

V-49

繰返し荷重を受けるコンクリート引張軟化挙動のモデル化

北海道大学大学院○学生員 佐藤 公紀
北海道大学大学院 学生員 藤本 将行
北海道大学大学院 正会員 佐藤 靖彦
北海道大学大学院 フェロー 角田 與史雄

1. はじめに

有限要素解析によるコンクリート挙動の解析では材料構成則が必要となるが、繰返し荷重を受けるコンクリートの構成則については現在のところまだ開発段階にある。その中で前川⁽¹⁾は圧縮荷重を受けるコンクリートの包絡線と除荷・再載荷を含む内部曲線を、破壊パラメータと等価塑性ひずみによって表す方法を提案している。ここで破壊パラメータとは初期剛性と可逆過程における割線剛性との比である。コンクリートの疲労挙動を破壊パラメータ、塑性変形で表すと繰返し荷重の履歴を考慮することが可能となり、かつ簡易な仮定によって挙動を表せるため有効な方法と考えられる。しかし、前川らの方法では一定応力下での繰返しによる剛性低下および塑性変形の増加は表現できず、繰返し荷重を受けるコンクリートの挙動をシミュレーションすることはできない。そこで本研究は、前川の解析方法にエネルギーの概念を加えることによって、連続する除荷・再載荷を表現し引張の繰返し荷重を受けるコンクリートの挙動を簡易に解析する手法を提案するものである。ただし引張荷重を受けるコンクリートのひび割れ前の挙動は、供試体の形状、サイズによって異なるため、本研究では軟化域のみを対象とする。

2. 解析方法

前川⁽¹⁾は式(1)で示す様に破壊パラメータ K_0 と塑性ひずみ E_p によって、圧縮荷重を受けるコンクリートの包絡線と除荷・再載荷を含む内部直線を表現している (Fig.1 参照)。

$$S = E_0 \cdot K_0 \cdot (E - E_p) \quad \dots (1)$$

ここに、 S ；応力、 E ；全ひずみ、 K_0 ；初期剛性である。つまり破壊パラメータ K_0 と塑性ひずみ E_p によって除荷および再載荷直線を定め、その直線上を除荷・再載荷させているのである。ここで破壊パラメータ K_0 と塑性ひずみ E_p はそれぞれ過去に経験した最大全ひずみ E の関数として表されている (Fig.2, 3 参照) ため、除荷・再載荷の間は破壊パラメータ K_0 、塑性ひずみ E_p ともに変化しないことになる。そのため再載荷すると必ず除荷点に戻ってしまい、繰返しによる剛性低下および塑性変形の増加を表現できない。

そこで本研究ではエネルギーの概念を用いて、Fig.4に示すルールに従い連続した除荷・再載荷を表現する。ここで必要な破壊パラメータ k と塑性変形量 W_p はそれぞれ過去に経験した最大のエネルギー量 G_1 の関数と

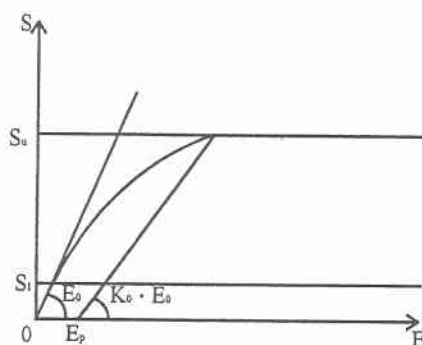


Fig.1 Maekawa's Model for Compression

して表す。コンクリートに引張荷重を与えると破壊包絡線にそってひび割れが進行し、エネルギーが蓄積される。次に、除荷点 $(\sigma_1/f_t, W_1/W_c)$ までに蓄積されたエネルギー量より塑性変形量 W_p を求め、 $(\sigma_1/f_t, W_1/W_c)$ 、 $(\sigma_2/f_t, W_2/W_c)$ を通り、 $(\sigma_1/f_t, W_1/W_c)$ において極値をとる 2 次曲線を除荷曲線と仮定する。また、除荷によって最小応力に達した後 $(\sigma_3/f_t, W_3/W_c)$ は、除荷点 $(\sigma_1/f_t, W_1/W_c)$ に向かって直線的に再载荷させる。除荷によって蓄積されたエネルギーは減少し、再载荷によって再びエネルギーが蓄積されていくが、この間過去に経験した最大のエネルギーは変化しないため、破壊パラメータ k および塑性変形量 W_p も変化しない。再载荷によって蓄積されたエネルギーが除荷によって失ったエネルギーを上回る $(\sigma_4/f_t, W_4/W_c)$ と、過去に経験した最大のエネルギー量が変わるため、破壊パラメータ k が低下し、再载荷直線の傾きが変化する。すなわち除荷点 (σ_i, W_i) に達するまでに再载荷直線の傾きが変わるので、連続した除荷・再载荷を表現できるのである。

