

可靠度在反滤层设计中的应用

吴良骥

(南京水利科学研究院水工所, 210024)

文 摘 本文对无粘土的反滤保护的可靠度进行了系统的探讨。首先从力学和结构角度分析了土体结构特征及破坏机理, 得到过滤理论下的极限状态方程。然后研究代表土体质点的单元体合理线性长度计算方法及其稳定程度。通过对均质体随机性的考察, 得出无粘性土特征粒径分布规律及分布特征值。最后, 应用概率论, 给出了单元体反滤保护和反滤层整体反滤保护失效率和可靠度的计算方法, 及西北口堆石坝的垫层反滤保护的失效率和可靠度。

关键词 无粘性土, 反滤保护, 过滤理论, 随机性, 可靠度。

1 前 言

在岩土工程方面, 特别是在岩土渗透稳定分析和渗透稳定保护措施设计方面, 长期以来一直依据确定性理论开展工作。实践结果表明按这些准则设计的工程不是远远偏于保守, 就是出现一些没有预见的情况。更为重要的是这些准则的应用到底有多大把握没有科学的说明, 往往以经验一言蔽之。事实上, 在岩土工程中不确定因素之多远胜于其它行业, 这些不确定性带来的随机性在实践中屡见不鲜, 尤其是散粒体本身的组成及结构就是难以确定的因素, 其性质的随机性就更为广泛。应用概率和随机的手段研究其性质, 进行分析和设计, 就显得更加合乎实际。

可靠性的分析在结构行业中应用始于40年代。我国土木工程界于60年代也开始这方面的研究。水工结构的可靠性的研究起步较晚。在渗流领域内, 国内虽在70年代已有文章发表^[1,2], 90年代也有文章论及^[3], 但仍属起步阶段。本文的提出也仅是一种初步尝试, 用意在于抛砖引玉, 促进渗流界对这方面工作的重视和积极开展其研究。

2 无粘性土的基本特性

正确地理解和把握无粘性土的本构关系是研究无粘性土多种性质的基础, 也是研究反滤层稳定性的基础。在工程上, 必须对作为承载材料的无粘性土组成从力学角度和相应的结构特点进行分析^[4]。

从力学角度出发,无粘性土中的颗粒可以分为骨架颗粒和填料颗粒。骨架颗粒为承受荷载和传递力的颗粒。反之为填料颗粒。

从颗粒组成的结构特点出发,骨架颗粒中又可分为连续型骨架颗粒和间断型骨架颗粒。连续型骨架颗粒定义为小一级颗粒能以单粒自身的体积撑开大一级颗粒形成的孔隙,这两级颗粒为连续型的。间断型骨架颗粒定义为小一级颗粒只能以群体体积撑开大一级颗粒形成的孔隙,这两级颗粒为间断型的。显然,连续型骨架颗粒均不能穿过大一级骨架颗粒孔隙而流失,而间断型骨架颗粒中,如果小一级颗粒粒径小于大一级骨架颗粒孔隙通道,就可能穿过孔隙而流失。根据骨架颗粒不同特性,土体可分为连续型土体和间断型土体。

从颗粒运移的观点出发,填料颗粒可以分成可移动填料和不可移动填料。可移动填料颗粒可以穿过骨架颗粒孔隙流失。否则,为不可移动填料颗粒。具有可移动填料的土为管涌土,不具有可移动填料的土为流土。

