

## [2151] 段階的に増大する持続荷重下のRC部材の変形と付着性状

氏家勲<sup>\*1</sup>・佐藤良一<sup>\*2</sup>・北條泰秀<sup>\*3</sup>・鳥取誠一<sup>\*4</sup>

## 1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物に作用する死荷重は建設から供用に至るまでに必ずしも一定ではなく、また、供用後にも補修・補強される場合、荷重はさらに増加することもありうる。このような一定ではない持続荷重が作用する場合の鉄筋コンクリート部材の長期変形挙動は一定の持続荷重が作用した場合と異なることが既に報告されているが[1]、十分に明らかとはなっていない。

本研究は一定の持続荷重を与えた曲げ実験と段階的に荷重を増大させた持続曲げ載荷実験を実施して、それぞれの付着特性を把握するとともに、荷重履歴の影響がRC部材の長期の変形およびひび割れ幅に及ぼす影響を実験的および数値解析的に検討したものである。

表-1 供試体一覧

Specimen	Plac-ing	Bar arrangement	$A_s$ ( $\text{cm}^2$ )	$p$ (%)	$A'_s$ ( $\text{cm}^2$ )	$p'$ (%)
CS20CR	2nd	d19-d16	4.86	1.15	3.82	0.91
CS20	2nd	d19-0	5.51	1.31	0	0
CS15CR	2nd	d19-d16	4.86	1.15	3.82	0.91
CS15	2nd	d19-0	5.51	1.31	0	0
CS10CR	2nd	d19-d16	4.86	1.15	3.82	0.91
CS10	2nd	d19-0	5.51	1.31	0	0
VS101015CR	2nd	d19-d16	4.86	1.15	3.82	0.91
VS101015	2nd	d19-0	5.51	1.31	0	0
VS152020CR	1st	d19-d16	4.86	1.15	3.82	0.91
VS152020	1st	d19-0	5.51	1.31	0	0
VS101520CR	1st	d19-dm16	4.86	1.15	3.16	0.75
VS101520	1st	d19-0	5.51	1.31	0	0
VS102020CR	1st	d19-d16	4.86	1.15	3.82	0.91
VS102020	1st	d19-0	5.51	1.31	0	0

$A_s, p$ : area and ratio of tension reinforcement  
 $A'_s, p'$ : area and ratio of compression reinforcement  
dm: grooved reinforcing bar

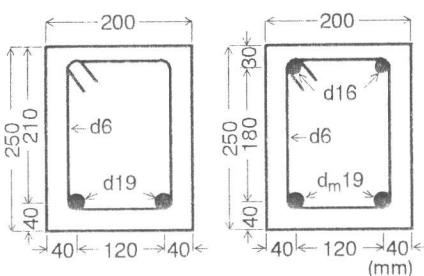


図-1 供試体断面図

## 2. 実験概要

## 2. 1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、細骨材と粗骨材には鬼怒川産の川砂(比重2.60、F.M. 2.95)と碎石(最大寸法13mm、比重2.62、F.M. 6.29)をそれぞれ用いた。混和剤にはリグニンスルフォン酸塩系のAE減水剤をセメント重量の0.3%用いた。鉄筋にはSD295の呼び名D19、D16、D6を用いた。

## 2. 2 供試体の作製

供試体の作製は2回に分けて実施し、RC部材合計12体、併せてクリープおよび乾燥収縮の計測用供試体を合計8体ずつ作製した。表-1に供試体の一覧を示す。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<sup>3</sup>である。RC曲げ部材の形状・寸法は20x25x240cmの矩形断面ばかりで、その断面諸元を図-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、所定の持続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を試験区間として平均曲率、コンクリートの圧縮ひずみ、ひび割れ幅、鉄筋ひずみを計測した。載荷した曲げモーメントは圧縮鉄筋の無い場合の引張鉄筋応力度で1000、1500、2000(kgf/cm<sup>2</sup>)(圧縮鉄筋の有る場合には引張鉄筋に溝を切削した鉄筋を用いているため1130、1690、2270(kgf/cm<sup>2</sup>)となる。)の3種類とし、図-2に示すように静的載荷後21日および210日において持続荷重を変化させた。供試体名は載荷経

