

# 基于浦东机场 3# 围堤施工实践 探讨混凝土替代块石的可行性

张志华

(上海汀滢环保科技有限公司, 上海 201707)

**摘要:** 文章详细介绍浦东机场 3# 围区外侧护坡垫层中“混凝土替代部分块石”方案创新与实践过程, 分析创新方案的实践效果, 基于此实践, 探讨水利水运工程中混凝土替代块石(简称“替代方案”)的可行性。

**关键词:** 护坡; 灌砌块石; 波浪爬高; 材料重度

**中图分类号:** U655   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1006—7973 (2022) 01—0070—05

上世纪五十年代以后, 在“就地取材”方针指引下, 灌砌块石施工工艺应运而生; 在水利水运工程建设中采用灌砌石工艺使用大量地方材料(特别是石材), 为节省大量建设投资, 为我国水利水运工程高速发展奠定良好基础。

但是, 长期开采石料造成水土流失, 周边农地无法耕种, 破坏了当地生态环境, 严重影响人民生活。这

种情况在 2010 年左右已引起国家有关部门的高度重视, 国家出台了“矿山石料开采许可证”政策。

随着国家对石料开采实行严格控制和管理, 导致水利水运工程建设所需块石供应量难以保障; 其次, 由于新鲜花岗岩等坚硬岩石的开采难度大、加工费时费工, 而石灰岩、风化岩等岩性偏弱岩石相对易于开采、费用降低, 导致水利水运工程石料供应质量下降; 再次, 由

真教学系统的操作和使用方法, 并灵活运用于仿真操作的熟练度也不同。虚拟仿真系统可线上操作, 学生的操作环境并不是统一授课的教室, 不同的环境导致学生在实验过程中的专注度不同。所以, 现阶段需要完善的是: 软件和系统的帮助文档, 并在软件中加入计时、提醒等功能, 提高学生在虚拟仿真实验教学平台上的实验效率和专注度。

## 5 结语

轮机虚拟仿真实验辅助现场实操通过虚实结合, 弥补了传统实验教学中的短板, 激发了学生对轮机综合类实验的热情, 提高了学习效率和教学质量。降低了轮机综合类实验现场实操的实验成本和安全隐患。

随着新一轮科技革命和产业变革的不断深化, 为培养更加适应未新技术和新产业发展符合工程教育认证标准的创新型工程技术人才和航海类专业人才, 应进一步完善轮机虚拟仿真实验教学系统, 提高学生的工程能力, 以响应国家建设世界一流教育强国的战略需求。

参考文献:

[1] 任燕, 习智华, 邢建伟, 徐成书. 基于工程教育专业认证的染整工艺实验教学改革创新[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(02): 186-189.

[2] 教育部 工业和信息化部 中国工程院关于加强建设发展新工科实施卓越工程师教育培养计划 2.0 的意见[J]. 中华人民共和国教育部公报, 2018(10): 13-15.

[3] 赵旭, 黄瑞, 冯茹梅. 工程教育认证背景下工科专业人才培养体系改革的研究与实践——以大连海事大学交通运输专业为例[J]. 航海教育研究, 2020, 37(03): 66-72.

[4] 国家级五大“金课”首次一并亮相[J]. 中国电力教育, 2020(11): 6.

[5] 刘革平, 王星. 虚拟现实重塑在线教育: 学习资源、教学组织与系统平台[J]. 中国电化教育, 2020(11): 87-96.

