

# 滞洪水库工程施工 对粉细砂碾压特性的探讨

楼望俊

(北京市水利局 100036)

**摘要** 永定河滞洪水库工程由于其特殊的运用和当地条件，以中细砂料为填料和地基。对这种一般水工上十分忌讳，因而也比较生疏的材料，工地不得不作相当多的试验研究。文中根据本工程的室内外试验结果，对此种材料的特殊碾压特性作一粗浅的探讨。

**关键词** 滞洪水库 粉细砂 碾压特性

TV6 B

## 1 粉细砂是本工程中的一大难题

在海河流域规划中，为减除永定河官厅水库以下山峡区间 $1600 \text{ km}^2$ 暴雨洪水对首都安全的威胁，计划在山峡出口修建陈家庄水库。由于该工程近期暂时难以开工，国家批准在大宁水库到京良铁路间的永定河右侧，修建稻田、马厂两座水库，加上原有的大宁水库，共有 $8000 \text{ 万 m}^3$ 的调蓄容量，作为“滞洪水库”，暂时替代陈家庄水库。它使北京市卢沟桥以下永定河道防洪标准由50年提高到100年一遇，降低小清河分洪几率与洪量，免除或减轻丰台、房山分洪区30万人口的乡镇、卫星城、企业工厂的淹没损失。

稻田、马厂地表是第四系全新统冲积层覆盖，表层为 $1\sim8 \text{ m}$ 厚的细砂， $5\sim14 \text{ m}$ 的中砂，以下为最大厚度 $20 \text{ m}$ 的壤土，再以下有砂卵石层，下伏第三系粘土岩、碎屑岩。

按初设报告，本工程地基砂层相对密度 $0.22\sim0.42$ ，饱水情况下存在地震液化问题。

众所周知，对于总是离不开水的水利工程来说，特别“忌讳”均匀的粉细砂。它在填筑时难以碾压密实，饱和时易于震动液化，对工程的安全、稳定是个莫大威胁。

《水工建筑物抗震设计规范》明确规定：对有抗震要求的建筑，均匀的中、细、粉砂属可液化地基，应采取置换、加密、压重、桩基、围封等措施进行处理；中、细、粉砂及粉土不宜用作筑坝材料；对无粘性填筑材料的碾压相对密度值：浸润线以上不小于 $0.75$ ，浸润线以下根据地震烈度在 $0.75\sim0.85$ 间选取。

《堤防工程设计规范》规定：位于地震烈度 $7^\circ$ 以上的Ⅰ级堤防，经主管部门批准，应进行抗震设计；有抗震要求的堤防应按国家现行标准《水工建筑物抗震设计规范》进行；对于必须处理的可液化土层当挖除有困难时，应采取处理措施；粉细砂不宜作为堤身填筑材料，不得不用时应采取处理措施。

滞洪水库工程区地震设防基本烈度为 $8^\circ$ 。按照上述要求，粉细砂的堤、闸地基都得作加固处理。库内开挖出来的中

细砂料得运出去弃掉，堤防填筑得另找料源。如果这样，滞洪水库设计的可行性就难以成立了。所以，粉细砂是本工程一大技术难题。

## 2 滞洪水库不同于一般的水库

滞洪水库的运用条件与一般的水库比较，存在着本质的差别。水库一般是拦河筑坝，库内常年有水。而滞洪水库为主河道旁侧的滞洪区（上游有官厅水库、三家店拦河闸，平常河水全经引渠进城），常年无水。只逢永定河遇超过20年一遇频率洪水，本工程才有数日的滞洪机会，库内蓄水时间仅占运用期大约1%。可见，滞洪与地震同量遭遇的几率应是极低的。另外，这个滞洪水库只是近期应急，陈家庄水库终究还是要建的。

鉴于上述理由，设计和审查文件明确：滞洪水库只有进水闸、连通闸、退水闸、分洪闸4座建筑物按 $8^\circ$ 地震设防；而左堤、右堤、中堤、横堤4座建筑，执行Ⅰ级堤防标准，但不考虑地震与滞洪遭遇。按《堤防工程设计规范》规定，Ⅰ级堤防无粘性土料的压实标准为相对密度 $0.65$ 。因为库区开挖量挺大，填筑砂料充足，设计堤顶宽 $75\sim100 \text{ m}$ ，堤坡 $1:4.5$ ，借以提高它的抗灾能力。

