ベーンせん断試験における部分排水の影響

福山大学工学部　正員　○西原　晃
丸磯建設　　加島健作
大成ロテック　　北原義隆
松田組　　髙橋　茂

１．はじめに

ベーン試験の問題点の一つとして、ベーン強度が回転速度の影響を受けることが挙げられている。ベーン強度が回転速度の影響を受ける原因としては、

1)非排水強度のせん断速度依存性

2)部分排水の影響

の２つが考えられている。本報告は、2)の部分排水の影響について実験結果をもとに考察したものである。

２．ベーンせん断面における部分排水強度

ベーンは、図-1に示すように、上下端面の水平せん断面と、円筒形側面の鉛直せん断面を有する。これらのせん断面に作用するせん断応力をτ_h、τ_vとすれば、ベーンの回転時のトルクは次のように表される。

$$M=\frac{\pi}{2}HB^2\tau_v+\frac{\pi}{6}B^3\tau_h \qquad (1)$$

さて、図-2は、ベーンの回転にともなうせん断面上の有効応力の変化を模式的に表したものである。ベーンの上下水平面、鉛直側面のいずれにおいても垂直全応力は一定であり、全応力経路はＩ→Ｔのような経路をたどる。一方、ベーン試験が完全な非排水状態で行われるならば、ベーンの回転にともなって過剰間隙水圧が発生するため、有効応力経路はＩ→Ｕのようになる。しかしながら、ベーン周辺では少なからず排水が生じるため、過剰間隙水圧が部分的に消散し、有効応力経路はＩ→Ｐのようになると考えられる。したがって、ベーンの回転速度が速く、過剰間隙水圧の消散が少ないうちはベーン強度は非排水強度に近いが、回転速度が遅くなるにつれて過剰間隙水圧の消散の程度が大きくなると、垂直有効応力の増加とともに強度も大きくなることになる。このような部分排水の影響を表すために、本研究では以下のような解析を行った。

図-2に示すように、せん断開始から時間ｔだけ経過した時の応力比を$(\tau/\sigma')_t$とし、その時の部分排水状態での有効垂直応力をσ'_pとすれば、

$$\sigma'_p=\sigma'_c-u_p \qquad (2)$$

で与えられる。ここに、u_pは時間ｔにおいて残留している過剰間隙水圧であり、次式で求められるものとする。

$$u_p=(1-U_t)\,u_u \qquad (3)$$

ここに、u_uは非排水状態において時間ｔの間に発生した過剰間隙水圧、また、U_tは時間ｔの間の圧密度であり、圧密理論を用いて求めることができる。式(2)、(3)を用いて、σ'_pが求まれば、部分排水時のせん断応力τ_pは次式によって求めることができる。

$$\tau_p=(\tau/\sigma')_t\times\sigma'_p \qquad (4)$$

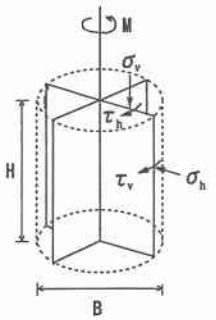

図-1　ベーンのせん断面

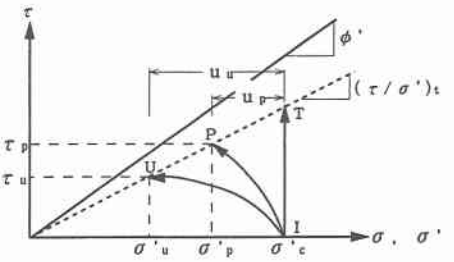

図-2　部分排水時の有効応力経路

3．ベーン強度の解析結果と実験結果の比較

ベーンの回転速度と強度の関係を調べるため、ベーン試験を実施した。また、非排水強度と部分排水強度の関係を調べるために、定体積一面せん断試験と通常の定圧一面せん断試験を行った。実験に用いた試料は、大阪周辺で採取された沖積粘土（w_L＝73.5%、w_P＝29.5%、PI＝44%、ϕ'＝35°）を練り返して再圧密したものである。