**基金项目:** 辽宁省教育科学“十三五”规划 2020 年度立项课题“辽宁省智能船舶航海类专业人才培养研究”(JG20DB057); 华中科技大学实验技术研究项目“船用电机降压启动控制虚拟仿真实验”(2021ch01); 大连海事大学教改项目“线上线下混合式学习教学设计的实施与实践工作坊”(JF2020Y13)。

于砌石砌筑需要有熟练技术工人，且需承担繁重体力劳动，目前，能够胜任此工作的中青年劳力数量急剧下降，呈现后续无人趋势；另外，砌石砌筑工艺无法高度机械化，人工耗用较多，由于人工费快速增长，使得砌石砌筑单方造价接近或甚至高于混凝土价格。

而混凝土具有对石材质量（可利用石材下角料）要求低、可塑性好、作业适合机械化、施工速度快等特点。自上世纪末，水利水运工程建设中利用“混凝土代替部分块石或全部块石”愿望十分强烈。“浦东机场 3# 围区工程外侧灌砌石护坡垫层利用混凝土替代部分块石”创新方案就是在此情况产生并付诸实践的。

## 1 浦东机场 3# 围区工程概况

### 1.1 工程位置、范围及主要内容

浦东机场 3# 围区工程是为浦东机场第五跑道建设而立项新建的，是 2011 年上海市重点工程。工程位于浦东新区中部海塘岸段及上下游滩涂水域，北起浦东机场江镇河泵闸，南至浦东机场薛家泓泵闸。工程主要内容新建围堤 13.736km，并将围区内 2 万亩滩面吹填至 3.50m 高程。工程平面布置详见图 1。



图 1 工程平面布置图

### 1.2 外侧护坡护面结构设计

3# 围区堤身外侧为复式坡面，上下级坡度一致，中部设置消浪平台。外坡护面结构包括 60cm 厚抛石护滩；C20 埋石混凝土护脚；C20 灌砌块石护坡垫层及垫层外 2t 消浪异形块体，C20 埋石混凝土消浪平台，外侧护面结构形式详见图 2。

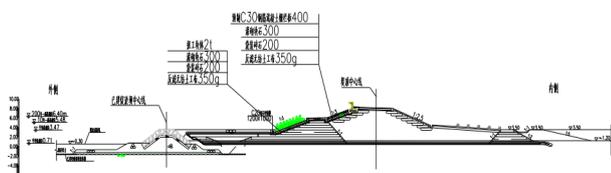


图 2 外侧护坡结构图

### 1.3 外侧护坡结构主要工程量

铺设无纺布约 15.0 万  $m^2$ ，袋装碎石约 3.0 万  $m^3$ ；

灌砌块石约 4.5 万  $m^3$ （灌砌石设计孔隙率 40%，混凝土理论用量约 1.8 万  $m^3$ ），块体 89000 块。

### 1.4 外侧护坡结构计划施工时间

截止 2011 年 2 月底，3# 围区堤身土方施工到位；计划施工准备 10 天，3 月 10 日开始外侧护坡（度汛）结构施工，2011 年 6 月 30 日主汛期来临之前结束。

## 2 “混凝土替代块石”方案实践

### 2.1 设计及《标准》对块石质量要求

（1）设计要求：块石应新鲜、质地坚硬、无风化、无裂隙，单体重量不小于 30kg。

（2）《标准》要求：上海市工程建设规范《水利工程施工质量检验与评定标准》（DG-TJ08-2008）规定，块石质量应符合设计要求，最小尺寸不小于 20cm。

### 2.2 块石供应现状

上海地区用块石主要来源地是浙江省舟山地区，由于受生态环境保护、石料开采许可证等政策影响，2011 年矿山关停过半，上海地区块石供应量远远满足不了工程建设需要；进场块石质量参差不齐，大的重达数吨需要人工解石方可使用，而小的重量不足 10kg 作为废渣抛弃，块石质量不满足设计及《标准》要求。

3 月 10 日至 4 月底结构施工 40 天，时间超过计划工期 1/3，但施工任务完成不足 1/5，实际进度远滞后于计划进度。

### 2.3 混凝土替代部分块石想法的提出与确定

由于外坡结构前期施工进度严重滞后计划，再不改变现状，6 月 30 日外去上结构将无法完成，7 月份台风来临，土质大堤存在被风浪冲毁的风险。

参建单位为解决困境，提出修改外坡垫层设计方案想法，初拟三种修改方案：一是将护坡垫层灌砌石修改成混凝土；二是将护坡垫层灌砌块石修改成埋石混凝土；三是修改《标准》中“灌砌石施工质量检验与评定标准”，放宽块石最小尺寸、单体重量、砌石缝宽规定，提高进场块石利用率、提高混凝土使用量，进而加快施工进度。前两种方案因结构形式发生变化及斜坡上浇筑商品混凝土难以成型等原因被否决。

