

胶结碎石土的折线型强度准则研究

朱思宇¹, 李文涛², 王旭光¹, 王 琛¹

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610065)

摘要: 针对胶结碎石土在低正应力和高正应力下的表现的差异性, 基于摩尔-库伦强度准则, 根据胶结碎石土在屈服应力前后的摩尔-库伦强度线, 提出了胶结碎石土的折线型强度准则, 推导了强度准则参数与单轴抗压强度和抗拉强度的关系, 通过单轴压缩试验和直接拉伸试验计算了强度准则参数, 并与三轴压缩试验直接获取的强度准则参数结果进行比较。结果表明, 计算值与试验值误差在合理范围内, 折线型强度准则对胶结碎石土具有一定的适用性。

关键词: 胶结碎石土; 强度准则; 抗剪强度参数; 三轴压缩试验

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0199-03

1 引言

自 RAPHAEL J M^[1]于 1970 年首次提出胶结碎石土的概念以来, 胶结碎石土就因其经济效益好、抗震性能优越、干缩与自身体积变形小等优点被广泛运用于坝工、地下、路基、边坡等工程中^[2,3]。胶结碎石土因胶结材料作用呈一定的结构性土性质, 其强度准则一直是研究的热点。刘恩龙等^[4,5]提出了二元介质模型; 蔡新等^[6]对胶结堆石料进行了不同围压下的大型三轴试验, 并结合抗压及抗拉强度, 推导出压缩和拉伸状态下的本构关系模型, 模型计算结果与试验结果一致性较好; DEGUE K M 等^[7]提出了针对胶结土的理论准则。胶结碎石土在低正应力下因胶结作用表现出一定的结构性, 强度中存在明显的凝聚分量; 然而, 在高正应力作用下胶结作用散失, 转换为无粘性碎石土, 凝聚分量散失。胶结碎石土的强度包线可在不同应力下用两条不同的直线表示, 呈折线型强度包线性质。此外, 获取胶结碎石土强度参数的三轴压缩试验工作量大, 且围压较大时常规土工三轴试验仪器轴向荷载能力不足, 则基于单轴压缩和拉伸状态下的试验结果推导抗剪强度参数值得深入研究。为此, 本文基于摩尔-库伦^[8]强度准则, 提出了胶结碎石土的折线形强度准则, 基于单轴抗压强度和拉伸强度推导出抗剪强度参数粘聚力 c 和内摩擦角 φ 值, 并

通过室内单轴压缩、直接拉伸、三轴压缩试验结果进行验证, 结果可供参考。

2 胶结碎石土的折线型强度准则

2.1 折线型强度准则

胶结碎石土的摩尔-库伦强度包线在低应力范围内, 可近似由一条直线表示。然而, 当应力大于屈服应力时, 胶结碎石土的胶结作用散失, 转变为无粘性土, 直线型强度包线不能同时适用于胶结碎石土和无胶结碎石土。折线型强度准则相对于摩尔-库伦强度准则同时考虑了胶结碎石土的胶结作用散失前后的强度特征, 故可以屈服应力为界, 假设强度包线为两条直线。

将胶结碎石土的单轴抗压、直接拉伸、三轴压缩试验的破坏摩尔应力圆, 即圆 O_1 、 O_2 、 O_3 绘制在同一正应力 σ - 剪应力 τ 坐标上, 见图 1。图 1 中, O_1 为单轴抗拉摩尔圆; σ_t 为单轴抗拉强度; O_2 为单轴抗压摩尔圆; σ_c 为单轴抗压强度; O_3

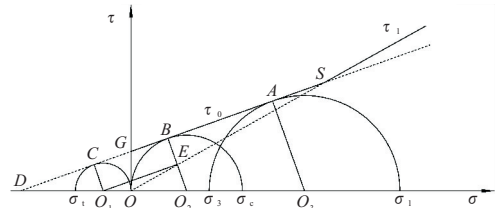


图 1 抗压、抗拉、三轴压缩试验摩尔应力圆

Fig. 1 Molar stress circle for compressive, tensile and triaxial compression tests

