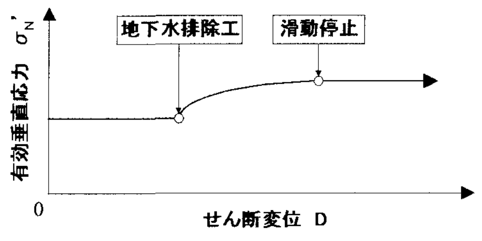
地下水排除工における地すべり粘土の残留強度と強度回復特性

信州大学大学院　学○辰谷明記
信州大学工学部　正　梅崎健夫　正　河村 隆

1. はじめに　地下水排除工の施工に伴う地すべり面上の有効垂直応力の増加（**図－1** 参照）を模擬したリングせん断試験を実施し，地下水排除工を施工した際の泥岩（土粒子比重 G_S=2.686，液性限界 w_L=27.0%，塑性指数 I_P=11.9，粘土含有率 CF=43.5%）再構成試料の残留強度および再圧密による強度回復について考察した．



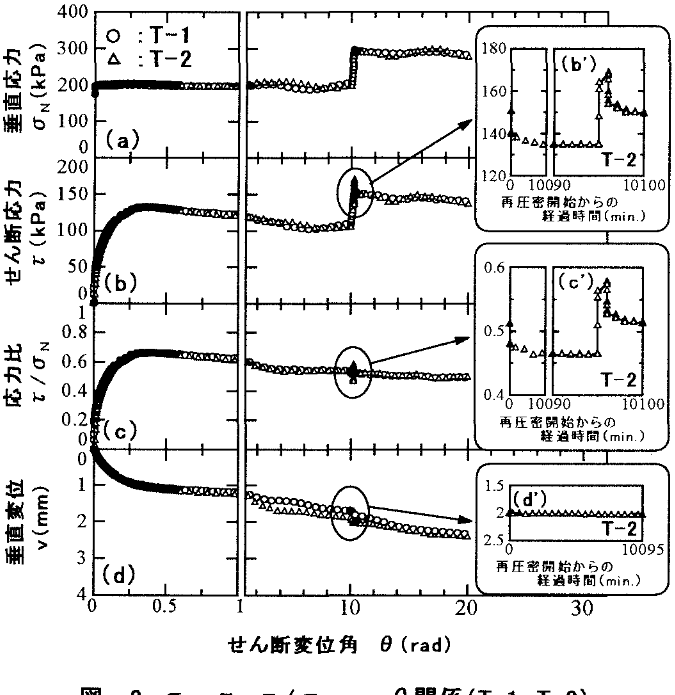
図－1　地下水排除工による有効垂直応力の変化

2. 試料および試験方法　泥岩を細粒化した試料に純水を加えて w_L の 2 倍以上の含水比 75%で練り返し，予圧密応力 σ_V=166.6kPa (=0.85 σ_C, σ_C：圧密応力）で 5 日間一次元的に予圧密した．その後，外径 100mm，内径 60mm，高さ 20mm の環状供試体に成形し，試験装置に設置した．σ_C=196kPa で 120 分間圧密（3t≒75min.）して正規圧密状態にした後，後述の **T-1～T-3** の試験を実施した．ただし，せん断および再圧密中の上下リングの隙間を 0.1mm，せん断変位角速度を 0.0025rad/min.（せん断変位速度 0.1mm/min.に相当），垂直応力の増加速度を $\dot{\sigma}_N$ =1.96kPa/min.とした．試験はせん断中に垂直応力 σ_N を制御しない「簡易定圧試験」であり，σ_N は供試体とリング周面の間に発生する摩擦力（リング周面摩擦力）のために，せん断開始時に設定した垂直応力 σ_N*から変化するため，σ_N をリング周面摩擦力を考慮したせん断面上の平均的な値として評価した．なお，試験装置および試験方法の詳細については参考文献 **1)** および **2)** を参照されたい．

①残留状態において垂直応力を増加させるリングせん断試験（T-1）　供試体を圧密後，σ_N*=196kPa でせん断変位角 θ =10rad までせん断し，その後 σ_N*を 294kPa まで増加させ，σ_N*=294kPa でさらに θ =10rad まで再せん断した．

