

风化土料修建高坝的可行性^①

杨 天 林

(水电部中南勘测设计院, 长沙)

提 要

本文以自然混合料和一种人工掺配料为代表, 简单介绍了龙滩水电站工程风化土料现场碾压试验的部份成果。通过对风化土料力学性质、特别是强度特性的分析, 说明风化土料属于砾石土范围, 力学性质能满足填筑高土石坝的要求, 是一种良好的筑坝材料。建议用指数方程表示抗剪强度, 在稳定分析中指数方程的参数可以换算为 c , φ 值。

无论在我国的南方或北方, 都经常碰到风化土料筑坝问题。当缺乏更为理想的土料时, 常常用风化土料作为高土石坝的防渗体。因此, 研究这种土料的力学特性有很大的实际意义。我们根据龙滩工程需要, 对风化砂页岩土料进行了大规模的现场碾压试验, 详细论证了风化料筑坝可行性。本文仅介绍这一试验研究的部分成果。

一、现场碾压试验概述

龙滩土料是由砂页岩风化而成, 根据风化程度的深浅和是否经过搬运, 分为残坡积土, 全风化和强风化三种类型。残坡积土呈红棕色和黄褐色, 以细料(粒径小于5mm)为主, 夹杂有风化不完全的块石, 定名为中塑限含砾粘质土, 和普通粘性土没有太大的差别。全风化砂页岩呈黄色、黄棕色和青黄色, 岩石的原生结构和力学性质已因全部风化而改变, 但仍保留着岩石的外形。处于深处的全风化料有时需要爆破开采, 因此级配情况与开采的方式、方法有关, 定名为含粘土的砾。强风化砂页岩裂隙发育, 非常破碎, 但仍保留着岩石的特性, 呈青灰色, 锤击有响声, 单个颗粒有较大的抗压强度。三种风化料的天然特性见表1。

表 1

风 化 料 类 型	比 重	天然干容重 (g/cm ³)	天然含水量(%)		级配含量(%)		定 名
			粗 粒	细 粒	粗 粒	粘 粒	
残 坡 积	2.75	1.55~1.70	7~13	20~23	4	24	CIg
全 风 化	2.72	1.55~1.83	4~12	15~20	61	7	GC
强 风 化	2.6~2.7	—	2~3	7~9	88	—	GW

注: 粗粒指粒径大于5mm, 细粒指小于5mm, 混合料为全料。

①本文部份资料摘自林如中等人编写的“红水河龙滩水电站风化土料碾压试验报告”和“龙滩水电站高土石坝筑坝材料研究阶段报告”。

碾压试验是在室内试验基础上进行的。根据工地大量筛分成果,对储藏量和级配变化幅度最大的全风化土料,确定了上限、平均、下限三条有代表性的级配曲线,用全风化单料和多种人工掺配土料进行了系统的室内试验研究。采用直径25.4cm的大型击实仪,在标准击实功能 $86.4t \cdot m/m^3$ 下,全风化混合料试验结果最大干容重 $\gamma_{dmax} = 1.89g/cm^3$,最优含水量 $w_{op} = 14\%$,相应的细料最优含水量为19%。此次碾压试验的目的之一就是验证室内试验成果能否控制现场开采情况。碾压试验结果表明,模拟实际施工开挖情况所得到的风化土料级配曲线,大都落在室内试验的级配范围内,有较好的代表性,可以说明龙滩风化土料的物理-力学特性。

现场碾压试验中对三种单料和多种人工掺配土料进行了大量的试验研究。这里着重介绍两种典型土料的试验结果。第I种是剥除复盖层后,从残坡积土开始,垂直开挖到全风化砂页岩的底部,留下足够厚度以保证不碰到强风化层。这种在开挖过程中按照储量多少进行混合而得到的土料称为自然混合料。对同一料场,残坡积土和全风化料的比例较为稳定,这一比例大体上为(3:7)~(4:6)。第II种是水平分层开挖,分别堆料,而后按重量比进行人工掺配。本文仅介绍一种有代表性的情况,配料比例为残坡积土35%,全风化土料35%,强风化料30%。

