

# 软土地基的处理

第六图书馆

软土 地基 加固水电技术情报(成都)李燕辉不详1990第六图书馆

第六图书馆

*www.6lib.com*

# 软土地基的处理

李燕辉

## 提 要

本文对软土地基的地质勘探试验、软土地基的工程处理与防治等方面，结合自己参观学习和工作中的点滴体会，以及我国在软土地基上修建水工建筑物有代表性的若干工程实例，作了较为系统的介绍。

第六图书馆  
www.6lib.com

## 一、概 述

水工建筑物的地基，一般分为两大类，即软土地基和岩石地基两类。所谓软土地基，主要是指：砂性土、粘性土、淤泥质软土和黄土类土。其主要特点是：地基承载能力低，变形量大，渗透稳定性差和抗滑稳定性低等。为此，必需慎重选择相应的专门结构，针对地基中存在的问题，采取适当的加固处理措施，并埋设必要的原型观测仪器，监视施工期和运行期的安全。

在水利水电工程中，软土地基常见的主要工程地质问题有：地基承载能力低，沉陷变形大，砂层液化，渗透变形；其次是地基中承压水、基坑临时边坡的稳定，基础回弹挤出等问题。对这些问题必须认真处理，以满足各种设计条件和荷载组合情况下，保证建筑物安全运行。

软土地基常见的主要处理措施有：换基、板桩围堰、桩基、井点排水、减压井和预压加固及加强建筑物刚度等。

从上述可见，软土地基的地质情况是比较复杂的。为了对建筑物地基采用合理的加固措施，认真做好建筑物地基的地质勘探试验工作，并结合基础开挖，对地基特性和主要工程地质问题作出正确的评价非常重要。

软土地基加固的理论与技术早已引起工程界的重视，尤其是近半

个世纪以来，在软土地基上修建工业民用建筑、水利水电工程的数量愈来愈多，从而也大大促进了软土地基加固理论和技术的发展。在最近一个时期发展和应用较多的加固方法有：旋喷法、强夯法及振冲加固法等。旋喷法的深层搅拌化学加固已在我国试用成功；振冲法早在30年代就在德国广为应用，1977年在我国南京试用成功后，迅速得到推广应用，累计碎石桩进尺已达七万m，在砂土和壤土地基，已有较多的成功经验，在粘性土中也有较好的进展，但尚需进一步探讨研究，有待原位观测，以积累资料和总结提高。强夯法已经取得的一些进展和加固效果，很引人注目，锤重已由1~2t加大到10t以上，最大达200t，自由落高也由1~2m加大到10m以上，最大达40m，因此夯击能量一般已达到150~500t·m，特殊情况下可达1000~2000t·m，此法应用范围极广，运用不同的工艺，可适用于各种土层，加固效果极为明显，但现有加固理论难以解释，有待试验和观测积累资料，找出有规律性的东西，总结提高和完善其理论。

## 二、软土地基的地质勘探试验

为确保修建在软土地基上的建筑物的安全，应切实做好软土地基的地质勘探试验工作。作为闸坝工程的软土地基应查明闸（坝）基及两岸接头的各土层工程地质特性与其物理力学性质指标、地下水分布

情况、水质等。

具体的工程地质勘察布置原则有：

1. 勘探剖面应结合闸（坝）建筑物的布置和导流工程的布置绘制纵、横地质剖面。对于勘探剖面上的坑孔（包括探坑、钻孔、触探和标准贯入试验孔、取原样孔等）间距、土石坝轴线剖面，一般控制在50~100m内，辅助剖面宜控制在100~200m以内，并根据土层变化的复杂程度适当加密或减稀，混凝土建筑物或地质条件比较复杂地段，宜控制在20~50m之间；局部地段，可适当加密。闸基上的钻孔应结合闸墩位置，坝（闸）基孔深，一般为1.0~2.0倍坝高或闸基宽度，地基中相对隔水层、相对硬土层或基岩埋藏较浅时，应打到相对隔水层、相对硬土层或基岩中一定深度。当软土层或透水层厚度较大时，应有部分控制深孔打到相对隔水层或相对硬土层。

2. 持力层范围内的每一土层，均应取原状土样，测定其物理力学性质指标。各土层主要指标的试验组数应不少于10组。非控制性土层和非主要指标的试验组数可适当地减少。为减少土样扰动和便于对比，应有部分原状试样取自试坑。试验工作应尽量在工地试验室进行；此外，还应针对不同土层的主要工程地质问题，布置有关野外试验，如混凝土拖板（抗剪）试验，软土层的十字板剪力试验，砂土地基的振动液化试验，湿陷性黄土的试坑浸水试验等。

3. 对主要含水层，应进行野外渗透试验，地下水动态观测和水质化学分析。

对于等级较低的建筑物，以上的诸项，可适当删减。

### 三、软土地基处理

软土地基工程处理的目的是为了提~~高~~地基的容许承载能力，控制地基的沉陷量及沉陷差值在设计允许范围内，防止地基发生水平滑动或塑流挤出，以保证建筑物地基在各种设计条件与荷载组合条件下的稳定；降低渗漏量，防止各种渗透变形现象的发生，以保证地基土的渗透稳定性；防止出现振动液化现象；保证基坑临时边坡的稳定以及特殊不利地质现象的排除。地基工程处理的基本原理不外乎三类：即①使土颗粒尽量紧密，减少土中孔隙，②改善地基应力分布，③用物理或化学方法使土颗粒胶结。下面就软土地基的几种不利地质情况的处理加固措施简述如下。

