

砾质土做为土石坝防渗体的研究

保华富

(国家电力公司昆明勘测设计研究院水电科研所, 昆明 650033)

尹志伟

(昆明市金碧路片区道路拓宽改造工程指挥部, 昆明 650034)

【摘要】 对多项工程砾质土防渗材料的大量室内外试验成果进行了分析研究, 得出结论: 当击后(或压后)砾石($> 5 \text{ mm}$)含量及 $< 0.074 \text{ mm}$ 细粒含量控制在某一界限范围时, 砾质土的渗透系数就能满足防渗要求, 其击后干密度大小与土料母岩性质、风化程度关系密切; 并提出了砾质土最大干密度经验公式的建议。

【关键词】 砾质土; 渗透系数与界限值; 砾石含量

【Abstract】 The study on gravelly soil as impemeable material shows that the seepage coefficient of gravelly soil fully satisfies the requirements of earth dam when the contents of gravel($> 5 \text{ mm}$) and fine grain ($< 0.074 \text{ mm}$) after compaction are limited within a critical value, and that their dry densities are fully influenced by their parent rock properties and weathered degree. In addition, an empirical fomula for maximum dry density of gravelly soil is put forward

【Key words】 gravelly soil; seepage coefficient and critical value; content of gravel

砾质土料源广泛, 既可利用天然砾石土、风化和软岩; 也可以在粘性土中掺入适量粗粒土混合成人工配合土, 用于填筑防渗体。目前一部分工程技术人员对采用砾质土防渗仍存在不少顾虑。本文结合云南省近年来多项工程砾质土料的室内外大型试验研究成果, 全面系统地进行了分析研究, 重点对砾质土的防渗及压实特性进行论述, 以期使我们加深对砾质土工程性质的了解, 进一步推动砾质土工程应用的发展。

1 砾质土的渗透性能

做为土石坝防渗料, 从防渗、孔压消散、边坡稳定因素综合考虑, 一般认为渗透系数 $k < 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 即可满足防渗要求, 不需要过于追求渗透性很低的土料。

砾质土料能否用作土石坝防渗体, 其渗透性能是关键问题之一。图 1、图 2 为云南

省已建和在建工程所用砾质土渗透试验成果。徐村电站为现场大型注水试验, 其余为室内试验。室内试验采用 $\phi 30 \text{ cm}$ 大型渗透仪完成。为排除不同砾质土由于击后颗粒破碎率不同而引起的差异, 我们将 $> 5 \text{ mm}$ 砾石含量 ρ_s 及 $< 0.074 \text{ mm}$ 含量用试后成果表示。

从图 1 的渗透系数 k 与 ρ_s 散点关系变化看, 试后 ρ_s 约为 55%, 是一个临界点。当 ρ_s 小于 55% 时, 全部统计土料的 k 值小于 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 且随 ρ_s 增减, k 值变化较小, 当 ρ_s 由 0 增至 55% 时, 渗透系数 k 值在 $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 间变化; 而当 ρ_s 大于 55% 时, k 值超过了 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 且随砾石含量 ρ_s 增加而迅速增大。从黄草坝试验成果看, 当 ρ_s 为 55% ~ 70% 时, k 值为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$

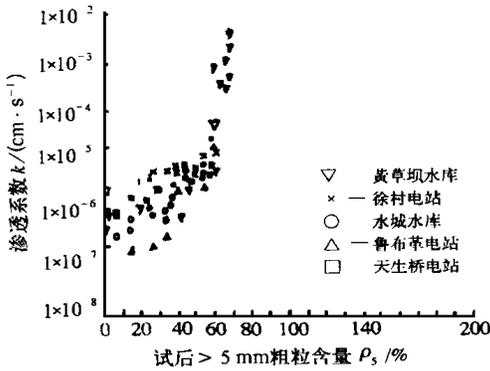


图1 砾质土砾石含量与渗透系数关系

cm/s , 即增大三个量级。分析其原因, 主要是当击后 ρ_5 小于 55% 时, 粗粒间的孔隙能被细粒土完全填充, 此时砾质土的渗透性主要取决于细料性质, 故随 ρ_5 的增加, 渗透系数变化不大; 而当 ρ_5 小于 55% 时, 由于粗粒已形成骨架, 粗粒间的孔隙不能被细粒土完全填充, 故 k 值随砾石含量增加而迅速增大。

