

III - 48

土の繰返し載荷時におけるクラックモデルに対する基礎的検討

東北学院大学工学部

学生会員 ○山根 久和

東北学院大学工学部

学生会員 落合 祥吾

東北学院大学工学部

正会員 飛田 善雄

1. はじめに

土の脆性挙動に関する研究は、設計において引張り強度が必要とされないためにほとんどされてこなかった。しかし、土の脆性挙動は、地盤の破壊問題や実務において重要である。土の脆性挙動を把握し、適切な構成モデルを構築し、適切に数値解析に適用できれば、土構造物の静的安定・地震時安定に対して新たな知見を与える事も可能といえる。本研究では、繰返し載荷時における脆性挙動の表現を試み、基本的な検討を行う。また、本論文では引張りを正とする。

2. 脆性挙動を表現する構成モデル

脆性挙動を考える場合、土はコンクリートと極めて類似した性質をもち、さらにコンクリートは実験的研究、モデルに対する研究、数値解析手法の研究が進んでいる。その中で提案されているモデルより、Ortiz[1]により提案されたモデルを基本として検討を行う。Ortizモデルは熱力学に基づくモデルであり、土への適用を考えた場合に最も可能性の高いモデルと考えられる。

3. Ortiz モデル

Ortizモデルの一番の特徴は、引張り場と圧縮場の両方で脆性挙動を表現できることである。それを可能にするための第一の工夫は、応力を引張り成分 σ^+ と圧縮成分 σ^- に分割している。引張りではモードIのクラック開口、圧縮ではモードIIのクラックに沿うすべりに対応している。第二の工夫は(1)式で定義される損傷関数である。

$$\Phi(\sigma, \mu) = \frac{1}{2} \sigma^+ : \sigma^+ + \frac{1}{2} c \sigma^- : \sigma^- - \frac{1}{2} t^2(\mu) = 0 \quad (1)$$

式(1)では差効果係数と呼ばれるパラメータ c 1つで圧縮場と引張り場の脆性挙動の違いを表現している。また、 $t(\mu)$ は損傷の進展に関する限界応力である。ここで、限界応力 $t(\mu)$ は式(2)で表される。

$$t(\mu) = t^+(\mu) + t^-(\mu) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} t^+(\mu) &= ft \exp \left\{ \frac{\log(1 + E^0 \mu)}{1 + E^0 \mu} \right\} \\ t^-(\mu) &= ft \exp \left\{ \frac{\log(1 + c E^0 \mu)}{1 + c E^0 \mu} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 E^0 はクラックの無い状態での弾性定数である。 μ は損傷の累積を表すパラメータであり、(4)式で表される。

$$\mu = \frac{s : D : s}{s : D : s + t(\mu) t'(\mu)} \quad (4)$$

Ortizモデルでは、4階の弾性コンプライアンステンソルそれ自身を材料の損傷の程度を表現する内部変数としている。弾性コンプライアンステンソルを、非損傷部分と損傷部分、さらに、モードIとモードIIに対応するように次のような加算分割を行う。

$$\left. \begin{aligned} C &= C^0 + C^c ; \quad C^c = C^I + C^{II} \\ C^c &= p^+ : \bar{C}^I : p^+ + p^- : \bar{C}^{II} : p^- \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $p^+(p^-)$ は引張り（圧縮）応力のみを選択する操作であり、 $p^+ = 0(p^- = 0)$ のとき、すなわち全ての応力主値が圧縮（引張り）であるときには、 $C^c = 0(C^{II} = 0)$ となることを意味している。

全てのクラックが活性な場合の損傷コンプライアンスの発展則はそれぞれ次のように与えられる。

$$\dot{\bar{C}}^I = \dot{\mu} \frac{\sigma^+ \otimes \sigma^+}{\sigma^+ : \sigma^+} ; \quad \dot{\bar{C}}^{II} = c \dot{\mu} \frac{\sigma^- \otimes \sigma^-}{\sigma^- : \sigma^-} \quad (6)$$

式(5)の逆を求めることで、損傷の影響を考慮した剛性テンソルが得られる。

$$D = C^{-1} \quad (7)$$

応力速度と弾性ひずみ速度の関係式より(8)式が得られる。

$$\dot{\sigma} = D : (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^c) ; \quad \dot{\varepsilon}^c = \dot{\mu} s \quad (8)$$

式(1)～(8)より、式(9)で定義される応力速度・ひずみ速度関係が得られる。

$$\dot{\sigma} = \left[D - \frac{(D : s) \otimes (D : s)}{s : D : s + t(\mu) t'(\mu)} \right] : \dot{\varepsilon} ; s = \sigma^+ + c \sigma^- \quad (9)$$

