

論文 細径異形鉄筋とコンクリート間の付着応力 - すべり関係のモデル化

乾 智洋*1・大野 義照*2・中川 隆夫*3

要旨：鉄筋コンクリート(RC)のスラブや壁に用いられる D13 を中心とした細径異形鉄筋とコンクリート間の付着応力(τ) - すべり(s)関係に及ぼすコンクリート強度, 鉄筋径およびかぶり厚さの影響を RC プリズムの両引き試験によって調べた。細径鉄筋では鉄筋降伏まですべり(s)の増大とともに付着応力(τ)は増大した。鉄筋径(D10, D13, D16)とかぶり厚さ(34~64mm)の τ - s 関係に及ぼす影響は小さく, コンクリート強度のみを変数とする完全弾塑性型の bi-linear で τ - s 関係を求め, その関係式を用いて両引き試験体の鉄筋端部すべり量の付着解析を行い, そのモデル式の適合性を評価した。

キーワード：付着応力 - すべり関係, コンクリート強度, 鉄筋径, かぶり厚さ, モデル化

1. はじめに

鉄筋とコンクリート間の付着応力(τ)とすべり(s)関係は鉄筋コンクリート(以下 RC と略記)部材の変形やひび割れ性状に直接関与することから多くの研究^{1),2),3)}があるが, それらの研究では, 柱や梁の主筋として用いられる D19 ~ D32 の異形鉄筋が対象とされ, 通常建築のスラブや壁に用いられる D13 などの細径異形鉄筋の付着特性に関する実験は少ない。前報⁴⁾では D13 を主にコンクリート強度, かぶり厚さおよび荷重方法(両引き試験, 片引き試験)の τ - s 関係に及ぼす影響を調べた。前報⁵⁾ではコンクリート強度の範囲を高強度(100N/mm² 以上)まで広げ, コンクリート強度, かぶり厚さおよび鉄筋ふし形状の影響を調べた。これらの実験において細径異形鉄筋の τ - s 関係では鉄筋が降伏するまですべり(s)の増大とともに付着応力(τ)が増加した。また, かぶり厚さの τ - s 関係への影響は認められなかった。前報⁵⁾ではこれらの結果をもとにコンクリート強度および鉄筋径を変数とする初期勾配を K_1 , 2次勾配を K_2 とする bi-linear 型の τ - s 関係式を求めている。

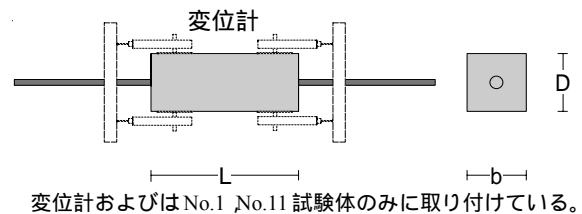
本報では, まず, かぶり厚さの τ - s 関係に及ぼす影響を再確認するために, 前報⁵⁾ではかぶり厚さに応じて試験体長を変えていたので, 新たに試験体長さを要因に加えて両引き試験を行った。あわせて, コンクリート強度と鉄筋径の影響も調べている。次に, これらの今回の実験データと前報⁵⁾の実験データをもとに, より付着解析に便利なように τ - s 関係を二次勾配のない完全弾塑性型の bi-linear 式にて表し, その関係式を用いて鉄筋ひずみ分布や端部の鉄筋すべり量の付着解析を行い, その適合性を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類と形状

試験体の形状を図 - 1 に, 試験体の種類を表 - 1 に示す。本実験では, 鉄筋へのゲージ貼付による影響を調べる目的で, No.1, No.11 試験体においては, 変位計(500 μ /mm)により端部抜け出し量を測定している。試験体長さは荷重中にひび割れが生じないように決め⁴⁾, 試験体は各 2 体作製した。ただし, No.8, No.9 試験体についてはかぶり厚さの影響をみるため No.6, No.7 試験体と同じ試験体長さとした。

鉄筋径 D13, コンクリートの呼び強度 24N/mm², かぶり厚さ 54mm, として作製した試験体(No.1 試験体)を基



変位計およびは No.1, No.11 試験体のみに取り付けている。

図 - 1 試験体の形状

表 - 1 試験体の種類

試験体	鉄筋の呼び名	呼び強度 (N/mm ²)	かぶり厚さ (mm)	b × D × L (mm)
1(08)	D13	24	54	120 × 120 × 300
2(08)	D13	44	54	120 × 120 × 300
3(08)	D13	60	54	120 × 120 × 300
4(08)	D10	24	55	120 × 120 × 300
5(08)	D16	24	52	120 × 120 × 300
6(08)	D13	24	34	80 × 80 × 200
7(08)	D13	24	44	100 × 100 × 200
8(08)	D13	24	54	120 × 120 × 200
9(08)	D13	24	64	140 × 140 × 200
10(08)	D13	24	64	140 × 140 × 400
11(08)	D13	24	54	120 × 120 × 300

