

論文

[2060] RC 部材の長期変形・ひびわれ幅に及ぼす環境条件の影響の検討

北條泰秀*1、佐藤良一*2、氏家 勲*3

1. まえがき

磁気浮上式鉄道構造物のような構造物では経済的かつ安全な高速走行を可能にするため、静的のみならず長期的な観点からも高い精度の変形制御が要求される。鉄筋コンクリート (RC) 構造物の長期変形を高い精度で予測するためには、クリープ・乾燥収縮などの材料特性とそれを取り込んだ部材剛性の評価が不可欠となる。

クリープ・乾燥収縮の主な予測式を環境条件の観点からみれば相対湿度 (以下湿度) が主要因として取り上げられており、最近では温度の影響も考慮されるようになった [1]。我が国では年平均湿度を基本としてクリープ・乾燥収縮を定めており、年平均湿度の相違から屋内と屋外で異なった値を採用している。しかし、平均的な湿度が同一であっても、湿度が変動する場合にはクリープが小さくなることが知られており、さらに屋外では日射や降雨に曝され乾湿の繰り返し作用を受けることもある。そのため、湿度変動や降雨の影響を無視して平均湿度だけでクリープ・乾燥収縮を評価することは、必ずしも適切とは言えないと考えられる。

そこで本研究では、環境条件の相違として、温度20℃で湿度が60%または70%の恒温恒湿室、屋内および屋外の4条件を取り上げ、それらの条件の相違がコンクリートのクリープ・乾燥収縮およびRC部材の変形・ひびわれ挙動に及ぼす影響を実験的に検討し、さらに著者らが開発したRC曲げ要素の長期変形解析理論を用いて求めた計算値を実測値と比較して、RC部材と長期挙動に及ぼす環境条件の影響について考察した。

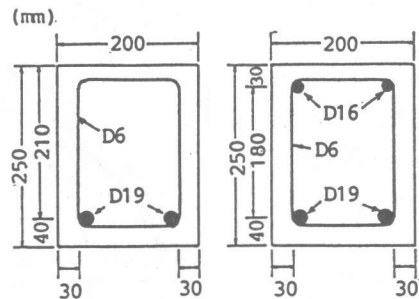
2. 実験概要

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

用いたコンクリートは水セメント比60%、単位セメント量 290 kg/m^3 である。供試体となるRC部材は湿度60%の恒温恒湿室 (以下恒温室60)、湿度70%の恒温恒湿室 (以下恒温室70)、屋内および屋外の実験のためにそれぞれ2体作製した。供試体はいずれもD19mm鉄筋を2本用いその引張鉄筋比は1.31%である。それぞれの環境の2体は圧縮鉄筋比が0と0.93%の2種類であり、圧縮鉄筋を配置した供試体の引張鉄筋



屋外, 屋内, 恒温室60・70

図-1 断面諸元

* 1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻、(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 宇都宮大学助手 工学部建設学科、(正会員)

の実鉄筋比は1.15%である。RC部材供試体の形状・寸法は20×25×240cmの矩形断面ばりで、その断面諸元を図-1に示す。クリープおよび乾燥収縮の実験供試体はいずれも恒温室60を4体、恒温室70を3体、屋内3体、屋外4体である。これらの供試体の長さは50cmで、断面はRC供試体と同じである。これらの供試体は、材令35日の載荷時まで湿潤養生し、所定の荷重を与えると同時に乾燥を開始した。

2. 3計測方法および載荷方法

載荷はスパン210cm、せん断スパン長65cmの2点載荷とした。載荷点、支点ではキャッピングを行い、偏心載荷がされないように極力配慮した。純曲げ区間80cmを試験区間とし、圧縮縁から1cmの位置と引張鉄筋位置でのコンクリートひずみとひびわれ幅を計測した。コンクリートひずみの計測は、標点距離を10cmあるいは5cmとしてコンタクトゲージを用いた。平均曲率は試験区間の圧縮部と引張鉄筋位置でのそれぞれの平均ひずみより算出した。供試体には鉄筋応力度でおおむね2000kg/cm²となる持続曲げモーメントを与えた。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. 供試体の環境条件

