

限界状態モデルの概念を導入した土質材料の Cap モデル

○法政大学 学生会員 白岩 浩樹
 法政大学 学生会員 内田 亮介
 法政大学 正 会 員 草深 守人
 法政大学 正 会 員 竹内 則雄

1. まえがき

限界状態モデルと Cap モデルは多くの点で類似したモデルであるが、前者は 3 軸試験から観察される力学現象を基本として示されたモデルであり、後者は 3 次元応力場における力学理論から出発したモデルである。限界状態モデルでは、移動降伏面が Roscoe 面と Hvorslev 面によって規定され、固定降伏面（限界状態線）はあくまでも限界状態のみを規定する。一方、Cap モデルでは、移動降伏面と固定降伏面の両者によって降伏過程が表現される。本文では、一つの試みとして Cap モデルを基本に限界状態モデルの概念を導入したモデルについて考察した。

2. 二つの移動降伏面を持つ Cap モデル

DiMaggio らは、Cap モデルを構成する二つの降伏面 f_1 、 f_2 をそれぞれ応力テンソルの第 1 不変量 J_1 と偏差応力テンソルの第 2 不変量 J_{2D} の関数として図-1 に示すようなモデルを与えた。ここで、 f_1 は固定降伏面であり、 f_2 は f_1 との交点を楕円の頂点とする移動降伏面である。もし材料が関連流れ則に従うと仮定された場合は、両降伏面の交点で体積塑性ひずみの増分はゼロとなり、限界状態モデルの概念と類似する。しかしながら、このようなモデルでは、 f_1 が固定降伏面であることから限界状態モデルで定義されている Hvorslev 面側の応力状態を表現することはできない。そこで、この制限を緩和する目的で両降伏面の移動を可能とする図-2 のような Cap モデル[1]を次式で与えた。

$$f_1 = J_{2D} - N J_1 + (N\Lambda - \sqrt{(1-\Lambda)^2 N^2 + \Lambda^2 M^2}) J_{01} = 0, \quad \Lambda = \frac{J_{e1}}{J_{01}} \quad (1)$$

$$f_2 = 27(1-\Lambda)^2 J_{2D} + \Lambda^2 M^2 J_1^2 - 2\Lambda^3 M^2 J_{01} J_1 + \Lambda^2 (2\Lambda - 1) M^2 J_{01}^2 = 0 \quad (2)$$

ここで、 N 、 M はそれぞれ f_1 および限界状態線の勾配、 J_{01} 、 J_{e1} は間隙比の関数として降伏 Cap の移動を表す応力の第 1 不変量である。

図-1 のモデルは移動降伏面と固定降伏面の交点で導関数が不連続となり塑性ひずみの方向は唯一的に定まらない。一方、図-2 のモデルは式(1)を式(2)に接する曲面 (N は J_{01} の関数) として仮定していることから両降伏面の接点で応力テンソルに関する導関数が連続であり、収束計算上の煩雑さを回避できる。また、このモデルでは、 $0 \leq N \leq M$ の範囲で限界状態モデルと同様な挙動を表現できること、および限界状態の

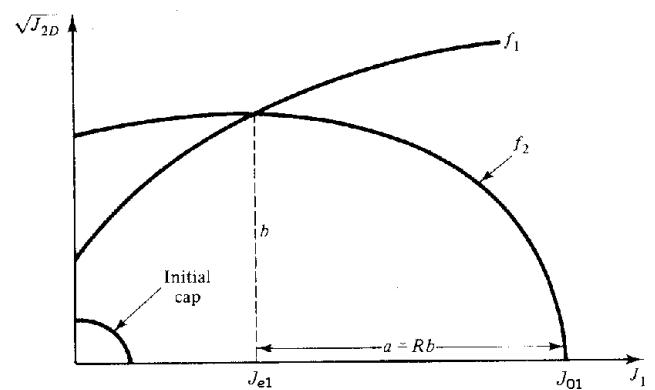


図-1 DiMaggio らの Cap-model

左右から限界状態を越えることもできる。例えば、図-2 の実線で示した応力経路では $N = 0$ とすると、限界状態モデルの Roscoe 面側と同様な挙動を表現でき、 $0 < N \leq M$ のとき、限界状態を乗り越えた軟化現象を表現することができる。さらに、点線で示した応力経路では、 $0 < N \leq M$ の範囲で限界状態モデルの Hvorslev 面側と同様な挙動を表現できることになる。

キーワード：Cap モデル，限界状態モデル，降伏面，3 軸圧縮試験，圧密，数値解析

連絡先：〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2 TEL. 042-387-6268 FAX. 042-387-6124

