

R.C. スラブの長期におけるひびわれ変形に関する研究 (その4)

—付着クリープ実験結果—

高橋久雄 小柳光生
武田寿一

Studies of Deflection of Reinforced Concrete Slabs under Sustained Loads (Part 4)

—Results of Experiments on Bond Creep—

Hisao Takahashi Mitsuo Koyanagi
Toshikazu Takeda

Abstract

Knowing bond creep is important in order to investigate deflection behaviors of reinforced concrete slabs. Tests were conducted on bond specimens axially loaded in tension and specimens for pull-out, and the behaviors of bond creep under sustained loads were studied during a period of approximately one year. The results show that in axially loaded tensile specimens the concrete carries approximately 50percent of the total tensile force through bond stress at bond length of 40 cm and $\sigma_s=1.0 \text{ t/cm}^2$, but practically no tensile force is carried by concrete through bond stress in case of bond length of 40 cm and $\sigma_s=2.0 \text{ t/cm}^2$.

概要

RC 部材の長期における変形挙動を知るためには、鉄筋コンクリートの付着クリープ性状の解明が必要である。

そこで今回、鉄筋D10を用いた両引き試験体と片引き試験体について、約1年間にわたる持続載荷を行い、付着クリープ性状を観察した。その結果、持続載荷1年での両引き試験体は、付着長40 cm, $\sigma_s=1.0 \text{ t/cm}^2$ の場合、コンクリートが約5割の引張力を負担するが、付着長40 cm, $\sigma_s=2.0 \text{ t/cm}^2$ の場合、付着力によるコンクリートの引張力負担は殆んど無いことがわかった。

1. まえがき

RC 部材の変形挙動を知るためには、鉄筋とコンクリートの付着性状の解明が必要であり、現在、付着性状に関する研究が、多くの研究者によって行なわれている。しかし、付着クリープ性状に関する研究は殆んど見受けられない。RC 部材の長期における変形性状を究明するためには、この分野の研究は今後重要であるとおもわれる。

今回、RC スラブ部材の長期におけるたわみ変形挙動を研究するための一連の実験として、持続載荷時における付着性状について実験を行ったので、その約1年間にわたる測定結果について報告する。

2. 実験概要

2.1. 実験目的

はり接合部付近の RC スラブに曲げひびわれを生じた場合のスラブ上端筋の長期的なすべり挙動を把握するために、モデル化した付着試験体を製作、加力し、そのすべり挙動を測定、検討する。

2.2. 試験体の種類

付着試験は、両引き試験と片引き試験の2種類を行い、両試験ともに長期載荷および短期加力の試験を実施して

プロック	シリーズ	付着長 (cm)	試験体名称	鉄筋有無	荷重 (kg/cm)	試験場所	プロック	シリーズ	付着長 (cm)	試験体名称	鉄筋有無	荷重 (kg/cm)	試験場所
I	A	40	I-A-40-1	○	2,000 (2,110)	恒温 恒湿 密室	IV	A	40	IV-A-40-1	2,000 (2,040)	地	
			I-A-40-2	IV-A-40-2									
			I-B-20-1	IV-B-20-1									
	B	20	I-B-20-2	○				IV-B-20-2					
			C	20				I-C-1	○	IV-C-1			
								I-C-2	○	IV-C-2			
II	A	40	II-A-40	○	1,000 (1,126)	恒温 恒湿 密室	V	A	40	V-A-40	1,000 (1,056)	下 屋	
			II-B-20	○						V-B-20			
			II-C	○						V-C			
III	A	40	III-A-40	○	0	恒温 恒湿 密室	VI	A	40	VI-A-40	0	地	
			III-B-20	○						VI-B-20			
			III-C	○						VI-C			