注) b, D, L は図 - 1 を参照

注) No.11 試験体ではコンクリート内部の鉄筋に箔ゲージを貼付していない。

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*2 大阪大学 先端科学イノベーションセンター特任教授 工博 (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 助教 博(工) (正会員)

準とし、鉄筋径(D10, D13, D16), コンクリート強度(呼び強度 24, 44, 60 N/mm^2), およびかぶり厚さ(34, 44, 54, 64mm)を要因とした。

2.2 使用材料

コンクリートには普通ポルトランドセメント, 川砂および最大粒径 20mm の碎石を用い, 水セメント比は 57%, 40%, 29%とした。試験時のコンクリートの力学的性質を表 - 2 に示す。鉄筋は図 - 2 に示す横ふし異形鉄筋を使用した。表 - 3 に鉄筋の力学的性質を示す。鉄筋のヤング係数は鉄筋の公称断面積から算出した。

表 - 2 コンクリートの力学的性質

呼び強度 [N/mm^2]	圧縮強度 [N/mm^2]	割裂強度 [N/mm^2]	ヤング係数 [kN/mm^2]
24	29	2.23	28.2
44	52	3.37	33.7
60	85	4.46	39.8

表 - 3 鉄筋の力学的性質

鉄筋の呼び名	降伏強度 [N/mm^2]	ヤング係数 [N/mm^2]	降伏ひずみ [μ]
D10	386	1.86×10^5	2141
D13	383	1.90×10^5	2038
D16	354	1.92×10^5	1903

2.3 載荷および測定方法

試験体は載荷日まで湿布養生を行い, コンクリート材齢 30 ~ 33 日に 100 t アムスラー試験機を用いて載荷を行った。鉄筋ひずみは, 50mm 間隔で鉄筋側面に貼付した検長 1mm の箔ゲージにより測定した。なお, 箔ゲージ貼付のために鉄筋のふしを削ることによる付着性能の低下を考慮し, 箔ゲージは図 - 2 のように鉄筋の縦リブに貼付し, コーティングを行った。

