

# 第一章 概 述

本书所涉及的土石坝是指用土、砂、砾石和石料等当地材料筑成的拦河坝，而用钢筋混凝土、沥青混凝土以及土工合成材料等非土质材料作防渗体的土石坝不在本书范围内。

土石坝是一种最古老的坝型，早在 4 100 年前，巴比伦人民已在幼发拉底河上为发展灌溉而修建土坝，公元前印度、埃及以及其他国家也建成一些土坝。为了防御黄河洪水灾害，早在春秋（公元前 770 年～前 476 年）以前，中国人民就已沿黄河两岸修建土堤，经过历代扩充加固，至今全长已达 1 498km。就其结构而言，土堤实质上就是土坝。公元前 598 年～前 591 年在安徽省寿县修建堤堰形成安丰塘水库。17～18 世纪俄国在乌拉尔等地修建 200 多座土坝以满足采矿及工业用水需要。

碾压式土石坝是指用碾压机具将土、砂和石料等分层碾压而建成的一种拦河坝。当前世界上碾压式土石坝发展最快，无论是坝高或数量方面都远超过混凝土坝，约占建坝总数的 95% 以上。在 100m 以上高坝中，1961～1968 年土坝仅占 38%，至 1975 年以后，就增加到 75%，其中已建的土石坝以苏联努列克为最高，达 317m。已建坝高超过 200m 的土石坝还有高达 263m 的墨西哥奇科森坝、高达 242m 的加拿大买卡坝以及高达 235m 的美国渥洛维尔坝等共 9 座。在中国已建坝高超过 100m 的土石坝有黄河小浪底（156m）、陕西石头河（105m）、甘肃碧口（101m）及云南鲁布革（101m）等。在国内外已建的高土石坝，不少位于 8 度或 9 度强震区以及工程地质条件不良的地区。

碾压式土石坝之所以得到广泛发展，主要具有如下特点：

(1) 土石坝可以就地取材,采用土料、砂、砾石渣和石料等筑坝,大大节省水泥、钢材和木材等外运材料。

(2) 随着土力学理论及实践日益完善,土石坝筑坝经验不断积累,使防渗土料由粘土、壤土等传统细粒土料扩大至黄土、坡残积红土、砾石土甚至膨胀土,其级配范围十分宽广。近年来,由于大型振动平碾的问世,使得从以往要求采用新鲜坚硬石料作为透水坝壳,发展至可以采用软岩、风化岩以及从建筑物基坑开挖出的石渣,通过振动平碾压实形成可靠坝壳。所有这些都大大拓宽了土石坝用料范围,得以因地制宜,提高经济效益。

(3) 土石坝对坝基要求,无论是承载力或抗剪强度方面都比混凝土坝低。许多土石坝都直接建在砾石甚至土基上,而混凝土坝就难以做到。对坝基要求相对低,是广泛采用土石坝的又一个原因。

(4) 近年来大型土方机械相继出现,使修建碾压式土石坝所需的开挖、运输、碾压等作业得以实行大规模机械化,效率及经济效益大为提高,施工速度加快,工期明显缩短。

(5) 土石坝造价通常低于混凝土坝。

目前土石坝发展趋势是用料多样化,采用大规模机械化施工,坝高逐渐增加,在拦河坝中所占比例愈来愈大。

## 第二章 枢纽布置和坝型

### 第一节 枢纽布置

土石坝枢纽通常包括拦河坝、溢洪道、泄洪洞、输水或引水洞及水电站等 应根据地形地质条件 通过技术经济比较确定。

坝址应选在地形地质有利的地方,使坝轴线较短、库容较大、淹没少 附近有丰富的筑坝材料 便于布置泄水建筑物。在高山深谷区 常将坝址选在弯曲河段 把坝布置在弯道上 利用凸岸山脊设置溢洪道和隧洞等 但当山脊比较单薄时 需校核水库蓄水后的山脊抗滑稳定和渗透稳定 并采取帷幕灌浆、排水、锚喷和填筑压戗等相应加固措施。应尽量避免将坝址选在工程地质条件不良的地段 如活断层 会形成整体滑动的软弱夹层 以及粉细砂、软粘土和淤泥等软弱地基上。