从图 2 的试验统计成果看, 当小于 0.074 mm 含量 $> 8\% \sim 10\%$ 时, 砾质土的渗透系数就小于 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 且随细料含量增加, k 值减小缓慢; 而当小于 0.074 mm 含量 $< 8\% \sim 10\%$ 时, k 值受其影响变化较大。考虑到现场条件与室内存在一定差异等不利因素, 为确保砾质土填筑后的防渗效果, 建议压后 ρ_5 宜控制不大于 50%, 小于 0.074 mm 含量不小于 10%, 并应采用重型机具碾压效果明显。

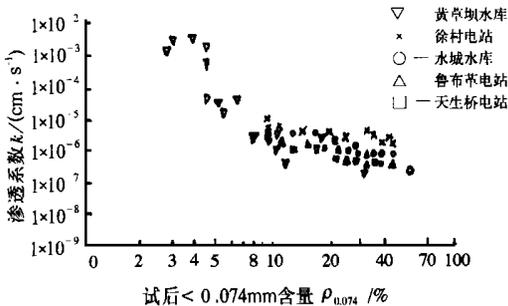


图2 砾质土 < 0.074 mm 含量与渗透系数关系

2 砾质土的压实特性与压实质量控制

砾质土的压实质量通常都采用压实度控制, 但采用压实度控制时, 必须已知砾质土的最大干密度, 才能根据填土压实干密度计算其压实度, 判别是否达到设计要求。目前确定砾质土最大干密度大致有三种方法, 即室内大型击实试验, 理论计算及经验公式法^[1]。

2.1 砾质土的室内大型击实试验

图 3 ~ 图 5 为室内大型击实试验成果 (见表 1)。为了便于比较, 本文还引用了有关作者的部分试验成果^[1], 由此可得出:

1) 三种坝料的击实最大干密度 $\rho_{d\max}$ 随砾石含量不同而变化, 且随砾石含量的增加而增大, 当 $\rho_{d\max}$ 增大到一定数值后, 再随 ρ_5 的增大, 最大干密度反而出现下降趋势。水城与徐村二种坝料的 $\rho_{d\max}$ 达到峰值时所以对

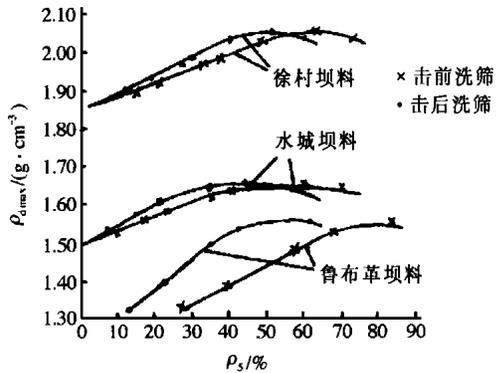


图3 各工程坝料的 $\rho_{d\max} - \rho_5$ 关系曲线

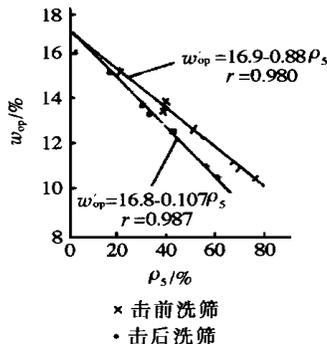


图4 徐村电站 $w_{op} - \rho_5$ 关系曲线

应的砾石含量: 击前分别为 64% 和 65%, 击后分别为 54% 和 52%。击后峰值对应的砾石含量大致与影响渗透系数的临界值 ρ_5 (约 55%) 一致。