收稿日期: 2022-04-23, 修回日期: 2022-05-17

作者简介: 朱思宇(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为粗粒土的工程性质, E-mail: 461829978@qq.com

通讯作者: 王琛(1977-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为粗粒土的工程性质等, E-mail: cwang@scu.edu.cn

为三轴压缩摩尔圆； σ_1 为大主应力； σ_3 为小主应力。

当应力大于屈服应力 σ_s 时，以屈服点 S 为界，强度包线分为两段直线， S 点前、后的直线方程式^[9]分别为：

$$\tau_0 = c_0 + \sigma \tan \varphi_0 \quad \sigma < \sigma_s \quad (1)$$

$$\tau_1 = c_1 + \sigma \tan \varphi_1 \quad \sigma > \sigma_s \quad (2)$$

式中， τ_0 、 τ_1 分别为 S 点前、后的抗剪强度； c_0 、 φ_0 分别为胶结作用存在时的粘聚力、内摩擦角； c_1 、 φ_1 分别为胶结作用丧失后的粘聚力、内摩擦角。

2.2 折线型强度准则参数求取

胶结作用丧失后，胶结碎石土抗剪强度性质近似于无胶结碎石土，可认为 τ_1 与无胶结碎石土的强度包线平行。假设其截距为零，即不考虑碎石土的咬合力，则有 $c_1 = 0$ ，式(2)可简化为：

$$\tau_1 = \sigma \tan \varphi_1 \quad (3)$$

对抗剪强度参数与单轴抗压和单轴抗拉强度的关系进行推导。由图 1 可知， τ_0 线为单轴抗拉摩尔圆 O_1 、单轴抗压摩尔圆 O_2 、三轴压缩摩尔圆 O_3 的公切线，过 O_1 作 $O_1E // CB$ ，有：

$$\Delta O_1CD \sim \Delta O_2BD \sim \Delta GOD \quad (4)$$

$$\tan \varphi_0 = \sigma_t / 2CD = \sigma_c / (2BD) = c_0 / OD \quad (5)$$

所以

$$\frac{O_2E}{O_1O_2} = \frac{O_2B}{O_2D} \Rightarrow \frac{\sigma_c/2 - \sigma_t/2}{\sigma_c/2 + \sigma_t/2} = \frac{\sigma_c/2}{O_2D} \quad (6)$$

$$O_2D = \sigma_c(\sigma_c + \sigma_t) / [2(\sigma_c - \sigma_t)] \quad (7)$$

$$BD = \sqrt{O_2D^2 - O_2B^2} = \frac{\sigma_c \sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{\sigma_c - \sigma_t} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)，则

$$\tan \varphi_0 = (\sigma_c - \sigma_t) / (2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}) \quad (9)$$

$$c_0 = (O_2D - OO_2) \tan \varphi_0 \quad (10)$$

$$c_0 = \frac{\sigma_c \sigma_t}{\sigma_c - \sigma_t} \frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} = \frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2} \quad (11)$$

故胶结碎石土折线型强度包线在小于屈服应力时为：

$$\tau_0 = \frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2} + \sigma \frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} \quad \sigma < \sigma_s \quad (12)$$

设两条直线的交点 S 坐标为 (σ_s, τ_s) ， $\sigma_s = \xi \sigma_c$ (ξ 为屈服系数，表示材料的屈服应力与单轴抗压强度的比值， ξ 取值范围为 2.0~3.0，本文取 3.0^[10])。将 $S(\sigma_s, \tau_s)$ 点代入式(12)可得 S 点的纵坐标：

$$\tau_s = \frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2} + \xi \sigma_c \frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} \quad (13)$$

联解式(3)、(13)可得：

$$\tan \varphi_1 = \frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2\xi \sigma_c} + \frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} \quad (14)$$