这样一种思路，既省去对 $300 \text{ 万 m}^2$ 多的堤防地基防震处理，又利用挖库砂料筑堤，使工程投资减少约半。这是本工程可行性成立的重要条件。

## 3 尽可能弥补粉细砂带来的不足

北京地区发生 $8^\circ$ 地震固然罕见，低烈度地震近年却发生过多次。参加过密云水库修建和抗震加固的人，对粉细砂在抗震方面的危害深有体会。粉细砂地基和粉细砂填堤总是工程的薄弱环节，虽然设计不作抗震校核，施工中仍应尽可能提高地基和填筑的密实度，增强工程的稳定性。

对地基，要求承包商在地基清理平整后，一律用大吨位震动碾充分压实，至少使地基表面 $1\sim2 \text{ m}$ 范围的密实度有显

著提高。

对堤防、滞洪水库的库容主要是开挖出来的。下半截堤身是由砂滩开挖而成，未经碾压，按初设报告，相对密度只有0.22~0.42。要求承包商对堤防地基重新取样试验，凡相对密度不足设计要求者，挖除表面垂直厚度1m（水平宽4.5m），重新上料分层填筑压实。这一部位大体是堤坡的滑弧危险区，将这范围土层逐层压实，对提高堤防安全有重要意义。

对压实标准，希望通过优化填筑碾压工艺，尽可能使填筑密实度超过初步设计提出的标准，相对密度0.65。2000年秋，委托北京市机械施工处在稻田库中部位置进行了碾压试验，证明该区砂料可以达到相对密度0.70的压实标准。后来，以20万m<sup>3</sup>的连通闸西北平台作为试验段，以相对密度0.70的标准执行，也成功了。因而，技术设计把压实相对密度要求由初设的0.65提高到0.70。

#### 4 “假凝聚力”使粉细砂难以压实

2001年春，筑堤施工全面动工前，各标段都以本段砂料分别进行碾压试验。有一些地段，无论怎样加大震动功能，变换震动工艺，就是达不到0.70相对密度的要求。相对密度0.65和0.70的干容重差也就0.02g/cm<sup>3</sup>，就是上不去。

试验说明，均匀中细砂和一般砾石、砂卵石料有明显不同，加大碾压功能对提高其密实度功效甚微。

请中国水科院、北京市水科所、若干施工单位试验室做了大量试验，来探讨砂料的碾压特性。这里引述其中的一组试验结果：

永定河河滩的砂料从上游向下游地逐渐变细。分别自滞洪水库工地上、中、下游，各取代表性砂样进行室内试验。中游的砂样，取自京良桥上游料坑，取了2#和4#两个样，两者颗粒粗细接近，但4#样含有粉煤灰成分。试验证明，粉煤灰的存在使砂料的比重和击实容重降低。上游河中有高井、石景山2座大电厂，故部分砂层含有粉煤灰。

4个砂样的物理特性如表1。

对这4组砂样做不同含水率的轻型击实试验，其结果如表2。

由试验结果可以看出：

均匀粉细砂的击实容重与含水率的关系曲线与一般土料以及砂砾料有显著不同。一般砂砾料含水率与击实容重的关系曲线呈“ $\vee$ ”形，全干最易压实，过最低点后，压实容重随含水率增加而增加。填筑施工中，讲究充分洒水，砂砾料含水率愈高，愈易于压实。粘性土料含水率与击实容重的关系曲线呈“ $\wedge$ ”形，有一最优含水量，过大过小都难以压实。均匀粉细砂的含水率与击实容重的关系曲线却呈“U”形，2个最大干容重的含水率值，1个为0%~0.5%，另1个为15%~19%。含水率3%~10%这一区间内，含水率变化对击实干容重影响不大，属于难以压实区。仔细观察均匀粉细砂碾压可以发现，碾棍下边砂层下沉，碾子旁边砂料上涌，就算重碾强震，密实

