

コンクリートの繰返し変形挙動のモデル化

－ ひずみ軟化型構成モデルの拡張 －

中部大学 学生員 ○高瀬雄士 中部大学 正員 水野 英二
三重大大学 正員 畑中 重光

1. はじめに

コンクリートは、低い拘束圧下においては、最大応力以降は破壊の局所化を伴うひずみ軟化挙動が支配する。それゆえ、軟化域での繰返し変形特性を如何に合理的にモデル化するかが鉄筋コンクリート(RC)構造物の非線形解析を行う上で重要となる。本研究では、筆者らのひずみ軟化型構成モデル（弾塑性モデル）¹⁾を繰返し挙動が再現できるように弾塑性・破壊モデルへと拡張する。

2. 繰返し荷重下でのコンクリートの挙動

図-1に示すような繰返し圧縮下でのコンクリートの挙動が、実験結果²⁾より知られており、以下では、ひずみ軟化型構成モデルを拡張して、このような繰返し挙動を再現することを試みる。

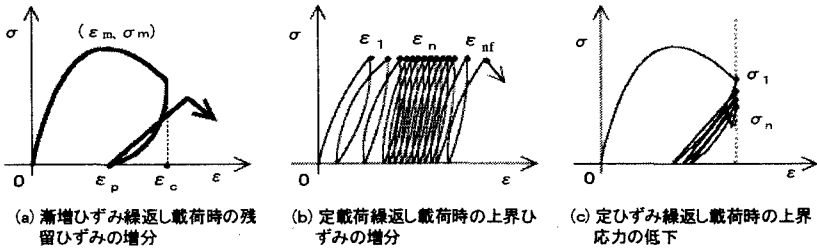


図-1 高応力繰返し一軸圧縮時の応力-ひずみ曲線²⁾

3. 筆者らのひずみ軟化型構成モデルの概要

ひずみ軟化型構成モデルは、ひずみ空間で定義した塑性理論に基づいており、その特徴は、1)非関連流れ則の仮定の下で負荷関数、2)塑性ポテンシャル関数をひずみ空間で定義していること、3)塑性仕事量をパラメータとしてコンクリートの硬化および軟化挙動を統一的に評価している点である。本研究に用いる負荷曲面は、強度パラメータ F_p によって静水圧軸(I_1 軸)を中心として、ひずみ硬化域では広がり、ひずみ軟化域では縮小する(等方硬化モデル)。強度パラメータ F_p はコンクリートの損傷度を表し、ひずみ硬化域では増加し、破壊曲面で最大値となり、ひずみ軟化に従って減少する。(図-2 参照)。

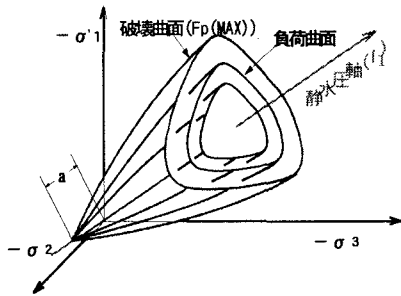


図-2 主応力空間における負荷曲面

これまでの筆者らのモデルは、除荷領域では、負荷曲面は縮小することなく、線形弾性挙動を再現するという特徴があった。それゆえ、本研究では、除荷および再載荷領域において生ずる塑性仕事量により負荷曲面を縮小させ、図-3に示すような非線形繰返し挙動を再現できるように構成モデルを拡張する。

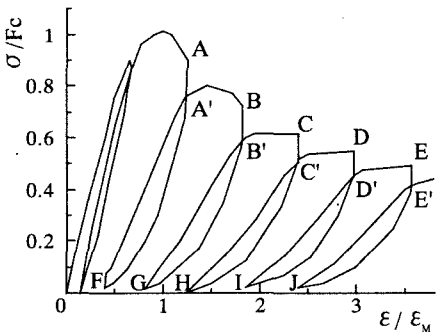


図-3 実験曲線 (谷川ら³⁾)

4. 一軸応力状態における繰返し載荷実験データによるモデル化

図-3に示すような除荷時および再載荷時の繰返し実験データ³⁾を用いて、一般応力状態下での繰返し挙動を再現できるように、以下のモデル化を行う。

4.1 除荷挙動のモデル化

図-3に示す除荷曲線 (A-F, B-G, C-H, D-I, E-J) に対して、A~E 点の除荷時点を原点に取り、軸ひずみ増分 $\Delta \epsilon$ と軸応力増分 $\Delta \sigma$ との関係性を調べた結果を図-4に示す。最小二乗法により、各除荷曲線を $\Delta \sigma / F_c = e^a (\epsilon / \epsilon_M)^b$ なる関係式で再現した。

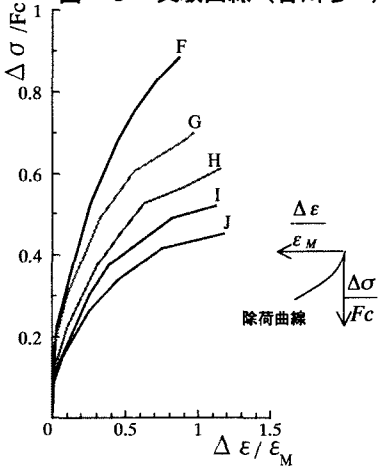
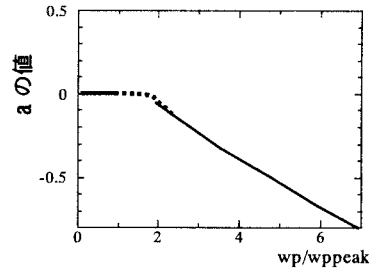
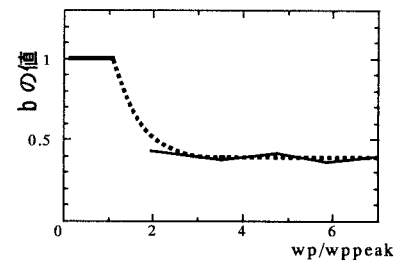