\* 1 宇都宮大学助手 工学部建設学科、(正会員)

\* 2 宇都宮大学助教授 工学部建設学科、工博(正会員)

\* 3 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻、(正会員)

\* 4 (財) 鉄道総合技術研究所 構造担当研究室主任研究員、工修(正会員)

路と圧縮鉄筋の有無を表している。例えば、CS20CRは鉄筋応力度で $2000\text{kgf/cm}^2$ の一定の持続載荷を行った圧縮鉄筋を有するもの、VS101520は引張鉄筋応力度で1000、1500、2000 $\text{kgf/cm}^2$ と増大させた圧縮鉄筋のない供試体を表す。

平均曲率は試験区間中央でダイヤルゲージ(精度 $1/100\text{mm}$ )を用いて計測されたたわみ量より求めた。コンクリートの圧縮ひずみは圧縮縁から $1\text{cm}$ の位置で標点距離を $10\text{cm}$ としてコンタクトゲージ(精度 $1/1000\text{mm}$ )を用いて計測した。ひび割れ幅は鉄筋位置で標点距離を $5\text{cm}$ としてコンタクトゲージ( $1/1000\text{mm}$ )を用いて計測した。鉄筋ひずみは異形鉄筋の縦リブの位置に深さ $3\text{mm}$ 、幅 $4\text{mm}$ の溝を切削し、その溝に試験区間中央 $40\text{cm}$ にわたって $2\text{cm}$ ピッチで貼付したひずみゲージより求めた。

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 $80\text{kgf/cm}^2$ を与えた。

供試体は34日間の湿布養生後に載荷し、載荷後700日までは温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ R.H.、700日以降は温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $70 \pm 5\%$ R.H.の恒温恒湿室に静置した。

### 3. 材料の性質

一回目のコンクリートの圧縮強度、引張強度、弾性係数は標準養生材齢28日で $332$ 、 $29.4$ 、 $29.0 \times 10^4$ であり、載荷時で $349$ 、 $30.6$ 、 $28.9 \times 10^4$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )である。二回目の場合は、 $378$ 、 $31.9$ 、 $32.0 \times 10^4$ 、 $390$ 、 $29.6$ 、 $31.3 \times 10^4$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )である。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を示せば図-3、図-4のとおりである。ひずみゲージより、実断面積を用いて求めた引張鉄筋の弾性係数は $204 \times 10^4 \text{kgf}/\text{cm}^2$ である。

### 4. 解析理論

解析は著者らの方法に基づいて行った[2]。後述する式は以下の仮定によって誘導されている。

- 1)断面内の温度は一定で一様であり、乾燥収縮は断面内で一様に生じる。
- 2)ひび割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)すべてのひび割れ幅およびひび割れ間隔は同一である。

クリープの影響を有効弾性係数を用いることにより考慮し、これらの仮定によって得られたひび割れ間の任意断面の曲率は式(1)によって得られる。

$$\{1/\tau(y)\} = \frac{\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}}{d-y} = \frac{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_e I_e(y)} = \{1/\tau(y)\}_M + \{1/\tau(y)\}_{As} + \{1/\tau(y)\}_{At} \quad (1)$$

