

DOI: 10.11779/CJGE2019S1048

坝基不同倾角软弱夹层的破坏模式及 D-C 模型参数研究

吕 布, 杨之俊, 韦秀东, 卢继忠, 傅旭东*

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 坝基岩体中的软弱夹层对抗滑稳定影响重大, 因此对其破坏模式及本构模型参数的研究具有重要意义。采用软弱夹层重塑样进行三轴压缩试验, 下部未泥化部分采用泥化部分土掺入 20% 水泥代替, 上部采用泥化部分土制样, 泥化部分与未泥化部分交界面分别制成 0° , 30° , 45° , 60° 倾斜面并作粗糙处理模拟实际界面特性。试验结果表明: 含不同倾角结构面的软弱夹层试样临界角范围为 $58.3^\circ \sim 61.7^\circ$, 当结构面倾角介于临界角范围之内时, 软弱夹层试样沿结构面破坏, 当结构面倾角位于临界角范围之外时, 软弱夹层试样在上部泥化部分土中破坏; 对软弱夹层试样三轴试验 $\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线进行线性拟合, 结果表明, 随围压增加, 试样初始切线模量及极限破坏强度均增加, 根据试验结果得出了相应的 D-C 模型参数并将其应用于坝基抗滑设计中, 取得了良好效果。本研究成果对坝基软弱夹层的抗滑设计及同类软弱夹层工程性质的研究具有一定参考价值。

关键词: 软弱夹层; 倾角; 三轴试验; 破坏模式; 本构模型参数

中图分类号: TU441.35

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)S1 - 0189 - 04

作者简介: 吕 布(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事边坡工程、桩基理论和地基处理等方面的研究。E-mail: blv_whu@163.com。

Failure modes and constitutive model for weak interlayer of dam foundation with different inclination angles

LÜ Bu, YANG Zhi-jun, WEI Xiu-dong, LU Ji-zhong, FU Xu-dong

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The soft interlayer in the dam foundation rock mass has a great influence on the stability of the dam foundation against sliding, thus the researches on its failure modes and constitutive model parameters are of great significance. The remolded sample is adopted for triaxial tests: the lower part is made up of clay and cement of 20% and the upper is made by clay, the interface is made into inclined planes of 0° , 30° , 45° and 60° and roughed to simulate the real interface characteristics. The test results show that the critical angle range of weak-interlayer samples with different dip angles is $58.3^\circ \sim 61.7^\circ$, when the inclination angle of the structural surface is in the range of the critical angle, the soft-interlayer sample is destroyed along the structural surface, otherwise the failure surface appears in the upper part of the muddy soil. Linear fitting of the triaxial test relationship curve of $\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$, and the results show that as the confining pressure increases, the initial tangential modulus and the corresponding peak intensity of the sample increases. According to the test results, the corresponding D-C model parameters are obtained and applied to the anti-sliding design of the dam foundation, and good results are obtained. The research results have a certain reference value for the anti-slip design of the dam foundation and the researches on similar soft-interlayer projects.

Key words: weak interlayer; inclination angle; triaxial test; failure mode; constitutive model parameter

0 引 言

坝基岩体中的软弱夹层可形成坝基滑坡失稳的底滑面, 对坝基抗滑稳定影响重大。目前对坝基软弱夹层的研究主要集中在软弱夹层强度及变形问题上, 研究表明软弱夹层剪切试验的破坏面多发生在夹泥与岩体的接触带^[1-4], 抗剪强度常低于夹泥本身的抗剪强度; 除强度及变形问题外, 对坝基软弱夹层剪切变形

本构关系的研究也有重要意义, 许宝田等^[5]在现场大型直剪试验的基础上, 建立了能较好描述软弱夹层剪切变形关系的剪切刚度 - 剪应力的幂函数模型。直剪试验往往无法得出软弱夹层的真实破坏性状, 宋彦琦

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51378403)

收稿日期: 2019 - 04 - 30

*通讯作者 (E-mail: xdfu@whu.edu.cn)