#### （一）软土地基处理

首先，根据地质勘探试验资料，鉴定地基土的承载力变形特性及抗剪强度等，综合建筑物各种设计工况及地基的工程性质，选定切合实际的~~处~~理方式。常用的处理方法有下列几种，可供参考选用：

- (1) 将软土全部挖除，如果不能全部挖除则可加深开挖。
- (2) 置换垫层：垫层可起到筏式基础的作用，提高地基的稳定性。

使建筑物荷重通过垫层均匀扩散传递，从而使软土层中的应力减少到安全范围内，减小基础的沉降量，并可缩短软土地基的固结时间。所置换的垫层，一般多采用换垫砂砾石或粘土、砂壤土层等，其具体所用材料与厚度由设计计算确定。

(3) 预压加固：即在建筑物修建前，在地基上预先施加足够的荷载，使地基固结达到建筑物建成后的沉陷量，然后卸荷施工。此法应注意水文地质情况，研究排水措施及建筑物的荷载条件。只有在对非轴向对称荷重的地基稳定性无问题时，才宜采用预压加固。

(4) 排水密实加固：其原理是通过人工排水以增加地基土的强度。这是因为软土地基强度低，变形量大的主要原因是其含水量高。对砂性土可采用“井点排水法”，对淤泥、淤泥质土或软粘土，可采用“砂井预压法”而对颗粒较细、渗透系数特别低的粘土，则需采用电渗排水。

(5) 桩基—浮基或支承桩：按桩的作用可分为端承桩、摩擦桩和挤密桩三类；按桩的材料和施工方法又可分为预制钢筋混凝土桩、钻孔灌注桩、爆扩桩、碎石桩、石灰砂桩和砂桩等，使用得较为普遍的是预制钢筋混凝土桩。

(6) 对上部结构进行合理处理，如减轻上部荷载，加大建筑物基础与刚度，增设沉陷缝等。

(7) 强夯法和振冲法，其主要原理是用物理的、机械的（如振动、

加重等)方法使地基土壤颗粒重新排列,尽量减小孔隙率以提高地基承载力和减小其沉降量,此法尤以近期发展起来的强夯法有效。它是利用重锤对地面进行连续夯击,从而改善松软地基土的力学性质。无论对砂土、粘性土、杂填土以及黄土,都能收到良好的效果,而且施工简便,速度快。现以西湾主坝坝基处理和江苏省几座船、涵闸的换基处理为例加以说明。

(1) 西湾蓄能电站主坝坝基为第四系复盖层,厚8~21m,除小部分为坡、洪积层外,大部分为冲坡积层,该层上部7m厚为粘土、亚粘土夹杂碎石,下部为碎石夹粘土和亚粘土,粘土层的物性指标如表1所示。覆盖层下卧地层为坚硬的石英砂岩,岩屑石英砂岩。

西湾电站主坝为面板堆石坝,坝基软土的处理主要解决三个问题:第一,坝基防渗要可靠,并满足渗流稳定的要求;第二,限制坝基沉降量,保证大坝防渗面板的安全;第三,上下游坝坡的抗滑稳定性要达到规定的安全值1.2。上游坝面的泥壳上面板的板趾,是将覆盖层挖除后置于基岩上,故无稳定问题;经过计算研究,对下游坝坡的稳定,必须提高坝基下10m范围内覆盖层的抗剪强度( $\phi$ 、 $C$ 值), $C$ 值需由天然状态下的 $0.65\text{ kg/cm}^2$ 提高到 $0.9\text{ kg/cm}^2$ , $\phi$ 值由 $20^\circ$ 提高到 $26^\circ$ 。

为此,经多种方案的比较研究,例如,将坝基下覆盖层全部挖除是最彻底的方法,可以满足上述三方面的要求,但挖填工程量巨大,



表1 粘土层的物性试验成果表

试验项目	试验成果(算术平均值)	试验项目	试验成果(算术平均值)
孔隙比	$e = 0.65$	压缩系数	$a = 0.011 \text{ cm}^2/\text{kg}$
湿容重	$\gamma = 2.03 \text{ g/cm}^3$	渗透系数	$k = 3.82 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$
饱和度	95%	内摩擦角	$\varphi = 20^\circ$ (直剪)
塑性指数	$L = 13.4\%$	凝聚力	$c = 0.68 \text{ kg/cm}^2$ (直剪)
含水量	$w = 22.6\%$		

很不经济, 换砂法可以提高抗剪强度, 满足坝体的抗滑稳定要求, 但解决不了防渗和沉降的要求, 工程量也较大; 砂井和预压法, 在施工期间利用坝体重量对基础进行预压, 通过砂井排水达到固结的目的, 可以起到限制沉降和提高抗剪强度的作用; 压重法即在坝体上, 下游堆筑压重体, 可增加坝体的稳定性; 控制筑坝速度和抽水加固法, 因坝基粘土的渗透系数小 (平均值为  $3.82 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ), 排水固结速度很慢, 不易达到设计要求, 爆破法

