

加筋土叠墙结构在河道治理工程中的应用

岳景哲

(四平市水利勘测设计研究院,吉林 四平 136000)

摘要:为提高城市河道整治工程的耐久性,降低工程投资,护岸结构设计采用高密度聚乙烯单向土工格栅加筋土叠墙结构。加筋体墙面采用回包、反滤结构形式,填料选用废弃砂砾料和建筑垃圾,墙体稳定验算主要采用 DIBT 计算方法,加筋材料设计参数选用蠕变极限值。计算结果表明,墙体结构设计解决了叠墙上级墙体基础沉降的稳定性问题以及加筋体与护面天然料石的连接问题,可提高护岸结构设计使用寿命 1 倍以上,较传统的混凝土结构节省工程费用约 31%。该工程竣工后经检验叠墙结构安全稳定。

关键词:加筋土;叠墙结构;土工格栅;河道治理

中图分类号:TU476+.4

文献标志码:B

文章编号:1006-7647(2012)S1-0039-03

1 工程概况

四平市北条子河综合治理工程是四平市城市防洪工程主体的续建部分,是主体工程的二期建设项目,治理河段位于四平市区北部繁华风光带,贯穿新城区。该工程对北条子河桩号 2+750~4+550 河段原设计的混凝土护岸挡墙结构形式进行方案优化,最后确定将原混凝土护岸结构修改为叠式加筋土挡墙结构。工程治理河道总长度约为 1.8 km,于 2005 年 5 月正式开工建设,2006 年末全部竣工验收。治理河段土工格栅加筋土护岸叠墙工程已运行 5a 以上,叠墙结构变形微小,工程运行安全稳定。

市区北条子河为招苏太河水系,属东辽河支流,河道 100 年一遇设计洪峰流量为 440 m³/s,河流由东流向西,属季节性河流。多年来,市区段已成为工业、生活污水的主要排泄通道。河水主要来源于地表径流、生活污水及工业废水,工业污水对混凝土及金属结构有较强的腐蚀性。地下水为第四系砂层孔隙潜水,含水层厚 0.8~5.3 m,其渗透性强,渗透系数达 1.0×10⁻² cm/s。地下水与河水具有较强的水力联系,枯水期地下水补给河水,丰水期河水补给地下水。治理河段大部分可采用天然浅基础,以粗砂层为持力层,局部河段护岸挡墙地基岩性为表层 1~2 m 厚淤泥或淤泥质土,其下部为中、粗砂,地基

表层承载力较低,需进行人工换填。工程区域最大冻土深度为 1.5 m,区域地震烈度为 VI 度。

2 护岸设计方案

2.1 断面形式

北条子河断面形式为复式矩形断面,即上、下为直立墙形式,河道宽度为 65~90 m。河道护岸挡墙为土工格栅加筋土叠墙结构,最大墙高为 6.21 m。下级墙高为 3.49~4.21 m,上级墙高为 1.31~2.00 m,上、下级墙面倾角均为 84°~88°。上、下级墙间设有台宽为 2.5 m 的人行步道,沿上级墙顶边缘依次设有 2.5 m 宽人行步道和 6 m 宽机动车道。

2.2 结构方案

在满足城市建设规划效果的前提下,本着就地取材、节省投资的原则,进行了 3 种河岸挡墙结构形式的比选,各参选方案的主要单位工程量及投资见表 1。

表 1 各参选方案每米主要工程量及投资

方 案	料石/ m ³	浆砌石/ m ³	砂砾料/ m ³	钢筋 混凝土/ m ³	单向土 工格栅/ m ²	连接 棒/ m	综合 造价/ 元
重力式 浆砌石挡墙	1.15	13.55	26.31				5908
悬臂式钢筋 混凝土挡墙	1.15		26.65	6.70			7253
土工格栅 加筋土叠墙	1.15		19.09	2.09	89.07	11	5386

通过上述方案的比选可知土工格栅加筋土叠墙方案单位造价最低,且该方案适用于严寒地区,在抗冻胀破坏、耐久性、环保及美观方面更具优势。具体说来:①河道护岸挡土墙高度为 5.49~6.21 m,如果采用浆砌石或钢筋混凝土挡墙结构形式,工程造价往往随墙高度的增加以平方速率增加,而加筋土挡墙一般以线性速率增长,因而工程造价较低。②加筋墙体填料选用砂粒料和废弃建筑垃圾,既有利于环保,又节省了工程投资。③加筋体填筑施工方便快捷,工期较短。④加筋填料透水性较好,具有良好的耐腐蚀性能,可提高河道护岸工程的耐久性。⑤加筋土结构具有较好的适应变形能力,对地基条件要求相对较低。⑥加筋土挡墙属于柔性结构,因而在抗震性能上也远优于混凝土和浆砌石等圬工结构。综合分析,本工程河道护岸设计结构方案最终确定采用土工格栅加筋土叠墙方案。

