

論文 コンクリートの収縮ひびわれ幅に及ぼす鉄筋量の影響

劉 勇*¹ 大野義照*² 中川隆夫*³ 林田都芳*⁴

要旨：鉄筋を埋設したコンクリートの一軸拘束ひび割れ試験を行い、鉄筋径、鉄筋本数がコンクリートの収縮ひび割れ幅に及ぼす影響や鉄筋ひずみ分布とひび割れ幅の関係を検討した。埋設鉄筋1本の場合、鉄筋径がD10からD16と大きくなるにつれて、ひび割れの発生は早くなるが、貫通ひび割れの発生までには多くの日数を要する。埋設鉄筋2本の場合、ひび割れ発生日に及ぼす鉄筋量の影響は認められないが、鉄筋量が増えるとひび割れは分散し、その幅は小さくなる。また、鉄筋ひずみ分布を捉えることで収縮ひび割れ幅を算定できることを示した。

キーワード：一軸拘束試験、乾燥収縮、ひび割れ幅、鉄筋ひずみ、付着消失長さ

1. はじめに

鉄筋コンクリート曲げ部材におけるひび割れ幅は、鉄筋応力度の一律な制限による間接的な方法¹⁾か、直接ひび割れ幅を算定する方法²⁾によって行われている。一方、壁などにおける乾燥収縮等に起因する乾燥収縮ひび割れの幅については、ひび割れ発生時に鉄筋が降伏しないように最低鉄筋比が定められているものの、鉄筋の制御効果は定量的に評価されるまでには至っていない。

本研究ではコンクリート部材の乾燥収縮等に起因する収縮ひび割れ幅算定のための基礎資料を得ることを目的に、壁や床スラブを想定し、JIS原案³⁾に準拠した一軸拘束ひび割れ試験を行い、異形鉄筋を埋設したコンクリートの収縮ひび割れ幅や鉄筋ひずみの経時変化を調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

コンクリートの調合を表-1に示す。水セメント比は一般の建築に用いられているコンクリート強度が得られるように定めた。セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は海砂(表乾密度2.55g/cm³,吸水率2.00%)、粗骨材は砕石(表乾

密度2.68g/cm³,吸水率0.82%)を、混和剤は高性能AE減水剤を使用した。

スラブは19.0cm、空気量は5.5%であった。コンクリートの力学的性質を表-2に示す。

鉄筋は横ふし異形鉄筋D10, D13, D16(降伏点応力度は382N/mm², 370N/mm², 464N/mm²)を用いた。

表-1 コンクリートの調合

W/C	s/a	単位重量 kg/m ³				空気量 %	スラブ (cm)
		水	セメント	砂	砕石		
60	47.1	180	300	815	965	5.5	19.0

表-2 コンクリートの強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
7日	14.7	2.3	22.8
14日	26.8	2.5	23.9
21日	27.8	2.7	24.4
28日	30.2	2.6	26.1

2.2 拘束試験体の形状と種類

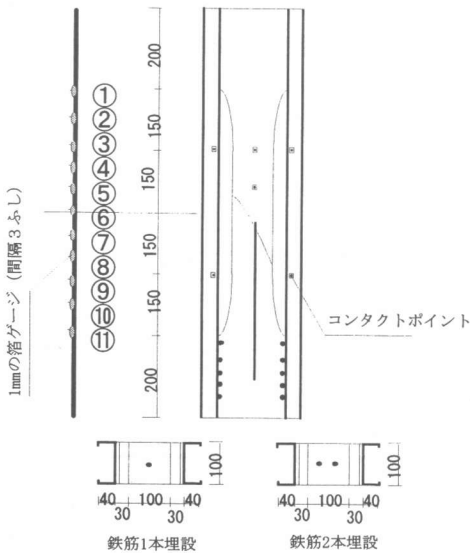
拘束ひび割れ試験体の形状を図-1に、その種類を表-3に示す。図-1には埋設した鉄筋の配置位置も示している。試験変数は鉄筋径3種類及び鉄筋本数2種類の6種類とした。試験体は各条件に対して2体製作した。比較のため、無筋の試験体も2体製作した。拘束鋼材は市販の軽みぞ形

