論文　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

乾　智洋[*1]・吉村　満[*1]・大野　義照[*2]

要旨：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)関係へのコンクリート強度，鉄筋径，かぶり厚さおよびふし形状の影響を調べる目的で両引き試験を行った。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は大きくなり，鉄筋径の増加とともにK_1，剛性変化時のすべりs_a は増加し，K_2は小さくなる傾向にある。かぶり厚さについては明確な傾向はみられず，鉄筋のふし形状についてはK_1への影響はみられなかったが，K_2については差が認められた。また，付着特性値(K_1，K_2，s_a)をもとにコンクリート強度，鉄筋径の影響を考慮しτ－s関係のモデル化を行った。

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，ふし形状

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下RCと略記)部材のたわみやひび割れ幅は，コンクリートと鉄筋間のすべりによって増大する。RCスラブにおいては定着部からの鉄筋の抜け出しによって，さらにたわみは増大する。ひび割れ幅や鉄筋の抜け出しは鉄筋とコンクリート間の付着応力(τ)－すべり(s)関係に依存しており，その付着特性を把握することが重要である。既往の研究[1),2),3)]では，D16，D19，D25およびD32 が中心であり，通常スラブに用いられるD13などの細径異形鉄筋の付着特性に関する実験データは少ない。既報[4)]でD13 を中心に付着特性を把握するための実験を行い，τ－s関係に及ぼす各要因の影響を報告したが，モデル化するまでには至っていない。また近年広く用いられてきている高強度コンクリートにおける，鉄筋とコンクリート間の付着性状は把握されていない。

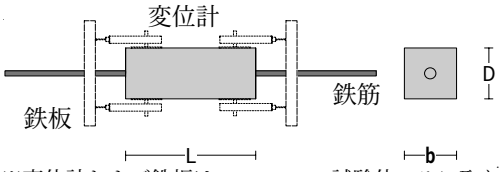
本報では， D13 を中心に鉄筋径，コンクリート強度，かぶり厚さおよび鉄筋のふし形状を実験要因にそれらの τ－s 関係への影響を調べるために，曲げ材の引張域を想定して作成した RC プリズム両引き試験体の単調載荷試験を行い，τ－s 関係のモデル化を行った。

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 試験体，No.17 試験体においては，精度 1/500 の変位計により端部抜け出し量を測定している。試験体長さは，載荷中にひび割れが生じないように決め[4)]，試験体は各 2 体作成した。

鉄筋径D13，コンクリート強度 28N/mm^2，かぶり厚さ 54mm，ふし形状タイプAの鉄筋を用いて作成した試験体(No.1 試験体)を基準とし，鉄筋径(D10，D13，D16)，コ



※変位計および鉄板は No.1, No.17 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	呼び強度 (N/mm^2)	かぶり厚さ (mm)	b×D×L (mm)	ふし形状
1	D13	24	54	120×120×300	A
2	D13	44	54	120×120×300	A
3	D13	64	54	120×120×300	A
4	D13	84	54	120×120×300	A
5	D13	100	54	120×120×300	A
6	D13	24	34	80×80×200	A
7	D13	24	44	100×100×200	A
8	D13	24	64	140×140×300	A
9	D10	24	55	120×120×300	A
10	D16	24	52	120×120×300	A
11	D16	44	52	120×120×300	A
12	D16	64	52	120×120×300	A
13	D16	84	52	120×120×300	A
14	D16	100	52	120×120×300	A
15	D16	24	52	120×120×300	B
16	D16	24	52	120×120×300	C
17	D13	24	54	120×120×300	A

注）b，D，L は**図－１**を参照

注）No.17 試験体ではコンクリート内部の鉄筋には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 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻　教授　工博　(正会員)

ンクリート強度(28，48，77，90，113 N/mm^2)，かぶり厚さ(34，44，54，64mm)，および鉄筋ふし形状(タイプA，タイプB ，タイプC)を要因とした。なお，コンクリート強度の影響はD13 およびD16 の 2 種類の鉄筋径において調べている。

