

円弧すべり解析に適用する中間土材料の強度定数設定に関する一考察（その1）

日本工営(株) 仙台支店 正会員 佐藤 信宏
正会員 ○石井 篤志

1. はじめに

盛土自体の安定性照査を行う場合には分割法の円弧すべり解析により実施されることが多い。盛土の強度特性(c , ϕ)を三軸圧縮試験等で検討する場合、排水性材料(例えば透水性の高い礫質土など)の場合を除き、排水性が比較的低い材料(細粒分を含む砂質土など)に対しては非排水条件下での強度特性の把握が重要となる。非排水条件下でのせん断過程では土の種類、密度、粒度組成等により体積変化(ダイレイタンス)の傾向が異なり、破壊に至る有効応力経路が複雑に変化する。そのため三軸圧縮試験(CU)で得られる全応力モール円の包絡線より得られる(c_{cu} , ϕ_{cu})を用いた全応力解析が試みられることがあるが(本来は初期拘束圧 σ'_{3c} と非排水せん断強さ S_u の係数に整理して得られる(c_{cu} , ϕ_{cu})を適用するのが望ましい方法と考えられる)、全応力円の包絡線より得られる(c_{cu} , ϕ_{cu})には物理的根拠が不明確⁴⁾な点、材料や密度の特性を反映した値が得られ難いなどの理由から円弧すべり解析に適用する強度パラメータ設定において苦慮することが多い。本論文は円弧すべり解析に適用する強度パラメータの設定方法に関する考察に際し、非排水条件下での有効応力経路に関する一般論および円弧すべり解析の特徴等について整理したものである。

2. 非排水条件下でのせん断挙動

土質材料は不連続体の材料であり、せん断過程で体積変化(ダイレイタンス)を生じる。一般に非常にゆるい土の場合にはせん断歪みの増大に伴い体積が収縮し負のダイレイタンスを、非常に密な土の場合には体積が膨張し正のダイレイタンスを生じる。非排水条件下では定体積条件であるため、せん断過程の体積変化に応じた間隙水圧が発生し、図-1に示すように破壊に至る有効応力経路が異なる。なお、代表的なせん断過程での応力-歪み関係の模式図は図-2に示すとおりである。

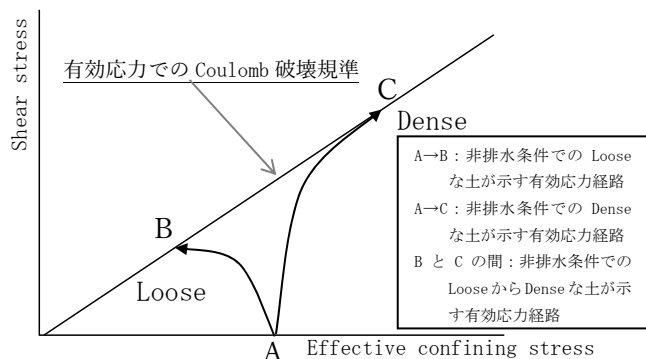


図-1 密度による有効応力経路の模式図

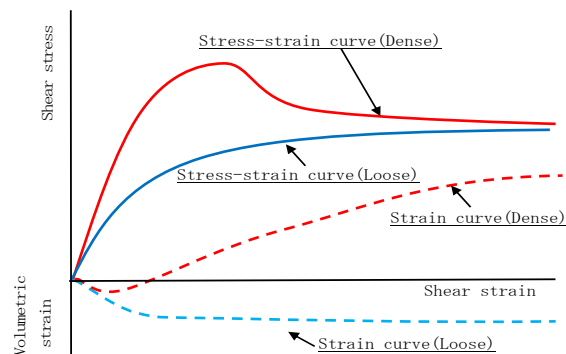


図-2 せん断応力、体積歪み-せん断歪み模式図

非排水条件下では、非常にゆるい土では正の間隙水圧 Δu (>0)が発生するため有効応力は減少し、図-1においてA→Bの有効応力経路を示す。したがって、有効応力のモール円は図-3に示すように全応力円に対して Δu 分左側にシフトする傾向を示す。一方、密な土では負の間隙水圧 Δu (<0)が発生するため有効応力は増大し、図-1においてA→Cの有効応力経路を示す。モールの応力円は Δu にともない大きくなり、破壊時のモール円は非常にゆるい土のそれと比較して大きくなる。そのため c_{cu} は大きい値を示し、 ϕ_{cu} は小さく評価される傾向を示す。なおこの場合、有効応力のモール円は図-4に示すように全応力円に対して右側にシフトする傾向を示す。