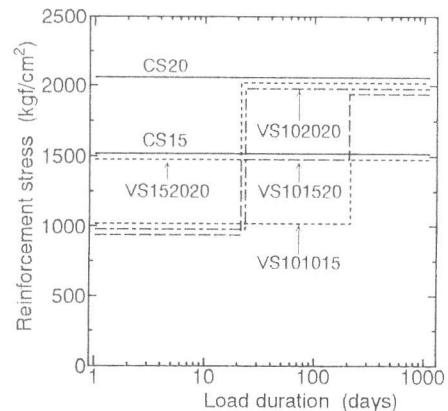


図-2 荷重経路

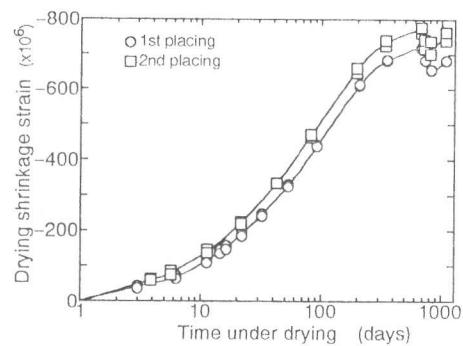


図-3 乾燥収縮ひずみ

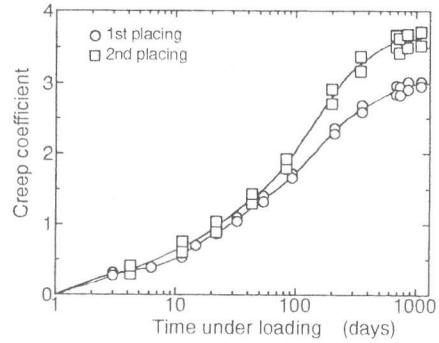


図-4 クリープ係数

上式は、応力に関する中立軸yが与えられれば、任意断面の曲率 $1/r(y)$ が得られることを意味するが、中立軸はすべりと引張鉄筋ひずみ、鉄筋位置のコンクリートひずみの関係式と次の微分方程式を以下の境界条件のもとで数値解析することによって求められる。(式の誘導については参考文献[2]を、変数については論文末の[記号]を参照)

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \frac{u}{A_s E_s} [1 + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{G_{cr}(y)}{G_c(y)} \frac{M + \Delta M_{sc,s}(y) + \Delta M_{st,s}(y)}{E_e I_e(y)} (d-y) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{G_{cs}(y)}{G_c(y)} \right\} \varepsilon_{cs}] \tau_b(s, x) \quad (2)$$

境界条件はひび割れ間中央断面( $x=0$ )およびひび割れ断面( $x=s_r/2$ )において次のように定められる。

$$x=0 : s=0,$$

$$x=s_r/2 : ds/dx = (\varepsilon_{st})_{cal.} - \varepsilon_{cs}$$

解析に用いた付着特性は表-2に示すとおりである。付着応力-すべり量関係は六車らの式に従うこととし[3]、ひび割れ近傍の付着劣化領域の範囲は最大ひび割れ間隔内において実測された鉄筋ひずみに基づいて定めた。また、付着のクリープは時間ととも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て定めた[4]。

## 5. 実験結果および考察

図-5、6に鉄筋応力度で $2000\text{kgf/cm}^2$ の一定の持続荷重を与えたCS20CR、CS20と2段階に荷重を増大させて同じ持続荷重を与えたVS102020CR、VS102020の平均圧縮ひずみの経時変化の実測値と解析値を示す。実測値において、圧縮鉄筋がある場合にはひずみの差は小さいが、圧縮鉄筋の有無に拘らず、いずれも一定の持続荷重を与えた方のひずみが大きい。有効弾性係数法によりクリープの影響を考慮して求めた解析値も実測値と同様な結果を示している。有効弾性係数法は応力履歴の影響を考慮できないことから、荷重履歴が異なった場合のひずみ差は用いたコンクリートのクリープ係数および乾燥収縮ひずみの違いによるものであり、比較的早い時期に変化する荷重履歴を受けた場合にはその影響は小さいと考えられる。

図-7、8は一定持続載荷のCS15と鉄筋応力度で $1500\text{kgf/cm}^2$ の荷重を2段階目に与えたVS101520とVS101015の圧縮ひずみを示したものである。21日目に荷重をCS15と同じにしたVS101520の場合の圧縮ひずみは、鉄筋応力度で $1500\text{kgf/cm}^2$ の荷重を受けている期間では、一定の持続荷重のものとほとんど同じ値となっている。しかしながら、210日目に荷重を増加させたVS101015の場合にはCS15より圧縮ひずみは小さくなってしまっており、コンクリートひずみにおいては再載荷の時期の遅い場合に荷重履歴の違いの影響が

