北海道大学大学院	学生員	佐藤	公紀
北海道大学大学院	正会員	佐藤	靖彦

山梨大学工学部 正会員 中村 光

1. はじめに

有限要素解析やファイバーモデルによるコンクリート挙動の解析に用いる材料構成則の中で、繰返し荷重(地 震および疲労)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開発段階にあると言える。そこで本研究 は、塑性変形量と損傷パラメータをエネルギーの関数として表す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表現する手法を提案する。

### 2. 解析方法

本研究ではエネルギーの概念を用いて連続した除荷・再載荷を表現す る。*Fig.1* は応力と変形との関係を示す。応力と変位曲線で囲まれる面 積が蓄積されたエネルギーであり、このエネルギー量と塑性変形量およ び損傷パラメータ(初期剛性と除荷・再載荷時における剛性との比)を 関連付け、内部曲線を描く方法を考える。すなわち、除荷点( $_1$ , $_1$ ) までに蓄積されたエネルギー量より塑性変形量  $W_p$ を定め、( $_1$ , $_1$ ) と( $_2$ , $_2$ )を通り、( $_2$ , $_2$ )において極値をとる2次曲線を除 荷曲線と仮定する。除荷によって最小応力に達した後( $_3$ , $_3$ )は、 除荷点( $_1$ , $_1$ )に向かって直線的に再載荷させる。除荷によって蓄



積されたエネルギーが減少し、再載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、損傷パラメータ k および塑性変形量 W<sub>p</sub> も変化しないものと考える。再載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と(図中の(4,4)の点)過去に経験した最大のエネルギー量が変わるため、損傷パラメータ k が低下し、再載荷直線の傾きが変化する。すなわち除荷点(1,1,1)に達するまでに再載荷直線の傾きが変わるので、連続した除荷・再載荷を表現できるのである。

### 3. 解析結果

### (1) ひび割れ前

引張の繰返し荷重を受けるコンクリートのひび割れ前の挙動は、応力-変位関係が直線で近似できると考えると、

- (1) 初期剛性
- (2)ひび割れ発生時のエネルギー量 *G*<sub>c</sub>
- (3) 損傷パラメータkとエネルギー量 $G_i$ との関係

(4) 塑性ひずみ  $E_p$  と エネルギー量  $G_i$  との関係

を与えることにより前章で述べた方法でモデル化することが出来る。本研 究では初期剛性はヤング係数により求め、(2)から(4)は Cornelissen<sup>(1)</sup>の実

験結果により決定した。解析結果を Fig.2 に示す。

キーワード;引張性状、繰返し荷重、エネルギー

連絡先;〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学研究科複合構造工学分野 TEL 011-706-6182 FAX 011-707-6582



# (2) ひび割れ後(軟化域)

引張の繰返し荷重を受けるコンクリートの軟化域での挙動は、

(1) 包絡線

(2)損傷パラメータkとエネルギー量 $G_i$ との関係

(3) ひび割れ幅  $W_p$  とエネルギー量  $G_i$  との関係

を与えることにより前章で述べた方法でモデル化することが出来る。す なわち、軟化域においては繰返し荷重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求める。本研 究では(1)については*Reinhardt*<sup>(2)</sup>の式を用い、(2)と(3)につい ては*Hordijk*<sup>(3)</sup>の実験結果を用いて決定した。ここで最大ひび割れ幅は 160µmとしている。解析結果を*Fig.3*に示す。

## (3) 全領域

引張の繰返し荷重を受けるコンクリートの全領域における挙動は、今 までに述べたひび割れ前、ひび割れ後のモデルを組み合わせることによ ってモデル化される(*Fig.4*)。ただし、ひび割れ前のコンクリートの挙 動がひび割れ後の挙動に与える影響は未だ解明されていないため、ひび 割れ後の蓄積エネルギーはひび割れ前の蓄積エネルギーとは無関係と 考えている。つまり、ひび割れ後の蓄積エネルギーはひび割れた時点を 0 としている。*Fig.4* によると、ひび割れ前のモデルにおけるひび割れ た点(破壊エネルギーに達した点)から軟化が開始するわけではなく、 応力 変形量の関係はひび割れ前後で不連続となっている。これはひび 割れた瞬間にコンクリートの弾性ひずみが0 になると仮定しているた





Fig.4 Numerical Results

めで、もしひび割れ幅 弾性ひずみの戻りの関係が得られれば、連続した曲線でコンクリートの挙動を表すこと が可能となる。

### 4. 今後の課題

(1)繰返し荷重を受けるコンクリートの挙動実験は極めて少ない。本論文は、ひび割れ前、ひび割れ後ともに一つの実験データからひび割れ発生時のエネルギー、損傷パラメータとエネルギーとの関係、塑性ひずみ(ひび割 れ幅)とエネルギーとの関係を定めた。今後、数多くの実験を行い、信頼性を向上させる必要がある。

(2)軟化域における最大ひび割れ幅を160µmとしているが、この値は、コンクリートの種類や環境条件によって異なるため、より汎用性のある方法とする必要がある。

(3)ひび割れ時の除荷域の変形量が求まれば、引張の繰返し荷重を受けるコンクリートの挙動を連続的に表すことが可能となる。

**謝辞**:本研究を進めるにあたり、北海道大学大学院 角田與史雄教授、ならびに、上田多門助教授にご助言を賜 りました。ここにお礼申し上げます。本研究は、文部省科学研究費(基盤研究(B):代表 長岡技術科学大学 下 村匠助教授)を受けて行ったものであります。

# 5.参考文献

(1) Hans.A.W.Cornelissen, Hans.W.Reinhardt; Uniaxial tensile fatigue failure of concrete under constant-amplitude and programme loading, Magazine of concrete Reserch Vol.36 No.129,1984

(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.Hodijk; Local approach to fatigue of concrete, Dissertation submitted to Delft University of Technology, 1991