I、II两种土料碾压前后的级配情况分别如图1和图2所示。

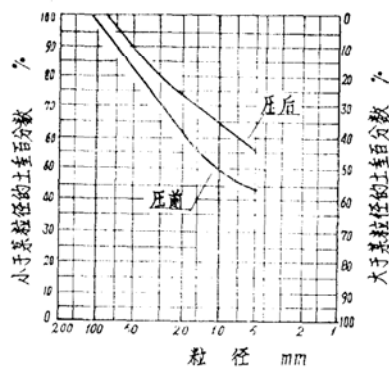


图1 自然混合料级配曲线

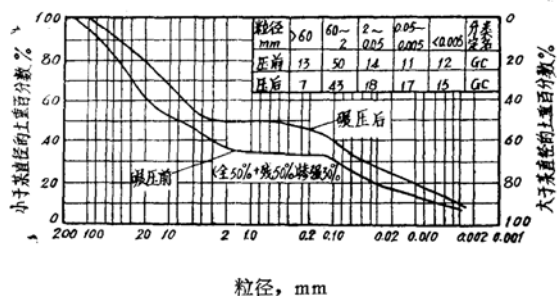


图2 人工掺配土料级配曲线

土料采用松动爆破,人工开挖,1.9m³装载机装入3t自卸汽车运料,退铺法铺土,人工整平,粒径超过150mm的予以剔除,铺土厚度40cm。碾压机械在经过对比试验之后选用了单联凸块振动碾。碾碾自重8t,直径140cm,长172cm,振动频率1800Hz,振幅1.3mm,激振力19t,总作用力27t。凸块振动碾碾压时行车速度为1.2~1.5km/h,碾压10遍。在碾压现场用灌砂法测容重,进行大筛筛分,并按粒径分类测含水量,加权平均后作为全料含水量。碾压完成后挖取原状土样,在工地试验室进行力学性质试验。试验方法按文献[1]进行。

抗剪强度试验采用大型直剪仪,试样直径30cm,高20cm,垂直压力和水平推力都采用

四川绵阳生产的千斤顶施加,最大出力为20 t,实际最大垂直压力可达20 kg/cm²。仪器分上盒和下盒,中间开缝10mm。千斤顶的压力用压力表测定,变形分别用10mm和150mm量程的百分表测定。由于千斤顶加荷不易控制,无法做慢剪试验,因而对非饱和土采用不固结快剪,饱和土采用固结快剪。大型直剪仪兼作压缩试验。大型渗透仪直径28cm,用变水头法测定。渗透稳定试验采用改装的大型渗透仪进行。

二、现场碾压试验成果

本节着重介绍强度试验结果,其他方面仅予综合说明。大型直剪试验结果可以按照库仑公式整理

$$s = p \tan \varphi + c \quad (1)$$

而大量资料证明,在高压下抗剪强度 s 更符合指数规律

$$s = A p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^m \quad (2)$$

式中 p 和 p_a 分别为垂直压力和大气压力, c 为凝聚力, A 、 m 分别为对数格子上直线的截距和斜率。 s 、 p 、 p_a 和 c 的单位 kg/cm²。试验结果按上述二式分别绘于图3和图4。强度参数及有关情况汇总于表2。

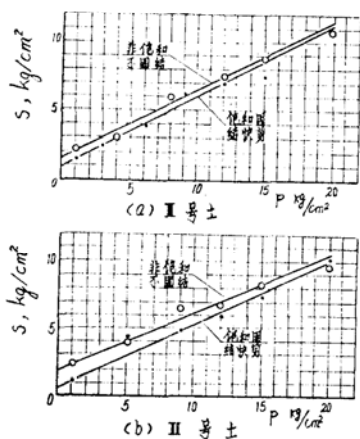


图3 库仑强度包线

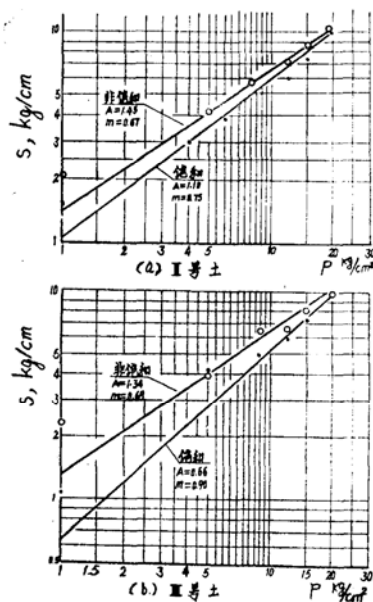


图4 指数方程强度包线

中南设计院宜昌实验室用龙滩全风化料在直径50cm的大型直剪仪上进行试验,最大垂

表 2

土 样 编 号	试验方法	γ_d (g/cm ³)	w (%)	φ (°)	c (kg/cm ²)	A	m
I	非饱和快剪	1.77	16.4	26.2	1.6	1.45	0.67
	饱和固结快剪	1.77	16.4	26.3	1.0	1.10	0.75
II	非饱和快剪	1.81	13.9	23.1	1.9	1.34	0.68
	饱和固结快剪	1.81	13.9	25.2	0.6	0.66	0.90

