

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.04.017

松散堆积体水下稳定坡角与粒度成分的关系

刘娟,胡卸文,王军桥,杜映锦,杨铁

(西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031)

摘要 结合西南某龙头水库工程,在查明库区岸坡不同成因、不同粒度成分的坡体结构基础上,对水库运行中不同松散堆积体边坡的水下稳定坡角进行实测,并在相应部位进行粒度分析,采用分形理论得出不同堆积体粒度成分的综合表征值,统计了细粒质量分数,利用该综合表征值以及细粒质量分数,建立不同松散堆积体粒度成分与水下稳定坡角之间的 2 个相关关系表达式。基于这 2 个表达式,只需测定库区各种不同松散堆积体粒度成分即可确定其相应的水下稳定坡角,从而进行坍岸范围预测。

关键词 松散堆积体边坡 水下稳定坡角 粒度成分 坍岸预测

中图分类号 :TV697.2 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2010)04-0071-05

Relationship between underwater stable slope angle and granularity composition of loose deposits//LIU Juan, HU Xie-wen, WANG Jun-qiao, DU Ying-jin, YANG Tie (*School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

Abstract : Combined with a main reservoir project in southwest China and based on investigating the slope structure of different causes and granularity composition, the underwater stable angles of slopes with different loose deposits during the medium-term of reservoir operation were measured, and the granularity composition at corresponding site was analyzed. The comprehensive characteristic values of different deposits were obtained by using the fractal theory, and the content of fine particles was calculated. On such a basis, two expressions for the relationship between the granularity composition and the underwater stable angle were established. Accordingly, as for different loose deposits in reservoirs, only the granularity composition was measured for the corresponding underwater stable slope angle so as to predicate the range of bank collapse.

Key words : loose deposit slope ; underwater stable slope angle ; granularity composition ; bank collapse forecast

目前水库坍岸预测中应用最为广泛的是图解法(两段法),其中水下稳定坡角是图解法预测水库坍岸最重要的影响因素,要使预测结果更符合实际情况,需对库区不同岸坡水下稳定坡角进行准确的测量。结合西南某龙头水库工程,在现场获取不同松散堆积体粒度成分的基础上,基于分形理论得出不同粒度成分的综合表征值以及细粒质量分数,并与野外实测的不同松散堆积体边坡水下稳定坡角进行相关分析,得到不同松散堆积体粒度成分与水下稳定坡角的 2 个相关关系表达式。基于这 2 个表达式,只需测定其粒度成分即可确定其相应的水下稳定坡角,从而进行库岸边坡坍岸范围预测,其成果对很难获得水下稳定坡角地区的坍岸预测具有重要意义。

1 水下稳定坡角测定

目前,在图解法预测坍岸范围的方法中,松散堆积体水下稳定坡角是非常重要的影响因素,而水下稳定坡角主要根据野外大量实测数据确定。本文所指的松散堆积体均是在第四系地质历史时期自然堆积形成,堆积形成时间长久,自身固结压密且稳定性较好,而不针对新近人工堆积体。

西南某龙头水库正常蓄水位 2 140.00 m,在水库运行中期,库区不同成因松散堆积体岸坡坍岸明显,严重影响了坡体上居民的安全及整个环湖公路的正常运营^[1]。随着水库的正常运营,预测库区松散堆积体岸坡坍岸范围非常必要,实地调查显示库区松散堆积体按成因主要为崩坡积、冰水堆积、冰缘冻融

基金项目 国家自然科学基金(40772175,40841025,40972175) ; '十一五'国家科技支撑计划(2008BAG07B01) ;西南交通大学科学研究基金(2008-A01)

堆积,按上述松散层分别选择主沟 1 号堆积体、近坝左岸堆积体、蚂蝗沟 5 号堆积体及昨日沟 3 号堆积体进行分析研究(图 1~4),野外测量中,将以正常蓄水位 2 140.00 m 为界测定水下和水上稳定坡角,并对不同成因堆积体共测定了 43 个剖面,所测的水下稳定坡角值见表 1。



