深水裸露爆破挤淤填石工艺在董家口港引堤工程中的应用

郑允磊[1]，谭剑波[2]
（1. 中交第一航务工程局有限公司，天津 300461；
2. 中交一航局第二工程有限公司，山东 青岛 266071）

摘 要：在董家口港引堤工程爆破挤淤填石施工中，为有效提高施工效率，考虑采用水下裸露爆破工艺替代传统水下钻孔爆破工艺。依据规范和设计要求，并结合工程实际情况设计爆破参数，采用自制机具实施水下裸露爆破。经过探地雷达法、钻孔探摸法等检测验证，堤身达到设计要求落底深度和宽度，表明水下裸露爆破在爆破挤淤填石施工中是可行的。水下裸露爆破挤淤填石的成功实施，较大地提高了施工效率，保证了工期，并一定程度上降低了爆破成本，建议在后续同类工程中推广应用。

关键词：裸露爆破；挤淤填石；参数；检测
中图分类号：U655.52 **文献标志码**：B **文章编号**：2095-7874(2020)06-0055-04
doi:10.7640/zggwjs202006013

Application of deep-water exposed blasting and silt squeezing-stone filling technology in Dongjiakou Port causeway project

ZHENG Yun-lei[1], TAN Jian-bo[2]
(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;
2. No.2 Engineering Company Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: In the exposed blasting and silt squeezing-stone filling construction of Dongjiakou Port causeway project, in order to effectively improve the construction efficiency, it is considered to replace the traditional underwater drilling and blasting technology with underwater exposed blasting technology. According to the standard and design requirements, and combined with the actual situation of the project, the blasting parameters were designed, and a self-made equipment was used to implement underwater exposed blasting. After the detection and verification of GPR method and drilling exploration method, the bottom depth and width of the levee meet the design requirement, which shows the underwater exposed blasting is feasible in the blasting and silt squeezing-stone filling construction. The successful implementation of underwater exposed blasting and silt squeezing-stone filling technology has greatly improved the construction efficiency, ensured the construction period, and reduced the blasting cost to a certain extent. It is recommended to popularize and apply it in subsequent similar projects.

Key words: exposed blasting; squeeze silt and fill stone; parameter; detection

0 引言

青岛港引堤工程全长 2 408 m，根据各里程段不同的地质条件，选择不同的基础处理工艺，其中 K0+650 m—K2+100 m 里程段淤泥厚度为 5~8.8 m，介于 4~25 m 之间，宜采用爆破挤淤填石进行软基处理[1]。由于本工程工期较紧，对爆破挤淤施工效率要求较高，而常规的水下钻孔布药爆破工艺操作流程较繁琐，爆破准备时间长，并受堤身施工通道窄、堤头水流条件复杂等条件制约。

综合考虑上述工程特点和难点，采用水下裸露爆破挤淤填石。利用本工程爆破挤淤施工段淤泥厚度较小，水深较大的地质条件，直接在水下泥面裸露布药，大大简化爆破挤淤施工工艺，提

收稿日期：2019-08-16 修回日期：2019-11-12
作者简介：郑允磊（1987— ），男，山东日照人，工程师，港口航道与海岸工程专业。E-mail：529062613@qq.com

高施工效率，确保工程进度。因裸露爆破挤淤填石的机理、装药工艺、施工参数及施工组织都不同于以往的爆破挤淤施工，故在施工中如何对布药工艺、爆炸参数、施工组织管理进行严格的设计，确保引堤堤身落底深度和宽度，是本工程爆破挤淤成败的关键。

1 裸露爆破可行性

本工程爆破挤淤施工段淤泥砂石含量极少，孔隙比 1.6~1.7，含水率 60%左右，属于常规性淤泥，爆破难度较低；泥厚 5~8.8 m，淤泥层较浅，于高潮水位爆破时，水深 11~16 m[2]。引堤爆前堤头抛填顶标高为+6 m、底标高为−10 m 左右，堤身高，势能大，爆炸使淤泥受到强烈扰动，强度大大降低，堤头石料瞬时塌落，能挤出更多的淤泥。

由爆炸压力挤掉大部分淤泥，由石料塌落挤掉剩余部分淤泥，在达到设计及规范要求的同时大大提高了爆破效率，保证了工期。

爆破参数设计时，将原泥面以上部分海水视为同等重量不同厚度的淤泥，例如 12 m 海水可视为 7.5 m 厚淤泥，或 6.25 m 厚淤泥加 2 m 海水，或 5 m 厚淤泥加 4 m 海水等等(将淤泥与海水的重度比取为 1.6∶1)，从这个意义上来讲深水浅层淤泥水下裸露爆破可等效的视为浅水深厚淤泥水下钻孔爆破。

