深中通道岛隧结合段高压旋喷桩止水性能试验研究*

刘和文[1,2,3,4]，赵卫民[1,2,3,4]，寇晓强[1,2,3,4]，陈智军[1,2,3,4]

（1. 中交天津港湾工程研究院有限公司，天津 300222；2. 中交第一航务工程局有限公司，天津 300461；
3. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室，天津 300222；4. 天津市港口岩土工程技术重点实验室，天津 300222）

摘要：深中通道岛隧结合段采用高压旋喷桩形成止水帷幕结构，采用传统取芯检测方法难以合理评价止水效果。基于水位恢复法，将岛隧结合段视作单一抽水井，设计了一套止水帷幕渗透性分析评价试验方法。通过埋设水位管、孔隙水压力计对潜水水位及承压水压力进行监测，获得试验期间的水位连续变化数据，推算得到止水帷幕渗透系数。结果表明，高压旋喷桩作为止水帷幕的岛隧结合段单日最大渗流量约 169.05 m^3，利用达西公式，计算综合渗透系数为 7.03×10^{-6} cm/s，接近黏土渗透系数，高压旋喷桩止水帷幕止水效果较好，后续岛隧结合段基坑的开挖、施工过程也印证了该结论。在取芯检测法难以判断桩体质量时，该方法可作为止水帷幕止水性能评价的有效手段。研究结果对于高压旋喷桩止水帷幕设计与现场原位检测具有一定的参考意义。

关键词：岛隧结合段；高压旋喷桩；止水帷幕；渗透试验

中图分类号：U655.54　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)08-0249-07

Experimental study on water sealing performance of high-pressure jet grouting piles in island-tunnel joint section of Shenzhen−Zhongshan Link

LIU Hewen[1,2,3,4], ZHAO Weimin[1,2,3,4], KOU Xiaoqiang[1,2,3,4], CHEN Zhijun[1,2,3,4]

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China;
2. CCCC First Harbor Engineering Company, Co., Ltd., Tianjin 300461, China;
3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of the Ministry of Communication, Tianjin 300222, China;
4. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China)

Abstract: The island-tunnel joint section of the Shenzhen−Zhongshan Link is reinforced with high-pressure jet grouting piles to form a water-stop curtain. It is hard to accurately assess the water-stop performance of the curtain through conventional core sampling tests. Based on the water level recovery test method, this study regards the island-tunnel joint section as an independent pumping well and develops a test procedure for analyzing and evaluating the permeability of anti-seepage curtains. The phreatic water level and confined water pressure are monitored by embedding water level pipes and pore water pressure gauges, and the continuous water level change data during the test are obtained to calculate the permeability coefficient of the water-stop curtain. The results show that the maximum daily water seepage of the island-tunnel joint section using high-pressure jet grouting piles as the water-stop curtain is about 169.05 m^3, and the comprehensive permeability coefficient calculated via Darcy's law is 7.03×10^{-6} cm/s, a value close to that of clay. The high-pressure jet grouting pile cutoff wall exhibits good water-stopping performance, which has been verified by the subsequent excavation and construction

收稿日期：2025-12-22　　**录用日期：**2026-01-15

***基金项目：**中交第一航务工程局有限公司科研项目(2018-8-21)

作者简介：刘和文(1990—)，男，硕士，高级工程师，从事岩土工程监测与理论计算研究。

process of the foundation pit at the island-tunnel joint section. When the coring detection method is difficult to judge the pile quality, this method can be used as an effective means for evaluating the water-stop performance of the water-stop curtain. The research results have certain reference significance for the design and field in-situ detection of high-pressure jet grouting pile water-stop curtain.