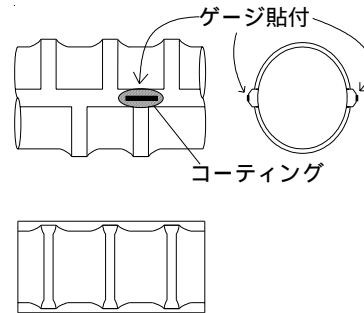


図 - 2 鉄筋形状とゲージ貼付位置

3. 実験結果および考察

3.1 τ - s 関係

図 - 3 に試験体 No.1 ~ No.10 (ただし, 同種 2 体のうち 1 体) の τ - s 関係を示す。 τ および s は各ゲージ区間

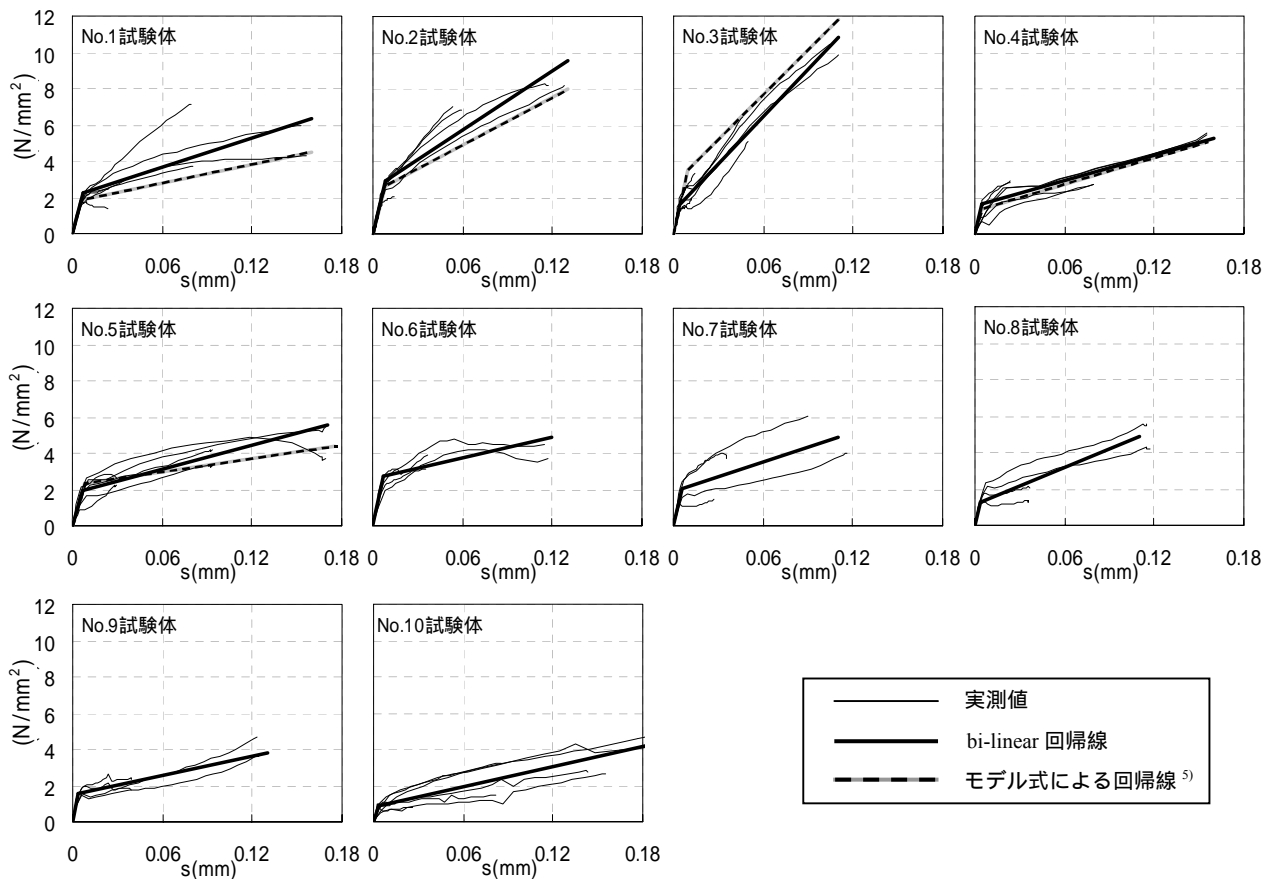


図 - 3 τ - s 関係

において、 τ は鉄筋ひずみ分布の傾きから求め、 s は試験体中央から当該のゲージ区間中央までのひずみの積分から求めた。ただし、コンクリートの引張ひずみは小さいことから無視している。なお測定値は各試験体の鉄筋が降伏するまでの値を用いており、後述の回帰線においても τ - s 関係におけるすべり量(s)の最大値までを示している。

τ - s 関係は全般にすべり s がある値を越えると付着剛性が低下している。これは鉄筋のふし周辺の内部ひび割れの発生によるものと考えられる。その後、鉄筋の降伏まですべり s の増加とともに τ は増加している。ただし、かぶり厚さの小さい試験体 No.6 では $s=0.05 \sim 0.06\text{mm}$ において τ は最大となっている。D19 の鉄筋を使用した既報³⁾の実験では、 τ - s 関係はある付着応力(τ_{\max})に達するとすべり量の増加とともに付着応力が減少した。また、D25 の定着長の長い引き抜き試験¹⁾においても τ_{\max} に達している。本実験では、D16 の鉄筋を用いた No.5 試験体において同様の傾向が見られたが、D10、D13 の鉄筋を用いた試験体では No.6 試験体を除いて鉄筋降伏までに

τ_{\max} まで達していない。これは、D10、D13 はふし高さが低く、ふし間隔は狭いため、ふしからの内部ひび割れ幅も狭いのですべりが大きくなっても付着応力が低下しなかったものと考えられる。

同図中には τ - s 関係を最小二乗法により近似した bi-linear 回帰線を太線で、試験体 No.1 ~ No.5 については前回の報告⁵⁾で提案したモデル式による回帰線を太点線で示している。2つの線はほぼ一致している。なお bi-linear 回帰線は以下のようにして求めた。鉄筋ひずみの実測値から得た τ - s 関係においてすべり量 $s=0.005\text{mm}$ 付近において剛性の変化が見られるので、bi-linear 回帰線の初期剛性 K_1 は $s = 0.005\text{mm}$ における回帰直線の傾きとし、2次剛性 K_2 は $s > 0.005\text{mm}$ における回帰直線の傾きとした。また 2本の回帰直線の交点のすべり量の値を剛性変化時のすべり量 s_a とした。