*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 (正会員)
 *2 大阪大学教授 工学研究科建築工学専攻 工博 (正会員)
 *3 大阪大学技官 工学研究科建築工学専攻 (正会員)
 *4 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 (正会員)

鋼（呼び名 1173, 100×40×40mm, 厚さ 2.3mm, 断面積は 3.97cm²）を用い, 拘束鋼材比は 7.9%である。乾燥収縮試験体, 圧縮クリープ試験体ともに長さ 500mm×幅 100mm×厚さ 100mm の角柱体で, 引張クリープ試験体は長さ 1000mm×幅 100mm×厚さ 100mm の角柱体で, 各 2 体製作した。

表一三 試験体の種類

試験体 記号	配筋状況	
	鉄筋径	鉄筋本数
RD10-1	D10	1
RD10-2	D10	2
RD13-1	D13	1
RD13-2	D13	2
RD16-1	D16	1
RD16-2	D16	2
RD00	無筋	



図一 拘束試験体形状

2. 3 実験方法及び測定方法

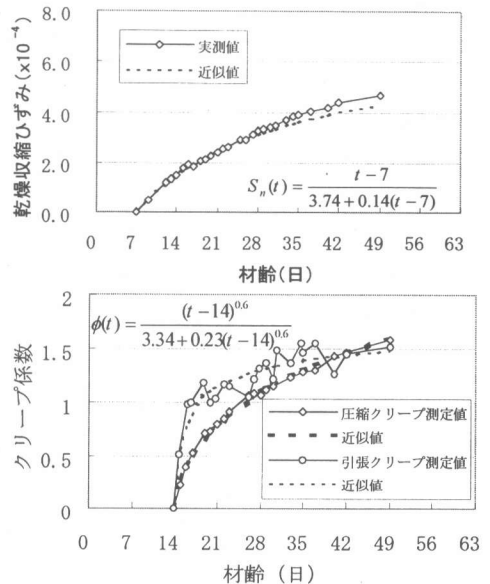
試験は 20±1℃, R.H.60±5%の恒温・恒湿室で実施した。拘束ひび割れ試験体の製作及び試験は「JIS 原案のコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」に準拠して行った。各試験体ともコンクリート打設後, 型枠のまま湿潤養生し, 材齢 7日に脱型後, 乾燥を開始した。なお, 試験体に

はひび割れの発生を試験体中央位置とするため, 同位置両側面に厚さ 2mm のプラスチック板を深さ 15mm まで埋設し, スリットを設けた。コンタクトストレーンゲージ (C. S. G) を用いて, 試験体中央部長手方向の検長 300mm 区間におけるコンクリートと拘束鋼材のひずみを, ひび割れ幅を測定のため検長 100mm で 3 区間の変位を測定した。また箔ゲージ (F. S. G) を用い, 埋設した鉄筋のひずみや拘束鋼材のひずみの経時変化を 4 時間毎に計測した。コンタクトポイント, 箔ゲージの貼付位置を図一に示す。箔ゲージの貼付間隔は, 3 ふし間隔とし, 鉄筋 D10, D13, D16 の貼付間隔はそれぞれ 5.2cm, 5.2cm, 5.5cm である。圧縮・引張クリープ試験は材齢 14 日から開始した。持続圧縮応力は 6N/mm², 持続引張応力は 1N/mm²であった。

3 実験結果及び考察

3. 1 乾燥収縮・クリープ係数

乾燥収縮ひずみ, 圧縮クリープ係数及び引張クリープ係数の経時変化を図二に示す。図中に最小自乗法により求めた実測値の近似値を示している。



図二 乾燥収縮ひずみ, クリープ係数

3. 2 ひび割れ発生状況

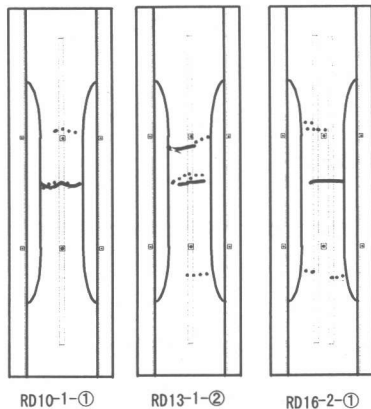
初ひび割れ発生材齢、ひび割れ発生本数及び貫通ひび割れ発生材齢を表-4に示す。ひび割れ発生材齢は、コンタクトゲージによる測定値(検長300mmや検長100mm)が大きく変動した材齢とした。