図-3は、一面せん断試験における非排水状態と部分排水状態の有効応力経路の解析結果を示したものである。解析では、式(3)におけるu_uの値を求めるに際し、定体積一面せん断試験から得られた、過剰間隙水圧と応力比、せん断速度の関係を利用している。また、圧密度U_tは一次元圧密理論を用いて求めた。圧密係数はc_v＝70 cm²/dayである。

図-4は、一面せん断試験における非排水強度と部分排水強度の実測値ならびに部分排水強度の解析値を破壊までの時間に対してプロットしたものである。せん断速度が速く、破壊までの時間が短いうちは部分排水強度は非排水強度に近いが、破壊までの時間が長くなるにつれて、部分排水強度が増加していくことがわかる。また、解析値は部分排水の影響を過大評価する傾向があるものの、部分排水強度と破壊までの時間の関係をうまく表しているものと考えられる。

図-5は、H＝B＝2cmのベーンの破壊時の回転トルクを破壊時までの時間に対してプロットしたもので、破壊までの時間が長くなるにつれてトルクが増加していく傾向が見られる。

ベーンの回転トルクは式(1)で与えられ、ベーンの上下水平せん断面と側面の鉛直せん断面における部分排水強度τ_h、τ_vは式(2)～(4)を用いて求めることができる。図-5の解析結果は、一面せん断試験の結果を用いて、非排水状態ならびに部分排水状態のベーンの回転トルクを計算したものである。ただし、上下水平面で発生した過剰間隙水圧は鉛直方向に一次元的に消散し、鉛直側面で発生した過剰間隙水圧は水平方向に放射状に消散するとして計算している。また、圧密度を計算するに際し、排水距離が必要であるが、ここでは、ベーンの羽根の端から10～40mmの位置に仮想的な排水面を想定し、その内部では過剰間隙水圧は一様に発生すると仮定した。解析結果は実験結果とほぼ対応しており、ベーン試験における部分排水の影響を定性的に表現できているものの、一面せん断試験の場合と同様に、部分排水の影響を過大評価しており、さらに検討を必要とする。

4．おわりに

部分排水の影響は、ベーンの寸法（排水距離）や地盤の圧密係数によって異なる。今後、今回の解析結果をもとに、さらに考察を進めていく予定である。

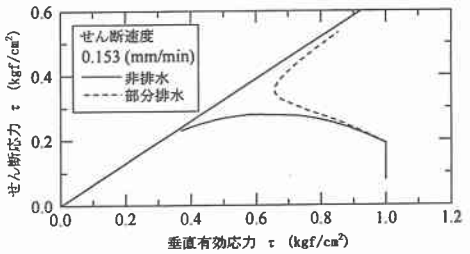

図-3　一面せん断試験における有効応力経路の解析値

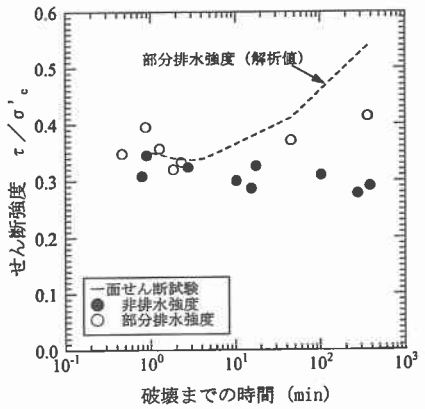

図-4　一面せん断試験における部分排水の影響

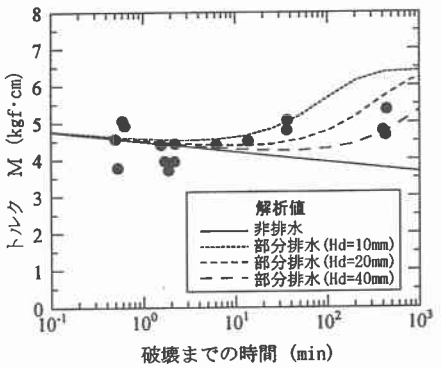

図-5　ベーン試験における部分排水の影響