

泥质软岩高边坡湿化稳定性研究

Study on slaking stability of excavated high slope of argillaceous soft rock

陈晓平¹, 茜平一², 梁志松², 张芳枝²

(1. 暨南大学 土木工程系, 广东 广州 510632; 2. 广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510635)

摘要: 以一实际泥质软岩高边坡为分析对象, 通过原状土样的室内试验成果分析了该种土体的特殊力学特性; 采用 Bishop 圆弧滑动法对边坡在天然状态、残余强度状态、湿化状态下的整体稳定性进行了计算; 根据试验得到的 Duncan 模型参数对边坡在不同应力状态下的非线性应力-应变特征进行了有限元分析; 并在不改变模型参数和计算方法的前提下对加固后的边坡进行了相应的计算, 所得出的结果与边坡实际运行状态吻合, 表明泥质软岩边坡的设计与分析必须考虑水的入渗和卸荷松弛所导致的土体强度的衰减。

关键词: 泥质软岩; 开挖边坡; 湿化稳定; 非线性应力-应变

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)05-0543-05

作者简介: 陈晓平(1957-), 女, 山东青岛人, 博士后, 教授, 博士生导师。主要从事土力学与地基基础工程方面的教学与研究。

CHEN Xiaoping¹, QIAN Ping-yi², LIANG Zhi-song², ZHANG Fang-zhi²

(1. Department of Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The slaking stability of an excavated high slope of argillaceous soft rock is systematically studied. Based on the laboratory test results of undisturbed sample, the special mechanical characteristics are analyzed. The Bishop's circular arc analysis is used to calculate the overall stability of slope in the natural state, residual shear strength state, as well as slaking state. According to the coefficients of Duncan model gained by laboratory tests, the nonlinear stress-strain characteristics of the excavated high slope under different stress state is studied by finite element method. Moreover, strengthened slope is calculated and analyzed using homologous model and coefficients. The results reveal that it is identical with the slope in the real state. The conclusion can be drawn that the strength attenuation due to rainfall infiltration and decompression relaxation must be taken into account in the design and analysis of argillaceous soft rock slope.

Key words: argillaceous soft rock; excavated slope; slaking stability; nonlinear stress-strain

0 前言*

泥质软岩是指富含黏土矿物的强风化岩, 大多已失去母岩特性, 具有一些特殊的结构特征和力学特性^[1,2], 在此土质上形成开挖边坡时将面临许多诱发失稳的因素, 湿化变形是其中的一个重要因素。

根据一些具体工程的观察, 发现泥质软岩湿化变形的某些特征与膨胀土有一定的相似, 由此常导致一些带绝对性的观点, 认为软岩就是一种具有软弱、松散、破碎和遇水膨胀等特性的岩体, 其实由于所含矿物的不同, 有些泥质软岩的膨胀性往往是比较低的。

对于本文的泥质软岩, 通过对典型土样的电子扫描和 X 射线衍射鉴定, 显示该边坡涉及的风化泥质软岩的矿物组成包括以石英、云母为主的碎屑矿物和以高岭石为主的黏土矿物。室内试验表明, 土体的自由膨胀率均在 20% 以下, 最大的无荷线膨胀率只有 0.4%。根据膨胀土的现行规范, 该土体达不到弱膨胀土的下限值(分别为 30% 和 0.7%), 显然, 吸水崩解并不是本工程土体坍塌的主要原因, 这与一般的膨胀岩不同。

开挖边坡, 特别是较高边坡的稳定性问题已有较多的研究, 研究的内容涉及多个方面, 其中包括土体卸荷松弛后的应力状态^[3]和折减强度的有限元分析方法^[4-6]等。本文在综合考虑泥质软岩的力学特性和稳定分析方法的基础上, 对此问题作一较系统的研究。

1 泥质软岩的物理力学特性

1.1 岩土分层及工程概况

某泵站位于残丘及山前河流冲、堆积地貌, 地层主要由第四系人工填土层、冲积层及下伏侏罗系中统塘厦群上亚群泥质粉细砂岩组成, 自上而下为: ①人工填土, 含少量碎石, 呈松散-稍密状态; ②、③粉质黏土, 呈可塑状态; ④-1 全风化泥质粉砂岩, 呈粉质黏土状; ④-2 全风化泥质粉砂岩, 风化不均, 含有较多黏土矿物, 原岩结构不清, 未遇水时呈硬塑-坚硬状; ⑤强风化泥质粉砂岩, 局部夹有黑色炭质泥岩, 岩质软