Keywords: island-tunnel joint section; high-pressure jet grouting pile; water-stop curtain; permeability test

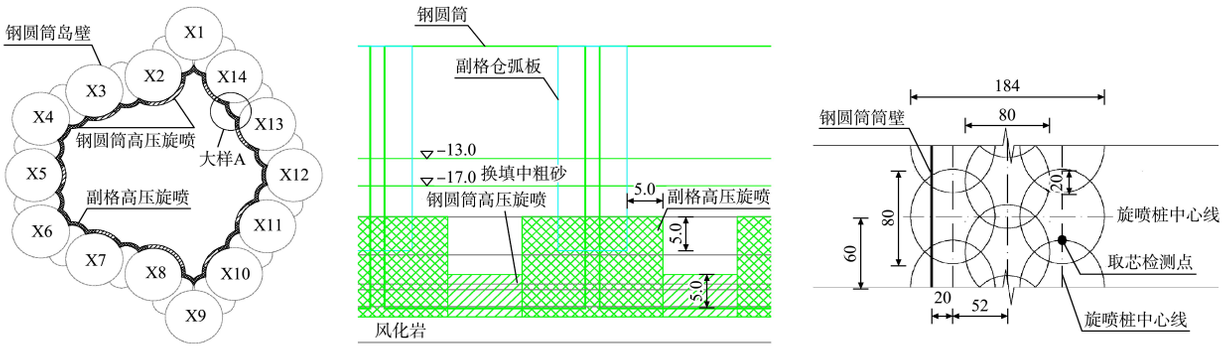
高压旋喷通过高压射流切割破坏原地基土体，同时将水泥浆等固化剂与土体强制搅拌混合，待固化剂凝结硬化后形成具有一定强度和抗渗性能的连续桩体帷幕，从而阻断地下水的渗流通道。因其具有施工条件适应性强、施工周期短、成本相对可控等优点，成为止水工程的首选结构形式[1-2]，高压旋喷工艺在各类止水功能场景下应用广泛[3-4]。

高压旋喷桩受施工场地地质水文条件制约，针对不同地质条件下高压旋喷桩止水帷幕成桩过程中遇到的质量问题，研究人员通过工艺设备改进、分序施工、调整提升速率、优化水泥掺入比等措施，改善高压旋喷桩的成桩质量[5-6]；史长远[7]揭示了粉砂土地层条件下高压旋喷桩成桩失效机理，基于粉砂土地层条件下双(三)管法高压旋喷桩现场试验，明确了浆压和喷孔间距是两个影响高压旋喷桩成桩质量的关键因素；陈富等[8]采用钻孔压水和钻孔注水试验对高压旋喷桩防渗性进行检测，分析了钻孔压水、钻孔常水头注水和钻孔降水头注水试验检测高压旋喷桩防渗墙渗透系数的试验原理和计算方法，并提出了不同方法的适用条件。南进江等[9]对张靖皋长江大桥北航道桥南锚碇基坑底部旋喷桩水平封底隔水层开展了钻孔式振荡现场试验和变水头渗透室内试验，得到的渗透系数结果差异较大，补充开展的现场原状土振荡试验和变水头渗透试验结果同样表明，现场振荡试验结果比变水头渗透室内试验结果大很多，渗透系数结果受试验方法影响较大。范丹丹等[10]基于砂卵石潜水含水层单井抽水试验结果，分别利用 Dupuit-Kusargent 法、Thiem 法、直线斜率法及水位恢复法等 4 种方法计算潜水含水层渗透系数，对比采用各方法计算的渗透系数模拟的水位值与现场实测值的偏差，并讨论了造成偏差的原因。

根据当前行业研究成果与工程现状可知，高压旋喷桩止水帷幕应用场景通常地质复杂，成桩质量参差不齐，渗透性试验多采用单一钻孔形式进行，不同的试验方法结果存在差异[11]。大型现场原位试验相对于单孔渗透或室内试验能直接反映研究对象的渗流特性，具有重要的工程应用实际意义。本文针对深中通道西人工岛岛隧结合段高压旋喷桩止水帷幕，设计了一套渗透性原位检测试验方法，并连续开展 7 d 现场试验，通过对试验数据的分析，旨在科学合理评价深中通道岛隧结合段高压旋喷桩止水帷幕渗透性能。

