

石膏溶蚀区某船闸地基灌浆效果试验评价

张超,于海,王龙

(四川省交通勘察设计研究院有限公司,四川成都610017)

摘要:某船闸位于石膏溶蚀区,地基内普遍发育挤压破碎带及封闭型溶蚀孔隙。为了对灌浆处理效果进行定量评价,进行灌浆前后岩块密度、波速、抗压强度试验,以及岩体承载力及波速试验,进行灌浆前后试验结果对比及回归分析,并提出灌浆方案优化建议。结果表明,岩块及岩体的物理力学指标试验值离散性较大,平均值上表现出相关性;该船闸地基内发育的溶蚀孔隙相对独立、连通性差,固结灌浆对于提高岩基承载力作用有限。

关键词:灌浆效果评价;石膏溶蚀孔隙;地基承载力

中图分类号:U 641.5

文献标志码:A

文章编号:1002-4972(2023)S1-0156-06

Test evaluation on effect of grouting treatment for foundation of ship lock in gypsum dissolution area

ZHANG Chao, YU Hai, WANG Long

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: A ship lock is located in the gypsum dissolution zone, and the compression fracture zone and closed dissolution pores are generally developed in the foundation. To quantitatively evaluate the effect of grouting, we carry out the tests such as the test of rock block density, wave speed, compressive strength, rock mass bearing capacity and wave speed before and after grouting. Then we carry out the comparison and regression analysis of the test results before and after grouting, and propose suggestions for optimizing the grouting scheme. The results show that the physical and mechanical index test values of the rock block and rock mass have large dispersion, and the average value shows correlation. The dissolution pores developed in the foundation of the ship lock are relatively independent and have poor connectivity. Consolidation grouting has a limited effect on improving the bearing capacity of the rock foundation.

Keywords: evaluation of grouting effect; gypsum dissolution pore; bearing capacity of foundation

随着我国水运行业的不断发展,采用固结灌浆改善地基岩体质量使其满足工程要求,越来越受到重视。固结灌浆通过浆液对结构面的充填加固,提高结构面抗剪强度,增强岩体整体性及完整性,降低岩体孔隙度,使得岩体承载力及抗渗性增强。目前固结灌浆效果评价方法主要有波速测试、取芯试验、压水试验、钻孔电视等。其中波速测试可直接测定灌浆前后岩体波速变化,测试速度快,效果可靠,是一种较为成熟的检测方

法^[1];取芯试验法可查看岩体空隙填充情况,并制备试样进行室内物理力学性质试验,是一种通用的检测方法;压水试验通过灌浆前后岩体透水率的变化,可用于定量检测岩体防渗性^[2];钻孔电视形成的影像能更明确地反映钻孔附近岩体的浆液填充情况^[3]。

但是单一的检测方法无法满足工程中对灌浆后岩体承载力、抗渗能力提高的定量判别要求,灌浆效果检测目前仍缺少一个明确标准^[4],许多

灌浆工程通过上述多种方法组合进行综合判别。温帅等^[5]采用声波测试、钻孔变形模量、磨片鉴定及室内试验等方法, 评价大岗山坝基辉绿岩裂隙复合灌浆效果, 指出灌浆后岩体连续性、整体性均得到显著改善; 刘长武等^[6]通过微孔结构扫描仪、X射线衍射图谱、室内试验等方法, 评价巷道围岩水泥注浆效果, 指出注浆加固改变了岩石的微结构、孔隙及物质组成, 提高了岩体结构面强度; 冯海明^[7]以岩溶路基压水试验数据分析为基础, 改进压水试验工艺, 并提出岩溶路基灌浆效果定量评价标准。受限于成本及时间因素, 工程中很少开展现场荷载试验对灌浆效果进行直接检测。

尖子山船闸地基岩体为紫红色粉砂质泥岩, 含大量石膏溶蚀孔洞, 且存在近水平的层间破碎带, 对沉降、防渗及结构安全不利, 故现场采用固结灌浆加固处理。本文以现场荷载试验、波速测试及室内试验为主要手段, 通过对闸基灌浆前后岩体地基承载力、岩块强度、纵波波速试验成果的统计分析, 定量评价固结灌浆对石膏溶蚀区地基承载力的影响, 以期为类似工程灌浆效果评价及灌浆方案的制定提供参考。