* 基金项目: 广东省东-深供水改造工程资助项目(DSJZ-KJ-019); 广东省自然科学基金资助项目(021145)

收稿日期: 2002-11-10

表 1 基本物理指标

Table 1 Physical indexes of soil

层号	土名	w / %	G_s	ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	ρ_d /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	n / %	e	S_r / %	w_p / %	w_L / %	I_P / %	I_L
④-2	全风化泥质粉砂岩	27.5	2.76	1.92	1.51	45.6	0.84	97.1	26.8	42.9	16.2	0.043
⑤	强风化炭质泥岩	24.4	2.77	1.97	1.58	42.9	0.76	92.3	26.7	42.0	15.3	0.15

表 2 不同试验条件下的强度指标

Table 2 Strength indexes under different test conditions

层号	土名	三轴试验			反复直接剪切试验						
		固结排水强度			峰值强度		残余强度		强度衰减		剪切面
		c_{cd}/kPa	$\varphi_{cd}/(^{\circ})$	$w/\%$	c_d/kPa	$\varphi_d/(^{\circ})$	c_r/kPa	$\varphi_r/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	含水率/ %
④-2	全风化泥质粉砂岩	12.0	27.7	23.6	9.65	23.7	8.40	17.27	13.0	27.1	26.0
⑤	强风化炭质泥岩	14.0	29.8	18.3	11.6	23.4	8.50	16.70	26.7	28.6	25.1

弱,具有失水龟裂,易碎的特征;⑥弱风化粉细砂岩,岩质稍硬。泵站引水渠段永久性挖方边坡共分5级,高达50多m,网状裂隙发育,边坡土质从上至下分别为④-2、⑤、⑥层。边坡开挖过程中及开挖后多次出现局部隆起、坍塌现象,且大多出现于降雨后。

1.2 峰值强度与残余强度

边坡失稳的内在原因显然与边坡土性有关,针对滑动体的分布规律和分布范围,从④-2和⑤层现场钻探土进行了多项室内试验,以对该工程所遇的泥质软岩的力学特性作出比较全面的评价。

由所取得的土样确定各层土的基本物理指标的统计均值及强度指标见表1、表2。

表1表明:①天然含水率和天然孔隙比均不算大;②天然密度较大;③土粒比重较大,表明土体中黏土矿物的含量较高;④土体处于饱和状态;⑤塑性指数均不高,表明土体的亲水性并不高;⑥液性指数较小,土体一般处于坚硬和硬塑(或接近硬塑)状态。

表2试验结果表明,在反复剪切过程中,剪切面上的含水率增加,强度随之衰减,其中强风化炭质泥岩的衰减幅度大于泥质粉砂岩,各层土的 φ 值衰减幅度大于 c 值。所以,开挖卸荷后的边坡长期强度将明显低于土体天然强度,并对土体的长期稳定起着控制作用。

1.3 浸水软化强度

将反复剪切后的土样浸水15d后再测其强度参数^[7,8],发现内摩擦角和黏聚力均有衰减,且后者更为显著。图1给出了④-2层典型土样浸水软化后的强度参数及与其峰值强度和残余强度的比较。

图1所示的试验结果表明:相对于土体的天然峰值强度,残余强度 c_r 降低了16%, φ_r 降低了19.5%;浸水软化强度 c_w 降低了56.3%, φ_w 降低了25.2%。所以,对于所研究的开挖边坡来说,边坡土体不仅在产

生滑动后强度有明显降低,而且在长时间浸水后也会由于其软化而使强度进一步降低,正是由于土体的这一特性,才使得降雨入渗成为边坡坍塌的诱发因素。

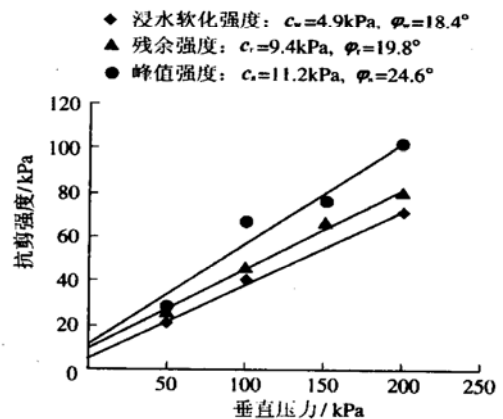


图 1 浸水软化强度与峰值强度和残余强度比较

Fig. 1 The comparison among slaking, natural and residual strength

1.4 非线性应力-应变关系曲线

图2为由典型原状土样三轴排水剪试验所获得的④-2和⑤层土的应力-应变关系曲线,由图可见,典型土样的应力-应变关系均为非线性特征,其中④-2层全风化泥质粉砂岩的变形过程基本呈现应变硬化特征,并随着围压的增加,屈服点逐渐后移,这一变形特征与一般软黏土类似;⑤层强风化炭质泥岩的应力应变关系则表现出一定的应变软化特征,围压越低,这种特征越明显,表明⑤层土更具软岩的力学特性。

