

一种轻质硬壳海堤的断面设计和可靠性分析*

陶松垒¹ 张子和² 吴建华¹

(¹ 杭州应用工程技术学院 310012)

(² 浙江省围海工程公司 宁波 315051)

提要 针对软基堤坝易沉陷、滑移、倒塌,施工难,工期长的问题,提出一种新型的筑堤结构。该结构采用高强度材料作为外壳,以轻质材料放置于易沉滑的部位,以松散材料填充坝体。根据受力特性、构造要求、施工条件及抗滑稳定条件,拟解决结构断面设计的一些基本问题,并结合实例运用专业程序进行了对比计算分析,说明轻质硬壳堤坝比传统堤坝具有更高的可靠性。

关键词 轻质硬壳堤坝,断面设计,可靠性

1 海堤坝构建中存在的问题

由于我国沿海滩涂上覆盖着深厚的第四纪以来海相沉积层,其特征是:含水量高,孔隙比大,渗透系数小,埋藏深厚,承载力与抗剪强度低,灵敏度高,固结时间长等等。所以在设计筑堤中存在着如下问题:(1) 软弱地基。一般处理方法是避开软弱地基或挖除软弱土层^[4],但对于海堤工程来讲,这种做法不切合实际,只能在软基上筑堤。(2) 堤身过重。对于软基来说,重力坝并非越重越好。一方面,过重致使坝基土体中超静水压力增大,有效应力减小,抗剪强度降低,在

波浪荷载作用下,底床主应力方向不停发生转变,导致地基破坏;另一方面,坝身过重将在设计环节限制堤顶高度,易造成越浪,越浪水流冲刷堤坝,先在防浪墙后冲成深沟,防浪墙沉陷倾倒,形成海水漫顶溢流冲刷土堤使块石护墙层层塌落直至削平堤体^[1]。(3) 堤坝材料松散防渗性差。用泥和石块填筑造成的水坝,对十里长堤来说,都是松散材料,地基稍有变动,

* 浙江省自然科学基金资助项目 59957 号。

收稿日期:2001-05-22;修回日期:2001-07-30

就有缝隙,水就会向外渗漏出来。堤身渗漏是一大隐患,干砌块石防冲砌体质量差,容易松动变形,致使海水渗入淘蚀堤身土料。(4)稳定性差。在施工期内或建成后经常出现不均匀沉降、滑坡、位移,一遇到地震、台风就损失惨重,堤防被毁,海水倒灌。全国由于毁堤造成的年损失高达上百个亿。(5)堤身土方堆不上去,站不住,自然坡比达1:16,无法机械化快速施工。(6)工期长。尽管采用了塑料排水板、土工布及砂垫层等措施仍要根据地基承载力严格控制加荷速率。

2 轻质硬壳堤坝简介

2.1 基本思想

轻质硬壳堤坝旨在克服上述问题,提出以高强度材料制成堤坝的外壳,以轻质材料垫入堤坝易沉陷的部位然后填入其他松散材料,使之产生减重、加筋、防渗、隔离、堆高的作用,从而减轻堤坝易沉陷部位的重量,调整堤坝平衡,以均衡堤坝荷重,增强整体稳定性,提高强度。使堤坝刚中有柔,刚柔相济,与地基融为一体,以解决不均匀沉降的问题。

2.2 结构型式

结构型式有轻质坝芯结构、局部填充结构、掺拌结构、硬壳结构等,具体参见文献[2]。本文讨论一种典型的硬壳结构型式,如图1所示。

用高强度材料做成薄壁外壳,该外壳的上部设有开口,四周和底部设有带栏栅和滤网的开孔,并放置在涂面的堤线上,然后从上部开口填入松散材料。外壳可以是整个坝体,也可以是坝体的某个部分。轻质垫层采用发泡塑料设置于堤坝的底部,以调整重量,使软弱地基受力平衡。堤坝尺寸应根据地基土质、水位高度、风浪推力、标准等级、填料容重等因素综合确定。

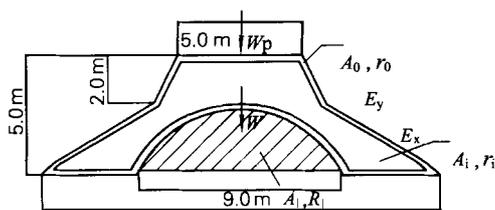


图1 设计计算断面

Fig.1 Cross-section for design and computing

2.3 材料选取

轻质硬壳堤坝的材料,包括外壳材料、壳体填充材料及轻质垫层材料。外壳材料可选用强度大、防渗性好、耐风化的各种材料,比如高分子复合材料、钢筋混凝土、玻璃钢等。壳体填充材料可以因地制宜,就地选材,主要原则是价格低廉取料方便。轻质垫层材料

