

# 基于改性直剪试验的裂隙土抗剪强度参数相关性

Rosa Irdiana\* Indrasurya B. Mochtar Noor E. Mochtar

泗水理工大学土木工程系, ITS 校园, 苏库里洛, 泗水 60111, 印度尼西亚

**【摘要】**：裂隙土是一种关于由斜坡表面的裂缝而导致滑坡的理论。目前已经有一些针对裂隙土的剪切参数的研究。其中，最新研究是关于软硬稠度条件下裂隙土的物理和抗剪强度参数的相关性。该研究中的土壤条件不太能代表非常硬的斜坡土壤稠度。因此，对中等至极高稠度进行了进一步研究。在相同的总压力和不同的水压下，使用改进的直剪试验对裂隙土壤试样进行试验。结果表明，水压对裂隙土没有显著影响。因此，对其他裂隙土样进行了无水压直剪试验，以了解土的剪切参数相关性。在裂隙土壤中，粘聚力丧失，摩擦角不受土壤孔隙比的影响。中等至非常高稠度下裂隙土壤剪切参数相关性的经验公式适用于  $LL < 50\%$  的情况； $\Phi = 22^\circ$  且  $LL \geq 50\%$ ， $\phi = -0.0024 LL^2 + 0.2062 LL + 17.514$ 。

**【关键词】**：裂隙土；改性直剪；抗剪强度参数

## 1 引言

现场滑坡事实表明，滑坡发生在高强度/强降雨的雨季。许多研究也表明，强降雨与边坡破坏直接相关<sup>[1-3]</sup>。此外，长期稳定的斜坡也会发生滑坡。滑坡也可能发生在由岩石或硬粘土构成的斜坡上，这些岩石或粘土具有非常安全的稳定性。尽管土壤类型、坡度和降雨强度相对相同，但滑坡也会发生在斜坡上，通常不会发生在斜坡的侧面<sup>[4]</sup>。从逻辑上和理论上讲，在相同的条件下，斜坡应该沿着其侧面具有相同的滑动。

根据文献<sup>[5]</sup>，由于土壤收缩、过去的土壤运动、强烈的地面运动(地震引起的振动)、厚淤泥-粘土土层上存在薄沙层(图1)，以及植物根系风化，导致土壤表面出现裂缝，从而发生滑坡。裂缝可能是从土壤形成以来就已经出现<sup>[4,6]</sup>。下雨时，水会进入裂缝，以相对缓慢的速度从裂缝中流出(消散)。水可能携带细土部分，而粗土部分(细砂)则留在裂隙面内。这导致裂缝中有一层薄沙，使其表现出沙子的行为<sup>[7]</sup>。

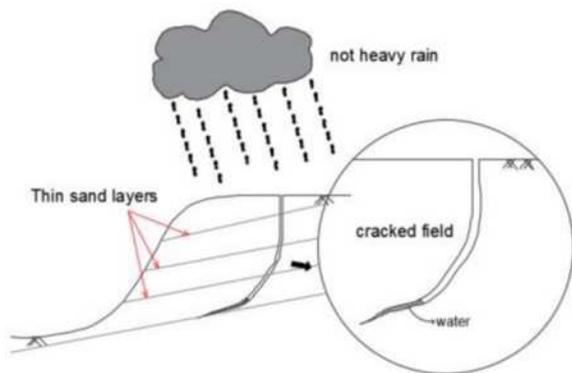


图1 薄沙层和裂缝未完全充满水<sup>[5]</sup>

当雨势不大时，进入裂缝的水量相对较小，且容易消散，因此裂缝区域不会完全被水填满(图1)。而在暴雨期间，进入裂缝的水量相对较大，裂缝完全被水填满(图2)，导致孔隙水

压力增大；如果裂纹扩展，这种情况会导致滑动。

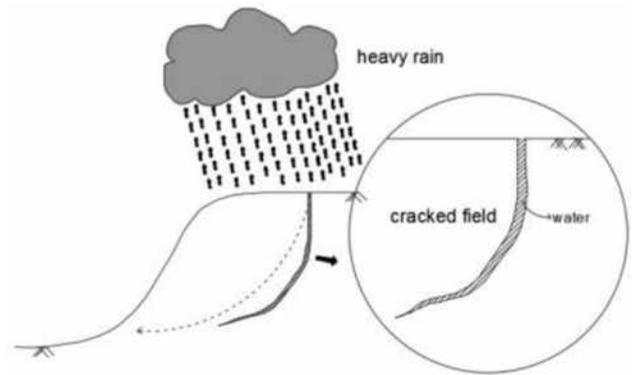


图2 暴雨时裂缝完全被水填满<sup>[5]</sup>

裂纹扩展是一个时间函数，岩石或植物根部可以阻止裂纹的扩展(图3)。引起滑坡的裂纹扩展取决于裂纹方向，如图4所示<sup>[8]</sup>。在暴雨期间，与滑坡潜在区域相同方向的裂纹扩展可能诱发滑坡。