2 整体稳定性评价

开挖边坡形成后,根据其滑动特征和失稳状态,采用圆弧滑动法分别对下述5种工况进行整体稳定分析,以确定边坡的整体稳定性。

工况1:采用各层土的天然峰值强度指标;工况2:边坡表层4m厚土层因开挖卸荷达残余强度,采用残

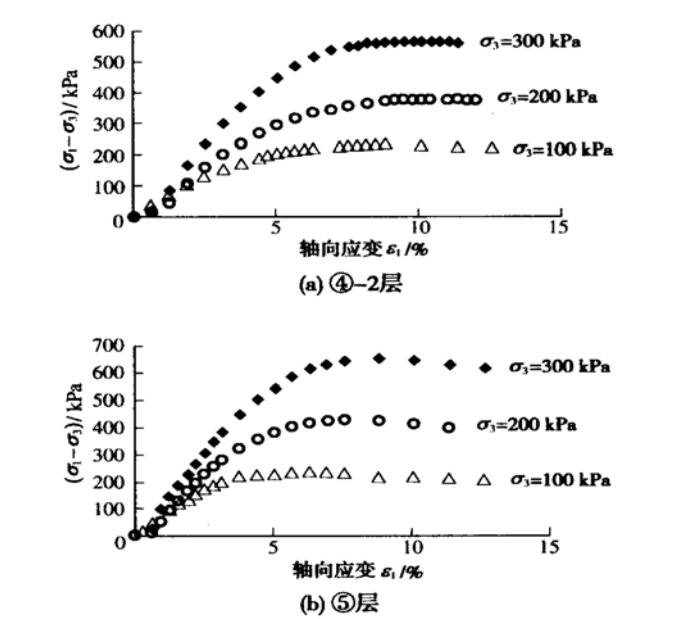


图 2 典型土样的应力-应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain relationship of a typical sample

余强度指标; 工况 3: 边坡表层 4 m 厚土层因雨水入渗达软化强度, 采用浸水软化强度指标; 工况 4: 边坡 ④-2 层土体全部达残余强度, 表层喷锚支护; 工况 5: 边坡 ④-2 层土体全部达软化强度, 表层喷锚支护。

表 3 列出了 5 种工况下的整体稳定安全系数。图 3 为与工况 5 所对应的滑弧位置。

表 3 各种计算工况所对应的整体安全系数

Table 3 Safety factors for the work conditions

计算工况	圆心坐标		半径 R / m	最小安全系数 $F_{\min}$
	X / m	Y / m		
工况 1	65.0	61.0	79	1.258
工况 2	67.0	51.0	87	1.180
工况 3	67.0	56.0	82	1.151
工况 4	62.0	62.0	76	0.751
工况 5	64.0	60.0	78	0.682

计算结果表明: ①边坡开挖后考虑表层土卸荷松弛而导致强度指标衰减时, 边坡的稳定性将降低; ②边坡开挖后考虑降雨入渗造成表层土体软化、强度衰减时边坡的稳定性将进一步降低; ③边坡开挖后当 ④-2

层全部达残余强度时, 采取表层喷锚支护的加固措施无效, 此时边坡的整体稳定性明显得不到保证, 最小安全系数降到 1.0 以下; ④边坡开挖后当 ④-2 层全部达湿化强度时, 整体安全系数进一步降低, 此时采取表层喷锚支护的加固措施亦无效。

