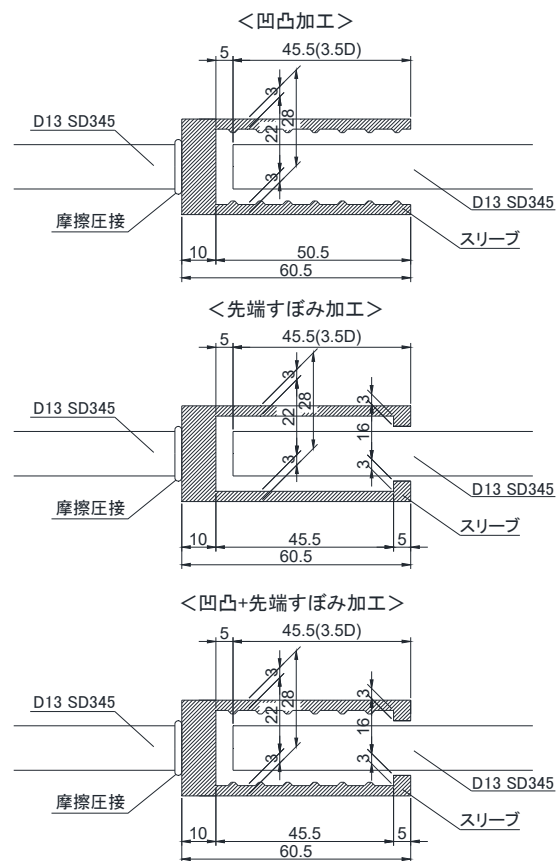


図-1 スリーブ形状（寸法の単位：mm）

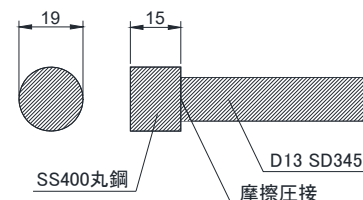


図-2 挿入側鉄筋のヘッド加工

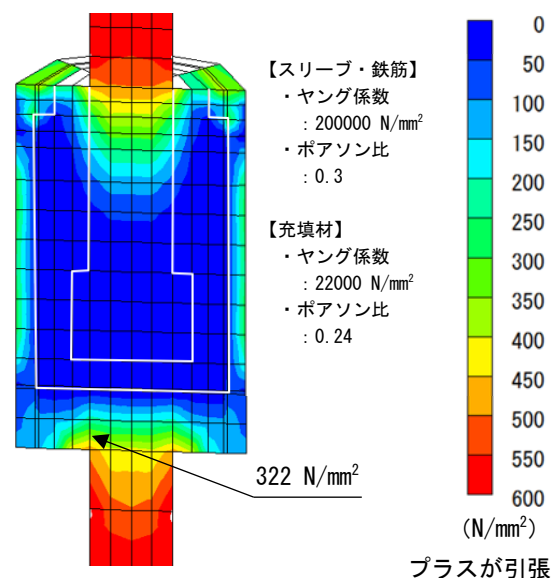


図-3 FEM 解析最大主応力図

表-1 検討ケース

シリーズ	ケース	スリーブ	充填材		挿入側鉄筋	供試体数 (体)	備考
1	1	凹凸	エポキシ樹脂系		ヘッドなし	2 ※3	スリーブ形状の比較
	2	先端すぼみ				2 ※3	
	3	凹凸+先端すぼみ				2 ※3	
2	4	先端すぼみ	エポキシ樹脂系		ヘッドなし	2 ※3	エポキシ樹脂系とセメント系の比較
	5		セメント系	普通強度 ※1		1	
3	6	先端すぼみ	セメント系	普通強度 ※1	ヘッドなし	1	充填材強度およびヘッド加工の影響
	7				ヘッドあり	1	
	8			高強度 ※2	ヘッドなし	1	
	9				ヘッドあり	2 ※3	
4	10	先端すぼみ	セメント系	高強度 ※2	ヘッドあり	1	スリーブの変形挙動の確認
	11					肉厚 3 mm	
	12					肉厚 6 mm 肉厚 9 mm	
5	13	凹凸	セメント系	高膨張 (膨張圧： 40 N/mm ² 以上)	ヘッドなし	1	充填材の膨張性能による影響
	14				ヘッドあり	3 ※3	
	15	先端すぼみ			ヘッドなし	1	
	16				ヘッドあり	2 ※3	