散粒体聚合本身具有强烈的随机性,宏观上的研究只能给出其基本特性,不能给出其细微变化,只有把握住细微的变化才能更加科学地确认宏观的概念。

3 过滤理论和极限状态方程

防止无粘性土在渗透力作用下的失稳或破坏的有效措施之一是反滤保护。反滤层的失稳涉及到被保护土和反滤层两种土料的属性,以及渗流水的动力特性。反滤层的失稳必要条件是几何条件 G ,充分条件是力学条件 F 。理想的反滤保护极限状态方程通式为

$$Z=f(G, F) \quad (1)$$

很显然,几何条件中包括被保护土保护颗粒(d_c)和反滤层孔隙通道(D'_p)。 d_c 取决于被保护土颗粒分曲线(GSD_B)、颗粒形状(g_B)、孔隙率(n_B)、构造特征(S_B)。 D'_p 取决于反滤层颗粒分曲线(GSD_F)、颗粒形状(g_F)、孔隙率(n_F)、构造特征(S_F)。力学条件中包括渗透力(f_{sB} , f_{sF})和被保护土内的有效应力(σ_B)。式(1)可为

$$Z=f(GSD_B, g_B, n_B, S_B, GSD_F, g_F, n_F, S_F, f_{sB}, f_{sF}, \sigma_B) \quad (2)$$

为确保工程安全,在一些高坝或高水头建筑物中力学条件较为充分。假设力学条件完全充分,反滤保护的稳定性就成了反滤保护的几何稳定性问题,也即过筛效应。式(2)可简化为

$$Z=f(d_c, D'_p) \quad (3)$$

从单粒径球体的几何组成理论分析和多粒径的反滤保护层间关系试验结果表明^[4],通过反滤层最大粒径

$$D'_0=0.335D_0 \quad (4)$$

式中 D_0 为反滤层土体的等效孔径。

被保护土的保护颗粒 d_c 是指被保护土中的某一级颗粒,该级颗粒被保护住,整个被保护土也就被保护住。通过系列振筛过筛试验^[4],可得到以下几个结论:

a) 连续型土体骨架的 d_{s0} 为保护颗粒。

b) 间断型土体中,当间断骨架只有一级间断时,该级间断颗粒的 d_{s0} 为保护颗粒;若为多级时,取最后一级间断颗粒的 d_{r0} 为保护颗粒。

c) 管涌土可根据工程上允许干容重 γ_c 确定保护颗粒, d_c 的含量 P_c 为

$$P_c = \left(1 - \frac{\gamma_c}{\gamma_s} - n\right) / (1 - n) \quad (5)$$

式中 n 为土体孔隙率; γ_s 为土粒比重。

极限状态方程可写成

$$Z = d_c - D'_0 \quad (6)$$

该反滤保护在极限状态方程中考虑了颗粒级配、孔隙率、颗粒形状和构造特性, 这是其它单粒径极限状态方程所无法考虑到的。但是 d_c 和 D'_0 的求解比较复杂, 特编制了土样颗粒结构分析程序 EGSA, 简化 d_c 和 D'_0 的求解。

上述极限状态方程中没有计及土样中各种参数的随机性和土样与整体之间的关系。

4 单元体及其稳定性

在岩土工程中, 对土体的考察均以单元体为对象。对于单一粒径组成的土体, 当单元体线性长度超过粒径长度时, 其颗分曲线为一定值。对于多粒径土体而言, 当土体为均质时, 考察单元线性长度的不足, 其颗分曲线处于波动状态, 容易被误认为非均质体。当土体为非均质体时, 考察单元线性长度太大会获得较为稳定的颗分曲线, 错误地被认为均质体。由此可见, 考察单元具有一合理的线性长度, 可避免上述两种错误的判断。

对于均匀多粒径土体, 为了在考察单元中能包含土体中所有粒径颗粒, 取样的最小体积, 即临界单元体积为

$$V_0 = \frac{\pi}{6(1-n)P_{d_{\max}}} d_{\max}^3 \quad (7)$$

式中 d_{\max} 为该土体包含的最大粒径; $P_{d_{\max}}$ 为 d_{\max} 的含量, 一般取 5%; n 为土体孔隙率; V_0 为临界单元体积。

以体积为 V_0 的单元体在均匀多粒径体中取样, 只有土体颗粒有规律整齐排列时, 才具有颗分曲线稳定性。否则, 由于颗粒在标准单元体中位置的随机性和取样单元相对标准单元位置的随意性, 所得的取样颗分曲线是波动的, 见表 1。由此可见, 临界单元的线性长度不足以保证土样颗分曲线的稳定性。 L_0 为临界单元体线性长度。

