

論文 メゾスケール解析による表面形状の異なる異形鉄筋の付着挙動評価

川上 真由*1・安江 歩夢*2・小林 謙祐*3・兼松 学*4

要旨：異形鉄筋の表面形状がコンクリートとの付着性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、引抜試験および有限要素法によるメゾスケール解析を実施した。引抜試験の結果から、節の配置の異なる異形鉄筋の付着挙動においては、節の高さと節の間隔の比が影響を及ぼすこと、および節の高さと節の間隔の比が極めて大きい鉄筋においては、節頂部を結ぶコンクリートのせん断破壊が生じやすいことが確認された。さらに、有限要素法によるメゾスケール解析においては、機械的な噛み合い作用に起因する付着応力の増大を評価できる一方、せん断破壊などの破壊挙動を再現することが困難であることが示唆された。

キーワード：付着, 異形鉄筋, 節, 有限要素法, メゾスケール解析

1. はじめに

これまで行われてきた数 cm～数 m オーダーの鉄筋コンクリート(以下, RC)構造解析においては、付着応力-すべり量(以下, τ -s)関係などの付着構成則を挿入することにより、RC 部材の力学的挙動が評価されてきた^{1),2)}。しかし、このような付着構成則はある実験条件下における実験結果から一般化されたものであることから、解析結果は実験結果に依存することとなる。

一方で近年、補強材とコンクリートの付着挙動を数値解析的に評価する手法の1つとして、数 mm オーダーのメゾスケール解析が注目されている。メゾスケール解析では、鉄筋やコンクリートの構成則および界面のパラメータにより鉄筋とコンクリート間の付着挙動が評価される。したがって、RC 部材の力学的挙動評価において付着構成則の外挿を必要としない。さらにメゾスケール解析では、鉄筋の形状を直接モデル化することにより、節周辺に生じるコンクリートの局所応力やコンクリートのひび割れを再現することが可能となる³⁾。

既往の研究においても、有限要素法(Finite Element Method : FEM)や剛体-バネモデル(Rigid-Body Spring Model : RBSM)といった解析手法を活用したメゾスケール解析に関する事例が報告されている^{3),4)}。またこれらの研究においては、メゾスケール解析において丸鋼と異

形鉄筋や節の高さと節の間隔の比等、形状変化による付着挙動の差異を評価可能であることが示されている。一方で、メゾスケール解析において、異形鉄筋の表面形状(節の配置)が付着性能に及ぼす影響の違いを評価した研究事例は存在しない。

本研究では、鉄筋の表面形状が付着性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、表面形状の異なる3種類の異形鉄筋を対象に引抜試験を実施し、さらにFEMによるメゾスケール解析をもって検証した。

2. 引抜試験による異形鉄筋の付着挙動評価

2.1 実験水準および試験体の概要

実験水準は、異形鉄筋の表面形状(表-1)、鉄筋径、らせん筋の有無とした。なお、表-1に示す各寸法は、市販の光学式3Dスキャナ EinScan Pro 2X HDにより取得した3Dデータを、3D CAD ソフトウェア Fusion 360に読み込むことで測定した。3Dスキャナの性能を表-2に示す。

また、試験体の概要を図-1に、コンクリートの使用材料を表-3に、さらにコンクリートの調合、フレッシュ性状および圧縮強度を表-4に示す。試験体は、JSTM C 2101より寸法および付着区間の長さを決定した。コンクリート母材は1辺6D(D:鉄筋径)角の立方体とし、中心部には長さ450mmの鉄筋を埋設した。また、鉄筋とコンクリートの付着区間は4Dとし、載荷端側には2Dの

表-1 異形鉄筋の表面形状

鉄筋径	公称径 (mm)	表面形状	節高さ H (mm)	節間隔 L (mm)	リブ幅 (mm)	H/L
D13	12.7	竹	0.61	8.33	2.99	0.073
		ねじ	0.95	7.06	3.31	0.134
		クロス	0.64	7.53	1.29	0.085
D16	15.9	竹	1.07	10.6	2.47	0.101
		ねじ	1.24	8.13	5.93	0.153
		クロス	0.82	9.43	1.77	0.086

表-2 3D スキャナの性能

3D精度(最大)	0.04mm
ポイント間隔(3D解像度)	0.24mm
スキャン速度	0.5/s以下
位置合わせ方式	ターンテーブルのマーカーポイント特徴位置合わせ