.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の砕石を用い，水セメント比は 57%，40%， 29%，23%， 20%とした。試験時のコンクリートの力学的特性を**表－２**に示す。呼び強度 44，64 及び 84N/mm^{2}のコンクリートは，呼び強度 24N/mm^{2}のレディミクストコンクリートに，本学実験室でセメントを加え，水セメント比の調整を行った。呼び強度 44N/mm^{2}においては圧縮強度用試験体に不備があったので他のコンクリートのセメント水比と強度の関係を最小二乗法により線形近似を行い，その回帰式から，圧縮強度 48 N/mm^{2}を推定した。鉄筋には**図－２**に示すような形状の 3 タイプの横ふし異形鉄筋を使用した。**表－３**に鉄筋の力学的性質および形状寸法を示す。鉄筋のヤング係数は鉄筋の公称断面積から算出している。

2.3 載荷および測定方法

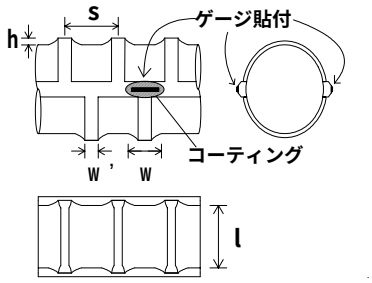
試験体は載荷日まで湿布養生を行い，コンクリート材齢25～29 日に 100 t アムスラー試験機を用いて載荷を行った。鉄筋ひずみは，50mm 間隔で鉄筋側面に貼付した検長 1mm の箔ゲージにより測定した。なお，箔ゲージの貼付のために鉄筋のふしを削ることによる付着性能の低下が起こらないように，箔ゲージは**図－２**のように鉄筋の縦リブに貼付し，コーティングを行った。

3. 実験結果および考察

図－３に基準試験体(No.1 試験体)およびゲージを貼付していない試験体(No.17 試験体)にとりつけた変位計により測定した鉄筋応力と端部抜け出し量との関係を示す。抜け出し量は 2 体の試験体の平均値で示している。両者はほぼ一致しており，鉄筋のリブに箔ゲージを貼付した影響は無視できる。

表－２　コンクリートの力学的性質

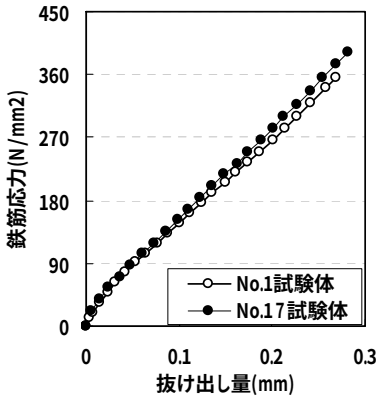
呼び強度 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
24	28	2.24	25.4
44	(48)	―――	―――
64	77	3.75	34.8
84	90	4.61	40.8
100	113	4.81	44.9



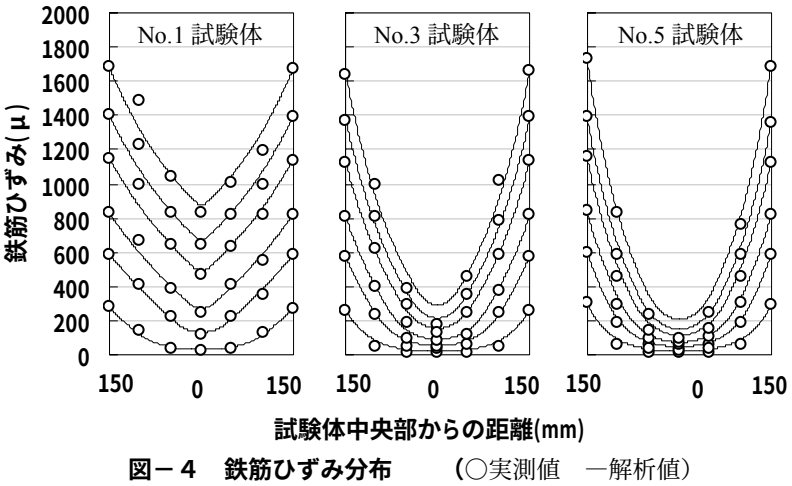
図－２　鉄筋形状とゲージ貼付位置

表－３　鉄筋の力学的性質と形状寸法

鉄筋径	ふし形状	降伏強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	降伏ひずみ (μ)	形状寸法				
					s (mm)	h (mm)	w (mm)	w' (mm)	l (mm)
D10	A	367	179	2067	7.75	0.51	1.42	5.02	9.41
D13	A	360	179	1967	10.45	0.75	1.48	4.77	13.02
D16	A	346	187	1936	13.80	1.16	1.90	6.40	15.44
	B	353	201	2144	12.33	1.25	2.25	6.67	16.08
	C	343	191	1822	14.19	1.31	2.10	6.67	16.28