図-2は載荷時から所定の載荷期間での計測時における屋内、屋外の温度と湿度の経時変化を示したものである。冬季に載荷された後、夏季にむかい、気温は屋内で5℃から34℃へ、屋外では-4℃から39℃まで上昇し、その後10℃、8℃まで低下した。それぞれの平均温度は屋外14.5℃、屋内16.2℃であった。これに対し、湿度は屋内の場合で30%から90%、屋外の場合では15%から100%の範囲を変動したが、温度と異なり季節ごとの差は変動幅には少し見られるものの、ほとんど無かった。載荷期間での平均湿度は屋内66%、屋外70%である。

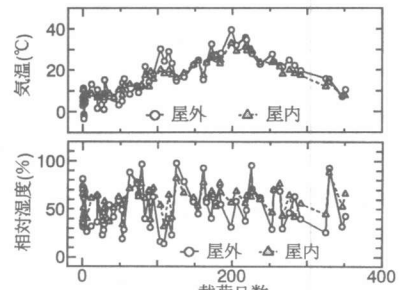


図-2 供試体の環境条件

4. 材料の性質

標準養生材令28日での、コンクリートの圧縮強度、引張強度および弾性係数はそれぞれ338、34.2、32.8×10⁴ (以上単位はすべてkgf/cm²)である。恒温恒湿

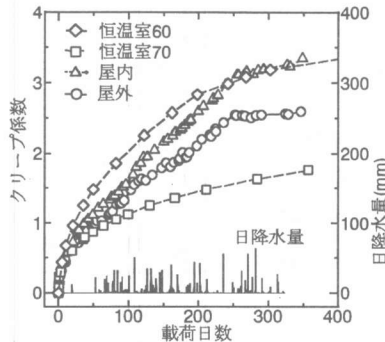


図-3 クリープ係数

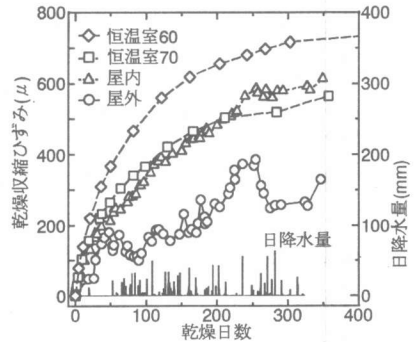


図-4 乾燥収縮ひずみ

室、屋内および屋外それぞれにおける載荷時材令の圧縮強度、引張強度および弾性係数は、恒温恒湿室で395、35.6、34.3×10⁴、屋内で394、33.9、30.1×10⁴、屋外で406、34.3、31.2×10⁴ (以上単位はすべてkgf/cm²)である。

図-3、4はそれぞれの環境条件下で実測して求めたクリープ係数と乾燥収縮ひずみの経時変化を、降雨[2]と共に示したものである。載荷後、初期の段階ではクリープは著しく進行し、環境条件の差

はみられない。載荷後50日を過ぎると、屋内および屋外のクリープ係数は、恒温室の場合と異なり、250日当たりまでほぼ線形に増加し、その後、ほぼ一定かわずかにかつ直線的な増加する。この挙動は温度変化と強い関係があることを裏付けるものと思われる。屋外のクリープ係数は、平均湿度が70%で降雨の影響も受けるが、湿度70%に一定の恒温恒湿室の場合より相当に大きい。この結果はこれまで指摘された変動湿度の影響と一致する。一方、乾燥収縮はクリープ係数の場合と異なり、湿度60%の恒温恒湿室の場合が最も大きく、70%の恒温室と屋内の場合がほぼ等しく、屋外が最も小さい。これにみられるように、乾燥収縮は平均湿度におおむね対応するが、降雨がある場合はその影響を強く受けることが認められる。

5. 解析理論[3]

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

- 1) 乾燥収縮は断面内で一様に生じる。
- 2) 断面内の温度は一定で一様である。
- 3) ひびわれ断面のコンクリートは引張応力を負担しない。

4) 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。

5) 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。

6) すべてのひびわれ幅およびひびわれ間隔は同一である。

解析は2)の仮定の下で行われているので温度が変動する場合には解析値に温度変化ひずみを加えた。温度及び乾燥収縮ひずみの勾配による曲率も解析値に加えて屋内、外の曲率を評価した。

