

名古屋工業大学 正 員 吉田 弥智
赤井 登
学生員 ○木村 克彦

1. まえがき

最近、有限要素法を用いたRC部材に関する解析的研究が多く見られる。この場合、鉄筋とコンクリート間の界面にボンドリンクというバネ要素を設け、このバネ要素の特性、すなわち、鉄筋位置での付着応力度-相対すべり量関係（以下、 τ - s 関係と略記）を正確に与えれば、RC部材の挙動をかなりの精度で追跡できることがわかって¹⁾いる。しかし、 τ - s 関係におよぼす各種要因の影響についてはいまのところ不明の点が多い。そのため、本研究では、曲げひびわれ間の引張鉄筋近傍をモデル化した両引供試体を用いて、鉄筋とコンクリート間の付着特性に影響を与えると考えられる各種の要因のうち、鉄筋径、かぶり厚さ、コンクリート強度、埋込み長さ等を要因とする実験計画法を用いて実験を行ない、鉄筋位置での τ - s 関係に関する回帰分析を試みた。

2. 実験方法

図-1に示すような両引供試体を用いて、鉄筋とコンクリート間の付着特性について調べた。供試体の概略と取り上げた要因および水準数を表-1に示す。鉄筋のひずみ度は図-2に示すように貼付した測長5mmのワイヤーストレイゲージを用いて測定した。なお、ゲージはエポキシ系樹脂でコーティング処理を施した。また、端部すべり量およびひびわれ幅の測定には、それぞれダイヤルゲージ（最小目盛： $1/1000$ mm）およびコンタクトゲージ（精度： $5/1000$ mm）を用いた。供試体の製作には、早強ポルトランドセメント（ $\sigma_f=346$ kg/cm²）、木曽川産および天竜川産の細・粗骨材（それぞれ最大径5mmおよび15mm）、SD35（横3.5）を用い、コンクリートの水セメント比は、40%、55%および70%の3種類（スランプ：8.5±1 cm）とした。供試体は、検査6日まで湿潤養生（温度：20±2℃、相対湿度：90±5%）とし、検査7日目に実験した。

3. 実験結果とその考察

3-1 使用材料の性質：使用コンクリートの力学的性質を表-2に示す。

3-2 τ - s 関係：今回の実験によって得られた鉄筋のひずみ度分布の一例を図-3に示す。これらのひずみ度分布より、次式を用いて τ - s 関係を求めた。

$$\tau_x = A_s E_s / \psi \cdot d\epsilon / dx \div A_s E_s / \psi \cdot \Delta \epsilon / \Delta x \quad \cdots (1)$$

$$s_x = \int_0^x \epsilon_{sx} dx - \int_0^x \epsilon_{cx} dx \div \sum \epsilon_{sx_i} \Delta x_i - \sum \epsilon_{cx_i} \Delta x_i \quad \cdots (2)$$

- ここに、
 τ_x : 鉄筋位置 x での付着応力度
 s_x : 鉄筋位置 x でのすべり量
 ψ : 鉄筋の周長
 A_s, E_s : 鉄筋の断面積およびヤング係数
 $\epsilon_{sx}, \epsilon_{cx}$: 鉄筋および鉄筋位置でのコンクリートのひずみ度

ここで、 Δx_i は1〜2 cmとし、コンクリートのひずみ度 ϵ_c は断面内で一様分布

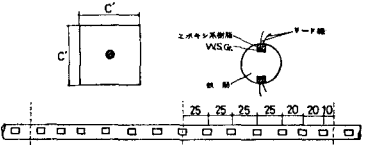
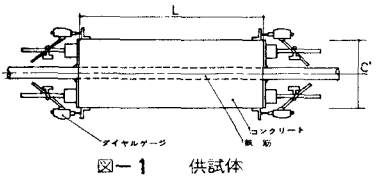


図-2 ゲージ貼付位置

表-1 供試体概要

NO		D (mm)	C (cm)	A (mm ²)	L (cm)
1	1	16	10	200	20
2	"	"	"	300	30
3	"	15	200	45	
4	"	"	300	30	
5	19	10	200	30	
6	"	"	300	20	
7	"	15	200	30	
8	"	"	300	45	
9	"	10	"	30	
10	"	"	400	20	
11	"	15	300	30	
12	"	"	400	45	
13	22	10	300	20	
14	"	"	400	30	
15	"	15	300	45	
16	"	"	400	30	
2 - 13	25	10	200	20	
14	"	"	300	30	
15	"	15	200	45	
16	"	"	300	30	
3 - 13	29	10	300	20	
14	"	"	400	30	
15	"	15	300	45	
16	"	"	400	30	
水準数	5	2	3	2	

D : 鉄筋径 A : コンクリート強度
C : 断面寸法 L : 供試体長さ

と考えて

$$\varepsilon_c = n A_s / A_c \cdot (\varepsilon_{sL} - \varepsilon_{sx}) \quad \dots (3)$$

とした。ここに、 n 、 A および ε_L は、それぞれヤング係数比、コンクリート断面積および端部での鉄筋のひずみ度である。式(1)および(2)より求めた τ - S 関係の一例を図4に示す。なお、図中の曲線は、これらの τ - S 関係を最小二乗法により次の3次式を用いて近似したものである。

$$\tau_x = a_0 + a_1 S_x + a_2 S_x^2 + a_3 S_x^3 \quad \dots (4)$$

図4によれば、近似曲線は実験値と比較的よく表わしている。本研究では、式(4)のように実用性を重視し、3次式近似としたため a_0 の値は実験値に比べていくぶん大きくなっている。また、 a_0 の値は、近似する関数の性質により多少異なるが、鉄筋とコンクリート間の膠着作用により生じるものと思われる²⁾。なお、 a_0 の値を正しく評価するには、低荷重時の鉄筋および鉄筋近傍のコンクリートのひずみ度を綿密に測定する必要がある。