図－３　鉄筋応力－抜け出し



図－４　鉄筋ひずみ分布　　(○実測値　―解析値)

3.1 鉄筋ひずみ分布

図－4に鉄筋ひずみ分布の1例を示す。○印は6つの荷重階(鉄筋応力度50，100，150，200，250，300N/mm^2)における実測値を示している。曲線は後述(3.2節)のτ－s関係から算出した各付着特性値(K_1，K_2，s_a)を用いた解析結果を示している。ただしK_1:初期剛性, K_2:2次剛性, s_a:剛性変化時のすべり量である。試験体中央部では実測値に比べ，解析値の方がやや大きくなっているが，全体では解析値は実測値をよく捉えている。

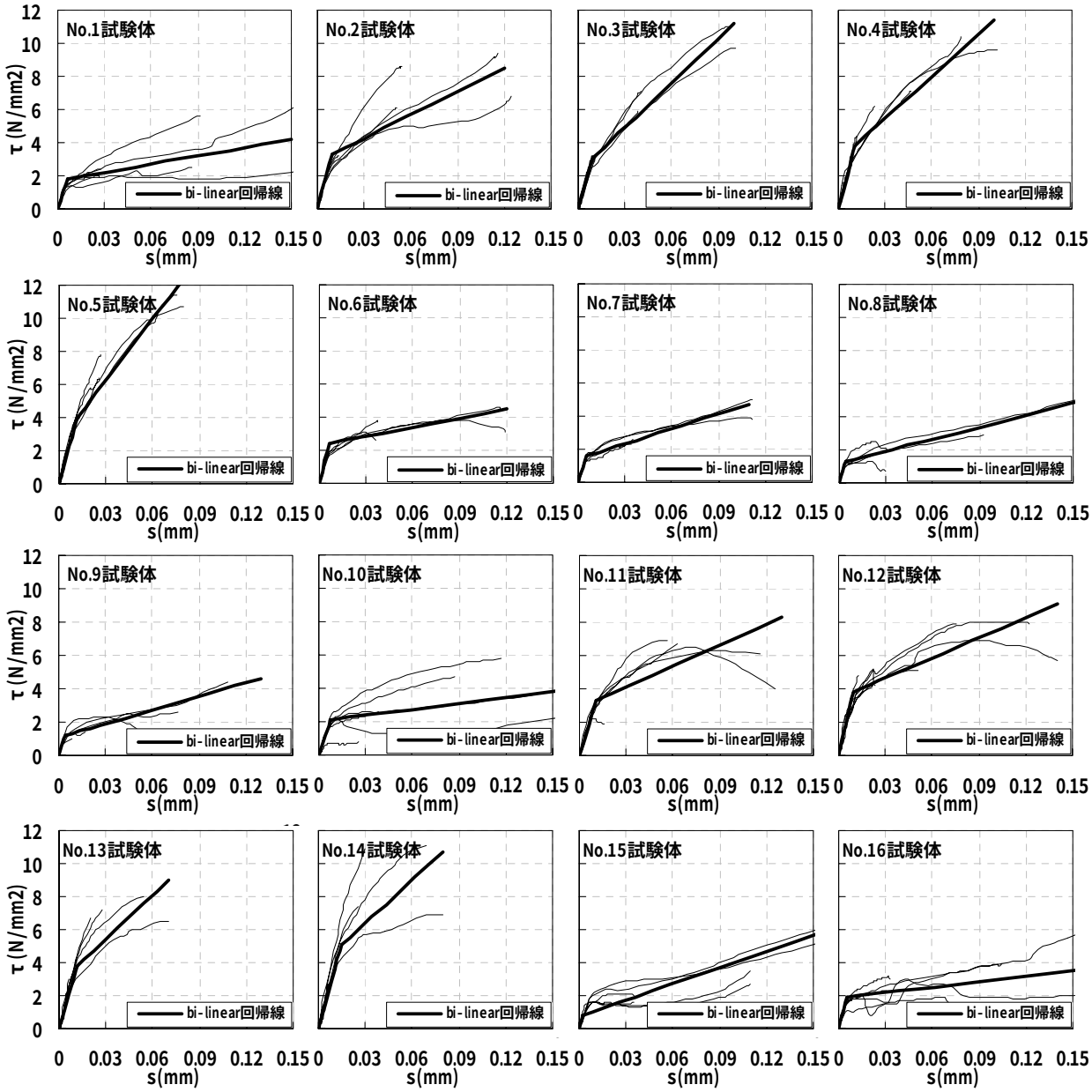
3.2 τ－s関係

図－5に試験体No.1～No.16(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は各ゲージ区間において，τは鉄筋ひずみ分布の傾きから，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。

同図中には次のようにして求めた最小二乗法による近似線(bi-linear回帰線)を太線で示している。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0.005mm近辺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≦0.005mmにおける回帰直線の傾きとし，2次剛性K_2はs＞0.005mm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。

要因ごとのτ－s関係を**図－6**に示す。なお、同図に示すτ－s関係には，2体ずつ作成した試験体の平均値を用いている（以下同様）。

以下にτ－s関係の特徴および各要因の付着特性値(K_1,



図－5　τ－s関係