可选用泡沫塑料,如聚苯乙烯、聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯等等发泡。这些材料发泡倍数大(可达80倍左右)、价格低、重量轻($0.2 \sim 0.4 \text{ kN/m}^3$)、强度高(抗压力 0.35 MPa ,抗弯强度 $0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$)、抗渗透性好(吸水率 $0.0 \sim 0.002 \text{ g/cm}^3$)、化学稳定性好。为提高强度,方便施工,可加添加剂,亦可采用中空结构代替。

2.4 构筑施工方法

外壳和轻质垫层可以通过工厂生产堤坝构件或工程附近预制,然后运到现场构筑,也可直接在现场制作。壳体填充材料一般离坝趾一定距离外取土,作者专门研制了一种原状土远距离管道输送方法及设备,进行原状土的远距离输送填灌,作为轻质硬壳堤坝的配套手段,也为大规模快速筑堤提供了设备保证。施工时应注意堤坝整体平衡以保证其沉降一致。

3 海堤结构断面设计

轻质硬壳海堤断面设计内容包括:硬质外壳设计、轻质垫层区面积确定、抗滑与整体稳定性验算、抗波浪力设计、抗渗设计,其中抗滑和整体稳定性验算可按常规方法进行。下面着重讨论硬质外壳和轻质垫层、抗波浪力及抗渗的设计要点。

3.1 外壳设计

硬质外壳主要起抵抗冲刷、加强填充体侧约束、提高整体稳定性等作用,要求具有足够的抵抗刚度。壳体的刚度主要由本身材质及几何造型决定,材料的选用在上节中已有叙述,几何造型中坝顶宽度可根据坝体结构的实际功能来确定,比如满足通行要求等。坝高可依据实际场地条件及堤坝功能而定,可参见相应设计规程。外壳强度主要按构造要求、可能的受力特性及施工实际情况进行设计。

3.1.1 构造要求

根据材料和工程的性质确定外壳的厚度,如钢丝网混凝土以不小于5cm为宜,并要求在1.5~2.5m间设置肋,以加大壳体的整体刚度。如以高分子材料为壳体,宜采用异形材料,波纹高度不小于10cm,厚度为1~3cm。采用雌雄块使外壳连成整体。

3.1.2 受力要求

堤坝内填充物为松散体材料,则外壳对填充材料有一定的约束作用,因此壳体斜坡部位受到填充体一定的法向反力,设计中该反力可按土体力学特性和刚体极限平衡原理进行计算。外壳壁厚要满足该力作用下的抗力要求。

3.1.3 施工要求

预制坝壳应考虑吊装浮装问题,可按梁板受力模式设计吊装位置,根据现场起吊能力确定预制分段长

度,便于施工。应考虑到紧急抢险、快速填筑、临时围堰等情形,为便于工厂预制生产,其外型尺寸不能过大,若尺寸较大的,则应采用现场分段进行构筑。

3.2 轻质垫层区面积的确定

轻质垫层区为图1阴影部位。假设堤坝外形几何尺寸已定,即顶宽、底宽、坝高、壳壁厚度为已知值,轻质垫层区域面积还有待于确定,该面积除满足常规几何可实现性外,主要应满足堤坝水平抗滑能力。参照重力式挡土墙的滑动稳定验算公式,推得轻质垫层区面积 A_1 应满足下式:

$$A_1 \leq \frac{r_0 A_0 + \gamma_1 (A - A_0) + W_p + E_y - \frac{K_c E_x}{f}}{\gamma_1 - \gamma_1} \quad (1)$$

式中: A_0 , A ——堤坝断面总面积(包括轻质垫层区)、外壳断面面积、轻质垫层区面积(m^2);

γ_0 , γ_1 , γ_1 ——硬壳材料重度、填充物重度、轻质材料重度(kN/m^3);

W_p ——坝顶面受力(kN);

E_x , E_y ——坝体侧面所受的水平力、竖向力(kN);

K_c ——坝体沿坝底的滑动稳定系数,一般取1.3;

f ——基底摩擦系数。

3.3 抗波浪力设计

(1) 波浪要素包括风速、风向、风区长度、风时与水域水深等,可按相关规程的方法来确定。(2) 波浪爬高计算:从体形看,轻质硬壳堤坝为复合斜坡堤,其爬高的计算,可先确定断面的折算坡度系数,再按该坡度系数的单坡断面确定爬高值。(3) 波浪压力计算:我国《混凝土重力坝设计规范》规定,根据坝前不同水深情况,分别确定作用于坝上的波浪压力图形及其数值。