表-2 解析に用いた付着特性

Bond stress-Slip curve	$\tau_b(s, x) = \tau_{b,max}(x) \cdot e^{-\frac{\ln \{(e-1)s/s_{max}(t_0, t_0)+1\}}{(e-1)s/s_{max}(t_0, t_0)+1}}$
Bond strength	$\tau_{b,max} = 140\text{kgf/cm}^2$ $\{0 \leq x \leq (s_r/2 - 1.5ds)\}$ $s_r$ : crack spacing
Slip at $\tau_{b,max}(x)$	$s_{max}(t_0, t_0) = 0.24\text{ mm}$ (at static loading)
Drop of Bond strength	$\tau_{b,max}(x) = \frac{s_r/2 - x}{1.5ds} \tau_{b,max}$ $\{(s_r/2 - 1.5ds) \leq x \leq s_r/2\}$
Creep coefficient of bond	$\phi_b(t, t_0) = 0.32(t-t_0)$ $\{0 \leq t-t_0 \leq 1(\text{day})\}$ $= \{0.32 + \frac{1.32(t-t_0-1)}{1.64(t-t_0-1)+134}\} \{1(\text{day}) \leq t-t_0\}$

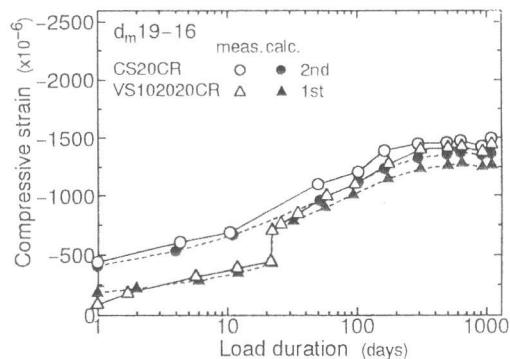


図-5 圧縮部コンクリートひずみ

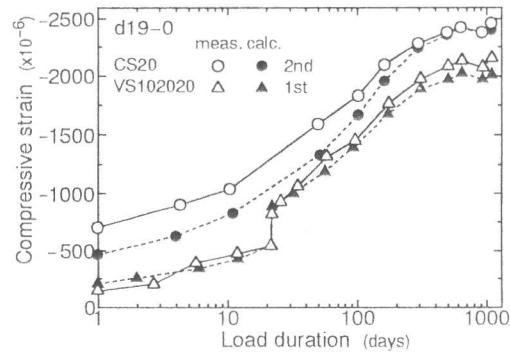


図-6 圧縮部コンクリートひずみ

認められる。これはVS1010  
15の場合には210日までに作用している荷重が小さいことからそ

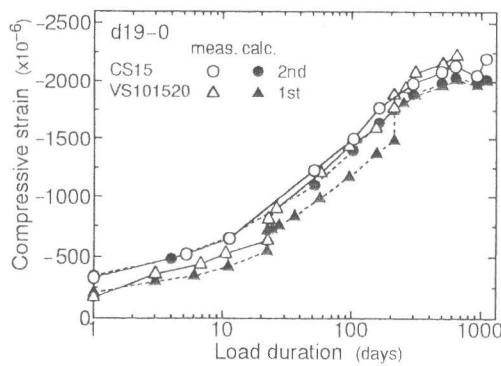


図-7 圧縮部コンクリートひずみ

れまでに生じる圧縮ひずみが小さいことに加えて、210日に増加した荷重に対するクリープひずみも載荷材齢が遅いことから小さくなるためと考えられる。

次に、荷重履歴の違いが鉄筋の平均ひずみに及ぼす影響を示したのが図-9である。すなわち、図-9はCS20CR、CS15CRとVS101520CRの供試体中央40cm区間の平均鉄筋ひずみと最大鉄筋ひずみの経時変化の1例を示したものである。一定の持続荷重が作用しているCS20CRとCS15CRの平均鉄筋ひずみは最大鉄筋ひずみよりどちらも約7%小さくなっている。しかしながら、VS101520CRの平均鉄筋ひずみは鉄筋応力度が $1690\text{kgf/cm}^2$ の段階では約24%、 $2270\text{kgf/cm}^2$ の段階では13%程度小さくなってしまっており、荷重履歴を受けることによりテンションスティフニング効果が高くなっていることが示されている。また、鉄筋ひずみに関しては荷重を増加させる材齢が早期であっても荷重が変化する影響を受ける。

