

文章编号: 1000-582X(2011)12-035-07

软弱夹层力学参数取值规范分析

唐良琴^{1,2}, 刘东燕¹, 聂德新³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 410074;
3. 成都理工大学地质研究所, 四川 成都 610059)

摘要: 软弱夹层的工程地质性质既与地应力、地下水等环境条件有关, 也与其成因性质、粒度成分和矿物成分等有关。试验研究了成因性质、颗粒组成及物质组成相同条件下, 软弱夹层抗剪强度参数随含水量、性状指标(W/W_p)和干密度变化的关系, 并建立了相关方程。结果表明: 夹层强度随含水量和性状指标减小而增大, 随干密度增大而增大。因此, 在对具体工程的软弱夹层进行强度参数取值时要综合考虑夹层在原地条件下的含水量、颗粒组成、粘土矿物成分及所处的地应力环境等因素。并探讨了重力坝规范中仅用粒度成分定量指标选取软弱结构面抗剪强度参数存在的不足之处。

关键词: 软弱夹层; 强度参数; 粒度成分; 物质组成; 稠度状态; 地应力

中图分类号: P645; TU45

文献标志码: A

Discussion on values criterion of strength parameters of weak intercalations

TANG Liang-qin^{1,2}, LIU Dong-yan¹, NIE De-xin³

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;
2. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;
3. Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, P. R. China)

Abstract: The engineering properties of weak intercalations are not only related to the environmental conditions, such as ground stress, ground water, etc., but also to their genesis, granularity composition and mineral composition. Under the same genesis, grain composition and material composition, the relationship between shear strength and water content, properties index (W/W_p), dry density is analyzed by experimental study, and the related equations are established. The results reveal that shear strength increases with the decrease of water content and properties index and the increase of dry density. Therefore, to select strength parameters of weak intercalation in the specific engineering, the factors, such as water content, grain composition, clay mineral composition, and ground stress, should be taken into account. In addition, shortcomings of the strength parameters of weak intercalation that only relies on the quantify index of granularity composition in Design Specification for concrete gravity dams is discussed.

Key words: weak intercalation; strength parameters; granularity composition; consistency state; ground stress

收稿日期: 2011-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072229)

作者简介: 唐良琴(1975-), 女, 重庆大学博士研究生, 主要从事岩土工程、地质工程方向的研究,
(E-mail)tlq129@sohu.com。

软弱夹层是在一定的地质环境条件下形成的,它们经历了地质构造运动的漫长历史,受到了各种地质作用的影响,形成了非均质各向异性的不连续地质体。由于其较差的物理力学性能,大大降低了岩体的强度,使岩体产生过大变形,对大坝坝基和两岸岸坡的稳定性具有控制作用。意大利的瓦依昂大滑坡和法国马尔巴塞坝的失稳破坏都与软弱夹层的存在有着直接的关系。因此,正确、合理地选取软弱夹层强度参数是作好坝基、坝肩岩体抗滑稳定性评价的基础。

现行的电力行业标准《混凝土重力坝设计规范》(DL5108—1999)^[1]、水利行业标准《混凝土重力坝设计规范》(SL319—2005)^[2]和《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487—2008)^[3]等规范中给出了软弱结构面、软弱层和断层力学参数取值范围。但上述规范中,除《混凝土重力坝设计规范》(DL5108—1999)给出了用粒度成分定量指标选取软弱结构面的抗剪强度参数以外,其它规范均未给出量化指标。

以此为依据,在大量试验研究基础上,文中对某重力坝坝址区软弱夹层的强度参数取值进行了深入的探讨。

1 按规范选取软弱夹层强度参数

软弱夹层的物质成分是控制夹层强度的物质基础,采用D/MAX3C型衍射仪对试验区的软弱夹层进行矿物成分分析,其结果表明:该区的软弱夹层粘土矿物成份以伊利石为主。由于软弱夹层物质组成的颗粒大小和各粒组含量多少也是控制软弱夹层工程特性的主要因素,因此,通过颗分试验,获取了代表性软弱夹层的粒度成分(见表1,部分成果)。同时,用塑液限联合测定仪测定其对应的塑限和液限。