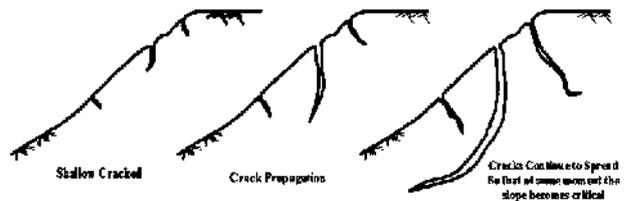


图3 裂纹扩展机制

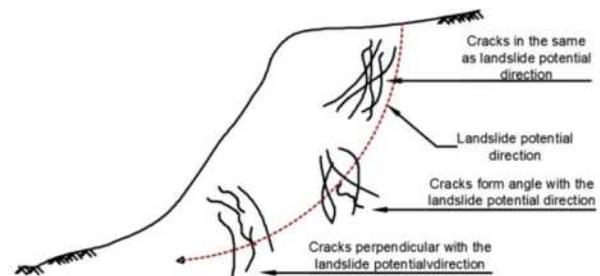


图4 潜在滑坡上的裂缝方向和模式<sup>[8]</sup>

为了发展这一理论，人们已经进行了多项研究，包括一项关于裂隙土参数的研究。该研究通过增加一个水输入系统，使用改进的直剪切装置在实验室中开展了裂隙土测试；还对剪切盒进行了改良，使水压可以按照图 5 所示的现场条件施加给试验对象<sup>[9]</sup>。除此之外，还有学者对裂隙土与粘聚力的关系以及高塑性粘土(Lok Buntar 粘土)的剪切角进行了研究<sup>[10]</sup>。

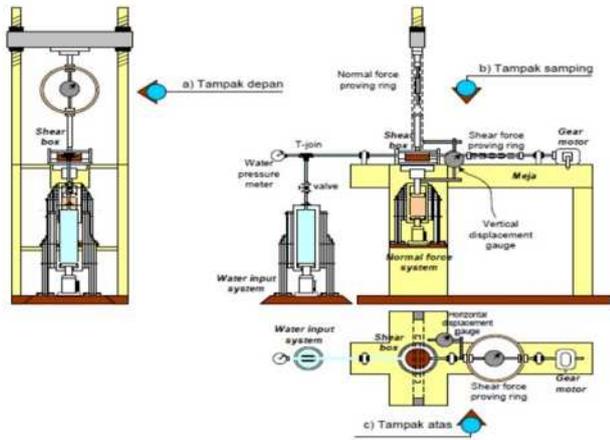


图 5 改性直剪试验装置示意图<sup>[9]</sup>

从该研究中发现，当 100% 裂缝出现且土壤仅具有摩擦角值时，土壤粘聚力会丧失。然而，用改进的直剪仪进行的研究需要很长时间，而且费用昂贵。因此，学者<sup>[11]</sup>研究寻找另一种方法，在不进行实验室直接测试的情况下，获得裂隙土壤中土壤物理参数与粘聚力和摩擦角之间的关系。该研究针对软、中、高稠度土壤进行，其中获得了初始土壤粘聚力和孔隙比之间的经验公式。此外，还得出了裂隙土的塑性指数、孔隙比与摩擦角之间的经验关系。然而，这项研究的结果并不代表现场条件，因为斜坡通常由中等至非常硬的土壤形成。

基于上述研究结果，需要进行额外的研究，以确定土壤物理参数和破裂土壤内摩擦角值之间的经验公式，以根据现场土壤条件确定中等至非常高稠度的细土。

## 2 研究意义

本研究旨在确定中等至非常高稠度细土的土壤物理参数和裂隙土壤内摩擦角之间的经验公式，因此不需要直接进行实验室试验。

## 3 方法

本研究使用扰动土样测试各种塑性(液限)和含水量变化。含水量是从改进的普氏测验中获得的最佳含水量。将土壤和水的混合物压实，制成设计稠度(中等至非常硬)的土壤样品，使用文献中的方法估算  $C_u$  值<sup>[12]</sup>，该值由 UCT 试验确定。此后，制作新的试样进行改良直剪和直剪试验。

