

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S1.006

# 基于应力集中系数的抗剪强度取值方法 及其应用研究

刘世伟<sup>1,2</sup>, 盛 谦<sup>1,3</sup>, 龚彦峰<sup>2</sup>, 冷先伦<sup>1</sup>, 陈子婧<sup>4</sup>, 李建贺<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 铁四院 水下隧道技术湖北省工程实验室, 湖北 武汉 430063; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘 要:**通过对直剪试件剪切面内应力集中系数分布规律的研究, 结合剪应力-剪切位移变化曲线的分析, 提出一种采用应力集中系数进行土体抗剪强度取值的方法。以武汉地铁六号线某区间段角砾黏土地层为研究对象, 进行室内大型直剪试验, 得出角砾黏土的抗剪强度参数随含石量的变化规律, 与规程方法进行对比分析, 探讨文中方法的可行性。结果表明, 应力集中系数  $K_0$  一定程度上能够反映直剪时土体剪切承载力的强弱; 角砾黏土的黏聚力随着含石量的增加呈近似线性关系, 与现有研究成果一致; 试验结果位于规程规定合理范围内, 说明基于应力集中系数的抗剪强度取值方法可作为研究土体强度特性的有效途径。

**关键词:**直剪试验; 界面应力; 抗剪强度; 含石量; 剪应力集中系数

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0053 - 09

## A method for determining shear strength using shear stress concentration factor and its engineering application

LIU Shi-wei<sup>1,2</sup>, SHENG Qian<sup>1,3</sup>, GONG Yan-feng<sup>2</sup>, LENG Xian-lun<sup>1</sup>, CHEN Zi-jing<sup>4</sup>, LI Jian-he<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei, 430071, China; 2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Hubei Provincial Engineering Laboratory for Underwater Tunnel, Wuhan, Hubei, 430063, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

**Abstract:** This paper proposes a method for determination of shear strength based on stress concentration factor by investigating the distribution regularity of stress concentration factor in the shear plane and analyzing the curves of shear stress-shear displacement. Laboratory large-scale direct shear tests are conducted on the specimens from clay layer with breccia along Wuhan metro line 6. the variations of shear strength parameters of the soil layer with the stone content variation are determined. Through comparing this method with procedures in codes, the feasibility of this method are discussed. The results show that the stress concentration factor  $K_0$  partly reflect the shear strength of the soil; the cohesion of clay containing breccia approximately increases linearly with the increase of stone content, which is consistent with the existing research results. This method for shear strength based on stress concentration factor, can be used as an effective way to study soil strength characteristics.

**Keywords:** direct shear test; interfacial stress; shear strength; rock content; shear stress concentration factor

## 1 引 言

国内外对于岩土体强度与变形特性的研究主要基于数值模拟<sup>[1-3]</sup>、现场试验<sup>[4-6]</sup>以及室内试

验<sup>[7-9]</sup>3种方法。数值分析方法中试件内部粗细颗粒形态分布和裂隙结构与实际试件的形态存在一定差距, 得到的试验结果具有一定的局限性。现场大型直剪试验得到的数据能够较为真实地反映

收稿日期: 2017-02-23

基金项目: NSFC-云南联合基金重点支持项目 (No. U1402231); 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2015CB057905); 国家自然科学基金面上项目 (No. 51279202)。

This work was supported by the NSFC-United Fund Key Support Project of Yunnan(U1402231), the National Program on Key Basic Research Project of China(973 Program) (2015CB057905), and the National Natural Science Foundation of China(51279202).

第一作者简介: 刘世伟, 男, 1989年生, 博士研究生, 从事隧道开挖与地下水渗流稳定性方面的研究。E-mail: liu1989shiwei@163.com

土体的力学特性,但成本较高、仪器设备安装、操作比较复杂,试验影响因素控制较为困难。室内试验相对试验结果接近现场试验结果,且操作方便,试验因素可控性强,得到广泛应用。然而,无论采用何种方法进行研究,抗剪强度取值是目前存在一个共性问题,能否准确合理地确定抗剪强度值直接影响着土体强度指标的确定,影响工程设计计算的合理性与实际变形稳定。

对土工试验中抗剪强度取值方法的研究,刘祖德<sup>[10]</sup>详细地分析了影响抗剪强度取值标准的因素,并就三轴试验抗剪强度取值标准给出了一些有益建议。卞首蓉等<sup>[11]</sup>分析了土体抗剪强度影响因素和取值方法。土工试验规程<sup>[12]</sup>规定“取剪应力-剪位移关系曲线上峰值或稳定值作为抗剪强度,如无明显峰值,则取剪切位移达到 $(1/15 \sim 1/10)D$ 处的剪应力作为抗剪强度”。魏厚振等<sup>[13-14]</sup>将剪应力-剪位移有峰值的取峰值作为抗剪强度,对于没有明显峰值,以应变15%处的剪应力作为抗剪强度。邓华锋等<sup>[8]</sup>根据土石混体大型直剪试验得出的剪应力-剪位移关系曲线以及 $\Delta\tau/\Delta s\tau_{\max} - s$ (剪位移)关系,提出采用临塑抗剪强度和极限抗剪强度对土石混合体的抗剪强度进行描述,但应用较为复杂。