3. 実験値と計算値の比較

式(1)と式(2)で表される Cap モデルを用いた有限要素解析結果と実験値の比較をおこなうことにより、これらの降伏関数の表現性について考察する。東京都内で採取した CH 級の沖積粘土に液性限界の 15% 増しの水を加え完全に攪拌した後、再圧密した粘土試料を用いて圧密非排水 3 軸試験を実施した。これらの試験結果に基づいて式(1)と式(2)の材料定数を算定した結果を表-1 に示す。ただし、試験は Hvorslev 面側の試験を実施していないことから材料パラメータ N は、式(1)が原点を通る式(2)の接平面の勾配であると仮定している。

計算に用いた材料条件は、表-1 より $N = 1.72$, $M = 1.50$, $\Lambda = 0.67$, $E_0 = 5 \text{ MPa}$, $\nu = 0.25$, および圧密試験結果から $e - \log p$ 曲線の載荷・除荷時の勾配を $\lambda = 0.2$, $\kappa = 0.02$ とした。

図-3 と図-4 は圧密非排水 3

軸試験結果と計算値を比較したものであり、それぞれ応力経路と応力-ひずみ曲線を示す。図中には修正 Cam-clay モデルを一般化した限界状態モデル[1]との比較の意味で、上記の計算条件の中で第 1 降伏面の勾配のみを $N = 0$ とした場合の計算値も合わせて示した。

第一降伏面を第二降伏面に接し、かつ原点を通る曲面と仮定した ($N = 1.72$) 場合、偏差応力の計算値は試験値とあまり良い対応を示さなかった。しかし、限界状態モデルに相当する Cap モデル ($N = 0$) では、試験値と比較的良好な対応を示した。これは、試験に使用した土試料が再圧密した正規圧密粘土であり、限界状態モデルにより近い土試料であることによるものと思われる。ただし、これらのことは、今回の比較計算のみで即断できるものではない。

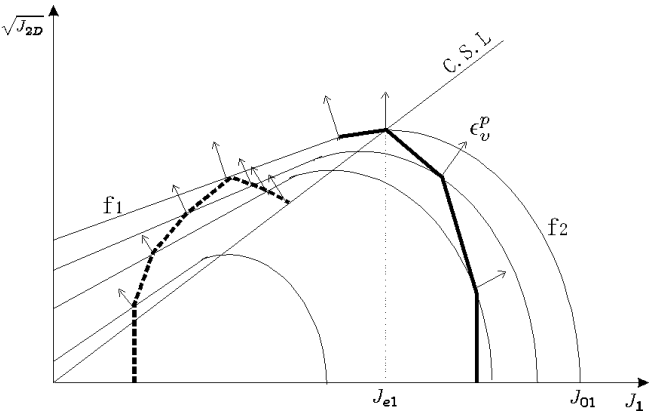


図-2 破壊と限界状態を表現した Cap-model

表-1 圧密非排水 3 軸試験結果と材料定数

σ_3 (kPa)	f_1			f_2				
	p_{fsl} (kPa)	q_{fsl} (kPa)	N	p_{csl} (kPa)	q_{csl} (kPa)	p_0 (kPa)	M	Λ
123	70	116	1.66	87	130	127	1.49	0.69
147	77	133	1.73	102	153	152	1.50	0.67
196	98	177	1.81	134	208	203	1.55	0.66
221	112	190	1.70	151	220	229	1.46	0.66
平均	—	—	1.72	—	—	—	1.50	0.67

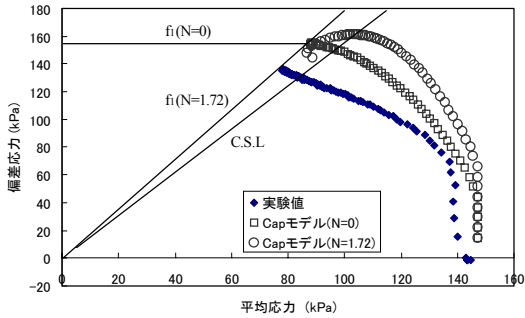


図-3 非排水応力経路

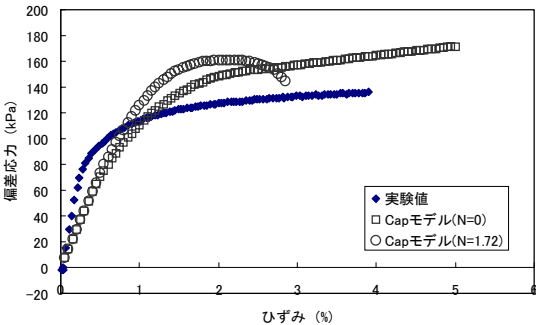


図-4 応力-ひずみ曲線

4. あとがき

本文は Cap モデルに限界状態の概念を取り入れる一つの試みを示したものであるが、このモデルは、正規圧密粘土に対する試験値と計算値にまだ無視できない差があり、今後の検討を必要とする。

【参考文献】 大橋正未知, 草深守人, 竹内則雄: 拡張型限界状態モデルと弾塑性-圧密連成解析, 計算工学講演会論文集, Vol.6, 2001 年 5 月