图 1 主沟 1 号崩坡积堆积体



图 2 近坝左岸冰水堆积体



图 3 蚂蝗沟 5 号冰缘冻融堆积体



图 4 昨日沟 3 号靠下游侧冰缘冻融堆积体

表 1 不同松散堆积体水下稳定坡角实测值

成因类型	工程部位	水下稳定坡	
		实测剖面号	坡角/(°)
崩坡积堆积	主沟 1 号	1-1	23.34
		2-2	21.19
		3-3	19.89
	近坝左岸	4-4	24.45
		5-5	26.64
		6-6	27.94
		7-7	28.34
		8-8	33.65
冰水堆积	昨日沟 3 号 (靠上游侧)	9-9	33.79
		10-10	31.85
		11-11	34.76
		12-12	34.83
		13-13	29.04
		14-14	18.01
		15-15	25.39
		16-16	27.79
		17-17	20.36
	蚂蝗沟 5 号	18-18	19.33
		19-19	15.81
		20-20	13.78
		21-21	13.61
		22-22	14.27
		23-23	12.81
		24-24	12.88
		25-25	13.80
		26-26	13.04
		27-27	13.45
冰缘冻融堆积	昨日沟 3 号 (靠下游侧)	28-28	12.63
		29-29	12.84
		30-30	12.17
		31-31	12.86
		32-32	11.04
		33-33	16.13
		34-34	18.24
		35-35	17.76
		36-36	14.47
		37-37	15.54
		38-38	14.25
		39-39	11.74
		40-40	13.00
		41-41	16.22
		42-42	16.43
		43-43	17.08

2 基于分形理论的粒度成分综合表征值

分形理论是由法国数学家曼德勒罗于 20 世纪 70 年代末 80 年代初创立的,该理论的主要内容是研究一些具有自相似性的不规则曲线和位线(线性分形)、具有自反演性的不规则图形、具有自平方性的分形变换以及具有自仿射的分形集等^[2-3]。目前,应用广泛的是自相似性分形,而进行定量描述自相似性分形的参数是分维。分维可用下式表示：

D = lim_{ε→0} lnN / lnε 或 N(ε) ∝ ε^{-D} (1)

式中：ε 为标度；N(ε) 为该标度下所得到的度量值；D 为研究对象的分维。

式(1)亦提供了测定分维的方法,即只要测量一系列的 ε 与相应的 N(ε),在双对数坐标下,N(ε) ~ ε 直线部分的斜率就是所研究对象的分维。

对于土的颗粒组成,假设颗粒的直径为 r,直径大于 r 的颗粒数目为 N(r),若满足式(2),则 D 就是上述的分维。

N(≥ r) = ∫_r^∞ P(r')dr' ∝ r^{-D} (2)

式中:P(r')为粒径 r 的分布密度函数;r'为粒径自变量。

事实上,当式(2)成立时,必须存在 N(r) ∝ N(λr),λ > 0,故 N(= r)与 N(≥ r)是呈正比的,因而式(2)中的 D 与式(1)中的 D 是一致的。

不直接考察直径大于 r 的颗粒数目,而是用相应的质量关系来讨论颗粒分布之分维。

设 M(r)为直径小于 r 的颗粒总质量,M 为整个分析土样的总质量,如果

M(r)/M ∝ r^b (3)

对公式(3)求导得 dM ∝ r^{b-1}dr,对公式(2)求导得 dN ∝ r^{-D-1}dr。

由于粒径的增加与质量的增加是相对应的,则

dM ∝ r^3dN (4)

也即 r^{b-1}dr ∝ r^3r^{-D-1}dr,故分维

D = 3 - b (5)

从上述推导可见,只要在双对数坐标下 M(r)/M ~ r 存在直线段,就表明土的粒度分布具有分形结构。而实际上 M(r)/M 就是粒径小于 r 的颗粒质量分数,这样,只要在 M(r)/M 与 r 的双对数坐标系中求得直线段的斜率 b,即可按式(5)得出粒度成分的分维值^[4-8]。

由于土体粒度成分的复杂性,目前只从定性上分析土体粒度成分的综合表征,缺乏合适的定量描述参数,分形理论解决了该问题,分维作为描述土体粒度成分特征的参数,能较好地反映各种粒径大小在土体中的组成特点,可将其作为土体工程分类的一个综合性定量指标。

结合野外调查 43 个实测剖面,在不同松散堆积体处共取 11 组土样进行粒度成分分析,绘制了相应的粒度分布曲线(图 5 ~ 8),并根据分形理论,确定每组粒度成分的综合表征值——分维值 D(表 2、表 3)。