坝轴线一般宜顺直 如布置成折线 在转折处以曲线连接。如坝轴平面形成弧形 最好是凸向上游 如受地形限制 不得不凸向下游 曲度应小些 防渗体不要过薄 以免蓄水后防渗体产生拉力 而出现顺水流方向的裂缝。

水流漫顶将招致土石坝失事 故洪水账应留余地 应设置安全可靠有足够泄流能力的泄水建筑物,这些对于土石坝安全运用至关重要。由于溢洪道超泄能力较大,如有条件应优先考虑。如坝址附近有天然垭口 可以利用布置溢洪道 并用其开挖料筑坝。由于陡槽流速高 溢洪道宜尽量布置成直线,上游引水渠和下游出水渠 可布置成弯道。当坝址附近没有天然垭口 也可以将溢洪道布

置在坝肩 紧挨土石坝 用混凝土或浆砌石导墙隔开 并要保护上游坝坡，防止被横向水流冲刷。

泄洪洞是最常见的另一种泄水建筑物，经常采用“龙抬头”型式 将导流洞进口抬高 改造成泄洪洞。混合式泄洪洞进口采用溢流堰，与溢洪道相似，但泄流陡槽却采用隧洞。明流洞身尽可能直线布置。在中小型土石坝枢纽中，也有采用坝下埋管作为泄水建筑物 坝下埋管最好建在岩基上 如需建在土基上 要求土基密实、均匀 而且埋管沿线的土基刚性不要相差过大 避免产生不均匀沉降。坝下埋管优先采用明流，避免在明满流交替状况下工作。

如泄水建筑物和水电站布置在同一岸，发电引水洞通常靠近岸边 而泄水建筑往岸里布置 这样发电引水洞可以短些 对降低水锤压力有利，同时使得泄水建筑物出口位于水电站尾水渠下游，减少泄流时水面波动，影响水电站尾水位。

泄水建筑物出口离下游坝脚应有一定距离，并采用可靠消能措施 如消力池、挑流鼻坎等 来达到消能目的 防止淘刷坝脚。

## 第二节 坝 型

采用土料防渗的碾压式土石坝通常采用如下的 4 种断面型式。

### 一、均质土坝

坝体绝大部分采用同一种筑坝材料筑成的土坝（图 2-1）。通常用弱透水土料 如粘土、壤土和砾石土等修筑均质土坝 当受到料源限制时 偶尔也采用砂壤土和砂等透水性大的材料修筑 但仅适用于对渗漏量基本可以不控制的滞洪水库，而且上下游坝坡比较缓 以满足坝坡稳定要求。

均质土坝适用于当地只有一种筑坝材料的情况。其优点是：坝体材料单一 施工工序简单 干扰少 坝体防渗部分厚大 渗透比

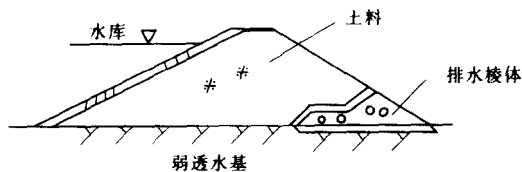


图 2-1 均质土坝

降比较小,有利于渗流稳定和减少通过坝体的渗流量。此外,坝体和坝基、岸坡及混凝土建筑物的接触渗径比较长,可简化防渗处理。均质土坝的缺点是:由于土料抗剪强度比用在其他坝型坝壳的石料、砂砾和砂等材料的抗剪强度小,故其上下游坝坡比其他坝型缓,填筑工程量比较大。坝体施工受严寒及降雨影响,有效工日会减少,工期延长,故在寒冷及多雨地区的使用受到限制。由于这种坝型全断面基本上都用弱透水材料筑成,排水性能差,施工期因填土自重而产生的孔隙水压不易消散,对坝坡稳定不利。

位于相对不透水基上的均质土坝,如不设置坝内排水,坝体浸润线上抬很高(图 2-2),需要较缓的下游坝坡才能保证边坡稳定,而且对渗水出逸的下游坡面还必须用透水料保护。此外,当库水位降落时,在上游坝坡范围内浸润线以下的坝体饱和水排向库内,渗水方向对上游坡稳定不利,需要比较缓的上游坡以维持边坡稳定。因此,不透水基上均质土坝常需设置坝体内排水,详见第五章第七节“坝体排水”。

