

住友建設（株）	正会員	山本浩嗣
宇都宮大学	正会員	佐藤良一
鉄道総合技術研究所	正会員	涌井一
北海道大学	正会員	角田興史雄

1. はじめに

わが国のコンクリート標準示方書（以下示方書）においてはコンクリート部材の長期の変位・変形量は、「永久荷重によるコンクリートのクリープおよび乾燥収縮等の影響を考慮して求めるものとする」とあるが、ひび割れを許すコンクリート部材の長期変位・変形量を求める算定式を提示するには至っていない。

そこで、本研究はひび割れ、クリープおよび乾燥収縮の影響を取り入れた長期の曲げ剛性を提案する。

2. 長期曲げ剛性の誘導

2. 1 基本的考え方

本論文の基本的考え方は、現行示方書と同様、ひび割れおよび全断面の長期の曲げ剛性を求め、コンクリートの引張剛性を考慮して両者の曲げ剛性を按分するというものである。

図-1に示すように、ひずみの直線性を仮定し、クリープの影響は有効弾性係数 $E_e = E_c / \{1 + (E_c/E_{28}) \phi_{28}\}$ (E_c, E_{28} : 載荷時および材齢28日の弾性係数, ϕ_{28} : E_{28} を用いて求めたクリープ係数)によって考慮する。また、乾燥収縮は断面に一樣に生じるとする。この仮定に基づけば、ひび割れ断面では、次の軸方向力および曲げモーメントの釣合条件式が得られる。

$$\text{軸方向力} : P = \int \sigma_c(z) dA_c' + A_s' \sigma_s' - A_s \sigma_s - A_p \sigma_p = E_e \Psi_{cr} G_{cr}(x_{cr}) + \Delta P_{cs \ cr} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{曲げモーメント} : M - P(dp - x_{cr}) &= \int \sigma_c(z) z dA_c' + A_s' \sigma_s' (x_{cr} - d') + A_s \sigma_s (d - x_{cr}) + A_p \sigma_p (dp - x_{cr}) \\ &= E_e \Psi_{cr} I_{cr}(x_{cr}) + \Delta M_{cs \ cr} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{ただし } \Delta P_{cs \ cr} = (A_s' E_s + A_s E_s + A_p E_p) \epsilon_{cs} \quad (3)$$

$$\Delta M_{cs \ cr} = \{E_s I_s' / (x_{cr} - d') - E_s I_s / (d - x_{cr}) - E_p I_p / (dp - x_{cr})\} \epsilon_{cs} \quad (4)$$

これら2式より、コンクリート応力が0となる中立軸（以下中立軸） x_{cr} に関する次式が得られる。

$$\{M - P(dp - x_{cr}) - \Delta M_{cs \ cr}\} G_{cr}(x_{cr}) = \{P + \Delta P_{cs \ cr}\} I_{cr}(x_{cr}) \quad (5)$$

中立軸が求まれば、式(2)よりひび割れ断面の曲率 Ψ_{cr} は以下のように表される。

$$\Psi_{cr} = (M - P(dp - x_{cr}) - \Delta M_{cs \ cr}) / \{E_e I_{cr}(x_{cr})\} = \{M - P(dp - x_{cr})\} / \{E_e I_{cr}(x_{cr})\} / [1 - (\Delta M_{cs \ cr} / \{M - P(dp - x_{cr})\})] \quad (6)$$

上式において、 $I_{cr}(x_{cr}) / [1 - (\Delta M_{cs \ cr} / \{M - P(dp - x_{cr})\})]$ は軸方向力またはプレストレス力および乾燥収縮の影響を考慮した断面二次モーメントといえることができる。プレストレス力はそれが下縁側に作用する場合は見かけ上断面二次モーメントを大きくすることになり変形を抑制する。乾燥収縮および鋼材の拘束に起因する見かけの曲げモーメント $\Delta M_{cs \ cr}$ は鋼材位置と中立軸間の距離に対する乾燥収縮ひずみと鋼材の断面二次モーメントに依存する量で、圧縮鉄筋は変形を抑制し、引張鉄筋と鋼材は促進することが式(4)によってわかる。また全断面に対しては軸力が図心に作用していると考えれば図心位置 x_g は容易に求まり、曲げモーメントの釣合より曲率は次式で表せられる。

$$\Psi_g = (M - P(dp - x_g) - \Delta M_{cs \ g}) / \{E_e I_g(x_g)\} \quad \text{ただし } \Delta M_{cs \ g} = E_e \{G_{cl}(x_g) - G_{cu}(x_g)\} \epsilon_{cs} \quad (7)$$

上式よりひび割れ断面と同様に軸方向力またはプレストレス力および乾燥収縮の影響を考慮した断面二次モーメントを得ることができる。

2. 2 長期曲げ剛性

式(6) (7) から軸方向力またはプレストレス力、および乾燥収縮の影響を考慮した断面二次モーメント

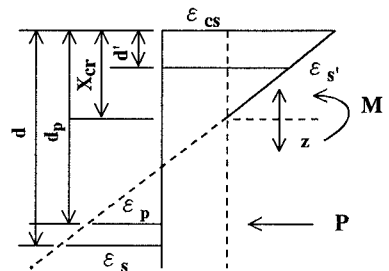


図-1 ひずみ分布の仮定
(ひび割れ断面)