多适用于砂土地基。对于粘土地基尚无先例。最后参考上海某建筑工地使用强夯法处理粘土地基的经验,决定在西湾电站主坝基础采用强夯法。西湾电站主坝地基粘土中含50%的碎石,夯实厚度仅8m,要求 $\phi_c$ 值提高的幅度也不太大。所以,应用强夯法加固坝基,达到了预期的目的。

西湾电站主坝软基处理的具体部署如图1:混凝土面板的趾板及其垫层置于基岩上,趾板底基岩进行固结和帷幕灌浆,与混凝土面板一起组成上游可靠的防渗设施。坝基中间部分,因坝体重量大,主要是控制沉降量,根据计算,在一年半的施工期内,通过坝体重量预压,加上砂井排水,完全可以达到设计要求。该区宽约128m,砂井直径30cm,间距2.5m,系采用等边三角形布置,井深至基岩,井内回填质量好的砂石。下游部分,宽约65m,其中20m在坝坡以外),由于坝体重量小,采用砂井预压法难以达到设计要求,故改用强夯法。先清除表层腐植土,然后铺一层厚1m以上的反滤石渣,以排除渗水及顺利传递夯击能量。锤重10t,落距15m,夯点间距5m,夯四遍。夯点尽量均匀布置。在砂井预压处理区及强夯处理区之间的是宽约30m的过渡区,兼有控制沉降量和提高抗剪强度的要求,故采用强夯与砂井相结合处理的办法。为增强下游坝坡的稳定性,在下游坝坡脚,加设高10m左右,向下游堆长约25m的压重体(如图1所示)。

(2) 江苏省修建在软土地基上的涵闸和船闸，多采用换垫层的办法，见图2。它可增加地基的稳定性，减小建筑物的沉降量，还可就地取材，节约大量的资金，施工又简便。

现将江苏省三座工程对软土地基在换填垫层处理后的实际沉降观测，不同阶段的沉降量介绍如下，以了解这种处理方法的效果。

阜宁腰闸（砂垫层），建于1957年，21孔，每孔净宽3 m，分7块底板，每3孔为一组，采用一字空箱岸墙，完建期荷载约5 t/m，其软土性质为：粘粒含量=33~51%，容重 $\gamma = 1.8 \text{ g/cm}^3$ ，含水量 $W = 41\%$ ，内聚力 $c = 0.12 \text{ kg/cm}^2$ ，内摩擦角 $\varphi = 8^\circ$ 。见图3

王港调节闸（壤土垫层），建于1964年，共3孔，底板为3块，U形结构，长 $C = 4 \text{ m}$ ，每孔净宽 $5.0 \text{ m}$ ，完建期荷载中孔为8 t/m，边孔为 $6.8 \text{ t/m}$ 。见图4。其软土性质为：容重 $\gamma = 1.82 \text{ g/cm}^3$ ，含水量 $W = 47\%$ ，内聚力 $c = 0.09 \text{ kg/cm}^2$ ，内摩擦角 $\varphi = 7^\circ$ 。

阜宁船闸（砂壤土垫层），建于1972年，一闸三首。上闸首长16 m，宽20 m，完建期荷载 $8 \text{ t/m}^2$ ；总渠下闸首长16 m，宽12 m，完建期荷载 $2 \text{ t/m}^2$ ；中小河下闸道长20 m，宽15.5 m，完建期荷载 $3.5 \text{ t/m}^2$ 。闸室墙为扶梁连拱墙，底板长19.3 m，宽7.5 m，完建期荷载 $11 \text{ t/m}^2$ 。其软土性质为：粘粒含量

$=35\sim45\%$ ，容重  $\gamma = 1.81 \text{ g/cm}^3$ ，含水量  $w = 41\%$ ，内聚力  $c = 0.14 \text{ kg/cm}^2$ ，内摩擦角  $\varphi = 10^\circ$ ，压缩系数  $a_v = 0.065 \text{ cm}^2/\text{kg}$ ，见图 5。

对于这三个工程在不同阶段的地基沉降量列于表 2 中，三个工程的沉降曲线可见图 6。

从表 2 中可见，垫层对减少建筑物沉降是明显的。垫层在施工期就起了预压作用，只要控制垫层的施工质量，其自身的沉降量是不大的。但必须指出，砂垫层在放水时会出现突然沉降，这可能是由于放水时发生轻微振动所致；而填土垫层则无这种现象。另外，建筑物的合理设计对沉降的关系也很大。如阜宁腰闸采取一字空箱轻型结构，荷载均匀；王港调节闸采用 3 个 U 形分离式结构，这两座闸长期以来运转正常，未发生破坏，而阜宁船闸地基与阜宁腰闸相似，但总体布置复杂，底板底面高度变化大，荷载不均匀，故而使用才 5 年，最大沉降量却已超过阜宁腰闸 20 年的沉降量，闸室墙多处倾斜，裂缝严重。