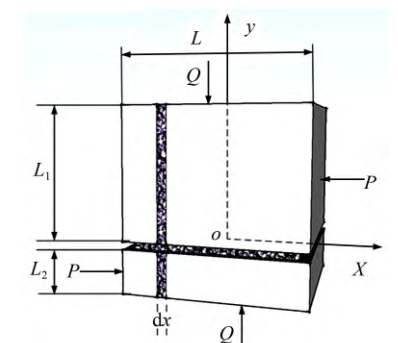
研究试验曲线无明显峰值情况下的抗剪强度取值较为困难,通常采用规定或经验方法取值,增加了试验结果的人为因素影响。本文在对土体剪切界面上剪应力进行弹性解析分析的基础上,提出采用剪应力集中系数确定土体抗剪强度的方法,应用于武汉地铁六号线角砾黏土强度特性试验分析中,对比分析了得出的试验结果与规程方法试验结果,证明了本文方法的有效性。

## 2 剪切界面内任一点剪应力大小及应力集中系数分布

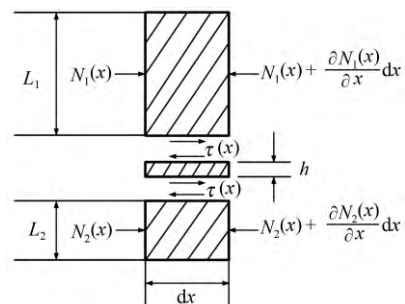
根据直剪仪剪切盒的结构特点可将土体试样分为上剪切盒土体、剪切缝土体和下剪切盒土体三部分,上剪切盒土体底面的剪应力等于剪切缝土体上界面剪应力,下剪切盒土体顶面的剪应力等于剪切缝土体下界面剪应力。基于一般界面应力计算方法<sup>[15-16, 19]</sup>对三部分土体展开受力与变形分析,可得上下剪切盒界面内的剪应力分布。结合上述分析,为了简化理论推导过程,便于计算,假设(1)土体是连续均质的,剪切过程中上下剪切盒内土体和剪切缝土体均处于弹性状态。(2)剪切缝土体沿着剪切方向只受剪应力作用

且剪应力沿剪切缝土体高度方向保持不变。(3)上、下剪切盒土体内的剪切力沿高度方向线性变化,沿宽度方向均匀分布。(4)在剪切过程中不计偏应力产生的弯矩以及剪切盒自身摩擦的影响。

设上剪切盒土体尺寸为 $L \times L \times L_1$ ,下剪切盒土体尺寸为 $L \times L \times L_2$ ,二者所受剪力均为 $P$ ,法向压力均为 $Q$ ,剪切方向为 $x$ 轴,剪切缝土样中心为坐标原点 $o$ ,垂直向上为 $y$ 轴,如图1(a)所示。沿剪切方向取宽度为 $dx$ 的土样进行受力分析,剪切缝上下微单元体所受的剪力分别为 $N_1(x)$ 和 $N_2(x)$ ,如图1(b)所示。



(a) 剪切盒内土体受力分析



(b) 微单元体受力分析

图1 直剪试样受力分析

Fig.1 Force analysis of specimens in direct shear tests

根据弹性理论可知,剪切缝内土体的剪切变形为

$$\gamma = \frac{du(x,y)}{dy} + \frac{dv(x,y)}{dx} \quad (1)$$

式中: $x$ 、 $y$ 分别为水平和竖向坐标轴; $u(x,y)$ 、 $v(x,y)$ 分别为剪切缝内土体中任一点的水平和竖向变形。由胡克定律可得对应的剪应力:

$$\tau(x) = G \left[ \frac{du(x,y)}{dy} + \frac{dv(x,y)}{dx} \right] \quad (2)$$

式中: $G$ 为剪切缝土体的剪切模量。

依据假设条件(2),分析中可不考虑剪切缝内土体的竖向变形的影响,则式(2)可改写为

$$\tau(x) = G \frac{du(x,y)}{dy} \quad (3)$$

根据假设条件 (2) 可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{du(x,y)}{dy} &= \frac{[u_2(x) - u_1(x)]}{h} \\ \frac{d\tau(x)}{dx} &= \frac{G}{h} \left[ \frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： $h$  为剪切缝的厚度； $u_1(x)$ 、 $u_2(x)$  分别为上剪切盒底面和下剪切盒顶面沿剪切方向的变形。

考虑到上下剪切盒内土体的剪切变形，设上剪切盒底面的剪应力为  $\tau(x)$ ，依据假设条件(1)，则上下剪切盒内土体中的剪应力为

$$\left. \begin{aligned} \bar{\tau}_1(x,y) &= \frac{\tau(x)}{2} \left( 1 + \frac{2y}{L_1} \right), \left( -\frac{L_1}{2} \leq y \leq \frac{L_1}{2} \right) \\ \bar{\tau}_2(x,y) &= -\frac{\tau(x)}{2} \left( 1 - \frac{2y}{L_2} \right), \left( -\frac{L_2}{2} \leq y \leq \frac{L_2}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $y$  为相对于上下剪切盒内土体的形心，以向下为正方向，变量上的横线表示任意一点，一下推导均遵循上述约定。根据剪应力和剪应变的关系可得由于剪切变形引起的上下剪切盒土体内任意一点水平变形为