これらの仮定によって得られたひびわれ間の任意断面の曲率は式(1)によって得られる。

$$\left(\frac{1}{r(y)}\right) = \frac{\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}}{d-y} = \frac{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_c I_c(y)} = \{1/r(y)\}_M + \{1/r(y)\}_{\Delta s} + \{1/r(y)\}_{\Delta t} \quad \dots (1)$$

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、中立軸は次の連立微分方程式(2)(3)と境界条件によって求められる。

$$\frac{ds}{dx} = \frac{\{1 + G_{cr}(y)/G_c(y)\} M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_c I_c(y)} (d-y) \quad \dots (2)$$

$$\frac{d^2 s}{dx^2} = \frac{u}{A_s E_s} \left[1 + \frac{\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{G_{cr}(y)}{G_c(y)} \frac{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_c I_c(y)} (d-y) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{G_{cs}(y)}{G_c(y)} \right) \varepsilon_{cs}}{\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_c I_c(y)} (d-y) \right]} \right] \tau_b(s, x) \quad \dots (3)$$

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

$$x=0 : s=0 \quad x=s_r/2 : ds/dx = (\varepsilon_{st})_{cs} - \varepsilon_{cs}$$

なお、付着モデル[3]については表-1に基づいている。

表-1 付着モデル

付着応力-すべり曲線	$\tau_b(s, x) = \tau_{b, \max}(x) \cdot e^{-\frac{\ln \{(e-1)s/S_{\max}(t, t_0)+1\}}{(e-1)s/S_{\max}(t, t_0)+1}}$
付着強度	$\tau_{b, \max} = 140 \text{ kgf/cm}^2$ {0 ≤ x ≤ (s _r /2 - 1.5ds)} s _r : ひびわれ間隔
付着強度時のすべり量	S _{max} (t ₀ , t ₀) = 0.24 mm (静的時)
ひびわれ近傍の付着強度の低下	$\tau_{b, \max}(x) = \frac{s_r/2 - x}{1.5ds} \tau_{b, \max}$ {(s _r /2 - 1.5Ds) ≤ x ≤ s _r /2}
付着クリープ	$\phi_b(t, t_0) = 0.32t$ = {0.32 + \frac{1.32(t-1)}{1.64(t-1)+134}} {1(day) ≤ t}

6. 考察

図-5,6は、4種類の環境下での圧縮鉄筋のない部材について、圧縮部コンクリートの平均ひずみの経時変化を、解析値と比較して示したものである。これによれば、実測ひずみは恒温室60、屋内、恒温室70、屋外の順に大きく、300日目、屋外でのひずみは恒温室60のひずみの65%程度で約800 μ 小さい。これに対して解析値の場合は恒温室60、屋内と順に大きく、クリープ係数が最も小さい恒温室70と乾燥収縮ひずみが最も小さい屋外の場合はほぼ等しく最も小さい。恒温室70の場合に、300日で実測ひずみは解析値よりもおよそ20%程度大きい。しかし、他の条件下の場合は実測値と解析値とはおおむね等しく、圧縮鉄筋が無い場合には、それぞれの環境条件下のクリープ係数と乾燥収縮ひずみを用いて解析すれば、かなり正確に予測できるといえる。

一方、圧縮鉄筋がある場合

には、図-7,8に示すように、恒温室60と屋内の場合がほぼ等しく大きな値を示し、恒温室70と屋外はほぼ等しく小さい。300日目では後者は前者のおよそ80%でその差は300 μ 程度となり、大小関係においては物性値と対応している。解析値との比較を見れば、恒温室70,60の場合とも、実測値を若干小さく評価しているが両者の差はそれほど大きくはない。しかし屋外・屋内の場合、解析値は実測値よりもかなり小さく、300日では実測値の70~80%程度となりその差は共におよそ300 μ で、恒温室の場合の約100 μ の差よりも大きくなっている。これは、圧縮鉄筋のある場合、経時的な変動温湿度下でさらに温湿度の変動を受け易い圧縮鉄筋とその周辺コンクリートとの間に応力のやりとりが常に行われていると考えられるが、この影響を本解析で用いた有効弾性係数法が評価しきれないためと思われる。したがって、圧縮鉄筋が配置されているような場合には、コンクリートの応力履歴を考慮し得る方法が適切と思われる。