注: 表中 W 为试验前含水量。

直压力达到 50 kg/cm², 试验结果如图 5 所示。由图可见, 在高压下抗剪强度 s 和指数方程的拟合更好一些。

现行的土石坝稳定分析和应力应变计算, 抗剪强度大都用库仑公式表示。如果采用指数方程表示抗剪强度, 为了利用原有的公式和方法, 根据式 (2) 和导数的几何意义可得:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{ds}{dp} = Am \left(\frac{p}{p_a} \right)^{m-1} \quad (3)$$

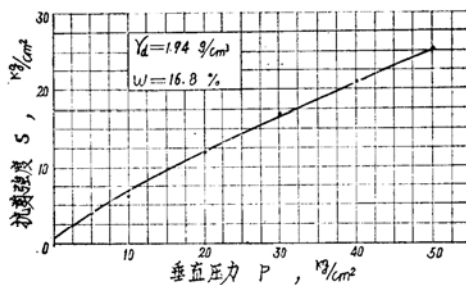


图 5 风化土料高压下强度包线

$$c = Ap_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^m - p \operatorname{tg} \varphi = Ap_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^m (1 - m) \quad (4)$$

这样就可以利用原有体系进行计算, 只不过 φ 和 c 是变值。在稳定分析中, p 为垂直于滑弧面上的压力, 在有限元法应力应变计算中, 取 p 为垂直应力 σ_y 。

根据现场碾压试验, 将自然混合料和人工掺配土料其他试验成果概括在表 3 中。

表 3

土 号	土料名称	粗粒含量 (%)		含水量 (%)		干容重 (g/cm ³)	渗透系数 (10 ⁻⁶ × cm/s)		破 坏 比 降	压 缩 性	
		压 前	压 后	全 料	细 料		水 平	垂 直		压缩 指数	压缩 系数
I	自然混合	56.4	44.9	16.4	20.2	1.77	3.5	1.5	17.2	0.12	0.011
II	人工掺配	53.6	45.7	13.6	19.2	1.81	7	6.7	27.2	0.11	0.011

注: 压缩指数 $C_c = (e_{i1} - e_{i2}) / (\lg p_{i2} - \lg p_{i1})$ 。

由表 2 和表 3 可见, 两种土料的力学性质非常接近, 都有较高的抗剪强度, 基本上属于低压缩性土, 渗透系数为 $i \times 10^{-6}$ cm/s。特别是人们所耽心的渗透稳定性, 属于流土破坏型式, 如果防渗体厚度取水头的 1/5, 则在没有反滤层保护的情况下安全系数可以达到 3.0

以上。总之,应该说风化土料的力学性质是可以满足高土石坝防渗要求的。

三、风化土料的强度特性

(一) 风化不完全的粗颗粒含量和质量是影响风化土料抗剪强度大小的重要因素

在砂页岩全风化土料中,普遍含有风化不完全的粗颗粒,粒径从几厘米到十几厘米,干容重从 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 到 $2.1\text{g}/\text{cm}^3$ 。这些粗颗粒本身的强度变化很大,有的手捏即碎,有的锤击也难粉碎。

将不同粗粒含量的风化料在标准击实功能和各自的最优含水量下击实,制成不同干容重的试样。把制得的试样饱和后都在垂直压力 $p = 50\text{kg}/\text{cm}^2$ 下固结,然后进行快剪,得到不同的抗剪强度 s 。用相同土料同样条件下的击实试验中所得到的击后粗粒含量,作为本次试验的击后粗粒含量,其结果见表4。

表4

序 号	1	2	3	4	5
级 配 情 况	全风化细料	全风化上限	全风化平均	全风化下限	掺40%的强风化料
试样干容重 $\gamma_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.80	1.86	1.89	1.91	1.99
粗粒含量 (%)	击 前	0	33	61	77
	击 后	0	20	32	46
	剪 后	0	20	26	31
破 碎 率 $n(\%)$	0	0	18.8	32.6	31.6
抗剪强度 $s(\text{kg}/\text{cm}^2)$	17.7	25.2	27.0	28.1	31.4