选用硬质材料作为外壳,可以提高堤身抗风浪冲刷能力,在体型上作了特别设计,即将堤坡设计成折坡,坡度从下到上增大,能有效消减波浪能,抑制风浪爬高。另外,由于堤壳较薄,在有粗粒推移质的沿海不宜采用轻质硬壳形式,但在东南沿海,大陆架表层以海相沉积物为主,其推移质多为砂质土或淤泥质土粒,应用该种形式堤坝结构是合适的。

3.4 抗渗设计

堤身外壳采用高分子材料或钢筋混凝土为材料,不仅具有较强的抗渗能力,而且在出现水位骤降时能大大提高坝坡的抗滑稳定性。至于坝基防渗措施的选用可参照传统土堤的防渗设计方法。

4 稳定性实例分析

辽河油田的海滩石油勘探工程在潮间带建筑钻探平台(人工岛)和运输通道(堤坝),有油时需用几

年,没油就废弃。工程地质情况如表1所示。原先从80 km以外运石方堆筑,由于地基软弱,加之潮水冲刷,堤坝时常沉滑。沉了又填,填了又沉。既方量大,造价高,又不能正常工作。为此本课题组做了轻质硬壳堤坝的方案,并进行了可行性分析。

表1 工程地质表

Tab.1 Soil parameters of embankment foundation

地质类型	层厚 (m)	γ (kN/m^3)	c (kPa)	φ ($^\circ$)	P_k (kPa)
粉砂土	2.0	17.7	0	31.0	120
粉土	1.4	18.0	0	22.3	110
粉质黏土	3.0	17.8	0	14.0	100
粉土	10.6	18.1	0	27.0	150

根据地基和实际情况,拟定坝体形式及相关几何尺寸如图1所示。由于坝顶要求通车,外壳为钢筋砼,坝顶盖厚取15 cm,其他取10 cm;坝体填充材料容重为17 kN/m^3 ;轻质垫层为泡沫重0.4 kN/m^3 ;设坝顶作用有活载12 kN/m^2 。

4.1 抗滑稳定验算

取抗滑稳定系数 K 为1.3,坝体基底摩擦系数 f 按软塑地基取0.25,考虑到坝体侧面的波浪压力作用,侧面受力按满坝顶静水压力计。根据式(1)计算得到,满足水平抗滑稳定条件轻质垫层区最大面积 $A_{1\max}$ 为32.9 m^2 ,而设计断面的轻质垫层区面积 A_1 为27.9 m^2 , $A_1 < A_{1\max}$,满足要求。

4.2 整体稳定性计算分析

堤坝稳定分析采用刘国华1997的边坡稳定分析程序(STAB)。该程序适用于由土或土石料堆积起来的自然边坡或人工边坡的稳定分析。本计算选用圆弧滑动法,通过最优化技术自动寻找最危险的滑弧。

表2 填料计算参数表

Tab.2 Parameters of materials for embankment construction

填料类型	γ (kN/m^3)	c (kPa)	φ ($^\circ$)
填土	18.0	0	40
外骨料	25.0	1100	0
填充料	17.0	0	0
垫层泡沫	0.4	0	0

作者计算了以轻质硬壳材料、一般填土为材料但具有相同边坡的两种堤坝及按常规边坡(1:2.5)且与前两者具有相同顶高和顶宽的一般填土堤坝的整体稳定性安全系数,滑弧土条宽度为0.5 m,填料计算参数见表2。