根据试验获得的各软弱夹层的粒度成分,按《混凝土重力坝设计规范》(DL5108—1999)中提出的用粒度成分定量指标选取的各主要代表性软弱夹层抗剪强度参数建议值见表1。表1中获得的抗剪断参数值是规范中均值及标准值的大值与低值的平均值。

表1 按重力坝规范用粘粒含量对夹层强度参数取值(部分成果)

试验编号	夹层分布层位	分类名称	粘粒含量/%	粉粒含量/%	砂粒含量/%	抗剪断参数均值		抗剪断参数标准值		塑限	液限
						f'	C' / kPa	f_{dk}	C_{dk} / kPa		
斜井 xjT ₃ ²⁻⁵	T ₃ ²⁻⁵	A1型	37.5	41.0	21.5	0.21	70	0.16	35	16.3	25.5
过河平洞 xhpd-155	T ₃ ²⁻³	A1型	31.5	54.5	14.0	0.21	70	0.16	35	16.0	23.5
河底平洞 pn1	T ₃ ²⁻⁴	A1型	31.0	59.0	10.0	0.21	70	0.16	35	15.3	23.0
过河平洞 xhdpd129	T ₃ ²⁻⁴	A1型	35.5	48.5	16.0	0.21	70	0.16	35	16.5	25.0
PD34xz-67	T ₃ ²⁻⁶⁻²	A1型	34.5	58.0	7.5	0.21	70	0.16	35	15.8	23.5
PD44-53	T ₃ ²⁻⁶⁻³	A1型	30.5	22.0	47.5	0.21	70	0.16	35	15.0	22.5
PD34xz-16	T ₃ ²⁻⁶⁻²	A1型	50.5	47.5	2.0	0.21	70	0.16	35	26.0	38.0
PD28-2	T ₃ ²⁻⁶⁻⁴	A1型	44.7	18.8	36.5	0.21	70	0.16	35	23.5	39.0
河底平洞 hdpd152	T ₃ ²⁻⁵	A2型	25.0	31.5	43.5	0.28	100	0.22	53	11.4	19.0
河底平洞 hdpd215	T ₃ ²⁻⁶⁻¹	A2型	21.5	39.0	39.5	0.28	100	0.22	53	12.0	20.0
PD47-169	T ₃ ²⁻⁶⁻²	A2型	26.0	46.5	27.5	0.28	100	0.22	53	16.3	25.7
PD44-139	T ₃ ²⁻⁶⁻³	A2型	17.5	21.0	61.5	0.36	100	0.29	53	14.5	22.5

把表1中的强度参数取值结果与现场强度试验成果相比较,表1中的强度参数值基本上相当于各软弱夹层处于塑态时的强度参数值。而在实际工程中,软弱夹层泥化的可能性与夹层的应力环境有

关^[4-10]。根据现场河床两岸各平洞所取得的软弱夹层的物理性质参数来看,几乎所有夹层都处于固态,没有泥化现象。对于河床坝基下的夹层,在一定深度以下,由于上覆岩体的自重和构造应力的作用,软

弱夹层泥化也是不切实际的。因此,表 1 中仅根据粒度成分评价的夹层强度参数明显偏低。

分析其原因,影响软弱夹层强度的因素除了粒度成分外,还有物质成分、含水量、夹泥性状、地应力等多种因素^[11-12]。显然,规范没有充分考虑到这一点。

2 用软弱夹层粒度成分进行强度参数取值的讨论

重力坝设计规范提出的以粒度成分定量指标评价软弱夹层强度参数是根据多个工程资料统计分析得到的,用这种标准可以较方便地得到夹层的强度参数值,但它没有考虑夹层的状态特征,夹层在原地条件下的含水量、粘土矿物成分和夹层所处的地应力环境等因素。