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_1(x,y) &= u_1(x,0) + \int_0^y \frac{\bar{\tau}_1(x,m)}{G} dm = \\ & u_1(x,0) + \frac{\tau(x)}{2G} \left( y + \frac{y^2}{L_1} \right) \\ \bar{u}_2(x,y) &= u_2(x,0) + \int_0^y \frac{\bar{\tau}_2(x,m)}{G} dm = \\ & u_2(x,0) - \frac{\tau(x)}{2G} \left( y - \frac{y^2}{L_2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： $u_1(x,0)$ 、 $u_2(x,0)$  分别为上下剪切盒内土体形心的水平变形。上下剪切盒土体内任意点的水平方向应变为

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varepsilon}_1(x,y) &= \frac{d\bar{u}_1(x,y)}{dx} = \frac{du_1(x,0)}{dx} + \frac{d\tau(x)}{dx} \left( \frac{y + \frac{y^2}{L_1}}{2G} \right) \\ \bar{\varepsilon}_2(x,y) &= \frac{d\bar{u}_2(x,y)}{dx} = \frac{du_2(x,0)}{dx} - \frac{d\tau(x)}{dx} \left( \frac{y - \frac{y^2}{L_2}}{2G} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由式(7)可得上下微单元土体中的剪力分别为

$$\left. \begin{aligned} N_1(x) &= -EL \int_{-\frac{L_1}{2}}^{\frac{L_1}{2}} \bar{\varepsilon}_1(x,y) dy = \\ & -EA_1 \left( \frac{du_1(x,0)}{dx} + \frac{d\tau(x)}{dx} \frac{L}{24G} \right) \\ N_2(x) &= -EL \int_{-\frac{L_2}{2}}^{\frac{L_2}{2}} \bar{\varepsilon}_2(x,y) dy = \\ & -EA_2 \left( \frac{du_2(x,0)}{dx} + \frac{d\tau(x)}{dx} \frac{L}{24G} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： $E$  为上、下剪切盒内土体试样的弹性模量； $A_1$  为上微单元土体内剪力作用面积 ( $= L \times L_1$ )； $A_2$  为下微单元土体内剪力作用面积 ( $= L \times L_2$ )。

结合式(7)、(8)的第一式，将  $y = L_1/2$  代入各式得到

$$\frac{du_1(x)}{dx} = -\frac{N_1(x)}{EA_1} + \frac{d\tau(x)}{dx} \frac{L}{3G} \quad (9)$$

结合式(7)、(8)的第二式，将  $y = -L_2/2$  代入，同理可得

$$\frac{du_2(x)}{dx} = -\frac{N_2(x)}{EA_2} + \frac{d\tau(x)}{dx} \frac{L}{3G} \quad (10)$$

由式(4)第二式、(7)、(9)、(10)可得

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G}{h} \left( \frac{N_1(x)}{EA_1} - \frac{N_2(x)}{EA_2} \right) \quad (11)$$

式(11)等号两边对  $x$  求导，可得

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = \frac{G}{hE} \left( \frac{dN_1(x)}{A_1 dx} - \frac{dN_2(x)}{A_2 dx} \right) \quad (12)$$

根据沿  $x$  方向力学平衡分析，可得

$$\left. \begin{aligned} L\tau(x) &= \frac{dN_1(x)}{dx} = -\frac{dN_2(x)}{dx} \\ N_1(x) + N_2(x) &= P \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)，可得

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = \frac{2GL(A_1 + A_2)}{hEA_1A_2} \tau(x) \quad (14)$$

式(14)的通解为

$$\tau(x) = C_1 e^{\lambda x} + C_2 e^{-\lambda x} \quad (15)$$

式中： $C_1$ 、 $C_2$  为常量系数；常量  $\lambda$  可由式(16)确定。

$$\lambda = \sqrt{\frac{2GL(A_1 + A_2)}{hEA_1A_2}} = \sqrt{\frac{2G(L_1 + L_2)}{hEL_1L_2}} \quad (16)$$

结合式(13)则可知式(15)有解的边界条件为

$$\left. \begin{aligned} N_1\left(-\frac{L}{2}\right) &= 0; N_1\left(\frac{L}{2}\right) = P \\ N_2\left(-\frac{L}{2}\right) &= P; N_2\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

解得

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{GPe^{\lambda L/2}}{hE\lambda(e^{2\lambda L} - 1)} \left( \frac{e^{\lambda L}}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \\ C_2 &= \frac{GPe^{\lambda L/2}}{hE\lambda(e^{2\lambda L} - 1)} \left( \frac{e^{\lambda L}}{A_2} + \frac{1}{A_1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

剪切缝内土体中沿剪切方向任意一点的剪应力为

$$\tau(x) = \frac{GPe^{\lambda(L/2+x)}}{hE\lambda(e^{2\lambda L}-1)} \left( \frac{e^{\lambda L}}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) + \frac{GPe^{\lambda(L/2-x)}}{hE\lambda(e^{2\lambda L}-1)} \left( \frac{e^{\lambda L}}{A_2} + \frac{1}{A_1} \right) \quad (19)$$

剪切缝内的平均剪应力为：

$$\bar{\tau} = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \tau(x) dx = \frac{GP}{hEL\lambda^2} \left( \frac{A_1 + A_2}{A_1 A_2} \right) \quad (20)$$