※1 材齢 28 日圧縮強度；60 N/mm²程度，膨張性能；収縮補償，※2 材齢 28 日圧縮強度 120 N/mm²程度，膨張性能；収縮補償
 ※3 複数実施した供試体における本論文で示すグラフは代表ケースを示す

(3) シリーズ 3：充填材強度およびヘッド加工の影響

シリーズ 3 では，充填材の強度の違いおよびヘッド加工の有無が引張耐荷力に及ぼす影響について確認した。既往の研究⁷⁾では充填材の強度が継手構造の引張耐荷力向上に寄与することが明らかとなっているが，本研究のように先端にすぼみがある構造においても同様に引張耐荷力向上効果が得られるかに着目して検討を行った。

(4) シリーズ 4：スリーブの変形挙動の確認

スリーブを先端すぼみとした場合，くさび効果により継手構造の引張耐荷力が向上することが期待できるが，くさび効果によりスリーブ先端付近には高い内部拘束力が発生し，スリーブの径を外側に押し広げようとする力が働く。その際，くさび効果を十分に発揮するためには，スリーブがその力に対して変形せず，十分な剛性を保有していることが条件となる。そこで，シリーズ 4 ではスリーブの肉厚を 3 mm，6 mm，9 mm と変化させて，スリーブの変形挙動について確認した。スリーブ変形挙動の確認は，図-4 に示すようにスリーブ外面に検長 3 mm のひずみゲージを 4 枚貼付してひずみの計測を行った。

(5) シリーズ 5：充填材の膨張性能による影響

シリーズ 5 では，高膨張タイプの充填材を用いた場合の引張耐荷力向上効果を調べた。スリーブ形状や挿入側鉄筋を変えた場合の関係性も確認するため，スリーブ形状は凹凸加工と先端すぼみ加工，挿入側鉄筋はヘッド加工なしとヘッド加工ありの両方について実験を実施した。



写真-2 スリーブに SS400 を用いた供試体における摩擦圧接部の破断状況

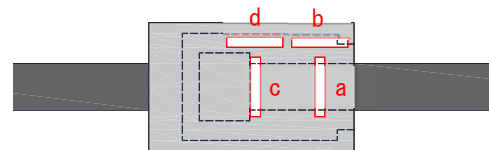


図-4 ひずみゲージの貼付位置

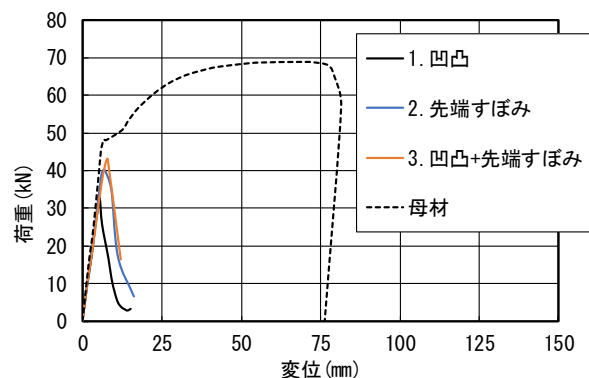


図-5 荷重-変位曲線 (シリーズ 1)



写真-3 引抜き破壊状況 (ケース 1)

