

エネルギー消費を考慮したコンクリートの圧縮疲労構成則の開発

関西大学環境都市工学部 学生会員 ○鶴岡 憲人
 関西大学環境都市工学部 正会員 上田 尚史
 関西大学環境都市工学部 正会員 鶴田 浩章

1. はじめに

構造物の適切な維持管理が求められている中で、コンクリート構造物の疲労劣化への対策は非常に重要である。一方、コンクリート構造物の疲労メカニズムには未だ不明な点もあり、適切な防止対策や補修等の管理を行うことは難しいのが現状である。これまで種々の環境条件や境界条件の下、あるいは材料特性について疲労試験が行われ、様々な知見が得られている。しかし、すべての条件に応じて実験を行うには、膨大な時間やコストが必要であり困難である。また、実験により部材内部の微細な疲労損傷を評価することは難しい。そのため、FEM 等により解析的に評価することが望まれる。

そこで本研究では、コンクリート構造物の疲労劣化挙動を解析的に評価することを目的として、コンクリートの疲労構成則の開発を行った。

2. エネルギー消費を考慮した圧縮疲労構成則

一般に、コンクリートは繰返し荷重を受けることにより剛性の低下および残留ひずみが生じる。これらの特性は、繰返し荷重に伴うエネルギーの消費と関連していると考え、疲労荷重を受けるコンクリートの内部履歴を次式でモデル化した。

$$\sigma_c = \varphi_{st} \cdot E_c(\varepsilon_c - \varepsilon_{pf}) \tag{1}$$

ここに φ_{st} は剛性低下率、 ε_{pf} は残留ひずみであり、それぞれ消費されたエネルギーの関数である。

既往の研究^{1), 2)}では剛性低下および残留ひずみは、疲労寿命 N_f に対する繰返し回数 N の比(载荷回数比 N/N_f)と関係付けられている。図-1に既往の実験^{2), 3)}から得られた剛性低下率と残留ひずみを破線で示すが、剛性の低下、残留ひずみともに、繰返し初期において急激に変化した後、穏やかな勾配に変わり、 N/N_f が0.8~0.9程度から再び急激な変化を示す特徴がある。

ここで、1サイクルあたりに消費されるエネルギーは、内部履歴の除荷・再載荷曲線で囲まれた領域の面積である。本研究では、式(1)で示す内部履歴を仮定していることから、1サイクルあたりのエネルギー消費

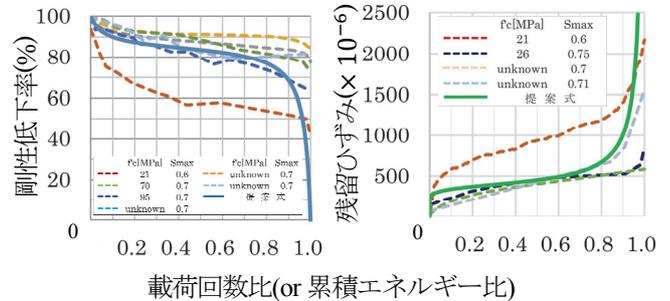


図-1 载荷回数と剛性低下・残留ひずみの関係

量を便宜上繰返し回数に応じて与えることとした。また、1サイクルあたりのエネルギー消費量は、破壊時まで一定と仮定し、破壊に至るまでに消費される総エネルギー(コンクリートが有する総エネルギー)を疲労寿命 N_f で除すことで算定した。このように仮定することで、繰返し荷重に伴う剛性低下と残留ひずみをエネルギー消費量と関連付けた。なお、既往の研究²⁾において、载荷回数と1サイクルあたりのエネルギー消費量は必ずしも一定ではないとの知見もあるため、今後検討が必要である。

以上のことを考慮して、剛性低下率 φ_{st} と残留ひずみ ε_{pf} を図-1および式(2), (3)のようにモデル化した。

$$\varphi_{st} = \left\{ \frac{1.0}{\log \alpha - 0.0116} + \frac{1.0}{\alpha + 0.0661} + 85.0 \right\} \times 10^{-2} \tag{2}$$

$$\varepsilon_{pf} = \varepsilon_{p0} + \left\{ 6.5 \log(\alpha + 0.003) - \frac{3.0}{\log \alpha - 10^{-3}} + 37.0 \right\} \times 10^{-5} \tag{3}$$

ここで、 α は1サイクルあたりのエネルギー消費量を累積したものをコンクリートが有する総エネルギーで正規化した累積エネルギー比であり、 ε_{p0} は静的荷重により生じる残留ひずみである。また、総エネルギーはNakamura and Higaiが提案する圧縮破壊エネルギー³⁾と等しいものと仮定した。

疲労による破壊は、エネルギー消費量の大きさで定義することとした。すなわち、コンクリートが有する総エネルギーから、累積消費エネルギーを差し引いたものを残余エネルギーとし、残余エネルギーがその時点での破壊に必要なエネルギー($\sigma_c^2 / 2\varphi_{st} \cdot E_c$)より小さくなったときに破壊したと判定することとした。

キーワード 疲労, 構成則, エネルギー消費, 剛性低下, 残留ひずみ

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号 第4学舎第5実験棟 コンクリート工学研究室 TEL 06-6368-1653