故胶结碎石土折线形强度包线在大于屈服应力时为：

$$\tau_1 = \left(\frac{1}{2\xi} \sqrt{\frac{\sigma_t}{\sigma_c}} + \frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} \right) \sigma \quad \sigma > \sigma_s \quad (15)$$

综上所述，胶结碎石土的折线型强度准则的

4 个参数分别为 $c_0 = \frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2}$ 、 $\varphi_0 = \arctan \left(\frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} \right)$ 、 $c_1 = 0$ 、 $\varphi_1 = \arctan \left(\frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2\xi \sigma_c} + \frac{\sigma_c - \sigma_t}{2\sqrt{\sigma_c \sigma_t}} \right)$ 。表明折线型强度准则参数可由单轴抗压强度和抗拉强度求取。

3 折线型强度准则试验验证

3.1 试验材料

为对胶结碎石土的折线型强度准则进行验证，对胶结碎石土进行了单轴压缩试验、直接拉伸试验、三轴压缩试验三类试验。对无胶结碎石土进行了三轴压缩试验。

试验材料由碎石土、水泥、粉煤灰、水组成。碎石土采用弱风化人工破碎灰岩，比重 $G_s = 2.80 \text{ g/cm}^3$ ，试验级配依据某工程实际级配，原颗粒级配和缩尺后的级配见图 2。

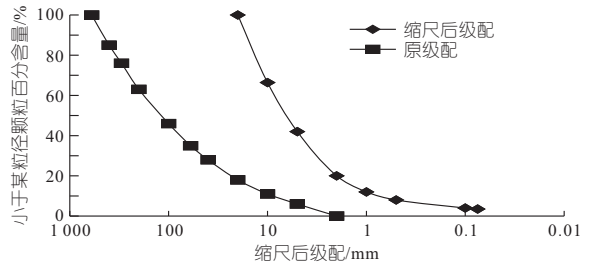


图 2 骨料颗粒级配曲线

Fig. 2 Aggregate particle grading curves

试验水泥为普通硅酸盐水泥，标号 P. O32.5，初凝时间 320 min，对应终凝时间 7、28 d 龄期抗压强度分别为 31.0、42.8 MPa。粉煤灰为成都市某电厂生产，密度 2.10 g/cm^3 ，需水量比 106%，45 μm 筛余 17%，烧失量 1.92%；CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 质量百分比分别为 5.32%、61.54%、22.38%、7.40%。

胶结碎石土的胶凝剂为水泥和粉煤灰，配合比 1 : 1，水胶比定为 0.9^[11]，胶凝掺量 90 kg/m^3 ，制样碎石土干密度 $\rho_d = 1.98 \text{ g/cm}^3$ ，试样为圆柱形，直径 $D = 101 \text{ mm}$ ，高度 $H = 200 \text{ mm}$ 。养护温度为室温 $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 试验结果与分析

为获取单轴抗压强度，开展了不同龄期下胶结碎石土的单轴压缩试验。龄期分别为 1、3、7、14、28 d，每组 3 个试样平行进行。不同龄期胶结

碎石土的应力—应变关系曲线见图 3。由图 3 可知,曲线表现为应变软化特性,其单轴抗压强度可取峰值点,对不同龄期的胶结碎石土采用直接拉伸试验获取单轴抗拉强度,见表 1。

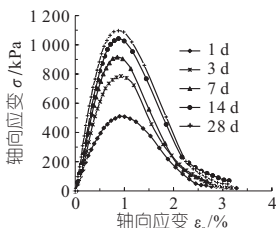


图 3 不同龄期胶结碎石土应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of cemented gravel soil at different ages

表 1 强度参数值

Tab. 1 Strength parameter value

试样编号	龄期 T/d	抗拉强度 σ_t /kPa	抗压强度 σ_c /kPa	σ_t/σ_c /%	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ / (°)
M1-1	1	49	527	9.3	3	40
M1-2	3	102	800	12.7	77	39
M1-3	7	155	907	17.0	175	41
M1-4	14	172	1 001	17.2	217	40
M1-5	28	215	1 194	18.0	261	42