等^[6]开展了含 0°，30°，45°，60°，90° 倾角的天然软弱夹层岩样的三轴压缩试验，表明夹层倾角为 60° 左右时，夹层对岩样的弱化作用最为显著。

由于直剪试验破坏模式的单一性，无法真实反映含有不同缓倾角软弱夹层的实际破坏模式及剪切变形本构模型。本文针对某坝基黏土岩软弱夹层开展试验研究，软弱夹层存在部分泥化、强度较低等问题，且软弱夹层存在明显的软硬交界面，交界面以上为泥化部分，其土质较软，交界面以下为微泥化部分，土质较为坚硬。根据坝基软弱夹层的结构特性，对含不同倾角结构面的软弱夹层开展三轴压缩试验，对其破坏模式及 Duncan-Chang 模型（下文统一简称为 D-C 模型）参数进行了研究，研究成果对坝基软弱夹层的工程性质评价及研究具有一定的参考价值。

1 试验过程

1.1 试样制备

试样取自李家嘴大坝坝基黏土岩软弱夹层，其 1/3 高度的上部泥化严重，下部则较为坚硬，软硬交界面上存在近似水平的微裂隙。由于破坏可能在泥化部分内产生，也可能沿软硬交界面产生，考虑到制备原状样的困难，采用重塑样进行试验：试样上部采用泥化部分土制备，试样下部采用在土中掺入 20% 水泥的方法来模拟^[7]；为了模拟破坏可能沿软硬交界面产生，将试样下部顶面做成斜面，与水平面分别成 0°，30°，45°，60°，并将斜面作粗糙处理模拟实际界面特性，再在其上部分层击实泥化部分土（图 1）。



图 1 不同倾角结构面软弱夹层试样

Fig. 1 Soft-interlayer samples with different dip angles

1.2 三轴压缩试验方案

本次试验采用 Φ101 mm 重塑样进行三轴压缩试验，为减少同一倾角软弱夹层试样在制样时的误差对试验结果的影响，采用一个试样多级加荷方法进行三轴压缩试验。本次试验共进行倾角为 0°，30°，45°，60° 四种情况下软弱夹层试样的三轴压缩试验。试验方案见表 1。

表 1 软弱夹层三轴试验方案

Table 1 Triaxial test schemes of weak interlayer

试样	密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	倾角 /(°)	试验方法
SY1	2.0	10.0	0	CD 试验
SY2	2.0	10.0	30	
SY3	2.0	10.0	45	
SY4	2.0	10.0	60	

2 软弱夹层强度特性及破坏模式分析

2.1 软弱夹层强度特性

对含不同倾角软弱夹层试样在 200，300，400 kPa 围压下进行三轴压缩试验，根据一个试样多级加荷三轴压缩试验得到不同倾角软弱夹层试样的应力应变关系曲线（图 2），多级加荷时，随着围压等级的提高，试样强度相应有一定程度的恢复与提高。由图 2 可知，在分级荷载作用下，含倾斜结构面软弱夹层试样应力应变关系曲线并未呈现明显的软化特性，且随分级荷载的增加，试样峰值强度逐步提高，试验过程中当试样累计应变达到 25% 左右时，试样应力应变关系曲线趋于平缓。倾角为 60° 时，试样应力应变关系曲线峰值强度明显低于其它倾角结构面试样。

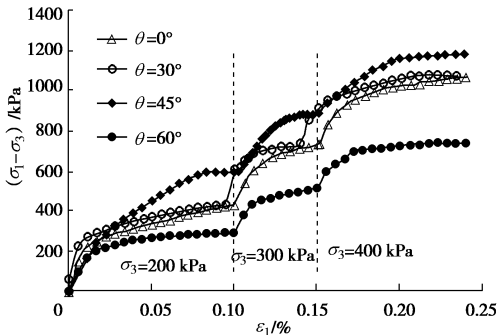


图 2 多级加荷三轴试样应力应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of multi-stage loaded triaxial samples