図-10、11に変化する荷重履歴を受けたVS101520とVS101015の平均曲率の経時変化を一定の大きさの持続荷重を受けた部材のそれと比較して示す。鉄筋の平均ひずみに及ぼす荷重履歴の違いの影響は前図によって確認されたが、この影響はVS101520などのように鉄筋応力度が高く、従って圧縮コンクリートひずみも大きい部材の場合には変形に対して小さく、圧縮部コンクリートひずみと同様に一定持続載荷のCS20と同じ荷重になった期間ではほぼ同じ曲率となっている。一方、VS101015の場合、コンクリートの圧縮ひずみや鉄筋ひずみが相対的に小さくそれ故テンションスティフニング効果が高いこと、さらに2段階目の持続荷重がある程度長期間経てから与えられているために、平均曲率は1100日においてCS15に比べて約15%低下しており、荷重履歴の影響が曲率においても認められる。従って、このような場合にはコンクリートとともに鉄筋の平均ひずみに対する応力履歴の影響を考慮した解析を行う必要がある。

図-12、13は鉄筋応力度で $1500\text{kgf/cm}^2$ および $2000\text{kgf/cm}^2$ の荷重が一定に作用した場合と段階的

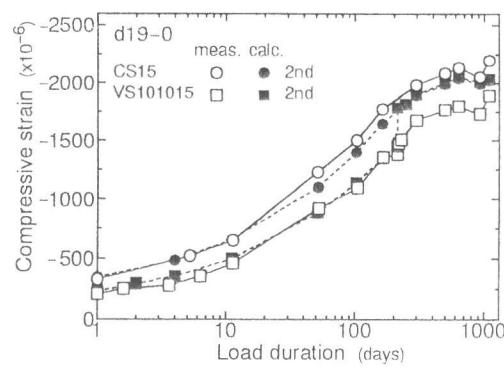


図-8 圧縮部コンクリートひずみ

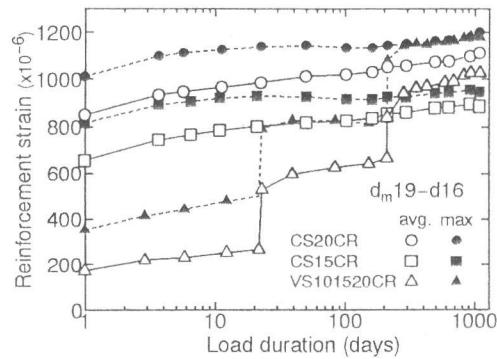


図-9 鉄筋ひずみの経時変化

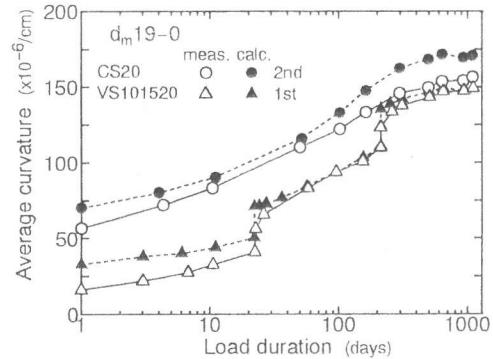


図-10 平均曲率の経時変化

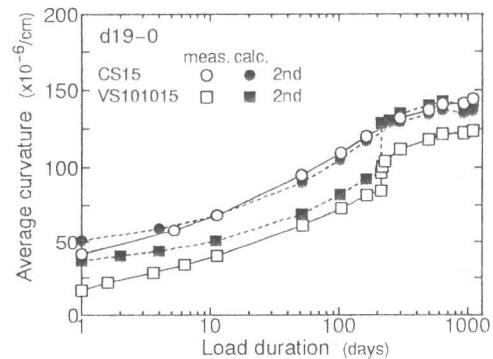


図-11 平均曲率の経時変化

に作用した場合の平均ひび割れ幅の経時変化を示す。変化する荷重履歴を受けた供試体の実測された平均ひび割れ幅は、図-9に示す鉄筋の平均ひずみの挙動に密接に関係して、載荷時期によらず一定の荷重が作用している場合に比べて小さくなっている。