1 工程概况

1.1 工程区地质条件

尖子山船闸位于岷江中游, 闸基岩体以白垩系中统灌口组(K_2g)砂质泥岩为主, 紫红色, 泥质胶结, 岩层产状 $203^\circ \angle 6^\circ$, 层间夹白色线状石膏, 见蜂窝状溶蚀孔洞, 直径数毫米至数十毫米不等。船闸建基面以下发育多层近水平的挤压破碎带, 缓倾下游, 呈透镜状分布, 局部软化。典型岩芯见图 1, 闸基典型断面见图 2。



图 1 闸基岩体石膏溶蚀孔隙及挤压破碎带

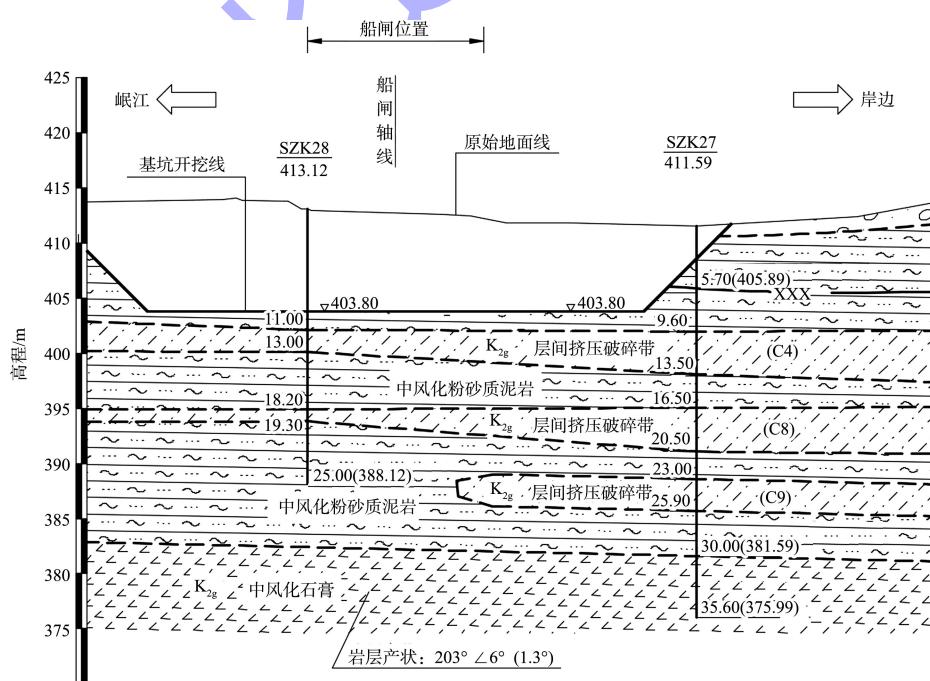


图 2 船闸基础典型地质断面

1.2 灌浆试验

在船闸区布置 9 个固结灌浆钻孔, 采用 3×3

布置, 孔距 $2\sim 3$ m, 如图 3 所示。固结灌浆孔深入建基面以下 12 m。采用自上而下分段灌浆法,

灌浆压力控制在 0.1~0.4 MPa，并根据实际测试情况调整。灌浆效果试验研究主要步骤为：1) 利用灌浆钻孔取芯开展灌浆前岩块物理力学性质试验，主要包括天然密度、单轴压缩及纵波波速，并在钻孔内开展灌浆前岩体纵波波速测试；2) 固结灌浆完成后开挖至建基面以上 2 m 左右，灌浆孔正中布置检测孔，在检测孔中钻孔取芯开展灌浆后岩块物理力学性质试验，并在检测孔中开展固结灌浆后岩体纵波波速测试；3) 利用固结灌浆后检测孔开展固结灌浆后岩体承载力和变形原位试验，同时在灌浆试验区东侧同一高程附近开展未灌浆岩体承载力和变形模量的对比试验。