表1 砂样物理特性

砂样编号	1#	2#	3#	4#
取样地点	上游	中游	下游	中游
比重	2.68	2.68	2.68	2.62
最大干容重(g/cm <sup>3</sup> )	1.85	1.77	1.85	1.67
最小干容重(g/cm <sup>3</sup> )	1.42	1.42	1.40	1.32
20~5mm	2.0%	0.0	0.0	0.0
5~2mm	2.0%	0.4	0.0	0.0
2~0.5mm	17.0%	6.0	5.5	2.0
0.5~0.25mm	21.0%	34.7	18.5	24.0
0.25~0.05mm	54.0%	55.0	55.0	73.0
0.05~0.005mm	4.0%	3.3	21.0	1.0
≤0.005mm	0.0%	0.0	1.0	0.0
不均匀系数Cu	3.3	2.85	3.0	2.0
曲率系数Cc	0.82	0.85	0.92	1.06
平均粒径	0.23	0.21	0.15	0.20
土样名称				含细粒土砂
相对密度为0.65的干容重(g/cm <sup>3</sup> )	1.68	1.61	1.675	1.53
相对密度为0.70的干容重(g/cm <sup>3</sup> )	1.70	1.63	1.69	1.65
相对密度为1.0的干容重(g/cm <sup>3</sup> )	1.85	1.77	1.85	1.67
干容重1.53g/cm <sup>3</sup> 的相对密度值	0.30	0.44	0.36	0.65
干容重1.67g/cm <sup>3</sup> 的相对密度值	0.64	0.81	0.675	1.0

表2 砂样不同含水量的干容重

1#砂样	2#砂样	3#砂样	4#砂样
含水率(%)	干容重(g/cm <sup>3</sup> )	含水率(%)	干容重(g/cm <sup>3</sup> )
0.0	1.73	0.0	1.72
0.35	1.74	0.33	1.72
1.82	1.66	1.90	1.61
3.82	1.62	4.11	1.59
5.71	1.62	5.89	1.59
8.02	1.63	8.01	1.59
10.10	1.63	9.83	1.61
12.57	1.64	12.04	1.62
13.51	1.67	14.43	1.63
14.88	1.71	15.65	1.65
16.90	1.68	16.32	1.68
		17.99	1.67
		17.3	1.70
			18.74
			1.56
		18.12	1.66
			20.02
			1.55

度变化不大。这和砾石、砂砾料或粘性土料碾压时，几乎难以觉察碾子两边有涌起现象，加大压实功能就可以明显地提高压实密实度，有着明显的差别。人们用“假凝聚力”来解释这一现象。

2000年9月北京市机械施工处做碾压试验时，期望利用当时多晴天，晒干沙滩表层，达到最好的压实效果。可惜，反复翻晒，地表砂料含水率最低也就到3%。2001年4月，新疆水利设计院李江工程师介绍他们的引额济乌工程。那里地处通古特沙漠腹地，大漠气候，高温干燥，沙层的天然含水率也有1%左右。可见，以北京的气温湿度条件，除采取烘箱烤炉，企望河滩沙丘含水率降到0%附近是不可能的。现场加水方法有用洒水车，有用水管，有用喷灌设备，一边喷洒，一边下渗，保不住水，到碾压时工作面的含水率多数是8%~10%，达不到最佳含水率。室内试验可用烘烤砂样或用不透水容器，

使砂料含水率降低到0%或16%、18%，在最优含水率下击实。施工现场却总是在最难压实的含水率下实施碾压。这就是均匀砂料特别难以压实的原因所在。

## 5 测试方法可操作性差

由表1可看出，砂料的最大、最小击实容重，及各相对密度的干容重值，与该材料的颗粒级配密切相关。表1列出了相当于0.65, 0.70, 1.0相对密度的干容重和干容重为 $1.67\text{g/cm}^3$ 相对应的相对密度，如干容重 $1.67\text{g/cm}^3$ 的含细粒土砂，相当的相对密度从0.64, 0.81, 0.675到1.0，干容重 $1.53\text{g/cm}^3$ 相当的相对密度从0.30, 0.44, 0.36到0.65。这4个样得出的数据差异之大可能提醒人们明白为什么这个指标往往让人发生误会。

每个砂样都有不同的最大、最小干容重和对应各相对密度的干容重。如上述1#与3#, 2#与4#砂料，平均粒径的差别不大，最大、最小击实容重的变化却不小，同一相对密度的干容重当然也有颇大差别。1#与3#砂料，平均粒径相差较大，其最大、最小击实容重却相近。所以，严格来说，每一个试样都应单独进行击实试验，得出其最大、最小击实容重，计算出其不同相对密度的干容重值。可是，真要这样做，试验周期太长，施工中无法实施，试验规程也没有这样要求。在工程实际中，在土料颗粒级配大体相同的料场，取几个代表性试样，试验得出一条“相对密度—干容重关系曲线”，在这一料场通用。