K_2，s_a)への影響について述べる。全般にτがある点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。しかし，付着剛性が低下した後も付着応力は減少せずに，上昇し続ける傾向にある。

コンクリート強度の増加とともに，D13 を用いた試験体においてK_1，K_2が増加する傾向にあり，s_aについても同様の傾向がある。D16 の試験体においても，τ－s関係へのコンクリート強度の影響は同様の傾向を示している。

鉄筋径の増加とともにK_1は大きくなる傾向にある。これは鉄筋径が増加するにつれ，鉄筋のふし高さは増大し，より大きな付着応力が生じるためと考えられる。内部ひび割れが発生すると，鉄筋径が大きいほうが剛性は急激に低下し，K_2は小さくなる傾向にある。s_aは鉄筋径の増加とともに増加する傾向にあった。本実験よりも太径(D19)の鉄筋を使用している実験[2)]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ているが，本実験では，いずれの鉄筋(D10, D13, D16)においても K_1からK_2へ付着剛性が低下した後もτは減少せず、上昇し続ける傾向にあった。これは，本実験では既報[2)](D19)に比べ細径の鉄筋を使用しているため，鉄筋のふし高さが低く，内部ひび割れの影響が小さいことによると考えられる。

かぶり厚さについては，かぶり厚さの大きいものの方が付着応力は大きくなると予想されるが，かぶり厚さの影響は明瞭ではなかった。鉄筋のふし形状については，K_1への影響はみられなかったが，K_2はタイプA，タイプCの鉄筋に比べ，タイプBの鉄筋は大きな値を示しており，付着応力も大きな値を示していた。

4. τ－s関係のモデル化

表－４に bi-linear 回帰線の各付着特性値を示す。以下，ふし形状タイプ A の鉄筋について，この付着特性値をもとにコンクリート強度，鉄筋径の影響を考慮し，モデル化を行う。なお、かぶり厚さについては傾向が明瞭でなかったためモデル化の要因には取りあげていない。