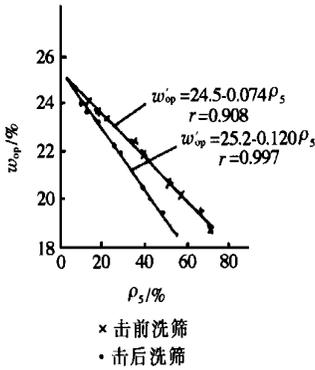


图 5 水城水库 w_{op} - ρ_5 关系曲线

2) 由于三种坝料岩性不同, 风化程度不同等因素, 击后的最大干密度有较大差异。徐村坝料母岩为砂岩, 风化后砾料坚硬, 击后颗粒破碎率平均为 20.7%, 因此击后干密度最大; 水城坝料母岩为全~弱风化泥质页岩, 颗粒较硬, 击后颗粒破碎率平均为 28.8%, 故击后干密度次之; 鲁布革坝料系软岩风化料, 岩性为页岩, 粉砂岩, 呈全风化状, 击后颗粒破碎率较高, 平均为 41.8%, 故击后干密度最小。

3) 对同一种坝料, 由于 ρ_5 不同, 所得 w_{op} 亦有所不同。如徐村坝料当 ρ_5 由 0 增至 64% 时 (击前), 最优含水量 w_{op} 则从 16.9% 减至 11.2%, 减少了 5.7%。

表 1 各项工程砾质土大型击实试验及其修正计算成果

物 工 程 指 标 名 称	击前	击后	实测 ρ_{dmax} ($g\ cm^{-3}$)	实测 w_{op} /%	按式(1)计 算的		按式(1)、(3)、 (4)计算的		按式(2) 计算的		A-C		B-D	
	ρ_5 /%	ρ_5 /%			击前	击后	击前	击后	击前	击后	击前	击后	击前	击后
					ρ'_{dmax} /($g\ cm^{-3}$)	ρ'_{dmax} /($g\ cm^{-3}$)	w'_{op} /%	ρ_{dmax} /($g\ cm^{-3}$)	w_{op} /%					
徐村电站	0	0	1.86	16.9	1.86	1.86	1.86	1.86	16.9	16.9	0	0	0	0
	14.0	10.0	1.90	16.0	1.92	1.90	1.91	1.90	15.3	15.7	-0.01	0	0.7	0.3
	20.0	15.6	1.92	15.2	1.94	1.92	1.92	1.92	14.6	15.1	0	0	0.6	0.1
	35.6	27.0	1.97	13.5	2.02	1.98	1.97	1.98	12.7	13.7	0	-0.01	0.8	-0.2
	38.4	29.3	1.98	14.0	2.03	1.99	1.97	1.99	12.4	12.5	0.01	-0.01	1.6	0.5
	48.6	39.8	2.03	12.7	2.08	2.04	1.99	2.01	11.2	12.2	0.04	0.02	1.5	0.5
	47.8	41.3	2.03	11.6	2.08	2.04	1.99	2.01	11.3	12.1	0.04	0.02	0.3	-0.5
	63.7	51.5	2.05	11.2	2.16	2.10	2.00	2.01	9.4	10.9	0.05	0.04	1.8	0.3
	68.4	56.0	2.05	11.0	2.19	2.12	2.00	2.00	8.9	10.4	0.05	0.05	2.1	0.6
	74.1	60.0	2.04	10.6	2.22	2.14	1.99	1.99	8.2	8.8	0.05	0.05	2.4	1.8
水城水库	0	0	1.49	25.3	1.49	1.49	1.49	1.49	25.3	25.3	0	0	0	0
	11.2	7.7	1.53	24.0	1.54	1.53	1.54	1.53	23.7	24.2	-0.01	0	0.3	-0.2
	15.8	10.6	1.56	23.7	1.57	1.54	1.56	1.54	23.1	23.8	0	0.02	0.6	-0.1
	20.7	16.7	1.59	23.3	1.59	1.57	1.58	1.57	22.4	22.9	0.01	0.02	0.9	0.4
	35.5	24.0	1.61	22.5	1.67	1.61	1.63	1.61	20.3	21.9	-0.02	0	2.2	0.6
	37.5	25.3	1.62	22.2	1.68	1.61	1.63	1.61	20.0	21.7	-0.01	0.01	2.2	0.5
	39.5	27.5	1.63	22.0	1.69	1.63	1.64	1.63	19.7	21.4	-0.01	0	2.3	0.6
	51.4	36.1	1.64	20.7	1.77	1.67	1.68	1.66	18.0	20.2	-0.04	-0.02	2.7	0.5
	56.1	39.0	1.65	20.3	1.80	1.69	1.69	1.67	17.3	19.8	-0.04	-0.02	3.0	0.5
	65.0	47.5	1.66	19.5	1.82	1.71	1.68	1.66	16.1	18.6	-0.02	0	3.4	0.9
	70.2	55.1	1.66	18.6	1.90	1.79	1.73	1.69	15.3	17.5	-0.07	-0.03	3.3	1.1