为了模拟改进的直剪和直剪试验中试样的开裂状态，将试样切成两半。在进行改进的直剪试验之前，对每个裂隙样品施加总压力相同的不同水压。测试对象随不同水压的变化以表 1 中的矩阵形式呈现。

表 1 裂隙土壤样本基质随水压的变化

稠度/塑性	中等	硬	非常硬	
低	水压:			
	0.0 kg/cm <sup>2</sup>	1 试样		
	0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1 试样		
	1.0 kg/cm <sup>2</sup>	1 试样		
	注: 总压力相同			
中等	无	水压:		
		0.0 kg/cm <sup>2</sup>	1 试样	
		0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1 试样	
		1.0 kg/cm <sup>2</sup>	1 试样	
		注: 总压力相同		
高	无	无	水压:	
			0.0 kg/cm <sup>2</sup>	1 试样
			0.5 kg/cm <sup>2</sup>	1 试样
			1.0 kg/cm <sup>2</sup>	1 试样
			注: 总压力相同	

注：如果结果不规则，可以添加测试对象；如果水压不能影响剪切强度，将在水压为 0.0 kg/cm<sup>2</sup> 条件下进行测试。

进行试验以确定水压力对裂隙土壤抗剪强度的影响。如果裂隙土壤中的水压对土壤抗剪强度没有影响，则测试对象需进行附加测试，水压为 0 kg/cm<sup>2</sup>，如表 2 所示。无水压的改性直剪试验与直剪试验大体相同。

表 2 水压为 0 kg/cm<sup>2</sup> 下裂隙土样基质

稠度/可塑性	中等	硬	非常硬
低	3 种不同正应力的 3 个试样	3 种不同正应力的 3 个试样	3 种不同正应力的 3 个试样
中等	3 种不同正应力的 3 个试样	3 种不同正应力的 3 个试样	3 种不同正应力的 3 个试样
高	3 种不同正应力的 3 个试样	3 种不同正应力的 3 个试样	3 种不同正应力的 3 个试样

注：每个正应力测试 3 次

裂隙土壤的物理和剪切参数值结果由此获得。然后对这些参数进行分析,以获得裂隙土壤的物理参数和剪切参数之间的经验相关性。

## 4 分析和讨论

### 4.1 研究的土壤参数

本研究中研究的土壤样品取自三个不同的位置,其液限(LL)值如下:低土30%、中土60%和高土90%。土壤样品的分类如表3所示。样品的最佳水分含量(wc最佳值)由改进的普氏测验确定;每个样品的最佳wc值分别为12.1%(Gresik土)、27.0%(Cicadas土)和26.0%(Robotics土)。

表3 初始土壤分类

参数	Gresik 土	Cicadas 土	Robotic 土
液体极限(LL)	30%	62%	92%
塑性极限(PL)	22%	45%	53%
塑性指数(PI)	9%	17%	39%
沙	13.20%	2.34%	1.10%
淤泥	36.75%	17.12%	15.94%
黏土	31.96%	80.33%	82.96%
USCS	CL	MH	MH
AASHTO	A-4	A-7-5	A-7-5

使用每个样品的最佳wc制作一个新样品,使用UCT试验确定Cu值,以获得不同稠度(中等、硬和非常硬)的土壤样品,如表4。因此,每种类型的土壤(低、中和高LL)有3个不同稠度的样品。

表4 土壤密度利用

LL 30% (Gresik)			
稠度	Cu (kg/m <sup>2</sup> )	γ (g/cm <sup>3</sup> )	γ 利用(g/cm <sup>3</sup> )
中等	0.27	1.64	1.64
硬	0.52	1.76	1.76
非常硬	1.01	1.89	1.89
LL 60% (Cicadas)			
稠度	Cu (kg/m <sup>2</sup> )	γ (g/cm <sup>3</sup> )	γ 利用(g/cm <sup>3</sup> )
中等	0.26	1.29	1.30
硬	0.52	1.37	1.37
非常硬	1.03	1.51	1.52
LL 90% (Robotika)			
稠度	Cu (kg/m <sup>2</sup> )	γ (g/cm <sup>3</sup> )	γ 利用(g/cm <sup>3</sup> )
中等	0.26	1.25	1.25
硬	0.53	1.3415	1.35
非常硬	1.06	1.496	1.50