表 1 L_0 单元体取样中 d_{\max} 颗粒概率分布特征值

包含单元数	1	2	2	2	2	2	2	4	6
单元体积	1×1	0.5×2	0.75×1	0.9×1	0.99×1	0.999×1	0.9999×1	0.25×4	0.457×2
及个数			0.25×1	0.1×1	0.01×1	0.001×1	0.0001×1		0.0215×4
均方差 σ^2	0	0.5	0.375	0.18	0.0198	0.00198	1.9×10 ⁻⁴	0.75	0.578
标准差 σ	0	0.707	0.612	0.424	0.141	0.0447	0.0141	0.866	0.76
均值 μ	1	1	1	1	1	1	1	1	1
离差 C_v	0	0.707	0.612	0.424	0.141	0.0047	0.0141	0.866	0.76

注: 单元体积及个数项中前者为取样体占有标准单元体体积, 后者为该体积的个数。

令土体由体积为 V_0 、线性长度为 L_0 的标准单元体组成, 标准单元体内包含土体颗分曲

线所有相应的颗粒。标准单元体中颗粒的位置是任意的。取样单元体线性长度为 NL_0 ， N 为单元线性系数。从平面分布考察， N 不同的单元体位置的不同所含的标准单元体个数不同， d_{max} 出现最多和最少个数也不同，表2和图1给出 NL_0 单元体中 d_{max} 个数偏离标准个数的范围和变化(d_{max} 出现的范围除以 d_{max} 标准数)。显然，随着单元体线性长度的增加， d_{max} 颗粒数变化范围越来越小，逐步趋于标准值。再从 d_{max} 在每一个 NL_0 单元体中出现的概率分布情况考察，图2给出 $2L_0$ 不同取样位置 d_{max} 概率分布曲线，图3给出不同 N 的取样单元相同取样位置 d_{max} 概率分布曲线。表3给出不同取样体积相同取样位置 d_{max} 概率分布特征值。表1、表3的前三列和图2中两根概率分布曲线说明：取样大小一样、取样单元位置不同，其标准差 σ 和离差系数 C_v 不同，但变化并不太大。表1中 C_v 最大值为0.866，是 $C_v=0.707$ 取样格式的1.23倍，表3前三列中最大 C_v 为0.327，是 $C_v=0.25$ 取样格式的1.31倍。由表3、图3、图4知，

表2 NL_0 单元 d_{max} 偏离标准数范围

线性长度	L_0	$2L_0$	$4L_0$	$8L_0$	$16L_0$	$32L_0$	$64L_0$
偏离范围	0~6	0.25~3	0.56~1.88	0.76~1.5	0.88~1.22	0.938~1.123	0.969~1.056