均质土坝主要用于中低坝,高坝用得不多。

## 二、多种土质坝(或分区坝)

采用两种以上的当地材料在坝体内分区填筑而成。除采用土质防渗料外,还采用砂、砂砾和石渣石料等透水料。土料置于坝体中间或靠上游,再按反滤排水原则分别设置从中间向上下游,或由上游向下游透水性逐渐增大的透水料,见图 2-3。

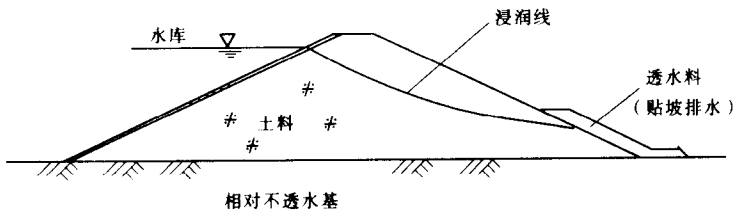


图 2-2 位于相对不透水基上的均质土坝

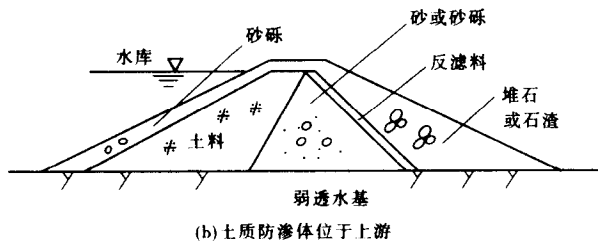
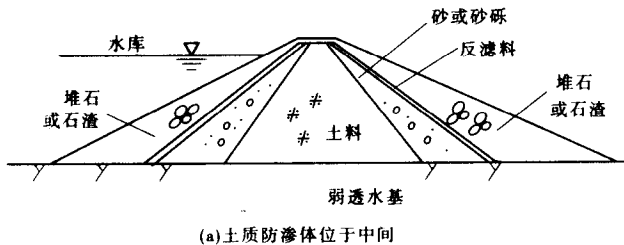


图 2-3 多种土质坝

多种土质坝适用于坝址附近具备土料以及几种透水土料，之所以采用几种透水土料有时是由于其中任何一种透水土料的储量不能满足填筑要求。采用这种坝型可以尽量利用枢纽建筑物开挖出来的石渣筑坝。

该坝型的优点是可以因地制宜，充分利用包括石渣在内的当地各种筑坝材料，土料用量比均质土坝少，施工受气候影响也相对

小一些。坝体从土质防渗体开始，向上下游分别按照反滤排水原则分区配置透水材料，有利于坝体排水，简化排水设施，降低下游坝体浸润线。如土质防渗体位于中间，库水降落时，上游透水料孔隙中的水分迅速外排，上游坝坡可以比较陡。如土质防渗体靠上游，下游坝体全为透水料，下游坝坡可以比较陡。该坝型比均匀土质坝节省坝体填筑方量，但缺点是坝体由多种材料分区填筑，工序复杂，施工干扰大。

### 三、土质心墙坝

土质防渗体位于坝体中间，上下游坝壳基本由一种透水料填成（图 2-4）。如心墙略偏向上游，称为土质斜心墙坝（图 2-5）。这种坝型适用于当地有防渗土料，又有足够数量的单一透水料，而且透水料场沿上下游分布，其蕴藏量大抵相当，便于分别从上下游上料，填筑透水料坝壳，使施工方便。