表 - 4 に各試験体における付着特性値を、図 - 4 に要因ごとに示した τ - s 関係を示す。なお、同図に示す τ - s 関係には、2体ずつ作製した試験体の平均値を用いている(以下同様)。 τ - s 関係の特徴および各要因の付着特性値(K_1 、 K_2 、 s_a)への影響について以下に述べる。

表 - 4 各試験体における付着特性値

試験体	鉄筋径	コンクリート強度 (N/mm^2)	かぶり厚さ (mm)	試験体長さ (mm)	K_1 (N/mm^3)	K_2 (N/mm^3)	s_a (mm)
1 (08)	D13	29	54	300	307	25	0.00738
2 (08)	D13	52	54	300	346	55	0.00849
3 (08)	D13	85	54	300	376	83	0.00484
4 (08)	D10	29	55	300	306	26	0.00636
5 (08)	D16	29	52	300	295	15	0.00678
6 (08)	D13	29	34	200	379	13	0.00805
7 (08)	D13	29	44	200	339	27	0.00612
8 (08)	D13	29	54	200	360	36	0.00521
9 (08)	D13	29	64	200	384	18	0.00409
10 (08)	D13	29	64	400	252	18	0.00398

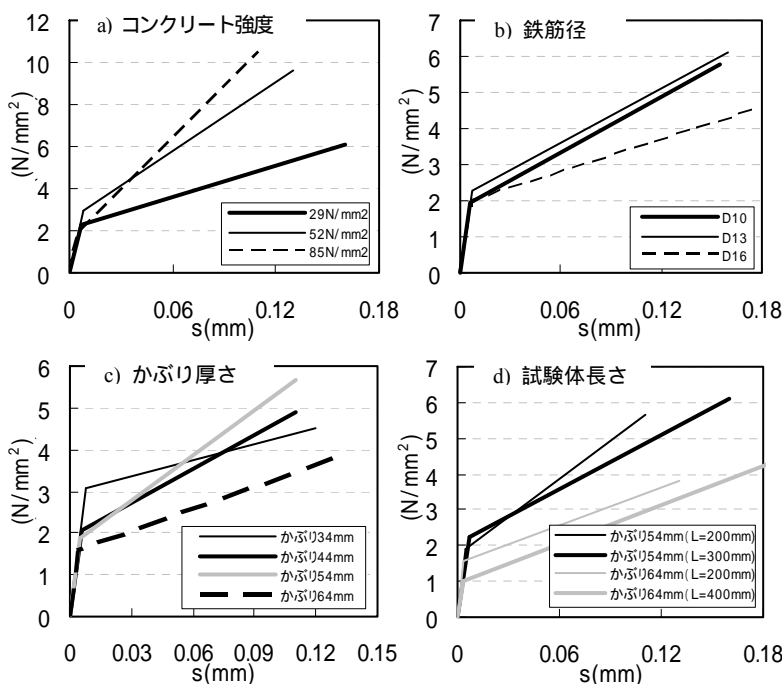


図 - 4 要因ごとに示した τ - s 関係

コンクリート強度の増加とともに、 K_1 はわずかに増加し、 K_2 は著しく増加した。 s_a には明確な傾向がみられなかった。

鉄筋径については、前報⁵⁾で径の増加とともに鉄筋のふし高さが増大するため、 K_1 は大きくなる傾向を報告しているが、本実験では K_1 は鉄筋径によらずほぼ一定であった。また内部ひび割れが発生すると、D16 の剛性は大きく低下し、 K_2 は小さくなった。 s_a には明確な傾向がみられなかった。

かぶり厚さについては、かぶり厚さの大きい方が K_1 は大きくなる傾向が見られるもののその差は小さい。No.6 試験体ではかぶり厚さが小さいためコンクリートの拘束力が小さく、付着応力は最大値(τ_{\max})に達している。そのため、No.6 試験体の bi-linear 回帰線については τ_{\max} に達した後の実測値も含めて最小二乗法により近似を行っているので K_2 は小さく、 s_a は大きな値となった。その他の試験体については K_2 および s_a にかぶり厚さによる明確な影響がみられなかった。

同じかぶり厚さで試験体長さの異なる試験体では、試験体長さが長い方が K_1 の値が小さくなる傾向が見られ、 K_2 、 s_a については明確な傾向は認められなかった。

