

論文

[2010] 長期のRC曲げ部材における変形と付着に関する研究

正会員 佐藤良一 (宇都宮大学建設学科)

正会員 氏家 勲 (宇都宮大学建設学科)

正会員○湊 英一 (宇都宮大学大学院)

正会員 北条泰秀 (宇都宮大学大学院)

1. まえがき

近年、構造物の多様化、薄肉化、高強度化などの趨勢を反映して、材料、とりわけコンクリートの強度と品質の目ざましい向上がみられる。このような場合、構造部材が高い応力状態におかれるため、鉄筋コンクリート(RC)構造部材の変形問題も重視されるようになるとと思われる。

RC部材の変形、特に長期における変形に及ぼす主要因として、ひびわれと共にコンクリートのクリープは周知の事実であるが、鉄筋とコンクリート間の付着特性もその一つと考えられている。例えば、CEBの場合、ひびわれ間の平均曲率に及ぼす付着の効果は、静的載荷時に比べ長期においては1/2低下するとしている[1]。また、BSでは引張部コンクリートが 1N/mm^2 の応力が生じているとして付着の影響を間接的に考慮し、これを 0.55N/mm^2 に低下させることによって、長期の影響を考慮している[2]。しかし、これらの根拠は定かではない。

本研究は、鉄筋のひずみを長期間にわたって計測することによって、付着の時間依存性挙動を明らかにすると共に、著者らが開発した解析理論[3]に基づいて得られた結果と比較しつつ、付着特性が変形挙動に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験では普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材は最大寸法13mm、比重2.62、F.M.6.29、細骨材は比重2.60、F.M.2.95であり、共に鬼怒川産である。混和剤にはリグニンスルホン酸塩系のAE減水剤を870cc用いた。鉄筋にはD19SD295Aを用い、その実測弾性係数は $204 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ である。

2.2 供試体の作製

供試体となるRC部材を3体、クリープおよび乾燥収縮の計測用供試体を2体ずつ作製した。用いたコンクリートは水セメント比60%、単位セメント量 290kg/m^3 である。RC曲げ部材の形状・寸法は $20 \times 25 \times 240\text{cm}$ の矩形断面ばりで、その断面諸元を図-

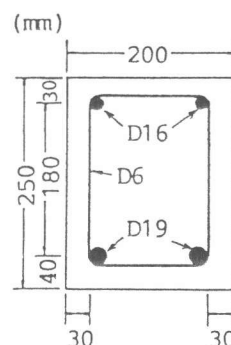


図-1 供試体断面図

1に示す。また、クリープおよび乾燥収縮用供試体は、RC部材と同じ断面である。これらの供試体は、所定の荷重を与えると同時に乾燥を開始した。

2.3 載荷方法および計測方法

載荷はスパン210cm、せん断スパン長65cmの2点載荷とした。純曲げ区間80cmを試験区間としてたわみ、コンクリートの圧縮ひずみ、鉄筋ひずみを計測した。

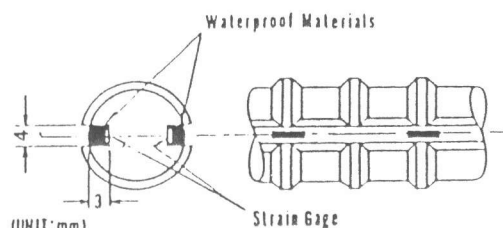


図-2 溝切鉄筋詳細

本研究の主目的の一つは、鉄筋とコンクリートとの付着応力の時間依存性挙動を把握することであるから、図-2、3に示すように、ゲージ貼付による付着の乱れを除くため、鉄筋の両側の縦リブの位置に溝を切削し、その各々の溝に4cmピッチで試験区間中央部40cmにわたってひずみゲージを貼付して材軸方向の鉄筋ひずみ分布を計測した。長期間にわたって、鉄筋のひずみを計測するため

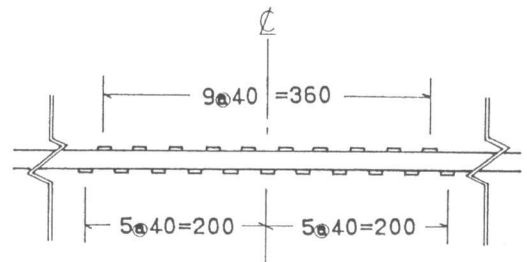


図-3 鉄筋ひずみ計測位置

に、ゲージ長6mmものをポリエステル系の接着剤で所定の位置に圧着して貼付した後、80℃で12時間加熱した。また、図-2に示しているように、防水をより確実にするためにパラフィン、ブチルゴム、エポキシ樹脂の順序でコーティングを行った。コーティングをする前には、鉄筋の引張試験を実施してゲージのチェックを行い、同時に鉄筋の弾性係数を求めた。