()内の数値は実際に加力した荷重である。

表一 試験体の種類

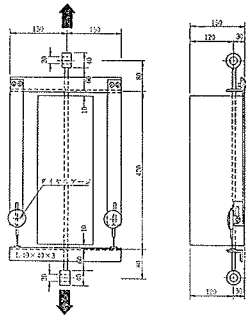


図-1 両引き試験体の様子

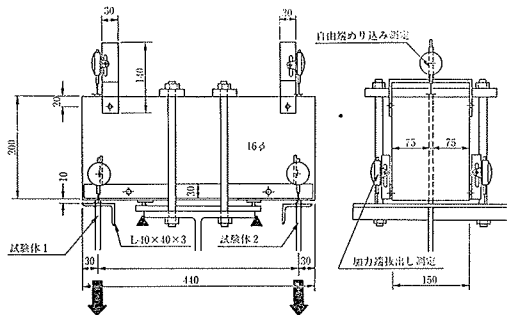


図-2 片引き試験体の様子

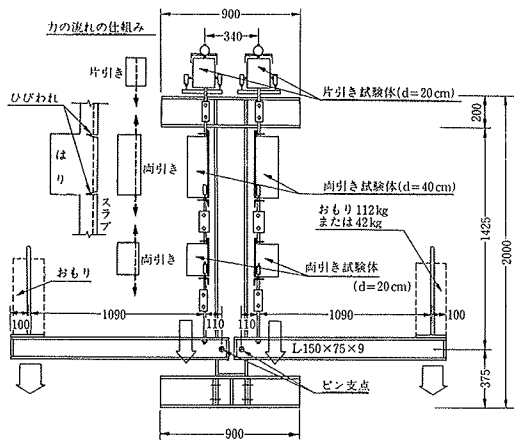


図-3 加力試験機と加力状況

いる。長期荷重の場合、コンクリートの収縮等の影響を考慮するため両引き、片引きともにダミーを製作している。また、環境条件の影響を見るため試験室は恒温室(60%RH, 20°C)および地下室(30~90%RH, 10~20°C)の範囲で年間変化を受ける)の2室としている。付着試験体の要因別一覧を表-1に示すが、A, B形状は両引き試験体で、それぞれ付着長40 cm, 20 cmとし、C形状は片引き試験体で、付着長20 cmとする。荷重レベルは2.0 t/cm²(鉄筋設計応力)および1.0 t/cm²の2種類としている。なおI, IVブロックA, B, C形状はそれぞれ2体ずつ同じ要因の試験体をもつ。またIII, VIブロックはダミーである。その他に、両引き試験体の付着性能を検討するためにコンクリートにおおわれていない鉄筋で、かつ両引き試験体と同じようにはね出しアングルをもつ試験体(以後、裸鉄筋試験体と定義する)の短期加力試験も実施した。これは両引き試験体の、完全に付着が失われた場合に相当する。

2.3. 試験体の形状、寸法

両引き試験体は、付着長20 cm, 40 cmの2形状とし、図-1に示すようにコンクリート断面15 cm×15 cmであり、鉄筋はSD30-D10を使用し、その試験体両端にアングル材を溶接して取り付けている。そのアングル区間長は、付着長20 cm, 40 cmに対しそれぞれ22 cm, 42 cmである。片引き試験体は、付着長20 cmの1形状とし、図-2に示すようにコンクリート断面15 cm×44 cmであり、鉄筋は両引きと同じD10であり、同時に2体の試験が出来るようになっている。両引き、片引きともにスラブ上端筋の挙動を想定しているため、コンクリート打設は横打ち、鉄筋埋込み位置は鉄筋中心からコンクリート面まで3 cmとしている。打設口は両引きの場合かぶり3 cm側から、片引きの場合かぶり7.5 cm側から打込んだ。ダミーの形状は加力用試験体と同一形状である。

2.4. コンクリート

コンクリートは生コンを使用し、設計基準強度 $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ 、スランプ18 cmで調合設計し、その調合表を表-2に示す。またこのコンクリートの性質を表-3に示すが、生コンのスランプは12.5 cmとなり、やや硬めであった。コンクリート強度は標準水中養生で、317 kg/cm²を示し、所要強度よりもかなり高かった。

2.5. 養生方法

試験体の養生方法は、打設後恒温室で12日間養生し、その後脱型し、地下室、恒温室にそれぞれの試験体に分けて荷重時まで気中養生した。ダミーも同じ養生としている。

2.6. 加力方法

水セメント比	砂率	調 合 (kg/m ³)						種 類		
		w/a	S/a	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	細骨材	粗骨材
65.0	47.0	277	180	851	985	1.108	秩父産	20mm以下 青梅産	AE減水剤 (プラスチッククリート)	

表-2 コンクリート調合

生コンの性質				コンクリートシリンダー4週圧縮強度			
スランプ	空気量	単位容積重量	練上り温度	気中養生		標準水中養生	
12.5 cm	3.6%	2,290 kg/cm ³	22.0°C	$F_c = 323 \text{ kg/cm}^2$	$E_c = 2.55 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$F_c = 317 \text{ kg/cm}^2$	$E_c = 2.73 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