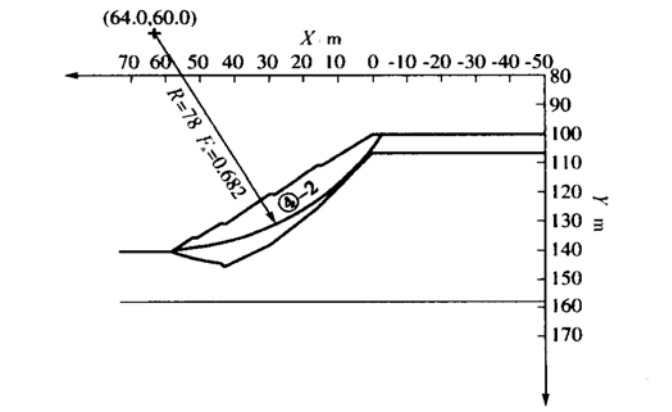


图 3 与工况 5 对应的滑弧位置

Fig. 3 The slip line for slope No. 5

上述计算结果也是对该泵站开挖边坡实际运行状态的客观描述, 表明边坡开挖后开敞的时间越长, 降雨入渗的范围越大, 土层中强度衰减的范围就越大, 边坡的稳定性就越差, 所表现的滑动形式为浅层强度衰减区域内的坡面滑动, 此时仅靠喷锚支护的加固措施并不能提高土体的抗滑能力。

3 应力-应变非线性分析

3.1 计算参数

高边坡的非线性应力-应变分析采用 Duncan 模型, 模型参数由原状土的室内试验确定, 如表 4 所示。

3.2 采用峰值强度计算成果

边坡开挖的实际施工程序是分级开挖, 有限元分析采用逐级卸荷模拟, 图 4 为逐级开挖到坡底时边坡内水平位移、竖向位移的分布曲线。

计算结果表明, 边坡内最大变形和最大应力水平均发生于边坡表面, 其中最大水平位移为 3.75 cm, 最大竖向位移(隆起)为 8.04 cm, 应力水平 S (实际应力

表 4 Duncan 模型参数

Table 4 Parameters of Duncan model

土层	状态	γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	φ / ($^{\circ}$)	c / kPa	R_f	K	n	G	F	D
④-2 层	天然状态	18.80	27.20	12.40	0.55	187	0.48	0.38	0.37	0.06
	湿化状态	8.80	20.3	6.10	0.55	125	0.74	0.38	0.37	0.06
⑤层	天然状态	19.00	31.00	36.00	0.52	201	0.15	0.35	0.23	9.36
	湿化状态	9.00	30.00	18.00	0.52	134	0.84	0.31	0.07	2.55
⑥层	天然状态	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	湿化状态	9.50	0.00	1550.00	0.00	1000	0.00	0.20	0.00	0.00