3. 実験結果および考察

3.1 スリーブ形状の比較

シリーズ1の引張試験の結果(荷重-変位曲線)を図-5に示す。いずれのケースも鉄筋降伏前に充填部が引き抜かれる破壊形態となった。このうち、先端にすぼみを持たせたケース2のスリーブに対して、スリーブ内面に凹凸を設けたケース1の方が引張耐荷力は低い結果となった。これは、写真-3に示すケース1の引抜き破壊状況をみても分かるように、鉄筋周囲の付着が最初に限界を迎えることで引抜き破壊に至っており、スリーブと充填材の境界面の付着力を向上させる凹凸加工自体は、シリーズ1の組合せにおいて、継手の引張耐力向上にはほぼ寄与しないことが理由であると推察される。なお、本論文で示す荷重-変位曲線は、载荷初期における試験機械の馴染み分を補正したものを示している。

ケース2の先端すぼみだけのスリーブとケース3の凹凸と先端すぼみを組み合わせたスリーブを比較すると、抜け出した際の荷重は、ケース3の荷重が若干ではあるが高い結果となったが、ばらつきのレベルでありほぼ差異は見られなかった。これは、前述の凹凸加工がスリーブの引張耐荷力向上に寄与しない点が理由であると考えられる。

先端すぼみ加工が引張耐荷力向上に寄与することが確認できたが、これは、図-6に示すように先端のすぼみ部で抜け出そうとする挙動に対して、くさび効果による拘束力が得られたことで、鉄筋と充填材との付着力を高める方向に有効に働いたものと考えられる。既往の研究⁷⁾ではスリーブ内部にテーパを設けてくさび効果を発揮させることが耐力向上に大きく寄与することが明らかとなっているが、今回のようにテーパではなく、先端にすぼみ部を設けるだけでも、同様に一定のくさび効果が見込めるものと推察される。

3.2 エポキシ樹脂系とセメント系の比較

図-7にシリーズ2の結果を示す。セメント系の方がエポキシ樹脂系よりも引張耐荷力は大きくなった。セメント系の充填材はセメントと骨材をブレミックスした材料となっており、骨材同士の噛み合わせにより、エポキシ樹脂系よりも引張耐荷力が向上したものと推察される。

3.3 充填材強度およびヘッド加工の影響

図-8にシリーズ3の結果を示す。本検討では、挿入

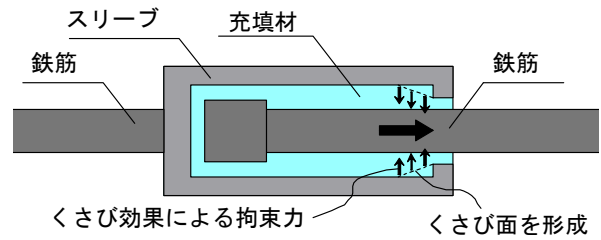


図-6 スリーブ内部の先端すぼみ部におけるくさび効果の概念図

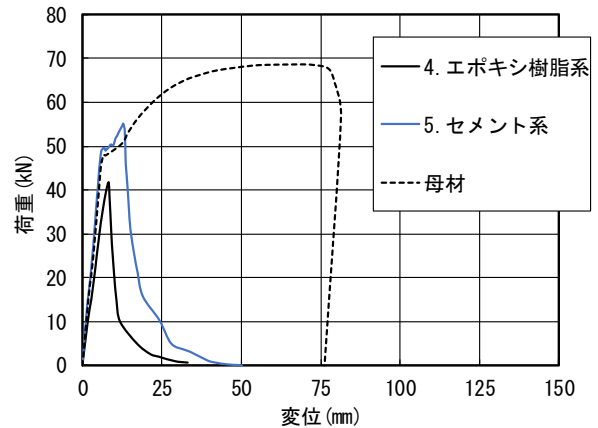


図-7 荷重-変位曲線 (シリーズ 2)