図-9,10は圧縮鉄筋のない供試体の平均曲率について示したものである。ここで計算値は実測での

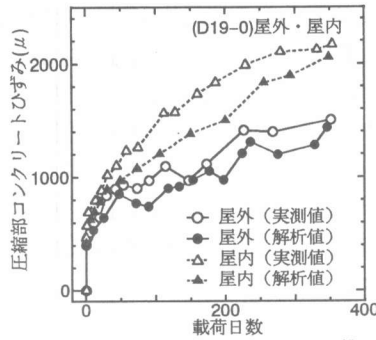


図-5 圧縮部コンクリートひずみ

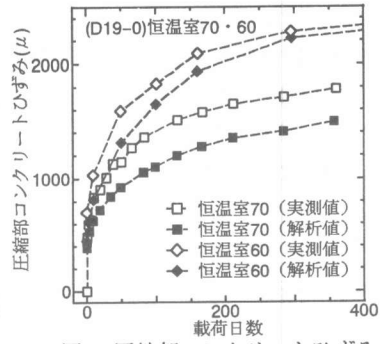


図-6 圧縮部コンクリートひずみ

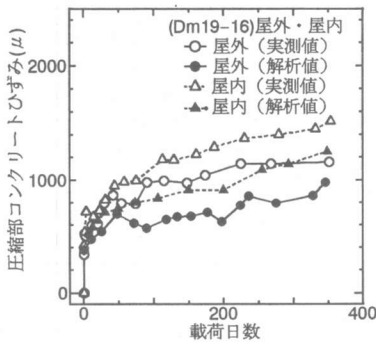


図-7 圧縮部コンクリートひずみ

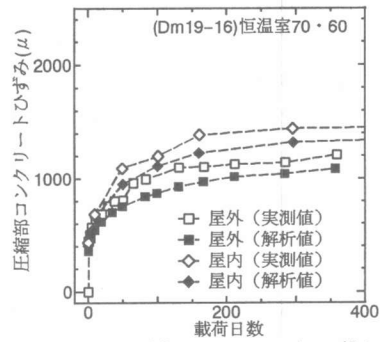


図-8 圧縮部コンクリートひずみ

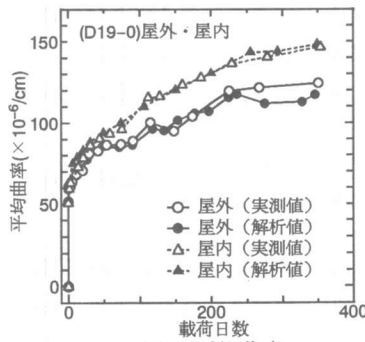


図-9 平均曲率

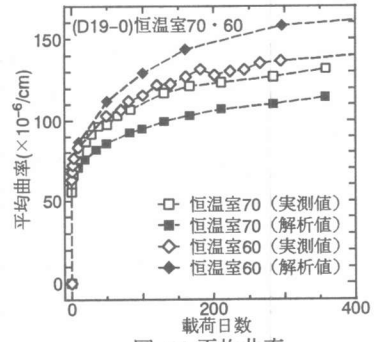


図-10 平均曲率

平均ひびわれ間隔を用いている。平均曲率に及ぼす環境条件の影響が引張部の剛性にも依存するため、圧縮ひずみほど大きくはない。実測値および解析値とも圧縮ひずみと密接に対応する挙動を示している。したがって、圧縮鉄筋が無く、一定の持続荷重を受ける場合には、適切な物性値、ひびわれ間隔を与えられれば、本解析法は変動環境下においても、圧縮ひずみ同様平均曲率も比較的精度よく予測し得ると言えよう。

図-11, 12に示すように、圧縮鉄筋が配置されている場合、環境条件の及ぼす影響は相対的に小さく、解析値もほぼ同様な結果を示している。しかし解析値は、屋内、外では、実測値を小さく予測し、圧縮ひずみと同様な傾向を示す。