计算结果如图2所示,轻质硬壳堤坝整体稳定安全系数 $K = 2.525$,滑动弧面半径 $R = 14.256$ m

(图 2a);与前者具有相同外型的一般填土堤坝整体稳定安全系数 $K = 1.210$, 滑动弧面半径 $R = 6.959$ m(图

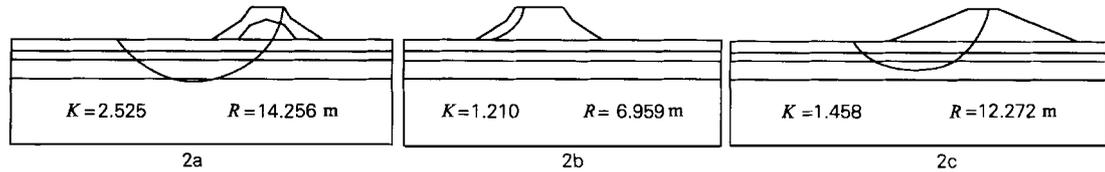


图 2 整体稳定性计算结果

Fig.2 Fruits of overall stability analysis

2b);按常规边坡设计的填土堤坝的整体稳定安全系数 $K = 1.458$, 滑动弧面半径 $R = 12.272$ m(图 2c)。

通过计算表明,对于相同的地质条件与断面外型,一般填土堤坝坝体将先于地基失稳,若加设硬壳外壳,其安全系数可提高一倍多。若按常规边坡(1:2.5)设计的堤坝,它的坝体本身稳定性将有所提高,但与轻质硬壳堤坝相比,由于具有更大的坝重,其整体抗滑稳定性将有所降低,安全系数只有轻质硬壳堤坝的 0.6 倍。通过 3 种情况的对比分析,轻质硬壳堤坝的优点得到了充分的体现:加设的硬壳将提高坝体边坡系数,与常规边坡土坝相比,减小填方近 45%,同时增强了防渗性能;其轻质材料的利用,进一步减轻了坝重,可节省坝基处理的投资,且提高了整体抗滑稳定性。

4.3 抗水平推力

轻质硬壳堤坝由于降低了材料重量,进而减小了与地基土之间的水平摩擦力,其性能似乎不如传统土坝,但传统海堤由于极大的底面宽度,设计时往往无须考虑坝体抗水平推力性能。如在坝壳趾部加设齿坎,则将提高其抗推能力^[3]。

5 轻质硬壳堤坝的优点

5.1 提高了堤坝的稳定性

一方面,减轻了堤坝易沉陷处的重量,提高了坝体的强度与整体性,调整了堤坝的受力平衡,避免了不均匀沉降与滑坡;另一方面,轻质材料相当于一个有一定强度的垫层铺于软弱地基上,扩大了荷载力扩散范围,使压力均匀分布,同时对下卧土体有约束作用,限制了地基的侧向变形。

5.2 加快了施工建设速度

传统的施工方法,在软弱地基填筑土石料时必须严格控制加荷速率,待地基固结强度提高后才能再加荷,并且软黏土堆不上去,固结度的提高很缓慢,工期长。而采用轻质堤坝从根本上解决了地基强度和土方

堆高的问题,有利于机械化、大规模施工,所以大大缩短了工期。

5.3 减少了坝体方量

填充的轻质材料或设置的中空外壳,使土方易堆高,可以增大坡比,如从 1:16 提高到 1:4,可以减少大量土石方。坝体重量减轻,还可减少闭气层土方量。在缺少石材的地区,还可以土代石,省去大量石方。

5.4 治理白色污染

轻质堤坝采用废弃塑料作为材料,集中埋入堤坝底下,是治理白色污染的好方法。

5.5 提高堤坝的安全寿命

由于有硬壳边坡,不仅保持了边坡的稳定,而且有效地抑制了雨水风浪的侵蚀和越浪的冲刷。轻质堤坝采用的材料具有化学稳定性好、耐腐耐老化能力高、抗菌抗生物能力强等特点,只要土石覆盖良好就有很好的耐久性。对蟹鳃蝼蚁造成的漏洞也有有效的防止作用。

另外,轻质堤坝刚中有柔,柔中有刚,刚柔相济,整体适应地基的变化,具有较好的抗地震性能和抗渗性能。

6 结语

针对海堤坝存在的沉陷、滑坡、渗漏、倒塌等问题,本文提出了一种新型的筑堤结构——轻质硬壳海堤,适合于软基筑堤、快速筑堤、临时围堰、抢险救灾。具有施工速度快,坝体方量少,堤坝安全寿命长等优点。说明轻质硬壳堤坝比传统堤坝具有更高的可靠性。

参考文献

- 1 毛佩郁,段祥宝,毛昶熙。海洋工程,1996,14(2):28~39
- 2 陶松垒,金伟良,傅军。海岸工程,1998,17(4):34~40
- 3 俞亚南,屠毓敏。中国公路学报,2000,13(2):27~30
- 4 Brigger P. J. . Can. Geotech. J.,1998,35(1):1 018~1 031

(下转第 12 页)

(上接第 7 页)

DESIGN OF CROSS - SECTION FOR LIGHT & HARD-SHELL DYKE AND ITS RELIABILITY

TAO Songlei¹ ZHANG Zhihe² WU Jianhua¹

(¹ Hangzhou Institute of Applied Engineering and Technology, 310012)

(² Zhejiang Reclaiming Engineering Co., Ningbo, 315000)

Received: May, 22, 2001

Key Words: Light & hard-shell dyke, Cross-section design, Stability

Abstract

Paying respect to the sinking, movement and collapse of the soft embankment itself, overweight and looseness are major factors on the stability of the dyke, so the light & hard-shell dyke (LHD) is presented. It can be built with high stress materials outside and loose materials inside. Several problems about cross-section design are to be solved according to statics characters, structure requirements, performance conditions and the requirement of anti-slid stability. Then based on computing and analysis for an instance, it is concluded that the LHD possessed more overall stability than traditional embankment.

(本文编辑:李本川)