

大面积溶洞地质条件下重力式码头结构设计

严晨宇, 姜 婷, 王小平

(中交四航局港湾工程设计院, 广东 广州 510231)

摘要: 喀斯特地貌广泛分布于我国南方地区, 该类地貌区域易形成岩溶地质, 对码头工程的建设十分不利。结合实际工程, 从确保码头主体结构满足安全稳固和正常使用要求角度, 采用单跨梁模型、普式破裂拱法等特殊分析计算方法, 论证了该地质条件下重力式码头工程建设的技术可行性, 并对类似地区工程地质勘察等前期工作提出了一些针对性的建议, 供岩溶地质区域类似工程项目建设时参考。

关键词: 大范围溶洞地质; 重力式码头; 单跨梁模型; 普式破裂拱法

中图分类号: P 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0083-05

Design for gravity quay under condition of extensive range of karsts cave

YAN Chen-yu, JIANG Ting, WANG Xiao-ping

(Engineering Design Institute Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510231, China)

Abstract: The karst areas distribute widely in south China, where karsts caves form easily and the geologic condition is unfavorable for the construction of the wharf. Based on the practical project, we demonstrate the technological feasibility for the construction of gravity quay under this kind of geologic condition by special methods including the single-beam-model and the Protodyakonov's theory, and put forward suggestions for the initial stage work such as geologic survey, which may serve as reference for similar projects.

Key words: extensive range of the karsts cave; gravity quay; single-beam model; Protodyakonov's theory

码头工程地处广东省英德市沙口镇清溪村, 属北江中游, 为喀斯特地貌区, 先后 2 次地质勘探表明工程区域岩溶发育、溶洞密集。

1 工程概况及地质特征

本工程拟建设 7 个 1 000 吨级货船泊位, 码头长 540 m, 连片式布置。根据物探及地质勘察

报告, 溶洞强发育区位于码头中段, 范围约 150 m。码头前沿后 16 m 位置剖面线揭示, 洞顶埋深最浅, 距离设计基床底面仅 3 m 左右。溶洞见洞率为 36%, 工程所在地岩溶发育程度见图 1, 物探剖面见图 2, 地质剖面见图 3, 主要地层物理力学指标见表 1。共完成高密度电法勘探剖面 4 条。