4. τ - s 関係のモデル化

τ - s 関係のモデル化による違いが鉄筋のひずみ分布および端部抜け出し量に及ぼす影響を調べる目的で、付着解析を行った。図-5に4つの τ - s モデルを示す。モデルAは前述の3.1節に示した最小二乗法による近似線で2次勾配型である。モデルBはモデルAと同値の初期剛性(K_1)を持ち、モデルAと積分値が同じ値となるように B を与え、完全弾塑性型とした。モデルCはモデルAと同じ積分値をとり、同図に示す S の面積が最小となるように K_C および s_c を与え、完全弾塑性型とした。モデルDは τ - s 関係のすべり量 s_b までの実測値からモデルAと同様に最小二乗法により近似を行い、その初期剛性(K_D)と同じ積分値をとるように与えた D を持つ完全弾塑性型とした。すべり量 s_b は各試験体における鉄筋の長期許容応力度($\sigma=220\text{N/mm}^2$)までの実測値から決定している。

図-6に1例としてNo.1試験体のひずみ分布を示す。印は6つの荷重階(鉄筋応力度50,100,150,200,250,300 N/mm^2)における実測値を、曲線はモデルA~Dを用いた付着解析結果を示している。2次勾配型に近似したモデルAは最も実測値を捉えているが、完全弾塑性型の

モデルBでも十分な解析精度を持っている。モデルCは鉄筋応力の小さいレベルでは中央部の鉄筋ひずみを大きめに算出し、モデルDは鉄筋応力の大きいレベルで鉄筋ひずみが直線的な分布に算出される結果となった。

次に鉄筋の端部すべり量を調べるため、No.1試験体における鉄筋ひずみの積分から求めた値およびモデルA~Dを用いた解析値を図-7に示す。図中のひずみの積分値は実測の鉄筋ひずみ分布の積分によって求めた端部すべり量の計算値で、モデルA~Dは前述の解析モデルを用いた解析結果から求めた端部すべり量である。モデル