举例说明：爆破处理泥厚为 6 m，水深为 12 m。

1）假定将泥面以上部分海水视为同等重量不同厚度的淤泥后，若覆盖水深 $H_w<2$，药包埋深 h 应满足以下条件：

$h=(h+6)\times0.5$；$12-1.6h<2$；求得 h 不存在。

2）假定将泥面以上部分海水视为同等重量不同厚度的淤泥后，若覆盖水深 $2\leqslant H_w\leqslant4$，药包埋深 h 应满足以下条件[3]：

$h=(h+6)\times0.45$；$2\leqslant12-1.6h\leqslant4$；求得 h 不存在。

3）假定将泥面以上部分海水视为同等重量不同厚度的淤泥后，若覆盖水深 $H_w>4$，海水折算淤泥厚度为 7.5 m；

药包埋深 h = 7.425 m；

即药包位于原泥面上 0.075 m 处，因此把药包搁置于泥面上，将深水浅层淤泥水下裸露爆破等效视为浅水深厚淤泥水下钻孔爆破。

2 爆破挤淤填石原理

基于上节的理论支持，深水浅层裸露爆破挤淤原理与常规钻孔埋入爆破挤淤原理基本相同：先对堤身实施陆路抛填，当达到爆填进尺时，开始爆填作业。将药包放置于堤身前方泥石结合点外一定距离内的泥面之上，采用导爆索传爆网络，陆上起爆。爆炸动能将淤泥排开，形成爆坑，同时爆炸使淤泥受到强烈扰动，强度大大降低，堤头石料在瞬时内塌落，并沿淤泥强度小的方向滑移。经过爆炸和振动，石料落到持力层上，完成了石料对淤泥的置换。重复进行上述的“抛填—爆炸”循环施工作业直至达到设计要求。在施工过程中，用体积平衡法估算石方落底情况，并分别用探地雷达法和及钻孔探摸法进行检测。原理示意图见图 1。

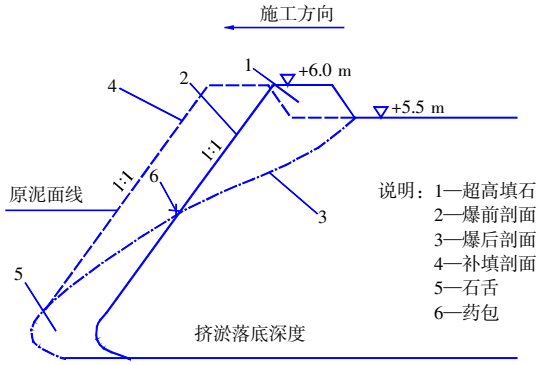


图 1 原理示意图

Fig. 1 Principle diagram

3 工艺流程及施工要点

3.1 工艺流程

工艺流程图[4]见图 2。

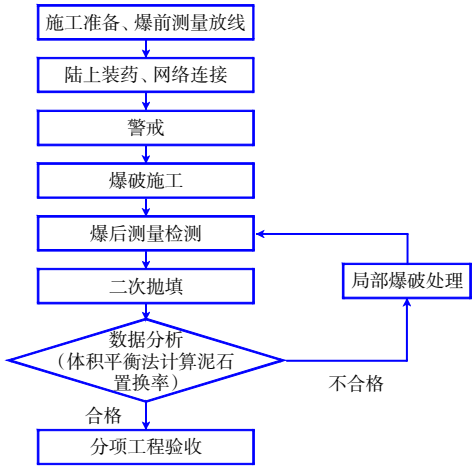


图 2 工艺流程图

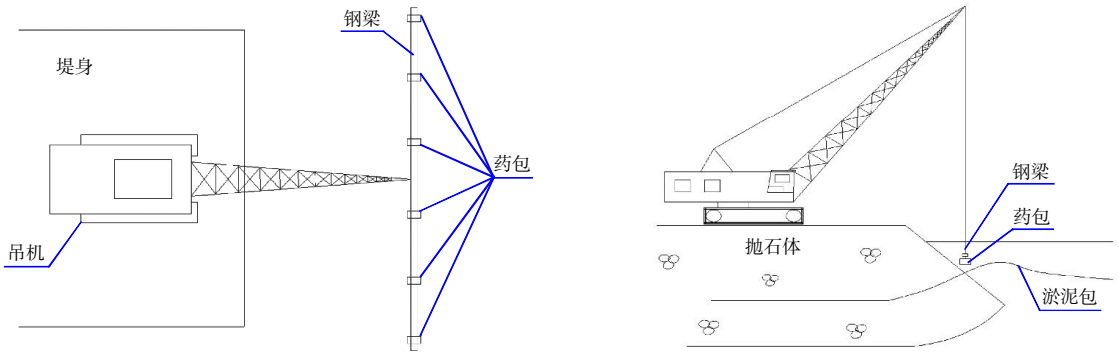
Fig. 2 Process flow diagram

3.2 施工要点

本工程爆破挤淤施工要点是布药。施工中采

用陆上机械实施水下布药，装药机具主要由 1 台履带吊、1 根钢梁、1 卷细长钢丝、若干插销组成。经计算，在 2.5 t 吊重下，50 t 履带吊最大臂展为 26 m，能满足布药点最大距离要求。