表-4 ひび割れ発生材齢および収縮応力(N/mm²)

	初ひび割れ材齢	ひび割れ本数	貫通ひび割れ材齢	収縮応力 実験値	収縮応力 解析値
RD10-1-①	21	1	21	1.30	1.78
RD10-1-②	27	1	27	1.30	2.03
RD10-2-①	19	1	33	1.38	1.59
RD10-2-②	21	2	-	1.27	1.76
RD13-1-①	16	1	-	0.85	1.32
RD13-1-②	16	2	26	0.80	1.32
RD13-2-①	19	1	-	1.09	1.67
RD13-2-②	20	2	-	1.09	1.76
RD16-1-①	26	2	26	1.01	2.15
RD16-1-②	14	2	-	0.76	1.14
RD16-2-①	19	2	-	1.15	1.75
RD16-2-②	21	3	-	1.30	1.93
RD00-①	30	1	30	1.70	2.16
RD00-②	35	1	35	2.19	2.16

注：試験体記号末尾の①、②は同種の2体の試験体を区別するための番号である。

材齢50日におけるひび割れ発生状況の一例を図-3に示す。鉄筋を埋設した試験体では鉄筋がコンクリートの収縮変形を拘束するので、無筋試験体よりひび割れの発生が早くなっている。埋設鉄筋1本の場合、RD16-1-①を除き、ひび割れはRD16, RD13, RD10の順に発生した。埋設鉄筋



図中では、実線は打設面のひび割れ、破線は底面のひび割れ

図-3 ひび割れの発生状況

2本の場合、ひび割れ発生材齢には大差がなく、材齢19~21日に発生した。

3. 3 拘束応力

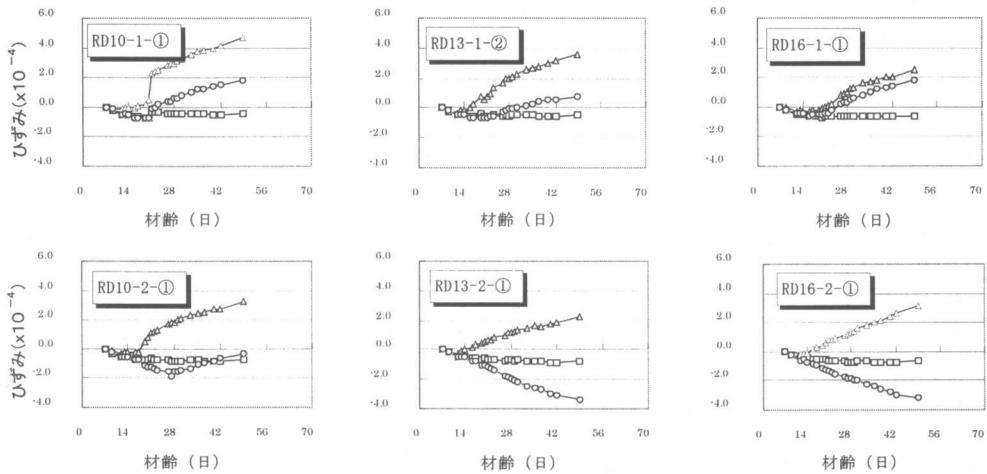
ひび割れ発生前のF.S.Gで測定した拘束鋼材ひずみの変化量より算出したひび割れ発生直前の収縮応力及び逐次計算法³⁾による収縮応力の解析値を前提の表-4に示した。ひび割れ発生時の収縮応力の割裂引張強度に対する割合は45%~55%であった。

3. 4 拘束試験体のひずみの経時変化

コンタクトストレインゲージで測定した拘束試験体の、コンクリートのひび割れを含む変位を検長300mmで除したひずみと拘束鋼材ひずみの材齢7日以降の経時変化の一例を図-4に示す。埋設鉄筋1本の試験体RD10-1, RD13-1, RD16-1の打設面と底面におけるコンクリートひずみはひび割れ発生後も両ひずみとも同じように徐々に増加した。これはひび割れが発生と同時に断面を貫通したことによる。一方、埋設鉄筋2本の試験体では、ひび割れ発生後打設面のコンクリートひずみが増加しているが底面ひずみは減少した。すなわち、ひび割れは打設面の一部に発生し、その後も底面までは貫通していない。