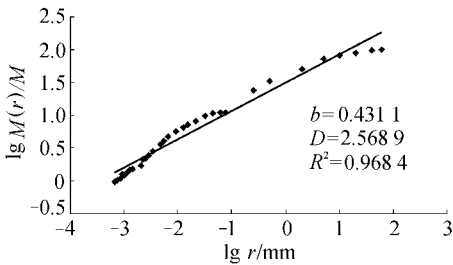


图 5 主沟 1 号崩塌堆积体粒度分布曲线

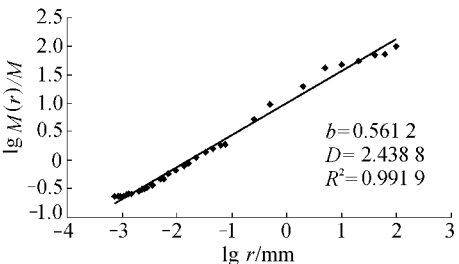


图 6 近坝左岸冰水堆积体粒度分布曲线

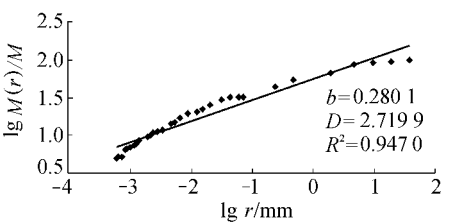


图 7 蚂蝗沟 5 号冰缘冻融堆积体粒度分布曲线

表 2 不同松散堆积体颗粒级配组成

成因类型	工程部位	实测剖面编号	颗粒级配组成/%					细粒质量分数/%	D
			> 20 mm	20 ~ 2 mm	2 ~ 0.075 mm	0.075 ~ 0.005 mm	< 0.005 mm		
崩塌堆积	主沟 1 号堆积体 1 号坑	1-1	10.10	39.86	39.19	7.11	3.74	10.85	2.569
	主沟 1 号堆积体 2 号坑	2-2	50.13	25.21	16.44	5.93	2.29	8.22	2.588
	近坝左岸 1 号坑	5-5	27.66	39.05	29.67	2.85	0.77	3.62	2.467
冰水堆积	近坝左岸 2 号坑	6-6	28.60	45.77	24.04	1.19	0.40	1.59	2.439
	近坝左岸 3 号坑	7-7	44.73	35.54	17.83	1.43	0.47	1.90	2.406
	昨日沟 3 号堆积体 4 号坑	15-15	18.61	40.90	31.32	7.86	1.31	9.17	2.500
	昨日沟 3 号堆积体 5 号坑	13-13	19.45	53.64	23.50	2.97	0.45	3.42	2.413
冰缘冻融堆积	蚂蝗沟 5 号堆积体 1 号坑	21-21	4.78	28.35	35.13	17.35	14.39	31.74	2.720
	蚂蝗沟 5 号堆积体 2 号坑	27-27	0	12.41	39.96	26.23	21.40	47.63	2.718
	昨日沟 3 号堆积体 1 号坑	42-42	2.26	22.97	58.83	11.28	4.66	15.94	2.583
	昨日沟 3 号堆积体 2 号坑	38-38	5.04	12.42	50.83	25.47	6.24	31.71	2.686

表 3 不同松散堆积体细粒质量分数、粒度分维及实测水下稳定坡角值

成因类型	工程部位	细粒质量分数/%	D	剖面编号	水下稳定坡角/(°)
崩坡积堆积	主沟 1 号	10.85	2.569	1-1	23.34
		8.22	2.588	2-2	21.19
		3.62	2.467	5-5	26.64
冰水堆积	近坝左岸	1.59	2.439	6-6	27.94
		1.90	2.406	7-7	28.34
		9.17	2.500	15-15	25.39
冰缘冻融堆积	昨日沟 3 号 (靠上游侧)	3.42	2.413	13-13	29.04
		31.74	2.720	21-21	13.61
	蚂蝗沟 5 号	47.63	2.718	27-27	13.45
		15.94	2.583	42-42	16.43
	昨日沟 3 号 (靠下游侧)	31.71	2.686	38-38	14.25