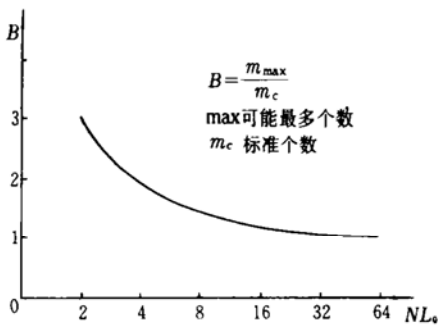


图1 NL_0 单元 d_{max} 偏离变化图

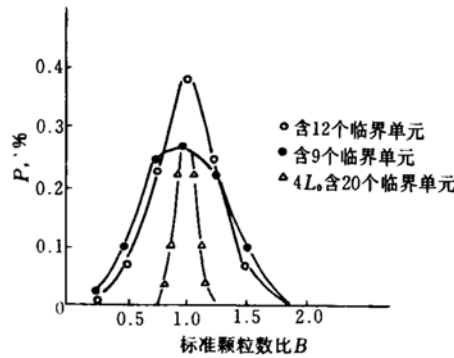
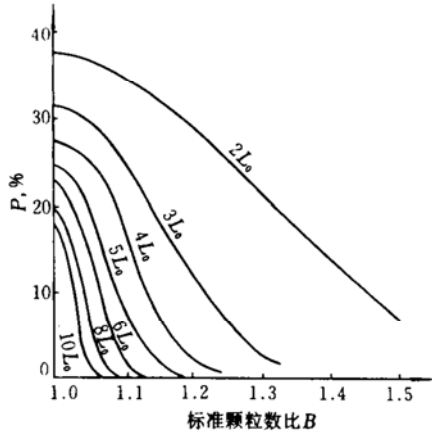
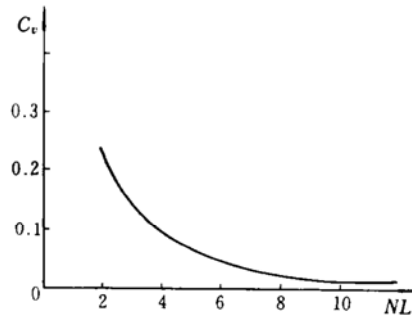


图2 $2L_0$ 取样体颗粒 d_{max} 含量概率分布

表3 不同体积取样中 d_{max} 颗粒概率分布特征值

线性长度	$2L_0$	$2L_0$	$2L_0$	$3L_0$	$4L_0$	$5L_0$	$6L_0$	$7L_0$	$8L_0$	$9L_0$	$10L_0$
包含 L_0 单元体体积及个数	1×1	0.828×4	1×2	1×6	1×12	1×20	1×30	1×42	1×56	1×72	1×90
	0.5×4	0.0858×8	0.5×4	0.5×6	0.5×8	0.5×10	0.5×12	0.5×14	0.5×16	0.5×18	0.5×20
	0.25×4										
均方差 σ^2	1.69	1.25	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.64	5.0
标准差 σ	1.3	1.12	1.0	1.22	1.42	1.58	1.73	1.87	2.0	2.15	2.24
均值 μ	3.97	4.02	4	9	16	25	36	49	64	81	100
离差系数 C_v	0.327	0.278	0.25	0.136	0.0884	0.0632	0.0481	0.0382	0.0312	0.0266	0.0224
置信系数 β	0.949	0.971	0.875	0.969	0.929	0.978	0.961	0.943	0.979	0.969	0.958
置信区间	2~6	2~6	3~5	7~11	14~18	22~28	33~39	46~52	60~68	77~85	96~104
偏离区间	0.5~1.5	0.5~1.5	0.75~1.25	0.78~1.22	0.88~1.12	0.88~1.12	0.92~1.08	0.94~1.06	0.94~1.06	0.95~1.05	0.96~1.04
偏离误差	0.5	0.5	0.25	0.22	0.12	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05	0.04

在同一格式取样位置时,随着 N 的增大,概率分布曲线变得越来越陡,颗粒数偏离值越来越小,离差系数越来越小,偏离区间和偏离误差随之减少,置信系数提高。根据概率和统计理论,具有正态分布的概率,当 $C_v < 0.1$ 时,随机变量可视为确定值。从表3可知,当 $N > 4$ 时, $C_v < 0.1$,也就是说取样单元线性长度必须大于临界单元线性长度 L_0 的4倍,取样得到的颗粒分布曲线才趋于稳定,才能代表“均质”体的颗分曲线。 $4L_0$ 单元体可视为“均质”体稳定单元体, $4L_0$ 可视为合理线性长度。

图3 d_{\max} 颗粒概率分布图4 离差系数随 NL_0 的变化

以上考察的取样格式为单一格式,即 $N(N-1)$ 个标准整单元和 $2N$ 个 0.5 标准单元体组成的,分析说明此种考察格式还是具有一定代表性的。以上讨论的是平面分布情况,立体空间的分布由于所包含的标准单元个数更多,颗粒出现个数离差系数就会更小。因而,根据平面分布情况所选取的稳定单元尺寸可用于空间问题。