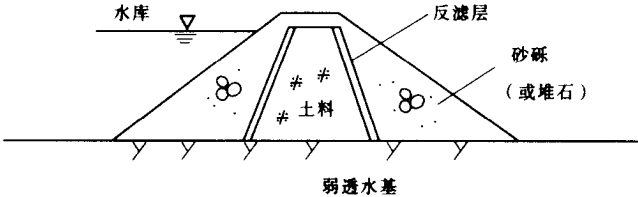


图 2-4 土质心墙坝

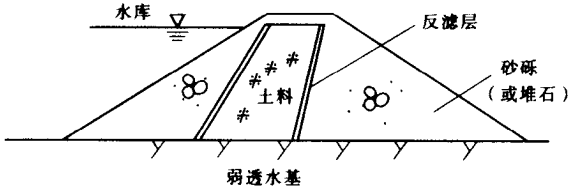


图 2-5 土质斜心墙坝

土质心墙坝的优点是：①心墙位于坝体中间而不倚靠在透水坝壳上，其自重通过本身传到基础，不受坝壳沉降影响，依靠心墙填土自重，使得沿心墙与地基接触面产生较大的接触应力，有利于心墙与地基结合，提高沿接触面的渗透稳定性；②当库水位下降时，上游透水坝壳中的水分迅速排泄，有利于上游坝坡稳定，使上游坝坡比均质土坝或斜墙坝陡；③下游坝壳浸润线也比较低，下游坡也可设计得比较陡；④在防渗效果相同的情况下，土料用量比斜墙坝少，施工受气候影响相对小些；⑤位于坝轴线上的心墙与岸坡及混凝土建筑物连接比较方便。土质心墙坝的缺点是：①心墙土料与坝壳透水料平起，在气候对土料施工不利的情况下不能像斜墙坝那样先填坝壳争取工期；②心墙位于坝体中间检修不便；③在多泥沙河道上，土质心墙不能直接与水库淤土连接，无法利用水库淤土，作为透水坝基的防渗铺盖。虽然也可以在上游坝壳底部设土质铺盖，以解决土质心墙与水库淤土的连接问题，但土质铺盖抗剪强度比坝壳透水料低，成为上游坝壳抗滑的软弱部位，使上游坝坡需设计得缓些。

#### 四、土质斜墙坝

土质防渗体靠上游，下游透水坝壳基本由一种透水材料筑成，见图 2-6。适用于当地有丰富的土料和透水料，尤其是当不透水料场主要位于上游时，采用这种坝型便于土料上坝，施工方便。

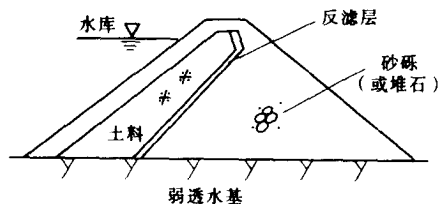


图 2-6 土质斜墙坝

在雨季或者冬季填筑土料有困难时采用土质斜墙坝，可以先填下游坝壳透水料，争取工期；土质斜墙容易检修；基础处理干扰比较小；下游坝壳浸润线比较低，对下游坡稳定有利；在多泥沙河道上斜墙便于与水库淤土连接，形成天然铺盖，用于坝基防渗。

这种坝型的缺点是：土质斜墙靠在透水坝壳上，如坝壳沉降较多，将使斜墙开裂；与岸坡及混凝土建筑物连接不如心墙坝方便，斜墙与地基接触应力比心墙小，同地基结合不如心墙坝。

坝型的选择主要应根据坝址区地形地质条件、筑坝材料情况，如质量、蕴藏量、开采条件、上坝路线、运距以及气候、坝高和利用基坑开挖料的可能性等进行综合考虑，因地制宜，通过技术经济比较择优选定。

## 第三章 筑坝材料和填筑标准

### 第一节 筑坝材料

应遵循因地制宜、就地取材的原则设计土石坝。首先在坝址附近广泛进行筑坝材料调查 随着调查阶段逐步深入 逐步提高调查精度。通过筑坝材料调查 落实筑坝材料性质、可开采量、运距和开采条件等 据此选定坝型、坝的断面结构 以及施工机具和方法。要优先采用离坝址近的筑坝材料 尽量少占或不占农田 尽可能利用建筑物基础开挖料。

本节着重介绍一些筑坝材料的主要性质、基本要求和主要物理力学指标经验值 供设计参考。对于重要土石坝 筑坝材料的物理力学指标应通过试验及工程类比确定。

#### 一、土质防渗料

土质防渗料使用范围较广 从一般粘性土到黄土、坡残积红粘土、砾石土和膨胀土等 国内外防渗料级配范围见图 3-1。但是沼泽土 斑脱土 地表土 开挖压实困难的干硬粘土 塑性指数大于 10、液限大于 40% 的冲积粘土，冻土等不宜采用。在寒冷地区有时不得不用冻土，要控制冻土含量不超过 10% 最大冻土块径不大于铺土厚的 1/2，冻土含水量不超过塑限含水量。