## (二) 砂土液化的处理

### 1. 判别液化的几种方法

砂土地基的液化对水工建筑物危害极大。对饱和砂土地基发生振动液化的可能性，应根据砂土的粒径和级配、密实度、上覆压力和侧向压力、砂层的埋深和封闭条件、地下水位和建筑区的地震烈度及地

表2 阜宁腰闸、王港调节闸、阜宁船闸不同阶段的地基沉降观测表

建 筑 物 名 称	阜宁腰闸(中心孔)	王港调节闸(中心孔)	阜宁船闸(上闸首)
垫层施工期地基沉降量 (mm)	50	30	
建筑物施工期地基沉降量 (mm)	99 (其中垫层本身沉降量为4)	42 (其中垫层本身沉降量为7)	60
放水情况	放水期突然沉降50mm	无突然沉降	缓慢充水,未发生突然沉降
至1978年总沉降量 (mm)	207	190	5年为32
竣工期最大差异沉降 (mm)	14	7	
建筑物运转情况	20年运转正常,未发生裂缝、倾侧等现象	15年运转正常,未发生裂缝、倾侧等现象	上闸首运转正常,闸室墙差异沉降严重,多处倾侧

震历时等因素。结合室内试验和野外模拟试验资料，参照有关的经验公式和经验数据进行综合分析判断，以便进行防治处理。

对于一般的细砂、极细砂、粉砂、砂壤土和粉质砂壤土（平均粒径  $d_{50} < 2 \text{ mm}$ ，粘粒含量  $< 15 \sim 20\%$ ，不均匀系数  $\eta < 10$ ），可根据下列标准，判断液化的可能性。

(1) 按砂土的相对密度（表 3）判断：

表 3 砂土在不同地震烈度时液化可能性

地震烈度	相对密度 $D_r$	液化可能性		
		大 (容易)	中 (可能)	小 (不容易)
7°		$< 0.65$	$0.65 \sim 0.75$	$> 0.75$
8°		$< 0.73$	$0.73 \sim 0.83$	$> 0.83$
9°		$< 0.80$	$0.80 \sim 0.90$	$> 0.90$

(2) 根据砂土的上覆有效压力和标准贯入试验击数判断（见图 7）：

(3) 根据砂土的中值粒径判断（见表 4）

表 4 可能发生振动液化的中值粒径范围

地震烈度	7°	8°	9°
中值粒径 $D_{50}$	$0.05 \sim 0.15$	$0.03 \sim 0.25$	$0.15 \sim 0.50$

(4) 对塑性指数 ( $I_p$ ) 小于 7~11 的少粘性土, 可根据土的饱和含水量  $W_s$  和液限  $W_L$  间的关系进行判断:

当  $W_s$  接近或超过  $W_L$  (例如  $W_s \geq (0.9 \sim 1.0) W_L$ , 或液性指数  $I_L \geq (0.75 \sim 1.0)$  时, 可认为容易产生液化; 反之, 若  $W_s$  低于  $W_L$  较多, 则不易液化。液性指数的定义为:

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p} = \frac{W - W_p}{I_p}$$

式中:  $W_p$  ~ 塑限;  $W_L$  ~ 液限;

$W$  ~ 含水量, 此处采用  $W = W_s$ ;

$I_p$  ~ 塑性指数。

对抗剪强度低, 灵敏度高, 压缩性大的饱和软弱粘性土层 (包括淤泥、淤泥质土和软粘土), 在地震作用下, 颗粒间的微弱结构被扰动而引起抗剪强度降低和压缩性增大, 会使建筑物地基滑动或产生较大的沉陷变形。对于重要工程, 需作专门的试验与研究。下述指标可供综合评价参考: 液性指数  $I_L \geq 0.75$

无侧限抗压强度  $q_u \leq 0.5 \sim 0.7 \text{ kg/cm}^2$ ;

标准贯入试验击数  $N_{63.5} \leq 4$ ;

灵敏度  $S_t \geq 4$ 。

(5) 对于地下水位埋深小于 2 m, 又直接出露地表的松散砂层 (相对密度  $< 0.33$ ), 在 6~7 度地震作用下, 极易发生液化。

在7~9度地震时，砂层上粘土覆盖厚度大于6~10m时，也可能发生液化。

(6) 以野外爆炸试验的结果来判断液化可能性的标准如下(用5kg 6号硝酸炸药埋入地下4.5m处，引爆后测量距爆炸孔5m半径范围内的地面平均沉降量判断)详见表5。

表5 爆炸试验法判定砂土液化指标

地面平均沉降量(cm)	> 20	10~20	5~10	< 4
砂的紧密程度	极松砂	松砂	中等紧密砂	紧密砂
发生液化的可能性	很可能	可能	很少可能	实际不可能