通过上述大型实试验, 得出了各种坝料的 ρ_{dmax} - ρ_5 及 w_{op} - ρ_5 关系, 施工时可根据设计要求的压实度求得不同砾石含量下的 $\rho_{d设}$

ρ_5 关系做为砾质土压实质量控制的依据。但上述试验工作量较大, 一般要求有代表性的试验数量不少于 20 组, 且必须具备大型击

实仪才能完成。

2.2 砾质土最大干密度理论计算法

砾质土不同砾石含量下的最大干密度的理论值可按式(1)计算:

$$\rho'_{d \max} = 1 \left/ \left[\frac{\rho_5}{\rho_w G_{s2}} + \frac{1 - \rho_5}{\rho_{d \max}} \right] \right. \quad (1)$$

式中: $\rho'_{d \max}$ ——砾质土最大干密度理论计算值, g/cm^3 ;

ρ_5 ——粗料含量, 以小数计, %;

G_{s2} ——粗粒干密度, g/cm^3 ;

$\rho_{d \max}$ ——细料用标准功能单独击实的最大干密度, g/cm^3 ;

ρ_w ——水的密度, g/cm^3 。

最优含水量则按公式^[2]计算:

$$w'_{op} = w_{op}^o (1 - \rho_5) + w_A \rho_5 \quad (2)$$

式中: w'_{op} ——砾质土的最优含水量计算值, %;

w_{op}^o ——细粒土试验所得最优含水量计算值, %;

w_A ——粗粒吸着含水量, %。

如将试验成果代入式(1)和式(2)计算, 成果见表1。由表1可看出: 当砾石含量较低时, 徐村与水城两坝料的计算值 $\rho'_{d \max}$ 与实测值 $\rho_{d \max}$ 较为接近, 但随 ρ_5 的增大, 计算值逐渐偏离并大于实测值。相比之下, 用击后砾石含量计算误差较小。从式(2)的计算值 w'_{op} 与实测值 w_{op} 比较看, 两坝料用击后砾石含量计算与实测值较为吻合。如考虑到实际上坝时限制 ρ_5 不宜大于 50% (击后) 这一条件, 则用击后砾石含量计算的 w'_{op} 引起的误差完全满足规范要求, 而计算的 $\rho'_{d \max}$ 在 ρ_5 较高时仍存在较大误差。

2.3 建议砾质土最大干密度经验公式

如果将徐村、水城二工程实测的 $\rho_{d \max}$ 与理论计算值 $\rho'_{d \max}$ 之比与 $(1 - \rho_5)$ 作线性回归分析, 则发现它们呈较好的线性关系(见表2)。为了便于比较分析, 同时我们引用了丹江水库经验公式求出的 $\frac{\rho_{d \max}}{\rho'_{d \max}}$ 比值一并列于表2中^[3]。

表2 各项工程大型击实试验最大干密度修正系数计算成果

工程物理指标名称	修正系数 $\rho_{d \max} / \rho'_{d \max}$	砾石含量 ρ_5 / %												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
徐村电站	击前	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95
	击后	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95
水城水库	击前	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.92	0.91
	击后	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.97	0.96	0.95	0.93	0.91
丹江水库	击前	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93
三项工程平均	击前	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93
	击后	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93