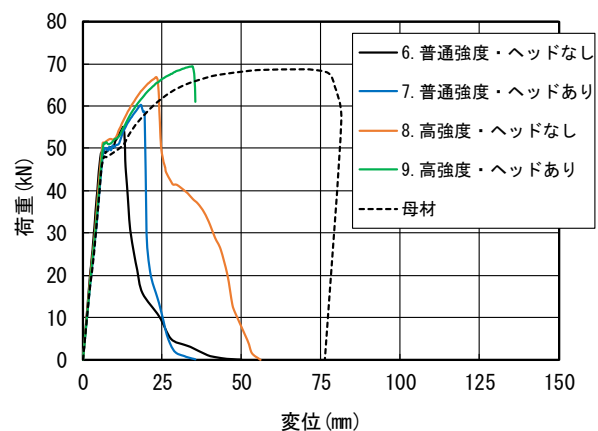


図-8 荷重-変位曲線 (シリーズ 3)



写真-4 引抜き破壊状況 (ケース 7)

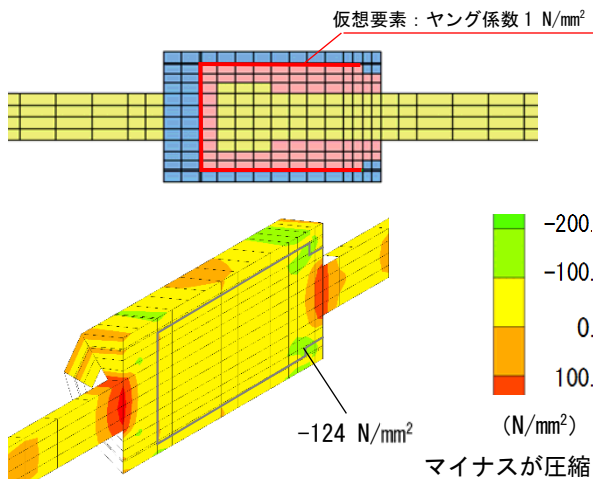


図-9 FEM 解析最小主応力図

側鉄筋のヘッド加工にも着目しているが、いずれのケースにおいても鉄筋母材の降伏には達したものの鉄筋母材破断前にスリーブ部の引抜き破壊となった。

ケース6の普通強度の充填材で鉄筋母材の降伏まで至ったことから、さらなる引張耐荷力向上を目指してケース7の挿入側鉄筋のヘッド加工を組み込んだ構造での実験に取り組んだ。その結果、ケース6では鉄筋周辺の付着が切れて鉄筋が抜け出す破壊形態であったものが、ケース7では充填材のせん断による破壊形態に変化し、引張耐力の向上は確認できたものの鉄筋母材の破断までは至らなかった。ケース7の引抜き破壊状況の写真を写真-4に示すが、先端すばみ部で充填材が圧壊するような挙動を示したのちに充填材がせん断破壊に至り抜け出すような傾向がみられた。

この挙動を確認するために実施した FEM 解析の結果を図-9に示す。解析モデルは、すばみ部に局所的な応力が発生する状態を再現するため、スリーブと充填材の境界部にはヤング係数を 1 N/mm^2 と小さくした仮要素を組み込み、スリーブ内面と充填材の摩擦抵抗を最小化したモデルとした。このモデルに鉄筋母材の引張強度相当の 70 kN の引張荷重を与えた場合、スリーブ先端すばみ部付近の充填材には 124 N/mm^2 の局所的な圧縮応力が働くことが分かった。このことから、圧縮強度 60 N/mm^2 程度である普通強度の充填材では、くさび効果による拘束力に対して圧縮強度が不足することがきっかけとなり引抜き破壊に至ったものと考えられる。

ケース8, 9では 120 N/mm^2 程度の圧縮強度を発現する高強度の充填材を使用した場合の引張耐力を確認した。この結果、普通強度のケース6, 7と比較して高強度のケースの方が継手構造の耐荷性能が向上し、本シリーズの先端のみをすばませる構造でも、既往の研究成果⁷⁾と同様に耐力が向上することが確認できた。