还可根据爆炸试验时砂层的沉降率(地面沉降与爆炸时砂层的完全液化深度的比值)来评定。当沉降率 $\leq 1/10$ 时，可以认为是中等紧密砂，很少可能发生液化。

(7) 此外，也可应用室内试验法、工程条件类比法、简化估计法(西特法)来判断砂土液化出现的可能性。

## 2 防止地基土层的几种工程措施

水工建筑物地基应尽量避免或清除可能液化的砂土层，通常对可能发生砂土液化的地基采用的防治方法有下列几种，供参考选用：

(1) 开挖换土：即将可能液化的砂土层开挖清除后置换成其他土层。



(2) 浅基：利用可液化砂土层，上复土层作为基础的持力层，增加有效覆盖压力，以提高砂土层的抗液化能力。

(3) 增密加固：对较疏松的细、中、粗砂，可以采用爆炸、振捣或挤压桩等方法加大砂层密度，达到加固地基的目的。有条件时也可采用电化学加固法或砂法加固，如安徽的花凉亭水库，河南鸭河口水库和内蒙古的红山水库，曾采用爆炸法加密砂层，效果良好。

(4) 增加盖重：用回填土增加地基的有效覆盖压力。例如黄河流域的巴家咀水库，在淤土上加高土坝，用挤淤法先修盖重，然后再加高坝体。黑龙江省的大来水库，在坝基周围加压填料，增加荷载以保护地基。

(5) 桩基：桩基为有效的地基抗震措施，但桩必须伸入非液化层一定深度，各个方向有一定刚度，以免桩身产生侧移、弯曲或折断。

(6) 板桩围封可液化层，防止其侧向活动，板桩应穿过可液化层。

(7) 改变地基的应力状态，控制地基的孔隙水压力。

(8) 加强排水设施降低地下水位：对于渗透性小的可液化层或相对不透水层中的饱和砂透镜体，可结合地基排水，采用砂井或减压井等排水设施降低孔隙水压力。

(9) 基坑中表层砂层液化或软粘土软化现象的处理方法如下：

① 对饱和疏松的砂性土，可采用井点、土井或明渠进行排水，以降低地下水位。

② 对软粘土受振软化成橡皮状土层影响施工时，可采取全部挖除，或部分挖除填以干土、石渣或块石，或调整施工速率，分期分段施工，利用坝体填土起预先固结的作用。

对分布较广的软土，或予以挖除，或在下游设置砂垫层，砂井加速排水固结。

⑩ 振冲法建造碎石桩群加密砂层，已被实践所证实是一种切实可行的处理办法。

现以铜街子水电站左岸堆石坝深槽段坝基液化处理为例加以说明。

该深槽在坝轴线处呈南北向展布，深槽宽约30~40m，最大槽深约77m（见图8），槽底高程363m，向下游逐渐抬升，深槽两壁为玄武岩，壁面陡峭，呈倒悬状（见图9）。深槽中为上更新世晚期和全新世堆积物覆盖，自下而上，大致分为四层。第一层（底部）为漂卵石夹砂与漂卵石夹块碎石，厚20~25m，局部有架空现象；第二层为卵石夹砂或砂壤土层，厚18~30m；第三层为黄、灰色粉细砂层，厚约20m，间夹2~12m厚的卵石夹砂，分布高程多在400~425m之间；第四层（河床表层）为漂卵石夹砂，厚5~15m。地质勘测工作除钻孔外还采取开挖竖井取样做三轴试验，各层的物理性质和非线性参数见表6。

该堆石坝，坝长434.4m，坝高48m。坝轴线与深槽相交，坝的上游面与导流明渠相交，由明渠左挡墙作为混凝土面板的支撑。

在坝基面下3~7 m处,为厚约20 m的粉细砂层,其承载力仅0~2 MPa,7°地震时有液化的可能。鉴于深槽覆盖层的结构和力学性能,在墙基下修建了两道混凝土防渗墙(见图9),并在其间设置五道横隔墙,组成防渗承重系统,并与上部挡墙和沥青混凝土斜墙共同组成上游防渗设施。同时,对坝基下的砂层采用75KW振冲器振冲加固,以防液化并提高其承载力。根据试验、计算和已有工程的经验,选定振冲孔间距3 m,排距2.5 m,呈梅花形布孔。在明渠挡墙部位,孔距取2 m和2.5 m不等,呈棋盘格形布置,孔深按目前施工机械能够达到的深度,取为14.5 m,孔内回填卵砾石,按每米1.5 m<sup>3</sup>计。振冲布孔参见图10。

经实际检查:

1. 振冲后砂层的物性指标均有提高。表7、表8的数值说明振冲后砂层的状态仍属中等密实度。(判别标准为相对密度 $0.33 < D_r < 0.67$ ,标贯击数为29~10)。

2. 振冲有效范围。振冲器直径约400mm,造孔后按Ⅱ区每米振冲孔回填卵砾石1.1 m<sup>3</sup>计,其成桩直径可达1.18 m。在本工程的具体条件下,经检测振冲有效范围约1.2 m左右,最佳加固范围为0.8~1.0 m。振冲桩间振冲前后砂层的物性指标增值不大。

3. 地基承载能力。振冲前后各地层指标见表9。

左深槽堆石坝非线性参数

表6

1. 非线性参数

分 类	干容重 ( $t/m^3$ )	孔隙比	$R_f$	K	n	F	G	D	c	$\phi$	备 注
alQ4	2.13	0.47	0.952	560	1.00	0.185	0.415	2.0	0.44	0°	漂卵石夹砂
fglQ32-2	1.6	0.72	0.82	1128	0.72	0.16	0.32	2.1	0.35	0°	漂卵石
al+plQ32-1	2.12	0.968	0.968	333	0.73	0.13	0.43	1.0	0.38	2°	卵石夹砂
内过渡层	1.37	0.89	0.89	400	0.98	0.16	0.39	3.3	0.33	5°	
外过渡层	1.95	0.80	0.80	530	0.29	0.17	0.41	2.63	0.33	2°	
坝壳料											alQ4代用