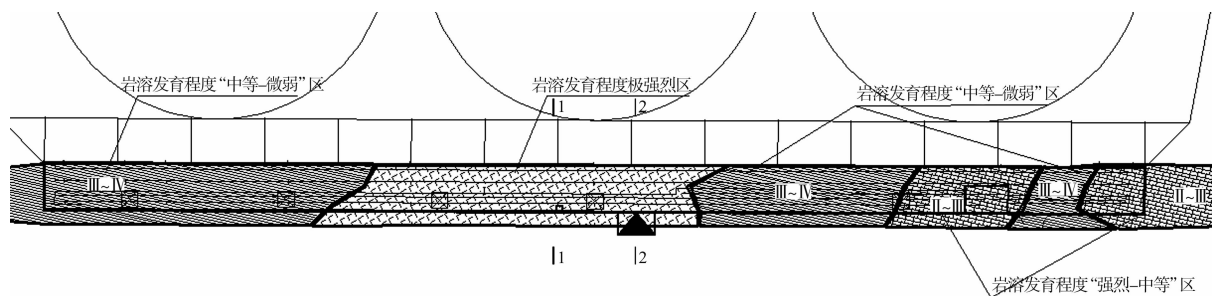


图 1 岩溶发育区分布

收稿日期: 2014-01-12

作者简介: 严晨宇 (1983—), 女, 工程师, 注册土木工程师 (港口航道), 从事港口航道设计工作。

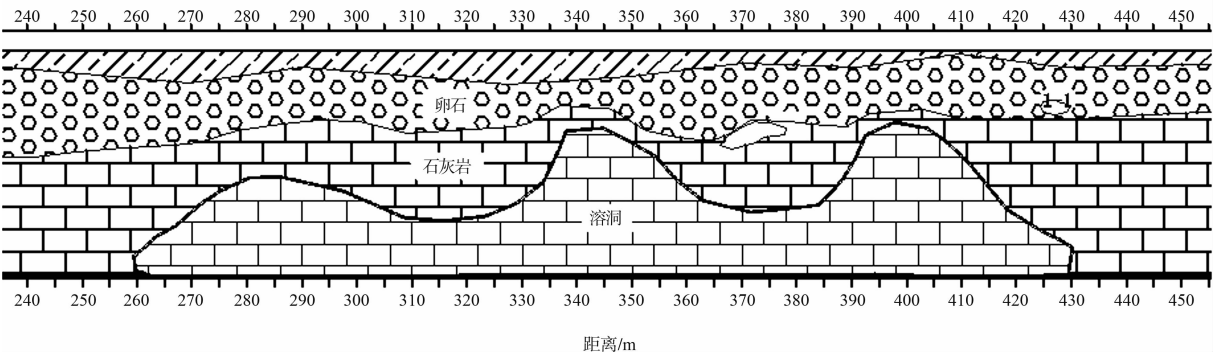


图2 溶洞发育区物探剖面

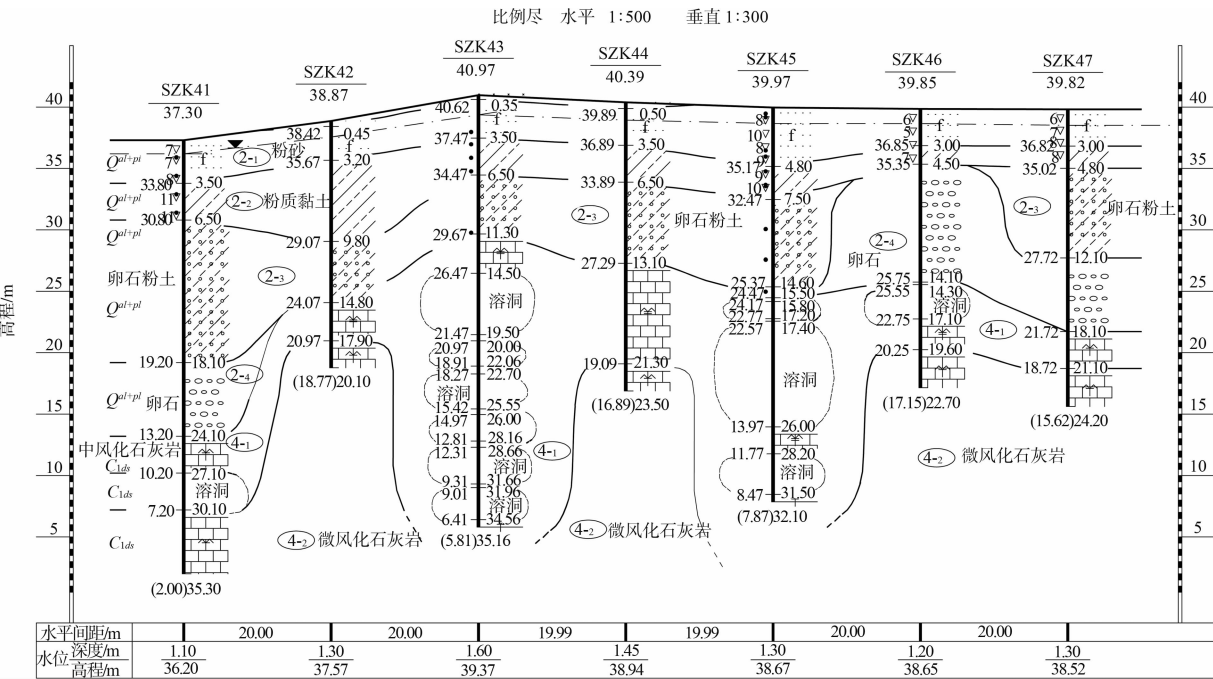


图3 溶洞发育区地质剖面

表1 主要地层物理力学指标

层号	土层名称	状态	容许承载力 f/kPa	天然密度/ (t·m ⁻³)	E _s /MPa	E _o /MPa	凝聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	饱和抗压强度 R _c /MPa
3	粉质黏土	可塑	180	1.8	5.25	21	25.0	13.0	
4 ₋₁	中风化石灰岩	块状	3 000	2.3					
4 ₋₂	微风化石灰岩	柱状	7 000	2.4					35

