

V-50

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

北海道大学大学院 ○学生員 藤本 将行
 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
 北海道大学大学院 フェロー 角田 與史雄

1. はじめに

圧縮疲労に限らず、引張やせん断の疲労に関する研究は既に数多く報告されている。また、水中や気中といった環境条件の異なるコンクリートの疲労特性についても報告されている。これまでに数多くの $S-N$ 曲線が提案されている。一方、変形について考えると、静的に関しては、強度と共に除荷や再載荷といった履歴をも評価できるモデルが提案されているが、疲労に対しては、破壊に至るまでの変形挙動を表現できるモデルはない。任意の時間におけるコンクリート構造物の損傷度を知ることは、構造物を長期間使用する上で重要な行為である。そこで本研究では、繰返し圧縮力を受けるコンクリートの応力-ひずみ曲線を表現できる手法を提案し、実験及び既往の研究との比較検討を行うこととした。

2. 実験概要

Fig.1 のような D10 の鉄筋 2 本を挿入した供試体を作製し、圧縮疲労試験を行った。同サイズの供試体の静的試験で圧縮強度を計測し、その 70% を応力振幅の最大応力とした。なお、最小応力は 10% であり、載荷速度は $5H_z$ とした。本実験の目的は、塑性ひずみと剛性の低下の挙動に着目して実験を行った。シリンダー圧縮強度 31.3MPa、供試体圧縮強度 23.2MPa、応力振幅は、最大応力 16.2MPa、最小応力 2.3MPa、破壊回数 $N_f=25744$ 回であった。

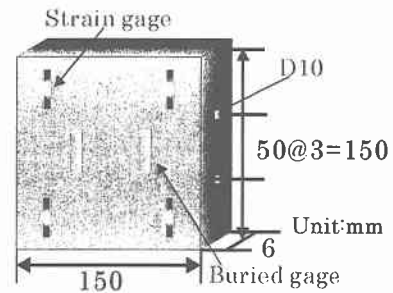


Fig.1 Specimen

3. 解析

3. 1 概要

前川²⁾はコンクリートの平面応力を弾塑性破壊モデルに基づいて、等価応力と等価ひずみを表現している。これは、塑性と破壊といった状態量を定式化するために等価塑性ひずみと破壊パラメータを用いている。これらのパラメータはコンクリート中の局部破壊の状態を表すものであり、載荷履歴の関数として与えられるので、この考え方は繰返し載荷を受けるコンクリートの損傷をも扱いやすい。しかし、前川の等価応力-等価ひずみの関係では再載荷は、除荷開始点を目指して載荷されるため、一定応力振幅の疲労実験をモデル化した時、最大応力を越えない限り同じループを回りつづけることになってしまう。そこで、エネルギーという概念を取り入れ、前川モデルでは等価塑性ひずみと破壊パラメータは等価全ひずみの関数であったものをエネルギーの関数に変換することで、供試体に蓄積される損傷エネルギーが過去に受けたエネルギーを越えた点で剛性、つまり破壊パラメータが低下し、ループから抜け出すことを表現する。

3. 2 前川モデル

A Study on Fatigue Behavior of Concrete under Compressive Loading

By Masayuki FUJIMOTO, Masaki SATO, Yasuhiko SATO and Yoshio KAKUTA

前川は式 (1) にあるように、等価応力-等価ひずみの関係式には、剛性低下を表す破壊パラメータ K_0 と等価塑性ひずみ E_p を組み込んである。

$$S = E_0 K_0 (E - E_p) \quad E_0 : \text{initial elastic modulus} = 2.0 \quad (1)$$

K_0 と E_p は以下の式のように等価ひずみの関数で表される (式 (2), 式 (3))。

$$K_0 = \exp(-0.73E(1 - \exp(-1.25E))) \quad (2)$$

$$E_p = E - \frac{20}{7}(1 - \exp(-0.35E)) \quad (3)$$

前川の荷重→除荷→再荷重の等価応力-等価ひずみ曲線は Fig. 2 のように描ける。初期荷重は経験した等価ひずみに応じて剛性が低下し、同時に等価塑性ひずみは増加していき、ある最大応力レベルに達するまで荷重される (Fig. 2 : ①)。次に除荷曲線は、除荷開始点で接線剛性が無限大となり残留ひずみ点を通る円弧として描く (Fig. 2 : ②)。その円弧に沿って応力が低下して最小応力に達する。そして、再荷重は除荷開始点をめがずす直線である (Fig. 2 : ③)。

3. 3 修正モデルの手法

本研究では、前川氏のモデルを一部修正し、エネルギーの変化量で繰返しを描く試みを行った。修正モデルを Fig. 3 に示す。初期荷重の部分は前川の関係を用いることとした (Fig. 3 : ①)。