2. 接触面参数

部 位	容 重 ( $t/m^3$ )	$R_f$	K	n	F	G	D	c	$\phi$	备 注
全新世冲积层~混凝土	2.10	0.72	4000	0.55				0.25	0°	
内过渡层~混凝土	1.6/2.4	0.85	3200	0.95				0.28	0°	
内过渡层~外过渡层	1.32/1.84	0.79	4300	0.30				0.24	0°	
外过渡层~坝壳	1.86/2.21	0.69	3300	0.50				0.34	0°	
混凝土~泥皮	2.4/0.93	0.62	1400	0.65				0.11	3°	

表7 振冲加固砂层成果统计表

贯孔数	实测贯击数 N63.5	干容重 g/cm <sup>3</sup>	相对密度	备 注
(个)	平均值	平均值	平均值	
5	14.2	1.42	0.53	振冲前
1	22.0	1.52		振冲后, 距孔中心小于0.3m
3	17.9	1.51		振冲后, 距孔中心小于1.0m
2	14.0	1.40	0.32	振冲后, 距孔中心大于或等于1.0m

表8 砂层振冲前后的物性指标

名 称	振 冲 前	振 冲 后	增 值	附 注
干容重 (g/cm <sup>3</sup> )	1.42	1.43	2.8%	振冲后, 测点与振冲桩距离大于1.0m
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.38	1.97	4.3%	
相对密度	0.53	0.62	17%	振冲后, 测点与振冲桩距离等于1.0m
实测标贯击数	14.20	14.60	2.3%	振冲后, 柱间值平均数
变形模量 (MPa)	6.80	17.34	255%	
动弹性模量 (MPa)	393.13	447.18	12.9%	
动剪切模量 (MPa)	130.83	169.65	5.4%	
允许承载能力 (MPa)	0.24	0.25	4%	

表 9

振冲前后各地层指标表

地 层	容许承载力 (MPa)		变形模量 (MPa)	
	振冲前	振冲后	振冲前	振冲后
漂卵石夹砂	0.73	/	49.03~53.84	/
粉 细 砂	0.24	0.25	6.80	17.34
振冲加固桩	/	0.64	/	29.93

加固范围内的砂层平均允许承载力提高到了  $0.30 \sim 0.41$  MPa, 增加  $19.2 \sim 61.5\%$ 。从平面有限元分析中看出, 应力及应变均有所改善。

4. 砂层液化问题。铜街子水电站左深槽的粉细砂层处于封闭状态, 上覆荷重也较大, 振冲造孔填料为  $2 \sim 3$  cm 的卵石。振冲后对加固桩进行颗分试验, 结果是卵石含量为  $55.9\%$ , 砾石  $43.0\%$ , 砂为  $15.2\%$ , 其渗透系数远较粉细砂大, 在地震过程中可以消散超孔隙水压力。参照有关经验资料分析, 在 7 级地震时, 完成可以防止砂层液化, 在 8 级地震时, 砂层液化也会得到缓解或改善。说明使用振冲法加固深厚覆盖层中的砂层以防止液化的措施是有效的, 而且, 具有施工简便, 投资少, 工期短等优点, 具有一定的优越性。

### (二) 渗透变形的防治

#### 1. 渗透变形主要形式:

(1) 管涌：系指细颗粒在粗颗粒骨架裂隙中移动和携出现象。可分为非发展性管涌和发展性管涌两类。发展性管涌对建筑物稳定不利。

(2) 流土：系指在渗透水流作用下，土体内所有土粒随水流方向同时发生移动的现象。其表现形式为整体的浮动隆起，称为整体流土；或在集中渗流的薄弱地带形成泉眼或沸腾翻花的形式，称为局部流土。