1 工程背景

深中通道西人工岛岛壁采用插入式钢圆筒结构[12]，钢圆筒间采用副格仓弧板连接(简称副格)，实现快速成岛；岛壁外侧为海水，海平面平均高程 0.52 m，岛隧结合段基坑开挖平均底高程约−12.0 m；岛壁结构钢圆筒底部强风化岩与海水联通，富含承压水，具有较高的渗透性。为了满足岛隧结合段基坑内的渗流稳定和突涌稳定要求，在岛壁内侧沿钢圆筒施作高压旋喷止水帷幕，止水帷幕竖向深度范围为钢圆筒及副格底高程以上 5.0 m 至中风化岩层顶面，岛隧结合段钢圆筒底高程介于−35.3～−32.6 m，副格底高程约−26.0 m，止水帷幕采用 3 排连续的高压旋喷桩，桩径 0.8 m，搭接宽度 0.2 m，高压旋喷止水帷幕平面布置与立面布置见图 1。



a) 平面布置　　b) 立面布置(单位: m)　　c) 桩位布置(单位: cm)

图 1　岛隧结合段高压旋喷止水帷幕布置

Fig. 1　Layout plan of high-pressure jet grouting water-stop curtain at island-tunnel junction section

岛隧结合段经过降水联合堆载预压处理后开挖至−8.0 m 高程，进行高压旋喷桩止水帷幕施工，旋喷桩成桩区域典型地层分布见图 2(选自岛壁勘察钻孔 XDZK10)[13]。

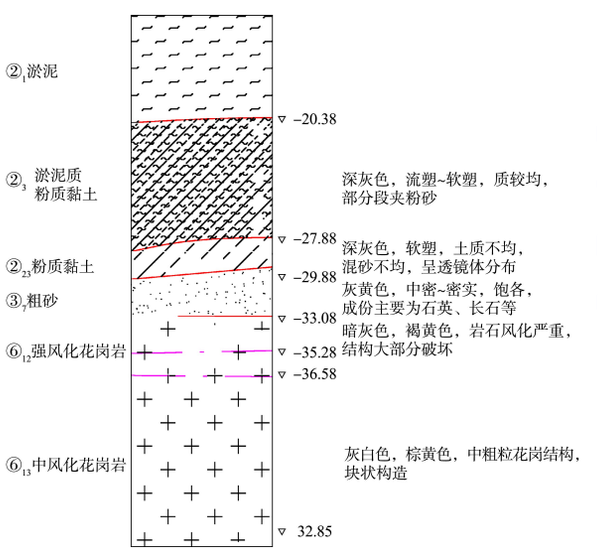


图 2　旋喷桩成桩区域典型地层分布(单位：m)

Fig. 2　Typical stratum distribution of pile-forming area of jet grouting piles(unit:m)

施工前在岛内进行试桩，待现场高压旋喷桩达到 28 d 龄期后，在旋喷桩半径中点处取芯进行质量检测[14]，有些桩体桩身完整性较好，如 ESY-25 号桩。个别桩体存在桩身局部成型较差现象，如 ESY-16 号桩，主要表现为在砂层中的成桩质量较差，水泥含量低，松散无黏结，是潜在的渗流通道，在临界水力条件下可发生流土，甚至管涌现象。旋喷桩取芯检测结果显示，桩体质量存在离散性，取芯检测方法无法合理评价止水帷幕止水效果。为了进一步验证岛隧结合段的渗流稳定性和突涌稳定性，保证基坑开挖安全，本文设计了现场原位水位恢复法止水帷幕渗透性试验方法，以科学合理评价止水帷幕止水性能。

2　试验原理及方法

在地层渗透试验中，水位恢复法是测定土体渗透系数的常用原位测试方法之一，通过观测钻孔中水位在扰动后的恢复过程，推算土体的渗透性能。在渗透试验中，水位恢复法适用于渗透性较弱至中等的土体；基于达西定律与地下水渗流理论，进行岛隧结合段水位恢复试验。试验前通过抽水使地下水位降至稳定状态，随后停止抽水，岛外海水在水头差作用下向岛内汇流，岛隧结合段内水位逐渐回升，回升速率与止水帷幕渗透性能直接相关，观测并记录岛内水位随时间的恢复过程。通过水位恢复时程曲线，可评估现有降水系统能力是否满足现场生产要求，同时根据推算的止水帷幕综合渗透系数，评价止水帷幕止水效果。