根据表4绘出抗剪强度 s 、干容重 γ_d 和击实后粗粒含量 m_s 的关系曲线如图6所示。由图可见,当 m_s 小于60%时,抗剪强度 s 随 m_s 的增加而上升。其原因一方面是粗粒含量增加时,在相同的击实功能下干容重增加,颗粒之间挤得更加紧密,要发生剪切破坏更困难一些。另一方面,粗颗粒之间的咬合作用比较强,妨碍了土料的剪破。特别是处在剪切面上的粗颗粒,本身强度大小对试样的抗剪强度有很大影响。一些软弱的粗颗粒在剪切过程中比较容易剪断,甚致在固结过程中已被压碎,对提高土料抗剪强度的作用较小。

相反,自身强度较高的粗颗粒很难被剪断,而是沿着粗颗粒和细料的接合面剪开,使剪切面变得起伏不平。剪力在克服这样的阻力时要消耗很大的功,抗剪强度往往因此而增加较多。

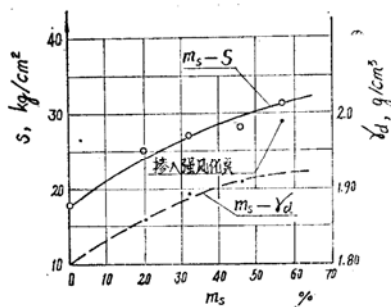


图6 $m_s - s$ 和 $m_s - \gamma_d$ 曲线

表4中几种土样的级配曲线, 主要部份都大致平行, 都缺乏中间粒径(0.15~1.5mm), 级配相近, 主要是粒径粗细之差。因此, 无论是干容重的提高, 还是咬合作用的增强, 起因都是粗颗粒含量的增加。

(二) 饱和对风化土料抗剪强度的影响

砂页岩风化料中的低强度粗颗粒有时在碾压后还保持着原来的结构。由于有泥质胶结等原因, 浸水前在粗颗粒内部还有一定联结力, 可以在某种程度上提高土样的抗剪强度。在浸水饱和后, 土料发生了较大的物理变化, 某些胶结物质被溶解。粗颗粒因软化而强度降低, 其结构甚致在渗透水流的作用下也会瓦解, 土样的抗剪强度也因起骨架作用的粗颗粒的消失而降低。在渗透试验后的土样中, 再也找不到前面所说的低强度粗颗粒就是明显的例证。在其他条件相同、仅仅直剪试验条件不同的情况下, 设非饱和快剪的抗剪强度为 s_u , 相同垂直压力下的饱和固结快剪抗剪强度为 s_s , 如果用 $\eta = s_s/s_u$ 表示抗剪强度的软化系数, 在垂直压力 $p = 1 \text{ kg/cm}^2$ 时, I号土为0.71, II号土为0.47。虽然 s_s 中包含有因固结而提高的抗剪强度部份, 但又不便采用不排水剪, 所以 η 值可以大致给出一个饱和对抗剪强度影响的概念。

随着垂直压力 p 的增大, η 越来越大, 以致接近于1。究其原因: 第一, 在垂直压力加荷过程中, 非饱和土的孔隙比越来越小, 饱和度不断增加, 以致非饱和土越来越接近于饱和土的性质。例如, 在 $p = 16 \text{ kg/cm}^2$ 时饱和度接近于90%。因此, 饱和对抗剪强度的影响也大大缩小。第二, 由于 p 的增加, 或者由于不均匀压缩产生了剪切变形, 粗颗粒只保留一个虚假的外型, 其结构实际上已经被破坏, 因而饱和对抗剪强度的影响也就甚小了。

由图3和图4可见, 饱和主要使 c 值降低, 而 φ 角大体维持不变。随着土样长期浸水饱和以及渗透作用, 砂页岩风化料的 c 值还可能进一步降低。因此, 采用式(2)进行计算时, 因为 p 趋于零时抗剪强度 s 也趋于零, 可以较好地反映将来 c 值可能降低的实际情况。随着资料的积累, 对长期浸水后保留的 c 值有了定量的认识, 可以将式(2)修改为在 p 小于某一数值后, s 等于常数 c 。

