

締め固めた土のベーンコーン剪断試験と三軸圧縮試験との強度比較

サンコーコンサルタント株式会社 ○向井 理史, 内田 昇一, 片田 良之

1. はじめに

ベーンコーン剪断試験は、土層強度検査棒の羽根つきコーンを先端に使用して原位置での強度定数を簡便に求めることのできる試験である。試験の整理には経験式による経験式法と、原位置でのベーンコーン剪断試験結果と力学試験結果との相関式を作成して強度定数を求める相関式法の2つが佐々木（2010）¹⁾により提唱されているが、経験式法はデータの蓄積に乏しく暫定的であるため、基本的に相関式法で強度定数を求めることが推奨されているのが現状である。しかし、室内試験を必要としない経験式法は費用面や作業量から実用化が望まれており、これまで矢島ほか（2019）²⁾ などによる整理方法の見直し、伊藤（2017）³⁾ や佐々木・鈴木（2018）⁴⁾ によるベーンコーン剪断試験と室内試験との比較が報告されている。伊藤（2017）³⁾、佐々木・鈴木（2018）⁴⁾ は主に砂質土について比較検討し、経験式法の適用にはさらなるデータの蓄積が必要と述べている。今回、粗粒分含有率を変化させた粘性土を対象に力学特性を比較検討し、経験式法の粘性土地盤への適用性について評価した。

2. 試料

(1) 原土

原土は埼玉県比企郡嵐山町内の田園で採取した。室内土質試験の結果、原土は粗粒分含有率10%程度の砂まじり粘土であった（表-1の不攪乱）。

(2) 調整試料

上記の粗粒分含有率10%を含む原土(Case-1)を基準に、市販の5号珪砂を用いて粗粒分含有率を約20%, 30%, 40%にそれぞれ調整した粘性土（Case-2, Case-3, Case-4）を作成した。それぞれの土質性状は表-1に示すとおりである。

表-1 試料の土質性状一覧

		不攪乱	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
一般	湿潤密度 (g/cm ³)	1.688	1.813	1.866	1.904	1.947
	乾燥密度 (g/cm ³)	1.267	1.359	1.436	1.507	1.582
	土粒子密度 (g/cm ³)	2.676	2.648	2.652	2.654	2.646
	自然含水比 (%)	33.2	32.4	29.5	25.5	21.8
	間隙比	1.115	0.948	0.847	0.762	0.672
	飽和度	80.2	93.3	93.9	91.9	90.6
	間隙率	52.72	48.67	45.86	43.25	40.19
	空気間隙率 (%)	10.59	4.65	3.49	4.79	5.72
	礫分 (%)	0	0	0.3	0.1	0
粒度	砂分 (%)	11.7	10.7	21.3	29.1	42.1
	細粒分含有率 (%)	88.3	89.3	78.4	70.8	57.9
	粗粒分含有率 (%)	11.7	10.7	21.6	29.2	42.1
	液性限界 (%)	54.5	56.8	54.9	52.8	49.9
コンシステンシー	塑性限界 (%)	22.8	23.9	23.4	22.6	22
	塑性指数	31.7	32.9	31.5	30.2	27.9
	液性指数	0.33	0.26	0.19	0.10	-0.01
	コンシステンシー指数	0.67	0.74	0.81	0.90	1.01

3. ベーンコーン剪断試験

(1) 供試体作成方法

今回は異なる土質性状間での力学特性の比較を目的とするため、試験は締め固めエネルギーを統一して作成した供試体で実施した。つまり、締め固め試験用10cm モーランドを使用して2.5kg ランマーで25回/1層を3層に分けて突き固めた時 (Ec=550kJ/m³) の密度とした。

ベーンコーン剪断試験用の供試体は二つ割れモーランド（直径70mm, 高さ150mm）に試料を投入し、ジャッキを用いて供試体の上下方向から圧入して作成した。繰り返しによる強度低下の影響を避けるため、供試体に用いる試料の繰り返し使用は避けることとした。