5 均质土体的随机性

在自然界中,由于成因条件的不同,形成了不同性质的土体。单粒径的土体在自然界中几乎不存在。在工程中,限于施工条件,离析和变异也是难免的。在取样过程中,小粒径经常漏失。上述原因造成绝对均质体难以存在。也就是说,土体的均质性是相对的,必须应用概率分布和统计手段,寻找出相对的均质体和非均质体。

上节从理论上考察了单元体及其稳定性。在考察过程中,只论及颗粒在土样中出现的随机性,没有考察取样位置的随机性和概率分布。因而,上节给出的颗粒在土样中出现的概率分布曲线是不完整的。

K.J.威特进行了一次均质土填筑试验^[5],把填筑体分成 8×16 单元网格,依次取了128个土样,每个土样体积等于其临界体积,获得 d_{15} 和 d_{85} 的频率分布,见图5。并给出 $N=2, 4, 6 \dots$ 单元体的特征粒径频率分布及其离差系数,给出离差系数 C_v-N 的关系曲线,见图6。结论是:特征粒径概率分布曲线与对数正态分布曲线十分一致;离差系数随 N 增大而减小,与上节理论分析是一致的。当 $N=12$ 时, d_{15} 离差系数 $C_v=0.2$,这清楚表明,过大的土样会给不均匀土带来虚假的均匀性。

对西北口钢筋混凝土面板堆石坝127个垫层料土样和101个过渡层土样的分析见表4、5。分析的结论为:

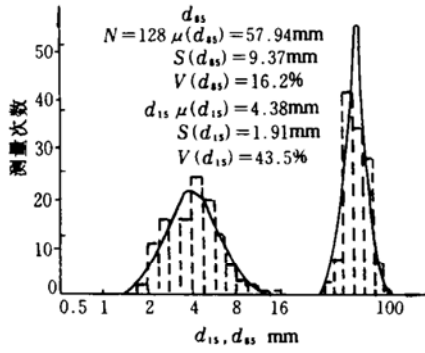


图5 128个土样 d_{15} 和 d_{85} 的频率分布和直方图

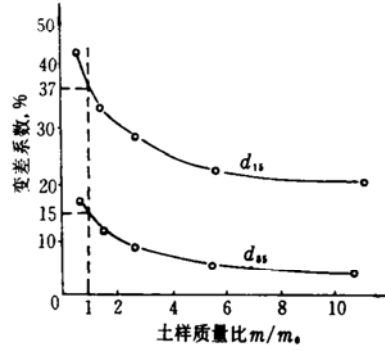


图6 d_{15} 和 d_{85} 的变差系数与土样质量的关系

表4 西北口垫层料参数分布特征值

ζ	μ	σ^2	σ	C_v	C_s	$\bar{\mu}$
D_{10} (mm)	1.92	0.91	0.95	0.49	1.15	1.66
D_{15} (mm)	2.99	1.47	1.21	0.41	0.84	2.75
D_{30} (mm)	15.38	59.45	7.71	0.50	1.06	13.65
D_{60} (mm)	22.78	95.67	9.78	0.43	0.74	20.72
D_{85} (mm)	50.24	112.22	10.59	0.21	-0.09	49.06
ρ (g/cm ³)	2.33	0.004	0.06	0.03	-1.25	2.33
η	18.33	837.35	28.94	1.58	5.3	12.71
d_c (mm)	11.45	31.44	5.61	0.49	1.39	10.35
D'_0 (mm)	0.13	0.005	0.07	0.52	0.16	0.11
L_s (cm)	31.5	67.51	8.22	0.26	0.47	30.42