が得られているので、これを現行示方書の式の対応する断面二次モーメントと置き換え、剛性を曲げモーメントにより変化させる場合、長期の曲げ剛性は次式のように得られる。本式では引張剛性の経時変化は実用的にはないとしている。

$$EeI_e = \left[\left(\frac{Mc_{rd}}{M_d} \right)^4 \frac{EeI_g}{1 - \frac{\Delta M_{cs} g}{M_d - P(dp-xg)}} + \left(1 - \frac{Mc_{rd}}{M_d} \right)^4 \frac{EeI_{cr}}{1 - \frac{\Delta M_{cs} cr}{M_d - P(dp-xcr)}} \right] \quad (8)$$

ここで、 Mc_{rd} ：曲げひび割れが発生する限界の曲げモーメント、 M_d ：変位計算時の設計曲げモーメント
またこの曲げ剛性を用いて曲率を求めるときは $\Psi = (M - P(dp-x)) / EeI_e$ から求められるが、ここでの x は上式の I_g 、 I_{cr} の代わりに xg 、 xcr を代入して平均的な x を求めた。

3. 適用性の検討

幅20cm、高さ25cm、長さ240cmの矩形断面はりの80cmの等曲げ区間の平均剛性、曲率について実測値と提案式で得られた計算値を比較した（鉄筋、P C鋼材の有効高さは $d=21$ cm, $dp=16$ cm）。代表的な2例について図-2、3に示す。クリープ係数は載荷時材齢（16日）の実測クリープ係数を、乾燥収縮はプレストレス導入時（材齢9日）に乾燥開始した実測値を用いた。プレストレス力はクリープ、乾燥収縮を考慮して求めた載荷時の値を用いた。図中の例えば $Dm16-16(7.4)$ は引張鉄筋にD16を2本、圧縮鉄筋にD16を2本、緊張材に呼び名7.4の異形棒鋼を2本それぞれ用いたことを、 m は切削溝のあることを意味する。

本計算値は、実用式であることを考慮すれば、実測値と比較的よく一致している。また重ね合わせの原理に基づいたStep by Stepによって求めた計算値と比較すれば、プレストレスが大きくなるにつれて曲率および引張鉄筋応力度を多少大きく評価する傾向がある。プレストレス導入時期と他の永久荷重の作用時期が大きく異なる場合や大きな応力の変動がある場合には、両者の差が大きくなることも考えられる。

4. 結論

有効弾性係数に基づいてひび割れおよび全断面のクリープ・乾燥収縮を考慮した曲げ剛性を求め、現行示方書の引張剛性と結び付けてコンクリート部材の実用的な長期曲げ剛性を誘導した。本式は、限られた数の実測値との比較の範囲ではあるが、実測値を比較的高い精度で予測した。しかし、応力履歴の影響が大きい場合にはその適用性について事前に確認しておく必要がある。

なお、本研究は第一著者が宇都宮大学に在学中に行ったものである。

〈参考文献〉

1) 山本、佐藤、涌井、落合：PRC部材の長期変形挙動の検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, NO. 2, pp973~978, 1994

記号：ここで説明のない変数は示方書にしたがった。
 σ_p ：曲げモーメントおよびプレストレス力による緊張材の変化応力
 d ：圧縮縁からの圧縮鉄筋、引張鉄筋およびP C鋼材までの位置、 ϵ_{cs} ：乾燥収縮ひずみ、 G ： xcr または xg まわりの断面一次モーメント、 I ： xcr または xg まわりの断面二次モーメント
サフィックス cr ：ひび割れ断面、 g ：全断面、 c ：圧縮部コンクリート
 cl ：図心の下縁側コンクリート、 cu ：図心の上縁側コンクリート
 s ：鉄筋、 p ：P C鋼材、 $'$ ：圧縮を意味する

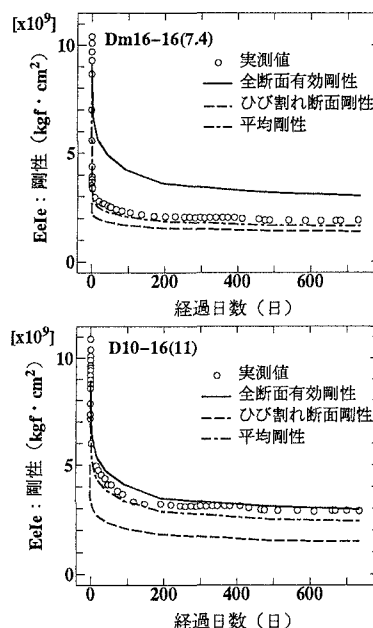


図-2 計算値と実測値の比較（剛性）

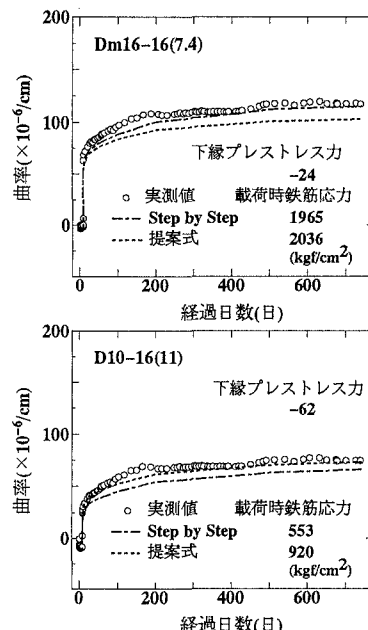


図-3 計算値と実測値の比較（曲率）