4.1 コンクリート強度の影響

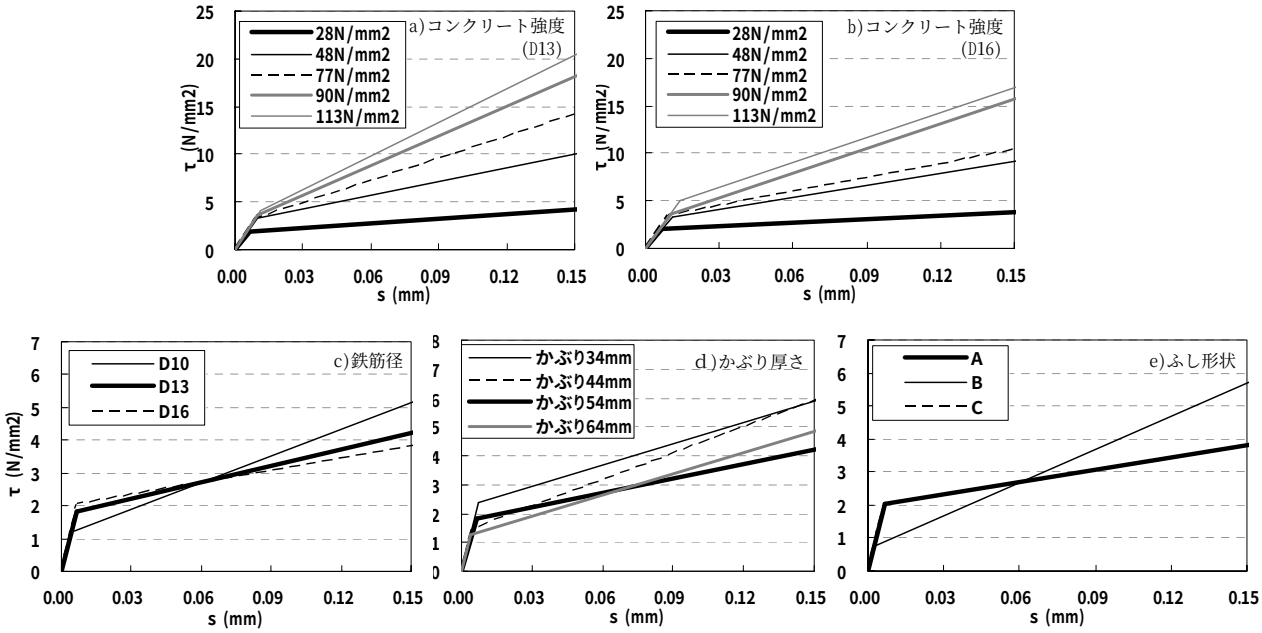
コンクリート強度と各付着特性値の関係を**図－７**に示す。図中にはそれぞれの最小二乗法による回帰線も記載している。なお，回帰線は，試験体 No.1 の付着特性値を満たすように求めている。以下に付着特性値の回帰式(モデル式)を示す。

$$K_1 = 290 \times \left(\frac{f_c}{28}\right)^{0.2} \quad (\mathrm{N/mm^3}) \tag{1}$$

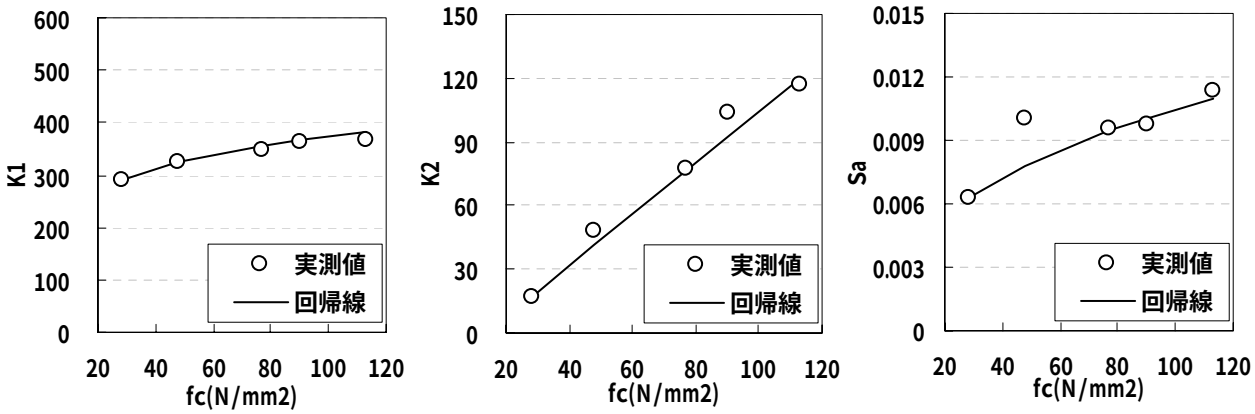
$$K_2 = 17 \times \left\{2 \times \left(\frac{f_c}{28}\right) - 1\right\} \quad (\mathrm{N/mm^3}) \tag{2}$$