(2) 試験方法および整理方法

ベーンコーン剪断試験は押し込み荷重と回転トルクから剪断強度 (c, φ) を求める試験である。具体的な測定方法等や留意点については佐々木（2010）¹⁾ で詳述されているため、ここでは省略する。

試験は二つ割れモーランドの横方向を固定し、供試体中央部を深さ70mm 程度コアドリルでくり抜いた位置で行った。コーンとロッドの質量を除いた鉛直荷重は0, 25, 50, 75, 100N とした。

整理は佐々木（2010）¹⁾ の経験式（以下、土研式）、矢島ほか（2019）²⁾ の回帰式（以下、矢島式）、岸本ほか（2022）⁵⁾ の式（以下、岸本式）の3つの換算式を使用した。試験回数については地盤の不均質性から同一地点で4回程度と報告されている。Case-1で4回実施したところ、試験結果に差異は認められなかったため、調整試料は均質に混合されているものと判断し、残りは各1回の試験とした。

(3) 試験結果

試料採取地点での試験結果を表-2に示す。3つの換算式全て1回目の剪断抵抗角は他と比較して高い値となった。

表-2 原位置でのベーンコーン剪断試験結果一覧

	土研式 ¹⁾		矢島式 ²⁾		岸本式 ⁵⁾	
	C _{dk} ' (kN/m ²)	φ _{dk} ' (°)	C _{dk} ' (kN/m ²)	φ _{dk} ' (°)	C (kN/m ²)	φ (°)
1回目	7.6	28.0	10.3	12.3	10.3	17.9
2回目	10.4	15.9	14.1	6.7	14.1	13.3
3回目	9.7	14.8	13.1	6.2	13.1	12.8
4回目	7.3	16.9	9.9	7.1	9.9	13.7
平均値	8.8	18.9	11.9	8.1	11.9	14.4

Case-1から Case-4のベーンコーン貫入試験結果を表-3に示す。粗粒分含有率が増加するに従い剪断応力、粘着力は増加する傾向が見られた（図-1, 図-2）。

表-3 調整試料のベーンコーン剪断試験結果一覧

	土研式 ¹⁾		矢島式 ²⁾		岸本式 ⁵⁾	
	C_{dk} (kN/m ²)	ϕ_{dk} (°)	C_{dk} (kN/m ²)	ϕ_{dk} (°)	C (kN/m ²)	ϕ (°)
Case-1	16.5	26.6	22.3	11.6	22.3	17.4
Case-2	21.1	21.1	28.5	9.0	28.5	17.7
Case-3	26.7	21.5	36.1	9.2	36.1	15.5
Case-4	29.9	40.4	40.5	19.2	40.5	22.2

4. 三軸圧縮試験

(1) 供試体作成方法

供試体は、直径50mm、高さ100mmの二つ割れモールドを使用して Case-1 から Case-4 までそれぞれ4供試体ずつ作成した。

(2) 試験条件

試験は圧密非排水（CUbar）の条件とし、有効拘束圧は表層部で実施するベーンコーン剪断試験との比較を検討するため 20, 40, 60, 80kN/m² とした。

(3) 試験結果

試験の結果、表-4に示すとりの全応力と有効応力が得られた。

表-4 三軸圧縮試験結果一覧

	全応力		有効応力	
	C_{cu} (kN/m ²)	ϕ_{cu} (°)	C'_{cu} (kN/m ²)	ϕ'_{cu} (°)
不攪乱	10.8	21.9	4.0	35.4
Case-1	27.4	24.2	9.2	33.4
Case-2	37.1	22.9	6.6	35.6
Case-3	45.4	24.2	1.9	39.2
Case-4	71.1	25.2	5.5	36.7

5. 考察

(1) 三軸圧縮試験の強度

今回、粘性土の範囲で粗粒分含有率を任意に変えて試験を実施した。その結果、粗粒分含有率にかかわらず有効剪断応力に優位な差は見られず（図-1；グラフは $\sigma = 20$ kN/m²としたときの応力）、各ケース間での剪断応力の差は粘着力の差であり（図-1、図-2、表-4）、一般的に粘性土で言われていることと整合的であった。