2 主体结构选型

2.1 主体结构选型

溶洞在重大冲击力作用下会出现塌陷，增加基础施工难度。桩基础遇溶洞需打穿至足够厚度的持力层，或采用灌浆的形式灌满溶洞，因此桩基方案具有明显的不确定性，工程造价不易控制。

本工程溶洞埋深及位置与码头前沿线及底高程有一定距离，可以考虑不破坏溶洞的情况下，减小溶洞顶附加应力至合理范围。重力式结构可通过合适的断面设计或工程措施，有效扩散和降低基底应力。因此，本工程码头主体结构以中风化石灰岩层为地基基础。

2.2 基础与溶洞的安全间距

地质勘察揭示溶洞最小出露深度为 16 m, 采用重力式结构时, 需保证基床与溶洞顶间有一定的安全距离, 这是本工程重力式码头方案中需重点解决的技术难题之一。

2.3 溶洞顶盖安全复核

根据物探报告, 溶洞顶盖可能会出现顶盖埋深较小的情况, 应结合码头主体结构方案对顶盖承载能力进行复核计算, 必要时在结构上采取局部调整构件尺寸等工程措施以减小码头墙体基底应力, 确保溶洞顶盖结构安全, 这是本工程重力式码头方案中需重点解决的另一技术难题。

3 设计方案

3.1 设计思路

为了解决设计方案中存在的技术难题, 需从结构设计入手, 通过一些特殊的甚至是非常规的工程措施, 以实现上述设计理念。基本思路是:

1) 在结构断面设计时, 寻找最佳平面尺度, 减小前趾应力集中, 使地基应力在底板范围内尽量分布均匀并尽量降低应力水平。

2) 尽量减少结构自重或加大结构底宽, 采用密度相对小的箱内填料以减小填料质量, 在确保结构本身整体稳定安全的前提下, 尽量减小基底应力。

3) 复核溶洞顶盖安全厚度。如遇顶盖计算安全厚度大于实际厚度的溶洞, 局部改变结构物底宽, 调整基底应力分配, 降低基底应力水平, 进而尽量减小溶洞顶最小安全厚度计算值, 以满足溶洞顶盖结构性安全需要。

3.2 重力式码头主体结构设计

按照 JTS 141-1—2010 《港口工程荷载规范》^[1] 和 JTS 167—2009 《重力式码头设计与施工规范》^[2] 等相关规范的要求及本工程实际工况条件, 采用不同底宽沉箱方案进行基底应力对比验算, 结果见表 2。

表 2 不同底宽沉箱基底应力计算结果对比

底宽/ m	基床厚度/ m	基床顶应力设计值/ kPa	基床底应力设计值/ kPa
5.0	1.0	362.54	243.09
5.6	1.0	364.09	253.58
6.6	1.0	301.06	223.48
7.6	1.0	294.43	227.60

计算结果显示, 自重为主要控制荷载。当将基础底宽进一步缩小为 5.0 m 时, 结构基床顶面及底面抗倾抗滑均不满足规范要求, 因此, 综合考虑选取底宽 5.6 m 方案。

结构选型: 沉箱长 4 m, 底宽 5.6 m, 高 5.3 m, 前、后趾宽 0.9 m, 单箱质量约 89 t, 箱内回填料为中粗砂, 基床底面最大应力设计值为 253.58 kPa, 小于地质报告提供的溶岩层承载力参考值 350 kPa, 因此, 满足地基承载力规范要求。

3.3 溶洞顶盖安全厚度的试算

根据工程实践, 影响溶洞顶盖稳定的因素主要有顶板的厚度、形状、顶盖的完整性、建筑物跨过溶洞的长度等, 其中以顶盖水平力最为不利。理论计算中, 按顶盖岩体的完整性划分, 分为较完整的岩体和破碎岩体, 其中较完整的岩体可采用单跨梁模型和梁板模型计算, 破碎岩体可选用普式破裂拱法计算^[3-4]。项目溶洞顶盖岩石破碎程度尚未完全探明, 需明确洞体的顶盖厚度较小, 因此根据岩体的完整性, 选择单跨梁模型、普式破裂法分别进行计算。采用物探绘制的两个最不利的洞体断面 (图 4), 进行洞顶安全厚度 D 的验算。