②残留状態において垂直応力増加後に再圧密を行うリングせん断試験（T-2 および T-3）　供試体を圧密後，σ_N*=196kPa で θ =10rad までせん断し，その後 σ_N*を 294kPa まで増加させる．このときせん断を一時停止し，せん断応力を強制的に除荷することなく σ_C=σ_N*=294kPa で 7 日間再圧密した後，σ_N*=294kPa でさらに θ =10rad まで再せん断した．

3. 試験結果および考察　**図－2(a)～(d')** に，**T-1** および **T-2** における σ_N, τ，σ_N/τ および v と θ の関係をそれぞれ示す（v は圧縮を正とする）．**T-1** では，θ ≦10rad において，τ はピーク強度 τ_p=131.7kPa を示した後漸次減少し，ほぼ一定値に収束する．双曲線近似法[1)]を用いると残留強度は τ_{r1}=104.0kPa となり，τ の収束値にほぼ一致することから残留状態に達していると考えられる．θ =10rad までせん断した後，σ_N*を 294kPa まで増加させると，σ_N*の増加に伴い τ も増加する．θ ≧10rad においてはすでに残留状態に達しており，τ の平均値から求めた残留強度 τ_{r2}=146.7kPa にほぼ収束している．v はせん断開始から漸次増加し，残留状態においても増加を続けるが，これは上下リングの隙間から試料が漏れることによると考えられる．**T-2** においては，**図－2(b')** に示すように，τ は再圧密中に最小強度 τ_{sd}=134.5kPa まで減少した後，再せん断



図－2　σ_N, τ, τ/σ_N, v－θ 関係（T-1, T-2）

開始直後に回復強度 τ_{si}=168.9kPa まで増加した後漸次減少し，双曲線近似法により求めた残留強度 140.2kPa に収束する．v は再圧密中は一定であり，再圧密による圧密は認められない．また，T−3 は T−2 とほぼ同様の挙動を示した．

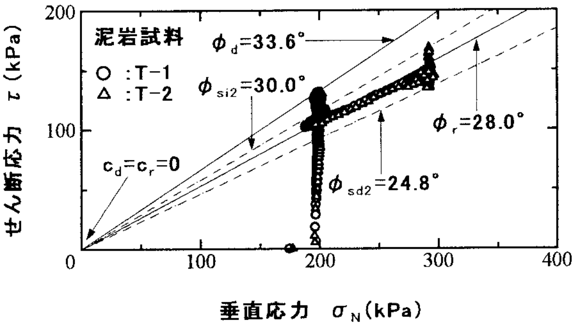
図−3 に T−1 および T−2 における応力径路を示す．T−1 において，τ は $\theta \leqq$10rad においてピーク強度線（ϕ_d=33.6°，c_d=0）に到達した後漸次減少し，残留強度線（ϕ_r=28.0°，c_r=0）上に至る．σ_N* の増加過程においては残留強度線に沿って増加し，その後も残留強度線上に収束している．T−2 においても，τ は再圧密前までは T−1 とほぼ同様の応力径路をたどる．しかし，τ は再圧密中に τ_{r1} から τ_{sd2}=134.5kPa（強度低下時の内部摩擦角 ϕ_{sd2}=24.8°）まで減少し，再せん断開始直後に τ_{si2}=168.9kPa（強度回復時の内部摩擦角 ϕ_{si2}=30.0°）まで増加した後，残留強度線まで減少する．また，T−3 は T−2 とほぼ同じ応力径路をたどり，再圧密中に τ_{sd3}=126.4kPa（ϕ_{sd3}=23.5°）を，再せん断開始直後に τ_{si3}=166.5kPa（ϕ_{si3}=29.6°）を示した．

図−4 に，NSF 粘土 (G_S=2.726, w_L=73.9%, I_P=40.8,CF=91.7%) を用いた同様の試験における応力径路を示す [2]．τ は σ_N 増加後の再圧密の有無によらず，残留状態到達後は常に残留強度線（ϕ_r=24.3°，c_r=0）上にあり，強度回復は認められなかった．