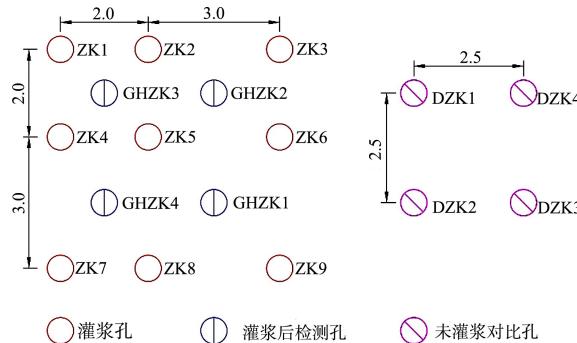


图 3 船闸区固结灌浆效果试验孔平面布置 (单位: m)

2 灌浆前后岩块室内试验

2.1 天然密度对比

现场钻孔取芯后，密封送至室内加工成直径 50 mm、长 100 mm 的标准圆柱样，如图 4 所示。灌浆前共取得 30 个岩块试样，其中 6 个试样表面见明显溶蚀痕迹，为溶蚀样，其余 24 个为完整样。灌浆后钻孔中未在溶蚀孔洞内发现浆液，水泥浆和原岩体界限分明，水泥柱主要集中分布在原挤压破碎带范围，完整性较好，灌后共取 18 个岩样，其中 11 个原岩样、7 个水泥样。

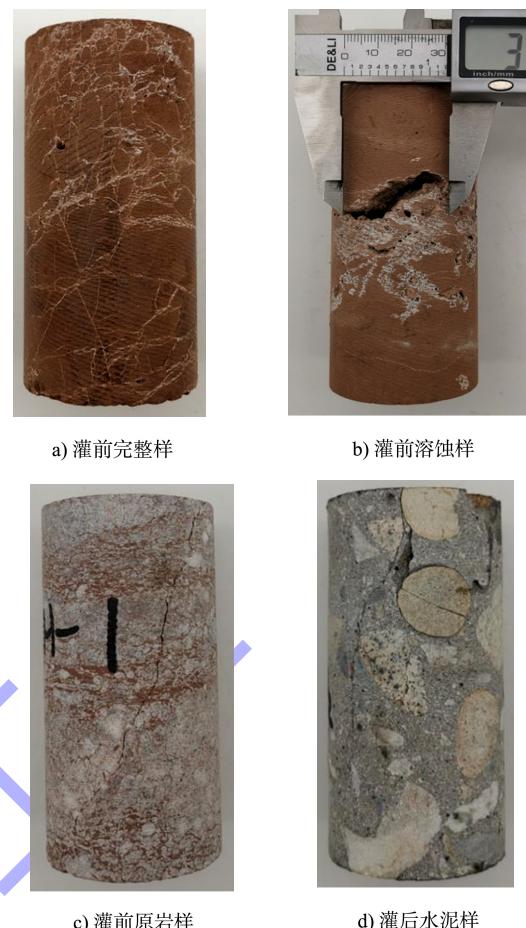


图 4 灌浆前后钻孔岩芯试样

灌浆前后岩样的物理性能指标见表 1。可以看出，灌浆前完整样天然密度范围 1.89~2.35 t/m³，平均值为 2.15 t/m³；溶蚀样天然密度范围 1.96~2.34 t/m³，平均值为 2.14 t/m³。完整样与溶蚀样天然密度范围及平均值无明显差异，由于石膏、溶蚀孔隙的存在，试样天然密度离散性相对较大。灌浆后原岩样天然密度范围 2.30~2.38 t/m³，平均值为 2.33 t/m³；水泥样天然密度范围 2.35~2.44 t/m³，平均值 2.40 t/m³。灌浆后岩块天然密度由 2.14 t/m³ 提高到 2.33 t/m³，提高幅度为 8.88%。

表 1 灌浆前后岩样物理性能指标

试样分组	试样类别	数量/个	天然密度/(t·m ⁻³)		纵波波速/(km·s ⁻¹)	
			区间值	平均值	区间值	平均值
灌浆前	完整样	24	1.89~2.35	2.15	0.848~2.571	1.814
	溶蚀样	6	1.96~2.34	2.14	0.922~2.408	1.729
灌浆后	原岩样	11	2.30~2.38	2.33	2.538~2.801	2.673
	水泥样	7	2.35~2.44	2.40	3.678~4.310	3.995