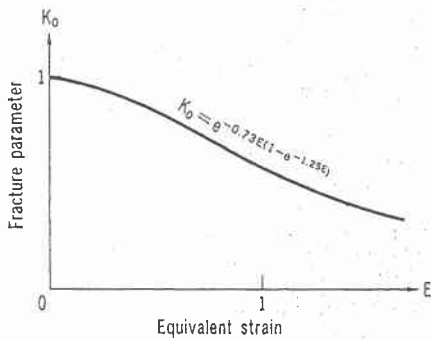


Fig.2 Fracture Parameter

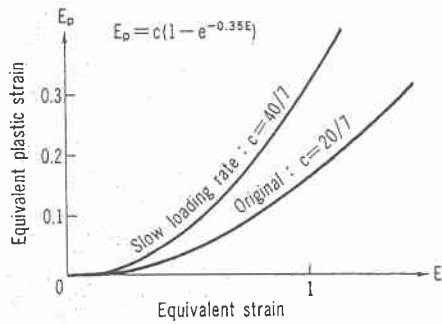


Fig.3 Plastic Strain

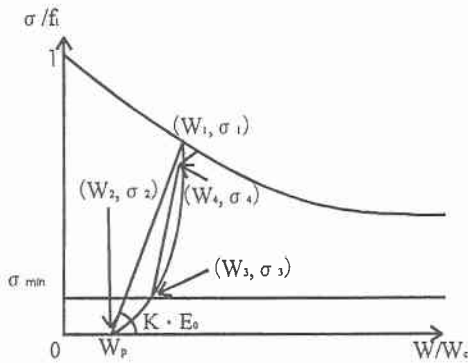


Fig.4 Proposed Model for Tension

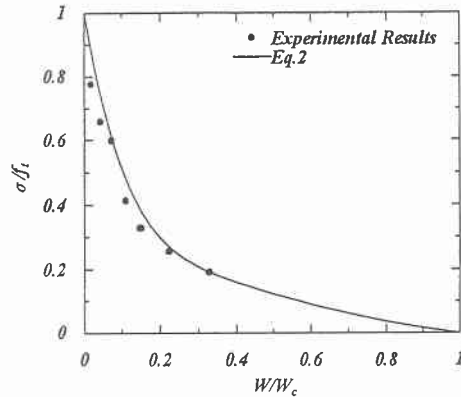


Fig.5 Envelope Curve

以下に解析に用いる関係式を示す。

(1) 包絡線

本研究では引張荷重を受けるコンクリートの引張軟化曲線を表す式として Reinhardt が提案する式⁽²⁾を採用する。

$$\frac{\sigma}{f_t} = \left\{ 1 + \left(C_1 \cdot \frac{W}{W_c} \right)^3 \right\} \cdot \exp \left(-C_2 \cdot \frac{W}{W_c} \right) - \frac{W}{W_c} \cdot (1 + C_1^3) \cdot \exp(-C_2) \quad \cdots (2)$$

ここに、 σ ；応力、 f_t ；引張強度、 W ；ひび割れ幅、 W_c ；限界ひび割れ幅、 $C_1=3$ 、 $C_2=6.98$ である。また、本研究では解析結果との比較に Hordijk の実験結果⁽³⁾を用いているが、Fig.5 に式 (2) による計算結果と実験結果を示す。本研究では、繰返しによって包絡線の形状は変わらないと仮定し、その内部曲線を蓄積されたエネルギーにより定めることとする。

(2) 破壊パラメータ k

前述の通り、前川⁽¹⁾は破壊パラメータを初期剛性と可逆過程における割線剛性との比と定義し、全ひずみの関数としているが、本研究における破壊パラメータはエネルギーの関数であり、初期剛性に対する除荷後の再載荷時における剛性の比と定義される。本研究の解析では Hordijk の実験結果⁽³⁾と比較するため、初期剛性 E_0 を Hordijk の実験結果と同じ $E_0=57.5$ としている。Hordijk⁽³⁾が示したひび割れ幅—破壊パラメータの関係 (Fig.6 参照) と、(1) で仮定された破壊包絡線より得られるひび割れ幅—エネルギーの関係より破壊パラメータとエネルギーの関係を示す近似式 (3) を得た。Fig.7 に計算結果と実験結果を示す。