式 (19) 与式 (20) 相除，可得剪切缝土体中任一点的剪切应力集中系数为

$$K(x) = \frac{\lambda Le^{\lambda(L/2+x)} (A_2 e^{\lambda L} + A_1)}{(e^{2\lambda L} - 1)(A_1 + A_2)} + \frac{\lambda LGPe^{\lambda(L/2-x)} (A_1 e^{\lambda L} + A_2)}{(e^{2\lambda L} - 1)(A_1 + A_2)} \quad (21)$$

当  $L = 200 \text{ mm}$ ,  $L_1 = 100 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 50 \text{ mm}$  时， $\lambda$  取不同值的情况下剪切应力集中系数  $K$  在剪切缝内沿剪切方向的分布规律如图 2 所示。

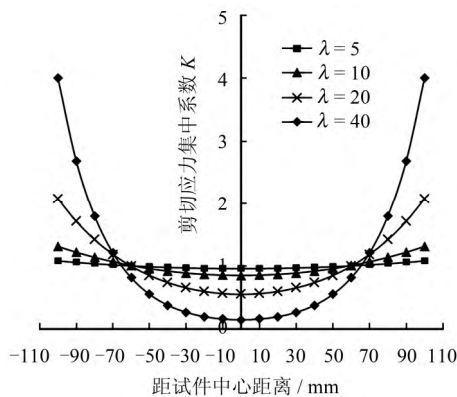


图 2 剪应力集中系数沿剪切方向分布特征  
Fig.2 Distribution characteristics of shear stress concentration factor along the shear direction

根据图 2 分析可知沿剪切方向，试件的中心点处的剪切应力集中系数最小，边缘处的应力集中系数最大，由此可以推断试件的破坏是由边缘向内部逐渐演化，当最小剪应力集中系数超过破坏允许值时（即试件中心点处发生破坏时），可以认为试件此时完全发生破坏，由此可知  $x = 0$  处剪应力集中系数在一定程度上可以用来反映岩土体直接剪切时剪切承载力的强弱，表示为

$$K_0 = \frac{\lambda Le^{\lambda L/2}}{e^{\lambda L} - 1} \quad (22)$$

### 3 基于剪应力集中系数的抗剪强度取值方法

依据规程<sup>[13]</sup>规定的取值原则，在土体直剪试验过程中对于无明显峰值情况下取剪切位移达到

(1/15 ~ 1/10) $D$  处的剪应力作为抗剪强度，即在该范围内的取值均是合理的，因此在采用规程进行取值时存在选择下限值（1/15 $D$  对应的剪应力）或选择上限值（1/10 $D$  对应的剪应力）的问题，选择该范围内某一值为标准，通常是依据试验人员的经验来判断的，增加了试验结果中的人为因素影响。为了能够尽量减少人为因素的影响，通过对剪应力-剪切位移曲线（ $\tau$ - $u$  曲线，见图 3）和剪切面内剪应力集中系数的分析，笔者提出了基于剪切应力集中系数  $K_0$  的抗剪强度取值方法。

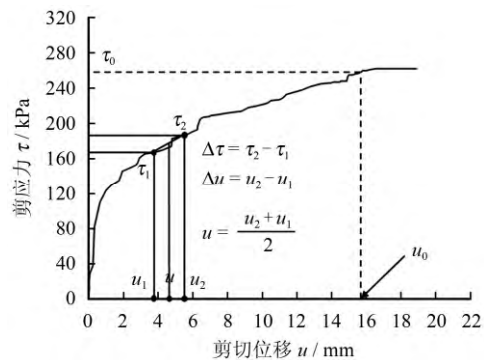


图 3 剪应力与剪切位移变化曲线  
Fig.3 Change curves of shear stress-shear displacement

通过分析土体直剪试验过程中剪应力与剪切位移变化的一般特征曲线，将剪应力变化量  $\Delta\tau$  与剪切位移变化量  $\Delta u$  的比值定义为似剪切应变比  $\theta$ ：

$$\theta = \frac{\Delta\tau}{\Delta u} = \frac{d\tau}{du} \quad (23)$$

式中： $du$  为剪切缝内土体的水平剪切位移微分形式； $d\tau$  为剪切缝内土体的平均剪切力微分形式。

结合式 (3)、式 (4) 第一式、式 (19)、(20)、(23) 可得  $\tau$ - $u$  曲线中任一剪切位移  $u$  所对应的似剪切应变比为

$$\theta = \frac{d\tau}{du} = \frac{G}{hL} \quad (24)$$

由于  $\lambda = \sqrt{\frac{2G(L_1 + L_2)}{hEL_1L_2}}$ ，结合式 (24) 可以得到由似剪切应变比  $\theta$  表示的变量  $\lambda$  的表达式：

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\theta L(L_1 + L_2)}{EL_1L_2}} \quad (25)$$

将式 (25) 代入式 (22) 可得到应力集中系数  $K_0$  与似剪切应变比  $\theta$  之间的关系式。将试验得到的  $\tau$ - $u$  曲线离散成为若干直线段，该直线段对应的剪切位移采用平均值  $u$  代替，如图 3 所示。结合式 (23) 和图 3 求出每个被离散的直线段对

应的似剪切应变比  $\theta$  和剪切位移  $u$ 。将每个直线段对应的  $\theta$  代入式 (25)、(22)，可得每个被离散的直线段对应的应力集中系数  $K_0$ ，结合每个被离散的直线段对应的剪切位移  $u$  值，可绘制得出应力集中系数  $K_0$  与剪切位移  $u$  的变化曲线，如图 4 所示。