2.2 软弱夹层破坏模式研究

由试验结果（见图 3）可知，当倾角为 0° 时，试样发生鼓状破坏，当倾角为 30°，45°，60° 时，试样发生斜面剪切破坏；当倾角为 60° 时，剪切破坏面与倾斜结构面基本重合，当倾角为 30° 和 45° 时，试样最终破坏面与倾斜结构面不重合，且与水平方向的夹角大致呈 60°。



(a) θ = 0° (b) θ = 30° (c) θ = 45° (d) θ = 60°

图 3 含不同倾角软弱夹层试样破坏形式

Fig. 3 Failure modes of soft-interlayer samples

可依据基于莫尔-库仑理论的 Jaeger 单结构面理论^[8]研究含倾斜结构面的软弱夹层的破坏规律(图 4)。

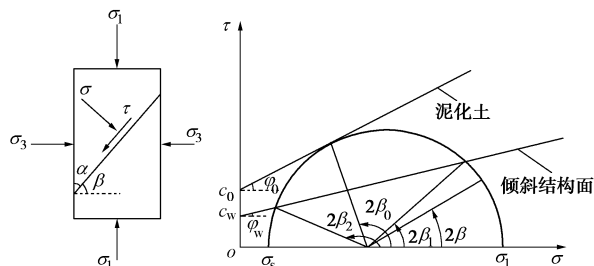


图 4 单结构面理论分析

Fig. 4 Theory of single structural plane

软弱夹层结构面与最小主应力夹角为 β ，根据 Jaeger 单结构面理论，沿结构面产生破坏的条件为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \varphi_w)}{(1 - \tan \varphi_w \cot \beta) \sin 2\beta}, \quad (1)$$

$$\beta = 45^\circ + \frac{\varphi_w}{2}, \quad (2)$$

式中 c_w 、 φ_w 分别为结构面的黏聚力和内摩擦角。

不沿结构面破坏时，破裂面与 σ_1 的夹角为

$$\beta_0 = 45^\circ + \frac{\varphi_0}{2}, \quad (3)$$

式中， φ_0 为完整岩样的内摩擦角。

按照正弦定理求得 β_1 和 β_2 如下：

$$\beta_1 = \frac{\varphi_w}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \varphi_w) \sin \varphi_w}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_w}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \varphi_w) \sin \varphi_w}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (5)$$

β_1 和 β_2 是试件沿结构面破坏的倾角极限值，当结构面倾角介于 β_1 和 β_2 之间时试样将沿结构面破坏，当结构面倾角位于 β_1 和 β_2 范围之外时，试样沿上部泥化土内部破坏。

由式 (1) ~ (5) 可得软弱夹层试样倾斜结构面的黏聚力 c_w 和内摩擦角 φ_w 分别为 36.1 kPa 和 30° ， β_1 和 β_2 分别为 58.3° 和 61.7° 。图 3 中，结构面倾角 β 为 60° 时，倾角结构面介于临界角 β_1 和 β_2 之间，试样最终沿倾斜结构面破坏；其它倾角结构面 (0° ， 30° ， 45°) 位于临界角范围之外，均在试样上部土层材料内破坏。

3 软弱夹层 D-C 模型参数研究

本文以 D-C 模型^[9]为理论基础，结合 Kondner^[10]、Janbu^[11]的研究成果对坝基软弱夹层的本构模型参数进行了研究，求解计算 D-C 模型参数。

限于文章篇幅，仅列出软弱夹层含 45° 倾角结构面情况下 D-C 模型参数求解过程曲线，依据三轴试验结果绘制 $\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线及 $\lg(E_i/p_a) - \lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线，如图 5、图 6；并根据试验结果得到不同倾