表-3 コンクリートの性質

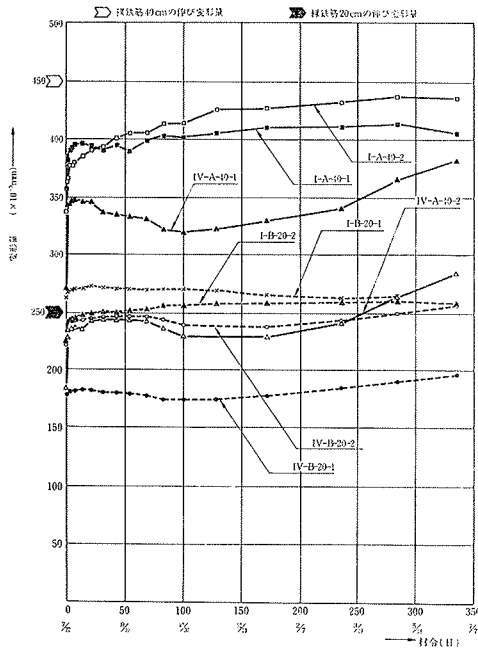


図-4 両引き試験体の伸び変形量 ($\sigma_s=2.0t/cm^2$)

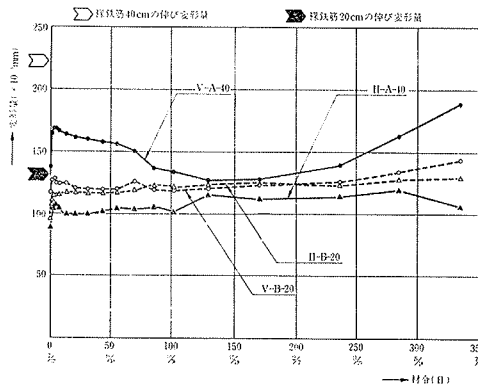


図-5 両引き試験体の伸び変形量 ($\sigma_s=1.0t/cm^2$)

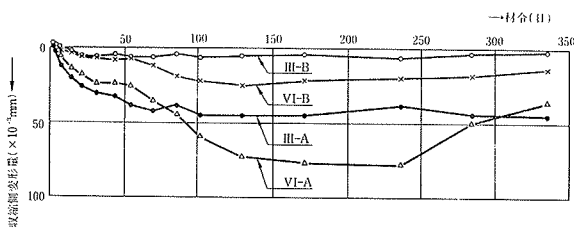


図-6 両引き試験体ダミーの変形量

加力方法は、てこの原理を利用し、荷重物の約10倍程度に拡大されるような加力試験機を製作し、その加力状況を図-3に示す。荷重物として鉄板（1枚 14 kg）を使い、鉄筋が所要応力になるまで重ね合わせて加力を行った。載荷材齢は、長期用、短期用試験体ともに打設後4週である。この加力に先立ち、引張りロードセルを用いて試験機の較正曲線を求めたが、その結果、荷重物の大きさと鉄筋応力はほぼ比例関係にあることを確認した。なお、片引き試験体の加力方法は、曲げ部材の性状と近似させるため鉄筋界面付近のコンクリートに圧縮力ではなく、曲げ引張力が作用するように工夫したものである。

2.7. 測定方法

両引き試験体は、そのアングル区間長の伸び変形をダイヤルゲージ（1/1,000 mm 精度）で測定する。また、Iブロックのうち A, B 1体ずつ試験体中央位置の鉄筋に W.S.G（4ゲージ法）を貼り鉄筋ひずみを測った。この試験体は I-A-40-1, I-B-20-1 と記号する。片引き試験体は、加力端抜出しと自由端めり込みをダイヤルゲージ（1/1,000 mm 精度）で測定するが、そのゲージホルダーの固定は試験体コンクリートにアンカーする。なお、I-C-20 試験体鉄筋の中央位置には、W.S.G. を貼り鉄筋ひずみを測った。

3. 両引き試験体実験結果

両引き試験体の持続荷重下における鉄筋伸び変形量を測定し、その結果を鉄筋応力 2.0 t/cm², 1.0 t/cm² に分けてそれぞれ図-4, 5を示す。ダミー試験体の測定結果を図-6に示すが、両引き試験体の場合、ダミー補正を行わず読み取り値をそのまま伸び変形量として図-4, 5に表わしている。短期試験の結果を図-7に示すが、同図中に裸鉄筋試験体の伸び変形測定結果も示し、比較している。