平均曲率は試験区間の中央点で計測されたたわみ量から求めた。コンクリートの圧縮ひずみは圧縮縁から1cmの位置で標点距離を10cmとしてコンタクトゲージで計測した。3体の供試体には、通常のRC理論に基づいて、鉄筋応力度でおおむね1000、1500および2000kg/cm²となる持続曲げモーメントを与えた。それぞれの供試体は以下CS-10,CS-15,CS-20と呼称する。また、コンクリートの乾燥収縮およびクリープひずみは埋込型ひずみ計を用いて計測した。クリープ用供試体にはコンクリート応力で約80kgf/cm²を与えた。

3. 材料の性質

コンクリートの圧縮強度、引張強度および弾性係数は、標準養生材令28日で332、29.8、28.9x10⁴であり、載荷時で390、29.6、31.3x10⁴(単位はいずれもkgf/cm²)である。解析では弾性係数は一定とし、載荷時の値を用いた。

図-4、図-5は実験により得られたクリープ係数および乾燥収縮ひずみであり、解析ではこれらの実測値を用いた。

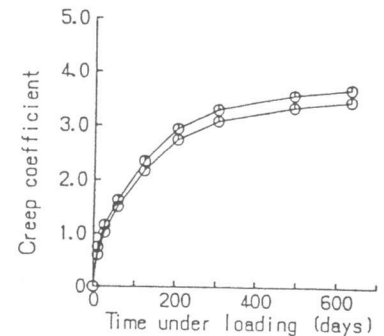


図-4 クリープ係数

4. 解析方法の概要

4.1 解析理論[3]

持続荷重を受けるRC曲げ部材の変形を、付着応力-すべり量曲線に基づいて行う場合、クリープの評価を有効弾性係数および重ね合わせの原理を適用して得られる両者の結果はほとんど差がないことが指摘されている[4]。そこでここでは有効弾性係数法によりクリープの影響を考慮することとするが、基本となる方程式は以下の仮定の下で導かれている。

- 1) 乾燥収縮は断面内で一様に生じる。
- 2) ひびわれ断面のコンクリートは引張応力を負担しない。
- 3) 圧縮応力域のコンクリートひずみと鉄筋ひずみとの間には平面保持の仮定が成立する。
- 4) 引張応力域のコンクリートひずみは応力に関する中立軸からの距離に比例する。
- 5) 全てのひびわれ幅およびひびわれ間隔は同一である。

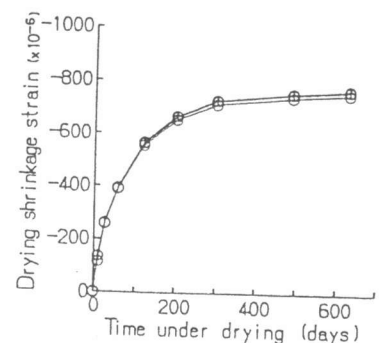


図-5 乾燥収縮ひずみ

仮定4)は部材高さが低いことおよびBSでの引張部コンクリートの応力分布の仮定[2]等に基づいている。以上の仮定に基づき、座標xの任意断面における軸方向力および曲げモーメントに関する釣り合い条件から時間ステップiの鉄筋ひずみ $\varepsilon_{s,i}$ と鉄筋位置の引張コンクリートひずみ $\varepsilon_{t,i}$ は応力に関する中立軸 y_1 の関数 $f(y_1)$ として表され、すべり量 δx との関係は次式ようになる。

$$d\delta x/dx = \varepsilon_{s,i} - \varepsilon_{t,i} = f(y_1) \quad (1)$$

一方、 $x+dx$ においても成り立つ釣り合い条件とすべり量とひずみ、鉄筋ひずみと付着応力の関係を用いれば最終的に基礎方程式として(2)式が得られる。

$$\frac{d^2 \delta x}{dx^2} = \frac{U_s}{A_s E_s} \{1+G(y_1)\} \tau x + Q(y_1) \quad (2)$$