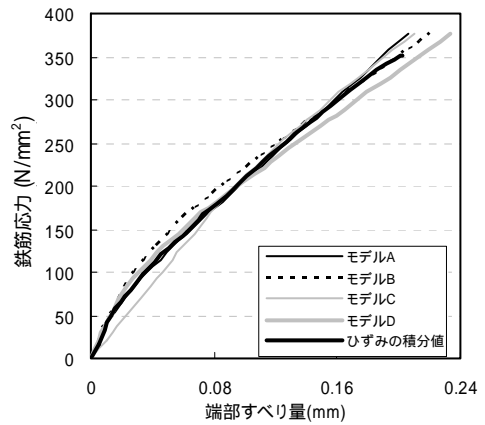


図-7 鉄筋応力 - 端部すべり量関係

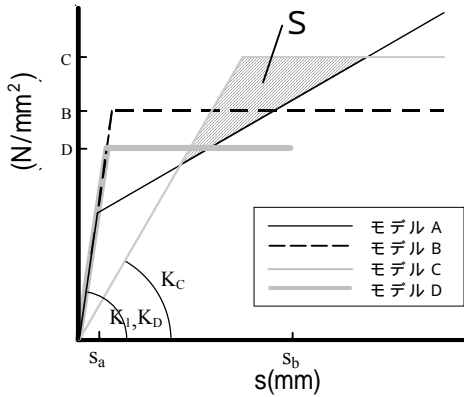


図-5 τ - s モデル

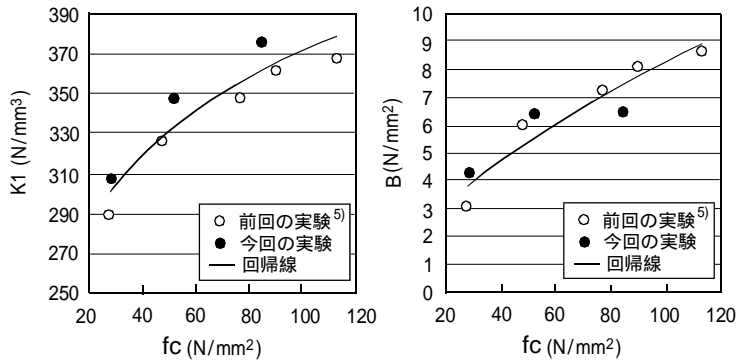


図-8 付着特性値とコンクリート強度の関係

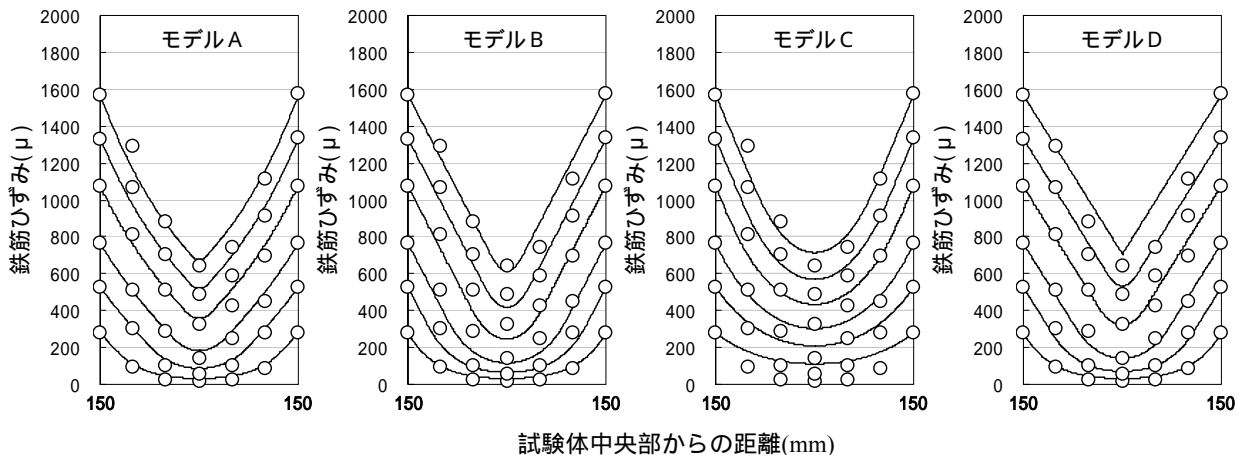


図-6 鉄筋ひずみ分布(No.1試験体) (実測値 - 解析値)

C は鉄筋応力が小さい範囲では端部すべり量を大きめに算出し、モデルDは鉄筋応力が大きい範囲では端部すべり量を大きめに算出する結果となった。計算値とそれぞれのモデルを用いた解析値を比較すると、モデルの形や特徴により鉄筋ひずみ分布に違いが見られるが、端部すべり量は全体的にいずれの解析値も計算値をよく捉えており、各近似式による差異は小さいと言える。一方、鉄筋ひずみ分布や鉄筋のすべり量を求める付着解析において、2次勾配のないモデルB、Cのほうが解析は格段に容易である。そこでモデルの簡便さから τ - s 関係を完全弾塑性型で近似している回帰線 B の付着特性値(K_1 , B)を用いたモデル式の提案を行う。

表 - 5 にモデル B の付着特性値(K_1 , B)を示す。モデル式の提案では本実験結果および前回⁵⁾の実験データを対象とし、傾向が明瞭であったコンクリート強度のみをモデル化の要因とした。

かぶり厚さ 54mm、試験体長さ 300mm でコンクリート強度が異なる 8 つの試験体の各付着特性値とコンクリート強度の関係を図 - 8 に示す。同図中にはそれぞれの最小二乗法による回帰線も記している。以下に付着特性値の回帰式(モデル式)を示す。

表 - 5 各試験体における付着特性値

(前回の実験)

試験体	鉄筋径	コンクリート強度 (N/mm ²)	かぶり厚さ (mm)	試験体長さ (mm)	K_1 (N/mm ³)	B (N/mm ²)
1 (07)	D13	28	54	300	289	3.04
2 (07)	D13	48	54	300	326	5.95
3 (07)	D13	77	54	300	347	7.18
4 (07)	D13	90	54	300	361	8.07
5 (07)	D13	113	54	300	367	8.65

(今回の実験)

試験体	鉄筋径	コンクリート強度 (N/mm ²)	かぶり厚さ (mm)	試験体長さ (mm)	K_1 (N/mm ³)	B (N/mm ²)
1 (08)	D13	29	54	300	307	4.23
2 (08)	D13	52	54	300	346	6.34
3 (08)	D13	85	54	300	376	6.44
4 (08)	D10	29	55	300	306	4.28
5 (08)	D16	29	52	300	295	3.24
6 (08)	D13	29	34	200	379	3.80
7 (08)	D13	29	44	200	339	3.51
8 (08)	D13	29	54	200	360	3.83
9 (08)	D13	29	64	200	384	2.70