防渗料的水溶盐含量（指易溶盐和中溶盐，按重量计）不超过 3% 有机质含量对均质坝不要超过 5% 对心墙坝和斜墙坝不超过 3% 压实后的渗透系数 对均质土坝不大于  $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$  对心墙、

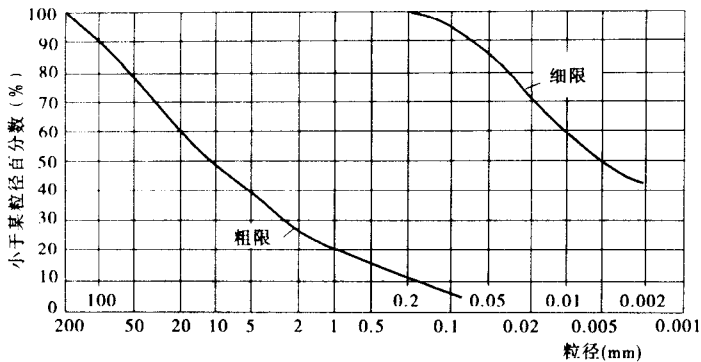


图 3-1 防渗料级配范围

斜墙和铺盖不大于  $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 。现对几种土质防渗料分述如下。

#### (一) 一般粘性土

通常不含大于 2mm 的粒径 粘粒 (小于 0.005mm) 含量一般大于 10% 最好在 10%~40% 范围内 这样容易压实 对含水量不太敏感 处理含水量 (增加或减少) 相对容易。对于心墙或斜墙也有采用粘粒含量达 40%~50%、甚至更高的粘性土 但粘粒含量过高的粘土不易压实, 容易干裂, 对天然含水量比较敏感, 不好处理, 应慎用。粘性土的塑性指数最好在 10~17 之间 而且级配连续。碾压后粘性土的渗透系数主要取决于粘粒含量和压后干密度, 一般为  $i \times 10^{-6} \sim i \times 10^{-8} \text{cm/s}$  ( $1 \leq i < 10$ , 下同) 内摩擦角  $20^\circ \sim 25^\circ$  粘聚力 10~50kPa。

#### (二) 黄土

广泛分布在我国华北和西北地区, 其粘粒含量为 10%~25% 粉粒 (粒径 0.05~0.005mm) 含量为 50%~70% 液限为 20%~33% 塑性指数为 7~17 天然干密度  $1.3 \sim 1.45 \text{t/m}^3$  黄土在塑性图上的位置见图 3-2。

天然黄土为钙质胶结 垂直孔隙发育 有些黄土浸水后钙质软

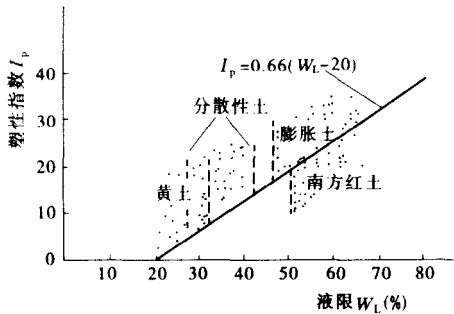


图 3-2 几种土在塑性图上的位置

化产生湿陷 作为坝基应慎重 并应进行处理。如利用筑坝 通过开挖破坏其垂直孔隙，再经过碾压密实，仍可成为合格的防渗料。我国华北、西北地区曾用黄土成功建成许多土石坝 根据各地区已建成的 28 座黄土坝设计指标统计，最优含水量 16%~19% 干密度  $1.6 \sim 1.7 \text{t/m}^3$  渗透系数  $i \times 10^{-5} \sim i \times 10^{-7} \text{cm/s}$  内摩擦角  $20^\circ \sim 25^\circ$  粘聚力为  $10 \sim 30 \text{kPa}$ 。

有些黄土含有较多礞石，由于礞石是钙质结核，属于难溶盐，溶解水中的速度十分缓慢 对坝安全没有威胁 不必硬性规定允许的含量。黄土料场如有成层礞石 最好采用立面开采 使其与含礞石少的土层混掺 上坝后应使礞石在坝内散开 防止在坝体内形成集中的礞石层，蓄水后成为漏水通道。