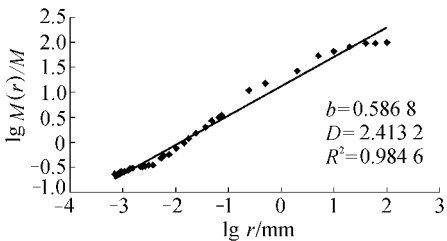


图 8 昨日沟 3 号冰水堆积体粒度分布曲线

从图 5~8 中可以看出,lg $\frac{M(r)}{M} \sim \lg r$ 关系曲线的陡缓反映了不同松散堆积体粒度组成的差异,粒度越粗,其对应的斜率越大,相应的分维值越小;粒度越细,其对应的斜率越小,相应的分维值越大。

在崩坡积堆积体、冰水堆积体以及冰缘冻融堆积体中,冰水堆积体颗粒最粗,相应的分维值最小,而对应的水下稳定坡角最大;冰缘冻融堆积体颗粒最细,相应的分维值最大,而对应的水下稳定坡角最小;崩坡积堆积体颗粒粗细程度介于冰水堆积体和冰缘冻融堆积体之间,分维值和水下稳定坡角也介于二者之间。松散堆积体成因不同,分维和水下稳定坡角均不同,三者的关系见表 3。

3 水下稳定坡角与粒度成分的相关性

将基于分形理论得到的不同成因堆积体粒度成分的综合表征值(即粒度成分的分维)与相应部位实测水下稳定坡角进行相关分析(图 9),可见粒度越粗(相应的分维值越小),水下稳定坡角越大;粒度越细(相应的分维值越大),水下稳定坡角越小,并可得出两者具有如下相关关系:

$$y = 8726.8e^{-2.3741x} \quad R = 0.908 \quad (6)$$

由于不同松散堆积体的细粒质量分数对水下稳定坡角有一定的影响,故对细粒质量分数与坡角进行相关分析(图 10)。此处研究的细粒质量分数是指粒径小于 0.075 mm 的质量占样本总质量的百分比。从图 10 中可看出,在一定范围内,细粒质量分数越高,水下稳定坡角越小,随着细粒质量分数不断

增高,坡角将趋于一个稳定值。两者的相关关系如下:

$$y = 0.0114x^2 - 0.8873x + 30.157 \quad (R = 0.968) \quad (7)$$

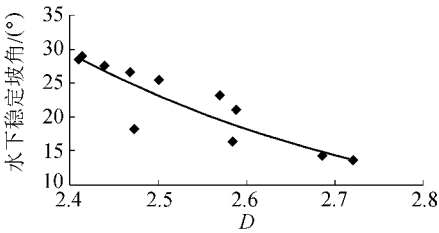


图 9 分维与水下稳定坡角的相关关系

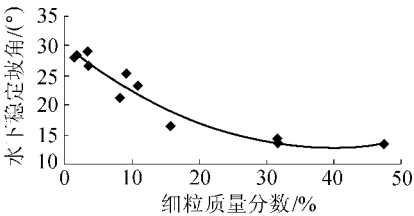


图 10 细粒质量分数与水下稳定坡角的相关关系

比较式(6)与式(7)的相关系数可知,松散堆积体粒度成分中细粒质量分数对水下稳定坡角的影响更大。在确定松散堆积体水下稳定坡角时,将式(6)与式(7)对比分析计算,得到基于分维和基于细粒质量分数的水下稳定坡角预测值,并取两者的平均值与实测值比较,平均值更接近实际值(表 4)。因此,对库区不同松散堆积体,只需要测定其粒度成分,确定分维值以及细粒质量分数,即可确定其相应的水下稳定坡角,从而进行坍岸范围预测。

4 结 论

a. 不同松散堆积体水下稳定坡角随着颗粒由粗变细坡角由大到小。

b. 基于分形理论绘制的 lg $\frac{M(r)}{M} \sim \lg r$ 关系曲线的陡缓反映了其粒度组成的差异,粒度越粗,其对应的斜率越大,相应的分维值越小;粒度越细,其对

表 4 不同粒度成分及细粒质量分数下水下稳定坡角预测值

成因类型	工程部位	坡角预测值/(°)		平均值/(°)	误差/(°)
		基于分维	基于细粒质量分数		
崩坡积堆积	主沟 1 号	19.59	21.87	20.73	2.61
		18.73	23.63	21.18	0.01
		24.96	27.09	26.03	0.61
	近坝左岸	26.67	28.78	27.72	0.22
		28.85	28.51	28.68	0.34
		23.08	22.98	23.03	2.36
冰水堆积	昨日沟 3 号 (靠上游侧)	28.37	27.26	27.81	1.23
		13.69	13.48	13.58	0.03
冰缘冻融堆积	蚂蝗沟 5 号	13.75	13.76	13.76	0.31
		18.95	18.91	18.93	2.50
		14.84	13.48	14.16	0.09