2.1 当软弱夹层颗粒组成、物质组成一定,含水量不同时软弱夹层强度参数的变化特征

1) 具有高粘粒含量(A1 型)的软弱夹层的强度特征随含水量变化的关系

选取该坝址斜井 0+91 m 处 T_3^{2-5} 软弱夹层,保持试样始终在相同的粒度成分和干密度条件下,分别制成不同含水量进行剪切试验,得到的强度参数列于表 2。可以看出,随着含水量的降低,软弱夹层的强度增高,当含水量在 14.8%~16.5% 左右时,夹泥的 $f' = 0.17 \sim 0.24$, $C' = 20.9 \sim 47$ kPa,若用保证率 80% 取值,则与重力坝设计规范建议标准值接近,当含水量继续减小, f' 、 C' 、 f_{dk} 、 C_{dk} 均继续上升,显然仅用粘粒含量来选取夹层的强度尚存在一些不足之处。

表 2 斜井 $x_j T_3^{2-5}$ 软弱夹层不同含水量的强度试验成果

样号	密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	含水量 w /%	抗剪断强度均值		抗剪断强度标准值		颗粒组成的含量/%			塑限
			f'	C'/kPa	f_{dk}	C_{dk}/kPa	0.074~2.0	0.005~0.074	<0.005	
斜井	2.138	18.01	0.116	7.3	0.106	5.7				
	2.169	16.53	0.173	20.9	0.149	17.8				
	2.219	14.58	0.241	47.7	0.202	39.3	21.5	41.0	37.5	16.3
$x_j T_3^{2-5}$	2.275	13.88	0.336	58.7	0.308	52.0				
	2.320	11.99	0.393	63.1	0.353	53.0				
	2.380	10.76	0.538	107.5	0.487	93.4				

上述 6 组试验成果的 f' 、 f_{dk} 、 C' 、 C_{dk} 与 w 的相关曲线见图 1、图 2,从图中可以看出当粒度成分一定时夹层夹泥强度与含水量具有很好的相关性,相关性系数都在 0.94 以上,其相关关系式见图 1、图 2 中标注的方程。由相关曲线和相关关系式可知:随含水量降低,其强度迅速增高。这说明含水量对软弱夹层夹泥强度的影响较大^[13-19],同时也说明粒度成分相同的软弱夹层,强度参数不会始终是一个不变的量。由于相关关系式是在一定含水量区间(10.76%~18.01%)建立的,因此使用相关关系式计算强度参数时也应在这—区间范围内。现场测得 T_3^{2-5} 的原状样含水量在 10.98%~15.12% 之间,在关系式适用区间内。