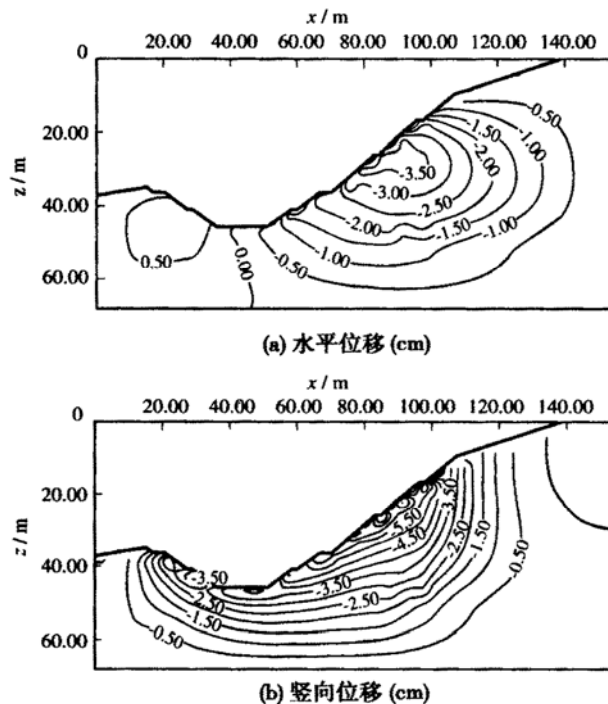


图4 边坡开挖完成后的位移场

Fig. 4 Displacement distribution curves after excavation

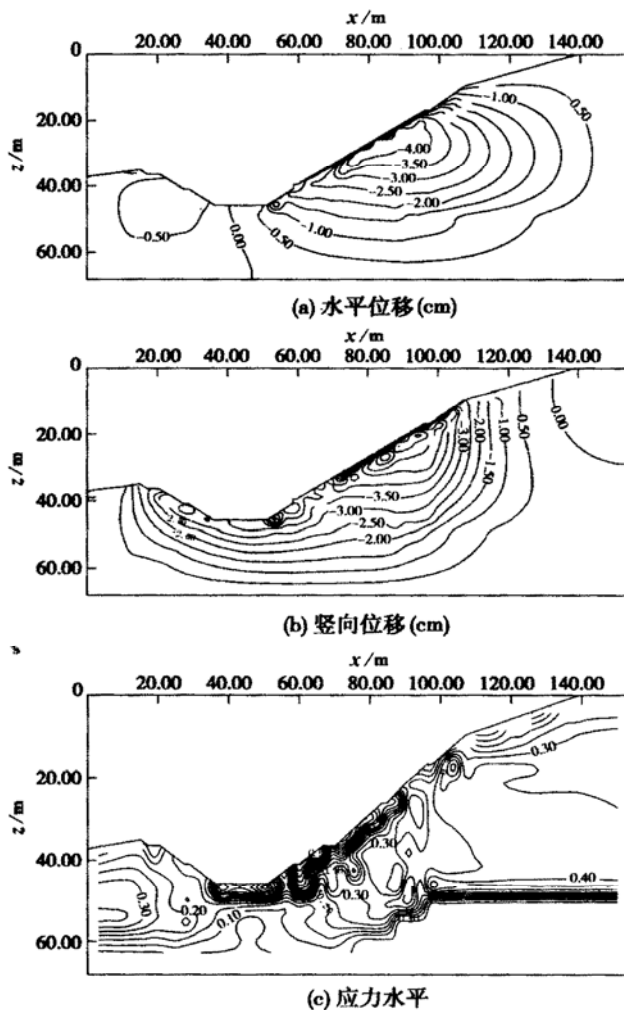


图5 坡面渗水后的位移和应力水平

Fig. 5 The displacement and stress level in the infiltrated slope

状态与破坏应力状态之比) 大多在 0.5 以下, 只有极少数单元达到 $S = 1$ 。所以, 采用峰值强度计算边坡可以得出变形和强度都能满足要求的结论, 这一结果与前面所述整体稳定分析中工况 1 的计算结果相同, 却与边坡开挖后出现多处局部坍塌的实际运行状态不一致。

3.3 开挖后坡面湿化稳定分析

根据前述土工试验结果, 形成该土坡的泥质软岩具有遇水软化的特性。为分析降雨入渗的影响, 采用软化指标按同一模型对边坡进行了稳定分析, 相应的计算结果见图 5。

由图示结果可见, 开挖坡面湿化后最大水平位移增加不明显, 为 4.34 cm; 竖向位移(隆起)沿坡面明显增加, 最大值为 18.48 cm; 变化最显著的是坡面内应力水平, 坡脚和坡面一定深度内出现大面积的 $S = 1$ 的区域, 表明土体的稳定性已得不到保证。

湿化稳定分析结果是与土坡的实际运行状态相吻合的, 该边坡在开挖面形成。坡面未采取任何保护措施期间, 曾由于降雨渗入土坡内部而造成多处失稳。表明土体强度降低后不可避免地导致了土体的稳定性问题。

4 边坡加固措施和分析

为改善土坡的稳定状态, 经多方案比较后, 该工程采取了坡面喷锚支护、坡底加 $D = 1\text{ m}$, $L = 15\text{ m}$ 的抗滑桩、改变坡比、喷锚支护之外堆填块石的综合处理措施, 图 6 为处理后的边坡断面及网格剖分。

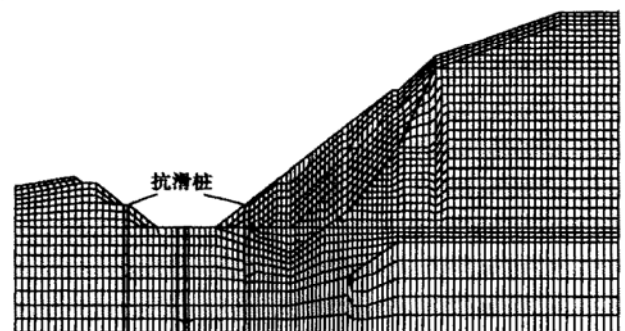


图6 边坡加固后的计算网格

Fig. 6 The calculation mesh in the strengthened slope

采用湿化强度指标和圆弧滑动法对加固后的边坡进行整体稳定分析, 可得最小整体安全系数 $F_s = 1.412$, 满足整体安全要求。

为模拟该边坡工程是在出现多处局部坍塌之后才采取加固措施这一实际运行状态, 对于加固后的边坡的非线性应力-应变分析采用以边坡处理前的湿化分析结果作为初始应力状态, 然后按照与加固前相同的