2011 年 5 月 5 日，围绕外侧护坡护面垫层（灌砌块石）设计技术要求调整，项目建设单位组织参建单位，邀请项目主管部门参加召开专题会。设计单位首先介绍了灌砌块石有关设计要求需调整的原因和调整后方案，以及调整后功能、质量、施工等方面理论分析，同时，

对照现行《标准》进行符合性分析；与会人员充分讨论后形成共识：结合施工实际，放宽块石尺寸及重量要求，增大块石缝宽，最大缝宽控制在30cm以内（三角缝不作限制），这就是浦东机场3#围区的“混凝土代替护坡垫层部分块石”替代方案。

## 2.4 替代方案实施

### 2.4.1 实施过程

5月5日替代方案确定后，总包方方案质量标准大量采购块石，由于降低“块石质量”，块石供应量很快得到保障；施工班组及时调整施工力量，增加工作面，由于砌石缝宽增大，灌砌块石工效明显提高，施工速度较前期加快近30%。经过项目全体人员的共同努力，6月29日外坡（度汛）结构施工结束。

### 2.4.2 实施要点

（1）由于外坡存在坡度，块石摆砌大面朝下以保证块石稳定、减少悬空石或刀口石数量，方便混凝土灌注与振捣，进而保证混凝土密实。

（2）混凝土灌注浇筑坚持“由下而上”原则，下部混凝土振捣密实后再浇筑上部混凝土，严禁相反施工；每仓混凝土灌注浇筑在同潮水完成，避免灌砌石混凝土内部产生施工缝，影响护坡垫层整体性。

（3）由于砌石缝宽增大，混凝土浇筑过程中易下溜（流），可临时采用片石支撑于两块石之间，一是阻止混凝土下溜，二是保证混凝土浇筑过程中块石的稳定；另外，减小混凝土塌落度降低其流动性，进而减少混凝土下溜机率。

（4）混凝土振捣结束，应及时整理块石高低及缝宽，保证垫层面平整及缝宽均匀，原浆勾缝并清洁表面。

## 2.5 替代方案实施效果分析

（1）进度分析。2011年6月29日外坡（度汛）结构施工结束，较原计划提前一天；7月1日，工程经历了2011年第一场台风的洗礼，大堤平安度过。

（2）质量分析。外坡（度汛）结构验收前，质量监督单位委托第三方对外坡垫层施工质量取芯检测，结果显示，垫层厚度、混凝土密实度与强度均满足设计及《标准》要求。

（3）经济分析。据项目部统计，外坡垫层混凝土实际用量约2.34万 $m^3$ ，较理论量增加5400 $m^3$ （块石用量减少5400 $m^3$ ），混凝土增加30%；反向推算，垫层砌石孔隙率52%，较设计孔隙率增大12%；增加缝宽导致混凝土增加约0.12 $m^3$ /灌砌石 $m^3$ ，垫层混凝土表面

积增加（块石面积减少）约为总面积13.3%。按时价结合工效（块石135元/ $m^3$ 、混凝土300元/ $m^3$ 、人工150元/ $m^3$ ，人工节省30%）比较替代前后方案的施工成本，替代方案较前方案节省约26.2元/ $m^3$ 。

（4）缺点分析。由于块石单体重量减小砌石缝宽增大，块石表面积减少，垫层“天然属性”及观感质量有所降低；但是，异形块体安装后，上述缺点将随之消失。

## 3 混凝土替代块石的可行性分析

### 3.1 混凝土替代块石趋势分析

中国高质量发展、生态环境保护等政策的执行愈来愈严格，天然材料（石材、木材）开采量与利用率必将大幅度下降；由于混凝土具备优良施工特性和混凝土研发的新技术新材料迅猛发展，混凝土（包含材质改变的新型混凝土）应用量将逐渐增大，应用范围将更加广泛；水利水运工程结构某些部位利用混凝土替代块石终将是趋势。