図-13~16は平均ひびわれ幅の経時変化について実測値と計算値を示したものである。図-13, 14の場合、特に屋外では他の条件に比べて乾燥収縮が小さいにもか

かわらず、環境条件の差がほとんど見られない。一方、図-15, 16の場合は、恒温室60の実測値を解析値は過大評価しているが、環境条件の差がみられ、恒温室60、屋内の場合は他の条件下の場合よりひびわれ幅は0.04, 5mm程度大きい。乾燥収縮ひずみ差が300 μ 、ひびわれ間隔が12cmとすれば、拘束がなければ幅の増加は約0.04mmになり、ある程度の傾向はつかめる。計算値は屋内、屋外の場合比較的良く一致しているが、恒温室の場合は、過大評価する場合がある。この理由の一つはひびわれ間の新しい内部ひびわれの発生によると思われる[4]。

7. 結論

本研究はコンクリートおよび鉄筋コンクリート部材の長期変形に及ぼす環境条件すなわち、相対湿度60%、70%の恒温恒湿室、屋内および屋外の影響を実験および解析によって検討したものである。本研究の範囲内で以下のことが結論として得られた。

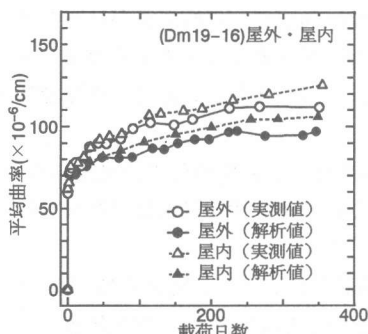


図-11 平均曲率

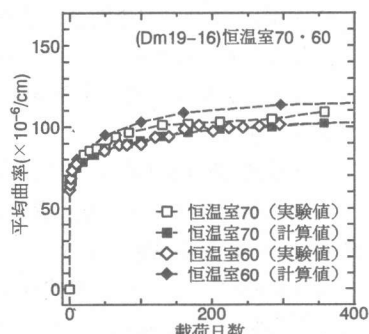


図-12 平均曲率

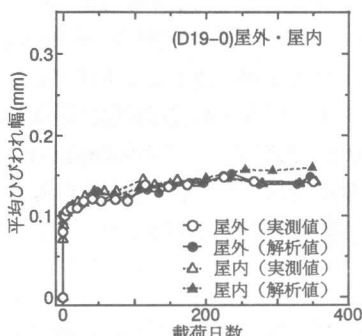


図-13 平均ひびわれ幅

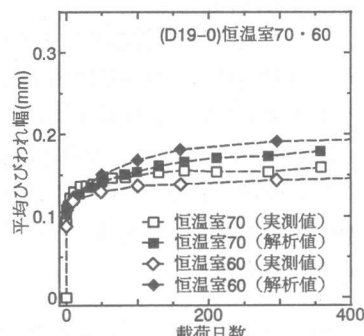


図-14 平均ひびわれ幅

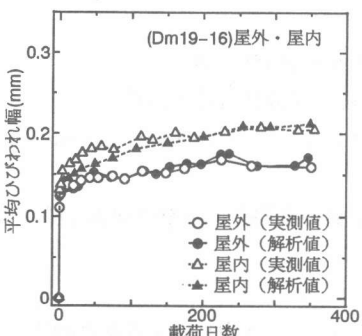


図-15 平均ひびわれ幅

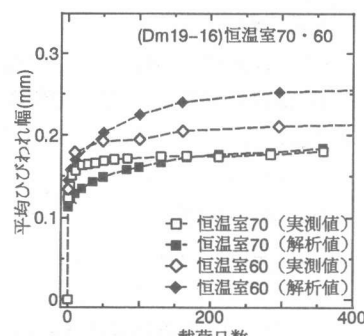


図-16 平均ひびわれ幅

1) 屋内のクリープ係数は、載荷日数350日で、平均湿度が66%と高いにもかかわらず、湿度60%の恒温恒湿室のそれとほぼ等しかった。平均湿度70%の屋外のクリープ係数は同湿度の恒温恒湿室のそれよりもおよそ40%大きかった。このことから、変動する温湿度は冬季より生じ始めたクリープを促進することが認められた。