表－４　各試験体における付着特性値

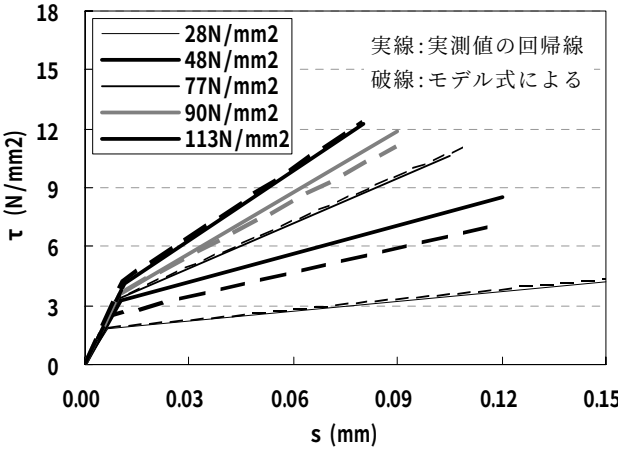
試験体	鉄筋	呼び強度 (N/mm²)	かぶり厚さ (mm)	ふし形状	K_1 (N/mm³)	K_2 (N/mm³)	s_a (mm)
1	D13	24	54	A	289	17	0.00631
2	D13	44	54	A	326	48	0.01004
3	D13	64	54	A	347	77	0.00956
4	D13	84	54	A	365	104	0.00975
5	D13	100	54	A	367	117	0.01133
6	D13	24	34	A	341	25	0.00697
7	D13	24	44	A	311	30	0.00491
8	D13	24	64	A	305	24	0.00418
9	D10	24	55	A	271	27	0.00443
10	D16	24	52	A	300	12	0.00677
11	D16	44	52	A	303	42	0.01089
12	D16	64	52	A	377	48	0.00937
13	D16	84	52	A	352	86	0.01019
14	D16	100	52	A	354	87	0.01427
15	D16	24	52	B	288	33	0.00264
16	D16	24	52	C	321	24	0.00581



