

港珠澳大桥岛隧工程水文地质特征分析

胡长友, 罗俊

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 为了查明港珠澳大桥隧道区的水文地质条件, 根据水文气象资料、水的化学分析、抽水试验、CPTU(测孔压静力触探), 并结合地形地貌、地层情况、土的物理力学性质, 对港珠澳大桥岛隧工程水文地质特征进行分析。分析结果表明: 该场区地表水为海水, 松散岩类孔隙水为弱承压水, 基岩裂隙水与松散岩类孔隙水形成直接水力联系。该区域属于典型的三角洲入海口地带, 其工程水文地质特征具有独特性与代表性, 可以为类似的其它三角洲入海口地带的工程水文地质特征分析提供经验。

关键词: 水的化学分析; 抽水试验; CPTU; 地表水; 地下水

中图分类号: P 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0065-04

Hydro-geological characteristics of HZM bridge tunnel

HU Chang-you, LUO Jun

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: This paper analyzes the hydro-geologic characteristics of HZM bridge tunnel according to the hydrological and meteorological data, chemical analysis of water, pumping test, CPTU, topography, stratigraphy, as well as soil's physical and mechanical properties of the HZM Bridge tunnel area. The result shows that the field of surface water is sea water, the loose stratum pore water is weak-pressure water, and there is a direct hydraulic connection between bedrock fissure water and loose stratum pore water. The region is typical delta estuary zone and its engineering hydrogeological characteristics are unique, so it can supply experience for other similar delta estuary zone engineering.

Key words: chemical analysis of water; pumping test; CPTU; surface water; groundwater

港珠澳大桥岛隧工程是目前世界上在建的最长的沉管隧道, 隧道区位于港珠澳大桥线路中部附近, 属于伶仃洋水域。该区域位于珠江口, 水文地质条件复杂, 为查清该区域水文地质特征, 分析地下水对基础的影响, 采取了收集历史水文气象资料、钻探、对水进行化学分析、抽水试验、CPTU(测孔压静力触探试验)、土工试验等方法。根据上述方法的成果, 对该区域的地表水、地下水的特征进行了分析。

1 基本资料

1.1 历史水文气象资料

场区地表水为海水, 随潮汐而变化, 据2011年内伶仃潮汐表及勘察期间现场观测资料显示, 现场勘察期间海域平均潮差1.75 m, 海域最大潮差2.81 m。

1.2 钻探成果资料

根据野外勘察结果, 场区地层自上而下分别为: ①全新世海相沉积层(Q_4^m), ②晚更新世陆

收稿日期: 2013-05-06

作者简介: 胡长友(1981—), 男, 工程师, 主要从事岩土勘察及室内试验工作。

相沉积层(Q_3^{al+pl})，③晚更新世海陆交互相沉积层(Q_3^{mc})，④晚更新世流相沉积层(Q_3^{al+pl})，⑤震旦纪变质岩(Z)。根据地层情况可将本区地下水划分为松散岩类孔隙承压水和基岩裂隙水。

1.3 水化学分析成果资料

本次勘察进行了海水的室内化学试验，试验成果见表1。

本次化学试验按照以下标准进行：pH值，

表1 海水的室内化学试验结果

取水位置	统计项目	pH	溶解性氧气/($mg \cdot L^{-1}$)	氯化物/($mg \cdot L^{-1}$)	硫酸盐/($g \cdot L^{-1}$)	钙离子/($mg \cdot L^{-1}$)	碱性/($mg \cdot L^{-1}$)	酸性/($mg \cdot L^{-1}$)
海水面处	平均值	8.21	7.92	17 157	1.97	360	116	10
	最大值	8.22	8.03	17 599	1.98	372	117	12
	最小值	8.20	7.76	16 852	1.94	349	115	8
海面以下5 m处	平均值	8.17	7.94	18 122	2.08	392	118	10
	最大值	8.18	8.10	18 705	2.11	413	119	12
	最小值	8.16	7.76	17 747	2.02	373	117	8
海床面处	平均值	8.14	8.03	18 694	2.10	393	119	9
	最大值	8.16	8.16	19 116	2.12	407	120	12
	最小值	8.12	7.92	18 253	2.08	382	118	6