3. 5 ひび割れ幅の経時変化

ひび割れ幅の経時変化を図-5に示す。ひび割れが2本以上ある試験体ではそのひび割れ幅を平均値で示している。ひび割れ幅は乾燥収縮や鉄筋とコンクリート間の時間経過に伴う付着劣化により増加している。D10鉄筋1本を埋設した試験体はひび割れの発生直後に、付着応力の緩和によってひび割れ幅が急増し、その後は乾燥収縮により徐々に増加している。一方、D13, D16を埋設した試験体では、急激な変化がなく、緩やかに増加している。材齢50日において、埋設鉄筋1本の場合、RD10, RD13, RD16の順にひび割れ幅は小さく、鉄筋径がD10からD13, D16と大きくなるにつれて、ひび割れ本数が増え、最大ひび割れ幅は約60%低減されている。埋設鉄筋2本の場合も同様、RD10, RD13, RD16の順にひび割れ



—□— 拘束鋼材ひずみ —△— コンクリートひずみ (表) —○— コンクリートひずみ (裏)

図-4 コンクリートと拘束鋼材のひずみの経時変化

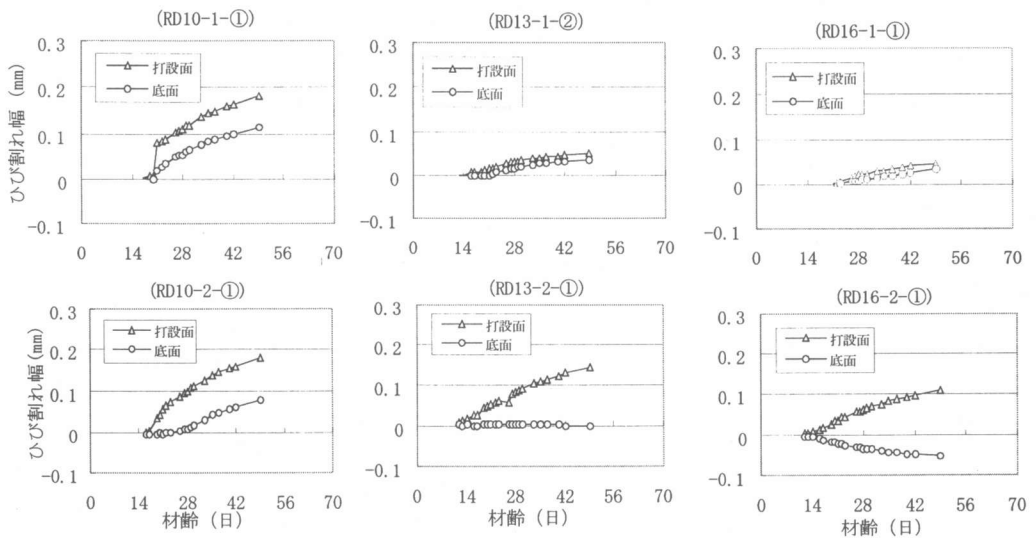


図-5 ひび割れ幅の経時変化

幅は 0.18mm, 0.14mm, 0.11mm と小さくなっている。

3. 6 ひび割れ幅の算定

拘束試験体において、ひび割れ発生以前は、埋設鉄筋と拘束鋼材にはコンクリートの乾燥収縮による圧縮力が生じている。ひび割れが生じると、ひび割れ幅は、図-6に示すように発生時には拘

束区間内の拘束鋼材と埋設鉄筋の戻り変形とコンクリートの弾性回復変形の和として表れる（初期ひび割れ幅と呼ぶ）。その後ひび割れ幅は、時間経過に伴うコンクリートと鉄筋間の付着応力の緩和による鉄筋の伸び、拘束鋼材の戻り変形とコンクリートの収縮の和が加算される（長期ひび割れ幅と呼ぶ）。