4. 計算結果

Ortiz モデルを用いて一軸状態での引張りと圧縮の繰り返し載荷時の計算を行った。材料定数は、ヤング係数 $E=100(\text{MPa})$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ 、引張り強度 $f_t=0.018(\text{MPa})$ 、交差効果係数 $c=1/100$ とした。

図 - 1 に一軸状態で、引張りから除荷、圧縮から除荷の1サイクル(単調載荷)での応力 - ひずみ関係と2サイクル(繰り返し載荷)での応力 - ひずみ関係を示す。繰り返し載荷時における計算結果は除荷時の経路から再載荷時の経路が離れていく様な結果となっている。

まず、引張り場については再載荷時には損傷が進展せず、除荷時と同じ経路を辿ることとした。図 - 2 に改良を行った引張り場での繰り返し載荷の応力 - ひずみ関係を示す。

また、圧縮場の脆性挙動の表現は引張り場と同様の考え方を用いるとヒステリシスの表現に問題がある。そこで、ヒステリシスの表現をするために Ortiz モデルに塑性論を取り入れて計算を行った。しかし、図 - 3 に示す実験結果[2]を Ortiz モデルの弾性劣化の影響が大きすぎるため十分に表現できなかった。

そこで、圧縮場におけるヒステリシスを表現するために除荷時と再載荷時に損傷を受けていない弾性を利用し、除荷と再載荷の進展と共に損傷を受けた弾性を利用することで圧縮場における脆性挙動の表現を行った。図 - 4 に応力 - ひずみ関係を示す。

5. まとめ

繰り返し載荷時の脆性挙動の表現を試み、数値計算を行った。繰り返し載荷時におけるモデルの可能性と問題点について以下に示す。

- ・ 引張り場の脆性挙動の表現は再載荷時に損傷が進展しないとすることで表現が可能であると考えられる。
- ・ 圧縮場では弾性劣化と塑性を組み合わせたが、実験挙動を十分に表現できず、脆性挙動のヒステリシス挙動のメカニズムについて、今後検討する必要がある。
- ・ 圧縮場でのヒステリシスの表現には損傷を受けていない弾性定数と損傷を受けた弾性を利用することで可能であると考えられる。

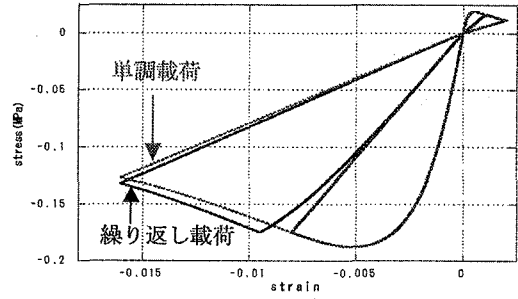


図 - 1 応力 - ひずみ関係

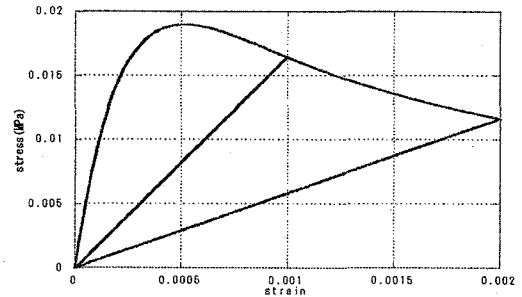


図 - 2 引張り場の応力 - ひずみ関係

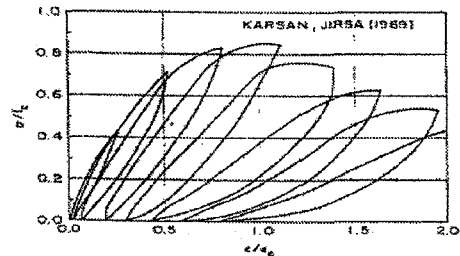


図 - 3 除荷と再載荷の実験データ

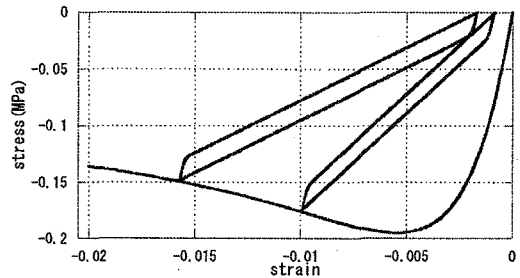


図 - 4 圧縮場の応力 - ひずみ関係

参考文献

- [1] Ortiz, M.: A constitutive theory for the inelastic behavior of concrete, *Mechanics of Materials* 4, pp67-93, 1985
- [2] Karsan, D. and J.O. Jirsa: Behavior of concrete under compressive loading, *J. Struct. Div. ASCE* 95, 2543, 1969