ここで、破壊パラメータ K_0 と等価塑性ひずみ E_p は、既往の研究³⁾の実験結果から読み取り、それを修正モデルで用いる。

次に除荷曲線は、除荷開始点と残留ひずみ点を通り、残留ひずみ点で極値を取る2次放物線と仮定した (Fig. 3 : ②)。これに沿って最小応力レベルまで低下していく。ここでは、損傷エネルギーは減少するが、経験した最大エネルギーは変化しないため、 K_0 、 E_p はエネルギーの減少に無関係である。

再荷重に関しては、前川のモデル同様、直線を仮定した (Fig. 3 : ③)。最小応力値と除荷開始点を結ぶ直線上を増加していき、再び損傷エネルギーが増加していく。減少したエネルギー量を取り戻した時 (Fig. 3 : ④)、つまり今まで経験した最大エネルギーを越えた時、剛性が低下し、今までの直線の傾きより小さくなり、除荷開始点には戻らず、最大応力値まで増加される (Fig. 3 : ⑤)。

エネルギーを越えた地点からは、その地点を原点として、剛性が低下しながら応力は増加していく。これによって繰返しのループを描くことができ、コンクリートが

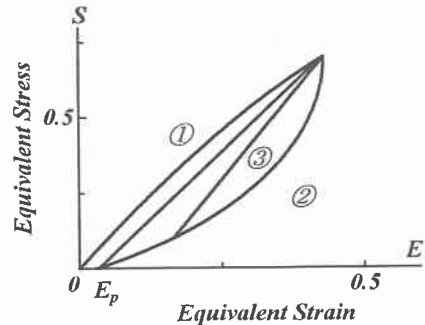


Fig. 2 Maekawa Model

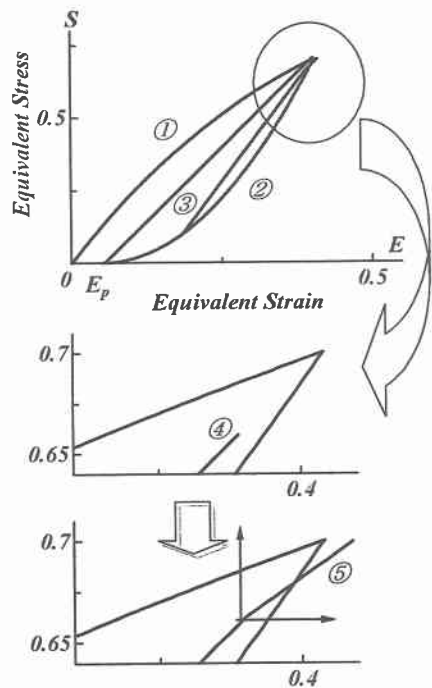


Fig. 3 Modified Model

蓄積でき得る最大の損傷エネルギー P_{max} に達するまでループを描く。

3. 4 モデルの比較と検証

モデルを構築する上でまず、 K_0-E 、 E_p-E の関係を修正した。剛性低下に関しては、既往の実験結果では前川モデルよりも小さく、等価塑性ひずみは前川モデルよりも大きいという結果が得られた(Fig. 4, 5)。本実験でも、同様な結果が得られた(図中の○)。この関係をエネルギー P の関数に変換した図が Fig. 6, 7 であり、修正モデルではこの関係を用いている。この関係は著者らの実験結果(図中の○)とも近い値を示した。

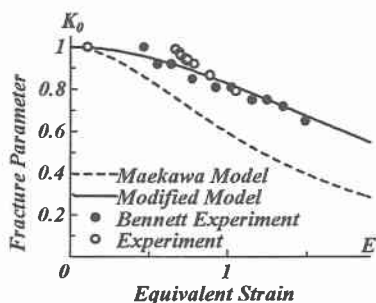


Fig. 4 Fracture Parameter-Equivalent Strain

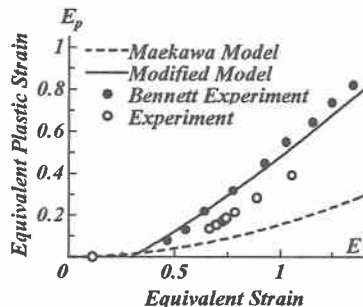


Fig. 5 Equivalent Plastic Strain-Strain

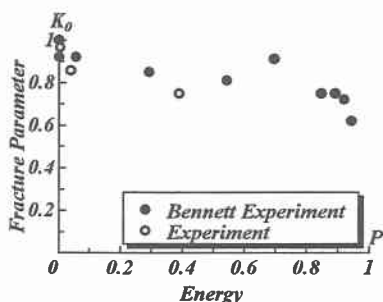


Fig. 6 Fracture Parameter-Energy

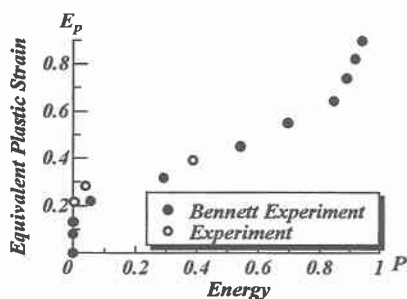


Fig. 7 Equivalent Plastic Strain-Energy

そこで次に、コンクリートが蓄積できる損傷エネルギーを考える。Fig. 8に示すような概念で、エネルギーを分割し初期载荷で蓄積されるエネルギーをA、除荷に減少するエネルギーをB、再载荷で増加するエネルギーをCとする。除荷一再载荷で増加するエネルギーを破壊回数倍し、初期载荷時のエネルギーを加算した値を P_{max} と定義した。