$$k = \exp(-20.6 \cdot G_i) \quad \cdots (3)$$

ここに、 G_i ；除荷時のエネルギー で、過去に経験した最大のエネルギーに等しい。

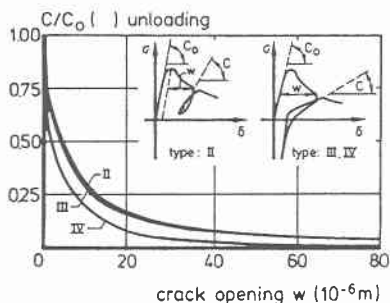


Fig.6. Stiffening Degradation

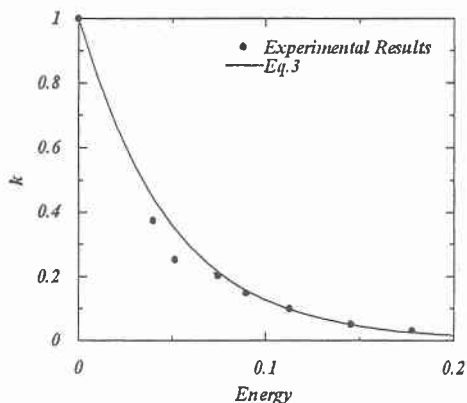


Fig.7. Fracture Parameter

(3) 塑性変形量 W_p

本研究では塑性変形量もエネルギーの関数として表される。Hordijk が示した応力—ひび割れ幅の関係⁽³⁾より除荷時の塑性変形量を求め、(1) から得られる除荷時のエネルギーとの関係より塑性変形量とエネルギーの関係を表す近似式 (4) を得た。Fig.8 に計算結果と実験結果を示す。

$$E_p = 47.1 \cdot G_i^3 + 1.1 \cdot G_i^2 + 0.3 \cdot G_i \quad \cdots (4)$$

解析による計算結果と Hordijk による実験結果⁽³⁾を Fig.9 に示す。計算結果における除荷点は実験結果のそれと等しくしている。ループの角度、形状とも比較的良好に一致しているといえる。この方法は、圧縮を受けるコンクリートに対しても適用できるものである⁽⁴⁾。

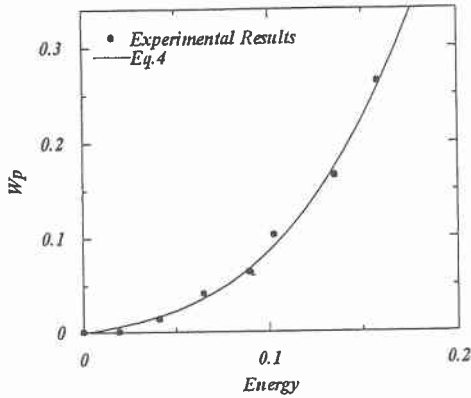


Fig.8 Plastic deformation

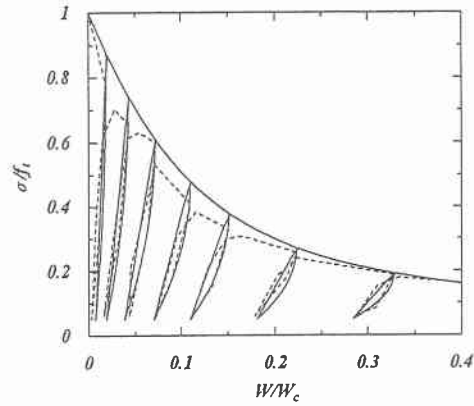


Fig.9 Numerical Results

3. まとめ

破壊パラメータとエネルギー量、塑性変形とエネルギー量の関係を用い、いくつかの簡単なルールによって引張の繰返し荷重を受けるコンクリートの軟化域における挙動をシミュレーションできることを示した。今後は以下の点に関して検討を進める予定である。

(1) 破壊パラメータ、塑性変形共に Hordijk の実験結果⁽³⁾に基づいて求めているが、グラフから読みとった値であるために正確性に欠けるものとなっている。また、本論文の主な目的は簡易なルールを設定することによって内部曲線を描ける解析方法を提案することにあつたため、破壊パラメータ、塑性変形の近似曲線は極めて簡単な式となっている。塑性変形、内部曲線の剛性を実験によって求め、より正確な近似曲線を求める。

(2) 本研究では軟化域のみに着目したが、ひび割れ発生前の繰返し荷重によるコンクリートの挙動についても軟化域同様の解析方法を用いることができると考えられる。

(3) 本研究で提案した解析方法は引張だけではなく圧縮、圧縮引張の繰返し荷重を受けるコンクリートの挙動の解析にも適用できるものと考えられる。

4. 参考文献

- (1) 岡村甫、前川宏一；鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版
- (2) Hans.W.Reinhardt,Hans.A.W.Cornelissen,and Dirk.A.Hordijk；Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete,Journal of Structural Engineering pp2462-2477,1986
- (3) D.A.Hordijk；Local approach to fatigue of concrete,Dissertation submitted to Delft University of Technology,1991
- (4) 藤本 将行、佐藤 公紀、佐藤 靖彦、角田 與史雄：圧縮荷重を受けるコンクリートの疲労性状に関する一考察、土木学会北海道支部論文報告集、2000