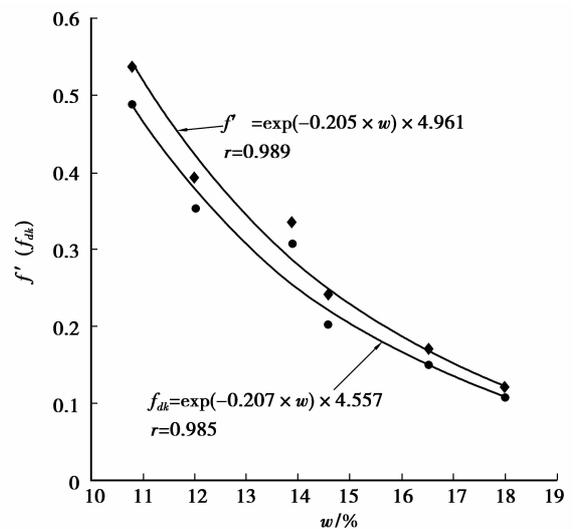


图 1 斜井 $x_j T_3^{2-5}$ 软弱夹层含水量与摩擦系数关系曲线

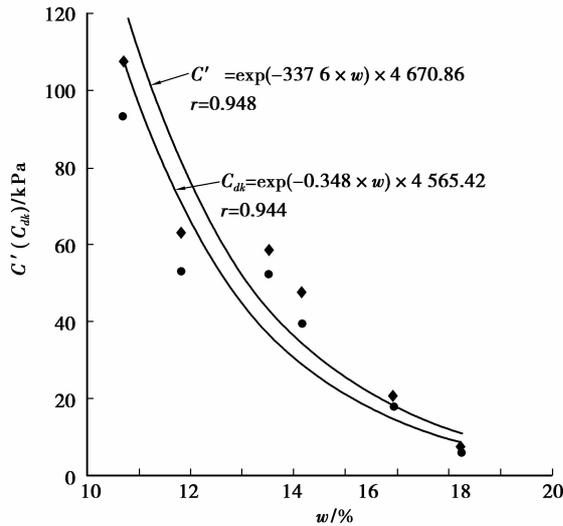


图 2 斜井 xjT₃⁻⁵ 软弱夹层含水量与内聚力关系曲线

表 3 河底平洞 215 m 处软弱夹层不同含水量的强度试验成果

样号	密度 /(g · cm ⁻³)	含水量 w /%	抗剪断强度均值		抗剪断强度标准值		颗粒组成的含量/%			塑限
			f'	C'/kPa	f _{dk}	C _{dk} /kPa	0.074~2.0	0.005~0.074	<0.005	
河底平洞 hdpd215	2.021	17.82	0.329	8.0	0.266	2.1				
	2.027	16.18	0.335	9.6	0.289	3.9				
	2.066	12.89	0.454	20.9	0.407	14.8				
	2.068	12.46	0.482	31.6	0.458	25.5	39.5	39.0	21.5	12
	2.107	11.71	0.555	45.8	0.536	41.0				
	2.133	11.16	0.628	43.5	0.590	33.7				
	2.179	9.80	0.654	78.4	0.610	66.6				

将各组试件的含水量、摩擦系数绘制成散点图(图 3、图 4),并进行相关分析,二者相关性良好,其相关关系式见图 3、图 4 中标注的方程。若要使得其强度参数达到规范中的取值,由相关关系式计算

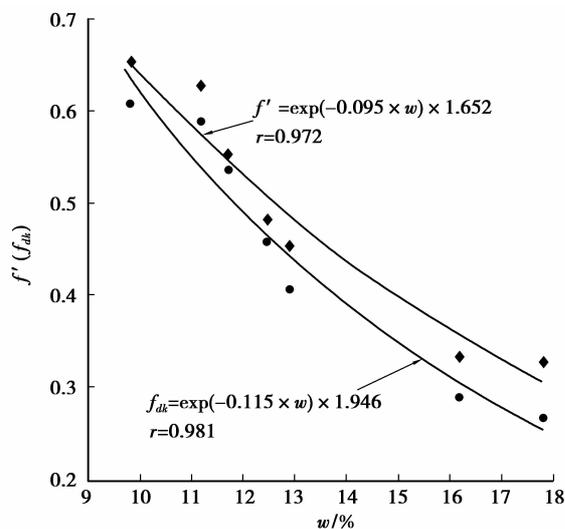


图 3 河底平洞 215 m 软弱夹层含水量与摩擦系数关系曲线

2) 具有较低粘粒含量(A2 型)的软弱夹层强度特征随含水量变化的关系

选取该重力坝坝址区河底平洞 215 m 处的软弱夹层,在室内制成相同干密度而不同含水量进行剪切强度试验,成果见表 3。从表 3 中可知,软弱夹层的强度参数值随含水量的变化而变化。当含水量为 10% 左右时,夹泥的 f' 和 C' 值高达 0.65 和 78.47 kPa,用保证率 80% 获得的强度参数标准值为 0.61 kPa 和 66.6 kPa,其结果远大于规范取值。尽管含水量增加到接近 18% 时, f'、f_{dk} 仍然高于规范值,分别 0.329 和 0.266。显然仅用粘粒含量来选取夹层的强度参数尚存在一些不足之处。