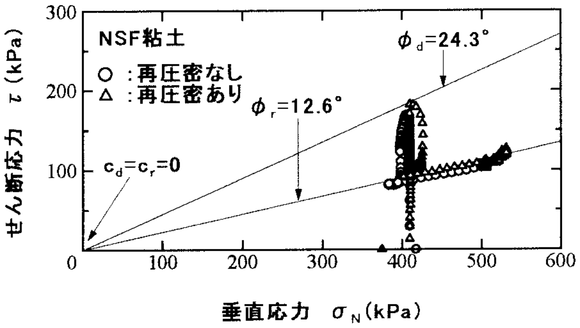
中村 [3] は，数種類の自然粘土を用いて地すべりの滑動・停止・再発を想定したリングせん断試験を行い（**図−5** 参照），強度回復が再せん断前の再圧密によって発現し，鉱物組成および有効垂直応力の大きさに依存することなどを明らかにしている．ただし，中村は再圧密中にせん断荷重を強制的に除荷している．

ここで，τ_p から τ_r への強度低下率 R_d を $\{(\tau_p/\sigma_N) - (\tau_r/\sigma_N)\} / (\tau_p/\sigma_N) \cdot 100$ (%)，τ_r から τ_{si} への強度回復率 R_i を $\{(\tau_{si}/\sigma_N) - (\tau_r/\sigma_N)\} / \{(\tau_p/\sigma_N) - (\tau_r/\sigma_N)\} \cdot 100$ (%) と定義して R_i と R_d の関係を検討した．ただし，再圧密中におけるせん断荷重の除荷の有無，および再圧密前の σ_N 増加の有無は考慮せずに，中村の試験結果との比較を行った．

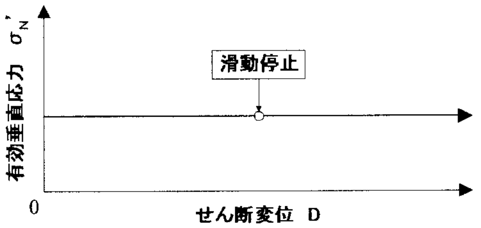
図−6 に各試料の R_i と R_d の関係を示す．T−1〜T−3 の結果は R_d=19.9%に対して R_i が 40%前後である．本試験の結果においても，R_d<20%の場合に強度回復が生じることが認められた．



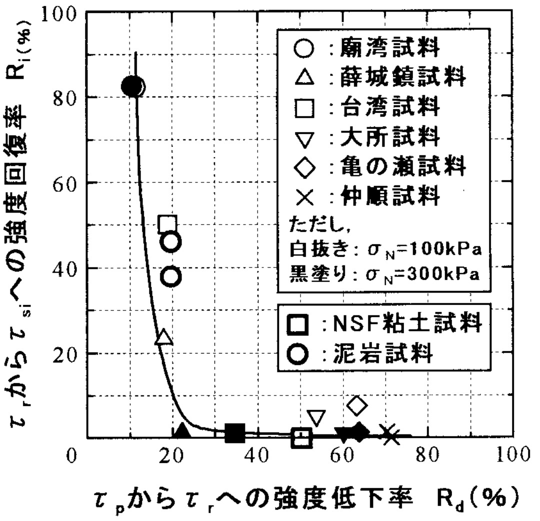
図−3 応力径路(T−1. T−2)



図−4 応力径路(NSF 粘土)



図−5 中村の試験における有効垂直応力の変化



図−6 回復率−低下率関係 [3]

4. まとめ

①地下水排除工の施工に伴うすべり面上の有効垂直応力の変化を模擬したリングせん断試験において，残留状態において垂直応力を増加させると，せん断応力は残留強度線に沿って増加する．②地すべり滑動の停止を模擬した再圧密後のせん断過程において，NSF 粘土に強度回復が認められないのに対し，泥岩には強度回復が認められた．③せん断による強度低下率と再圧密による強度回復率の関係から，Rd<20%の場合に強度回復が生じることが認められた．

【参考文献】 1) 鈴木ら：リングせん断試験における粘土の残留強度とせん断変位の関係，土木学会論文集，No.575/Ⅲ-40，pp.141-158，1997．2) 辰谷ら：地下水排除工における地すべり粘土の残留強度特性(その 1)，第 36 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.307-308，2001．3) 中村真也：地すべり土の残留強度と残留状態からの強度の回復に関する研究，鹿児島大学博士論文，pp.62-102，2001．