此外,通过直剪试验和改性直剪试验确定了新试样的物理性质和土体抗剪参数。不同稠度(中等、硬和非常硬)每种

土壤类型(低、中和高LL)的孔隙比如表5所示。从表5中得出的结果可知,土壤的稠度越高,孔隙比的值就越小。这是因为土壤的孔隙较小,土壤稠度较高。

表5 各液限(LL)空隙比和稠度

塑性	稠度	孔隙比 (e)
LL 30%	中等	0.76
	硬	0.64
	非常硬	0.54
LL 60%	中等	1.42
	硬	1.37
	非常硬	1.18
LL 90%	中等	1.49
	硬	1.34
	非常硬	1.08

### 4.2 水压对裂隙土抗剪强度的影响

为了确定水压力对裂隙土壤抗剪强度的影响,仅针对一些样本进行了改性直剪试验,采用相同的总压力( $\sigma = \sigma' + u$ )和不同的水压力( $u$ )( $u = 0.0 \text{ kg/cm}^2, 0.5 \text{ kg/cm}^2, 1.0 \text{ kg/cm}^2$ )。

试验结果以图6、图7和图8所示的中稠度低LL土样、高稠度中LL土样和极高稠度高LL土样的水平位移和剪应力之间的关系形式呈现。

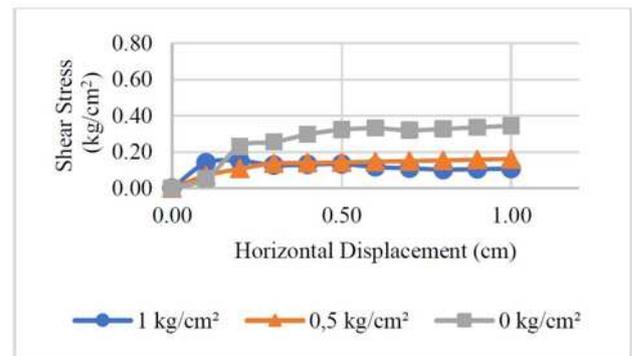


图6 低塑性中等稠度土壤的改性直剪试验结果

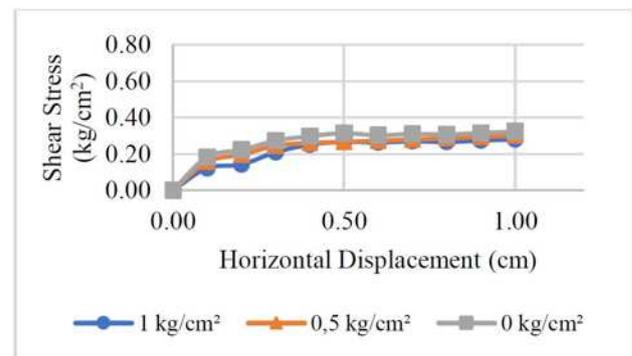


图7 中等塑性高稠度土壤的改性直剪试验结果

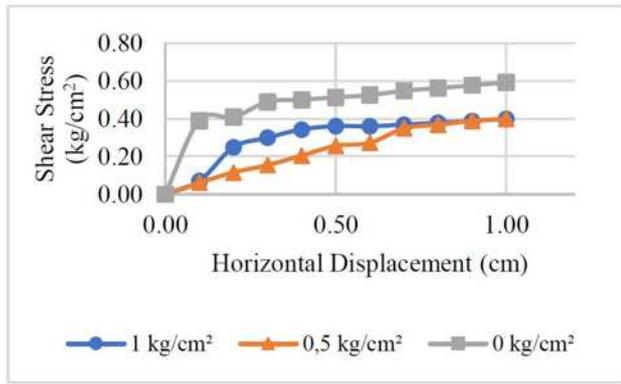


图 8 高塑性和极高稠度土壤的改性直剪试验结果

图中的结果表明，裂隙土样的最大剪应力值出现在水压 = 0 kg/cm<sup>2</sup> 时。然而，剪应力不受裂隙中水压的影响，特别是对于中等液限和高稠度的土样。这些结果与<sup>[10][11]</sup>的研究结果是一致的。因此，可以得出结论，水压力不影响土壤的抗剪强度。为此，在没有水压(0.0 kg/cm<sup>2</sup>)的情况下，对裂缝进行了进一步的直剪试验。