注：各项指标统计个数均为6。

按Part 3:1990 clause9.5进行试验；氯含量，按照BS1377: Part 3:1990 clause9.4进行试验；硫酸盐含量，按照BS1377: Part 3:1990 clause9.3试验；钙含量，按照In-house method进行试验；氧含量，按照APHA 4500-OC进行试验；碱度 $K_s4.3$ ，按照APHA 2310B进行试验；酸度 $KB7.0$ ，按照APHA 2320B进行试验。

1.4 抽水试验成果资料

根据与隧道连接的东、西人工岛附近的抽水试验结果表明^[1]：

1) 东、西人工岛附近，天然条件下松散岩类孔隙水以水平流动为主。地下水的流向为南至东南向。

2) 据水质分析资料，东人工岛地下水溶解性总固体为6.2~8.4 g/L，pH值为6.40~6.56；西人工岛地下水溶解性总固体为22.5~23.8 g/L，pH值为7.07~7.47。地下水水质类型为Cl-Na型。

3) 东、西人工岛地下水静止水位与海水水位的差异性。海水与地下水同时受潮汐的影响，地下水水位由于受到压力传导，变化滞后潮汐变化约15 min。东人工岛地下水水位平均高于海水位0.53 m，在高潮时差值小、低潮时差值大。西人工岛地下水水位与海水位平均高程基本一致，但高潮时海水高于地下水约1 cm，低潮时低于地下水约10 cm。

4) 地下水位的升降几乎与潮水涨、落同步，

滞后时间很短，仅数分钟至十几分钟不等，水位高度两者相差仅有0.20~0.40 m。孔隙承压水动态变化上与潮水位变化趋势基本一致。

5) 东人工岛第4大层砂土(包括42,43,44,45和46层)综合形成的渗透系数为 2.04×10^{-4} m/s，西人工岛第4大层砂土(包括42,43,44,45和46层)综合形成的渗透系数为 2.78×10^{-4} m/s。

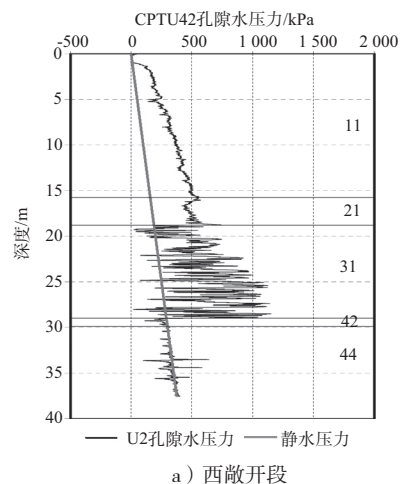
1.5 CPTU成果资料

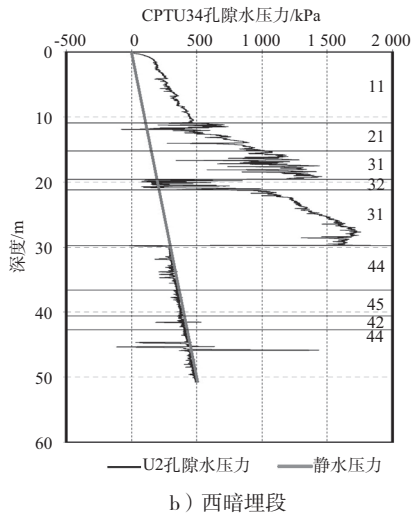
根据CPTU孔压曲线(图1)，各砂层孔隙水压力与静水压力基本一致。

1.6 土工试验成果资料

根据室内试验及CPTU数据与渗透系数的关系，提供渗透系数建议值。

根据室内试验获得的固结系数指标，求得原位条件下各细粒土层的垂直渗透系数。





注: CPTU孔压曲线图中的试验孔隙水压力对细粒含量越少、粒径越大的砂土层, 越接近稳定的孔隙水压力。

图1 CPTU典型孔压曲线

根据室内颗粒分析获得的 D_{10} 指标, 按照下面公式计算砂层的垂直渗透系数(m/s):