常遇黄土天然含水量远低于最优含水量，碾压前需加水处理。固然可将黄土运至坝面再洒水 但不易均匀。如条件允许 最好在料场根据地形 因地制宜划分畦块进行灌水 并控制灌水量 经灌水处理后的黄土天然含水量一般能保持在塑限附近，接近最优含水量。灌水后将表土刨松，待填筑时再按计划逐块开挖上坝。黄河上游刘家峡水电站黄土副坝即成功地用该法在料场进行了加水处理。

对粘粒含量低、粉粒含量高、抗管涌冲蚀能力低的黄土 应注意做好反滤保护。用此类黄土筑坝,饱和后如遇地震还可能液化,防止办法除碾压密实,使其干密度一般不低于  $1.65\text{t}/\text{m}^3$  外 还可用透水料进行压盖 以施加一定盖重防止液化 所需盖重由振动试验确定

### (三) 坡残积红粘土

在我国南方一些地区广泛分布由当地岩石在湿热条件下风化而成的坡残积红土 其性质与母岩有关。其中以云南贵州地区由石灰岩、白云岩等风化而成的红土比较典型 其他如玄武岩、花岗岩和片麻岩等也会风化成红土,但性能有一定差异。

坡残积红土外观呈红色或红黄色 土层一般不厚 矿物成分主要为高岭石、伊里石和针铁矿等 胶体活动指标(指塑性指数和小于  $0.002\text{mm}$  胶粒含量之比)一般小于 1,属于不活动或正常活动的粘土。这类土的粘粒含量有的高达  $50\% \sim 70\%$  液限常在  $50\%$  以上 塑性指数  $20 \sim 35$  在塑性图上的位置见图 3-2。

此类土的天然含水量虽然高达  $30\% \sim 50\%$  但最优含水量及界限含水量也高 天然干密度低,一般为  $1.2 \sim 1.4\text{t}/\text{m}^3$ 。红土不易压实 碾压后干密度一般仅为  $1.3 \sim 1.55\text{t}/\text{m}^3$  再提高击实功能对增加干密度的作用并不显著。这是由于红土含有上述较为稳定的矿物成分,二价交换性阳离子及酸性介质的作用 使粘粒和胶粒部分均处于凝聚状态 形成表面粗糙的耐水团粒 影响土粒之间相互挤紧 故不易压实 但正由于此 其压缩性也小 填筑后沉降量不大。因此 对于红土 可采用通常的碾压机具和碾压遍数 定出合理的压实标准 而不宜不做具体分析 照搬其他地区粘性土料的压实标准 盲目追求较高的填筑干密度 以免浪费和由于过度碾压造成填土剪力破坏。

如上所述 由于红土具有团粒结构 因此具有粗粒土和细粒土的特点。其压缩性低 强度高 透水性不大,可作为防渗料 在云

南、贵州、广西和广东等省都已利用坡残积红粘土成功建成土石坝。根据若干已建成工程统计，其压缩系数为  $0.001 \sim 0.003 \text{ cm}^2/\text{N}$  固结快剪内摩擦角  $\phi = 21^\circ \sim 27^\circ$  粘聚力  $C = 34 \sim 70 \text{ kPa}$ ，渗透系数  $i \times 10^{-6} \sim i \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。

#### (四) 砾石土

以往习惯采用不含有粒径大于  $5 \text{ mm}$  的粘性土作为土石坝的防渗材料，而目前在国内外都已成功利用砾石土来填筑许多土石坝的防渗体。砾石土同时含有粗料（粒径大于  $5 \text{ mm}$ ）及细料（粒径小于  $5 \text{ mm}$ ）。砾石土的来源：①通过立面开采将各种母岩（如花岗岩、石灰岩、砂页岩和板岩等）所形成的表层残积土和下层全强风化岩屑混掺取得；②用兼有破碎和压实功能的碾压机设备将一些软岩（如页岩、泥岩和板岩等）压碎、变细而得；③来自级配范围很广  $0.002 \sim 150 \text{ mm}$  的冰碛土；④通过人工方法将砂卵石、风化岩屑和细土料按一定比例进行混合而得。