### 4.3 裂隙土物理参数与剪切参数的关系

基于表 2 的 LL 值和稠度变化的土壤样品在裂缝中水压 = 0 kg/cm<sup>2</sup> 的直剪试验结果以水平位移和剪切应力之间的关系形式呈现。

将残余剪应力值与正应力值一起绘制，以获得土壤抗剪强度(粘聚力和摩擦角)，如表 6。从表 6 中的剪切试验结果可知，粘聚力值非常小(接近于 0)。这意味着，在已经开裂的土壤中，粘聚力值将会损失，因为该值非常小，可以忽略不计(C = 0)。这些发现与之前的研究一致<sup>[5,6]</sup>。

表 6 裂隙土的物理和剪切参数

LL (%)	稠度	孔隙比 (e)	裂隙土 1		裂隙土 2		裂隙土 3	
			C (kg/cm <sup>2</sup> )	Φ (°)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	Φ (°)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	Φ (°)
30	中等	0.76	0.1	21.66	0.02	21.34	0.05	21.14
30	硬	0.64	0.05	21.81	0.06	22.08	0.04	20.54
30	非常硬	0.54	0.08	22.32	0.08	21.17	0.08	21.51
60	中等	1.42	0.01	20.79	0.02	20.51	0.00	20.64
60	硬	1.37	0.01	20.97	0.02	21.24	0.01	21.65
60	非常硬	1.18	0.02	22.07	0.03	21.29	0.03	20.89
90	中等	1.49	0.03	15.63	0.03	15.17	0.03	17.06
90	硬	1.34	0.04	15.64	0.04	16.10	0.03	17.47
90	非常硬	1.08	0.06	16.48	0.04	16.22	0.04	17.29

图 9 给出了裂隙土样的液限和摩擦角之间的关系，孔隙比和摩擦角之间的关系如图 10 所示。从图 9 中可以看出，LL 的增加伴随着土壤摩擦角的减小。这表明，随着土壤越来越细，摩擦角的值将会降低。图 10 表明，裂隙土壤中孔隙比的值不影响摩擦角的值。这适用于<sup>[13]</sup>，该文献指出粘聚力导数的主要变量是孔隙比；如果失去粘聚力，孔隙比不会影响摩擦角。所以可以得出的经验关联就是液限和摩擦角的关系。

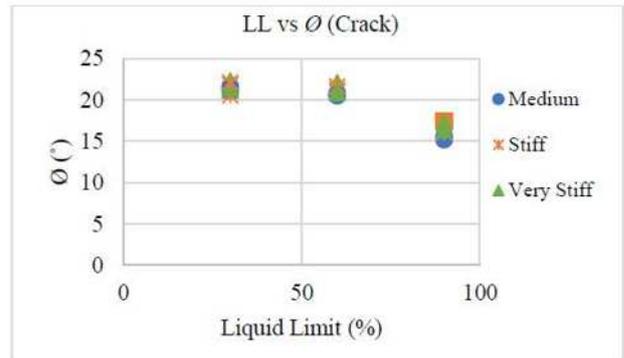


图 9 液限(LL)和摩擦角(Φ)之间的关系

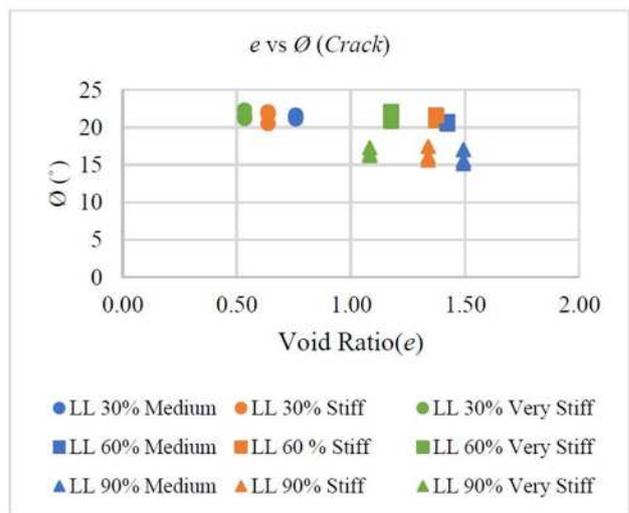


图 10 孔隙比(e)和摩擦角(Φ)的关系

经验关联从裂隙土壤液限和摩擦角数据回归中获得(图 11)。从回归结果可以发现，当 LL < 50% 时，摩擦角值保持不变，而当 LL 为 50% 时，摩擦角值将会减小(图 11)。关于裂隙土壤(C = 0)，获得的经验公式如下：