(三) 关于剪胀现象

密度大的土在剪应力作用下, 剪切面上土的颗粒发生滚动, 以致一些颗粒翻越过另外一些颗粒, 使土样体积发生膨胀, 即剪胀现象。碾压后的砂页岩风化土料, 在低压力时无论饱和土还是非饱和土都出现剪胀现象, 与砾石土的规律极为相似。图7表示了垂直压力 $p = 1 \text{ kg/cm}^2$ 时相对膨胀量 $\Delta h/h$ 随剪应力 τ 的变化过程。 Δh 表示土样竖向膨胀量, h 表示土样的原始高度。我们知道, 颗粒较粗, 颗粒之间挤得紧密的土, 在一些

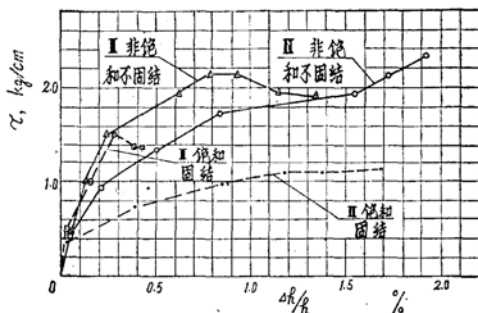


图7 大型直剪剪胀过程线

颗粒翻越另一些颗粒时, 产生的膨胀量更大些。II号土中由于掺入了30%的强风化料, 碾压后的粗粒含量为45.7%, 干容重为 1.81 g/cm^3 。而I号土碾压后的相应值分别为44.9%,

1.77g/cm^3 。相对来说, II号土粒径更粗一点, 容重更大一点, 因而剪胀现象也更明显。由图7可以看到, 无论是最终膨胀量还是在相同剪应力下的膨胀量, II号土明显比I号土大。

(四) 剪切过程线

设剪应力为 τ , 剪切试验终了时的剪应力为 τ_{end} , ΔL 为累计水平位移, D 为土样直径。现将II号土饱和固结快剪的水平位移过程线经过归一化后, 绘于图8。由图可见, 除了垂直压力 $p = 1\text{kg/cm}^2$ 之外, 点据都密集在曲线的附近, 呈双曲线形状。当 $\Delta L/D = 2\%$ 时, 曲线开始明显弯曲, 在剪应力作用下水平变位开始加快, 此时 τ/τ_{end} 约为0.6。当 $\Delta L/D = 8\%$ 时, 水平变位急剧增加, 呈现应变硬化现象, τ 为最终值的95%。当 $p = 1\text{kg/cm}^2$ 时, 由于在剪切过程中出现剪胀现象, 水平位移过程线呈现应变软化, 剪应力的破坏值, 即终值, 小于峰值强度。因而出现 τ/τ_{end} 大于1的情况, 点据偏离归一化曲线的距离也较大。由此可见, 砂页岩风化土料的剪切过程线和一般硬粘土的剪切过程线是非常一致的。

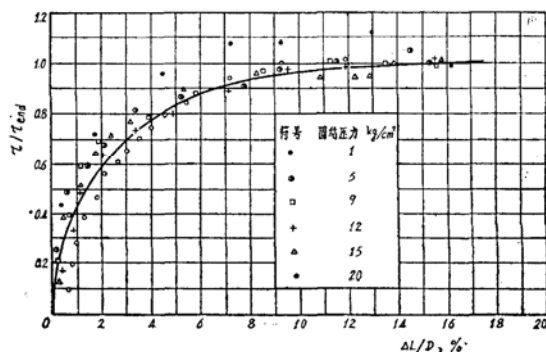


图8 水平位移过程线

四、风化土料筑坝的可行性

在前面的分析中已经看到, 风化土料的抗剪强度特性无不与混合料中的粗粒含量有极大关系。实际上, 风化土料的其他力学特性也都与粗颗粒含量有关。图9绘出了碾压试验中干容重随碾压后粗粒含量的变化情况。图中的“残+全+强”是指在残坡积和全风化各占50%的基本土料中, 再掺入不同比例的强风化进行碾压的试验结果。“残+全”是指残坡积和全风化以不同比例掺合时的试验结果。由图可见, 当碾压后粗粒含量在30~60%之间时, 干容重随粗粒含量的增加而增加。并且明显可见, 掺入强风化后, 干容重值比不掺强风化要稍大一点。其他配比的试验结果也与此相类似。