*1 東京理科大学 理工学部建築学科 (学生会員)

*2 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 修士課程 (学生会員)

*3 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 博士後期課程 (学生会員)

*4 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-3 コンクリートの使用材料

水(W)	上水道水
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
細骨材(S)	大井川水系陸砂 表乾密度：2.58g/cm ³
粗骨材(G)	青梅産碎石 粗骨材の最大寸法：10mm 表乾密度：2.66g/cm ³
AE減水剤(Ad)	リグニンスルホン酸塩 ポリカルボン酸系化合物

表-4 コンクリートの調合、フレッシュ性状および圧縮強度

W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(材齢28日) (N/mm ²)
		W	C	S	G	Ad			
60	46	175	294	808	993	C×1.8%	20.0	5.3	33.2

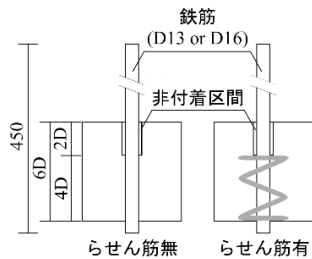


図-1 試験体の概要

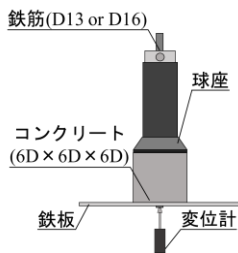


図-2 引抜試験の概要

非付着区間を設けた。さらに、らせん筋を有する試験体においては、試験体の付着区間に圧縮コイルバネ(ピアノ線、Φ4mm)のらせん筋を配置した。なお、引抜試験で使用する鉄筋は、JIS G 3112 に基づく市販の異形鉄筋(SD295A)とした。

2.2 引抜試験の概要

引抜試験の概要を図-2に示す。引抜試験は材齢28日の水中養生後、表面乾燥状態において、JSTM C 2101 に準じて行った。载荷には、あと施工アンカー用引張試験機を用い、鉄筋の引張応力の増加速度が49.0(N/mm²)/minとなるよう载荷速度を制御した。また、鉄筋の自由端部では、試験台に固定した変位計 CDP-25 により鉄筋の引き抜け量(自由端変位)を測定した。得られた測定結果を用いて、式(1)により付着応力を算出した。

$$\tau = \frac{P}{4\pi D^2} \quad (1)$$

ここで、 τ ：付着応力(N/mm²)

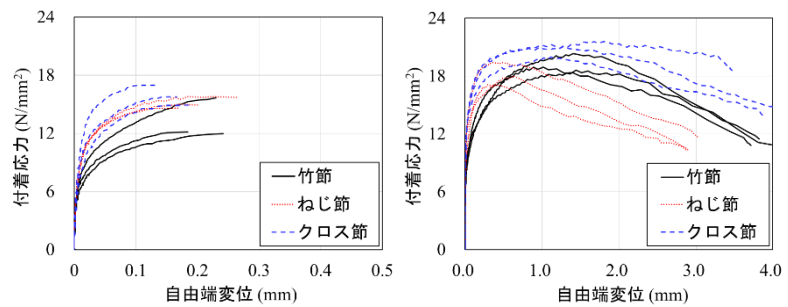


図-3 実験結果(D13)

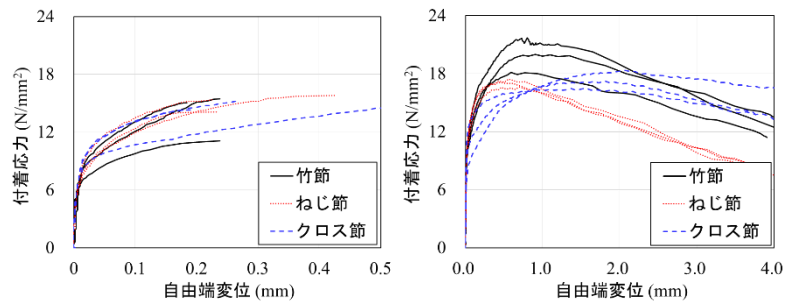


図-4 実験結果(D16)

P ：引張荷重(N)

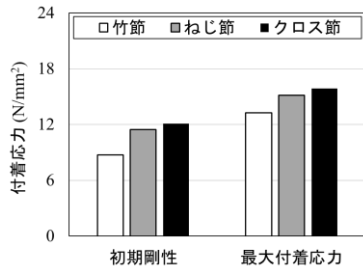
D ：鉄筋径(mm)