3 护岸叠墙设计

3.1 计算模型与特征参数

北条子河叠式护岸挡墙结构叠墙断面满足条件 $(H_1 + H_2)/20 < D < H_2 \tan(45^\circ - \varphi_r)$, 其中 H_1 和 H_2 分别为上、下级墙高, D 为上、下墙面台宽, φ_r 为加筋体内摩擦角^[1]。因此,上部挡墙按独立墙单元考虑,下部挡墙计算时将上部挡墙作为附加超载按整体稳定进行分析计算,计算时计入上级墙顶公路附加车辆活荷载。叠墙墙体整体稳定验算按加筋陡坡计算,墙体稳定验算荷载组合考虑墙体浸水及河水位骤降等最不利运行工况。因河水位骤降作用于墙体上的反向渗透压力按均质土坝在库水位骤降时的浸润线解析法计算^[2],其中,墙后填土的排水系数 $\mu = \alpha p$, α 为系数,本设计取 $\alpha = 0.56$, p 为墙后填土的孔隙率^[3]。

护岸加筋土挡墙工程加筋材料采用高密度聚乙烯(HDPE)单向土工格栅。设计要求采用高强度、小应变、低蠕变、抗老化性能优良可靠的加筋材料,其中纳米级碳黑质量分数宜为 2.0%~2.5%,且分散度均匀、优良。为满足工程设计耐久性要求,筋材的计算强度采用蠕变极限抗拉强度,并分别对筋材的质控强度和 2% 及 5% 应变相对应的抗拉强度进行规范。河道部分软基河段下级挡墙基础处理采用了 2~3 层聚丙烯双向土工格栅加筋垫层,每层垫层厚度为 60 cm,土工格栅与地基及上级挡墙混凝土基础与加筋体的摩擦因数采用 $(0.75 \sim 0.80) \tan \varphi_r$ ^[1]。加筋体填筑土料控制指标为:干密度不低于 1.85 t/m³,稳定计算时不计不稳定黏聚力 c 的影响,要求水下内摩擦角不小于 28°;加筋体填料压实度控制指标为:

下级墙不低于 0.98,上级墙不低于 0.95。根据现场原位土料的实际情况,要求墙背填料的干密度不低于 1.47 t/m³,内摩擦角不小于 11°,压实度不低于 0.94。

3.2 墙体构造设计

加筋材规格及层间距 S_v 的选择、布置需按计算及构造要求等综合确定。该工程河道护岸加筋土挡墙墙面采用回包形式,筋材回包长度为 1.5~2.0 m,墙面回包端填料反滤、排水层采用 400 g/m² 长丝复合无纺布。墙体护面采用天然花岗岩精料石砌筑,规格为 500 mm × 200 mm × 200 mm 和 250 mm × 200 mm × 200 mm 这 2 种,料石砌筑砂浆标号为 M₂₀,料石护面与加筋体回包面间设置厚度为 350~400 mm 的砾碎石过渡层,料石间及料石与加筋土体之间分别采用 Φ16HDPE 锁棒及厚度为 4~6 mm 的 HDPE 连接棒进行 50% 的连接。料石钻孔直径为 20 mm,孔深为 50 mm,护面料石砌体通过 HDPE 锁棒和回包面预留主筋格栅张紧、连接。

3.3 结构稳定验算

加筋土叠墙稳定分析主要分为内部稳定和外部稳定 2 种情况控制,该工程加筋土叠墙筋材铺设长度受外部稳定条件控制。墙体稳定验算主要采用德国建筑技术研究所的 DIBT 计算方法(双楔体法)。在墙体内部稳定验算中,其潜在的破裂面假定为沿不同墙高和不同角度(每隔 3°)的斜面。筋材设计计算强度分别采用不同规格格栅相应的长期蠕变残余强度,筋材使用寿命可达 100 a。