得出的含水量则高达 18%,此时夹层已经泥化,这与现场实际情况不相符合,现场测得原状样的含水率为 9.81%~10.59%。

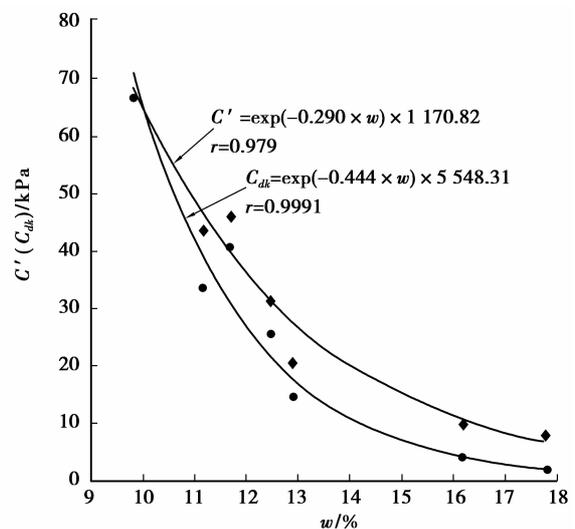


图 4 河底平洞 215 m 处软弱夹层含水量与内聚力关系曲线

2.2 当软弱夹层的颗粒组成、物质组成一定,其强度与性状的关系研究

工程岩土学和工程地质勘察中用土体的稠度状态指标评价地基土的承载力,实际上说明了土体的状态特征对强度的影响,作为与土体具有一定相似性的软弱夹层,其强度参数也应当与稠度状态有关。专家学者在研究龙羊峡、李家峡、积石峡等水电站坝址的软弱结构面时,曾引用夹泥的天然性状指标(W/W_p)来评价夹泥的抗剪强度^[20-22], W 为天然围压状态下的含水量,与密度、孔隙比及赋存环境有关。 W_p 为塑限含水量,其大小受粘土矿物成分及含量的控制。 $W/W_p < 1$ 时,夹泥呈固态; $1 < W/W_p < W_L/W_p$ 时,夹泥呈塑态; $W/W_p > W_L/W_p$ 时,夹泥呈液态。 W/W_p 既能反映夹泥的含水量、密实度、赋存环境,又能间接反映粘土矿物成分及含量,还能反映夹泥所处的稠度状态,它是一个具有综合代表性的指标。因此,这里仍采用性状指标(W/W_p)来研究这一问题。

选用该重力坝坝址区斜井中 T_3^{2-5} (A1 型)、河底平洞 215 m (A2 型)处软弱夹层试样来研究这一问题。

将软弱夹层夹泥制成不同性状的试样进行强度试验,得到不同稠度状态下软弱夹层的强度参数。将这些成果资料绘制成散点图(图 5~图 6)并进行相关性分析,其相关方程见图中标注。从相关曲线和相关方程可知:它们的相关性很好,其相关性系数均在 0.97 以上。无论哪一类型的夹层,当 W/W_p 在一定区间范围内,夹层强度参数值均随着性状指标的增大而明显降低。在 W/W_p 大于 1 时,夹层泥化,变化趋势减缓。这表明当物质组成和粒度成分