なお、本実験ではJSTM C 2101に基づき、自由端変位が0.002D時の付着応力(初期剛性)および引張荷重が最大時の付着応力(最大付着応力)に着目をし、実験結果について議論を行った。

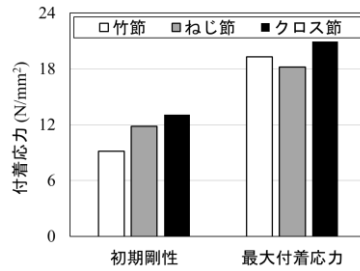
2.3 実験結果および考察

各水準により得られた τ - s 曲線を図-3および図-4に示す。また、各水準の初期剛性および最大付着応力を図-5および図-6に示す。

竹節およびクロス節の実験結果に着目をする。D13の測定結果において、クロス節の初期剛性および最大付着応力は竹節と比較して大きい。一方でD16の測定結果において、竹節の初期剛性および最大付着応力はクロス節と比較して大きい。これは、D13においてはH/L(節高さ/節間隔)が竹節よりクロス節の方が大きい一方で、D16の場合H/Lの値はクロス節より竹節の方が大きいことに起



(a) らせん筋なし



(b) らせん筋あり

図-5 初期剛性および最大付着応力 (D13)

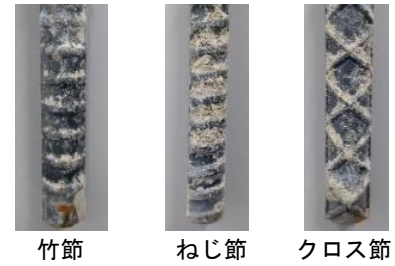
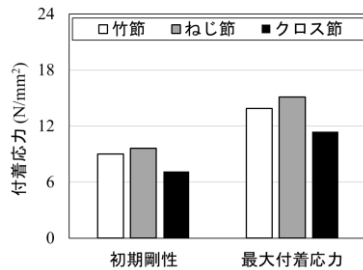
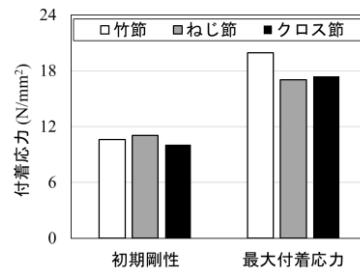


写真-1 鉄筋表面の様子 (D13)



(a) らせん筋なし



(b) らせん筋あり

図-6 初期剛性および最大付着応力 (D16)

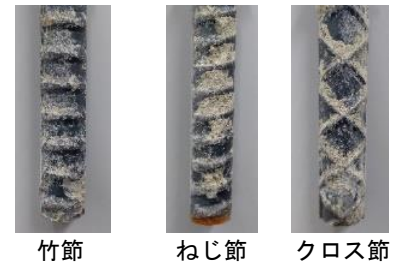


写真-2 鉄筋表面の様子 (D16)

因する(表-1)。Clark⁵⁾や国分ら⁶⁾は、異形鉄筋の節高さや節間隔が付着性能に影響を及ぼすことを報告していることから、付着挙動の差異を捉えるうえで H/L は重要な因子であることが改めて確認された。また、本実験には JIS G 3112 に基づいた市販の異形鉄筋を使用しているため、節角度は 45° 以上である。ここで村田ら⁷⁾は、節角度が 45° 以上の場合、異形鉄筋の表面形状によらず付着応力は同程度となることを報告している。したがって、本実験においては節角度が付着性能に及ぼす影響は小さいと推察される。

次に、ねじ節の実験結果に着目をする。らせん筋を有するねじ節の最大付着応力を除くと、D13 ねじ節の付着応力はクロス節に次いで大きく、D16 ねじ節の付着応力は他の表面形状に比べ最も大きい。さらに、らせん筋を有する場合、ねじ節の最大付着応力は鉄筋径によらず他の表面形状より小さい。これらは、ねじ節の支圧面積係数(BA)や H/L が他形状に比べ大きいことに起因すると推察される。国分ら⁶⁾は、自由端変位量が大きくなるにつれ、付着応力と BA が比例関係でなくなることを示している。また Rehm⁸⁾や Lutz et al.⁹⁾は、節角度が 40° 以上かつ H/L が 0.14 より大きい場合、節頂部を結ぶせん断破壊が生じやすくなることを報告している。ここで、本実験に用いたねじ節の H/L は、D13 では 0.134、D16 では 0.153 であり、D13 におけるねじ節の H/L は 0.14 に満たないものの他形状に比べ大きい。したがって、ねじ節の BA や H/L が大きいことで小さい自由端変位量における付着応力が大きくなる一方、自由端変位量が大きくなるとせん断破壊が生じ、最大付着応力が低下すると推察される。