### 3.2 混凝土替代块石优劣势分析

混凝土属于人造“石”，与块石相比，有此劣势但优势也明显。

（1）替代劣势。自然属性存在劣势。一是单位面积重量小于坚硬块石；二是混凝土强度远不及块石；三是混凝土耐磨性与耐久性不及块石。混凝土与天然石材相比的天然属性差可以通过新技术新材料来解决。

（2）替代优势。施工属性具备优势。一是能较好地利用料场“下角料”，减少石料资源浪费，促进生态环境保护；二是选用合适新材料能制成改性“混凝土”为工程所用（如铁渣替代粗骨料），三是可以将水利水运工程拆除混凝土破碎再利用节约资源；四是混凝土可塑性好，能制造各类形状，满足个性化需要；五是混凝土作业机械化程度高，施工成本相对较低。

### 3.3 混凝土替代块石对结构功能、性能影响分析

“混凝土替代部分或全部块石”能否在水利水运工程结构实施，其性能对结构设计功能、性能有无影响必须验证。

下面就浦东3#围区工程“混凝土替代部分块石”主要指标“波浪爬高、设计厚度、强度及使用寿命”进行验证。

#### 3.3.1 波浪爬高影响分析

块体安装前，风浪对外坡袭击影响最大，因此，

替代方案的抗风浪影响即波浪爬高验证最为重要。

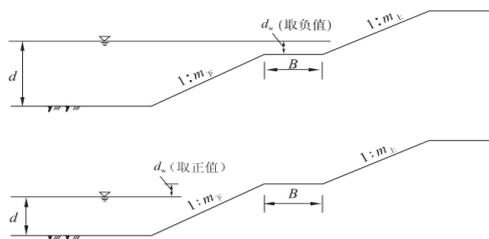


图3 复式斜坡断面示意图

浦东3#围区一二级坡与平台构成复式结构，两级坡坡度一致均为1:3。

(1) 带平台复合斜坡堤波浪爬高，可先确定该断面折算坡度系数  $m_e$ ，再按坡度系数为  $m_e$  单坡断面确定其爬高。折算坡度系数  $m_e$  可按下列公式计算：

当  $\Delta m = (m_{\text{下}} - m_{\text{上}}) = 0$ ，即上下坡度一致时；

$$m_e = m_{\text{上}} (1 - 0.4 * I_{d_w} / L) K_b$$

$$K_b = 1 + 3B/L$$

式中： $m_{\text{下}}$ 、 $m_{\text{上}}$ —分别为平台以下，以上的斜坡坡度；

$d_w$ —平台上的水深 (m)，平台在静水水位以上取正值，以下取负值；

B—平台宽度 (m)；

L—波长 (m)。

注：上述折算坡度法适用于  $m_{\text{上}} = 1.0 \sim 4.0$ ， $m_{\text{下}} = 1.5 \sim 3.0$ ， $I_{d_w} / L = -0.025 \sim +0.025$ ， $0.05 < d_w / L \leq 0.25$ 。

(2) 斜坡式堤正向规则波作用下波浪爬高计算，符合以下条件规定确定：

- ① 波浪正向作用；
- ② 斜坡坡比 1:m 为 1~5，复式坡采用  $m_e$ ；
- ③ 建筑物前水深  $d = (1.5 \sim 5.0)H$ ；
- ④ 建筑物前底坡  $i \leq 1/50$ 。