按初设报告：本工地砂料0.65相对密度的干容重是 $1.768\text{g/cm}^3$ ；地基砂层的相对密度为0.22~0.42。对此笔者分析，本工地的砂料相对密度0.65砂料干容重达不到 $1.768\text{g/cm}^3$ ，地基砂料相对密度也不至于低到只有0.22，恐怕是用砂砾料试样的“相对密度—干容重曲线”推算得出的数值。通过施工中实际取样试验，本工地地基砂料相对密度一般都在0.65以上，并不存在相对密度只有0.42的情况。

还有一个问题，从实践看，现行试验规程中，关于中细砂样的最大、最小击实容重试验方法不够严密，试验结果的重现性较差。我们曾特意组织全工地试验员集中训练，严格执行操作细节。即使如此，同一砂样，同一试验员，每一次试

验结果往往有明显差别。

总之，相对密度这个判别松散材料密实度的指标，应用在均匀中细砂工程中，可操作性不好，很容易产生错误，应当进一步研究完善。

## 6 均匀粉细砂的压实工艺

均匀粉细砂力学指标低，难以压实，饱和时又易液化，对工程的安全不利，故一般尽可能避开。永定河滞洪水库因其特殊条件，在这种地基上用这种材料填筑。

为慎重妥善解决滞洪水库的碾压标准问题，建管处于2001年4月5日、9日，分别请清华大学水电系教授，土坝专家周景星、王清友、王君连，水利部天津院老总工，设计大师林昭、水科院教授陈愈炯、新疆水利设计院李江工程师，同两个设计院设计总工，两个监理公司总监，质量中心站及建管处负责同志，举行座谈会。

会议取得比较一致的看法。(1)均匀粉细砂力学性能差，难以压实，水利工程中一般都尽量避免将其作为地基或填筑材料。(2)滞洪水库有其特殊情况，设计和审查单位据此确定的设计原则是合适的。(3)工地采用的碾压工艺是严谨合理的，可满足本工程质量要求。(4)相对密度的指标可操作性较差，主要依靠碾压工艺来保证质量。(5)建议研究用最大击实容重的90%或95%作为控制标准。(6)应该根据工地实际得到的填筑土料物理力学指标，核算堤防的稳定安全系数。设计进行了核算，证明工程是安全的。

根据以上调研，建管处明确：压实标准仍维持相对密度0.65，但尽可能超过。对碾压工艺作出如下规定：(1)震动碾重不得小于12t。(2)铺料厚度采用50cm。(震动碾压后，表面存在“松层”，铺层厚度再薄对提高密实度没有作用)。(3)含水量不作规定，洒水主要为了防尘。(4)铺完料后应先用静碾拉平、再开始正式震动碾压。(5)每个堤段根据砂料变化，取样试验求得相应的相对密度与干容重关系曲线。(6)震动碾压8遍后，取样试验压实干容重，求得相对密度，绝大多数可以超过0.65，如达不到，则设法处理。

(责任编辑：林跃朝)

## •简讯•

# 南水北调中线北京段工程简介

南水北调进京后，为解决北京市内供水的需要，尚需修建如下配套工程：①规划修建自来水厂14座。②修建南干渠。自总干渠老庄子附近的南干渠分水口至亦庄调节池全长25.36km，设计流量 $40\text{m}^3/\text{s}$ ，向丰台水厂、黄村水厂、亦庄水厂、通州水厂和自来水十厂供水。③工程量及占地。北京段总干渠主要建筑物包括：暗涵长35km、扬水泵2座、输水管道长45km及调蓄水库。控制工程包括节制

闸7座、分水口门7个、退水闸4座、左岸排水工程11处、桥梁1座。工程永久占地约 $66.6\text{hm}^2$ ，临时占地约 $43.5\text{hm}^2$ 。④工程投资及筹资方式。南水北调中线北京段总干渠投资估算约需61亿元，上述费用按照国家计委的统一部署，筹资方案为中央财政占20%，地方政府占40%，银行贷款占40%。配套的南干渠、自来水厂及输水管线总投资约需45亿元，由北京市政府自行解决。摘自《中国水利报》