针对不同龄期的胶结碎石土开展了三轴压缩试验,围压为 0.1~0.4 MPa,剪切速率 0.8 mm/min,抗剪强度参数见表 1。同时为便于比较,针对无胶结碎石土开展了三轴压缩试验,围压为 0.1~0.4 MPa,剪切速率 0.8 mm/min,线性抗剪强度参数见表 2。

表 2 抗剪强度参数对比

Tab. 2 Comparison of shear strength parameter

T/d	σ_c /kPa	σ_t /kPa	计算值			试验值		
			c_0^* /kPa	φ_0^* / (°)	φ_1^* / (°)	c_0 /kPa	φ_0 / (°)	φ_1 / (°)
7	907	155	187	45	47	175	41	43
14	1 001	172	207	45	47	217	40	43
28	1 194	215	253	44	46	261	42	43

注: c_0^* 、 φ_0^* 、 φ_1^* 为计算结果; c_0 、 φ_0 为胶结三轴试验结果; φ_1 为无胶结三轴试验结果。

在实际工程中,一般使用胶结碎石土初凝后的强度,故仅分析 7 d 龄期以上试验结果。基于单轴抗压强度和抗拉强度试验结果,根据式(9)、(11),获取胶结碎石土强度准则中的抗剪强度参数 c_0 、 φ_0 。根据式(14),获取无胶结碎石土的抗剪强度参数 φ_1 ,并与三轴压缩试验结果进行对比见表 2。由表 2 可知:①计算值 φ_0^* 分别为 45°、45°、44°,试验值 φ_0 分别为 41°、40°、42°,误差分别为 9.7%、12.5%、7.3%;计算值 φ_1^* 分别为 47°、47°、46°,试验值 φ_1 为 43°,误差分别为 8.5%、8.5%、6.9%。②无胶结碎石土 $c_1=0$,计算值 c_0^* 分别为 187、207、253 kPa,试验值 c_0 分别为 175、

217、261 kPa,误差分别为 6.4%、4.6%、3.0%,误差在可接受范围内。

综上所述,通过单轴抗压强度试验和直接拉伸强度试验获取三轴压缩试验结果可行,可认为折线型强度准则对胶结碎石土具有一定的适用性。

4 结论

a. 基于摩尔—库伦强度准则,提出了胶结碎石土的折线形强度准则,推导出抗剪强度参数值与单轴抗压强度和抗拉强度的关系式。

b. 基于室内胶结碎石土的直接拉伸试验和单轴压缩试验,计算了抗剪强度参数,并与三轴压缩试验和无胶结碎石土的三轴压缩试验结果对比,发现采用折线型强度准则时,胶结碎石土的抗剪强度参数计算值与试验值较接近,误差在合理范围内,验证了折线型强度准则的适用性。

c. 基于折线型强度准则,可同时分析低正应力下胶结碎石土和高正应力下胶结作用散失后无胶结碎石土的强度特征,抗剪强度参数可由单轴抗压试验和直接拉伸试验获取,减少了三轴压缩试验的工作量。

参考文献:

- [1] RAPHAEL J M. The optimum gravity dam, rapid construction of concrete dams [M]. New York: ASCE, 1970.
- [2] BATMAZ S, KOEKSAL A, ERGENEMAN I, et al. Design of the 100 m-high Oyuk hardfill dam[J]. International journal on hydropower and dams, 2003,10(5):138-142.
- [3] TOSHIO H. Design criteria for trapezoid CSG dams [C]//ICOLD-69th Annual Meeting. Dresden, 2001: 457-465.
- [4] 刘恩龙,沈珠江. 结构性土的强度准则[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1248-1252.
- [5] 刘恩龙,沈珠江. 结构性土强度准则探讨[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 50-55.
- [6] 蔡新,武颖利,李洪煊,等. 胶凝堆石料本构特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1340-1344.
- [7] DEGUE K M, SOULIE M, LADANYI B. Extension of the Griffith's fracture criteria to saturated clays [J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2003, 27(4): 275-288.
- [8] MATSUOKA H, NAKAI T. Relationship among Tresca, Mises, Mohr-Coulomb and Matsuoka-Nakai failure criteria[J]. Soils and foundations, 1985, 25(4): 123-128.
- [9] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [10] 李文涛. 胶结碎石土力学特性试验与数值模拟 [D]. 成都:四川大学, 2016.
- [11] 冯炜,贾金生,马锋玲. 胶凝砂砾石材料配合比设计参数的研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(2): 55-58.