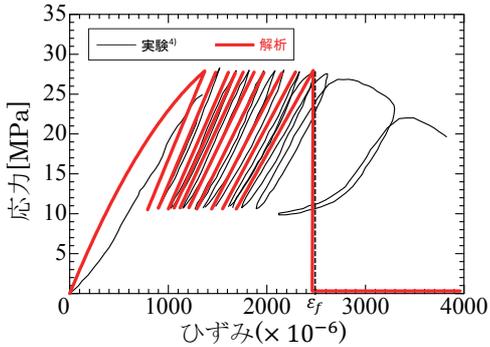


図-2 実験および解析結果の比較

3. コンクリートの疲労破壊試験を対象とした解析

開発した疲労構成則の妥当性を検証するため、畑野らにより行われたコンクリートの疲労試験⁴⁾を対象として解析を行った。実験では、圧縮強度 32MPa のコンクリートに対して最大応力比 0.87, 最小応力比 0.33 の疲労荷重が载荷されている。解析におけるコンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮強度までは二次放物線でモデル化し、内部履歴には式(1)で示す疲労構成則を適用した。破壊時の軟化勾配は、残余エネルギーに従って決定した。なお、疲労寿命 N_f は、菅田らの提案する S-N 回帰線⁵⁾を用いた。

図-2 に実験結果および解析結果を示す。载荷開始から破壊直前までにおいて繰返し载荷に伴い剛性が徐々に低下し、残留ひずみが生じる傾向を妥当に評価できている。解析による破壊時の剛性は初期の 7 割程度であり、実験と同程度の低下を示している。また、図中の ϵ_f は実験における破壊時のひずみであるが、解析による破壊時のひずみもほぼ同じ値となっており、妥当に評価できている。なお、軟化勾配に関しては、解析では実験とは異なり、急激に応力が低下している。この点については今後検討する必要がある。

4. ランダムに変動する応力に対する適用性

次に、ランダムに変動する応力に対する適用性について検討した。圧縮強度を 30MPa とし、図-3(a)に示すように最大応力の大きさは一定として、出現頻度を変えて解析を行った。

各パターンにおける解析の結果をひずみと载荷回数(回)の関係としてまとめたものを図-4(a)に示す。図より応力の頻度の違いによって载荷回数が若干異なることが確認できる。

また、図-3(b)に示すように出現頻度が高い応力の大きさを変えて解析した結果を図-4(b)に示すが、小さい応力の頻度が高いほど载荷回数が大きくなることがわかる。さらに、载荷回数の違いが図-4(a)に示した結果に比べ非常に大きくなった。このことか

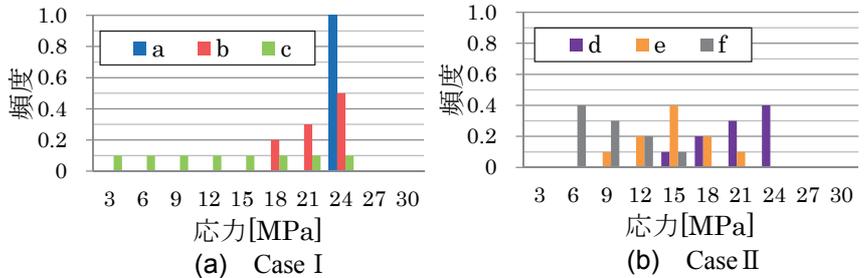


図-3 ランダムに変動する応力

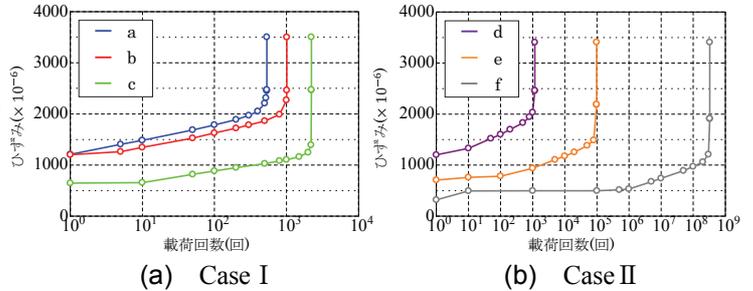


図-4 ひずみと载荷回数の関係

ら、最大応力の大きさの違いが载荷回数に大きく影響していることがわかる。一般に、载荷する応力が小さいほど疲労寿命は長くなるので、妥当な結果であるといえる。

以上のことから、ランダムに変動する応力下におけるコンクリートの疲労挙動に対して、本研究で開発した構成則は、妥当な結果が得られることが確認された。

5. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 繰返し载荷によって生じる剛性の低下および残留ひずみをエネルギー消費量と関連付けたコンクリートの疲労の構成則を開発した。
- (2) 開発した構成則を用いてコンクリートの疲労解析を行った結果、実験結果を概ね妥当に評価できることが確認された。また、ランダムに変動する応力に対しても妥当に評価できることが示された。

参考文献

- 1) GENE M. NORDBYT : fatigue of concrete a review of research, JOURNAL OF THE AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Vol.30, No.2, pp.191-219, 1958.
- 2) Minh-Tan Do, Omar Chaallal, and Pierre-Claude Aitcin : Fatigue Behavior of High-Performance Concrete, ASCE, Vol.5, No.1, pp.96-111, 1993.
- 3) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001.
- 4) 畑野 正, 渡辺 啓行 : 周期的圧縮荷重によるコンクリートの疲労破壊, 土木学会論文報告集, 第 185 号, pp.51-60, 1971.
- 5) 菅田 紀之, 尾崎 昶 : 各種コンクリートの疲労強度および疲労破壊性状に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.1-16, 2001.