

# 締固め度の異なる地盤材料のせん断挙動についての弾塑性力学に基づく解釈

名古屋大学 (学) ○津本翔太, (正) 中野正樹 酒井崇之

## 1. 序論

現在の盛土工における締固めの基準は、主に乾燥密度や飽和度、空気間隙率等で規定されている。しかし、現場発生土を盛土材として利用することから、材料の締固めやすさに関係なく適用されることや、室内締固め試験での締固めエネルギーと現場での違いなど、そのままの適用には問題がある。2007年の能登半島地震による能登有料道路の盛土崩壊、2009年の駿河湾地震における牧之原の東名高速の盛土崩壊といった例に見られるように、近年、盛土の大規模崩壊が頻発しており、盛土管理のための締固めや締固められた盛土など土構造物の変形挙動の把握などについて、経験を越えた理論による説明が必要になってきている。本研究では、理論的に解釈する基礎的なデータとして、河川堤防に使用が予定されている土材料を一種取り上げ、室内試験を行い、弾塑性構成モデル SYS Cam-clay model<sup>1)</sup>を用いて、骨格構造の概念に基づいて締固め度の異なる土供試体の力学挙動を解釈する。

## 2. 対象とする試料の物理的性質・締固め特性

本研究で取り上げた土試料は、河川堤防に使用が予定されているものである。そのため、河川堤防に適した土材料が選ばれていて、締固めやすい粒度を有している。図-1がその粒度分布である。粘土から礫までバランス良く配合されている。実際、

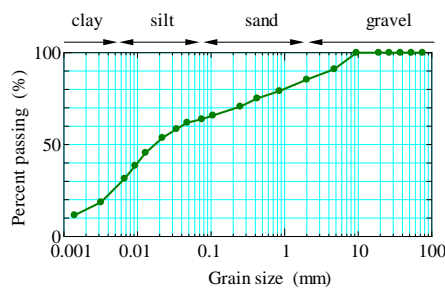


図-1 粒径加積曲線

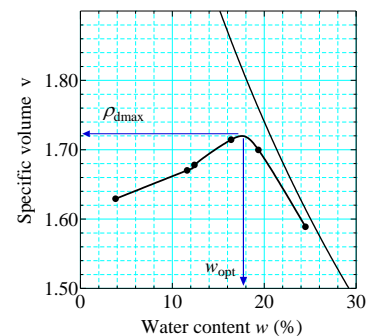


図-2 締固め曲線

A-a 法にて締固め試験を行ったところ、締固め曲線のピークが明瞭にあらわれ、最大乾燥密度も比較的高い値となっている。図-2にその締固め曲線とゼロ空気間隙曲線を示した。また、締固め度  $D_c$  を  $D_c=85\%$ 、 $90\%$ 、 $95\%$ 、 $100\%$ の4種類にした供試体に対して一軸圧縮試験を行った。試験結果は図-3に示す。締固め度の高い供試体ほど、初期剛性の増加とともに一軸圧縮強度も明確に高くなっており、締固めによる「強度」増加が確認された。

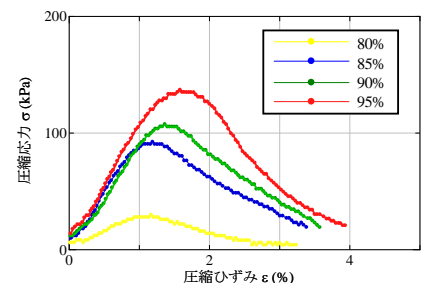


図-3 一軸圧縮試験結果

## 3. 締固め度の異なる盛土材供試体の非排水三軸圧縮試験結果

ここで実施した三軸圧縮試験は、上記の締固め試験で得られた最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  を基準にした締固め度  $D_c$  が  $85\%$ 、 $90\%$ 、 $95\%$ 、 $100\%$ となるような4種類の供試体を、締固めエネルギーを変えることにより作製し、 $60\text{ kPa}$ 、 $100\text{ kPa}$ 、 $150\text{ kPa}$ の拘束圧でそれぞれ24時間等方圧密した後、およそ  $0.021\text{ mm/min}$ の軸ひずみ速度で単調せん断を行った。なお、供試体の寸法は  $\phi 7.5 \times 15\text{ cm}$ としている。この試験結果は、次章で構成式による再現結果と合わせて図示する(図-4)。高い締固め度の供試体ほど、強度は格段に高くなっていることが分かる。また、有効応力パスをみると、締固め度を高めることにより、せん断に伴い平均有効応力  $p'$  が軸差応力  $q$  とともに増加するという密詰め砂に似た挙動が顕著になっていることがわかる。このように、三軸試験の結果にも締固めによる改良効果が明確に観察された。

## 4. 弾塑性構成モデル SYS Cam-Clay Model の概要<sup>1)</sup>

SYS Cam-Clay Model は土の骨格構造を「構造」、「過圧密」、「異方性」の3つで表現し、塑性変形の進展に伴う骨格構造の発展を記述できる弾塑性構成式である。「構造」、「過圧密」の概念は図-4に示す通りである。「構造」を有している土とは、同じ応力下において正規圧密状態よりも大きい間隙比であるような土のこ