表 - 6 解析ケース

case	コンクリート強度 (N/mm ²)	鉄筋径	かぶり厚さ (mm)	試験体長さ (mm)	備考
A	28	D13	54	300	1 (07)
B	29	D13	54	300	1 (08)
C	48	D13	54	300	2 (07)
D	52	D13	54	300	2 (08)
E	77	D13	54	300	3 (07)
F	85	D13	54	300	3 (08)
G	90	D13	54	300	4 (07)
H	113	D13	54	300	5 (07)
I	29	D10	55	300	4 (08)
J	29	D16	52	300	5 (08)
K	29	D13	34	200	6 (08)
L	29	D13	44	200	7 (08)
M	29	D13	54	200	8 (08)
N	29	D13	64	200	9 (08)

備考は表 - 5 の試験体記号を示す

$$K_1 = 173 \times f_c^{0.166} \quad (\text{N/mm}^3) \quad (1)$$

$$\tau_B = 0.484 \times f_c^{0.617} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

ここに f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

定着長が長い場合の引き抜き試験の結果から付着強度は f_c の 2/3 乗で与えられている^{1),2)}が、本報でもほぼ同じ値が得られた。

次に、ここで提案する

表 - 7 端部すべり量

case	計算値 (mm)	解析値 (mm)
A	0.097	0.112 (1.15)
B	0.104	0.104 (1.00)
C	0.080	0.090 (1.12)
D	0.085	0.082 (0.97)
E	0.070	0.073 (1.05)
F	0.078	0.067 (0.85)
G	0.062	0.069 (1.11)
H	0.058	0.064 (1.10)
I	0.098	0.086 (0.88)
J	0.126	0.117 (0.93)
K	0.081	0.085 (1.06)
L	0.088	0.085 (0.96)
M	0.088	0.085 (0.96)
N	0.098	0.085 (0.87)