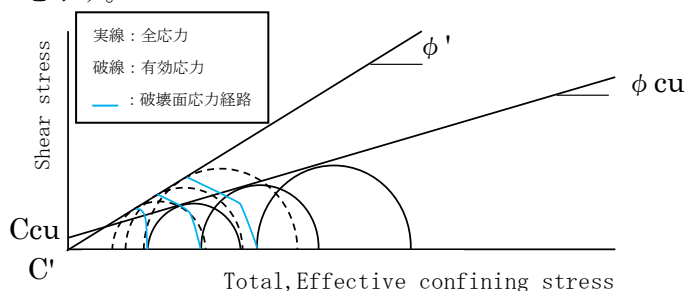


図-3 モールの応力円模式図 (CU条件: 非常にゆるい)

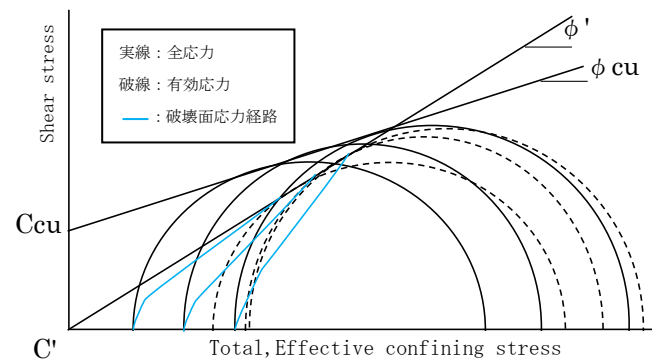


図-4 モールの応力円模式図 (CU条件: 非常に密)

3. 代表的な土の密度と有効応力経路

吉嶺³⁾は、砂を用いた非排水せん断試験結果をもとに、密度の状態に応じた一般的な非排水せん断挙動を図-5のように4種類に分類している。

以下、文献^{2) 3)}での説明を引用する。

密な砂ほどせん断挙動は(a)に近く、有効応力経路は(b)の挙動となる。一方、緩い砂ほどせん断挙動は(g)に近く、有効応力経路は(h)の挙動となる。また、同一の密度に対し初期の有効拘束圧が小さいほど(a), (b)の挙動に近く、それが大きいほど(g), (h)に近い挙動を示す。

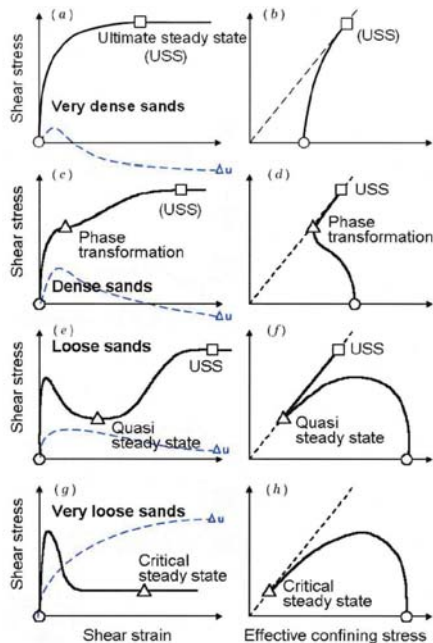


図-5 砂の一般的な非排水せん断挙動²⁾

4. 円弧すべり解析の特徴

円弧すべり解析の計算式の例を図-6に示す。

すべりに抵抗する分子の項に着目すれば、すべり面に作用する粘着力 c とすべり面の長さ l からなる第一項 (cl) 、続いてすべり面に垂直に作用する分割片の重量 $(W-u \cdot b) \cos \alpha$ による抵抗 $(W-u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi$ の第二項で構成されている。第一項は粘着力 c が直接的にすべり抵抗として考慮される一方、第二項はすべり面に作用する重量 $(W-u \cdot b) \cos \alpha$ とすべり面上の摩擦抵抗 $\tan \phi$ との間接的な関係にある。第二項は盛土厚が厚く、すべり面上に大きな上載圧が作用する場合を除いて第一項と比較すると安全率 F_s への影響度は小さい傾向を示すと考えられる。そのため、同解析手法を比較的小規模な盛土に対して用いる場合には、粘着力を大きく設定すると危険側の結果を得る可能性が懸念される。

$$F_s = \frac{\sum [c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi]}{\sum (W \cdot \sin \alpha)} \quad \dots \dots \dots (\text{解 4-1})$$

ここに、 F_s : 安全率

c : 土の粘着力 (kN/m²)