布药时先将浮漂(矿泉水瓶或泡沫)和药包用铁丝圆环系绑，穿于插销上，再将插销插入钢梁的预留插销孔上(预留插销孔间距按药包放置间距排列)，通过细长钢丝绳将插销串联在一起，然后履带吊车行至指定位置，提升钢梁旋转吊臂使钢梁位于药包布设位置正上方，后下发钢梁至原泥面由技术工拉动串联插销的钢丝绳，使插销与钢梁分离，浮漂上浮以确定药包脱落。提起钢梁进行下一循环作业，布药时间一般选取在涨潮及高平潮阶段，避免在落潮时潮水对堤心石的牵动作用使堤头石料滑动下陷，以保证布药作业的安全。布药示意图见图 3。



(a) 平面布置图　　(b) 立面布置图

图 3　布药示意图

Fig. 3　Schematic diagram of drug distribution

4　施工参数的确定

按照规范要求，综合考虑各种影响爆破效果的可能因素，通过典型施工，对深水浅层淤泥水下裸露爆破挤淤施工工艺的参数进行设计、确认。

4.1　抛填参数

堤心石推填顶标高为+5.5 m，为增加堤头抛石体动力惯性，使堤头抛石体在爆炸荷载的作用下沉降加大，堤头采取超高抛填，施工时按高程+6.0 m 控制。

进尺 L_H(堤头一次抛填推进的水平距离)：H_m 为 4~10 m 时，L_H 取 5~6 m。

抛填宽度：指堤头抛填的顶部宽度，为 13 m。

4.2　药包间距、个数

根据施工经验取药包间距：$a=4$ m；布药长度取为 L_L=20 m。

药包个数：$m=L_L/a+1$=6 个。

4.3　一次爆破排淤填石药量计算

$$Q=q_L' L_L$$

$$q_L'=q_0 L_H H_{mw}$$

式中：Q 为一次爆破排淤填石药量，kg；q_L'为线布药量，kg/m，即单位布药长度上分布的药量，炸药为 2 号岩石硝铵炸药；q_0 为炸药单耗，kg/m^3，即爆除单位体积淤泥所需的药量，由图纸和查表取值为 0.45 kg/m^3；L_H 为爆破排淤填石一次推进的水平距离，m，取 6 m；H_{mw} 为计入覆盖水深的折算淤泥厚度，m，$H_{mw}=H_m+(r_w/r_m)H_w$；H_m 为置换淤泥厚度，m，由图纸取值为 5.8 m；r_w 为水重度，kN/m^3，经查询取值为 10.3 kN/m^3；r_m 为淤泥重度，kN/m^3，该层土质为淤泥质黏土，由图纸取值为 17 kN/m^3；H_w 为覆盖水深，m，即泥面以上的水深，由平均潮位+2.83 m 和平均泥面顶标高−7.7 m 取值为 10.53 m；H_{mw}=12.18 m；L_L 为爆破排淤填石的一次布药线长度，m，取 L_L=20 m。

根据计算和经验取值：一次爆破排淤填石药量 Q=658 kg。

每个药包的药量 $Q_1=Q/m$=110 kg。

4.4　堤外侧爆夯参数

堤身侧爆按爆破夯实进行设计，根据现场实际情况堤身坡脚处标高平均超出设计标高 2 m，即爆破夯实后石层顶面平均沉降量 ΔH 为 2 m。

布药位置距堤轴线 28~30 m(距离堤侧底脚线 3 m 左右)，平行于堤轴线一字布药，药包直接放在水下坡脚石面上。

$$q_2=q_0'\cdot a\cdot b\cdot H\cdot\eta/n$$

$$\eta=\Delta H/H\times 100\%$$

式中：q_0'为爆破夯实单耗，指爆破压缩单位体积

石体所需要的药量，kg/m³，取 5 kg/m³；a、b 为药包间距、排距，根据施工经验及典型施工取 a = 3 m，b=2 m；ΔH 为爆破夯实后石层顶面平均沉降量，ΔH = 2 m；H 为爆破夯实前石层平均厚度；η 为夯实率；n 为爆破夯实遍数，取 n=2。