角软弱夹层的 D-C 模型参数，见表 2。

表 2 D-C 模型参数

Table 2 Parameters of D-C model					
倾角/(°)	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	K	n	R_f
0	40.5	35.7	53.83	0.7513	0.6899
30	39.4	36.6	67.69	0.9549	0.6638
45	41.5	37.4	71.33	0.8899	0.6935
60	35.5	30.0	48.47	0.8491	0.6439

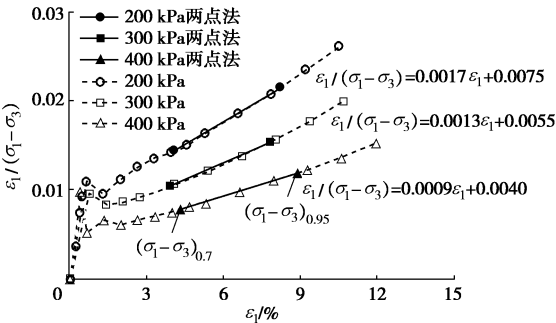


图 5 软弱夹层试样应力应变双曲线关系

Fig. 5 Hyperbola curves of stress-strain of weak-interlayer sample

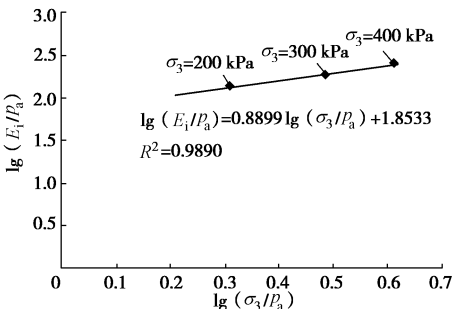


图 6 软弱夹层 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线

Fig. 6 $\lg(E_i/p_a) - \lg(\sigma_3/p_a)$ curves of weak interlayer

由图 5、图 6 可知，采用应力水平 $s=0.7$ 和 $s=0.95$ 的试验数据对 $\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 数据进行拟合，避免了低应力及高应力水平下拟合结果的偏差，随应力水平增加，拟合直线斜率逐步减小，截距也同步减小，对应的试样初始切线模量及极限破坏强度均增加； $\lg(E_i/p_a) - \lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线线性拟合精度 $R^2=0.9891$ ，所求解的模型参数 K 、 n 具有较高的精度，可以较好地反映软弱夹层试样的力学性质。

D-C 模型参数中 c 、 φ 值随软弱夹层结构面倾角的变化规律如图 7 所示。

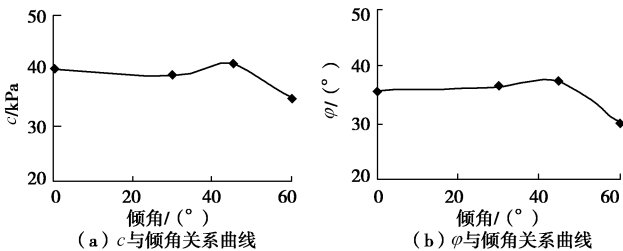


图 7 c 、 φ 值与软弱夹层倾角关系曲线
Fig. 7 Relationship among c 、 φ and inclination angle of weak interlayer

由图 7 可以看出，当倾角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时，软弱

夹层试样抗剪强度参数 c , φ 值随倾角增加变化不大, 当倾角大于 45° 时, 软弱夹层试样抗剪强度参数 c , φ 值随倾角增加而减小, 表明软弱夹层试样存在某一临界倾角, 当结构面倾角超过临界倾角时, 试样抗剪强度会有较大程度的降低。

本文对坝基不同倾角软弱夹层的破坏模式及 D-C 模型参数的研究成果, 对李家嘴大坝坝基抗滑稳定性设计计算有一定的参考价值。

4 结 论

三轴试验相较于直剪试验能更加准确地揭示破坏面的真实性状, 本文采用三轴压缩试验对不同倾角软弱夹层的破坏模式及本构模型参数进行了研究, 得到以下主要结论:

(1) 含倾斜结构面软弱夹层试样的应力应变关系曲线并未呈现明显的软化特性, 且随分级荷载的增加, 试样峰值强度逐步提高, 当试样累计应变达到 25% 左右时, 试样应力应变关系曲线趋于平缓, 倾角为 60° 的试样峰值强度明显低于其它倾角结构面试样。

(2) 当倾角为 0° 时, 试样为鼓状破坏; 当倾角为 30° , 45° , 60° 时, 试样破坏模式为斜面剪切破坏; 倾斜结构面的存在改变了软弱夹层试样的破坏模式。

(3) 试样沿结构面破坏时极限倾角范围为 $58.3^\circ \sim 61.7^\circ$, 当结构面倾角介于极限倾角范围之内时, 试样将会沿结构面破坏, 此时的强度值取决于结构面材料的强度值; 当结构面倾角位于极限倾角范围之外时, 试样在软弱夹层上部泥化土内部破坏, 此时的强度值取决于泥化部分土的强度。

(4) 取应力水平为 $s=0.7$ 和 $s=0.95$ 两点数据对试验整体 $\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线进行拟合, 具有较高的精度, 可以较为简便直观求解 D-C 模型参数, 研究成果对同类软弱夹层工程问题具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 董遵德, 袁澄文. 岩体软弱夹层现场慢剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, **13**(2): 149 - 159. (DONG Zun-de, YUAN Cheng-wen. Researches for controlled displacement-rate shear test in situ in rockmass soft intercalation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, **13**(2): 149 - 159. (in Chinese))
- [2] 袁天华, 席福来, 努尔哈斯木. 新疆某水利枢纽工程软弱结构面抗剪强度参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊 1): 223 - 226. (YUAN Tian-hua, XI Fu-lai, NU Erhasimu. Research into parameters of shear strength for a key water conservancy project in Xinjiang[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S1): 223 - 226. (in Chinese))
- [3] 闫汝华, 樊卫花. 马家岩水库坝基软弱夹层剪切特征及强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(22): 3761 - 3764. (YAN Ru-hua, FAN Wei-hua. Shear properties and strength of weak intercalated layers dam foundation of Majiayan reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(22): 3761 - 3764. (in Chinese))
- [4] 许宝田, 阎长虹, 陈汉永, 等. 边坡岩体软弱夹层力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11): 3077 - 3081. (XU Bao-tian, YAN Chang-hong, CHEN Han-yong, et al. Experiment study of mechanical property of weak intercalated layers in slope rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(11): 3077 - 3081. (in Chinese))
- [5] 许宝田, 阎长虹, 刘军熙, 等. 边坡岩体软弱夹层剪切变形本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 2): 65 - 69. (XU Bao-tian, YAN Chang-hong, LIU Jun-xi, et al. Study of shear deformation constitutive model of weak intercalated layers in slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S2): 65 - 69. (in Chinese))
- [6] 宋彦琦, 李 名, 刘 江, 等. 含不同倾角天然软弱夹层的大理岩破坏试验[J]. 中国矿业大学学报, 2015, **44**(4): 623 - 629. (SONG Yan-qi, LI Ming, LIU Jiang, et al. Experimental test on marble containing natural weak interlayer of different angles[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, **44**(4): 623 - 629. (in Chinese))
- [7] 张本蛟, 黄 斌, 傅旭东, 等. 水泥土芯样强度变形特性及本构关系试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(12): 3417 - 3424. (ZHANG Ben-jiao, HUANG Bin, FU Xu-dong, et al. An experimental study of strength and deformation properties of cemented soil core sample and its constitutive relation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(12): 3417 - 3424. (in Chinese))
- [8] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rocks[J]. Geology Magazine, 1960, **97**(1): 65 - 72.
- [9] DUNCANJ M, CHANGC Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, **96**(SM5): 1629 - 1653.
- [10] KONDNER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, **89**(1): 115 - 144.
- [11] JANBU N. Soil compressibility as determined by odometer and triaxial tests[C]// Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wiesbaden, Germany, 1963: 19 - 25.

(责编: 明经平)