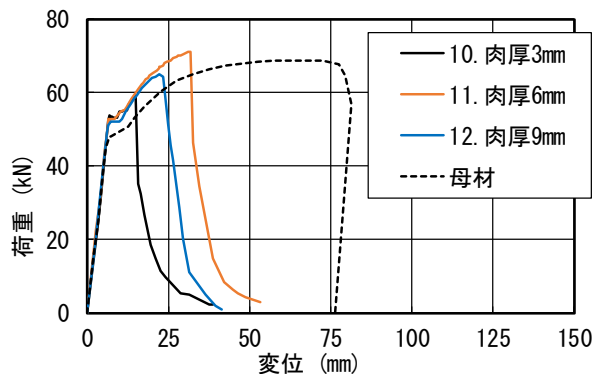


図-10 荷重-変位曲線 (シリーズ4)

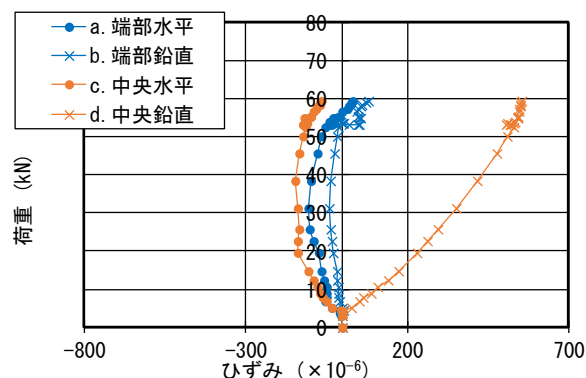


図-11 荷重-ひずみ関係 (ケース10: 肉厚3 mm)

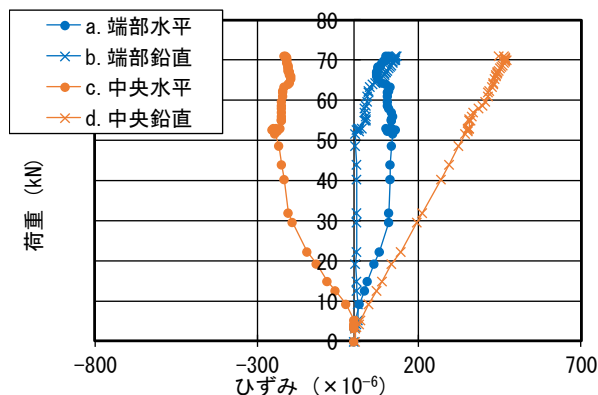


図-12 荷重-ひずみ関係 (ケース11: 肉厚6 mm)

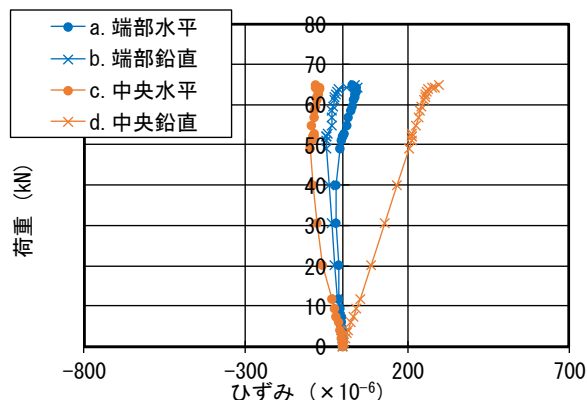


図-13 荷重-ひずみ関係 (ケース12: 肉厚9 mm)

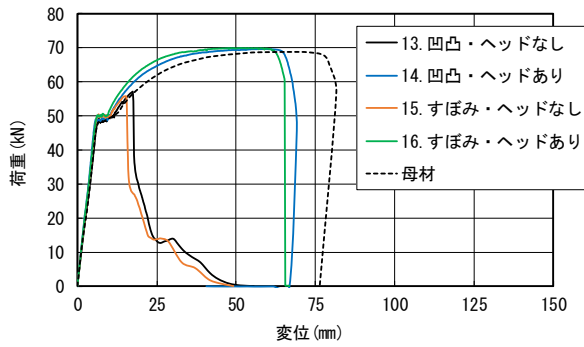


図-14 荷重-変位曲線 (シリーズ 5)