由公式计算得出单药包重量 q_2=30 kg；每炮药包数量为 30~60 个。

防波堤外侧爆夯火工品用量约为：乳化炸药 20 t，导爆索 1 万 m，雷管 30 发。

5 质量检测结果

按设计要求，本工程选用了探地雷达法、钻孔探摸法及沉降观测方法来检验裸露爆破挤淤填石施工效果[5]。

5.1 探地雷达法检测

通过弹性波在堤心石中的传播速度测定堤身的落地情况，按规范要求对 K0+750 m、K0+800 m、K0+850 m、K0+900 m 里程点进行了雷达波测试，共完成测试点 4 点。

探地雷达检测结果表明：各测点爆破挤淤后碎石体底界面埋深在 20.79~21.32 m 之间，墩体平均剪切波速度大于 250.0 m/s，堤心石落底深度达到设计要求（19~30 m），而且抛石层底面与下卧层顶面之间衔接良好，未见沙泥层（团）现象，由此可见全堤爆破挤淤施工质量良好[6]，满足设计要求。

5.2 钻孔探摸法检测

在堤顶上钻孔是检验爆破挤淤抛石体落底的最直接有效的方法。依规范要求，每 500 m 一个断面，每断面布置 3 个钻孔。根据钻探取得的成果资料，堤心石回填层厚度为 19.00~22.70 m，平均为 21.09 m，填石置换层底面和下卧地基层顶面之间的混合层厚度最大约 0.9 m，不大于 1 m，堤身落底情况好[7]，满足了设计与规范的要求。

5.3 沉降观测

沉降观测主要针对抛石体下卧土层可能产生的变形，是爆破挤淤检测的一项重要环节。通过对引堤沉降观测资料分析，引堤月累积沉降曲线呈逐渐变缓的趋势，可以判定堤身是稳定的[8]。

6 结语

经过青岛港董家口港区西防波堤施工引堤工程基础处理，在进行水下裸露爆破挤淤施工方面的尝试获得了成功，主要创新点为：

1）改进了施工工艺，各项操作简易化，尤其是水下裸露爆破避免了水上钻孔布药这一环节，提高了工作效率，并在一定程度上降低了爆破成本。

2）采用陆上装药，不需要大型施工机具和船舶，不受风浪、涌浪的影响，具有施工工艺简单、施工速度快、后期沉降小、整体稳定性强等优点。

3）在高潮时进行爆破，既增加了挤淤量，又保证了在布药时的人员机械安全，同时减小了爆破震动对周围环境的影响，降低了淤泥对周围环境的污染。

4）采用探底雷达法对进行爆破挤淤效果进行检测，多方位分析施工结果。

深水浅层水下裸露爆破挤淤填石技术在本工程中的成功应用，表明了采用水下裸露爆破在深水浅层爆破挤淤填石技术上是可行的，施工中所采用的方法和参数基本合理。本工程爆破挤淤的成功实施为今后类似工程施工提供了宝贵经验。

参考文献：

[1] JTS 154-1—2011，防波堤设计与施工规范[S].
JTS 154-1—2011, Code for design and construction of breakwater [S].

[2] JTS 145-2—2013，海港水文规范[S].
JTS 145-2—2013, Code of hydrology for sea harbour[S].

[3] JTS 204—2008，水运工程爆破技术规范[S].
JTS 204—2008, Technical code of blasting for port and waterway engineering[S].

[4] 曹红涛，任宁. 青岛港董家口港区北一突堤东围堰兼西防波堤施工引堤工程施工组织设计[R]. 青岛：中交一航局第二工程有限公司，2009.
CAO Hong-tao, REN Ning. Construction organization design for construction of east cofferdam and west breakwater of north first pier in Dongjiakou Port Area of Qingdao Port[R]. Qingdao: No.2 Engineering Company Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., 2009.

[5] 宋军港. 青岛港董家口港区北一突堤东围堰兼西防波堤施工引堤工程施工图设计[R]. 天津：中交天津港湾工程设计院有限公司，2009.
SONG Jun-gang. Construction drawing design of approach embankment for construction of east cofferdam and west breakwater of north first pier in Dongjiakou Port Area of Qingdao Port[R]. Tianjin: Tianjin Port Engineering Design & Consulting Company Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., 2009.

[6] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京：北京地质出版社，1994.
LI Da-xin.Methods and applications of ground penetrating radar [M]. Beijing: Beijing Geological Press,1994.

[7] JTJ/T 258—1998，爆炸法处理水下地基和基础技术规程[S].
JTJ/T 258—1998, Technical specification for the method of explosive in treating with underwater foundation and base[S].

[8] JTS 257—2008，水运工程质量检验评定标准[S].
JTS 257—2008, Standard for quality inspection of port and waterway engineering construction[S].