表-3は平均ひび割れ間隔と平均ひび割れ幅の結果を示すが、他の供試体においても変化する荷重履歴を受けることにより一定荷重の場合より平均ひび割れ幅は小さくなっている。また、平均ひび割れ間隔は持続荷重が増加することにより小さくなる傾向があり、このことも平均ひび割れ幅が小さくなっている一因と考えられる。

鉄筋の平均ひずみやひび割れ幅は当然のことながら付着応力の影響を受けるので、次に荷重履歴の違いが付着応力に及ぼす影響を検討する。図-14は鉄筋ひずみ分布から求めた平均付着応力の経時変化を示したものである。平均付着応力は実測された鉄筋ひずみの差より計算された付着応力の絶対値を部材中央40cmの区間で平均したものである。一定の荷重を持続載荷された供試体の実測された平均付着応力は約200日までは減少しているが、その後はほとんど変化していない。一方、変化する荷重履歴を受けたものは静的載荷後増加している。これは載荷荷重が小さく、ひび割れが十分に進展しておらずひび割れ断面における引張部コンクリートの応力負担が減少するためと考えられる。次に荷重を増大すれば平均付着応力は増大している。その後は徐々に低下しているが、再度荷重が増加することにより付着応力は増加しまた減少している。

そこで、図-15、16はCS20CRとVS101520CRの供試体の最大ひび割れ間隔内において実測された鉄筋ひずみを用いて求めた付着応力とすべり量の関係を示す。鉄筋ひずみが最小となる断面はほとんど移動しないので、その位置ではすべり量および付着応力は経時的に0となる。また、図-16では21日目と210日に荷重を増大させたので、その前後の付着応力とすべり量の関係を示してある。なお、すべり量を計算する際のコンクリートひずみには解析結果を参考にして自由乾燥収縮ひずみの80%の値を用いた。

一定の持続荷重が作用した場合には付着剛性は時間と共に低下するが、段階的に荷重が増大することにより付着剛性は増加している。従って、変化する荷重履歴を受けた場合、1100日経過した時の付着剛性は静的載荷時の付着剛性に比べてあまり低下していない。これは一定の持続載荷の場合には鉄筋のふ