なお、試験終了後の鉄筋において、ねじ節の節間にはコンクリートの残存が多く確認された(写真-1, 写真-2)。

3. メソスケール解析による異形鉄筋の付着挙動評価

本研究では、市販の汎用 FEM 解析ソフトウェア ANSYS を用いて、表面形状の異なる異形鉄筋とコンクリート間の付着挙動の評価を試みた。

3.1 解析モデルの概要

(1) 材料モデル

(a) コンクリート

コンクリートの応力-ひずみ(σ - ϵ)分布は、Desayi and Krishnan¹⁰⁾モデルおよび New RC 式¹¹⁾を用いモデル化した。Desayi and Krishnan による σ - ϵ 関係式を式(2)に示す。

$$f = \frac{E \cdot \epsilon}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^2} \quad (2)$$

ここで、 f : 任意のひずみにおける圧縮応力(N/mm²)

ϵ : 任意のひずみ

ϵ_c : 圧縮強度におけるひずみ

E : 静弾性係数(N/mm²)

圧縮強度におけるひずみ ϵ_c は、上記の σ - ϵ 関係式同様、Desayi and Krishnan が提案する式(3)より算出した。

$$\epsilon = \frac{2f_c}{E} \quad (3)$$

ここで、 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

さらに、静弾性係数 E は、JASS 5 による New RC 式(4)を用いて算出した。

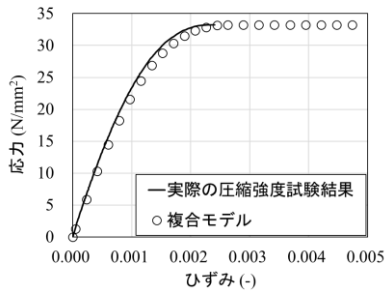


図-7 コンクリートの応力-ひずみモデル

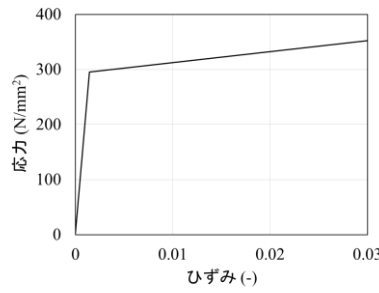


図-8 鉄筋の応力-ひずみモデル

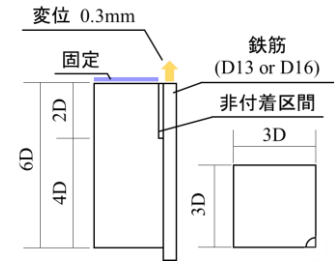


図-9 モデル概要および境界条件

表-5 コンクリートの破壊パラメータ

亀裂開口のせん断伝達係数	0.35
亀裂閉口のせん断伝達係数	1
引張強度(N/mm ²)	2.77

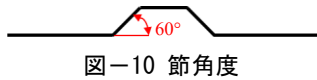


図-10 節角度

$$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{f_c}{60}\right)^3 \quad (4)$$

ここで、 k_1 ：粗骨材の種類により定まる修正係数(=1.0)

k_2 ：混和材の種類により定まる修正係数(=1.0)

γ ：単位容積質量(t/m³) (=2.4)

以上の算出式を用い、コンクリートの σ - ε 分布をモデル化した。モデル化したコンクリートの σ - ε 分布を図-7に示す。

コンクリートの圧縮強度は、表-4より 33.2N/mm²とし、ポアソン比は 0.18 とした。さらに、割裂引張強度は 2.77N/mm²(圧縮強度の 1/12)とすることで、コンクリートの引張挙動も考慮した。

(b) 鉄筋

鉄筋の σ - ε 分布を図-8に示す。鉄筋の σ - ε 分布は、2直線等方硬化則に基づきモデル化した。鉄筋の降伏強度は、JIS G 3112 に定める 295N/mm²とした。また、静弾性係数を 2.0×10^5 N/mm²、ポアソン比を 0.3、接線係数(図-8における、鉄筋降伏後の傾き)を 2000 N/mm²(静弾性係数の $1/100^{12}$)とした。

