

圧密降伏応力に着目した固化処理土の強度推定

九州大学大学院 正○笠間清伸 正 善 功企 正 陳 光斉

1. はじめに

固化処理地盤は、①施工上生じる固化材混合の不均一性と②固化対象となる地盤の土質の不均質性に起因する実質的な強度のばらつき、さらに③コア採取から室内試験にいたるまでに生じる乱れ等に起因する見かけ上の強度のばらつきを有する。著者らは、①～③を解決する固化処理地盤の強度評価法として、固化処理土の強度の支配的な因子である降伏応力比と原位置で測定する圧密降伏応力を利用した強度評価法を提案している¹⁾。原位置で圧密降伏応力を測定する手段としては、孔内水平載荷試験を考えている。これまで、孔内水平載荷試験を利用した粘性土や砂質土の強度定数評価法²⁾は提案されているが、粘着成分と摩擦成分を有する固化処理地盤に関しては十分な検討がなされていない。本文では、孔内水平載荷試験の応力経路を考慮し、Mohr-Coulomb と Cam-Clay 型の破壊基準を仮定した場合の、測定される降伏圧力と他の土質定数の関係について考察した。

2. 孔内水平載荷試験の応力経路

図1に示すように地盤の初期鉛直応力と水平応力をそれぞれ σ_z と $K_0\sigma_z$ とし、注入圧の増加により半径方向の応力 σ_r が変化する場合を考える。軸対称平面ひずみ状態において、応力成分 σ_r と σ_θ の応力変化は以下の式で表すことができる。

$$\Delta\sigma_r = \sigma_r - K_0\sigma_z = 2GC/r^2 \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma_\theta - K_0\sigma_z = -2GC/r^2 \quad (2)$$

また、平面ひずみ状態では $\Delta\sigma_z = \nu(\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta) = 0$ であるので

$$\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta + \Delta\sigma_z = 0 \quad (3)$$

となり、孔内水平載荷試験中の平均主応力 p は変化しないことを意味している。その結果、地盤が弾性的に挙動する範囲では、非排水・排水条件とは無関係に過剰間隙水圧は発生しないことになる。

ここで Mohr-Coulomb の破壊基準を仮定すると孔内水平載荷試験の応力経路を、 τ - σ 空間で示せば図2(a)中の A→B→C→D→E のようになると考えられる。図中の A→B はボーリング孔の掘削による応力開放に対応し、B→E は載荷過程に対応している。完全弾塑性型の応力ひずみ曲線を用いる場合には、平均有効応力が一定のまま B→D のように破壊基準に到達する。各応力状態に対応した孔内水平載荷試験の注入圧と体積変化量の関係を、図2(b)に示す。

代表的なひずみ硬化モデルである Cam-Clay モデルを用いた場合の p - q 空間の応力経路を図3(a)に示す。また、図3(b)には孔内水平載荷試験時の注入圧と体積変化量の関係を示す。Cam-Clay モデルを用

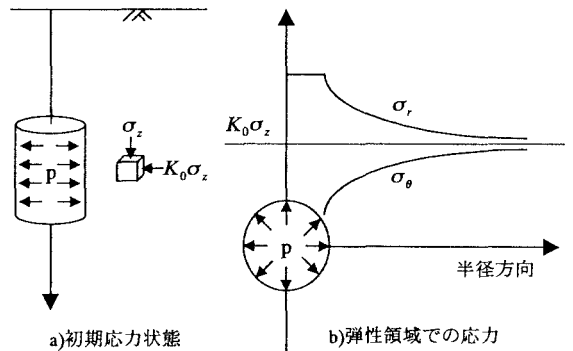


図-1 孔内水平載荷試験の応力状態

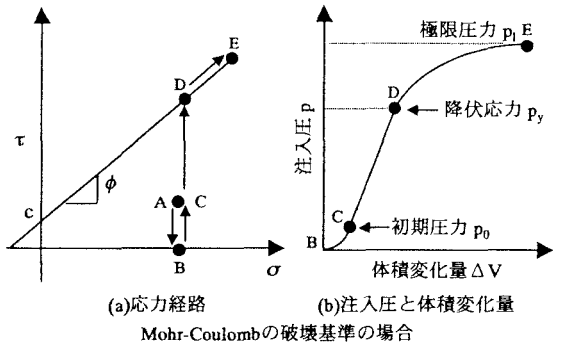


図-2 孔内水平載荷試験の応力経路その1

いる場合、C で降伏局面に到達した後、C→D のような非排水せん断経路を伴いつつ破壊基準に到達する。さらに注入圧が増加すると D→E の経路をたどって限界状態に到達する。