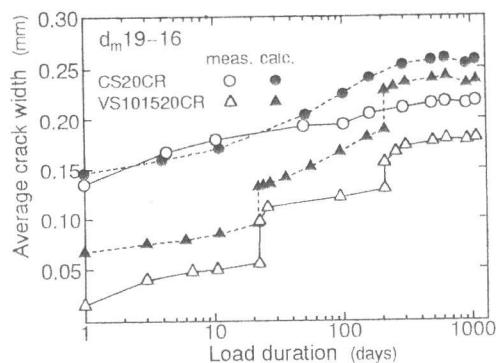


図-12 ひび割れ幅の経時変化

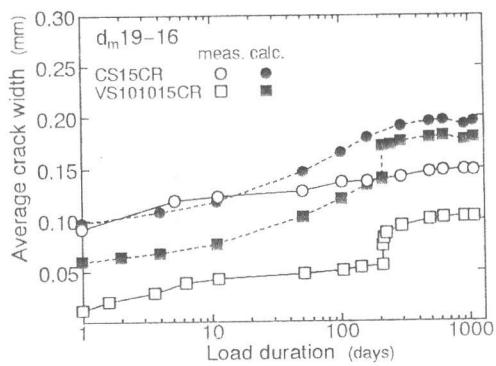


図-13 ひび割れ幅の経時変化

表-3 実験結果一覧

Specimen	Average crack spacing (cm)	Average curvature ( $10^{-6}/\text{cm}$ )		Average crack width (mm)	
		static	1100days	static	1100days
CS20CR	16.6	64.5	123.0	0.13	0.22
VS152020CR	14.8	43.4	127.5	0.08	0.20
VS101520CR	15.2	18.9	125.1	0.02	0.18
VS102020CR	16.1-11.8*	16.2	115.2	0.01	0.13
CS15CR	14.1	18.6	107.5	0.10	0.15
VS101015CR	12.6	15.0	96.9	0.01	0.10
CS20	12.3	56.5	156.5	0.09	0.15
VS152020	12.3	35.9	132.6	0.03	0.14
VS101520	13.3	15.9	149.0	0.01	0.15
VS102020	16.0-10.7*	15.5	148.5	0.01	0.13
CS15	14.1	41.0	143.9	0.06	0.13
VS101015	13.5	16.1	123.5	0.01	0.09

\*crack spacing narrowed by new cracking due to additional sustained load

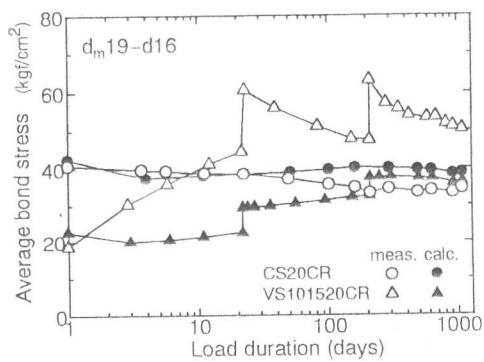


図-14 平均付着応力の経時変化

しがコンクリートにくい込むことによりすべり量が増大し、付着のクリープが生じるが、段階的に荷重が増大する場合にはそのくい込んだ状態から鉄筋が引張られるためにあまりすべることができず、付着剛性が増加するものと考えられる。以上のような付着特性の変化が一定荷重の場合に比べて、変化する荷重履歴を受けた場合の長期のひび割れ幅の増加が小さくなつた一因と考えられる。

## 5.まとめ

荷重の履歴を影響因子とする長期の持続実験を実施し、変形、ひび割れ幅、付着応力等について検討した結果、本研究の範囲内で以下のような結果が得られた。

1) 静的載荷後21日目に荷重を増加させた場合の実測平均

コンクリートひずみは有効弹性係数法による解析値とほぼ一致し、比較的早期に持続荷重が大きくなる場合にはその影響は小さい。しかし、210日に荷重を増加させた場合にはコンクリートひずみは一定の持続荷重の場合より小さくなり、荷重履歴の影響が認められた。

2) 平均鉄筋ひずみは荷重を増大させる時期によらず、荷重履歴の影響を受け、一定の持続荷重を受けた場合よ

りも小さくなつた。その程度は鉄筋応力度が小さい場合の方が大きかった。

3) 静的載荷後210日目に鉄筋応力度で $1500 \text{ kgf/cm}^2$ の持続荷重に増大させた場合の平均曲率は荷重履歴の相違が平均圧縮部コンクリートひずみおよび平均鉄筋ひずみに及ぼす影響が小さくなることより一定の持続載荷のものより約15%小さくなつた。

4) 一定の持続荷重が作用する場合には、平均付着応力は約200日までは徐々に減少し、その後はほとんど一定の値となつた。一方、荷重を段階的に増大させた場合には荷重の増大の時に付着剛性が大きくなることにより、平均付着応力が一定の持続荷重の場合より大きくなることが明らかとなつた。これにより、変化する荷重履歴を受けた供試体の平均ひび割れ幅は一定の持続荷重が作用しているものに比べて荷重を増大させる時期によらず小さくなつた。

<参考文献> [1]佐藤良一他:RC部材の変形、応力の長期挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 2、pp. 287-292、1991。 [2]R.Sato et al. :Basic Bond Equations in A Reinforced ConcreteFlexural Element, Proceedings of International Conference on Bond in Concrete, Vol. 1, pp. 2-89-2-98, 1992. [3]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、pp. 1-8、第132号、pp. 1-6、1967. [4]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、コンクリート工学年次講演会講演論文集、Vol. 1、pp. 465-468、1979. [5]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、セメント技術年報、40、pp. 514-517、1986.