伸び変形の測定結果について検討する。(1) 付着長 40 cm, $\sigma_s=2.0 t/cm^2$ の試験体の伸び変形は、平均で加力直後には裸鉄筋の伸び変形 (S_p) の 6 割強であるが、加力後 1, 2 日のうちに伸び変形がかなり増加、その後緩慢に増加しつつ、材令 336 日には、 S_p の 8 割程度の伸び変形となった。付着長 40 cm でも長期になれば付着効果はかなり小さくなると判断される。(2) 付着長 20 cm, $\sigma_s=2.0 t/cm^2$ の試験体の伸び変形は、加力直後で既に裸鉄筋の伸び変形 (S_p) の 8 割強を示し、付着効果が殆んど無いと判断される。材令 336 日には、 S_p 変形量と同程度か、もしくはその値を越えているものもある。 S_p 変形量を越えることは理論的にはあり得ないことであるが、この現象は測定精度に起因するものか、または加力開始までの期間中でのコンクリート収縮作用に伴う収縮させられた鉄筋ひずみが、付着効果が無いため解除し、見かけ上の伸び変形が大きくなったことなどに起因するのではないと思われる。(3) 付着長 40 cm, $\sigma_s=1.0 t/cm^2$ の試験体の伸び変形は、加力直後には裸鉄筋の伸び変形 (S_s) の 5 割弱で、材令 336 日にはこれが 6 割強となる。長期においても多少付着効果は存在することがうかがえる。(4) 付着長 20 cm, $\sigma_s=1.0 t/cm^2$ の試験体の伸び変形は、加力直後でも裸鉄筋の伸び変形の 8 割強を示しており、付着長が短かければ荷重レベルが低くても余り付着効果が見られないと言える。短期試験の結果（図-7）も同様の傾向が得られた。(5) 環境条件の違

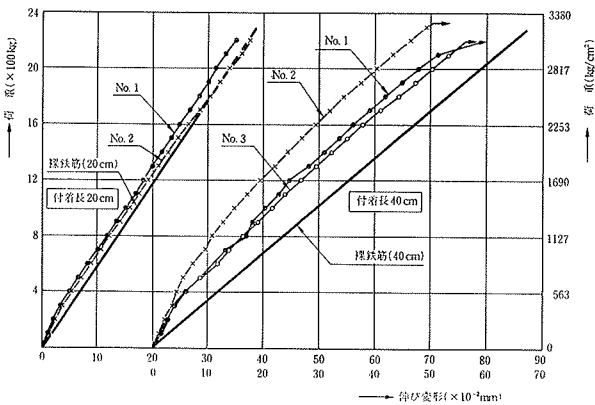


図-7 両引き試験体短期荷重試験結果

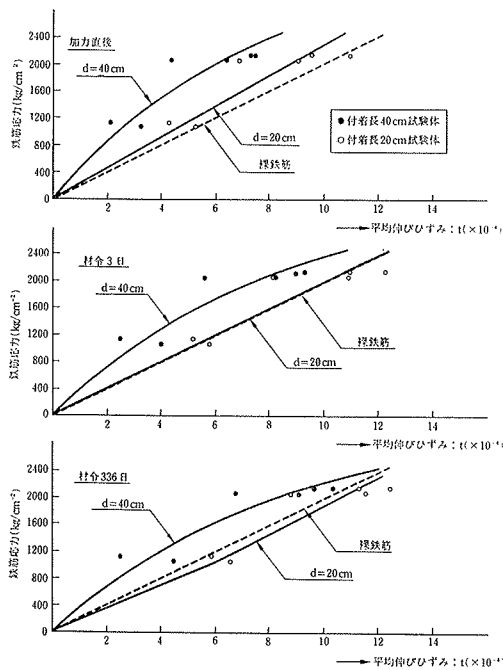


図-8 両引き試験体平均伸びひずみ曲線

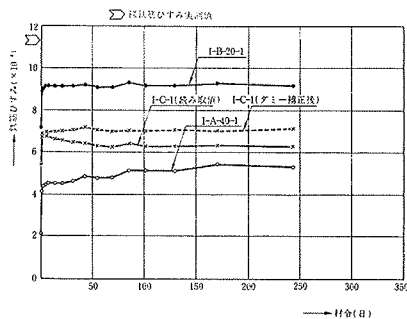


図-9 試験体長さ中央位置鉄筋ひずみ

いでは、地下室の試験体の伸び変形量は材令50日から材令200日にかけて、全体的に減少の傾向が見られるが、これはこの時期が秋季から冬季であるため温度、湿度ともに低下し、この影響を試験体が受けたためと思われる。ダミーも同様の傾向が見られた。その後、再び変形