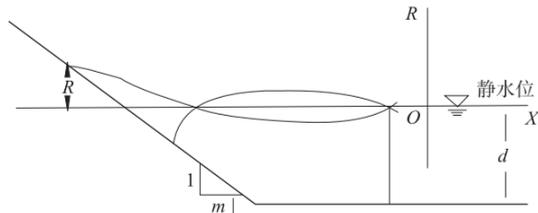


图4 单坡上的波浪爬高示意图

$$R = K_{\Delta} R_1 H$$

$$R_1 = 1.24 \tan(0.432M) + [(R_1)_m - 1.029] R(M)$$

$$M = 1/m (L/H)^{1/2} (\tanh 2\pi d/L)^{-1/2}$$

$$(R_1)_m = 2.49 \tanh 2\pi d/L \left[ (1 + 4\pi d/L) / \sinh(4\pi d/L) \right]$$

$$R(M) = 1.09 M^{3.32} \exp(-1.25M)$$

式中 R—波浪爬高 (m)，从静水位起算，向上为正；

$R_1 - K_{\Delta} = 1$ ， $H = 1\text{m}$  时的波浪爬高 (m)；

$(R_1)_m$ —相应于某一  $d/L$  时的爬高最大值 (m)；

H—波高 (m)；

M—与斜坡坡比 m 值有关的函数；

$R(M)$ —爬高函数；

$K_{\Delta}$ —与斜坡护面结构型式有关的糙渗系数，可下表确定。

表1 斜坡的糙渗系数  $K_{\Delta}$

护面类型	$K_{\Delta}$
混凝土及混凝土板护面	0.9
砌石护面	0.75~0.80

由 (1)、(2) 式来看，替代方案仅改变原方案垫层斜坡的糙渗系数  $K_{\Delta}$ ， $K_{\Delta}$  影响波浪爬高，替代方案造成波浪爬高增高率：

$$N = (0.9 - 0.775) / 0.775 * 100\% * 13.3\% (\text{改变面积}) = 2.1\%$$

项目堤身高度约 6.5m，波浪爬高增加 h 计算如下：

$$h = 6.5 * 2.1\% = 0.014\text{m}$$

波浪袭击最危险时正值堤身土方施工结束期，其时，堤身抛高预留量较大。因此，混凝土替代部分块石后，波浪爬高增加对工程影响甚小。

### 3.3.2 设计厚度影响分析

在波浪作用下，斜坡堤灌砌块石护面厚度 t(m)，当斜坡坡度  $m = 1.5 \sim 5.0$  时，按下式计算。

$$t = K_1 r H (L/H)^{1/2} / (r_b - r) * m^{1/2}$$

式中  $K_1$ —系数，砌石可取 0.225；

$r_b$ —灌砌石的重度， $\text{KN/m}^3$ ；

r—水的重度， $\text{KN/m}^3$ ；

H—计算波高 (m)； $d/L \geq 0.125$  时取  $H_{4\%}$ ； $d/L \leq 0.125$  时取  $H_{13\%}$ ；

( $H_{4\%}$ 、 $H_{13\%}$ —由《滩涂促淤圈围造地工程设计规范》查得)

L—计算波长 (m)；

m—斜坡坡比； $m = \cos \alpha$ ；

$\alpha$ —斜坡坡角 (°)。

从上式来看，替代方案对护坡设计厚度影响因素是护坡结构材料 (即灌砌石) 的重度；素混凝土重度  $23\text{KN/m}^3$ ，块石重度  $25 \sim 27\text{KN/m}^3$ 。原设计灌砌石孔隙率 40%，替代方案灌砌石孔隙率为 52%。

原设计方案灌砌石重度计算：

$$r_{b\text{原}} = 0.60 * 26 + 0.40 * 23 = 24.8\text{KN/m}^3$$

替代方案灌砌石重度计算：

$$r_{b\text{新}} = 0.52 * 26 + 0.48 * 23 = 24.56\text{KN/m}^3$$

其他因素未发生变化,替代方案灌砌石设计厚度与原灌砌石设计厚度比:

$$n=(r_{b,新}-r)/(r_{b,原}-r)=(24.56-9.8)/(24.8-9.8)=98.4\%$$

$$t_{新}=h_{原}/n=305(\text{mm})$$

替代方案灌砌石护坡厚度增加 5mm,增加值远小于《标准》允许偏差值厚度  $\pm 30\text{mm}$  及平整度 30mm 偏差,因此,影响较小可忽略不计。