(c) 鉄筋-コンクリートの界面

鉄筋とコンクリートの付着挙動においては、鉄筋とコンクリートの界面で摩擦が生じる。本研究では、摩擦係数および最大摩擦応力を設定することにより、鉄筋-コンクリート界面の挙動の再現を試みた。なお、本研究では摩擦係数を 0.3¹³⁾、最大摩擦応力を式(5)¹⁴⁾より 19.185N/mm²とした。

$$F_{max} = \frac{f_c}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

ここで、 F_{max} ：最大摩擦応力(N/mm²)

f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

(2) 要素タイプ

(a) コンクリート

コンクリートの要素タイプには、1つの六面体要素に対して8つの節点をもち、かつコンクリート特有のひび割れや破壊を再現可能な 3D 要素(SOLID65)を採用した。本モデルでは、コンクリートの各要素に対し3つの破壊パラメータ(亀裂開口のせん断伝達係数、亀裂閉口のせん断伝達係数、引張強度)を適用することで、コンクリートの破壊挙動を表現している。本解析で用いた3つの破壊パラメータの値を表-5にまとめる。

(b) 鉄筋

鉄筋の要素タイプには、1つの六面体要素に対して8つの節点をもつ 3D 要素(SOLID185)を採用した。

(c) 鉄筋-コンクリートの界面

コンクリートの界面要素には、1つの六面体要素に対して8つの節点をもち、かつ接触面において変形しやすい材料側の界面要素(CONTA174)を採用した。本モデルでは、各コンクリート側の界面要素に対し、3.1.(1)項に述べた摩擦係数および最大摩擦応力を適用することで、鉄筋側の界面要素との間に生じる接触やすべりを再現した。一方、鉄筋の界面要素には TARGE170 を採用した。

(3) 解析水準およびモデルの概要

解析水準は、異形鉄筋の表面形状(表-1)および鉄筋径とした。なお、本解析ではらせん筋の無い試験体のみを対象としている。また、モデルの寸法と形状を図-9に示す。モデルの寸法および形状は、2.2に述べた引抜試験体と同形状とした。ただし、解析時間の短縮を目的とし、解析に用いるモデルは引抜試験体の 1/4 サイズとした(図-9)。なお、図-10に示すように、モデル作製の都合上すべての節角度を 60° とした。またクロス節においては、形状の複雑さからある要素が大きくひずむことで、数値計算が発散することが想定される。したがって、解析の収束を目的とし、クロス節のみリブを設けずに解析を行った。

(4) 境界条件

境界条件はコンクリート上面を固定とし、載荷端側の鉄筋には 0.3mm の荷重変位を与えた。さらに、要素分割においては、最大寸法当たりのメッシュサイズが全水準で同値となるように要素を生成した。なお、境界条件の概要は図-9の通りである。

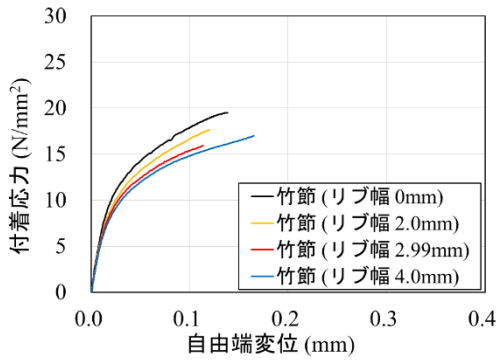


図-11 解析結果(D13, リブ幅の影響)

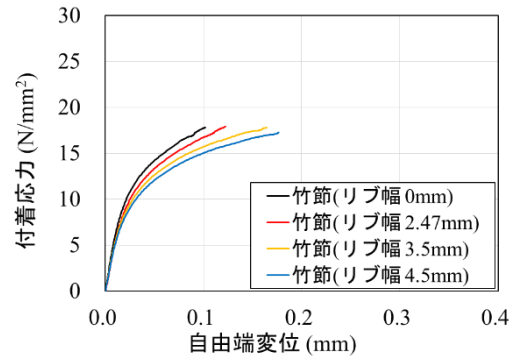


図-12 解析結果(D16, リブ幅の影響)