図5は、 τ - S 関係を τ_{max} および $S_{x| \tau=\tau_{max}}$ を用いて無次元化したものである。ここに、 τ_{max} は、最大付着応力度、 $S_{x| \tau=\tau_{max}}$ は、最大付着応力度時のすべり量である。この図によれば、 $\tau_x/\tau_{max} - S_x/S_{x| \tau=\tau_{max}}$ 関係は、ほぼ一つの曲線で表示することができる。なお、図中には、森田³⁾および Nilson⁴⁾による無次元化曲線も併示してあるが、本実験式は、森田および Nilson らの曲線のほぼ中間にある。

3-3 鉄筋の付着特性に影響をおよぼす各種要因効果：鉄筋の付着特性に影響をおよぼす各種の要因効果について調べるために、ここでは、一例として τ - S 曲線上の $S_x = 0.01$ mm 時の τ_x について重回帰分析を行なった。なお、特性値として $S_x = 0.01$ mm 時の τ_x を用いたのは、どの供試体についても、この程度のすべり量の範囲では、 τ - S 曲線は、ほぼ直線と見なせ、かつ、 τ - S 関係の特性を比較的良好に表現していると考えたからである。また、要因としては、表1に示した要因の他に、 τ - S 関係に影響を与えるだろうと考えられる C/D 、 $\sqrt{A}$ （記号の説明は表1参照。ただし、 C はかぶり厚さである）、 E_c および n をとって回帰分析を行ない、有意性の少ない C/D および n を除いて再度回帰分析を行なった。分散分析の結果を表3に示す。この表よりわかるように、この回帰は、F検定の結果5%の危険率で有意である。また、偏回帰係数の有意性についても検定を行なった結果を表4に示す。表4より、 $\tau_{sx=0.01}$ の値は、 C 、 A および D が大きくなれば、小さくなり、 L が大きくなれば、大きくなることからわかる。また、取り上げた各要因が、回帰分析結果にどの程度影響を及ぼすかは、標準回帰係数の大きさから判断でき、本分析結果によれば、 A 、 $\sqrt{A}$ 、 E_c 、 L 、 q_L および D の順で τ - S 関係に影響を及ぼす。最初の三つは、強度に直接または間接的に関係する要因であるため、 τ - S 関係には、強度が大きく影響していることがわかる。

本研究は、文部省科学研究費によるものである。また、回帰分析には名大大型計算機センター FACOM 230-60を使用した。文献：1) 小坂利子、木村立島、セメント技術年報 昭48年27巻pp394-399 2) 田真田：土木論文報告集 217号 PP87-98 3) 森田：鉄筋とコンクリートにおける付着と。いんばれに関する研究、学術論文誌 昭43 4) A.H. Nilson: "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete", Ph.D. Thesis of California Univ. 1967, 1970

表-2 使用コンクリートの力学的性質

水セメント比 (%)	比重	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (kg/cm ²)
40	2.33	390	25.3	2.99×10 ⁵
55	2.31	295	21.6	2.50×10 ⁵
70	2.16	211	19.6	2.19×10 ⁵

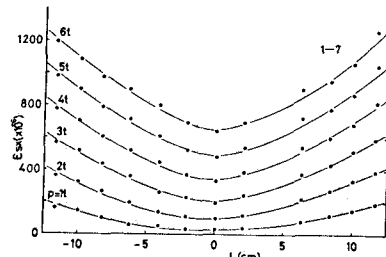


図-3 鉄筋のひずみ分布

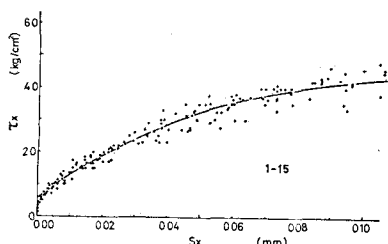


図-4 τ - S 関係

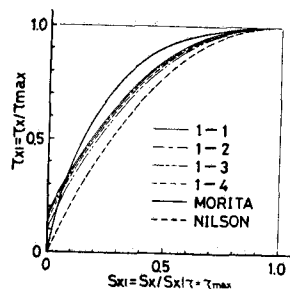


図-5 無次元化 τ - S 関係

表-3 分散分析表

変動要因	自由度	平方和	不偏分散	分散比
回帰による変動	7	830.81	118.69	33.42
回帰からの残差の変動	14	49.72	3.55	
全変動	21	880.53		

表-4

要因	偏回帰係数	標準回帰係数	t値
D (mm)	-0.556	-0.370	5.56*
C (cm)	-8.438	-1.658	3.48*
$\sqrt{A}$	-0.697	-6.137	4.66*
L (cm)	1.209	1.717	3.08*
C/L (x10)	18.381	1.026	2.49*
E_c (x10 ⁵ kg/cm ²)	-40.082	-1.791	5.20*
A (kg/cm ²)	0.723	7.362	5.17*
重相関係数 = 0.971		切片 = 246.90	