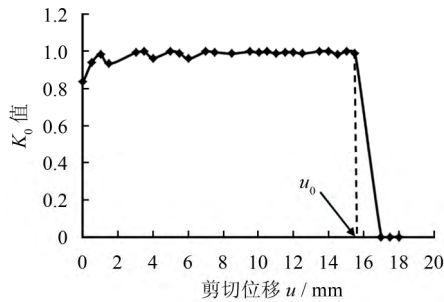


图 4  $K_0$  值随剪切位移变化曲线

Fig.4 Change curve of  $K_0$  value changing with shear displacement

通过图 4 分析可知  $K_0$  值基本在 1 左右波动变化，而后急剧下降，是由于剪切位移增大到一定程度时土体完全发生破坏，应力急剧减小，因此  $K_0$  值的急剧转折点对应的剪切位移可以认为是土体强度破坏位移  $u_0$ ，结合剪应力与剪切位移变化曲线可以求得土体抗剪强度  $\tau_0$ ，进而可求得岩土体的强度参数，此方法可以减少抗剪强度取值过程中人为因素的影响，增加试验数据结果的可信度。

#### 4 应用及验证

武汉地铁六号线某区间段岩土勘察分析报告显示，区间内地铁隧道穿越含角砾黏土地层活动频繁，地层的安全稳定性较差，严重影响着盾构隧道的健康高效施工，以该区间段内工程为依托，选取典型横断面进行现场取样和室内直剪试验研究，为不影响隧道施工的正常进行，取样地点位于如图 5 中所示的黑色边框范围内，沿隧道轴线方向进行取样。

直剪试验选用由中国科学院武汉岩土力学研究所和香港大学共同研发的现场室内两用大型直剪仪，如图 6 所示。经过颗粒分析可知天然状态下试样的角砾含量为 68.29%，黏土含量为 31.71%，并测得试样天然含水率为 2.6%。根据上述基本物性参数的测定结果，试验土样设计含水率为 10%，含石量分别为 30%、50%和 70%。依据现场取样深度以及土体重量，选取法向应力分

别为 107.5、215、430 kPa 进行试验。上述分析共设计 9 组试验。

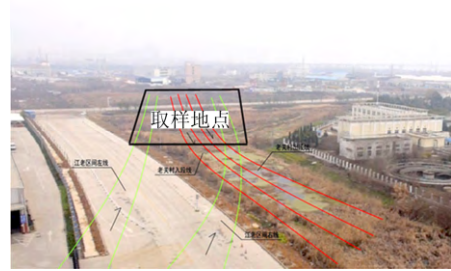


图 5 现场取样位置

Fig.5 Sampling field place



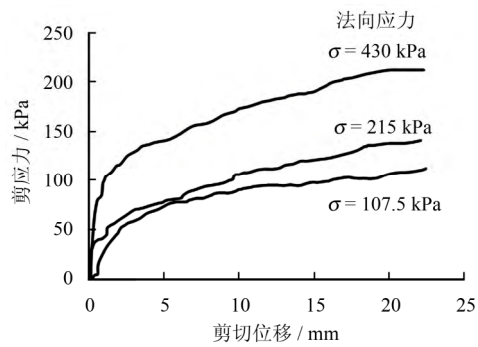
图 6 直剪试验设备

Fig.6 Direct shear test equipment

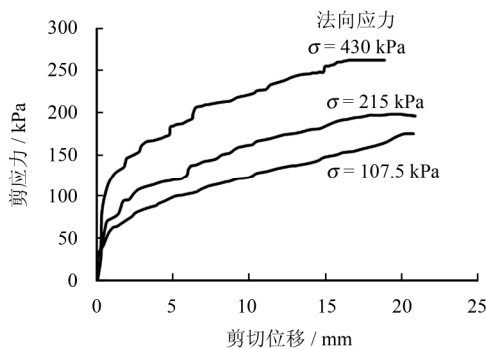
不同含石量不同应力水平条件下的剪应力-剪切位移关系曲线 ( $\tau-u$  曲线) 如图 7 所示。从图中可以看出，试样所得试验曲线均没有明显峰值，主要是本次试验采用不固结快剪，试验过程中由于垂直压力的压密作用以及剪切过程中剪切面上颗粒重排，小颗粒填充进入由大粗粒部分形成的孔隙中，从而剪切应力随剪切位移增大而增加，没有明显峰值。

根据直剪试验的结果采用单点法可以推算出不同剪应力条件下的多组剪切模量<sup>[17]</sup>，再求平均值，得到角砾黏土的剪切模量均值  $G$ 。依据弹性条件下剪切模量与弹性模量的关系可以求出角砾黏土的弹性模量均值  $E$  (本方法仅适用于直剪试验中剪应力与剪切位移线性变化范围内)。含水率为 10%，含石量分别为 30%、50%和 70%情况下角砾黏土的弹性模量均值  $E$  见表 1。