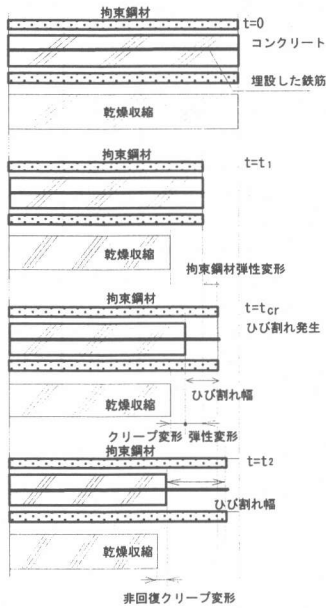


図-6 拘束試験体の収縮概念図

拘束試験体の鉄筋のひずみ分布を、RD10-1-①とRD16-2-①を例として、図-7示す。図中の横軸番号はゲージ貼付位置に対応している。ひび割れ発生前は、コンクリートの乾燥収縮により鉄筋ひずみは収縮するが、ひび割れが生じるとひび割れ位置近傍では引張ひずみが増大する。RD10-1-①においては、初ひび割れは材齢 21 日に生じ、ひび割れ位置の鉄筋ひずみは 1 日で大きく増加し、その後は若干増加している。RD16-2-①では、ひび割れが材齢 19 日に生じたが、ひずみの変化量が小さく、徐々に増加する傾向が見られる。また、両試験体の鉄筋ひずみとも、ひび割れ位置近傍で付着応力の緩和によって鉄筋ひずみは増大するが、ひび割れ位置から離れると、鉄筋はコンクリートと一体になり収縮している。ひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートのひずみ分布を模式図に示せば図-8 のようになる。同図において、 ϵ_{sh} はひび割れ発生直前の自由乾燥収縮ひずみを、 ϵ_{sr} は外部拘束鋼材によって拘束された鉄筋埋設のコンクリートひずみを、 ϵ_e と ϵ_{creep} はひび割れ発生直前のコンクリートの伸び弾性ひずみとクリープひずみ

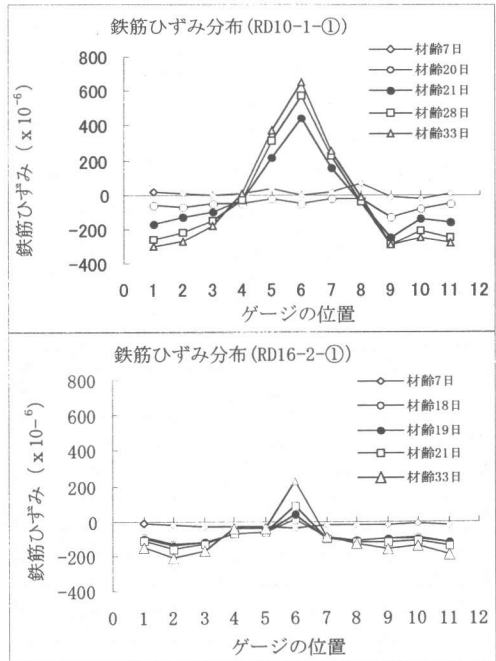


図-7 鉄筋ひずみの分布

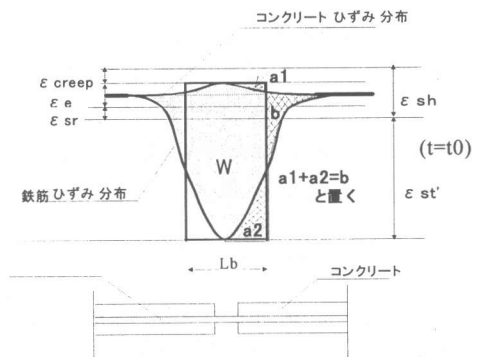


図-8 ひび割れ近傍模式図

を表している。ひび割れが発生するとひび割れ位置の鉄筋ひずみは増加して $\epsilon_{st'}$ となり、一方ひび割れ近傍のコンクリートは付着による拘束がなくなり、クリープひずみだけが残り $\epsilon_{sh} - \epsilon_{creep}$ となる。ひび割れ幅は図の灰色部分の面積に相当する。また同図の網掛け部分 a と b の面積が等しくなるように長さ L_b を定義すれば、ひび割れ幅は式(1)で計算される。なお、ここで、 L_b を付着消