应的斜率越小,相应的分维值越大。

c. 在一定范围内,根据不同松散堆积体水下坡角与其相应的粒度成分的相关分析,建立了不同松散堆积体粒度成分与水下稳定坡角的 2 个相关关系表达式。基于这 2 个表达式,可简易地测定水下松散堆积体粒度成分,即可确定相应的水下稳定坡角,

从而可快速进行坍岸范围预测。

参考文献：

[1] 胡卸文,吕小平,章璇.四川华能碛磛水电站水库蓄水后库岸边坡稳定性专题研究报告[R].成都:西南交通大学,2008.

[2] 胡卸文.无泥型软弱层带物理力学特性[M].成都:西南交通大学出版社,2002:46-51.

[3] MANDELBORT B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: Freeman,1982.

[4] 魏玉虎,胡卸文,齐光辉.分形理论在土体粒度成分特征评价中的应用[J].安徽地质,2006,16(2):120-122.

[5] 王东升,汤鸿霄,栾兆坤.分形理论及其研究方法[J].环境科学学报,2001,21(增刊):10-15.

[6] 任光明,聂德新.软弱层带夹泥粒度成分的分形研究[J].地质灾害与环境保护,1997,8(4):1-8.

[7] 易顺民,唐辉明.冻土粒度成分的分形结构特征及其意义[J].冰川冻土,1994,16(4):314-319.

[8] 刘松玉,方磊,陈浩东.论我国特殊土粒度分布的分形结构[J].岩土工程学报,1993,15(1):23-30.

(收稿日期 2009-12-25 编辑 方字形)

(上接第 70 页)

4 结 语

a. 从水工压力隧洞的充水实践出发,分析了隧洞衬砌在充水过程中工作状态的改变,最终将过渡到相应工作水压稳定渗流状态下或独立工作或围岩联合工作的状态。给出了这 2 种工作状态下的裂缝开度方程。

b. 给出了考虑充水过程计算裂缝参数的方法,它大体上能够反映裂缝的发展历史。钢筋应力 σ_s 和平均裂缝宽度 $2a$ 的最大值与充水过程有关,其最终的长期稳定值与充水过程无关。配筋应按充水过程中可能产生的最大钢筋应力配置。

c. 对可能的 2 种最终工作状态进行了实例计算,结果表明:稳定渗流、衬砌围岩联合工作状态下,最大钢筋应力 σ_s' 及 $2a$ 的计算值与常用不透水衬砌公式^[1]的计算值相比差别不大;稳定渗流、衬砌脱离围岩而独立工作的状态下, σ_s' 及 $2a$ 的计算值与常用不透水衬砌公式的计算值^[1]相比差别甚大,前者要小许多。设计者可以采取工程措施,保证衬砌围岩联合工作或使两者各自工作以达到使衬砌处于良

好工作状态的目。

d. 水工压力隧洞钢筋混凝土衬砌的裂缝参数计算是一个力学-水力学相互作用的复杂问题,国外有关文献甚少,国内稍多,目前的设计及计算方法尚无统一见解,也不尽完善,计算结果也不尽一致。在当前的设计施工实践中,对软岩压力隧洞衬砌的配筋很多,为了既保证安全,又节约投资,对这一问题做进一步的讨论和探究是很有意义的。

参考文献：

[1] DL/T5195—2004 水工隧洞设计规范[S].

[2] 彭守拙.压力隧洞透水衬砌裂缝宽度计算的探讨[J].水利水电科技进展,2009,29(3):46-48.

[3] 张有天,张武功,王镭.再论隧洞水荷载的静力计算[J].水利学报,1985(3):22-31.

[4] 彭守拙,钟建文.压力隧洞裂缝混凝土衬砌和围岩的接触条件[J].水利水电科技进展,2010,30(3):53-57.

[5] 谷兆祺.挪威水电工程经验介绍[R]. Trondheim, Norway: 挪威 TAPIE 公司,1985.

[6] 刘秀珍.关于圆形有压水工隧洞衬砌裂缝计算的探讨[J].水力发电学报,1983(3):91-101.

(收稿日期 2009-07-29 编辑 方字形)