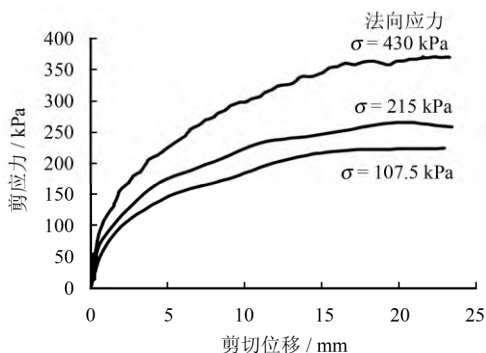
根据图 7 中的试验结果并结合本文方法可得不同含石量和不同法向应力条件下剪切面的应力集中系数  $K_0$  值随剪切位移的变化关系曲线。本次采用 0.5 mm 将剪切位移等间距离散化进行分析，限于篇幅，此处仅给出法向应力为 430 kPa，含石量分别为 30%、50%、70%时  $K_0$  值随剪切位移的变化关系曲线如图 8 所示。



(a) 含石量为 30%



(b) 含石量为 50%



(c) 含石量为 70%

图 7 不同含石量情况下直剪试验结果曲线  
Fig.7 Result curves of direct shear tests under different rock block proportions

表 1 角砾黏土体的弹性模量

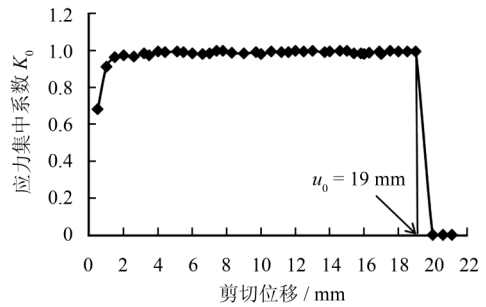
Table 1 Elastic modulus of clay with breccia

含石量/%	弹性模量均值 E/MPa
30	8.19
50	22.88
70	32.24

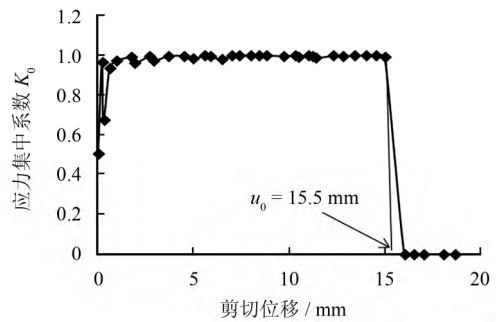
注：岩土体泊松比为经验取值， $\nu = 0.3$ 。

基于上述分析，不同含石量不同法向应力条件下采用上述方法与按照规程法抗剪强度的取值结果见表 2。分析表中抗剪强度值可知，采用本文方法得出的抗剪强度取值结果介于规程方法取值结果之间且偏于安全，一定程度上反映了本方法准确性。

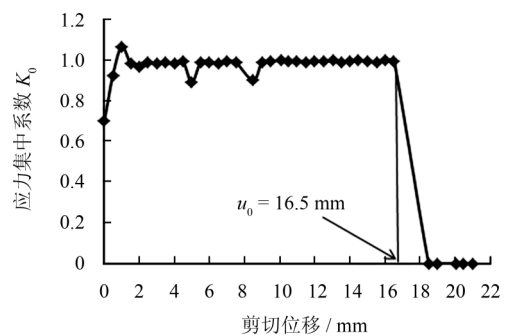
根据表 2 中的数据绘制得出不同法向应力条



(a) 含石量为 30%



(b) 含石量为 50%



(c) 含石量为 70%

图 8 不同含石量条件下 K0 值随剪切位移变化曲线  
Fig.8 K0 changing with shear displacement curves under of different stone contents

表 2 不同含石量条件下土体抗剪强度

Table 2 Shear strengths under different rock block proportions

含石量 /%	法向应力 /kPa	取值结果/kPa		
		本文方法	规程上限	规程下限
30	107.5	100	106	95
	215.0	123	148	116
	430.0	205	212	186
50	107.5	155	160	138
	215.0	186	200	177
	430.0	256	265	240
70	107.5	215	223	208
	215.0	255	265	240
	430.0	350	355	332

件经试验得出抗剪强度离散结果和法向应力  $\sigma$  与抗剪强度  $\tau_f$  的拟合关系曲线如图 9 所示。由图中分析可知，采用本文方法得出  $\tau_f - \sigma$  曲线介于规程方法得出的结果范围内，表明本文方法具有较