表5 西北口过渡料参数分布特征值

ζ	μ	σ^2	σ	C_v	C_s	$\bar{\mu}$
D_{10} (mm)	7.97	16.96	4.12	0.52	0.8	6.96
D_{15} (mm)	12.13	36.26	6.02	0.50	0.76	10.71
D_{30} (mm)	47.33	254.32	15.95	0.34	0.42	44.58
D_{60} (mm)	62.1	437.07	20.91	0.34	0.55	58.68
D_{85} (mm)	136.27	2354.5	48.52	0.36	1.04	128.66
ρ (g/cm ³)	2.28	0.005	0.07	0.03	-0.72	2.28
η	9.99	69.11	8.31	0.83	5.70	8.58
d_c (mm)	44.19	179.21	16.71	0.38	0.32	40.7
D'_0 (mm)	0.42	0.07	0.26	0.61	0.53	0.34
L_s (cm)	56.13	101.05	10.05	0.18	0.23	55.24

a) 取样线性长度 L_B 离差系数分别为0.26和0.18, 说明取样时没有严格按照要求, 土样线性长度变化超过一般要求。垫层和过渡层的临界单元线性长度分别为13.8cm和74.7cm。垫层和过渡层取样单元均值的线性系数 N_7 和 N_c 分别为2.28和0.75。很明显, 取样的线性长度远小于稳定单元的合理线性长度, 特征粒径的离差系数势必会很大。对照表1, 3和表4, 5, 垫层料中除 D_{85} 粒径外, 其它特征粒径的离差系数均大于均质体对离差系数的要求。过渡层中所有特征粒径的离差系数均在均质体的要求范围内。相对而言, 过渡层比垫层稍均匀些。土样干容重的离差系数为0.03, 说明碾压质量较好, 干容重分布很均匀。

b) 无论是垫层还是过渡层, 或是K. J. 威特的填筑试验, D_{85} 的 C_v 比 D_{15} 的小, D_{85} 的 σ 大于 D_{15} 的, 这表明 D_{15} 变化的绝对值并不大, 但相对值很大。这种情况与取样时细料漏失不均有关, 细料漏失对细粒变化影响大, 对粗粒变化影响不大。当然, 任何一种特征粒径变化均不能代表整个颗分曲线的变化。

c) 各种特征粒径频率分布表明, 其分布曲线与对数正态分布曲线十分相近。土体的保护粒径 d_c 和土体允许通过最大粒径 D'_0 的频率分析曲线也与对数正态分布曲线相近。见图7, 8。在可靠分析中, 可以应用这一结论, 而不会引起太大的误差。

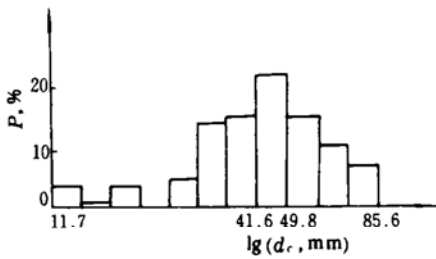


图7 西北口土料 d_c 频率分析曲线

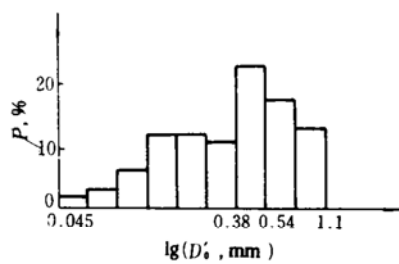


图8 西北口土料 D'_0 频率分析曲线

6 单元体反滤保护可靠度

在反滤保护工程中, 我们认为反滤层和被保护层单元体内的变化无论在哪一个单元中均是一样的, 也即单元体中特征值的变异与单元体所在位置无关。在施工中取样所获得的各种特征值的变异可代表一个单元体中可能出现的变异, 只是单元体体积必须与取样单元体一致。