将岛壁下部即钢圆筒、副格底部至中风化岩层顶部作为透水面，根据岛隧结合段渗流量，按式(1)计算岛壁高压旋喷桩止水帷幕综合渗透系数。

$$k = \frac{Q}{iA} \tag{1}$$

其中，

$$i = \frac{h}{L} \tag{2}$$

式中：k 为综合渗透系数，cm/s；Q 为岛内渗流量，cm^3/s；A 为岛壁透水面积，cm^2；i 为水力梯度，无量纲，表示沿渗流方向单位距离的水头损失；h 为岛隧结合段岛壁内外水位差，m；L 为渗径长度，即高压旋喷桩止水帷幕宽度，取 1.84 m。

根据棱柱体计算公式，岛隧结合段渗流量可按式(2)计算：

$$Q = Sh_{回}\, n \tag{2}$$

式中：n 为给水度，其敏感性与土层孔隙率、含水量相关，根据《工程地质手册》，中砂取 0.25；S 为岛隧结合段投影面积，取 7 134.8 m^2；$h_{回}$ 为回填覆盖层内水位上升高度，cm。

通过在岛隧结合段埋设水位管对潜水位进行监测，在承压水层埋设孔隙水压力传感器及水位管，对承压水压力与水位进行监测。人工岛区域承压水层为$③_7$ 粗砂层与$⑥_{12}$ 强风化岩层，为渗透试验的重点关注部位，岛隧结合段内共布置 4 处孔隙水压力监测点和 4 处水位管监测点，测点位置远离降水井，以降低降水漏斗对水位监测值的影响。

水位监测点分为Ⅰ类水位观测点和Ⅱ类水位观测点。Ⅰ类水位观测点用于表层潜水位的观测，编号Ⅰ-1～Ⅰ-2，埋设底高程为−18.0 m；Ⅱ类水位观测点用于承压水位观测，水位管底部位于承压水层，水位管顶部与钢圆筒岛壁顶部齐平，编号Ⅱ-1～Ⅱ-2；孔隙水压力传感器布置于承压水层内，编号 1#～4#，其中 3#测点位于砂层，其余测点位于风化岩中，各监测点相对位置见图 3，监测点编号等信息见表 1。监测点埋设时隧道结构二次止水帷幕施工完成[15]，将小岛分为东西侧两个基坑；隧道结构二次止水采用 3 排连续的高压旋喷桩，桩径 1.0 m，搭接宽度为 0.3 m，穿透全风化花岗岩，到达中风化岩层顶面，桩顶高程为−11.4 m，底高程为−39.9 m。其中 4#孔压、Ⅱ-2 水位位于二次止水帷幕东侧基坑。本文水位恢复法渗透试验针对岛隧结合部沿岛壁打设一圈封闭止水帷幕结构，目的是隔绝岛壁内外侧的水力联系，试验结果分析时不考虑止水帷幕结构内的二次止水帷幕的影响。