量が増えている。

両引き試験体の伸び変形量を把握すればそれが、はり側からのスラブ上端筋伸び変形量として得られると言える。そこでこの伸び変形量実測値を別の観点から整理し、一般的な付着長の形として適用できるように考える。つまり(伸び変形量/アングル区間距離)を平均伸びひずみ(t)と定義する。そして、このようにして求めた平均伸びひずみ(t)を鉄筋応力との関係式として図-8に示す。なお、この図中では代表的な材令における結果だけをプロットしている。また図中の実線は測定点の平均的な関係グラフを描いたものである。鉄筋応力が大きい方が裸鉄筋の平均伸びひずみ(t)に近づいていく様子が見られる。一般的な試験体付着長は20~40cmの範囲内が多いと思われるので、この図-8を用いれば異形筋D10における任意付着長の伸び変形量がおよそ予想できる。

鉄筋ひずみの測定結果を図-9に示す。この図には裸鉄筋の同一荷重(2.11 t/cm²)における鉄筋ひずみ値も併記した。

4. 片引き試験体実験結果

4.1. 測定結果

片引き試験体の持続荷重における自由端めり込み、加力端拔出量を測定し、その結果を鉄筋応力 $\sigma_s = 2.0$ t/cm², 1.0 t/cm² の場合についてそれぞれ図-10, 11に示す。この図中のグラフはダミー試験体の結果を用いて既に補正している。また、短期試験の結果を図-13に示すが、この試験体数は計3体であり、最終荷重はすべて、鉄筋の降伏で決まった。

測定結果について検討する。(1) $\sigma_s = 2.0$ t/cm² の場合、加力端拔出量の動きは加力直後に平均 112×10^{-3} mm の拔出しであるのに対し、材令10日で1.5倍、336日で2.0倍を示した。自由端めり込みの動きは、加力直後に平均 9×10^{-3} mm のめり込みが見られ、材令336日には平均 62×10^{-3} mm のめり込みを示した。(2) $\sigma_s = 1.0$ t/cm² の場合、加力端拔出量の動きは加力直後に平均 43×10^{-3} mm を示し、材令10日で1.3倍、材令336日で2.2倍になった。その後も拔出し変形は漸増していくと思われる。自由端めり込みは見られなかった。(3) 環境条件の違いでは、図-10, 11のすべり量は既にダミー補正をしているために地下室の両引き試験体の変形量(図-4, 5参照)のような冬季に減少する傾向は見られない。地下室の試験体と恒温室の試験体のすべり量を比較すると、恒温室のすべり量の方が加力直後から既に大きい傾向があるが、この原因はよくわからない。ただ、I-C-1試験体はW.S.G.を貼りつけているため実際の付着長は若干短くなっていると思われる。(4) 短期試験

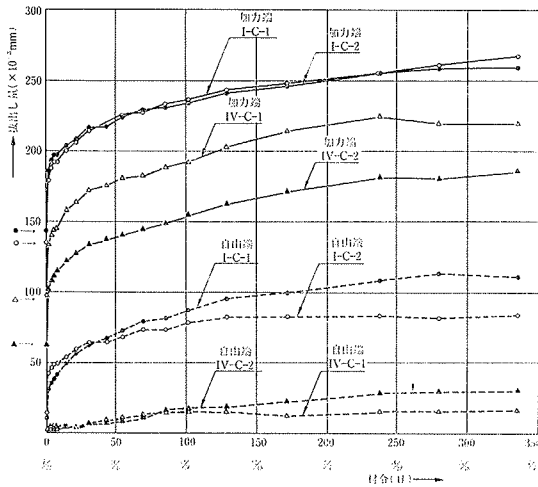


図-10 片引き試験体の拔出し変形量($\sigma_s=2.0\text{ t/cm}^2$)