当砾石土中砾石（不小于  $5 \text{ mm}$ ）含量小于  $30\% \sim 40\%$  时，砾石之间孔隙完全被细料（小于  $5 \text{ mm}$ ）所充填，砾石本身并不透水。因此，砾石土渗透系数取决于细料，而细料经过压实后渗透系数通常不大，能满足防渗要求。同时在该砾石含量范围内，往往出现砾石土的渗透系数为最小的情况。如砾石含量大于  $30\% \sim 40\%$ ，但小于  $60\%$ ，由于砾石的骨架作用，使细料达不到最高的压实标准，同时也可能分布不均，因此随着砾石含量增加，渗透系数也加大，但仍可满足防渗要求。实践证明，当砾石含量超过  $60\%$ ，由于细料量少，在砾石孔隙中填不密实，砾石形成架空，渗透系数迅速变大，不能作为防渗料，但可填筑坝壳。此外，试验证明，砾石土的渗透系数与小于  $0.074 \text{ mm}$  的颗粒含量关系密切（图 3-3）。当小于  $0.074 \text{ mm}$  的颗粒含量超过  $10\%$ ，其渗透系数可小于  $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ，可作为防渗料（图 3-3）。此外，砾石土的渗透系数还与所含细料本身级配及矿物化学成分有关。综上所述，为了满足防渗要

求 并为了留有余地 土石坝设计规范规定 砾石土的砾石含量宜不大于 50% 小于 0.075mm 的颗粒含量要求大于 15%。工程实践表明，为了保证不透水性和抗冲蚀性，砾石土粘粒（小于 0.005mm 含量最好至少为 6%~8%。砾石土渗透系数一般为  $i \times 10^{-5} \sim i \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。

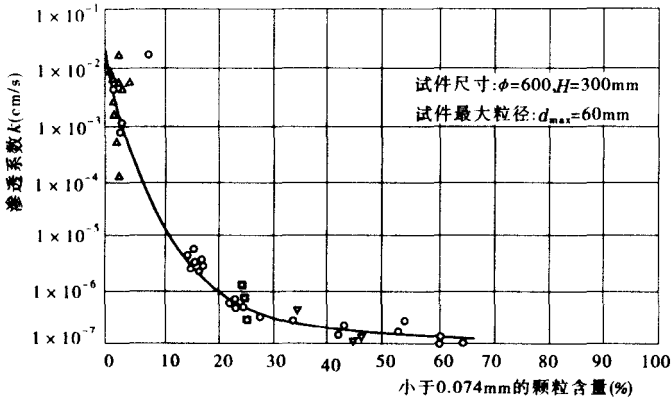


图 3-3 小于 0.074mm 的颗粒含量与渗透系数的关系

关于砾石土的渗透稳定性，根据国内外实践经验，其允许渗透比降一般采用 2~3 低于粘性土 这或许是由于砾石土级配范围宽，有粗有细，要考虑在渗流作用下细粒可能在粗粒所形成的孔隙中移动、产生内部管涌的不利情况，因此设计采用的允许渗透比降值比粘性土小。但也正由于砾石土的粒径范围大，一旦发生裂缝，粗粒不易被渗流冲走，可能留下来堵塞裂缝，形成自然反滤，使裂缝自愈，故砾石土仍具有一定抗冲蚀能力。

由于砾石土含有一定的粗颗粒，其压缩性通常小于粘性土，压缩系数一般小于  $0.001 \text{cm}^2/\text{N}$ （相应垂直应力为 100~200kPa）。当砾石含量小于 60% 时，砾石土的压缩性随砾石含量增加而减小。当砾石含量大于 60% 时 如上所述 由于产生砾石架空 填充

其中的细粒压不密实，故压缩性反而有所增大。

砾石土的抗剪强度随干密度增加而提高，浸水后略降，当砾石含量小于 30%~40% 时，强度主要取决于细料，超过 30%~40% 时，抗剪强度随砾石含量增加逐渐提高。砾石土抗剪强度由大型剪力试验确定，一般大于粘性土内摩擦角在  $22^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ，粘聚力为  $10\sim 30\text{kPa}$ 。