[記号] M:作用持続曲げモーメント、y:応力に関する中立軸高さ、 $\Delta M_{sc}(y)=A_s' E_s \{(y-d')^2 + y_{ct}\} \varepsilon_{cs}$ 、 $\Delta M_{st}(y)=-A_s' E_s \{(d-y)^2 - y_{ct}\} \varepsilon_{ct}$ 、 $\varepsilon_{cs}$ :乾燥収縮に起因する圧縮および引張鉄筋の曲げモーメント、d, d':圧縮縁から引張および圧縮鉄筋までの距離、 $\varepsilon_{ct}$ :引張鉄筋ひずみ、 $y_{ct}$ :引張鉄筋位置のコンクリートのひずみ、 $\varepsilon_{cs}$ :乾燥収縮ひずみ、 $E_c=E_e/(1+\phi)$ 、 $E_e$ :コンクリートの弾性係数、 $\phi$ :クリープ係数、 $I_e(y)=I_{cr}(y)-G_{cr}(y)y_{ct}$ :ひびわれ後の全断面の断面2次モーメント、 $G_{cr}(y)=G_c'(y)+n_e G_s'(y)+n_e G_s(y)$ 、 $I_{cr}(y)=I_c'(y)+n_e I_s'(y)+n_e I_s$ 、 $n_e=E_s/E_c$ 、 $G_c'(y)$ 、 $G_s'(y)$ :y回りの圧縮域コンクリートと鉄筋の断面1次モーメント、 $G_c(y)$ 、 $G_s(y)$ :y回りの引張域コンクリートと鉄筋の断面1次モーメント、 $I_c'(y)$ 、 $I_s'(y)$ :y回りの引張域のコンクリートと鉄筋の断面2次モーメント、 $A_c'$ 、 $A_s$ :圧縮と引張域のコンクリートの断面積、 $A_s'$ 、 $A_s$ :圧縮と引張域の鉄筋の断面積、u:周長、 $\tau_b(s, x)$ :付着応力

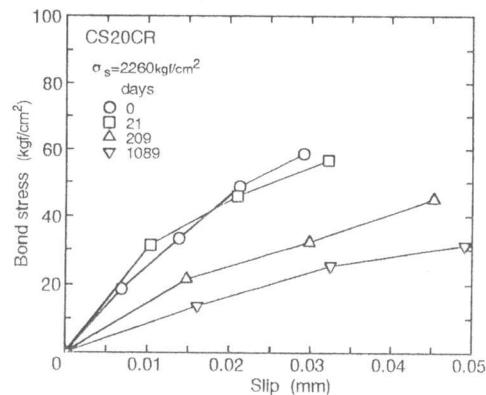


図-15 付着応力-すべり量関係

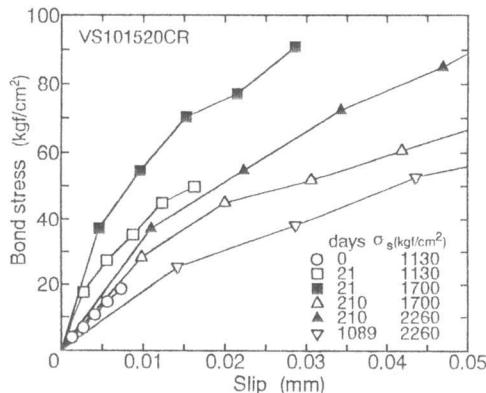


図-16 付着応力-すべり量関係