从表2可看出: 修正系数的起始修正值(即比值 ≤ 1 时的值) 所对应的 ρ_5 随不同工程、试验状态不同而异。如将上述三项工程击前、击后的修正系数进行平均后再线性回归, 得如下两式:

$$\text{击前: } \frac{\rho_{d \max}}{\rho'_{d \max}} = 1.01 + 0.192 \lg(1 - \rho_5)$$

$$\rho_5 > 10\% \quad r = 0.994 \quad (3)$$

$$\text{击后: } \frac{\rho_{d \max}}{\rho'_{d \max}} = 1.06 + 0.329 \lg(1 - \rho_5)$$

$$\rho_5 > 35\% \quad r = 0.994 \quad (4)$$

如果用式(1)、(3)、(4)三式重新计算修正后的砾质土最大干密度, 可发现徐村与水城两工程按本文给出的经验公式(3)(4)修正后计算的比值比直接用理论公式(1)计算更为接近实测值, 尤其当 ρ_5 较高时效果更为明显。对于中小型水利工程, 当缺乏砾质土不

同砾石含量的 $\rho_{d \max}$ 实测资料时,可直接用本文提出的经验公式(3)、(4)并结合式(1)进行计算已能满足要求。但从试验成果的规律、计算的吻合程度及与工程性质的密切关系看,以击后(试后)砾石含量计算较为合理,至于 ρ_s 多大时才对理论式进行修正,有关作者提出了各自的看法^[1,4],但均没有明确砾石含量是试前值还是试后值,且对砾石的界限粒径存在分歧。总的看来,本文提出的当击前砾石含量大于 10%,击后砾石含量大于 35% 时开始修正较为反映实际。

3 结 语

①用砾质土做为防渗体,考虑到现场条件与室内存在一定差异等不利因素,为确保土料的防渗效果,建议施工时宜控制压后砾石含量 $\geq 50\%$, $< 0.074 \text{ mm}$ 含量 $> 10\%$ 为宜,并应采用重型机具碾压密实。

②砾质土的击实(压实)后干密度与土料母岩性质、风化程度关系密切。

③当缺乏砾质土不同砾石含量的最大干

密度实测资料时,建议用本文提出的经验公式计算较为合理,而砾质土的最优含水量可利用细料($< 5 \text{ mm}$)最优含水量与粗料吸着含水量按击后(压后)粗细料比例换算求得,其计算误差完全满足规范要求。

④从试验成果的规律性、各项计算的精度及与工程性质的密切关系看,以击后(试后)砾石含量反映砾质土有关物理力学指标或计算较为合理。

参 考 文 献

- 1 王继庄等. 软岩风化料高土石坝防渗体的工程特性. 岩土工程学报, 1991, 13(3): 3~12
- 2 南京水利科学院等. SDS01-79 土工试验规程(上册). 北京: 水利出版社, 1981. 86~88
- 3 杨荫华. 土石料压实和质量控制. 北京: 水利电力出版社, 1992. 58~65
- 4 顾淦臣编著. 土石坝地震工程. 南京: 河海大学出版社, 1989. 238~240

收稿日期: 1999-06-23

(上接 33 页)

化形式与 β 的取值不相符合。当 β 取 0.5 时,即假定 Δp 的变化为三角形变化形式;当 β 取 1 时,即假定 Δp 的变化为直线均匀变化。显然,这两种假定过分简化了孔压变化形式。由此,造成了计算结果的误差。而取 $\beta=0.8$ 时,其结果介于前面两者之间,说明了合理的取用 β 值是减少误差的方法。另外,将计算时段 Δt 选取的尽量小也是减少误差的有效方法。

4 结 语

比奥固结理论是考虑孔隙水压力与土的固结变形耦合的严格的固结理论。为了在有限元计算中实现其耦合过程,本文总结了孔压消散到有效应力引起固结变形的两种方法。流量改

变法是通过各计算时段流量的改变来实现孔压到变形的变化。而二次荷载法是通过孔压等效荷载的改变来实现的。计算结果表明,二次荷载法可看作流量改变法在 $\beta=1$ 时的特例。为了减少计算误差,足够小的计算时段 Δt 与合理的 β 取值是行之有效的办法。

参 考 文 献

- 1 徐至钧,魏汝龙等. 圆形油罐地基变形特性的研究. 见中国土木工程学会主编. 第三届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981, 228~239.
- 2 王志建等. 软土地基 Biot 固结的一种有限元方法. 岩土工程学报, 1990, 12(6): 91~98

收稿日期: 1999-06-25