ここで、 U_s 、 A_s 、 E_s はそれぞれ引張鉄筋の全周長、全断面積、弾性係数である。 $G(y_1)$ 、 $Q(y_1)$ は y_1 の関数である(参考文献[3]参照)。付着応力はすべり量と位置の関数(表-1参照)であり、 δx と y_1 が未知変数であるので、(1)式と連立すれば、次の境界条件の下で数値解析できる。

境界条件はひびわれ間中央断面($x=0$)およびひびわれ断面($x=a$)において次のように定められる。

$$x=0 : \delta x=0 \quad x=a : d\delta x/dx = \varepsilon_{s,i} - \varepsilon_{sh} \quad (\varepsilon_{sh} : \text{自由乾燥収縮ひずみ})$$

4.2 付着モデル

RC部材中の長期の鉄筋とコンクリート間の付着特性は、付着応力-すべり量関係を基本とし、ひびわれ付近の付着強度の低下および付着クリープの2要因を考慮したモデルを用いて解析し、検討することとした。付着応力-すべり量関係の形は六車らの式に従うこととした[5]。静的載荷時のその曲線の勾配はCS-20の最大ひびわれ間隔内において実測された鉄筋ひずみを用い、コンクリートのひずみを無視して求めた。付着応力-すべり量曲線は、本来、各位置で求めるべきものであるが、ひびわれ付近の付着強度の劣化領域を除けば、各位置での付着応力-すべり量曲線は同一であるという前提で求めた。これにより得られた付着応力-

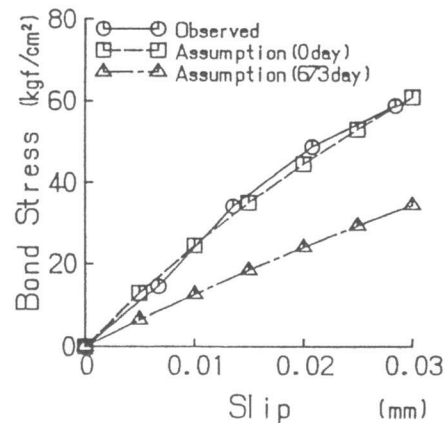


図-6 付着-すべり関係

表-1 付着特性

Bond stress-Slip curve	$\tau_x = \tau_{max}(x) e^{\frac{\ln[(e-1)\delta x/\delta_{max}(t_i)+1]}{(e-1)\delta x/\delta_{max}(t_i)+1}}$
Bond strength	$\tau_{max} = 140 \text{ kgf/cm}^2$ (except for near cracked section)
Slip at τ_{max}	$\delta_{max}(t_1) = 0.24 \text{ mm}$ (at static loading)
Drop of bond strength	$\tau_{max}(x) = \frac{a-x}{1.5xD_s} \tau_{max}$ ($a - 1.5xD_s \leq x \leq a$) a : half crack spacing D _s : diameter of reinforcement
Creep properties of bond	$\delta_{max}(t_i) = (1.0 + 0.32t_i) \delta_{max}(t_1)$ ($0 \leq t_i \leq 1$) $= \left(1.32 + \frac{1.32(t_i-1)}{1.64(t_i-1)+134}\right) \delta_{max}(t_1)$ ($1 < t_i$) (days)

すべり量曲線を示せば図-6のとおりである。図-6では通常のものとは比べ小さいすべり量の範囲で示されているが、これはひびわれが十分に分散した曲げ部材での付着応力-すべり量曲線が位置に関係なく成り立つ範囲では、この程度のすべり量しか生じないことを意味している。すなわち、通常議論されるひびわれ幅の値に対しては、位置に依存するひびわれ付近の付着劣化領域の付着応力-すべり量曲線が大きな役割をされると考えられるのである。ひびわれ付近の付着劣化領域も最大ひびわれ間隔内において実測された鉄筋ひずみに基づき図-7のように仮定した。付着のクリープ特性は、既往の研究と同様に[6]、時間と共に付着剛性が低下するという形で取り入れ、その低下率は高橋らの実験結果に基づいた[7]。これらをまとめ

て示せば表-1のようであり、曲線の1例を図-6に示す。

5. 結果と考察

図-8は、平均曲率の経時変化を、前章で述べた物性値および付着モデルを用いて計算した値と比較したものである。同図には引張部コンクリートを無視した計算値も併せて示してある。これによれば、平均曲率については、載荷後初期を除き、本解析モデルはおおむね妥当といえる。また、計