$$k=10^{-2}D_{10}^2 \quad (1)$$

式中: D_{10} 为有效粒径 (mm)。

根据文献[2]的解译公式计算各土层的垂直渗透系数。

$$\text{当 } 1.0 < I_c \leq 3.27 \text{ 时, } k=10^{(0.952-3.04I_c)} \quad (2)$$

$$\text{当 } 3.27 < I_c \leq 4.0 \text{ 时, } k=10^{(-4.52-1.37I_c)} \quad (3)$$

$$I_c=[3(3.47-\lg Q_t)^2+(\lg F_r+1.22)^2]^{0.5} \quad (4)$$

$$\text{其中: } Q_t=(q_t-\sigma_{v0})/\sigma_{v0}' \quad (5)$$

为标准化后的锥间阻力 (无量纲)。

$$F_r=[f_s/(q_t-\sigma_{v0})] \times 100\% \quad (6)$$

为标准化后摩阻比 (%)。

根据文献[2]的解译公式计算各土层的水平渗透系数。

$$k_h = \frac{\gamma_w}{2.3\sigma_{v0}} RRc_h \quad (7)$$

$$c_h = \frac{T^* r^2 \sqrt{I_r}}{t} \quad (8)$$

式中: T^* 为 t_{50} 修正时间因素, 为0.245; $r=21.85$ mm, 为锥头半径; I_r 为刚性指数:

$$I_r = \exp\left[\left(\frac{1.5}{M} + 2.925\right)\left(\frac{q_t - \delta_{v0}}{q_t - u_2}\right) - 2.925\right] \quad (9)$$

$$M = \frac{6\sin\phi'}{3 - \sin\phi'} \quad (10)$$

式中: ϕ' 为有效内摩擦角; RR 为压缩率, $0.5 \times$

$10^{-2} < RR < 2 \times 10^{-2}$ 。综合以上各种分析方法获得的细粒土渗透系数 (表2)。

表2 细粒土渗透系数建议值

层号	水平渗透系数 $k_h/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	垂直渗透系数 $k_v/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$
11	1.2	1.00
21	1.9	1.00
31	1.4	1.10
32	4.6	0.51
41	2.2	0.24

综合以上分析方法获得粗粒土渗透系数(表3)。

表3 粗粒土渗透系数建议值

层号	水平渗透系数 $k_h/(10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	垂直渗透系数 $k_v/(10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$
14	5.6	5.6
22	3.3	3.3
33	2.2	2.2
34	13.0	13.0
42	2.4	2.4
43	5.8	5.8
44	17.0	17.0
45	24.0	24.0
46	45.0	45.0

结合抽水试验结果, 若第4大层砂土, 包括42, 43, 44, 45和46层综合做为一层考虑渗透系数时, 可以将东、西人工岛抽水试验成果的平均值 2.41×10^{-4} m/s做为渗透系数的建议值。

2 数据处理与分析

2.1 地表水

场区地表水为海水, 随潮汐而变化, 海水水质类型为Cl-Na型。

2.2 松散岩类孔隙水

松散岩类孔隙承压水主要赋存于第4大层砂层中。第4大单元层以中砂(④₄)、粗砂、砾砂(④₅)为主, 局部发育细砂(④₂和④₃)、砾(④₆)。在隧道区发育广泛, 是区内主要的富含水强透水性含水层。该层上覆土层主要为弱含水弱透水的黏性土为主, 包括第1大单元层全新世海相沉积的淤泥及淤泥质土(①层)、第2大单元层晚更新世陆相的黏性土(②层)、第3大单元层晚更新世海陆交互沉积的黏性土(③层); 局部发育砂层(①₄, ②₂, ③₂夹砂层、③₃和③₄)。呈透镜体状分布于