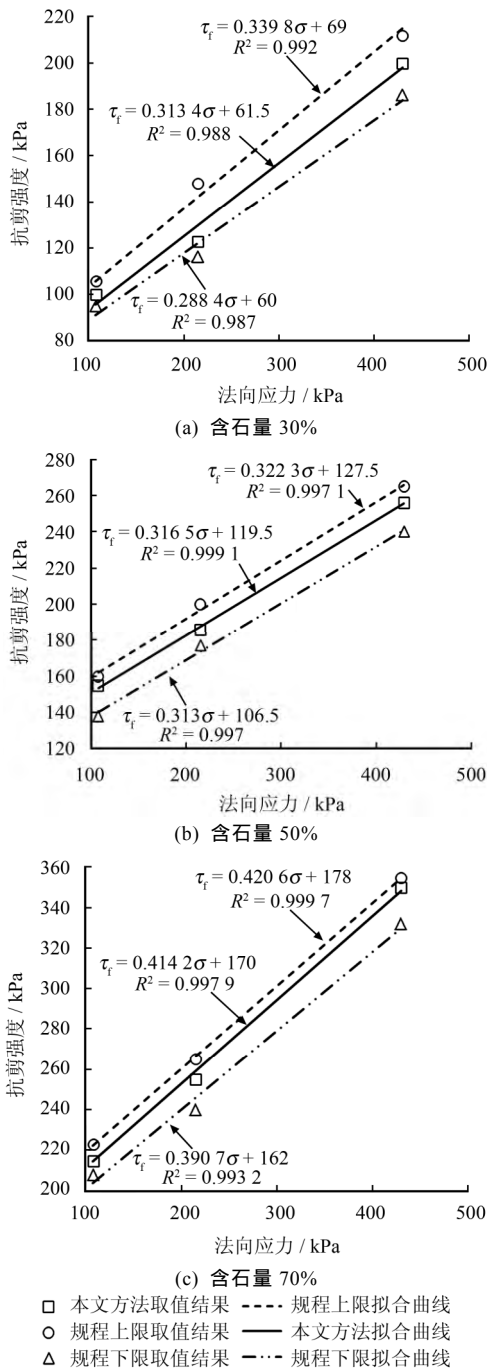


图9 不同含石量条件下法向应力与抗剪强度拟合关系曲线

Fig.9 Normal stress and shear strength fitting curves under different stone contents

好的可靠性。根据图9可求得不同含石量情况下试样的强度参数( $c$ 、 $\varphi$ )随含石量的变化曲线如图10所示。根据图中分析可知,含石量为30%~70%时,随含石量的变化,土体黏聚力的变化量超过100 kPa,内摩擦角的变化量近 $6^\circ$ ,含石量对角砾黏土的抗剪强度影响较大;角砾黏土的黏聚力与含石量近似呈线性关系增加,土体的内摩擦角随着含石量的增加不断增大,且含石量超过50%后内摩擦角的增长速率增大,与文献[4, 14,

18]的结论基本一致。本文方法得到的强度参数位于在规程<sup>[13]</sup>规定合理取值范围内,可知采用应力集中系数法得到的抗剪强度值合理有效。

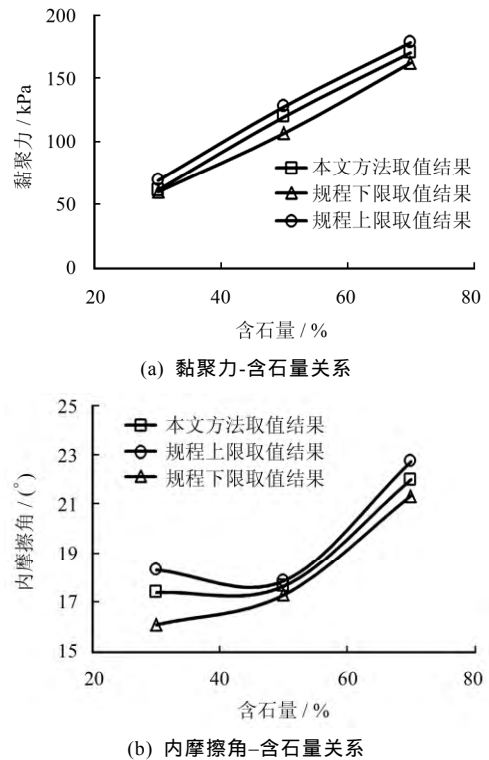


图10 剪切强度参数与含石量的关系  
Fig.10 Relationships between shear strength parameters and stone content

### 5 结论

(1) 试件中点处的剪应力集中系数  $K_0$  与试件整体破坏具有关联性,一定程度上可反映土体直剪时剪切承载力的强弱。结合剪应力-剪切位移变化曲线的分析,本文提出了一种操作简便且能够降低人为因素风险的抗剪强度取值方法。

(2) 武汉地铁六号线角砾黏土地层的室内直剪试验结果表明,含石量与角砾黏土的黏聚力近似线性相关,含石量50%为角砾黏土内摩擦角受到较大影响的临界含石量。与规程方法分析结果对比,验证了本文方法的合理性。

本文方法仅适用于大中型直剪试验中针对于直剪试验得出的剪应力-剪切位移变化曲线无明显峰值的情况开展,当剪应力-剪切位移变化曲线具有明显峰值情况下仍应当按照峰值进行取值。

### 参考文献

[1] 贾学明,柴贺军,郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. 岩土力学, 2010, 32(9): 2695-2703.