### 3.3.3 结构强度影响分析

护坡垫层灌砌石结构整体强度取决于结构中混凝土强度,而替代方案未改变混凝土强度,仅仅是结构中两类材料用量发生改变而已;因此,替代方案对护坡垫层结构整体强度几无影响。

反之,项目采取砌石大面潮下,增大缝宽等措施,对混凝土振捣更有利,混凝土内部更密实。综上所述,替代方案提高灌砌石施工质量,整体强度会更好。

### 3.3.4 结构使用寿命影响分析

混凝土结构使用寿命与混凝土强度、密实度关系密切,由 3.3.3 分析可知,结构使用替代方案对寿命未造成影响。

其次,为经济合理,我国水利水运工程永久性建筑物合理使用年限多在 50 年以内,只要混凝土施工质量能严格控制,运营期间能规范维修与保养管理,混凝土使用寿命远超合理使用年限。

因此,替代方案对工程结构使用寿命即耐久性也无影响。

### 3.3.5 结构运行维护影响分析

混凝土的耐磨性差于块石,垫层混凝土表面积增大,将来维修中修理工程量稍微增大,但砌石缝宽增大,将来维修更加方便。

## 3.4 替代方案分析结论

通过上述验证分析,可以得出替代方案对工程使用功能及其运营安全无影响。“浦东机场 3# 围区外侧护坡垫层中混凝土替代部分块石技术”是可行的。

## 3.5 混凝土替代块石方案的引用与发展

### 3.5.1 替代方案的引用

自浦东机场 3# 围区大堤外侧护坡垫层运用替代方案之后,混凝土替代块石已作为创新技术在后来开工的横沙八期工程等类似工程中推荐性(目前仍无标准)引用,均取得良好效果。

### 3.5.2 替代方案的发展

在引用替代方案同时,相关建设人员将其延伸发

展至海堤护脚、平台等部位的灌砌石结构、埋石混凝土结构之中,均达到预期效果。

最近几年,随着石材价格及人工费单价的快速升高,替代方案的经济优势更加明显。

## 4 建议

浦东机场 3# 围区工程“混凝土替代块石”的实践说明,替代方案能节省自然资源,减少对自然环境破坏。为了能把青山石山变成金山银山,更好造福子孙后代,在替代方案运用同时,应深入研究“混凝土替代块石”发展技术,为此,提出如下建议:

(1) 水利水运行业非重大工程有关部位(如河道护坡、护底等)均可推广。

(2) 水利水运工程建设中,根据混凝土替代部位重要性尝试扩大替代范围。

(3) 非关键部位尝试使用再生骨料生产替代混凝土,提高水利水运工程建设中废弃物资源化利用率,取得更好的经济效益与社会效益。

(4) 水利水运行业应加强高分子胶凝材料、新型骨料(比如铁渣)的研究与使用,以更新更环保的合成材料来替代水利水运中的天然材料。

## 5 结论

浦东机场 3# 围区大堤外坡工程自 2011 年 6 月建成运行至今十余年,经历 2012 年“海葵”、2014 年“凤凰”、2019 年“利奇马”及 2021 年“烟花”等超强台风的袭击,但是,工程至今未发生任何变形与损坏,结构依然完好,为浦东机场第五跑道建设运营提供了安全屏障。由此可见,水利水运工程某些部位“混凝土替代块石”是可行的,应该继续深入研究与推广。

### 参考文献:

- [1]《港口工程结构可靠性设计统一标准》GB50158.
- [2]《水利建设项目经济评价规范》.
- [3]《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》.
- [4]上海市工程建设规范《滩涂促淤围造地工程设计规范》(DG/TJ08-2111-2012).
- [5]《建筑固体废弃物资源化利用及可行性技术》,姜健,蒋承杰,蒋学.
- [6]《建筑施工生产生活废水回收处理和再利用技术与经济分析》,鄢海城.
- [7]《工程施工废弃物再生利用技术规范》GB/T50743-2012.