()内は解析値/計算値

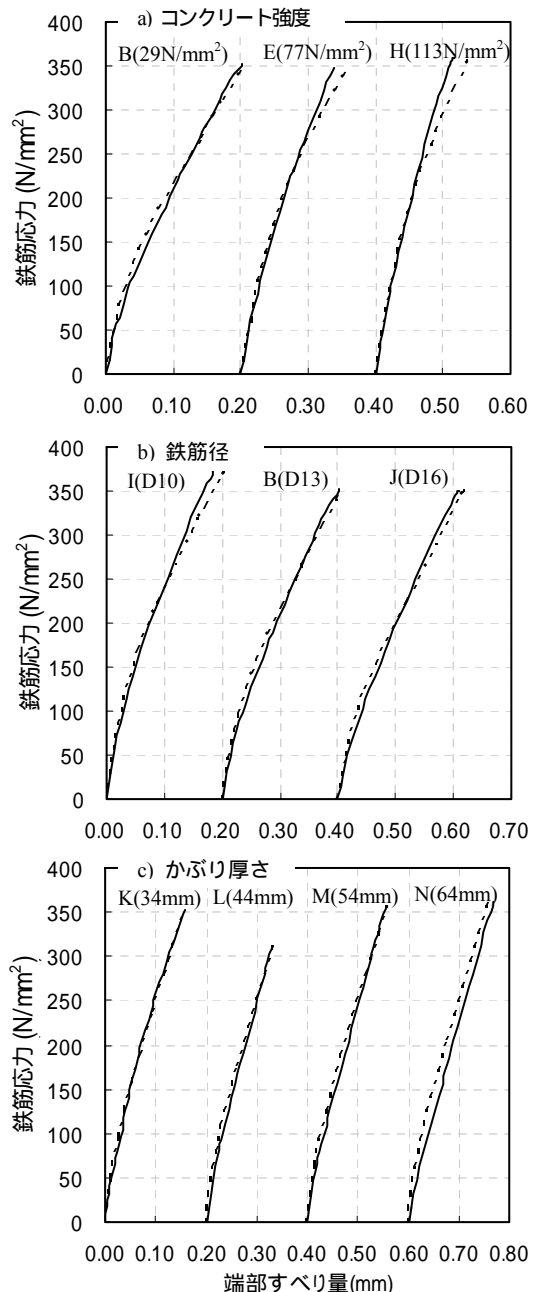


図 - 9 各要因における鉄筋応力 端部すべり量

τ - s モデル式の適合性を検討するために同式を用いて端部すべり量を付着解析によって求めた。表 6 に解析ケースを示す。解析ケースは表 5 の網掛け部分のコンクリート強度(28, 29, 48, 52, 77, 85, 90, 113 N/mm²), 鉄筋径(D10, D13, D16), およびかぶり厚さ(34, 44, 54, 64mm, ただし試験体長さは 200mm)を要因とした。解析は式(1), (2)から算出した付着特性値を持つ完全弾塑性型の τ - s モデルを用いて行った。図 - 9 に各要因(コンクリート強度, 鉄筋径, かぶり厚さ)における鉄筋応力 - 端部すべり関係を示す。コンクリート強度は 1 例として 29N/mm², 77 N/mm², 113 N/mm² の場合を示している。また図中の実線は鉄筋ひずみの実測値の積分による端部すべり量の計算値, 破線は解析値である。コンクリート強度が大きくなると鉄筋応力が増加するにつれ, 解析値は端部すべり量を過大評価する傾向がみられるが, 長期許容応力度では両者はほぼ一致している。鉄筋径およびかぶり厚さの違いによって両者に大きな差は見られなかった。表 7 に各解析ケースにおける長期許容応力度($\sigma=220\text{N/mm}^2$)における端部すべり量の計算値および解析値を, 図 - 10 に caseA ~ caseN における端部すべり量の計算値と解析値の比較分布図を示す。図中灰色線は 20% の誤差範囲を示しており, 解析値は計算値をよく捉えているといえる。

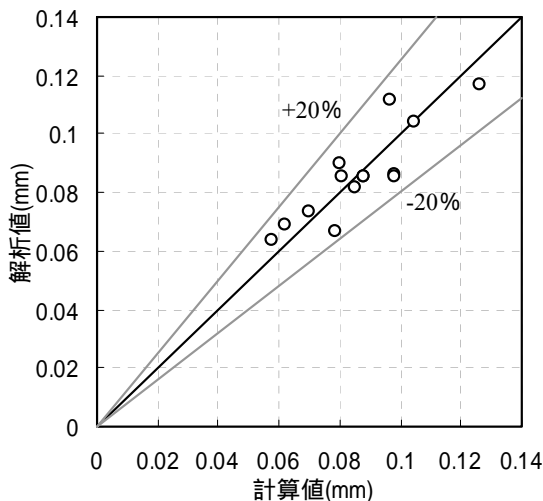


図 - 10 端部すべり量の計算値と解析値の比較

5. まとめ

D13 を主とした細異形鉄筋の両引き付着試験から得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 付着応力(τ) - すべり(s)関係は全般にすべり s がある量を越えると付着剛性は低下するが, その後もすべり s の増加とともに τ は増加している。
- 2) τ - s 関係を最小二乗法により bi-linear 回帰線に近似すると, コンクリート強度の増加とともに初期剛性 K_1 , 2次剛性 K_2 が増加する傾向にあるが, 剛性変化時のすべり量 s_a は明確な傾向がみられなかった。
- 3) 4つの τ - s モデルを用いた付着解析によって求めた鉄筋ひずみ分布および端部抜け出し量の違いは, モデルの形により両者にそれぞれ特徴は見られるが, 全体的に解析値は実測値をよく捉えていた。
- 4) コンクリート強度を要因に τ - s 関係を完全弾塑性型の bi-linear にモデル化し, 定式化した各付着特性値は次のようになる。

$$K_1 = 173 \times f_c^{0.166} \quad (\text{N/mm}^3)$$

$$\tau_B = 0.484 \times f_c^{0.617} \quad (\text{N/mm}^2)$$
ここに f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)
- 5) 定式化した付着特性値を用いた付着解析により求めた各試験体の端部すべり量は鉄筋ひずみ実測値より求めた計算値をよく捉えている。

参考文献

- 1) 山尾芳秀ほか: 付着応力 - すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 343 号, pp.219-228, 1984.3
- 2) 島弘ほか: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力 - すべり - ひずみ関係, 土木学会論文集第 378 号, pp.165-174, 1987.2
- 3) 大野義照ほか: 持続荷重下における異形鉄筋とコンクリート間の付着応力 ~ すべり関係, 日本建築学会構造系論文集 459 号, pp.111-120, 1994.5
- 4) 吉村満ほか: 鉄筋とコンクリート間の付着応力 - すべり関係に及ぼす各種要因の影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.29, No.3, pp.613-618, 2007
- 5) 乾智洋ほか: 鉄筋とコンクリート間の付着応力 - すべり関係に及ぼすコンクリート強度などの影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.30, No.3, pp.709-714, 2008