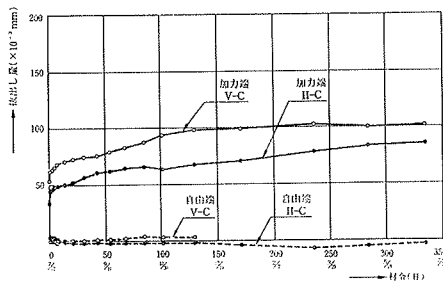


図-11 片引き試験体の拔出し変形量($\sigma_s=1.0\text{ t/cm}^2$)

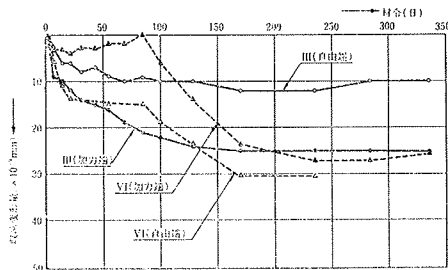


図-12 片引き試験体ダミーの変形量

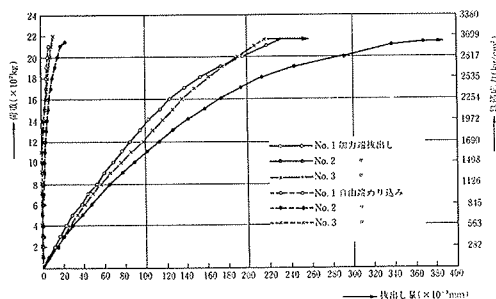


図-13 片引き試験体短期試験結果

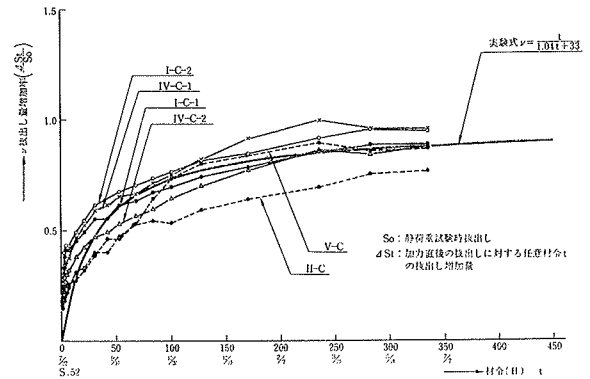


図-14 片引き試験体拔出し増加率の動き

の同荷重における加力端拔出し量の結果は、 $\sigma_s=2.0\text{ t/cm}^2$ で $130 \times 10^{-3}\text{ mm}$ 、 $\sigma_s=1.0\text{ t/cm}^2$ で $57 \times 10^{-3}\text{ mm}$ を示し、平均的には長期試験の加力直後の結果とほぼ対応は良かった。しかし、いずれの場合も各試験体の結果に相当のバラツキが見られた。

4.2. 経時的な拔出し増加率の検討

加力端拔出し量の動きを、 $\text{拔出し量増加率} = (\text{増加分拔出し量}) / (\text{加力直後の拔出し量})$ として整理しその結果を図-14に示す。この時、加力直後の拔出し量として個々の測定値でなく、短期試験結果の平均拔出し量を用いている。この結果、荷重レベルに関わりなく拔出し量増加率は、ほぼ同じ値を示した。同図中に最少2乗法を使って求めた拔出し量増加率実験式を記す。またこの図から、地下室試験体は、冬季にその動きはやや大きく、一般的に付着クリープ性状も多少湿分の影響を受けるものと思われる。

5. まとめ

持続荷重における鉄筋とコンクリートの付着性状を調べるため、D10の場合の両引き試験、片引き試験を実施しその経時的な挙動をほぼ把握することができた。両引き試験によれば $\sigma_s=2.0\text{ t/cm}^2$ の場合、付着長40cmであっても、長期的にはかなり付着性能が低下することがわかった。そのため、一般の構造物で、はり付近に曲げひびわれを生じたスラブ上端筋のはり内部からの伸び変形はかなり大きくなる可能性がある。スラブ変形計算の際には、スパンとして内法寸法でなく、はり心を考えるなどの配慮を行なう方が、より実状に合うものと思われる。

参考文献

- 1) 向井 毅, 他: コンクリートと鉄筋の付着クリープに関する研究, 日本建築学会大会論文報告集, 第89号, (1963.9), p. 39