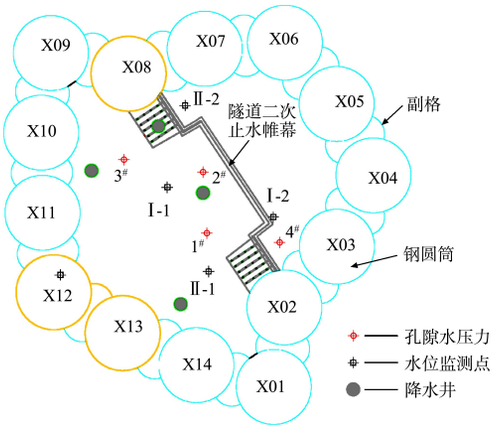


图 3　止水效果测试监测点平面布置

Fig. 3　Plane layout of monitoring points for water-stop effect test

表 1　监测点信息统计

Tab. 1　Statistics of monitoring point information

监测项目	监测点编号	坐标		高程/m	测点土层性质
		X/m	Y/m		
孔隙水压力	1#	143 297.71	240 198.73	−37.5	风化岩
	2#	143 326.98	240 223.03	−37.5	风化岩
	3#	143 324.51	240 164.87	−33.0	细砂
	4#	143 293.79	240 222.82	−35.4	风化岩层
水位	Ⅰ-1	143 285.75	240 198.75	−18.0	粉质黏土
	Ⅰ-2	143 326.59	240 222.55	−18.0	粉质黏土
	Ⅱ-1	143 303.17	240 206.13	−37.5	风化岩层
	Ⅱ-2	143 344.45	240 189.17	−37.4	风化岩层

3　试验过程及结果分析

3.1　试验过程

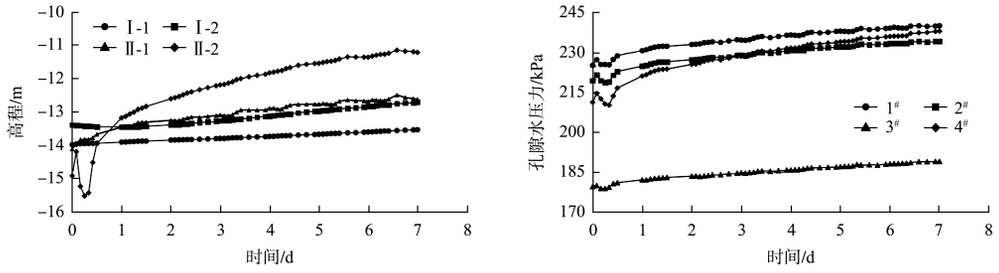
渗透试验开始时(早 8 时)，停止岛隧结合段与岛壁钢圆筒内水泵抽水，同时观测岛隧结合段潜水位、承压水位及承压水压力变化数据并记录，昼间每 2 h 观测 1 次，夜间每 4 h 观测 1 次，试验持续进行 7 d，第 1 天 11—15 时，恢复岛壁钢圆筒内降水(每个钢圆筒内均布置有降水井)，测试监测点对环境水位的敏感性。

3.2　监测水位数据分析

试验期间岛隧结合段水位监测数据见图 4，其中图 4a)为水位管直接观测的水位值，数据显示，潜水位基本保持匀速上升，Ⅰ-1 水位低于Ⅰ-2 水位，Ⅰ-1 水位观测数据未体现第 1 天的岛壁降水，Ⅰ-2 水位观测数据反应了岛壁降水动作，承压水水位Ⅱ-1 测点小于Ⅱ-2 测点数据，且Ⅱ-2 对岛壁

降水动作反应灵敏，说明Ⅱ-2 测点与外围水位存在水力关系，试验前 4 d 水位上升速率明显大于后 3 d，水位上升呈现收敛趋势，水位高程接近−11.0 m。对比两种类型水位数据，潜水水位相对滞后，几乎不反应筒壁降水动作，其间水位恢复较慢，说明止水帷幕基本隔绝了外部水位。东侧基坑水位高于西侧基坑，推测地下水流由东向西渗透。承压水水位高于潜水水位，承压水层仍然存在水头压力。

图 4b)孔隙水压力监测数据显示，各测点的孔隙水压力变化呈现相同的发展趋势，对水位变化比较敏感，均反映了第 1 天的降水动作，前 4 d 水位恢复速率大于后 3 d，水位高程呈现收敛趋势。3#孔隙水压力传感器位于砂层，该点位孔隙水压力相较于风化岩层内埋设传感器的监测值更小，差值约为 40 kPa，对应的水位差约为 4.0 m。