とを指す。また、「過圧密」土とは、ある応力状態から弾性除荷を受けた状態の土である。SYS Cam-Clay Model では、骨格構造の発展速さの違いによって、典型的な粘土と砂の力学挙動の違いを同一理論で説明できる。また、粘土や砂の間に稠密に存在する中間土にも適用できるモデルである。

#### 4. 弾塑性構成モデルによる力学試験結果の再現と解釈

ここでは、3章の締固め度の異なる力学試験結果を弾塑性構成モデルによって再現することを試みる。全て同じ材料であることから、締固め度に対して同じ材料定数(弾塑性パラメータと発展則パラメータ)を用いた。したがって締固め度の違いは、比体積や過圧密比等の初期値によって表現する。通常であれば、最初に構造のない練り返し試料の標準圧密試験結果から弾塑性パラメータを決定するのだが、締固め材であることから練り返し試料の作製は困難である。そのため、締固め度の違う土材料の三軸圧縮試験に対し、全てのパラメータを試行錯誤的に決定した。パラメータを表-1、表-2に示す。その際の計算結果

(細線) および用いた実験結果(太線)を図-4に示す。紙面の都合上、拘束圧が100kPaのものだけを記述した。計算結果は実験結果をよく表現している。また表1より、締固め度の高い土ほど、構造が低位で過圧密比が高いことがわかった。すなわち、締固め度の上昇を「過圧密の蓄積」および「構造の劣化」として表現できる。また、低い締固め度のもので構造の値は総じて小さかった。さらに、今回の三軸圧縮試験は、最高でも150kPaという低拘束圧であるため、過圧密が解消する様子をうまく捉えることができなかった。パラメータにより明確な根拠を持たせるため、高拘束圧での三軸圧縮試験も行いたい。

#### 5. 結論

今回用いた試料は、締固め試験や各種力学試験等の結果から、締固めによる改良効果が明確であり、締固めには適した試料である。また、この試料の力学試験結果をSYS Cam-Clay Modelによって再現したところ、締固め試料は構造が総じて低位であり、締固め度の上昇を「構造の劣化」および「過圧密の蓄積」として記述できることがわかった。今後は他の盛土材料についても同様の試験および解析を実施し、締固めやすい材料とはどのような骨格構造の働きを有するのかを調べてゆく。

#### 参考文献

- Asaoka et al. (2002): "An elasto-plastic description of two distinct volume change...", S&F, 42(5), 47-57.
- 中野他(2010):締固め特性の異なる2種類の土材料における力学挙動の比較, 第45回地盤工学研究発表会

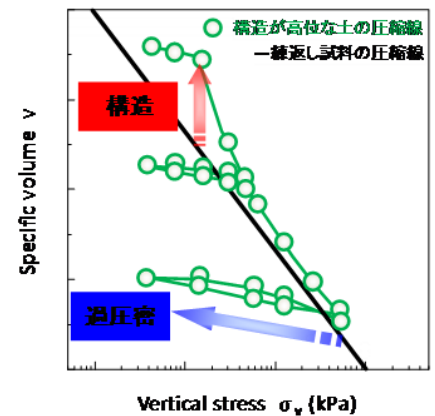


図-4 「構造」, 「過圧密」の概念図

表-1 初期値

締固め度(%)	85%	90%	95%	100%
初期比体積 $v_0$	1.79	1.71	1.67	1.57
初期構造の程度 $1/R^*_0$	1.58	1.48	1.45	1.1
初期過圧密比 $1/R_0$	5.89	16.7	23.4	53.3
初期異方性の程度 $\zeta_0$	0	0	0.4	0.4

表-2 材料定数

<弾塑性パラメータ>			<発展則パラメータ>		
圧縮指数	$\lambda$	0.085	正規圧密土化指数	$m$	0.7
膨潤指数	$\kappa$	0.010	構造劣化指数	$a$	0.3
限界状態定数	$M$	1.43		$b$	1.000
NCLの切片	$N$	1.63		$c$	1.000
ポアソン比	$\nu$	0.3		$c_s$	0.15
			回転硬化指数	$b_r$	1.0
			回転硬化限界定数	$m_b$	0.2

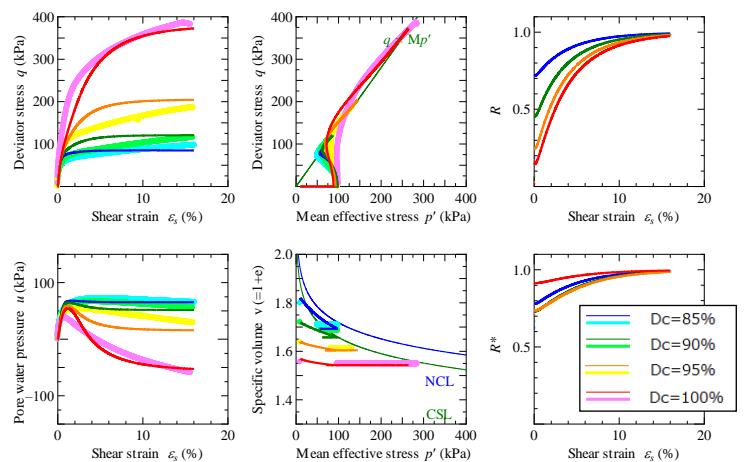


図-5 SYS Cam-Clay Modelによる力学挙動の再現