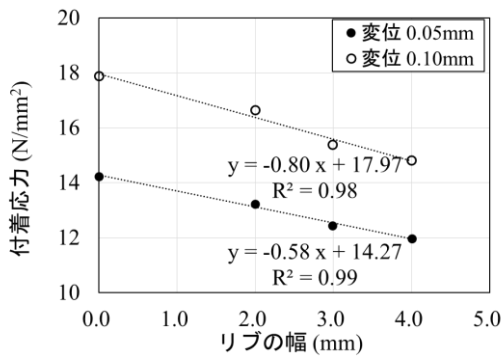


図-13 付着応力とリブ幅の関係(D13)

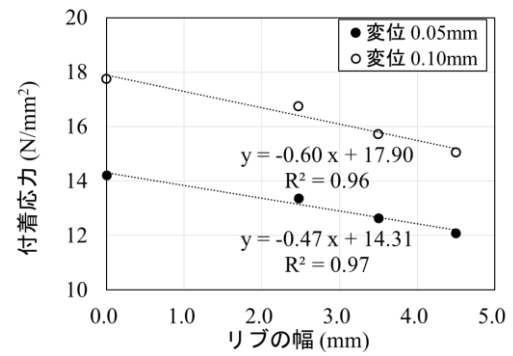


図-14 付着応力とリブ幅の関係(D16)

3.2 解析結果および考察

(1) クロス節のリブを考慮した場合の付着応力予測

上述したように、本解析ではクロス節にリブを設けていない。そこで、リブを有するクロス節の付着応力の大きさを予測するため、D13 竹節およびD16 竹節を対象に、リブ幅が付着応力に及ぼす影響を検討した。D13 においては、リブ幅を 0.00mm, 2.00mm, 2.99mm, 4.00mm, D16 においては、リブ幅を 0.0mm, 2.47mm, 3.5mm, 4.5mm として検討を行った。ここで、D13 においては 2.99mm, D16 においては 2.47mm がリブ幅の実測値である(表-1)。リブ幅を水準とした D13 および D16 竹節の解析結果を図-11 と図-12 に示す。また、自由端変位が 0.05mm および 0.10mm 時の各リブ幅における付着応力を図-13 および図-14 に示す。なお、自由端変位は鉄筋とコンクリートの変位の差分より算出した。

図-11 および図-12 より、リブ幅が大きくなるほど付着応力は低下する傾向にある。これは、リブ幅の増大により節の支圧面積が小さくなるのが影響を及ぼしたと推察される。したがって、本解析におけるクロス節においてはリブを作製していないことから、付着応力は実際にリブを有する形状よりも大きくなると考えられる。

また、図-13 より、D13 竹節の場合リブ幅が 1mm 増加するごとに付着応力は約 4%減少する。ここで表-1 より、D13 クロス節のリブ幅は 1.29mm である。したがって、リブを有する D13 クロス節の解析においては、リブを有さない場合と比較して付着応力は約 5%減少すると

推測される。同様の検討を D16 でも実施をすると、D16 クロス節においては、リブを考慮することにより付着応力は約 5%減少すると推測される(図-14)。以上より、後述する図-15 および図-16 においては、リブを有するクロス節の付着応力を上述した減少率から算出することで、クロス節の τ -s 関係を示した。

(2) 鉄筋の節高さおよび節間隔の影響

D13, D16 における竹節、ねじ節およびクロス節の解析結果を図-15 および図-16 に示す。なお、図-15 および図-16 には、2で行った引抜試験の実験結果の平均値を示す。

竹節とクロス節の解析結果に着目をする。D13 の場合、クロス節の付着応力は竹節の付着応力より大きい。一方 D16 の場合、竹節の付着応力はクロス節の付着応力より大きい。これは、表-1 に示す通り、D13 の場合 H/L は竹節に比べクロス節のほうが大きいこと、D16 の場合 H/L はクロス節に比べ竹節の方が大きいことに起因すると推察される。したがって、異なる表面形状の異形鉄筋において、H/L は付着性能に影響を及ぼすことが解析的にも明らかとなった。

続いてねじ節の解析結果に着目をする。ねじ節の付着応力は、鉄筋径によらず竹節およびクロス節に比べ大きい。これは、引抜試験時に確認されたねじ節特有のせん断破壊(写真-1, 写真-2)を本解析において適切に再現することができていないためであると推察される。したがって、せん断破壊を含めたコンクリートの破壊挙動