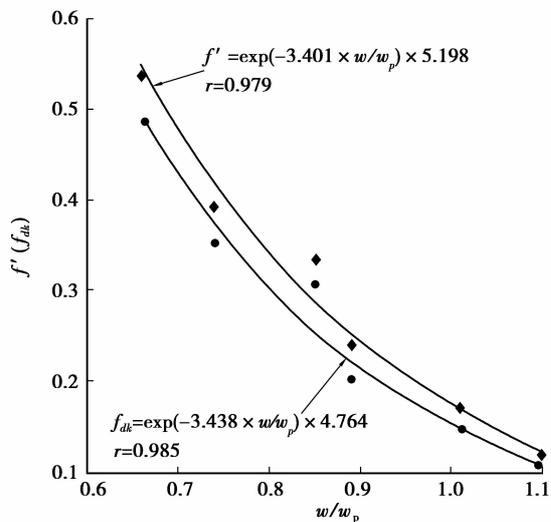


图 5 斜井 xjT_3^{2-5} 软弱夹层摩擦系数与性状指标的关系曲线

一定时,软弱夹层夹泥的强度并不是一个定值,而是随软弱夹层状态的变化而有很大变化,规范中没有考虑这一问题。

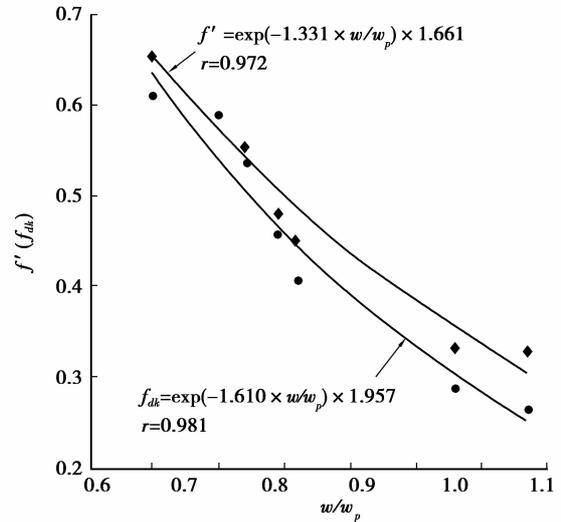


图 6 河底平洞 215 m 处夹层摩擦系数与性状指标的关系曲线

2.3 当软弱夹层颗粒组成、物质组成一定,不同干密度条件下软弱夹层强度特征

仍选用该重力坝坝址区的斜井 T_3^{2-5} (A1 型)软弱夹层和河底平洞 215 m 处 (A2 型)软弱夹层的试样进行强度试验。将试样配制成不同干密度的重塑样进行剪切试验,并将试验成果绘制成散点图(图 7~图 8)并进行相关性分析。同样可以看出当粘粒含量一定时,软弱夹层夹泥的强度与干密度具有良好的相关性,相关性系数均在 0.95 以上,其相

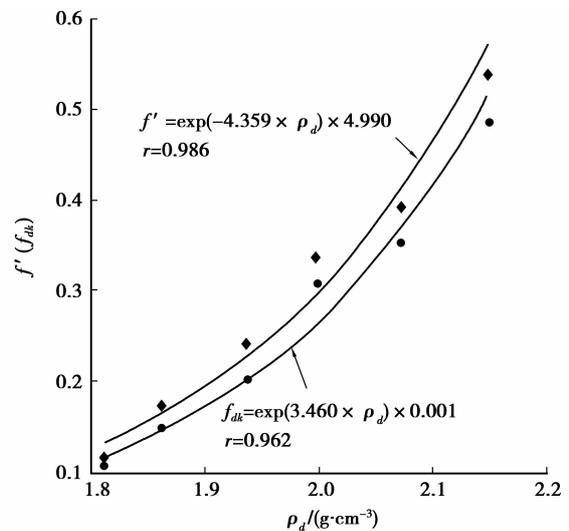


图 7 斜井 xjT_3^{2-5} 软弱夹层干密度与强度参数关系曲线

关关系式见图中标注的方程。而且,不论是哪种类型的软弱夹层,强度参数都具有随着干密度的增高而呈现增大的趋势。这表明当物质组成一定时,软弱夹层的强度受自身的干密度的影响^[11,19,23-24],不考虑这一基本因素去评价强度参数,也是不太合理的。