2) 乾燥収縮はおおむね平均湿度に対応し、湿度60%の恒温恒湿室の値が最も大きかった。しかし、平均湿度が同じであっても、屋外の乾燥収縮ひずみは恒温恒湿室で得られた値のおよそ1/2であり、降雨の強い影響が認められた。

3) 圧縮部コンクリートひずみは恒温室60、屋内、恒温室70、屋外の順に大きく、物性値ともおおむね対応することがわかった。圧縮鉄筋が無い場合、一例を除き、解析値も実測値と同様な結果を示した。圧縮鉄筋が配置されている場合は、解析値は実験値を小さく評価し、その程度は変動温湿度下の方が高かった。これはコンクリートの応力履歴を考慮することの必要性を示すものと考えた。

4) 平均曲率も圧縮部コンクリートひずみと同様環境条件の影響が認められ、圧縮鉄筋がない場合は、本解析法により変動環境下にあっても比較的精度よく予測できた。しかし、圧縮鉄筋がある場合は小さく評価し、圧縮部コンクリートひずみと同様な結果が得られた。

5) 平均ひびわれ幅に及ぼす環境の差の影響は認められる場合があった。屋内外の平均ひびわれ幅の解析値は、実測での平均ひびわれ間隔を用いれば、実測値とかなり一致した。しかし、特に湿度60%の恒温恒湿室の場合に対しては解析値が過大に評価した。この原因の一つとして微細ひびわれの発生を指摘した。

[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)の援助のもとで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:CEB-FIP MODEL CODE 1990 Final Draft,1991
- [2]宇都宮地方気象台:栃木県気象月報、平成4年1月-11月
- [3]Sato R. et al.:Basic Bond Equations in A Reinforced Concrete Flexural Element,Bond in Concrete, pp2. 89-2. 98
- [4]湊 英一:鉄筋コンクリート曲げ要素の長期変形とその機構に関する基礎的研究、宇都宮大学修士論文、平成5年3月

[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、 $\tau_b(s, x)$: 付着応力、
 $\Delta M_{s,c}(y) = A_s' E_s \{ (y-d') + y_{c,t} \} \epsilon_{c,s}$: 乾燥収縮に起因する圧縮鉄筋の曲げモーメント
 $\Delta M_{s,t}(y) = -A_s' E_s \{ (d-y) - y_{c,t} \} \epsilon_{c,s}$: 乾燥収縮に起因する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、 $\epsilon_{s,t}$: 引張鉄筋ひずみ
 $\epsilon_{c,t}$: 引張鉄筋位置でのコンクリートのひずみ、 $\epsilon_{c,s}$: 自由乾燥収縮ひずみ
 $E_s = E_c / (1 + \phi)$ 、 E_c : コンクリートの弾性係数、 ϕ : コンクリートのクリープ係数、 $n_e = E_s / E_c$ 、
 $I_s(y) = I_{c,r}(y) - G_{c,r}(y) y_{c,t}$: ひびわれ後の全断面の断面二次モーメント
 $G_{c,r}(y) = G_c'(y) + n_s G_s'(y) + n_s G_s(y)$ 、 $I_{c,r}(y) = I_c'(y) + n_s I_s'(y) + n_s I_s(y)$ 、
 $G_c'(y)$ 、 $G_s'(y)$: y 回りの圧縮域コンクリートと鉄筋の断面一次モーメント
 $G_c(y)$ 、 $G_s(y)$: y 回りの引張域コンクリートと鉄筋の断面一次モーメント
 $I_c'(y)$ 、 $I_s'(y)$: y 回りの圧縮域コンクリートと鉄筋の断面二次モーメント
 $I_c(y)$ 、 $I_s(y)$: y 回りの引張域のコンクリートと鉄筋の断面二次モーメント
 A_c' 、 A_c : 圧縮と引張域のコンクリートの面積、 A_s' 、 A_s : 圧縮と引張域の鉄筋の面積、 u : 周長