鉴于 d_c 和 D'_0 概率分布近似为对数正态分布, 式(6)可改写为

$$Z = d_c / D'_0 \tag{8}$$

令 $Z' = \ln Z$, $R = \ln d_c$, $S = \ln D'_0$, 式(8)等式两边取对数

$$Z' = R - S \tag{9}$$

单元体反滤保护失事概率为

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(x) f_S(x) dx \tag{10}$$

式中 F_R 为 $\ln d_c$ 的累积分布函数; f_S 为 $\ln D'_0$ 的概率密度函数

单元体反滤保护的可靠度 P_R 为

$$P_R = 1 - \int_0^\infty F_R(x) f_S(x) dx \tag{11}$$

令 $V = \frac{Z' - \mu'}{\sigma_{z'}}$, $\beta = \frac{\mu_{z'}}{\sigma_{z'}}$, 则

$$P_f = \phi(V^*) = \phi\left(\frac{0 - \mu_{z'}}{\sigma_{z'}}\right) = \phi(-\beta) \tag{12}$$

β 为安全指数, 根据 β 和标准化变量正态分布表, 可获得失事概率 P_f 。根据概率计算原理

$$\beta = \frac{\ln(\mu_{dc}/\mu_{D_0})[(C_{vD_0} + 1)(C_{vdc} + 1)]^{1/2}}{[\ln(C_{vdc}^2 + 1)(C_{vD_0}^2 + 1)]^{1/2}} \tag{13}$$

在岩土工程中, 常用几何平均值 $\bar{\mu}$ 代替 $\mu / (C_v + 1)^{1/2}$, 则

$$\beta = \frac{\ln(\bar{\mu}_{dc}/\bar{\mu}_{D_0})}{[\ln(C_{vdc}^2 + 1)(C_{vD_0}^2 + 1)]^{1/2}} \tag{14}$$

按式(14)计算, 西北口过渡料反滤保护的安全指数 $\beta = 4.69$, 失事概率 $P_f \approx 10^{-6}$, 可靠度为 $P_R = 0.999999$, 即在100万个单元体中有一个可能失事。

利用式(14), 设定不同的 $\bar{\mu}_{dc}/\bar{\mu}_{D_0}$ 和 C_v , 可获得不同失事概率。在工程中, C_v 往往为0.4~0.6, 为了确保失事概率小于 10^{-4} , 那么 $\bar{\mu}_{dc}/\bar{\mu}_{D_0}$ 必须大于6~16。这就要求反滤层与被保护土有一定的层间系数, 以便给设计人员提供设计依据。

7 反滤层整体反滤保护的可靠度

在岩土工程中, 反滤层不仅在面积上, 而且在厚度上均是很大的, 即反滤层是由无数单元体组成的。我们可以用单元体的线性长度把反滤层分成几层, 在渗流方向上各层反滤层犹如“并联”结构, 只有各层反滤层均失效时, 整个反滤层才会失效, 若是其中某一层没有失效, 被保护土就会堵塞在这一层, 颗粒运移也就终止。在垂直渗流方向上同一层的单元体, 犹如“串联”结构, 只要其中一个单元失效, 该层反滤层也就失效。

首先我们考察沿渗流方向单元体组成的单元反滤层失事概率, 如图9所示, 单元反滤层的失效概率应为单元反滤层中各层单元体失效概率之积。设单元反滤层包含 L 层, 每层单元体的反滤保护失效概率为 P_{fi} , 则单元反滤层反滤保护失效概率 P_{L_f} 为

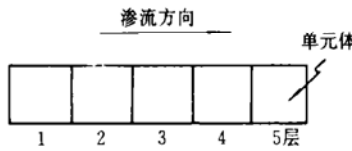


图9 单元反滤层

$$P_{L_f} = \prod_{i=1}^L P_{fi} \tag{15}$$

若各层单元体的反滤保护失效概率相同, 均为 P_f , 则

$$P_{L_f} = P_f^L \tag{16}$$

再考察整体反滤层的反滤失效概率。设整体反滤层由 M 个单元反滤层组成, 整体反滤层的反滤保护可靠度 P_{MR} 应为 M 个单元反滤层的反滤保护可靠度 $P_{L_{Ri}}$ 之积, 则