3.3.1 筋材允许强度确定

依据 GB 50290—1998^[4]的有关规定,土工格栅筋材容许抗拉强度由式(1)确定:

$$T_a = \frac{P_c}{F_{iD} F_{CR} F_{CD} F_{bD}} \quad (1)$$

式中: P_c 为蠕变极限抗拉强度; F_{iD} 为铺设时机械破坏影响系数, $F_{iD} = 1.30 \sim 1.45$; F_{CR} 为材料蠕变影响系数, $F_{CR} = 1.0$; F_{CD} 为化学破坏影响系数, $F_{CD} = 1.0$; F_{bD} 为生物破坏影响系数, $F_{bD} = 1.0$ 。

3.3.2 筋材布置

设计确定筋材水平方向满铺,垂直方向布置间距分为 2 种: $D_1 = 0.45$ m, $D_2 = 0.60$ m,每层筋材长度需综合稳定验算成果及墙体构造要求合理确定。按构造要求^[1],上部挡墙筋材长度不小于 $0.7H_1$,底部墙筋材长度不小于 $0.6(H_1 + H_2)$ 。

3.3.3 外部稳定验算

墙体外部稳定验算^[5-6]土压力计算采用库仑理论,墙后填土与墙背间摩擦角取 $\delta = 18.7^\circ$ 。土压力系数采用式(2)计算:

$$K_{a2} = \cos^2(\varphi_b + \varepsilon) \left\{ \cos^2 \varepsilon \cos(\varepsilon - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi_b + \delta) \sin(\varphi_b - \beta)}{\cos(\varepsilon - \delta) \cos(\varepsilon + \beta)}} \right] \right\}^2 \quad (2)$$

式中： φ_b 为墙后填土与墙背间内摩擦角； ε 为加筋体墙背倾角； β 为墙顶填土地面与水平面间的夹角。

随后进行墙体抗滑稳定验算、墙体抗倾稳定验算、地基承载力验算、深层抗滑稳定验算，得出水平抗滑稳定安全系数 F_{ss} 、抗倾覆稳定安全系数 K_0 、地基承载力 F_{sb} 、深层抗滑稳定安全系数 F_s （表 2）。

3.3.4 内部稳定验算

内部稳定验算采用 DIBT 计算方法，即沿墙高度方向分别对每间隔 3° 的楔体潜在破裂面及筋材层间的潜在滑动面进行抗滑稳定验算。

筋材长度与抗拔稳定性验算采用式（3）计算^[5]：

$$T_i = \frac{[(\sigma_{vi} + \sum \Delta \sigma_{vi})K_i + \Delta \sigma_{hi}]S_{vi}}{A_r} \quad (3)$$

式中： σ_{vi} 为筋材上部填土的垂直自重应力； $\Delta \sigma_{vi}$ 为超载引起的垂直附加应力； K_i 为土压力系数； $\Delta \sigma_{hi}$ 为作用于计算单元上的侧向水平应力； S_{vi} 为筋材垂直间距； A_r 为筋材面积覆盖率。

筋材强度安全系数及抗拔安全系数采用式（4）进行验算：

$$F_t = \left(\frac{T_a}{T_i} \right)_{\min} \quad F_f = \left(\frac{T_{pi}}{T_i} \right)_{\min} \quad (4)$$

式中： F_t 为筋材强度安全系数； T_a 为筋材容许抗拉强度； T_i 为筋材设计要求抗拉强度； F_f 为筋材抗拔安全系数； T_{pi} 为第 i 层筋材的抗拔力； T_i 为第 i 层筋材的设计拉力。

沿筋材层面及层间抗滑稳定安全系数 F_{ss} 的计算原理和公式与外部稳定验算的相同，具体计算方法见文献[5]。 F_{ss} 、 F_t 、 F_f 计算结果见表 2。由表 2 可见，各项稳定安全系数均满足现行规范^[4]要求。

表 2 加筋土叠墙典型断面稳定计算成果

部位	外部稳定最小安全系数				内部稳定最小安全系数		
	F_{ss}	K_0	F_{sb}	F_s	F_{ss}	F_t	F_f
上墙体	2.08	11.81	3.27		1.36	1.23	3.20
下墙体	1.31	7.12	3.27	1.50	1.37	1.23	5.93

3.4 原型观测

为监测墙体基础应力、墙面位移和主筋材应变，设计拟将堤防桩号 3+100（右）及 3+80（左）2 个断面定为原型观测断面。每个断面内测点布置为：护面位移观测点 5 个；加筋体回包面土压力观测点 10 个；墙基底压力观测点 9 个；筋材应变观测在垂直方向布置 7 层，共计 35 个测点，即材料应变计 35 支；