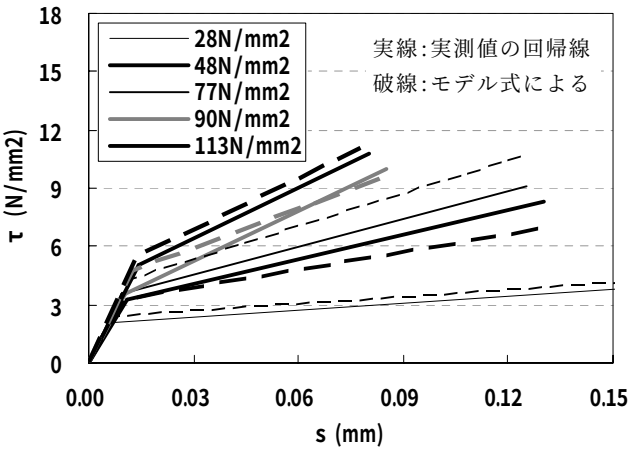
図－６　要因ごとに示したτ－s 関係



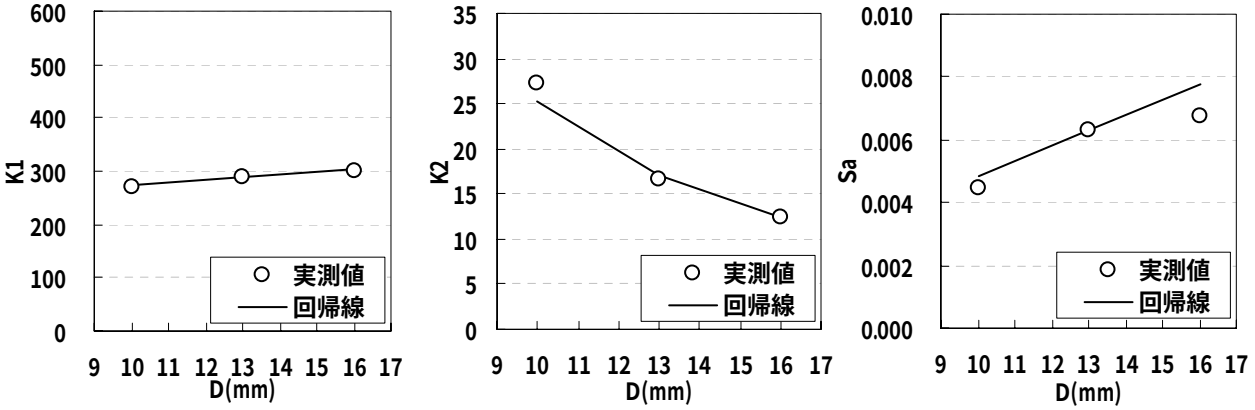
図－７　コンクリート強度と付着特性値の関係



図－８　τ－s 関係（D13）



図－１０　τ－s 関係（D16）



図－９　鉄筋径と付着特性値の関係

$$S_a = 0.0063 \times \left(\frac{f_c}{28}\right)^{0.4} \quad \text{(mm)} \qquad (3)$$

ここにfc：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

図－８に D13 における各コンクリート強度の τ－s 関係を示す。図中の実線は実測値の bi-linear 回帰線を，破線の関係は式(1)～(3)から算出している。両者はおおむね一致しており，上式でコンクリート強度の影響を考慮できているといえる。

4.2 **鉄筋径の影響**

鉄筋径と各付着特性値の関係を**図－９**に示す。なお，図中にはそれぞれの最小二乗法による回帰線も記載している。なお，回帰線は，試験体 No.1 の付着特性値を満たすように求めている。以下に回帰式(モデル式)を示す。

$$K_1 = 290 \times \left(\frac{D}{13}\right)^{0.2} \quad \text{(N/mm}^3\text{)} \qquad (4)$$

$$K_2 = 17 \Big/ \left(\frac{D}{13}\right)^{1.5} \quad \text{(N/mm}^3\text{)} \qquad (5)$$

$$S_a = 0.0063 \times \left(\frac{D}{13}\right)^{0.4} \quad \text{(mm)} \qquad (6)$$

ここにD：鉄筋径(mm)

図－１０に D16 における各コンクリート強度の τ－s 関係を示す。図中の実線は実測値の回帰線を示し，破線の関係は式(4)～(6)から算出している。両者はおおむね一致しており，上式で鉄筋径の影響を考慮できるといえる。

5. まとめ

異形鉄筋 D10，D13 および D16 とコンクリート間の付着応力(τ)－すべり(s)関係へのコンクリート強度，鉄筋径，かぶり厚さおよびふし形状の影響を調べた結果をまとめると以下のようになる

1）鉄筋径(D13，D16)に関わらず，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り，剛性変化時のすべり量s_aについても同様の傾向がある。

2）鉄筋径の増加とともにK_1は大きく，K_2は小さくなる傾向にある。s_aは鉄筋径の増加とともに増加する傾向にある。

3）かぶり厚さの影響は明瞭ではなかった。

4）鉄筋のふし形状については，K_1への影響はみられなかった。K_2はタイプA，タイプCに比べ，タイプBの鉄筋は大きな値を示し，付着応力も大きな値を示した。

5）コンクリート強度および鉄筋径を要因に τ－s 関係を bi-linear にモデル化した。定式化した各付着特性値は次のようになる。

$$K_1 = 290 \times \left(\frac{f_c}{28}\right)^{0.2} \times \left(\frac{D}{13}\right)^{0.2} \quad \text{(N/mm}^3\text{)} \qquad (7)$$

$$K_2 = 17 \times \left\{2 \times \left(\frac{f_c}{28}\right) - 1\right\} \Big/ \left(\frac{D}{13}\right)^{1.5} \quad \text{(N/mm}^3\text{)} \qquad (8)$$

$$s_a = 0.0063 \times \left(\frac{f_c}{28}\right)^{0.4} \times \left(\frac{D}{13}\right)^{0.4} \quad \text{(mm)} \qquad (9)$$

ここにf_c：コンクリート強度(N/mm^2)，D：鉄筋径(mm)，K_1：初期剛性(N/mm^3)，K_2：2 次剛性(N/mm^3)，s_a：剛性変化時のすべり量(mm)

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) 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

3) 金普漢ほか：プレストレストコンクリート緊張材として用いた異形鉄筋の定着長さ，日本建築学会構造系論文集 472 号，pp.121-128，1995.6

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) 島弘ほか：マッシブ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