$$LL < 50\%:$$

$$\phi = 22^\circ \quad (1)$$

$$LL \geq 50\%:$$

$$\phi = -0.0024LL^2 + 0.02062LL + 17.514 \quad (2)$$

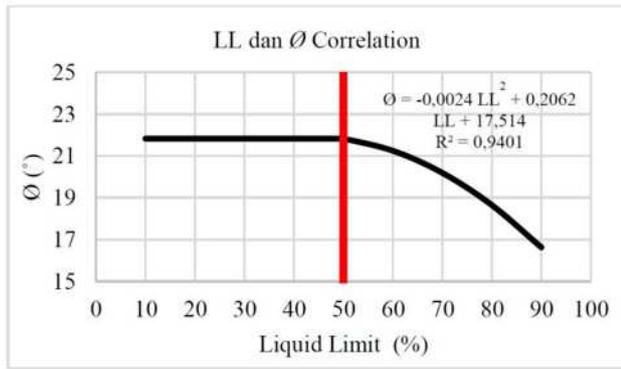


图 11 LL 和  $\phi$  相关性的经验公式

## 5 结论

根据这项研究的结果，可以得出以下结论：

### 参考文献：

- [1] H. Chen, C. Lee, K. Law. Causative mechanisms of rainfall-induced fill slope failures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004,130(6):593–602.
- [2] A. Tohari, D. Sarah. On the stability of steep slopes in unsaturated volcanic residual soils during rainfall. 2006.
- [3] T. Tran, M. Trinh, G. Lee, S. Oh, T. Nguyen. Effect of extreme rainfall on cut slope stability, study case in Yen Bai city, Vietnam. *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, 2015,16:23–32.
- [4] I. B. Mochtar. Field Evidence as the Base for Suggested New Concept of Soils Shear Strength Analysis and Slope Stability.2012.
- [5] I. B. Mochtar. A New Method of Perceiving Slope Stability Concept Based on Field Evidences. 2011.
- [6] S. Aleksander, I. B. Mochtar, Utama W. Identifikasi Keberadaan dan Perubahan Cracks di Dalam Lereng Tanah melalui Pengujian Tomographic Resistivity dan Induced Polarization sebagai Upaya Pembuktian Hipotesa the Concept of Crack Soil. Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, 2016.
- [7] I. B. Mochtar, N. B. Endah Mochtar. The Effect of Soil Cracks on Cohesion and Internal Friction Angle at Landslide. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 2018,8(3):1–5, 2018.
- [8] Hutagamissufardal, Adriani. Pengaruh Arah dan Rambatan Retak terhadap Nilai Kekuatan Geser Tanah. *Prosiding Seminar Nasional Tahunan V Program Studi Magister Teknik Sipil ULM*, 2018. pp.93–99.
- [9] Hutagamissufardal, I. B. Mochtar. Analyses of shear strength parameters of soils based on existence of crack planes during slopes failures. ITS, Surabaya, 2013.
- [10] Hutagamissufardal, I. B. Mochtar, N. E. B. Mochtar. The effect of cracks propagation on cohesion and internal friction angle for high plasticity clay. *International Journal of Applied Engineering Research [IJAER] ISSN 0973-4562*, 2018,13:2504–2507.
- [11] D. Adrian, I. B. Mochtar, N. E. Mochtar. Analisa sudut-geser-dalam tanah berbutir halus (cohesive soil) berdasarkan pendekatan cracked soil. *Jurnal Teknik ITS*, 2019,8(2):74–78.
- [12] I. B. Mochtar. Empirical parameters of clay, new version. Surabaya, May 2015.
- [13] T. Yang, Q.-song Zhang, X. Zhang, X.-hui Li, J.-qi Zhang, Y.-xue Sun, Z. Li. Cohesion variation during instability evolution of disaster medium in mud inrush of Mountain Tunnel. *Journal of Mountain Science*, 2019,16(11):2519–2531.

水压不影响裂隙土的抗剪强度，使用相同的总压力和各种水压的裂隙土试验结果表明，各水压的剪应力没有显著差异。

裂隙土壤的摩擦角不受其密度(孔隙比值)的影响。不同稠度的裂隙土样具有相同的摩擦角值(无显著差异)。此外，孔隙比是粘聚力导数的主要变量。因此，如果土壤样品裂隙，粘聚力会丧失，孔隙比不会影响土壤的抗剪强度(摩擦角)。

参数 LL 和裂隙土壤上的摩擦角( $C = 0$ )之间的相关性如下：

LL < 50%:

$$\phi = 22^\circ \quad (1)$$

LL  $\geq$  50%:

$$\phi = -0.0024LL^2 + 0.02062LL + 17.514 \quad (2)$$