$$P_{MR} = \prod_{i=1}^M P_{L_{Ri}} \tag{17}$$

若各单元反滤层的可靠度相同, 并为 P_{LR} , 则

$$P_{MR} = P_{LR}^M \quad (18)$$

$$P_{MR} = (1 - P_L^L)^M \quad (19)$$

$$P_{MJ} = 1 - P_{MR} \quad (20)$$

用式(16)、(18)对西北口垫层料反滤层(过渡料)^[6]进行失效率和可靠度计算。西北口过渡层厚1.744m, 垂直渗流方向的面积为2.84万m², 过渡层取样的线性长度几何平均值为56.13cm, 反滤层单元反滤层可分成3层, 即L=3。过渡层包含90142个单元反滤层, 即M=90142。则

$$P_{LJ} = 10^{-18} \quad P_{LR} = \overbrace{0.99 \cdots \cdots 9}^{18}$$

$$P_{MJ} = 9 \times 10^{-14} \quad P_{MR} = \overbrace{0.99 \cdots \cdots 91}^{13}$$

显然, 西北口垫层料的反滤层反滤保护是绝对可靠的。表6给出西北口过渡层与垫层对应特征粒径的算值平均值之比和几何平均值之比。由表6可见过渡层和垫层的层间系数为3左右, 按单粒径判别准则, 反滤层绝对可靠。室内反滤保护试验^[7]也论证了其反滤层绝对可靠。因而, 有人认为不设这个过渡层垫层也是安全的^[8]。

表6 西北口过渡层与垫层对应特征粒径之比

D_{10}	D_{15}	D_{50}	D_{60}	D_{85}	d_c	D'_0	D_0/d_c	注
4.15	4.06	3.08	2.73	2.71	3.86	3.23	0.037	μ_0/μ_a
4.19	3.89	3.27	2.83	2.62	3.93	3.10	0.033	$\tilde{\mu}_0/\tilde{\mu}_a$

参 考 文 献

- 曹敦履. 某水利枢纽工程围埝地基渗流问题[研究报告]. 长江水利水电科学院, 1974.
- 曹敦履. 随机渗流力学[研究报告]. 长江水利水电科学院, 1974.
- 葛祖立. 填筑坝砂砾滤(垫)层料设计的可靠性分析. 水利水运科技情报, 1992(1): 22~29.
- 吴良骥. 面板堆石坝反滤保护研究和优良级配选择. 见: 混凝土面板堆石坝会议论文集. 南京: 河海大学出版社, 1990. 336~348.
- Witt K J, Brarns J. The Influence of Parameter Variation on the Reliability of Filter. Proc of the ICOSD, C2.3, Rotterdam, 1984: 273~280.
- 沈英武. 西北口水库混凝土面板堆石坝布置和体型设计. 见: 面板堆石坝文集, 第一辑. 南京: 南京水利科学研究所, 1986: 21~30.
- 吴良骥. 西北口混凝土面板堆石坝垫层料反滤保护试验报告[研究报告]. 南京水利科学研究所, 1986: 13~15.
- 刘宏梅, 孙骅. 西北口堆石坝渡汛咨询报告(渗水堆石坝的渗流稳定问题). 水利水电科学研究所, 1986: 13~15.

Reliability Application in the Design of Filter Layer

Wu Liang-ji

(Nanjing Hydraulic Research Institute)

Abstract Structure features and failure mechanism of soil were analyzed, equation for limiting state based on the filter theory was obtained. Method for calculating the reasonable linear length of the element which represents the particle of soil and its stability were discussed. Through the investigation on the randomness of homogeneous soil, the probability distribution of characteristic particle of cohesionless soil and its characteristic values were obtained. Calculation method of reliability and specific accident on the element filter and entire filter protecting soil were given. Reliability and specific accident of the filter (transition layer) protecting the soil cushion course of the concrete face in Xibeikou CFRD were illustrated.

Key words non-cohesive soil, filter, filter theory, randomness, reliability.