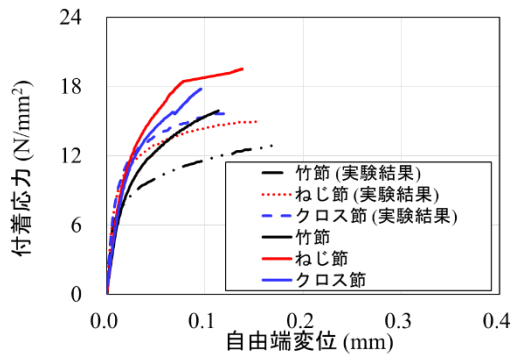


図-15 解析結果(D13)

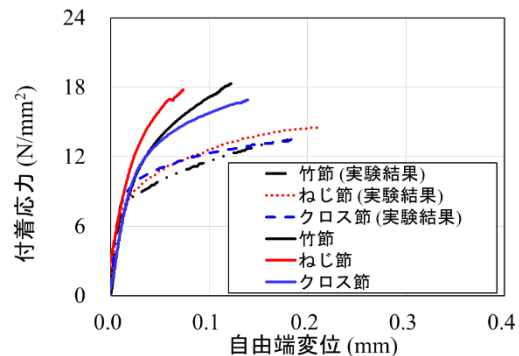


図-16 解析結果(D16)

を適切に再現するためには、モデルを改定し解析環境を再構築する必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 引抜試験においては、節の高さと節の間隔の比(H/L)が付着性能に影響を及ぼすことが改めて確認された。一方で、H/Lの大きいねじ節においては付着応力が小さくなることが確認された。
- 2) リブ幅が大きくなると、付着応力は小さくなる傾向にあり、リブ幅と付着応力は負の相関関係にある。
- 3) 有限要素法によるメゾスケール解析においては、H/Lが付着性能に影響を及ぼすことが確認された。一方で、解析におけるねじ節の付着応力は大きな値を示す傾向にあることから、本実験のメゾスケール解析においては、コンクリートの破壊を含む付着挙動の再現は困難であることが示唆された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H02302 の助成を受けたものである。本研究の実施にあたり、国土技術政策総合研究所 向井智久氏、東京理科大学 宮津裕次准教授、建築研究所 西尾悠平氏、日本原子力研究開発機構 諸岡聡氏ほか、多くの皆さまのご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 水越一晃ら：大規模非線形 FEM 解析を用いた RC 建物の構造設計に関する研究，大林組技術研究所報，No.84，pp.1-6，2020
- 2) 宍倉佳浩ら：水平二方向載荷を受ける実規模 RC 部材のせん断破壊挙動に関する解析的研究，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.77，No.4，pp.I-174-I-183，2021
- 3) 相馬悠人ら：界面の摩擦接触を考慮した損傷モデル

による鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション，土木学会論文集 A2，Vol.75，No.2，pp.I-165-I-173，2019

- 4) 武藤信太郎ら：メゾスケール解析による異形鉄筋の付着挙動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.763-768，2005
- 5) A.P. Clark：Comparative Bond Efficiency of Deformed Concrete reinforcing Bars，ACI Journal Proceedings，Vol.43，No.11，pp.381-400，1946
- 6) 国分正胤ら：太径鉄筋の使用に関する研究，土木学会論文報告集，No.202，pp.103-113，1972
- 7) 村田二郎ら：引抜き試験にとる異形鉄筋の付着強度に関する研究，土木学会論文集，Vol.1，No.348，pp.113-122，1984.8
- 8) G. Rehm：Über die Grundlagen des Verbundes Zwischen Stahl und Beton，Deutscher Ausschuss für Stahlbeton，No.138，pp.59，1961
- 9) L.A. Lutz，P. Gergely：Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete，ACI Journal，Proceedings Vol.64，No.11，pp.711-721，1967
- 10) P. Desayi，S. Krishnan：Equation for the Stress Strain Curve of Concrete，Journal of American Concrete Institute，Vol.61，pp.345-350，1964
- 11) 日本建築学会：建築工事標準示方書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，p.213，2022
- 12) 日本コンクリート工学協会：構造技術者のための非線形有限要素法の基礎と応用と実例，日本コンクリート工学協会，p.172，2008.9
- 13) Weiping Zhao，B. Zhu：Basic parameters test and 3D modeling of bond between high-strength concrete and ribbed steel bar after elevated temperatures，International Federation for Structural Concrete，Vol.18，pp.653-667，2017
- 14) ANSYS，Inc：ANSYS Mechanical APDL Element Reference，2022