算による引張部コンクリートの剛性寄与は静的載荷後初期の段階で15~

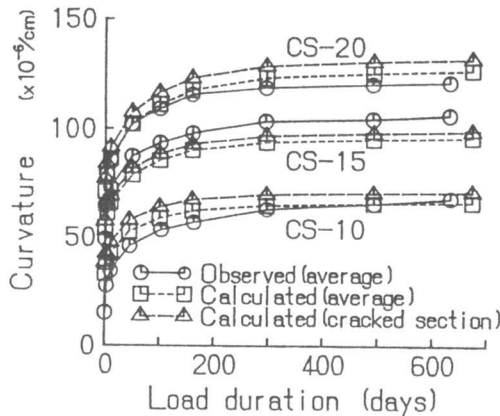
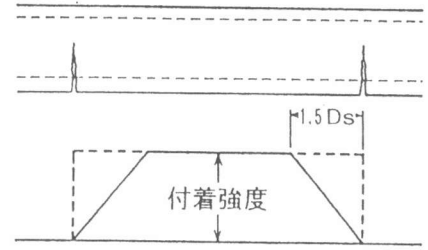


図-8 平均曲率の経時変化

6%、材令673日で7~3%であり、この経時変化による減少が付着のクリープに起因するものと思われる。鉄筋応力度が小さいCS-10に特に顕著にみられる載荷後初期の実測値と計算値の相違は、図-9に示すように、ひびわれ断面においてもコンクリートに負担される引張応力を、計算で考慮していないためである。載荷後初期に引張応力がコンクリートに負担され、その後急激に消失するこの現象は、静的時の変形にクリープや乾燥収縮の影響を考慮した項をそのまま掛け合わせるような変形予測方法には問題があることを意味していると思われる。

次に、平均曲率を構成する要因である引張鉄筋と圧縮部コンクリートのひずみの平均値について実測値と計算値の比較した結果を図-11および図-12に示す。図-11は図-10に示すようなひずみ分布に基づいて求めている。実測鉄筋ひずみは、主としてひびわれ断面の値の増大に対応して、載荷後初期に急増し、その後はわずかに増加しながら一定値に収束する傾向を示す。この傾向は、ひびわれ断面のコンクリートによる引張応力の時間経過にともなう減少と付着クリープに起因するといえよう。一方、圧縮部コンクリートのひずみについては、引張部コンクリートの影響はほとんどないといえ、さらにひずみの増加量も鉄筋の場合と比べ非常に大きい。