图10是渗透系数 k_{10} 随粗粒含量的变化情况。室内试验是用表4所列的几种全风化土料的试样进行渗透试验的结果。现场碾压是在30%残坡积加70%全风化的基本土料中, 掺入不同比例的强风化料的试验结果。图中的粗粒含量分别为击实后和碾压后的粗粒含量。由图可见, 当粗粒含量小于30%时, 混合料即全料的渗透系数基本上不受粗粒含量的影响, 而是由细料控制。当粗粒含量大于30%以后, 渗透系数 k_{10} 的对数值大体上与粗粒含量成直线变化。

由上述可见, 粗粒含量对风化土料的力学性质有明显的影响, 这一点恰恰是砾石土的特征。碾压后的风化土料不仅颗粒级配属于砾石土, 而且表现出砾石土的力学特性。国外采用砾石土作防渗体已经比较普遍, 并且有不少高土石坝在成功地运行着(见表5)。砾石土用作高土石坝的防渗体, 和普通土料相比, 除了广开料源, 就地取材之外, 还有承载能力大、便

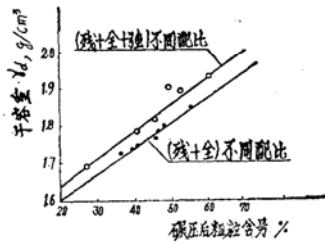


图9 干容重与粗粒含量关系

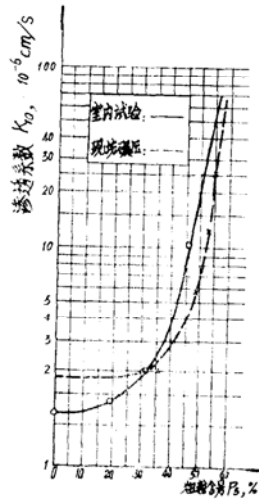


图10 粗粒含量与渗透系数关系曲线

于碾压机械行走、含水量容易控制,以及万一防渗体产生裂缝,粗颗粒有限制裂缝开展的作用等优点,因而愈来愈受欢迎。

表 5

序号	坝名	国家	坝高(m)	建成年份	粗粒含量%	土料情况
1	罗贡	苏联	325	在建		粘土碎石混合料
2	努列克	苏联	317	1980	20~50	砾石土
3	奇科森	墨西哥	263	1981	18~45	砾石土
4	特里	印度	261	在建		粘土卵石混合料
5	买加	加拿大	245	1973	25	冰碛土
6	契伏	哥伦比亚	237	1975		粘土碎石混合料
7	奥洛维尔	美国	235	1968	45	粘土掺砂砾石

五、结 语

通过风化土料强度特性的分析和力学特性与粗粒含量关系的讨论,可以看到碾压后的风化土料不仅在颗粒级配上属于砾石土,而且表现出砾石土的一些重要特性。风化土料不仅力学指标可以满足高土石坝的要求,而且作为一种砾石土,已经有一些高土石坝成功运行的实例。由此说明风化土料是一种值得重视的良好的筑坝材料。但是,风化土料中粘粒含量低(15%左右),粉粒含量高(30%以上),在水中容易崩解,妥善设置反滤层是非常必要的。在高

土石坝计算中, 抗剪强度用指数方程表示将会更合理, 采用式(3)、(4)确定稳定分析中的 c 和 $\text{tg}\varphi$ 值是可行的。

参 考 文 献

- [1] 水利电力部, 土工试验规程(SDS01-79), 水利电力出版社, 北京, 1979年。
- [2] Tien Hsing Wu, Soil Mechanics, Second Edition, Allyn and Bacon, Inc., Boston, 1976, pp.213~216.
- [3] 蒋国澄, 近代高土石坝结构的重要进展, 土石坝工程, 1984年第1期。

Possibility of Using Weathered Materials to Construct High Dams

Yang Tian-lin

(Mid-South Design Institute of Hydroelectric Projects, Changsha)

Abstract

This paper presents briefly part of the field test fill results of the representative naturally-mixed and artificially-mixed weathered materials at longtan hydroelectric project site. Analysis of the mechanical properties, in particular the strength properties of the weathered materials shows that the weathered materials, whose mechanical properties satisfy the requirements for high embankment dams, belong to the type of gravel soil. It is recommended to use an exponential equation to express the shear strength and the parameters of the exponential equation may be transformed into c and φ values in the stability analysis.