模型和指标对加固后的边坡进行有限元分析, 所得结果见图7。

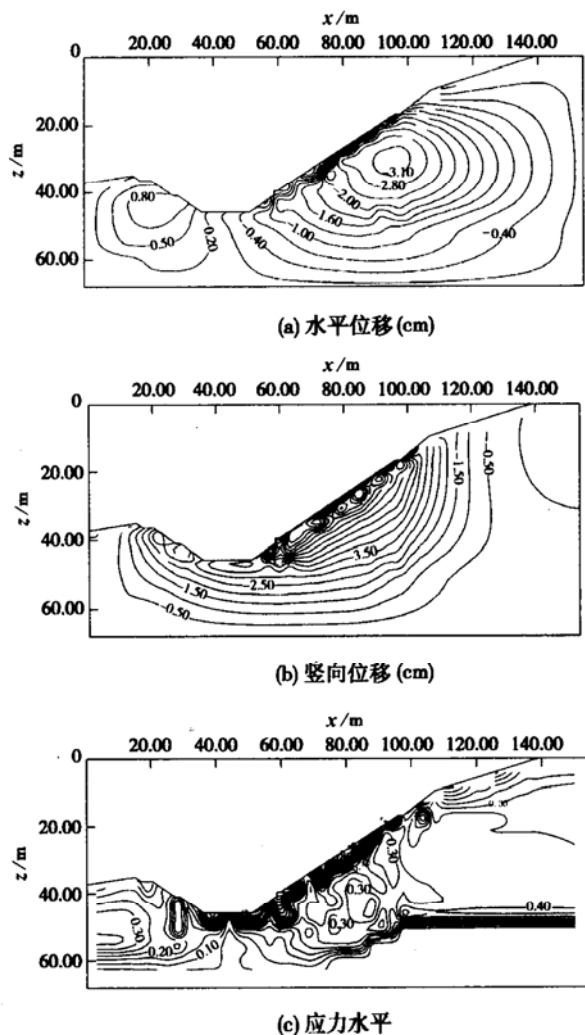


图7 边坡加固后的位移和应力水平

Fig. 7 The displacement and stress level in the strengthened slope

计算结果表明, 土体的最大水平位移和竖向隆起均有所降低(分别为3.23 cm和11.6 cm), 另外, 由于桩与土、坡面堆填块石与土之间的力学特性的明显差异和相互作用, 使得坡体的应力和应变均向桩周和坡面块石集中, 土体内变形和应力有所减小并趋于均化。这种应力集中现象一方面充分利用了桩和块石的强度, 另一方面转移了土体的受力和位移, 使边坡的整体受力得到改善。

显然, 如果该边坡能在开挖后及时采取相应的加固措施, 则坡面失稳的问题是可以避免的。

5 结 语

(1) 开挖高边坡的软质泥岩具有黏土矿物含量高、饱和度高、残余强度低、且遇水软化、黏聚力衰减明显的特征, 对于边坡开挖完成后的稳定极为不利。

(2) 由于土体强度指标的衰减, 开挖后的边坡虽然不会产生深层整体滑动, 但不能满足坡面浅层稳定性的要求, 即使采用喷锚支护的处理措施也不能保证其安全系数大于1.0, 其滑动特征表现为浅层局部。

(3) 由于土体湿化造成的黏聚力降低将导致开挖边坡在坡面、坡角多处出现局部破坏。

(4) 采取边坡加桩和块石回填、放缓边坡的加固措施是有效的, 土坡整体稳定分析结果和非线性有限元分析结果均表明, 加固后的边坡是稳定的。

(5) 根据泥质软岩的强度衰减特性, 在这一类土体上开挖边坡应及时进行坡面防渗等处理, 以保护土体的天然强度。

参加本课题工作的还有匡会健、吴煌峰、黄国怡、宋东辉、吴起星等。

参考文献:

- [1] 费涵昌. 泥岩风化物的工程特性与利用[J]. 工程勘察, 1999, (2): 8-14.
- [2] 林育梁. 软岩工程力学若干理论问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 690-693.
- [3] 黄阳才, 范景伟. 开挖边坡的稳定性研究[J]. 成都科技大学学报, 1995, 82(1): 81-96.
- [4] Matsui T, San K C. Finite element slop stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 59-70.
- [5] 连锁营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407-411.
- [6] Yoshida N, et al. Finite element analysis of softening effect in fissured, overconsolidated clays and mudstones[J]. Canada Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 51-61.
- [7] 孙云志, 黄胜华. 上第三系软岩力学性质试验研究[J]. 人民长江, 2000, 31(5): 37-43.
- [8] 杨文辉, 王小军. 膨胀土(岩)湿化性的试验方法研究[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(1): 29-40.