Case-4ではコンシステンシー指数 I_c は1を超え、液性指数 I_L は0未満であることから、粗粒分含有率が40%程度以上では締め固まりやすい特性を持つと言える。図-2のグラフにおいて、全応力のトレンドは粗粒分含有率30～40間で傾きが変わると想定されることから、粗粒分含有率35%で試験を追加し検証することが必要である。

(2) ベーンコーン剪断試験と三軸圧縮試験との強度比較

現段階では、ベーンコーン剪断試験において経験式で求めた剪断応力と三軸圧縮試験でのそれは整合性が見られず、粗粒分含有率の増加とともに両者間の差は大きくなる傾向が認められた（図-1）。従って、今回使用した3つの換算式は室内試験を併用せずに剪断力を求められるため実務で用いられることが多いが、佐々木（2010）¹⁾や

矢島ほか（2019）²⁾ が指摘しているように、室内試験結果と対応させた相関式を作成することが望ましい結果となった。

また、粘性土を対象にしたベーンコーン剪断試験による経験式での整理は、有効応力ではなく全応力を求めているものと考えられる。

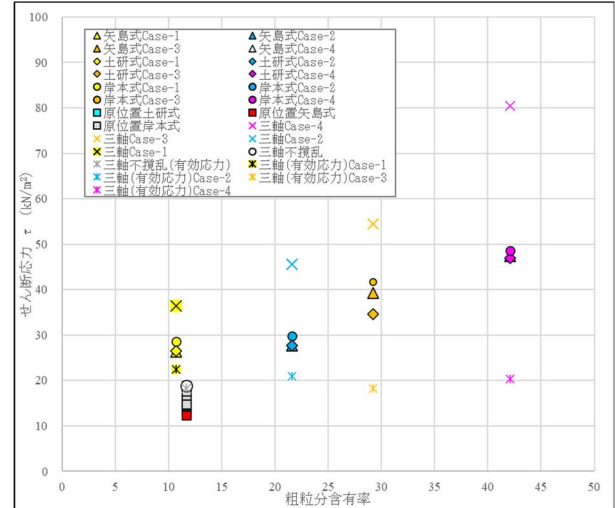


図-1 粗粒分含有率と剪断応力の関係

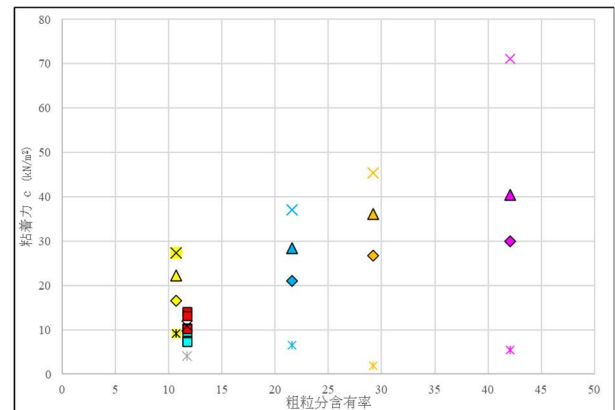


図-2 粗粒分含有率と粘着力の関係

《引用・参考文献》

- 1) 佐々木靖人（2010）：土木研究資料「土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル（案）」、土木研究所資料 第4176号，p.40.
- 2) 矢島良紀，山本定雄，金井哲男，法水哲，浅井健一（2019）：土層強度検査棒による地盤せん断強度評価に関する考察，日本応用地質学会研究発表講演要旨，239-240.
- 3) 伊藤秀一（2017）：土層強度検査棒と室内土質試験との比較例，北海道土質試験協同組合広報誌，363,5-9.
- 4) 佐々木貴，鈴木喬之（2018）：火山灰質土を対象とした土層強度検査棒と室内土質試験の比較，全地連「技術フォーラム2018」.
- 5) 岸本秀真，中尾真，梗田茂樹，高橋章（2022）：山岳地域における土層強度検査棒の適用性に関する検討（その2），電力土木，422，37-40.