沉降观测仪 2 处（6 个测点）。原型观测采用无线全自动数据采集系统，系统内设 65 点数据采集模块 5 个，配套信号收发主机 5 个，配备数据分析软件 1 套。

4 施工工艺

4.1 基础施工

施工以机械化作业为主，人工作业配合为辅。采用人工铺设土工格栅，加筋材料主强度方向应垂直于墙面，双向格栅幅间搭接长度不小于 30 cm，主强度方向严禁搭接；单向格栅幅间靠紧即可。按照设计要求开挖基础至设计深度，夯实基础，现浇护面材料钢筋混凝土基础，然后铺设加筋垫层双向格栅，在铺好的双向格栅上铺填砂砾料，整平压实后将回包格栅端部压在已铺筑的层面下约 15~20 cm，然后再铺筑上一层格栅。

4.2 加筋体及护面

首先进行料石护面钢筋混凝土基础施工，然后砌筑料石，预埋连接短格栅，每次砌筑高度不宜超过 3 层筋材间距。待护面料石间砌筑砂浆黏结强度具备张拉条件时，方可自下而上逐层铺筑主筋材格栅，并分层回填砂砾料，整平后进行碾压。分层厚度不宜超过 30 cm，砂砾料含水量宜控制在最优含水率的 $\pm 2\%$ 左右。铺设单向格栅时，应首先进行格栅连接，即用 HDPE 连接棒将料石预埋短格栅与主筋材格栅进行 100% 的连接，拉紧后，分别在主筋格栅首尾端用木桩或 U 形钉固定，然后在固定好的主筋格栅上分层铺筑砂砾料，分层碾压，分层厚度宜为 20~30 cm。墙面按设计要求回包，加筋体与料石护面间过渡层可随即填筑、捣实。要求距离护面料石 2 m 以内应用小型压实机械及人工进行夯实，2 m 以外采用小型振动碾碾压。填料压实密度不低于 0.95，重复上述作业至挡墙顶端。

5 工程效果

四平市北条子河综合治理工程采用土工格栅加筋土叠墙结构，设计加筋填料充分利用了当地废弃土料，而且在设计中科学地利用了高分子加筋材料长期物理力学指标的变化特性，显著降低了工程投资，较传统的混凝土结构节省工程费用约 31%，且可提高工程使用寿命 1 倍以上。同时，通过创新施工工艺，采用分段流水作业的循环施工方法，有效提高了施工速度，缩短了工期，取得了显著的经济效益和生态效益。设计墙体护面采用天然精料石砌筑，取得了良好的建筑效果，亮化了城市，改善了城市的生态环境。本次治理河段护岸叠墙已经过 5 a 多的运行检验，叠墙结构变形微小，整体结构安全稳定。

（下转第 43 页）

表 2 天然地基平板载荷试验承载力检测结果					
点号	地基土岩性	最终荷载/ kPa	累计沉降/ mm	承载力特征值/kPa	变形模量 计算值/MPa
P1	砂卵石	500	21.49	250	17.81
P2	粉质黏土	500	25.88	250	17.21
P3	粉质黏土	500	60.12	181	10.50
P4	砂卵石	500	39.06	250	14.69
P5	砂卵石	500	27.74	250	21.88
P6	砂卵石	500	31.06	250	39.16
P7	粉质黏土	500	46.66	233	16.45
P8	粉质黏土	500	47.34	199	11.47

值分别为 181 kPa ,233 kPa ,199 kPa ,不满足设计要求 ,累计沉降介于 46.66 ~ 60.12 mm ,变形模量计算值介于 10.50 ~ 16.45 MPa 之间。

为解决 P3 ,P7 ,P8 这 3 个点承载力不足、沉降较大的问题 ,采用土工筋带加筋垫层进行地基处理。基坑挖至 - 8.1 m ,对已扰动的粉土、粉质黏土部位插入片石再铺填砂卵石 ,砂卵垫层厚 600 mm。碾压垫层后铺设 1 层土工筋带。土工筋带采用聚烯烃复合加筋带 ,简称 TG 土工筋带 ,选用高强度玻纤为骨架 ,外覆抗老化耐酸碱聚烯烃化工材料复合而成 ,其破断拉力大于或等于 18 kN ,极限抗拉强度为 140 MPa ,破断伸长率小于或等于 2.0% ,摩擦因数大于或等于 0.5。土工筋带尺寸为 50 mm × 2.5 mm ,编织网格尺寸为 250 mm × 250 mm。