(3) 接触冲刷：当细颗粒土层与相差悬殊的粗颗粒土层或基岩面接触时，在渗透水流作用下，细颗粒沿接触面被冲刷移动的现象。

(4) 接触管涌：细粒土层在渗透水流作用下，向相邻的较粗颗粒砂土层孔隙中的移动现象。

## 2 渗透变形判别的几种方法

软土地基的渗透稳定性，应根据土层的颗粒组成级配、透水性、临界水力坡降、水文地质状况建筑物的运用条件等，来判断可能出现的渗透变形形式。常用的判断方法有：

(1) 根据砂土颗粒组成特点判断见表10。

(2) 根据临界水力坡降判断：

流土的临界水力坡降一般可按以下公式求得：

① 太沙基  
公式：
$$I_{kp} = \frac{\gamma_w}{\Delta \gamma} = (\Delta s - 1)(1 - n)$$

式中： $I_{kp}$ ～流土的临界水力坡降

表 10 地基渗透变形形式与砂土颗粒组成特点的关系表

砂土类别	判断依据	颗粒组成特征	渗透变形形式
正常级配砂砾石	按不均匀系数 $\eta$	$\eta < 10$ $10 < \eta \leq 20$ $\eta > 20$	一般产生流土破坏 可能产生流土或管涌破坏 一般产生管涌破坏
缺少中间粒径的砂砾石	按细粒含量 $P_z$	$P_z > 35\%$ (较均匀) $P_z$ 为 $25 \sim 35\%$ $P_z < 25\%$	一般为流土破坏 可能是流土或管涌(取决于土的密度、粒径、形状) 一般为管涌破坏
不缺少中间粒径的砂砾石	按细粒含量 $P_z$	粗料 $D_{15} \leq 5$ 细料 $D_{85} > 5$ 粗料 $D_{15} > 5$ 细料 $D_{85} \leq 5$	有可能产生流土破坏 产生管涌破坏



$r_w \sim$  单位土体的浮容重 ( $g/cm^3$ );

$\Delta_w \sim$  水的比重 = 1;

$\Delta_s \sim$  土的颗粒比重;

$n \sim$  土的孔隙比。

(本公式试验研究条件是: 土的不均匀系数为  $1.18 \sim 2.84$ , 土的粒径介于  $0.116 \sim 0.64 mm$  )。

不发生流土的容许坡降, 一般取其临界坡降的  $1/3 \sim 2/3$ 。

② 扎马林公式:

$$J_f = (\Delta_s - 1)(1 - n) + 0.5n$$

式中:  $J_f \sim$  流土的破坏比降, 其余同上式 (本公式试验研究条件是: 土的粒径介于  $0.236 \sim 0.767 mm$ , 孔隙比  $0.377 \sim 0.489$ )。

(3) 渗透管涌破坏的临界水力坡降可由公式计算:

$$J_{kp} = 4.2 \frac{d_{50}}{\sqrt{k/n}}$$

式中:  $J_{kp} \sim$  管涌的临界坡降。

(该公式的适用范围:  $n \geq 4$ , 粒径为  $2 \sim 400 mm$ , 渗透系数  $k = 10^{-3} \sim 10^0 cm/秒$ )。

管涌的临界坡降与土粒比重、孔隙度之间的关系为:

$$J_{kp} = (\Delta_s - 1)(1 - n) + 0.5n$$

式中符号意义同前。

(4) 管涌的临界坡降也可根据工程类比法确定。

### 3. 渗透变形防治的措施

地基渗透变形的防治主要是对地基采取有效的防渗和排水减压措施。

地基防渗可分为垂直防渗和水平防渗。垂直防渗方法有：在覆盖较浅时用明挖修筑截水齿墙，设置板桩帷幕、粘土水泥灌浆帷幕、混凝土防渗墙、沉箱沉井等；水平防渗为粘土铺盖等。此外，为了降低渗透或出逸坡降，防止下游地基或坡脚出现渗透变形，可采用反滤层、反滤盖重或减压井等处理措施。在施工的基坑中，为防止出现渗透变形，宜作好排水，对已出现的少数管涌点，可用砂砾石反滤料压堵。

随即迅速浇筑混凝土

高压喷射灌浆防渗技术的采用，可在松软地层中形成设计形状的防渗体，具有很好的防渗效果。例如云南的麦子河水库，系一高22 m的均质土坝，由于坝基内存在有厚约15 m的细砂层，渗透变形严重，坝前曾出现漏斗塌陷，坝后渗漏涌沙。1985年3~6月采用高压喷射灌浆技术处理了右岸230 m，左岸216 m的区段后，经围井及钻孔检查，所成的防渗墙墙体性状较好，平均渗透系数小于 $10^{-6}$  cm/s。这次高压喷灌，共完成了223个孔，总防渗面积为7297 m<sup>2</sup>，每m<sup>2</sup>的水泥用量0.3 t。实践证明，高压喷射灌浆

技术是处理堤坝渗漏和渗透变形的一项有效的新技术。

#### 四、结 语

1. 在软土地基上修建工业与民用建筑或水工建筑物，必须进行勘探试验工作，对地基作出正确的评价，找出存在的问题，为设计提供充分可靠的地质资料，藉以有助于采取适当合理的处理措施。

2. 应尽量避免在可能产生液化和流土的沙质壤土，特别是粉质砂壤土地基和不良淤泥地基上修建水工建筑物，因为这样的地基处理比较复杂，效果又不理想，在运行安全上又无确切的把握。

3. 对于闸坝工程地基中的渗透变形问题，应给予充分的注意。渗透变形要比沉降变形和承载力带来的影响和危害大，因为渗透变形的破坏比较隐蔽，不易发现，一旦发现，事态已有很大的发展，如果处理不当，就将导致失事。

4. 近期发展起来的振冲挤密法加固松软地基进展比较快，效果也比较明显，在砂土地基中已经积累了一些成功的经验，在壤土和粘性土地基中使用尚少，还有待于今后研究发展，加强对建在这类地基上已建和正建的建筑物进行比较系统的原型观测，以积累资料，总结提高。