2.2 弹性纵波波速对比

利用四川大学 V-Meter MK IV型声波测速仪开展岩块纵波波速测试, 结果见表 1。灌浆前完整样波速范围 0.848~2.571 km/s, 平均值为 1.814 km/s; 溶蚀样波速范围 0.922~2.408 km/s, 平均值为 1.729 km/s; 灌浆后 11 个原岩样波速范围 2.538~2.801 km/s, 平均值 2.673 km/s, 水泥样波速范围 3.678~4.310 km/s, 平均值 3.995 km/s。

由岩块波速结果可以看出, 灌浆前完整样与溶蚀样波速值离散性大, 其范围及平均值无明显差异, 说明岩样内部溶蚀孔隙分布不均, 相对孤立且连通性差, 即使完整样也可能在内部存在闭合的溶蚀孔隙。灌浆后水泥样纵波波速更高, 说明水泥浆内部结构更加完整, 灌后样平均波速较灌前样高约 47%。结合试样外观分析, 灌后样更加完整致密, 未发现灌浆液填充孔隙现象, 因此认为是由岩石本身差异引起, 而非固结灌浆对岩块物理性质的强化。

2.3 单轴压缩试验

试样单轴抗压强度采用中国科学院成都分院山地灾害与环境研究所 MTS 815 混凝土测试系统为试验平台, 结果见表 2。

表 2 灌浆前岩样室内力学试验结果

试样分组	试样编号	岩块纵波波速/ (km·s ⁻¹)		单轴抗压强 度/MPa	
		试验值	平均值	试验值	平均值
灌前 完整样	A-GQ-4	1.386		2.05	
	A-GQ-6	1.673		2.77	
	A-GQ-19	-		2.81	
	A-GQ-13	2.193	1.651	3.31	8.22
	A-GQ-7	1.822		4.46	
	A-GQ-1	1.938		4.97	
灌前 溶蚀样	A-GQ-15	0.935		19.60	
	A-GQ-12	1.613		25.77	
	B-GQ-3	2.408		4.26	
	B-GQ-39	0.922		5.22	
	B-GQ-40	1.449	1.675	5.76	8.69
	B-GQ-41	1.873		13.37	
	B-GQ-42	1.724		14.83	

续表 2

试样分组	试样编号	岩块纵波波速/ (km·s ⁻¹)		单轴抗压强 度/MPa	
		试验值	平均值	试验值	平均值
灌后 原岩样	A-GH-1	2.551		19.14	
	A-GH-18	2.618	2.629	21.64	22.21
	A-GH-17	2.717		25.84	
灌后 水泥样	B-GH-4	3.678		37.30	
	B-GH-2	3.717	3.698	54.06	45.68

由表 2 可知, 除 A-GQ-12 和 A-GQ-15 号样外, 灌前完整试样的单轴抗压强度最小值 2.05 MPa, 最大值 4.97 MPa, 平均值为 3.51 MPa。灌后原单轴抗压强度平均值为 22.21 MPa; 水泥样单轴抗压强度平均值为 45.68 MPa。

由灌前完整样与溶蚀样的单轴抗压强度试验值可看出, 其离散性较大, 平均值差别不大, 说明船闸地基内岩石强度受控于岩样内孔隙大小及连通程度。灌后原岩样试验值与灌前样完整样中的较大值相近, 灌后水泥样强度试验值较原岩样有较大提升, 说明灌后岩石强度提高幅度受控于孔隙内水泥浆液充填程度, 即岩体可灌性: 若岩体内孔隙连通性好, 浆液可对大部分孔隙充填, 则将大幅提高岩体完整性、抗渗性及强度指标; 反之则灌浆效果不佳, 对岩体强度提高作用有限。

3 灌浆前后岩体原位试验

3.1 灌浆前后岩体纵波波速对比

在 9 个固结灌浆孔及 4 个检测孔内测得岩体纵波波速, 取建基面以下岩体纵波波速平均值, 见表 3。固结灌浆孔内测得灌浆前波速范围 2.154~2.620 km/s, 平均值为 2.321 km/s, 检测孔测得灌浆后波速为 2.229~2.444 km/s, 平均值 2.340 km/s。波速平均值仅提高 19 m/s, 约 0.82%, 说明固结灌浆对岩体的整体纵波速没有本质提高。