a) 水位管水位　　b) 孔隙水压力

图 4　水位监测数据时程曲线

Fig. 4　Time-history curve of water level monitoring data

统计渗透试验每日早 8 时水位数据，根据式(1)分别计算东侧、西侧两个基坑渗流量以及监测的承压水水位高程，见表 2。根据表 2 可知，小岛西侧基坑Ⅰ-1 水位潜水层水位上升速率约为 0.07 m/d，承压层Ⅱ-1 水位上升最大速率为 0.725 m/d，发生在试验首日，试验第 7 天上升速率为 0.058 m/d，小于潜水位速率，小岛东侧基坑Ⅰ-2 水位潜水层水位上升速率约为 0.14 m/d，承压层Ⅱ-2 水位最大变化速率达到 1.741 m/d，同样发生在试验首日，试验第 7 天上升速率为 0.145 m/d，仍略大于潜水位上升速率，岛隧结合段单日最大渗流量为 169.05 m^3，远低于现状降水系统单日降水能力[16]。

表 2　止水帷幕止水性能试验水位数据统计

Tab. 2　Statistics of water level data from water-stop performance test of water-stop curtain

时间/d	Ⅰ-1 水位变化量/(m·d^{-1})	Ⅰ-1 渗流量/(m^3·d^{-1})	Ⅱ-1 水位高程/m	Ⅱ-1 水位变化量/(m·d^{-1})	Ⅰ-2 水位变化量/(m·d^{-1})	Ⅰ-2 水位渗流量/(m^3·d^{-1})	Ⅱ-2 水位高程/m	Ⅱ-2 水位变化量/(m·d^{-1})
1	0.075	86.89	−13.463	0.725	−0.061	−	−13.187	1.741
2	0.062	71.83	−13.261	0.202	0.065	40.63	−12.612	0.575
3	0.051	59.08	−13.096	0.165	0.122	76.00	−12.195	0.417
4	0.059	68.35	−12.898	0.198	0.147	92.00	−11.832	0.363
5	0.065	75.30	−12.773	0.125	0.150	93.75	−11.548	0.284
6	0.069	79.94	−12.687	0.086	0.135	84.38	−11.364	0.184
7	0.069	79.94	−12.629	0.058	0.130	81.25	−11.219	0.145

根据孔隙水压力传感器埋设高程，取地下水密度为 1.0 g/cm^3，计算测点处的水头高度，从而得到水位高程，结果见表 3。由表 3 可知，1#推算水位与西侧基坑Ⅰ-1 潜水位标高接近，2#、3#测点水位高程接近，均低于Ⅰ-1 潜水位高程，说明西侧基坑止水帷幕对承压水层的隔断效果较高，东侧基坑内承压水 4#测点推算水位高程大于Ⅰ-2 潜水位高程，高差约 2.0 m，说明东侧基坑与外界仍存在水力关系，同样可认为承压水层仍然存在水头压力。

表 3 止水帷幕止水性能试验孔隙水压力数据统计

Tab. 3 Statistics of pore water pressure data from water-stop performance test of water-stop curtain

时间/d	1#孔隙水压力值/kPa	1#水位高程/m	2#孔隙水压力值/kPa	2#水位高程/m	3#孔隙水压力值/kPa	3#水位高程/m	4#孔隙水压力值/kPa	4#水位高程/m
初始值	225.2	−14.98	219.5	−15.55	179.4	−15.06	211.3	−14.27
1	230.8	−14.42	224.9	−15.01	182.0	−14.80	221.2	−13.28
2	233.1	−14.19	227.4	−14.76	183.4	−14.66	225.6	−12.84
3	234.8	−14.02	229.1	−14.59	184.7	−14.53	228.7	−12.53
4	236.7	−13.83	230.9	−14.41	185.7	−14.43	231.8	−12.22
5	238.2	−13.68	232.3	−14.27	187.0	−14.30	234.1	−11.99
6	239.3	−13.57	233.5	−14.15	188.0	−14.20	236.1	−11.79
7	240.2	−13.48	234.4	−14.06	189.0	−14.10	238.1	−11.59