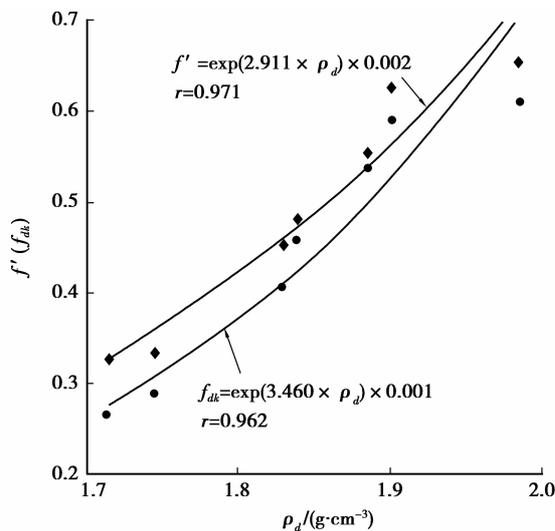


图8 河底平洞 215 m 软弱夹层干密度与强度参数关系曲线

3 结 语

研究表明,重力坝设计规范中提出的仅用粒度成分对软弱夹层进行强度取值,尽管对软弱夹层强度参数的选择提供了量化指标以及类比依据,但其取值未考虑影响夹层强度的种种因素(如含水量、粘粒成分、夹层性状、干密度等)。同时还发现,即使是同一类型的软弱夹层,粒度成分含量在同一区间(如A2型夹层的粘粒含量10%~30%之间),即使其它条件基本相同时,也会因在同一区间的取值差异,造成夹层强度差异较大。例如该重力坝坝址区的PD47-169处夹层和PD44-139处的夹层,当含水量都为18%时,前者的摩擦系数均值为0.207,后者为0.452。因此,在对具体工程软弱夹层强度参数取值时,应综合考虑夹层所处环境条件下的物理性状、应力状态,并结合现场原位大剪试验成果进行综合分析。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国电力行业标准. 混凝土重力坝设计规范: 中国, DL5108-1999 [S]. 1999-07-01.
[2] 中华人民共和国水利行业标准. 混凝土重力坝设计规

范: 中国, SL319-2005 [S]. 2005-06-09.

- [3] 中华人民共和国国家标准. 水利水电工程地质勘察规范: 中国, GB50487-2008 [S]. 2009-08-01.
[4] HO SH IINO K. Mechanism of lithification and cementation of the rocks, and its strength [C]// Proceedings of the 7th Japan Symp on Rock Mechanics, Dec. 1-2, 1987, Tokyo, Japan. [S. l.]: IEEE Press, 1987: 1-6.
[5] 张兴仁. 围压效应在工程地质研究中的意义[J]. 四川水利发电, 1990(2): 29-33.
ZHANG XING-REN. Research significance about the effect of confining pressure to engineering geology[J]. Sichuan Water Power, 1990 (2): 29-33.
[6] 胡卸文. 无泥型软弱层带物理性质的围压效应[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 86-90.
HU XIE-WEN. Confining pressure effect to physical property of no clay weak interbed [J]. Journal of Mountain Research, 1999, 17(1): 86-90.
[7] 张咸恭, 聂德新, 韩文峰. 围压效应与软弱夹层泥化的可能性分析[J]. 地质论评, 1990, 36(2): 160-166.
ZHANG XIAN-GONG, NIE DE-XIN, HAN WEN-FENG. The effect of confining pressure and the possibility of argillization of weak intercalation [J]. Geological Review, 1990, 36(2): 160-166.
[8] 聂德新. 地应力对夹泥抗剪强度的影响[C]//1983年全国水电中青年科技干部报告会论文集. 北京: 水利水电出版社, 1985.
[9] 聂德新, 符文熹, 任光明, 等. 天然围压下软弱层带的工程特性及当前研究中存在的问题分析[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 298-302.
NIE DE-XIN, FU WEN-XI, REN GUANG-MING, et al. Analysis of engineering properties of weak layer zone under natural confining pressure and the existing problems in the present studies [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7 (4): 298-302.
[10] 符文熹, 聂德新, 尚岳全, 等. 地应力作用下软弱夹层的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 584-587.
FU WEN-XI, NIE DE-XIN, SHANG YUE-QUAN, et al. Study on engineering properties of weak layers under ground stresses [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 584-587.
[11] 姜景山, 刘汉龙, 程展林, 等. 密度和围压对粗粒土力学性质的影响[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(8): 46-50.
JIANG JING-SHAN, LIU HAN-LONG, CHENG ZHAN-LIN, et al. Influences of density and confining pressure on mechanical properties for coarse-grained soils [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(8): 46-50.