図-4 除荷後の挙動

式中の a および b とエネルギー吸収量 (W_p/W_{ppeak}) との関係を図-5 および 6 に示す。なお, W_p/W_{ppeak} は, 除荷時点のエネルギー吸収量 W_p を最大応力時のエネルギー吸収量 W_{ppeak} で無次元化したものである。ここで, 以下の知見が得られた。

図-5 a 値— W_p/W_{ppeak} 関係図-6 b 値— W_p/W_{ppeak} 関係

① $a-W_p/W_{ppeak}$ の関係(図-5)は,

$W_p > W_{ppeak}$ なる領域では, 図のように斜めに傾いた直線に近い変化をすることが認められる。一方, $W_p < W_{ppeak}$ なる領域では, 線形弾性挙動を仮定することにより, 式中の境界条件は, W_p が W_{ppeak} までは a の値は 0 となる (図中の実線は, 実験データより得られたものである)。

② $b-W_p/W_{ppeak}$ の関係(図-6)は, a の値と同じく $W_p < W_{ppeak}$ 以前は, 線形弾性挙動を仮定することにより, 境界条件は, W_p が W_{ppeak} まで b の値を 1 となる。その後の破線は推測線となる。

今後は, 図-5 および図-6 を基にモデル化を行い, 他の高強度コンクリートなどについても, このようなモデル化が適用できるか, 確認する必要がある。

4.2 再載荷挙動のモデル化

図-3 に示す再載荷曲線 ($F-A'$, $G-B'$, $H-C'$, $I-D'$, $J-E'$) について, $F \sim J$ 点の再載荷時点を原点に取り, 軸ひずみ増分 $\Delta \varepsilon$ と軸応力増分 $\Delta \sigma$ の関係を調べた結果を図-7 に示す。再載荷挙動は直線と仮定して, 傾きとエネルギー吸収量との関係を図-8 に示す。なお, 図中の式は, 最小二乗法より求めた。

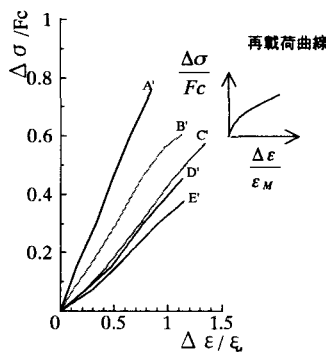


図-7 再載荷後の挙動

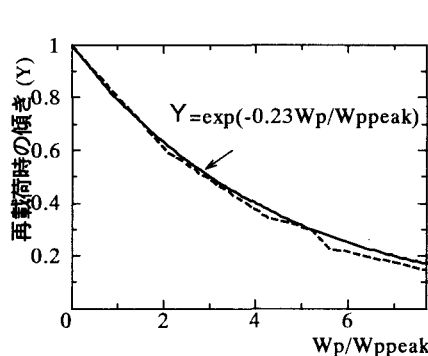
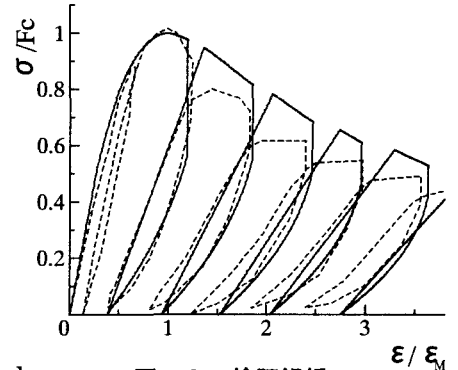
図-8 再載荷後の傾き— W_p/W_{ppeak} 

図-9 検証解析

4.3 フィードバック解析

以上のモデル化をひずみ軟化型構成モデルに採り入れて, 漸増ひずみ繰り返し載荷の検証解析を行った結果を図-9 に示す。本解析では, 除荷時および再載荷時に強度パラメータ F_p 値を低下 (すなわち, 負荷曲面を縮小) させている。図からも分かるように, 実験 (図-3) で得られたコモンポイントを再現することができる (コンクリートの圧縮強度 3.2MPa, ヤング係数 2940MPa を利用)。また, 除荷および再載荷曲線は, 塑性仕事量の増大に伴って, 傾きが小さくなることが再現出来ている。他の解析については, 発表当日に報告する。

5. 今後の課題

図-1(b)に示すようなサイクリッククリープを, また図-1(c)に示すような一定ひずみ幅での繰り返し挙動を再現する能力があるか, 検討する必要がある。

参考文献

- 1) 水野英二, 森本康介, 畑中重光: 中心軸圧縮力を受けるコンファインドコンクリートの拘束効果に関する三次元 FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20-3, 85-90, 1999.
- 2) 日本コンクリート工学協会: 塑性域の繰り返し劣化性状に関するシンポジウム, 委員会報告書, 2.2.1 繰り返し載荷時の応力-ひずみ曲線 (担当: 畑中重光), 115-128, 1998.
- 3) 小坂義夫・谷川恭雄・山田和夫・畑中重光: 一軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ曲線に関する研究, セメント技術年報, vol.37, 272-282, 1983.