3.3 止水帷幕综合渗透系数计算

假定钢圆筒和副格本身不透水，岛内外透水面主要为钢圆筒底部至中风化顶、副格底部至中风化顶等区域，岛壁 14 个钢圆筒及副格底部的投影面积即为岛隧结合段透水面积，结合钢圆筒与副格施工底高程记录与各筒体的勘察资料，确定中风化岩层顶高程，综合计算得到小岛透水面积为 3 378.48 m^2。

渗流量取试验第 2 ~ 7 天的累计渗流量值(902.45 m^3)；试验渗透时长 144 h；海平面水位高程根据试验期间珠江口潮汐表取值 1.0 m，岛隧结合段内水位高程按Ⅱ类水位管的监测结果，取均值−12.48 m，因此高压旋喷桩止水帷幕内外侧水位差为 13.48 m。由式(1)计算得岛隧结合段止水帷幕综合渗透系数为 7.03×10^{-6} cm/s，综合渗透系数较小，接近黏性土渗透性指标，满足设计文件对高压旋喷止水帷幕渗透系数不大于 1×10^{-5} cm/s 的技术要求，综合评价止水帷幕止水效果较好。

4 结语

1）对深中通道岛隧结合段高压旋喷桩止水帷幕开展渗透性能试验，试验期间潜水位呈匀速上升状态，承压水层水位上升前期速率高于后期，呈现收敛趋势，水位最高值为承压层Ⅱ-2 测点水位，达到−11.22 m；单日最大渗流量约 169.05 m^3，小于降水系统降水能力，能够保障基坑施工安全。

2）根据数据结果，计算岛隧结合段止水帷幕综合渗透系数为 7.03×10^{-6} cm/s。综合渗透系数较小，止水帷幕止水效果显著。

3）监测数据较为全面地反映了深圳通道西人工岛岛隧结合段的渗透状态，试验方法可靠，能够作为传统检测方法的有效补充，以便后续施工顺利进行。

4）孔隙水压力监测通过压力传感器推算水位值，易受透水石饱和度及孔压计周边土层含泥量影响，导致水压力监测值偏小，本文在进行止水帷幕综合渗透系数计算时采用水位管观测数据，安全系数更高。后续工程中，可通过现场沸水蒸煮透水石，并将孔隙水压力计置于土工布包裹的砂层中安放，以更好地反映地下水压力值。

参考文献：

[1] 张鹏, 邓智平, 蔡亮亮, 等. 基于某近海深基坑高压旋喷桩施工工艺的改进[J]. 中国水运, 2023(4): 130-132.
ZHANG P, DENG Z P, CAI L L, et al. Improvement of construction technology of high-pressure jet grouting pile based on an offshore deep foundation pit[J]. China water transport, 2023(4): 130-132.

[2] 陈浩. 土石围堰高压旋喷桩防渗施工技术应用[J]. 水运工程, 2021(12): 112-114, 149.
CHEN H. Application of anti-seepage construction technology of high-pressure rotary jet grouting pile in earth-rock cofferdam[J]. Port & waterway engineering, 2021(12): 112-114, 149.

[3] 陈明伟, 吉明. 垂直铺塑和高压旋喷联合止水帷幕在深水海堤围堰中的应用[J]. 水运工程, 2013(8): 186-190.
CHEN M W, JI M. Application of vertically laid plastic and high-pressure jet grouting waterproof curtain in deepwater seawall cofferdam [J]. Port & waterway

engineering, 2013(8): 186-190.

[4] 谢万东. 高喷止水帷幕在珊瑚礁中的应用[J]. 水运工程, 2014(2): 194-196.
XIE W D. Application of jet grouting for water sealing in coral reef[J]. Port & waterway engineering, 2014(2): 194-196.

[5] 诸葛爱军, 孙力, 赵克来, 等. 高压旋喷桩在砂卵砾石层的质量问题及控制措施[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(3): 47-51.
ZHUGE A J, SUN L, ZHAO K L, et al. Quality problems and control measures of high pressure rotary jet grouting pile in sand-gravel layer[J]. China harbour engineering, 2019, 39(3): 47-51.