- [12] VAU G P R. Engineering behavior of weak rocks: some answers and some questions [C]//Selected Papers on Geotechnical Engineering of Hard Soils & Soft Rocks. Rotterdam: Thomas Telford Ltd., 1993: 1741-1765.
- [13] 刘彬, 聂德新. 断层泥强度参数与含水率关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2164-2167.
LIU BIN, NIE DE-XIN. Study on relation between strength parameter and water content of gouge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2164-2167.
- [14] 梁斌, 莫凯. 不同含水率下重塑红黏土抗剪强度特性的研究[J]. 山西建筑, 2010, 36(4): 101-102.
LIANG BIN, MO KAI. Research on remodelling red clay's shear strength with different moisture ratio [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(4): 101-102.
- [15] 张林洪, 靳娟娟, 丁磊, 等. 高含水率土体强度与含水率和密度的关系研究[J]. 云南水力发电, 2010, 26(2): 42-44.
ZHANG LIN-HONG, JIN JUAN-JUAN, DING LEI, et al. The Study of the relations between strength and percent moisture content and density of an earth mass with high percent moisture content [J]. Yunnan Water Power, 2010, 36(4): 101-102.
- [16] 周永昆, 魏作安, 朱彬, 等. 滑带土厚度及含水率对其强度参数的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(2): 25-29.
ZHOU YONG-KUN, WEI ZUO-AN, ZHU BIN, et al. Study on the effect about interlayer thickness and water content to the strength parameters of landslide soil [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(2): 25-29.
- [17] 刘纪峰, 卢明师. 含水率对边坡土性及其稳定性的影响[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2010, 31(3): 63-66.
LIU JI-FENG, LU MING-SHI. Influence of soil water content on its properties and slope stability [J]. Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science, 2010, 31(3): 63-66.
- [18] 魏厚振, 汪稔. 蒋家沟砾石土不同含水率直剪强度特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 221-224.
WEI HOU-ZHEN, WANG REN. Strength behaviour of gravelly soil with different water content in Jiangjiagou ravine [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 221-224.
- [19] 刘小文, 常立君, 耿小牧, 等. 含水率、干密度对红土强度影响规律的试验研究[J]. 公路, 2008(12): 154-156.
LIU XIAO-WEN, CHANG LI-JUN, GENG XIAO-MU, et al. Experiment and study on influencing law of different water content and dry density for strength of laterite [J]. Highway, 2008(12): 154-156.
- [20] 陆栋梁. 黄河积石峡水电站软弱夹层工程地质特性研究[J]. 甘肃电力, 1995, 3(2): 34-41.
LU DONG-LIANG. The research of engineering geology characteristic of weak intercalated in hydroplant dam of Yellow River Jishixia [J]. Journal of Gansu Power, 1995, 3(2): 34-41.
- [21] 万宗礼, 聂德新. 坝基红层软岩工程地质研究与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 186-200.
- [22] 唐良琴, 聂德新, 任光明. 软弱结构面粒度成分与抗剪强度参数的关系探讨[J]. 工程地质学报, 2003, 11(2): 143-147.
TANG LIANG-QIN, NIE DE-XIN, REN GUANG-MING. Discussion on the relational between granulometric composition and shear strength parameter of weak structural [J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(2): 143-147.
- [23] 俞缙, 林从谋, 周亦涛. 干密度对黄土强度及其切线模量的影响[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2009, 27(4): 487-489.
YU JIN, LIN CONG-MOU, ZHOU YI-TAO. Effects of dry density on loess's strength and tangent modulus of deformation [J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2009, 27(4): 487-489.
- [24] 李振, 邢义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2255-2260.
LI ZHEN, XING YI-CHUAN. Effects of dry density and percent fines on shearing strength of sandy cobble and broken stone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2255-2260.

(编辑 陈移峰)