- JIA Xue-ming, CHAI He-jun, ZHENG Ying-ren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 32(9): 2695 - 2703.
- [2] 周剑, 张路青, 戴福初, 等. 基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 33(增刊 1): 2650 - 2659.
- ZHOU Jian, ZHANG Lu-qing, DAI Fu-chu, et al. Numerical simulation of direct shear tests for rock and soil mixture in a landside based on bonded-particle model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 33(Supp.1): 2650 - 2659.
- [3] 朱泽奇, 盛谦, 程红战, 等. 基于直接生成法的土石混合体三维随机模型构建与数值仿真研究[J]. 岩土力学, 2017, 37(4): 1 - 7.
- ZHU Ze-qi, SHENG Qian, CHENG Hong-zhan, et al. 3D stochastic model and numerical simulation of soil-rock mixture based on direct method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 37(4): 1 - 7.
- [4] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 996 - 1007.
- XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi, et al. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(5): 996 - 1007.
- [5] 胡伟. 溪洛渡库区典型土石混合体抗剪强度试验研究[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2014.
- HU Wei. Experimental study on shear strength of soil-rock-mixture in Xiluodu reservoir[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [6] 董云, 柴贺军, 杨慧丽. 土石混填路基原位直剪与室内大型直剪试验比较[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 235 - 238.
- DONG Yun, CAI He-Jun, YANG Hui-li. Comparison of shear test in site and lab large-scale shear test for rock-soil aggregate of roadbed[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(2): 235 - 238.
- [7] HOLTZ W G, ELLIS W. Triaxial shear characteristics of clayey gravel soil[C]//Proceeding of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Founding Engineering. [S.I.]: [s.n.], 1961: 143 - 149.
- [8] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 4065 - 4072.
- DENG Hua-feng, YUAN Xian-fan, LI Jian-lin, et al. Research on failure characteristics and determination method for shear strength of earth-rock aggregate in direct shear tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 4065 - 4072.
- [9] 王江营, 曹文贵, 张超, 等. 基于正交设计的复杂环境下土石混填体大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 32(10): 1849 - 1856.
- WANG Jiang-ying, CAO Wen-gui, ZHANG Chao, et al. Large-scale direct shear tests on soil-rock aggregate mixture under complicated environment based on orthogonal design[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 32(10): 1849 - 1856.
- [10] 刘祖德. 土的抗剪强度的取值标准问题[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(2): 11 - 19.
- LIU Zu-de. Problem about Standard Value Of Shear Strength[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 9(2): 11 - 19.
- [11] 卞首蓉, 陈贵喜. 土的抗剪强度指标取值研究[J]. 土工基础, 2010, 30(2): 88 - 90.
- BIAN Shou-rong, CHEN Xi-gui. Research Of Shear Strength Indexes of Soil[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2010, 30(2): 88 - 90.
- [12] 南京水利科学研究所. SL 237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. SL 237 - 1999 Specification of soil test[J]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [13] 李晓, 廖秋林, 赫建明, 等. 土石混合体力学特性的原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2377 - 2384.
- LI Xiao, LIAO Qiu-lin, HE Jian-ming, et al. Study on in-situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2377 - 2384.
- [14] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48 - 51, 57.



土力学研究所), 2010.

WU Yue-xiu. Modelling rough joint network and study on hydro-mechanical behavior of fractured rock mass[D]. University of Chinese Academy of Sciences(Institut of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2010.

- [31] 刘日成, 蒋宇静, 李博, 等. 岩体裂隙网络非线性渗流特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2817 - 2824.

LIU Ri-cheng, JIANG Yu-jing, LI Bo, et al. Nonlinear seepage behaviors of fluid in fracture networks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2817 - 2824.

- [32] 康志强, 张雪岩, 赵景民, 等. “S”型裂隙岩体锚固效果及应力场分布规律[J]. 金属矿山, 2014, 1: 46 - 49.

KANG Zhi-qiang, ZHANG Xue-yan, ZHAO Jing-min, et al. Effect of “S” type fractured rock anchoring and the distribution rule of stress field[J]. **Metal Mine**, 2014, 1:

46 - 49.

- [33] 赵伟, 吴顺川, 高永涛, 等. 节理岩体数值模拟及力学参数确定[J]. 工程科学学报, 2015, 37(12): 1542 - 1549.

ZHAO Wei, WU Shun-chuan, GAO Yong-tao, et al. Numerical modeling and mechanical parameters determination of jointed rock mass[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2015, 37(12): 1542 - 1549.

- [34] ASADI M S, RASOULI V, BARLA G. A bonded particle model simulation of shear strength and asperity degradation for rough rock fractures[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(5): 649 - 675.

- [35] WANG P T, YANG T H, XU T, et al. Numerical analysis on scale effect of elasticity, strength and failure patterns of jointed rock masses[J]. **Geosciences Journal**, 2016, 20(4): 539 - 549.

#### 上接第60页

WEI Hou-Zhen, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Strength behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 48 - 51, 57.

- [15] 张磊. 黏贴薄板加固梁的界面应力解:考虑梁和薄板的剪切变形[C]//第七届全国建设工程 FRP 应用学术交流会论文集. 杭州: [出版社不详], 2011.

ZHANG Lei. Paste sheet interface stress solution of beam, the beam and the shear deformation of a plate[C]//Proceedings of the 7th National Construction Engineering Application of FRP Academic Exchange. Hangzhou: [s.n.], 2011.

- [16] 王家全, 周健, 黄柳云, 等. 土工合成材料大型直剪界面作用宏观研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 32(5): 908 - 915.

WANG Jia-Quan, ZHOU Jian, HUANG Liu-yun, et al. Macroscopic and mesoscopic studies of interface interaction on geosynthetics by use of large direct

shear tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 32(5): 908 - 915.

- [17] 陶振宇. 岩石剪切模量的确定方法[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(3): 82-90.

TAO Zhen-yu. The determination method of rock shear modulus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1981, 3(3): 82 - 90.

- [18] MEDLEY E W. Systematic characterization of mélange bimrocks and other chaotic soil/rock mixtures[J]. **Felsbau-Rock Soil Engineering**, 1999, 17(3): 152 - 162.

- [19] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 基于直剪试验的页岩强度各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 874 - 883.

HENG Shuai, YANG Chun-he, ZENG Yi-jin, ZHANG et al. anisotropy of shear strength of shale based on direct shear test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(5): 874 - 883.