図-13は、図-10の鉄筋ひずみから求めた付着応力の分布を示したものである。付着応力



付着強度の材軸分布

図-7 付着強度の劣化領域

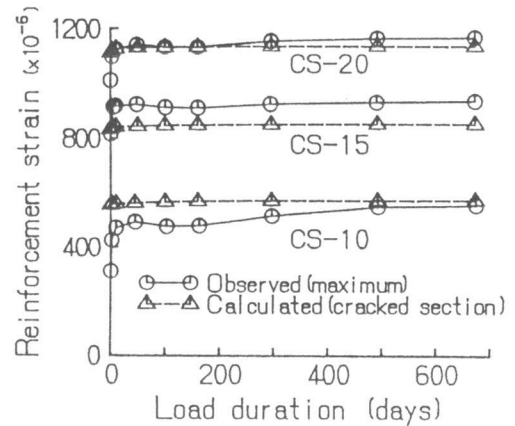


図-9 最大鉄筋ひずみの経時変化

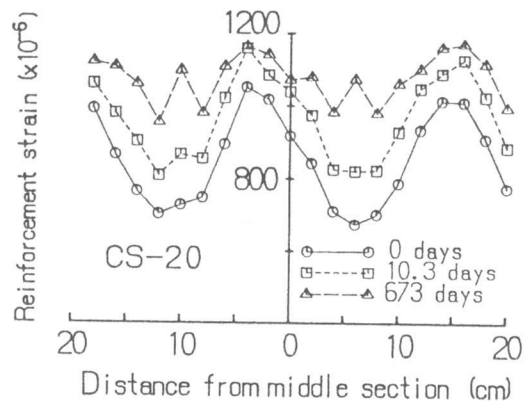


図-10 鉄筋ひずみ分布

は、鉄筋の公称直径から溝の幅を差し引いた値を用い、また、各ゲージの間は直線近似して求めものである。

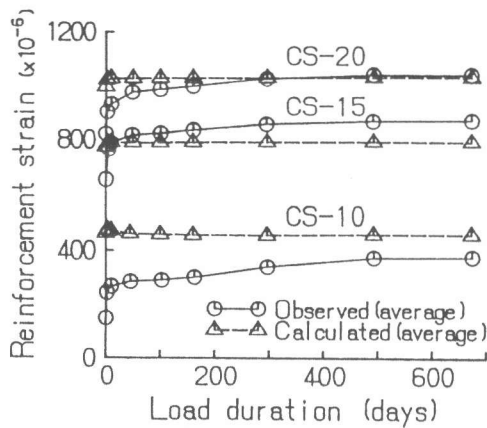


図-1 1 平均鉄筋ひずみの経時変化

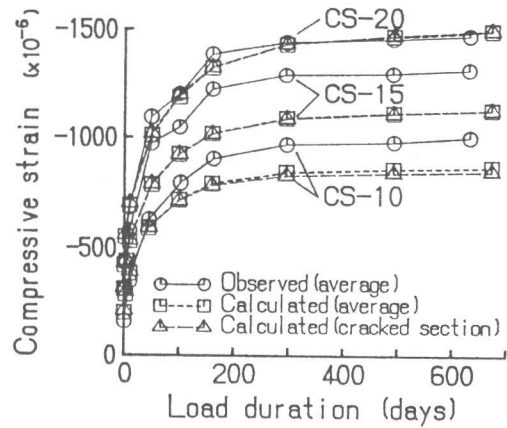


図-1 2 コンクリート圧縮ひずみの経時変化

次に、図

負の値も正として求めた部材中央部40cmの区間の平均付着応力の経時変化の1例を計算値と比較して示す。この図に示されているように、平均付着応力は、載荷後から低下率を減少させながら、150~200日あたりまで低下し、その後はほとんど一定値となっている。各部材の平均付着応力の最大および最小値は、CS-10の場合30および23、CS-15の場合33および19、CS-20の場合41および35であり（単位はいずれもkgf/cm²）、おおむね鉄筋応力度に対応して大きくなる傾向がある。載荷直後の最大値から材令673日までに低下した値の低下率は、CS-10の場合20%、CS-15の場合42%、CS-20の場合15%であり、ひびわれ間隔が異なることより鉄筋応力度に依存した傾向は見当たらないが、673日以降低下しないとすればCEBの低下率は大きい。一方、計算値の場合の時間経過に伴う平均付着応力の変化は鉄筋応力度に依存する。また、その挙動は載荷直後から一日までに急激に低下した後、若干増加しその後わずかに減少している。載荷後早期における実測値と計算値の相違は、付着剛性の低下率の与え方とひびわれ断面における引張部コンクリートの応力負担によると考えられる。

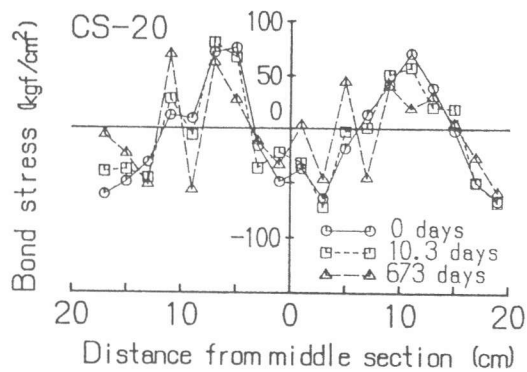


図-1 3 付着応力分布

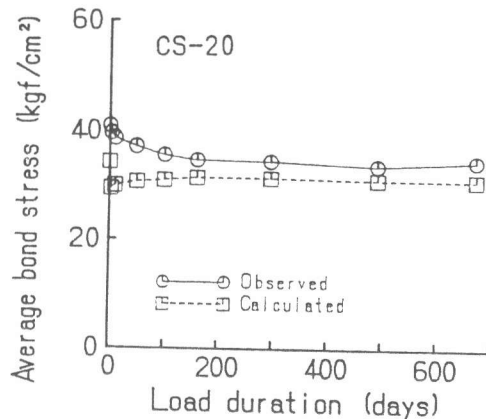


図-1 4 平均付着応力の経時変化

そこで、次にCS-20を例にとり、付着クリープの有無が平均付着応力および平均曲率に及ぼす影響を数値解析的に検討した結果を図-1 5、1 6に示す。付着クリープを無視した計算値は考慮した場合に比べ50%強大きい。図-1 4に示されている付着クリープを考慮した計算値と実測値の差が10%以内にあることを考えれば、平均付着応力を精度よく予測するために付着クリープは欠かせない要因といえる。しかし、図-1 6に示されているように、変形に及ぼす影響は、クリープおよび乾燥収縮と比較して極めて小さい。これは、図-1 2からわかるように圧縮部コンク