ϕ : 土のせん断抵抗角 (度)

l : 分割片で切られたすべり面の長さ (m)

W : 分割片の全重量 (kN/m), 載荷重を含む。

u : 間隙水圧 (kN/m²)

b : 分割片の幅 (m)

α : 分割片で切られたすべり面の中点とすべり面の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角 (度)

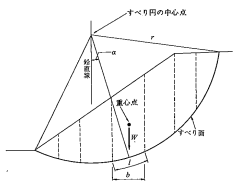


図-6 円弧すべり解析方法の一例¹⁾

5. モール・クーロン破壊規準上のせん断強さ

すべり面上の $(\tau - \sigma)$ 関係として有効応力表示の (c', ϕ') と全応力表示の (c_{cu}, ϕ_{cu}) で得られるせん断強さ τ_f について考察する。全応力法ではせん断強さ τ_f は“せん断開始前の有効応力 $(\sigma'_{3c} = \sigma'_{3f})$ ”の関数であるが、一方、有効応力法では“破壊時の有効応力 (σ'_f) ”の関数となる。特にせん断に伴う間隙水圧の予測は困難であるため、非排水条件下での“破壊時の有効応力”の推定は非常に難しく実用上の課題を有する。ここで、仮に非排水条件下であるにも関わらず有効応力表示の (c', ϕ') を適用した場合に推定されるせん断強さ τ_{f1} と、全応力表示の (c_{cu}, ϕ_{cu}) で推定される非排水せん断強さ τ_{f2} について考察する (図-7)。これより、 (c', ϕ') と (c_{cu}, ϕ_{cu}) の直線交点より低拘束圧側ではせん断に伴う間隙水圧を無視した分だけ非排水せん断強さを過小に、反対に高い側では $\Delta \tau_f$ 分だけ過大に非排水せん断強さを見積もることになる。いずれにしても非排水条件の盛土に対し、せん断に伴う間隙水圧を無視した有効応力解析を実施した場合には過大設計あるいは危険側の設計となると考えられる。なお、図-7に示す (c_{cu}, ϕ_{cu}) は三軸圧縮試験 (CU) での全応力円に対する包絡線から得られるものであり、いわゆる初期拘束圧 σ'_{3c} と非排水せん断強さ S_u の関係より定義される (c_{cu}, ϕ_{cu}) とは異なる点に留意願いたい。また、図-7に示すように、三軸圧縮試験 (CU) の全応力円の包絡線で定義した (c_{cu}, ϕ_{cu}) を用いて非排水せん断強さを推定する場合は本来の S_u より過小に評価することになる。

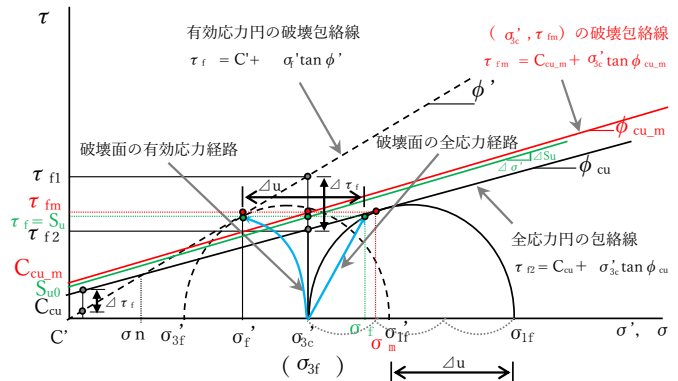


図-7 全応力と有効応力の関係_模式図

以上、本論文では非排水条件下でのせん断挙動に関する一般論の整理を行った。実際の盛土材料を用いた三軸圧縮試験結果の分析および円弧すべり解析による安全率の傾向と考察に関しては別報⁵⁾にて述べる。

《引用・参考文献》

- 1) 日本道路協会, 道路土工 盛土工指針, H22. 4
- 2) 持田ら, 堤体砂質土・礫質土の強度定数設定のための三軸圧縮試験法, 応用地質技術年報 (29), 95-113, 2009
- 3) 吉嶺充俊, さまざまな応力・ひずみ条件における砂の非排水せん断挙動, 第44回地盤工学シンポジウム発表論文集, 145-152
- 4) 三軸圧縮試験基準化委員会: 土の三軸圧縮試験法 土質工学会基準案について, 第20回土質工学会シンポジウム発表論文集, pp. 15-45
- 5) 佐藤、石井, 円弧すべり解析に適用する中間土材料の強度定数設定に関する一考察 (その2), 土木学会東北支部 技術研究発表会 (H29)