[6] 马骏. 多头搅拌桩结合高压旋喷桩施工技术在深基坑防渗帷幕中的应用[J]. 水运工程, 2016(6): 183-186.
MA J. Application of multi-head stirring pile and high-pressure spraying pile in construction of seepage proof curtain of deep foundation pit [J]. Port & waterway engineering, 2016(6): 183-186.

[7] 史长远. 粉砂土地层高压旋喷桩成桩失效机理分析及工程技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
SHI C Y. Research on formational failure mechanism and engineering technology of high pressure jet grouting piles in silty sand soil layer[D]. Jinan: Shandong University, 2024.

[8] 陈富, 李东军, 诸葛爱军, 等. 高压旋喷桩防渗墙钻孔注水和压水试验检测对比研究[J]. 水运工程, 2019(10): 197-203.
CHEN F, LI D J, ZHUGE A J, et al. Comparative study on borehole of high-pressure jet grouting pile cutoff wall between water injection test and water pressure test[J]. Port & waterway engineering, 2019(10): 197-203.

[9] 南进江, 林海峰, 唐政, 等. 大面积深层地基加固渗透系数试验研究[J]. 公路, 2023, 68(6): 65-74.
NAN J J, LIN H F, TANG Z, et al. Experimental study on permeability coefficient of large area deep foundation reinforcement[J]. Highway, 2023, 68(6): 65-74.

[10] 范丹丹, 陈群, 亓立成, 等. 由抽水试验计算砂卵石含水层渗透系数的方法对比[J]. 水利水运工程学报, 2021(4): 54-60.
FAN D D, CHEN Q, QI L C, et al. Comparison of methods to calculate coefficient of permeability of sandy cobble aquifer based on pumping tests[J]. Hydro-science and engineering, 2021(4): 54-60.

[11] 陶云, 黄兴. 一种新的旋喷桩止水效果检测方法[J]. 水运工程, 2022(9): 215-220.
TAO Y, HUANG X. A new detection method for water cutoff effect of jet grouting piles[J]. Port & waterway engineering, 2022(9): 215-220.

[12] 宋书东, 张全林, 张万达. 深中通道组合结构圆筒的围堰设计方案[J]. 水运工程, 2019(S1): 100-104.
SONG S D, ZHANG Q L, ZHANG W D. Designs scheme of combined cylinder cofferdam for passage from Shenzhen to Zhongshan [J]. Port & waterway engineering, 2019(S1): 100-104.

[13] 中交公路规划设计院有限公司. 深圳至中山跨江通道(A 合同段)先行工程施工图设计工程地质勘察报告[R]. 北京: 中交公路规划设计院有限公司, 2017.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Engineering geological investigation report for construction drawing design of Advance Project (contract section A) of Shenzhen-Zhongshan Link[R]. Beijing: CCCC Highway Consultants Co., Ltd., 2017.

[14] 陈智军, 刘和文, 寇晓强, 等. 深中通道深层水泥搅拌法水泥土强度特性室内试验研究[J]. 水运工程, 2020(8): 23-28, 52.
CHEN Z J, LIU H W, KOU X Q, et al. Laboratory test for strength properties of cement soil with DCM in Shenzhen: Zhongshan linking [J]. Port & waterway engineering, 2020(8): 23-28, 52.

[15] 吕鹏, 司锡宁, 王刚, 等. 外海人工岛复合地基及止水帷幕旋喷桩试桩施工[J]. 施工技术, 2022, 51(6): 133-138.
LYU P, SI X N, WANG G, et al. Construction of test piles for composite foundation and water-resisting curtain jet-grouting piles on artificial islands in open sea[J]. Construction technology, 2022, 51(6): 133-138.

[16] 中交公路规划设计院有限公司. 深圳至中山跨江通道西人工岛施工图设计说明[R]. 北京: 中交公路规划设计院有限公司, 2017.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Construction drawing design instructions of West Artificial Island of Shenzhen–Zhongshan Link[R]. Beijing: CCCC Highway Consultants Co., Ltd., 2017.

(本文编辑　王传瑜)