失長と呼ぶ。

$$W = \left\{ \varepsilon_{st} + (\varepsilon_{sh} - \varepsilon_{creep}) \right\} \times L_b \cdots \cdots (1)$$

材齢 40 日まで実測した鉄筋ひずみ分布から求めた付着消失長さ L_b と式(1)より求めた最大ひび割れ幅を表-5に示す。RD16-1②を除き、計算値は実測値にはほぼ近い値を示し、式(1)が成立つことがわかる。

表-5 ひび割れ発生直前の収縮応力(N/mm²)

	初ひび割れ発生材齢	実験値	解析値
RD10-1-①	21	1.30	1.78
RD10-1-②	27	1.30	2.03
RD10-2-①	19	1.38	1.59
RD10-2-②	21	1.27	1.76
RD13-1-①	16	0.85	1.32
RD13-1-②	16	0.80	1.32
RD13-2-①	19	1.09	1.67
RD13-2-②	20	1.09	1.76
RD16-1-①	26	1.01	2.15
RD16-1-②	14	0.76	1.14
RD16-2-①	19	1.15	1.75
RD16-2-②	21	1.30	1.93

3. 7 付着応力

コンクリートと鉄筋との間の付着特性がわかれば付着解析によって、鉄筋ひずみが算定できる⁴⁾。そこで、各試験体における平均付着応力を次式から算定し、表-6に示す。

$$\tau = E_s \cdot \Delta \varepsilon_s \cdot \phi / 4 \Delta l \cdots \cdots (2)$$

ここでは、 E_s は鉄筋のヤング係数、 $\Delta \varepsilon_s$ はひび割れが発生した鉄筋の測定点と鉄筋ひずみが安定した点間の鉄筋ひずみの差、 ϕ は鉄筋の径、 Δl は両測定点間の距離である。RD13-1の試験体を除く各試験体における平均付着応力はほぼ1.5N/mm² ~ 2.5N/mm²の範囲に収まっている。RD13-1の2本試験体とも他の試験体より、小さい値を示しているが、2本試験体とも2本のひび割れが近くにはほぼ同時に発生し、一つのひび割れ箇所における鉄筋ひずみが小さいことによる。

表-6 平均付着応力(N/mm²)

	$\Delta \varepsilon (\times 10^{-6})$	L(mm)	$\tau (N/mm^2)$
RD10-1-①	937	156	28.5
RD10-1-②	710	208	16.2
RD10-2-①	845	208	19.3
RD10-2-②	822	156	25.0
RD13-1-①	322	180	9.6
RD13-1-②	497	208	12.8
RD13-2-①	478	156	16.4
RD13-2-②	378	130	15.6
RD16-1-①	362	110	21.7
RD16-1-②	468	165	18.7
RD16-2-①	391	165	15.6
RD16-2-②	270	110	16.2

4. まとめ

本実験結果をまとめると次のようになる。

- 1) 埋設鉄筋 1 本の場合、鉄筋径が大きくなるにつれて、初収縮ひび割れの発生は早くなるが、貫通ひび割れの発生までには多くの日数を要する。また、ひび割れ本数が増え、最大ひび割れ幅は約60%低減されている。
- 2) 埋設鉄筋 2 本の場合、ひび割れの発生時期に及ぼす鉄筋量の影響は認められないが、鉄筋量が増えるとひび割れは分散し、その幅は小さくなる。
- 3) 鉄筋ひずみ分布を捉えることで収縮ひび割れ幅を算定できることを示した。また、鉄筋ひずみ分布から算出した平均付着応力度は鉄筋径に関係なく1.5N/mm² ~ 2.5N/mm²であった。

謝辞 本研究は本学学生松浦祥介君及び㈱タイコ千里工場の協力を得て行ったものであり、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準
- 2) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針
- 3) 鈴木計夫, 大野義照, 中川隆夫, 太田寛; 「コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験」, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.25~28.1988
- 4) 鈴木計夫, 大野義照, 李振宝, 太田崇士; 「持続荷重下における異型鉄筋の付着応力~すべり関係」, コンクリート工学年次論文報告集Vol.14, No.2, 1992, pp.51~56