的样本容量对指标拟定的影响,置信水平更高,拟定的监控指标更安全,能更好地规避极端情况下渠坡工程面临的未知风险。

c. 由于本文以超阈值的样本序列为研究对象,因此在实际工程的安全监测资料中,当测值序列变幅很小时,测值序列中的极值(超阈值)的区分度就较低,采用 POT 模型法拟定监控指标就有可能得到畸形(过大或过小)的结果,此时不宜采用本文方法拟定该效应量的监控指标。

参考文献:

[1] 王大洋,王大刚. 气候变化对岩溶区流域极端径流频率分析的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2021

(5):118-124.

[2] 聂兵兵,赵二峰,殷详详,等. 基于极值理论的大坝变形监控指标拟定[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12):101-104.

[3] PICKANDS III J. Statistical inference using extreme order statistics[J]. The annals of statistics, 1975, 3(1):119-131.

[4] 吴中如. 大坝的安全监控理论和试验技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.

[5] 魏德荣. 大坝安全监控指标的制定[J]. 大坝与安全, 2003(6):24-28.

[6] 唐贤琪,杨海云,吴凡,等. 基于改进 POT 模型的混凝土坝监控指标拟定[J]. 水利水电工程学报, 2021(2):117-123.

Development of Monitoring Index of Channel Slope Displacement

Based on 2σ-chauvenet Criterion POT Model

ZHOU Cong-cong¹, SHEN Zhen-zhong¹, MA Fu-heng²

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In the long service process of the deep excavated expansive soil channel slope, the real-time identification of the service behavior of the channel slope by means of displacement monitoring index is an important means to ensure the safe operation of the channel slope. Therefore, it is of great significance to formulate reasonable monitoring indexes for the safety of canal slope engineering. The POT model was presented in this paper. On the basis of introduction of 2 σ criteria and chauvenet principles, the threshold T and the corresponding relation between monitoring index was established. Through the best solution to satisfy the relationship between threshold, a canal slope displacement monitoring index for improved POT model was established to apply to the Taocha section of South-to-North Water Transfer Project of deep excavation expansion earth canal in slope engineering. Compared with the traditional POT model, the results show that the improved POT model based on 2σ-chauvenet criterion can effectively avoid subjectivity and random error, and it has higher calculation accuracy. The proposed displacement monitoring index is more safety, which has stronger guiding significance to prevent the risk of canal slope and ensure the safe long-term operation of canal slope.

Key words: deep carving channel slope; expansive soil; monitoring indicators; Peaks over Threshold model; 2σ-chauvenet criterion



(上接第 201 页)

Study on Polygonal Line Strength Criterion of Cemented Gravel Soil

ZHU Si-yu¹, LI Wen-tao², WANG Xu-guang¹, WANG Chen¹

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610065, China)

Abstract: In view of the difference between the performance of cemented gravel soil under low normal stress and high normal stress, based on the Mohr-Coulomb strength criterion, according to the Mohr-Coulomb strength line of cemented gravel soil before and after yield stress, a polygonal line strength criterion of cemented gravel soil was proposed. The relationship between strength criterion parameters and uniaxial compressive strength and uniaxial tensile strength was deduced. Uniaxial compression test and direct tensile test were carried out to calculate the strength criterion parameters and compare with the strength criterion parameters obtained by triaxial compression test. The results show that the error range between the calculated value and the experimental value is reasonable. The polygonal line strength criterion is suitable for cemented gravel soil.

Key words: cemented gravel soil; strength criterion; shear strength parameters; triaxial compression test