综上所述 砾石土兼有粘性土及砂性土特性 其级配优良 压实性好，对填筑含水量反应不像粘土敏感，便于施工，抗剪强度高，压缩性低，为良好的筑坝材料。当砾石含量小于 50% 小于  $0.075\text{mm}$  的颗粒含量大于 15% 时 其透水性小 可作为土石坝的防渗料。最大粒径一般不要超过  $15\text{cm}$  或填土厚的  $2/3$ 。砾石土的缺点是塑性低 抗裂性能不如粘性土。自 20 世纪 60 年代起 全世界  $100\text{m}$  以上高土石坝有不少用砾石土筑防渗体 有关实例见表 3-1。

利用砾石土筑坝应注意以下几点：①施工时应防止粗细料分离，避免粗料在坝体集中形成漏水通道。砾石土抗管涌冲蚀能力不如一般粘性土，设计方面应做好反滤保护。由于砾石土级配范围宽 不均匀系数大 如其全级配作为被保护土按普通反滤准则进行设计 可能得出偏粗的反滤 导致管涌事故。应以砾石土的细料级配作为被保护土来设计反滤料，以保证渗透稳定。如采用风化软岩筑坝，宜选择羊角碾或凸块振动碾等碾压机具进行压实 将岩块碾碎压密 使之具有弱透水性 而最好不用碾碎作用较差的气胎碾。

### （五）膨胀土

膨胀土具有明显的吸水膨胀和脱水收缩的特性，这种土由多种矿物组成，以亲水性强的粘土矿物为主，其化学成分也较复杂，一般为含水的铝硅酸盐。判别膨胀土都是以土和水的相互作用的程度为依据 有多种判别方法 尚未见统一 表 3-2 是一种以最大体积收缩率  $e_v'$  进行判别的方法，供设计参考。

表 3-1 国内外高坝用砾石土做防渗料实例

坝名	国家	坝高 (m)	坝型	防渗体材料	砾石 含量 (%)	最大 粒径 (mm)	天然 含水量 (%)	最优 含水量 (%)	填筑 干密度 (t/m <sup>3</sup> )	内摩 擦角 (°)	粘聚力 (kPa)	渗透 系数 (cm/s)	允许 渗透 比降	竣工 年份
麦卡	加拿大	245	斜心墙	冰碛土	25~47.5	200	—	—	—	—	—	$1 \times 10^{-7}$	3.0	1973
齐维尔	哥伦比亚	237	斜心墙	碎石块及中塑性粘土	55%大于 200 <sup>#</sup> 筛	150	19~21	—	—	—	—	—	3.5	1974
霍洛维尔	美国	235	斜心墙	粘土掺砂卵石	45	75	8~14	—	2.2	14	30	—	1.7	1967
高瀨	日本	176	心墙	粘土卵石	—	—	—	—	—	—	—	$1 \times 10^{-5}$	—	—
菲尔泽	阿尔巴尼亚	165.6	心墙	粘土掺砂卵石	30~35	60	—	—	—	—	—	$1 \times 10^{-7}$	1.75	1977
特里尼提	美国	164	心墙	风化安山变质岩	64	75	13	15~17.1	1.76	—	—	—	—	1962
库加尔	美国	158	斜心墙	滑石风化岩	56	150	15	14~23.1	1.89	—	—	$1 \times 10^{-7}$	—	1963
郭兴能	瑞士	155	心墙	粒径小于100mm卵石人工掺11%粘土	55	75	—	6~8	2.0~2.4	—	—	$1 \times 10^{-7}$	3.4	1961
给帕茨	奥地利	153	心墙	筛分山麓堆积土和卵石	37~64	80	8~14	6.5~7	2.1	29	10	$2.4 \times 10^{-7}$	4.8	1965
斯维福特	美国	153	心墙	细粒砾石土	50	100	10	12	1.9	—	—	$2 \times 10^{-5}$	1.8	—
奈采华 柯依托	墨西哥	138	心墙	风化砾岩,砂质粘土	—	—	25	16~28	1.65~1.79	22	0	—	—	1964
御母衣	日本	131	斜墙	人工掺粘土及风化花岗岩混合料	40~63	75	8~14	12.5~ 18.5	2.05	33	55	$1 \times 10^{-5}$	1.6	1960