加筋垫层碾压后 ,压实系数达到 0.97 ,为验证加筋垫层对粉土、粉质黏土的处理效果 ,在粉土、粉质黏土分布的部位做 4 个点平板载荷试验。各检测点承载力特征值见表 3。由表 3 可知 ,采用砂卵石加筋垫层处理后 ,地基承载力特征值均等于 250 kPa ,满足设计要求 ,累计沉降为 9.82 ~ 16.91 mm ,变形模量计算值为 15.98 ~ 21.7 MPa。

表 3 地基处理后地基平板载荷试验承载力检测结果				
点号	最终荷载/ kPa	累计沉降/ mm	承载力特征值/kPa	变形模量 计算值/MPa
Q1	500	11.71	250	18.29
Q2	500	9.82	250	21.70
Q3	500	12.22	250	17.61
Q4	500	16.91	250	15.98

注 地基处理后 Q1 Q2 Q3 Q4 的地基土岩性为砂卵石加筋垫层。

4 加筋土垫层处理前后的对比

采用加筋土垫层处理后 ,天然地基中的粉土、粉质黏土较软弱土体承载力和变形模量得到很大提高 ,完全满足设计要求。沉降量趋于均匀(9.82 ~ 16.91 mm)。

本建筑为梁板式基础 ,筏板厚 1.3 m ,主体施工过程中对建筑物进行沉降观测 ,共设 8 个沉降观测点(4 角各 1 个点 ,中间 4 个点) ,一层封顶时进行首次观测 ,以后每施工 1 层观测 1 次 ,1 ~ 8 号观测点累

计沉降量分别为 9.0 mm ,9.0 mm ,8.0 mm ,8.0 mm ,9.0 mm ,8.0 mm ,8.0 mm ,8.0 mm。由此可以看出 ,主体封顶后的沉降量仅 8.0 ~ 9.0 mm ,且很均匀。

5 结 语

本工程采用加筋土垫层处理不均匀地基取得了良好的效果 ,降低了基坑开挖的难度 ,缩短了工期 ,同时也降低了工程造价。

参考文献 :

[1] 张孟喜 ,孙钧 .土工合成材料加筋土应变软化特性及弹塑性分析[J].土木工程学报 ,2000 ,33(3) :104-107.
[2] 吴景海 ,王德群 .土工合成材料加筋的试验研究[J].土木工程学报 ,2002 ,35(6) :93- 99.
(收稿日期 2011-09-15 编辑 骆超)

(上接第 41 页)

6 结 语

- a. 加筋土叠墙结构物的整体稳定的关键技术问题之一是确保叠墙加筋体设计压实密度要求 ,尤其是下级墙加筋土体的压实度 ;有水位骤降工况的加筋土叠墙 ,其筋材设计长度一般由外部稳定条件控制 ;上、下级挡墙基础埋深应满足河道稳定冲刷深度及抗冻胀稳定要求。
- b. 土工格栅加筋土叠墙结构经济耐久 ,其抗冻害性能优良 ,适宜在严寒区域河岸整治工程中应用。
- c. 土工格栅加筋土叠墙方案有效地解决了刚性料石护面与加筋土体变形相容的问题 ,极大地提高了加筋土叠墙结构的整体性 ,因而建筑物整体的抗震性能良好。
- d. 耐久性要求较高的加筋土叠墙结构的加筋材料应优先采用强度高、小应变、低蠕变、抗老化性能可靠的 HDPE 土工格栅 ,加筋墙面宜采用包裹、反滤的结构形式 ,应考虑 2° ~ 6° 的墙面倾斜度。

参考文献 :

[1] 王钊 .国外土工合成材料的应用研究[M]. 香港 :现代知识出版社 ,2002.
[2] 毛昶熙 .渗流计算分析与控制[M].2 版 .北京 :中国水利水电出版社 ,2003.
[3] 武汉水利电力学院 .水力计算手册[M]. 北京 :水利出版社 ,1980.
[4] GB 50290—1998 土工合成材料应用技术规范[S].
[5] 岳景哲 .新型加筋土挡墙结构设计与探索[J].水利规划与设计 ,2010(5) :72-75.
[6] 刘宗耀 ,杨灿文 ,王正宏 ,等 .土工合成材料工程应用手册[M].2 版 .北京 :中国建筑工业出版社 ,2000.
(收稿日期 2011-09-06 编辑 骆超)