黏性土中,上述土层分布不连续,地下水补给性差,属于连续性差的含水层。

地下水的补给、径流和排泄。主要含水层的水质为咸水,化学成分及离子含量与海水接近(东人工岛附近较低),且含水层在海平面以下,从水动力条件及水质成份分析说明,该地下水水源与海水形成关联,但隧道区一带含水层上覆厚黏性土,孔隙水与海水在隧道区无直接联系。以上说明地下水补给来源为海水及大屿山和桂山岛等一些岛屿地下含水层的侧向径流,但以海水补给为主,以侧向径流形式排泄。岛屿地下含水层的侧向径流补给的影响,表现为离岛越近影响越大,在该场地表现为从东人工岛至西人工岛逐渐减弱的趋势。

主要含水层的承压性分析。地下水水头跟随潮汐变化而变动,水头峰值与海水高潮水位趋于一致,地下水水位变化滞后潮汐变化只有约15 min,说明地下水与海水存在密切的水力联系;CPTU测得的砂层孔隙水压力与静水压力基本一致,说明含水层内的水压与海水自然水压大致相同。从本地的海洋水文资料可以知道,该区潮汐类型属于不规则的半日潮混合潮型,最大潮差可达2.81 m。随着潮涨潮落,含水层内的地下水由于水源压力的改变,地下水与海水形成补给与排泄关系。在落潮期间,由于覆盖层上部主要为黏性土弱透土层,其对主要含水层地下水的自由排泄形成封盖阻力,故使主要含水层中的地下水具有承压特性。承压水头跟随潮汐变化而变动,承压水水头高与海水潮水位相差不大。

上部第1,2,3大单元层中局部发育的砂质透镜体层,由于分布的连续性差,大部分处于弱含水弱透水的黏性土包围中,且分布范围有限,其地下水补给范围小、能力不强,属于弱承压含水层。但上述第3大单元层中的③₃和③₄层在与主要含水层④层形成较好的沟通时,其水文特性将发生质变,宜按照主要含水层的性质考虑设计方案。

根据隧道设计方案,沉管段中段土层将进行疏浚开挖,最深处超过-40 m,各砂层将大部分直接与海水相连,形成就地补给、径流及排泄的特点,将形成新的地下水补给、径流及排泄体系。

以上分析说明,由于地下水与海水的水头差小,形成的渗透力不大。

2.3 基岩裂隙水

黏性土状全、强风化岩裂隙不发育,透水性较差,富水性弱;半岩半土状强风化岩,中、微风化岩,裂隙发育好,富水性较强。基岩裂隙水与上覆松散岩类孔隙承压水构成直接水力联系。

3 结语

1) 场区地表水为海水,海水水质类型为Cl-Na型。

2) 地下水补给来源为海水及大屿山和桂山岛等一些岛屿地下含水层的侧向径流,但以海水补给为主,以侧向径流形式排泄。岛屿地下含水层的侧向径流补给的影响,表现为离岛越近影响越大,在该场地表现为从东人工岛至西人工岛逐渐减弱的趋势。

3) 地下水水头跟随潮汐变化而变动,水头峰值与海水高潮水位趋于一致,地下水与海水存在密切的水力联系。主要含水层中的地下水具有承压特性。承压水头跟随潮汐变化而变动,承压水水头高与海水潮水位相差不大。

4) 由于地下水与海水的水头差小,形成的渗透力不大。

5) 基岩裂隙水为隧道区变质岩内的风化裂隙水和构造裂隙水。基岩裂隙水与上覆松散岩类孔隙承压水无明显的隔水层,沟通良好,构成直接水力联系。

6) 该区域属于典型的三角洲入海口地带,其工程水文地质特征具有独特性与代表性,可以为类似的其它三角洲入海口地带的工程水文地质特征分析提供经验。

参考文献:

- [1] 江苏水规院.港珠澳大桥主体工程初步设计阶段工程地质勘察报告(第五册 抽水试验)[R].南京:江苏水规院,2009.
- [2] Robertson P K, Cabal K L. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering[M]. 4th Edition. USA:Gregg Drilling & Testing, Inc., 2010.

(本文编辑 武亚庆)