(a) 断面

(b) 全景

写真-5 鉄筋母材破断状況

3.4 スリーブの変形挙動の確認

図-10 にスリーブ肉厚別の荷重-変位曲線を示す。各肉厚で引抜き時の耐荷力のばらつきはあるものの、相関性はみられなかったこともあり、スリーブ厚は鉄筋の引張強度相当の荷重に耐えることができるように設定すれば充分であると分かる。図-11、図-12、図-13 には各肉厚のスリーブ側面における荷重-ひずみ関係を示す。スリーブ先端部 (a および b) は拘束力に対して大きなひずみ変化はみられず、拘束力は維持できていたものと考えられる。スリーブ中央部 (c および d) で軸方向にひずみが発生しているが、径を広げる方向への変位は見られなかった。

3.5 充填材の膨張性能による影響

高い膨張性能を有する充填材を使用したシリーズ5の実験結果として、図-14 に荷重-変位曲線を示す。スリーブの形状に関わらず、ヘッド加工があるケース14およびケース16で鉄筋の母材破断に至る耐荷性能を確保することができた。これは、膨張時の拘束効果がかさび効果の拘束力と同等以上の効果を発揮し、ヘッド加工が抜け出しに対してさらに抵抗したものと推察される。破断状況を写真-5 に示す。

4. まとめ

スリーブの形状、充填材の種別、挿入側鉄筋のヘッド加工の有無をパラメータとしたモルタル充填継手の引張試験を実施した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) スリーブ先端内部にすぼみを有する形状とした場合、かさび効果により継手の耐力が向上する。
- 2) 充填材に骨材を有するセメント系材料を使用することによりエポキシ樹脂系の充填材を使用した継手より耐力が向上する。
- 3) かさび効果を発揮するスリーブ形状とした場合、使用する充填材は、先端部充填材に生じる高い内部拘束力に抵抗できる圧縮強度の高い材料を用いることが有効である。
- 4) 挿入側鉄筋にヘッド加工を用いることで充填材との一体性が確保され、継手の耐力が向上する。また、高い膨張性能を有する充填材と組み合わせることで、スリーブ形状の工夫に左右されずに短い定着長 (3.5×鉄筋径) でも鉄筋の母材破断に至るまでの耐力を確保することが可能となる。

今後は、ケース 14、16 の組合せが耐力を大きく向上させるメカニズムを解明するとともに膨張性能とヘッド加工の各々の影響度を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省 i-Construction委員会報告書概要資料：
<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (閲覧日：2019年12月10日)
- 2) 大橋茂信，横谷栄治，吉野次彦，寺戸一哉：モルタル充填式継手を有する鉄筋コンクリート部材の力学的性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21，pp. 295-300，No. 3，1999
- 3) 高津比呂人，木村秀樹：柱梁接合部内にスリーブ継手を有する梁主筋の付着性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，pp. 631-636，No. 3，2007
- 4) 安田瑛紀，松本浩嗣，松本智夫，二羽淳一郎：モルタル充填式継手と集約配筋がRCはりのせん断性状に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，pp. 517-522，No. 2，2015
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，p. 154，2010
- 6) 篠崎裕生，加納嘉，浅井洋，安川和公：中間定着工法を用いたPC大梁の部分解体，プレストレストコンクリート，Vol. 55，pp. 33-38，No. 1，2013
- 7) 坂田弘安，小林駿介，毎田悠承，島崎和司，佐伯栄一郎：モルタル充填式機械式継手に用いるテーパー付カプラーの力学性状，日本建築学会技術報告集，第22巻，第51号，pp. 527-530，2019.6