### 主要参考文献

1. 《水利水电工程地质手册》水利：电力出版社 1985年
2. 《软土地基学术讨论会论文选集》水利出版社 1980年
3. 《水利水电工程地质勘察规范》(试行)水利电力出版社  
1978年
4. 李启雄等“西湾蓄能电站主坝软基处理方案选择”《上海水利  
水电技术》1989年2期
5. 程美中、宋恒光“江苏省水闸软基换填垫层初步总结”1979  
年3月
6. “深厚覆盖层建坝研究论文集”水利电力部成都勘测设计院
7. 李正著“工程地质与水文地质土层探验”地质出版社  
1957年

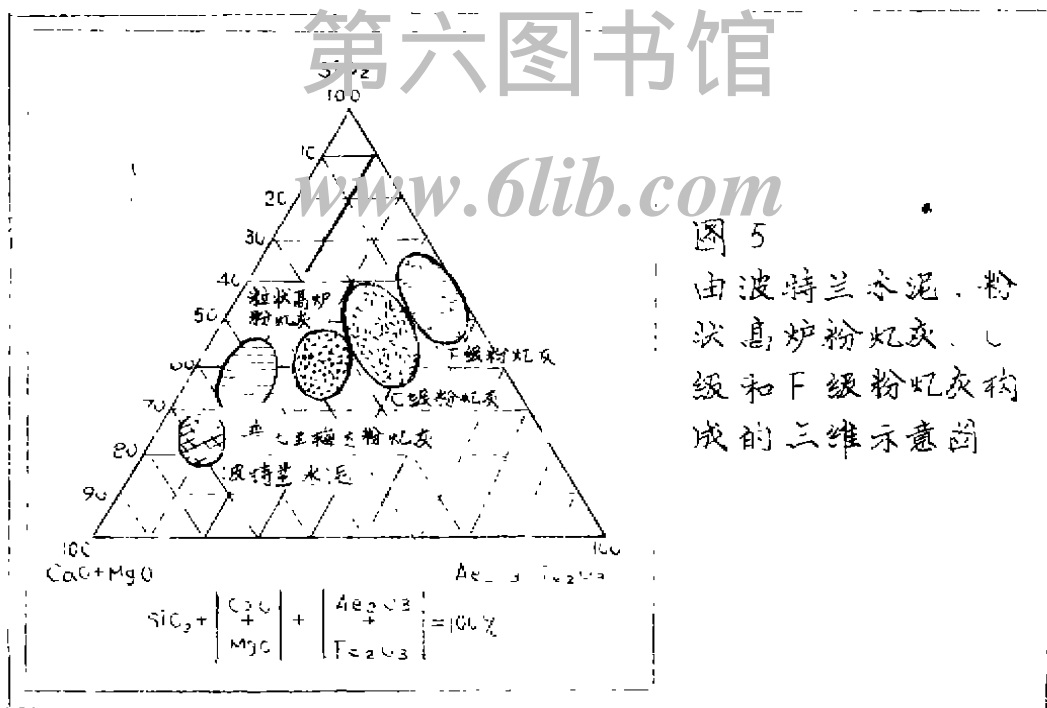
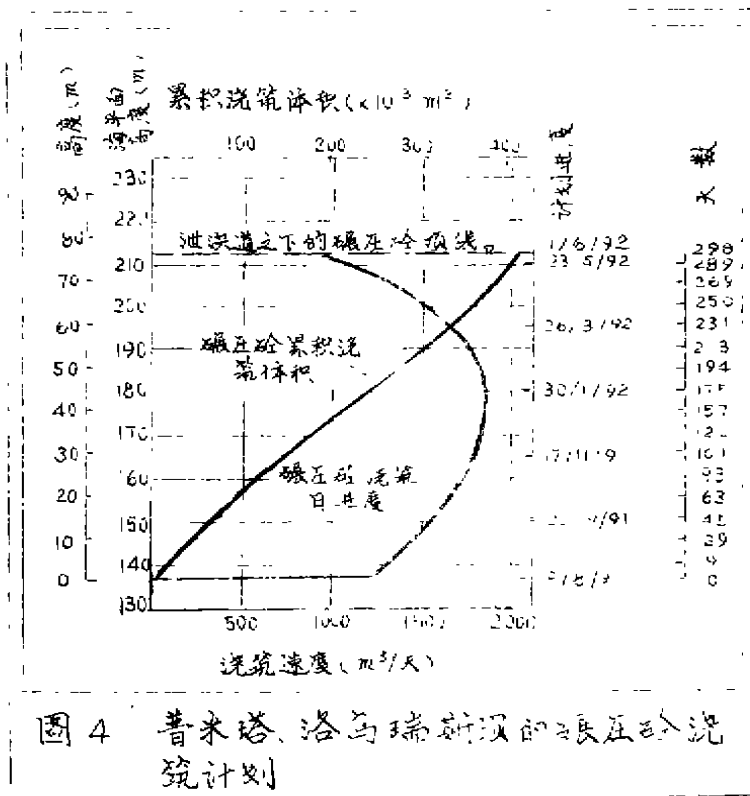
www.6lib.com 本期责任编辑：张宝山 李辉

主办单位：能源部、水利部成都勘测设计院

主 编：张宝山

内部报刊准印证号：川内字第01—044号

注：封底“内部报刊准印证 川新 字第308”作废



14-2