リートの
ひずみの
経時変化
が付着の
それに比
べ大きい
ためと思
われる。

最後に、
図-17

はひびわ

れ近傍の付着の劣化域の長さの影響を計算によって
検討したものであるがこの影響も大きい。しかし、
付着クリープと同様、変形に及ぼす影響度は小さい。

6. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論をまとめると以下の
とおりである。

- 1) 平均付着応力はおよそ2年間で42~15%低下した。
- 2) 本研究で用いた解析方法は、載荷後早期の平均付着
応力の挙動においては用いた付着剛性の低下率
の値やひびわれ断面でのコンクリートの引張応力
負担についてさらに検討する余地があるが、長期
においては平均付着応力の時間依存性挙動をおおむね推定できる。
- 3) 付着クリープが平均付着応力に及ぼす影響は大きい。しかし、変形に及ぼす影響は、コン
クリートのクリープおよび乾燥収縮に比べ極めて小さい
- 4) 付着強度の劣化域の範囲が及ぼす影響は付着クリープと同様、平均付着応力に対しては大

[謝辞] 本研究の一部は文部省の科学研究費(一般研究(C)、課題番号03650389)の援助のも
実施したものであり、厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1]CEB:Design Manual on CRACKING AND DEFORMATION, pp1.1-1.10, 1985
- [2]BSI:Structural use of concrete Part2, pp3/1-3/8, 1985
- [3]佐藤良一他:持続荷重を受けるRC曲げ部材の変形・ひびわれ, JCI年講, Vol.9, pp.217-222, 1981
- [4]佐藤良一他:応力履歴を考慮したRC曲げ部材の変形解析法, JCI年講, Vo.12, pp.239-244, 1991
- [5]六車熙他:鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, 第131号, pp1-8, 第132号, pp1-6, 1967
- [6]鈴木計夫他:持続荷重下における異形鉄筋とコンクリートの付着特性, セ技年報, 40, pp514-517, 1988
- [7]高橋久雄他:鉄筋とコンクリートの付着クリープ性状に関する研究, JCI年講, Vol.1, pp465-468, 1979

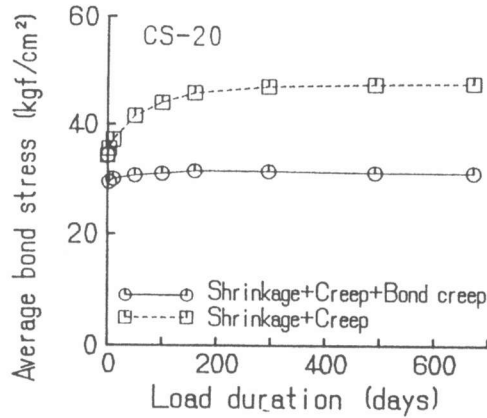


図-15 付着クリープの影響

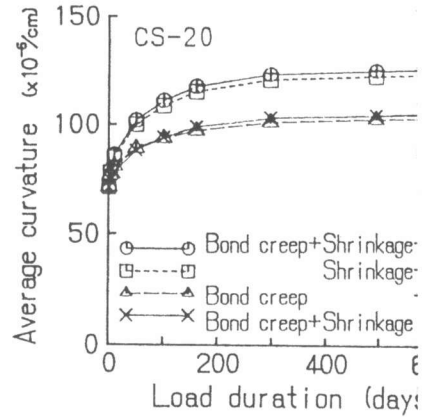


図-16 各要因が変形に及ぼす

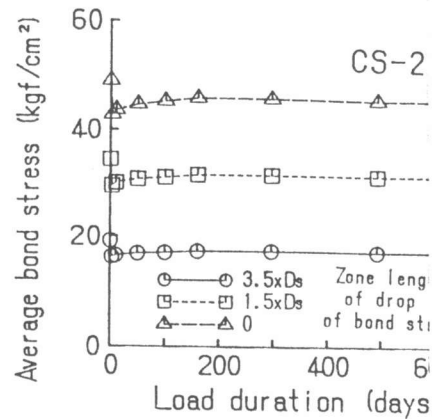


図-17 付着の劣化域長さが
付着応力に及ぼす影響