3. 孔内水平載荷試験の降伏圧力

Mohr-Coulomb の破壊基準を用いて、降伏応力 p_y を計算する。 $K_0 \leq 1.0$ とすると応力状態により、以

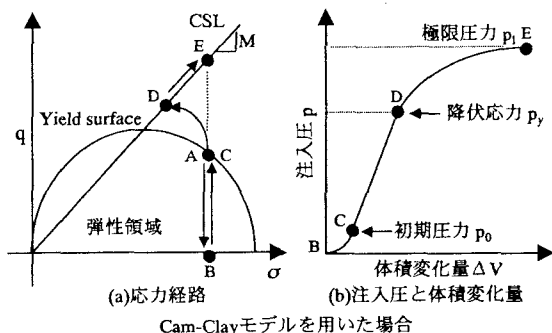


図-3 孔内水平載荷試験の応力経路その2

下の二つの破壊モードが考えられる。

破壊モード①($\sigma_\theta \leq \sigma_z \leq \sigma_r$)

$$p_y = K_0 \sigma_z (1 + \sin \phi') + c' \cos \phi' \quad (6)$$

破壊モード②($\sigma_\theta \leq \sigma_r \leq \sigma_z$)

$$p_y = (((1 + K_0) \sin \phi' - (1 - K_0)) \sigma_z + 2 \cos \phi') / (1 + \sin \phi') + K_0 \sigma_z \quad (7)$$

図-4 に Mohr-Coulomb の破壊基準を用いた場合の計算した降伏圧力を示す。ただし、 K_0 値は Jaky の式($K_0 = 1 - \sin \phi'$)を用いた。図の縦軸は、有効土被り圧で正規化している。全体的な傾向として、粘着力 c' が大きいほど内部摩擦角 ϕ' が小さいほど降伏圧力は増加する。また、降伏圧力が有効土被り圧より大きい場合は破壊モード①となり、小さい場合は破壊モード②となった。この図は、粘着力と内部摩擦角の両方を有するような固化処理地盤の強度定数の決定に有効であると考えられる。

修正 Cam-Clay モデルを用いると図-3(b)中の C の圧力 p_{yc} は、以下の式で与えられる。

$$p_{yc} = \sqrt{(M^2 p_0^2 - (1 - K_0)^2 \sigma_z^2) / 3 + K_0 \sigma_z} \quad (8)$$

ただし、 $p_0 = 2^{-\Lambda} (1 + K_0) \sigma_z \exp\{\Lambda \times \ln R\}$, $\Lambda = 1 - \kappa / \lambda$, $R = 1 + 9(1 - K_0)^2 / M^2 (1 + 2K_0)^2$ である。 p_0 は破壊時の平均有効応力であり、 R は過圧密比である。また、図-3(b)の D での圧力 p_{yd} は次式で表すことができる。

$$p_{yd} = \sigma_z \sqrt{(3M^2 (1 + 2K_0)^2 - (1 - K_0)^2) / 3 + K_0} \quad (9)$$

図-5 に式(8)と(9)により算定した二つの降伏圧力を示している。図中では Λ を 0.5~0.9 まで変化させている。図より内部摩擦角 ϕ' が増加するほど、有効土被り圧に対する二つの降伏圧力は減少する。この傾向は、Mohr-Coulomb の破壊基準を用いた場合と

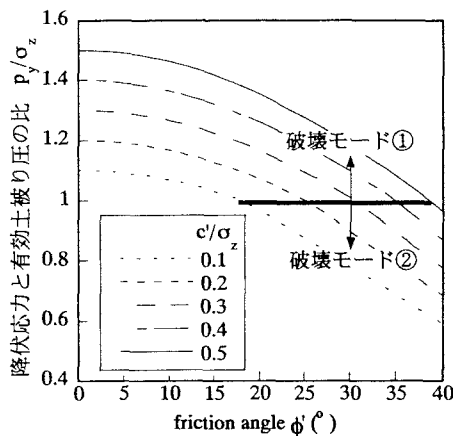


図-4 Mohr-Coulomb の破壊基準による降伏圧力

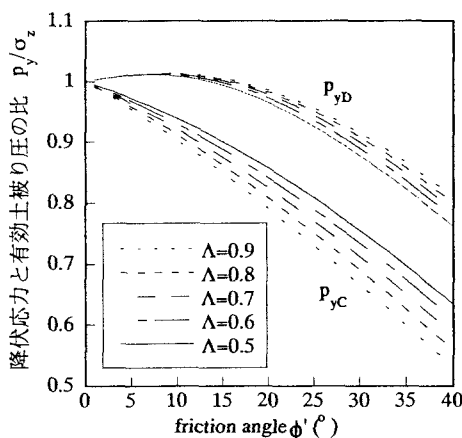


図-5 Cam-Clay モデルによる降伏圧力

同様である。また、脆性が高いほど($\Lambda \rightarrow$ 小)、二つの降伏圧力の差は小さくなる。ここで、内部摩擦角 ϕ' が $20 \sim 40^\circ$ では $p_{yd} / \sigma_z = 0.8 \sim 0.9$ となり、孔内水平載荷試験における降伏圧力は地盤の先行圧密圧力より若干減少する傾向にある。

4. まとめ

本文では、固化処理地盤で孔内水平載荷試験より測定される降伏応力の力学的な位置付けをするために、Mohr-Coulomb の破壊基準と Cam-Clay モデルを用いて応力経路および降伏圧力を考察した。

【参考文献】

- 1) 笠間清伸, 善功企, 江頭和彦, 佐藤孝夫: 原位置における固化処理地盤の強度評価法, 土と基礎, Vol.49, No.5, Ser.No.520, pp.19-21, 2001.
- 2) 太田秀樹, 深川良一, 西原晃: 原位置による変形・強度定数の決定と設計への適用性, 土木学会論文集, 第 346 号/Ⅲ-1, pp.77-86, 1984.