$$P_{max} = A + (C - B) \cdot N_f \quad (4)$$

実験値から、 $A = 0.239$

$$C - B = 0.0375$$

$$N_f = 25744$$

$$P_{max} = 965$$

となり、

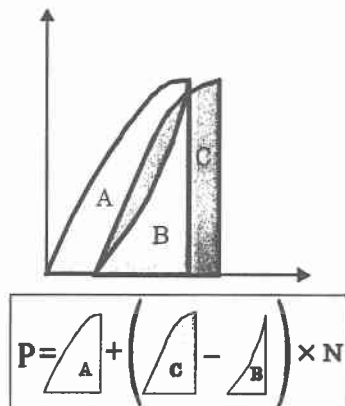


Fig. 8 Energy of Cyclic

これに従い、解析した結果 $N=55310$ となり、実験値よりも大きくなった。Fig.9は Bennettの実験を解析したものである ($S_{max}=0.65, S_{min}=0.01$, 実験値 $N=350500$)。

一方、静的载荷の場合、エネルギー量を応力-ひずみ曲線で囲まれた面積を P_{max} とすると、 $S_{max}=0.7$ では、Fig.10の斜線部の面積がそれにあたり、積分すると $P_{max}=1.9$ となった。つまり、破壊に必要なエネルギーを考える時、静的载荷と繰返し载荷を同等とみなすことは出来ないと思われる。また、 P_{max} 一定で応力レベルを変え、疲労寿命を求め $S-N$ 曲線をプロットした。Tepfers の $S-N$ 直線との比較も行った(Fig. 11)。両者の関係が大きく異なった理由として、一つの仮定を立てるならば、もし破壊エネルギーが静的と疲労とで異なるのであれば、疲労寿命が短い場合、すなわち低サイクルの場合は、より静的に近いエネルギーであり、また、疲労寿命が長い場合、すなわち高サイクルの場合には、本論文で用いたエネルギーより大きくなる可能性がある。

4. まとめ

本研究で、次のような知見が得られた。

- ・ コンクリートの受け持つ最大損傷エネルギーは、静的载荷の応力-ひずみ曲線で囲まれるエネルギーを繰返し疲労には適用できないものと思われる。
- ・ 最大損傷エネルギー P_{max} を一定とし、応力振幅を変えて疲労寿命を計算すると、Tepfers 式よりも $S-N$ 曲線の傾きが大きいものになった。

5. 今後の課題

供試体によって最大損傷エネルギーが異なるので、その点で改良が必要である。また、実験により塑性ひずみ、剛性の低下をより明確にしたい。このモデルで水中疲労との比較も今後行う予定である。

参考文献

- 1) 松下博通：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集 No.296, pp.87～95, 1980.4
- 2) 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
- 3) E.W.BENNETT and N.K.RAJU：Cumulative Fatigue Damage of Plain Concrete in Compression
- 4) R.Tepfers, B.Hedberg, G.Szczekocki：Absorption of Energy in Fatigue Loading of Plain Concrete

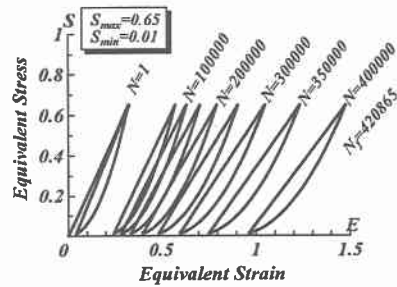


Fig.9 Analysis (Bennett Experiment)

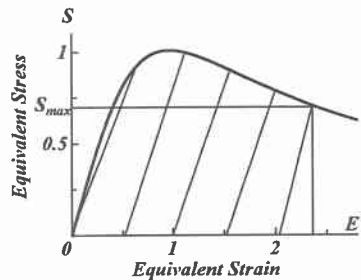


Fig.10 Energy of Static

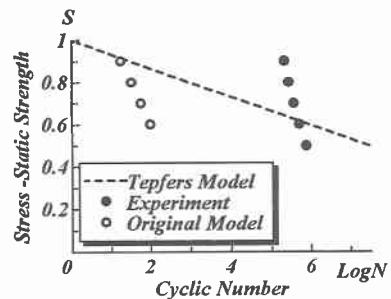


Fig.11 S-N Curve