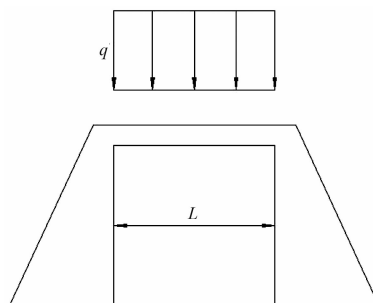


图 4 单跨梁模型计算简图

1) 单跨梁模型选用公式。

$$D \geq \sqrt{\frac{6 \text{ km}}{[\sigma]}} , M = \alpha q L^2 \tag{1}$$

$$D \geq \sqrt{\frac{4 K Q}{[s]}} , Q = \beta q L \tag{2}$$

式中： M 、 Q 为最大弯矩（ $\text{kN}\cdot\text{m}$ ）和剪力（ kN ）； K 为安全系数，取 1.5； α 、 β 为最大弯矩和剪力系数，当顶板为简支梁时， $\alpha = 1/8$ ， $\beta = 1/2$ ； q 为包括顶板、上覆土体自重和外载等（ kN/m ）； L 为洞跨（ m ）； $[\sigma]$ 和 $[s]$ 为岩体计算抗弯、抗剪强度（ MPa ）。

2) 普式破裂拱法。

按破裂拱概念估算出破裂拱高度 D ，将计算高度附加适当的安全系数，作为设计顶盖安全厚度。

$$D = K \cdot \frac{\alpha + H_0 \tan(45^\circ - \varphi/2)}{f} \tag{3}$$

式中： H_0 为溶洞高度（ m ）； K 为安全系数，取 1； α 为溶洞宽度之半（ m ）； φ 为内摩擦角（ $^\circ$ ）； f 为岩体坚固系数（ MPa ）， $f = R_c/10$ ， $R_c = 35 \text{ MPa}$ 。

根据地质报告绘制的两个最浅洞体典型断面（图 5），计算溶洞顶盖安全厚度，对实际施工提供安全性进行评价。计算溶洞顶盖实际厚度大于安全厚度时，为稳定型，反之为失稳型。计算结果见表 3，对应的典型结构断面见图 6。

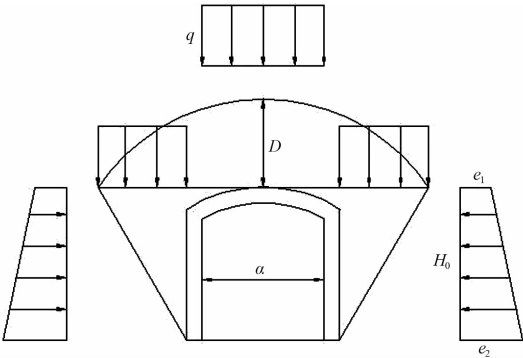


图 5 普式破裂拱法计算简图

表 3 溶洞顶盖安全厚度计算结果对比

计算断面编号	洞跨/m	洞高/m	单跨梁模型计算安全厚度/m	普式破裂法计算安全厚度/m	实际厚度/m	综合稳定性评价
断面 1	10	5.0	2.55	3.14	3.2	稳定型
断面 2	6	0.9	1.04	1.20	1.2	稳定型

可见，以上两类典型的溶洞顶盖结构在码头设计荷载作用下是安全的。

针对本工程岩溶比较发育的特殊地质条件，通过合适的结构选型和断面设计以及开挖断面的控制、基底应力控制等工程措施，确保溶洞顶盖安全厚度、不破坏溶洞结构，码头主体采用重力式沉箱结构是技术可行的，且预制沉箱单体质量较轻，不需要采用大型起重设备，施工简单、质量可控，且结构工程造价较低，在较好地避免了桩基结构诸多不可控因素的同时，实现了建港技术突破、工程经济节省的双重目标。

4 实施中的注意事项

4.1 超前物探

在基槽开挖前对溶洞强发育区进行超前物探，增加横向探测线，充分弄清溶洞面积、形式，如

遇到与地质（包括揭示孔洞位置）不同的情况进行补充钻探，进一步验算顶盖安全性。