表 3 灌浆前、后建基面以下岩体纵波波速对比

钻孔	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	ZK6	ZK7	ZK8	ZK9	全区域平均
灌浆前波速/(km·s ⁻¹)	2.620	2.344	2.154	2.254	2.574	2.321	2.167	2.207	2.249	2.321
钻孔	GHZK1		GHZK2		GHZK3		GHZK4			
灌浆后波速/(km·s ⁻¹)	2.229		2.287		2.444		2.400		2.340	

固结灌浆后 4 个检测孔岩芯见图 5。可以看出，固结灌浆后 4 个检测孔揭露的石膏溶蚀孔洞均为原状，未见水泥浆固结物，说明岩体中发育的石膏孔洞是闭合、独立且随机的，水泥浆难以进入。



a) GHZK1



b) GHZK2



c) GHZK3



d) GHZK4

图 5 固结灌浆后 4 个检测孔岩芯

3.2 灌浆前后现场荷载试验

现场荷载试验按《工程岩体试验方法标准》^[8]执行，采用圆形承压板，直径 40 cm。试验中承压板周围岩体均未出现隆起、裂缝等明显变形破坏

情况，总变形量也远小于承压板直径的 1/12，因此承载力试验的终止加载条件设定为 $p-s$ (荷载-位移)曲线出现明显拐点(比例极限)，由于试验加载并未达到岩体的极限荷载，且从试验结果看，船闸地基岩体的极限荷载基本上都大于比例极限的 3 倍，因此取荷载试验 $p-s$ 曲线的比例极限值作为船闸地基的承载力特征值。典型的岩体承载力及变形试验曲线如图 6 所示。

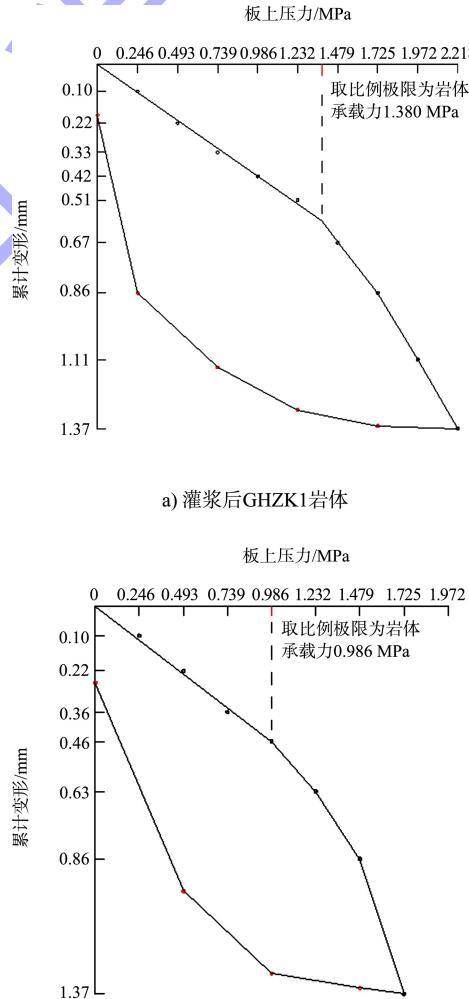


图 6 典型的岩体承载力-变形试验曲线

承压板荷载试验结果见表 4，取承压板下方 2.0 m 范围内岩体纵波波速的平均值作为对照。灌

浆后的 4 个试验点承载力范围 1.134~1.643 MPa, 最小值 1.134 MPa, 纵波波速 2.140~2.347 km/s; 未灌浆对比点承载力范围 0.986~1.972 MPa, 最小值 0.986 MPa, 对应的岩体纵波波速为 2.140~2.450 km/s。灌浆后岩基承载力试验值的离散性比未灌浆对比点低, 灌浆后岩基承载力最小值比未灌浆对比点提高约 15%。

表 4 灌浆后和未灌浆岩体承载力与对应波速

类型	编号	承压板下方 2 m 内岩体平均纵波波速/(km·s ⁻¹)	地基承载力/MPa
灌浆后试验点	GHZK1	2.246	1.380
	GHZK2	2.140	1.134
	GHZK3	2.252	1.479
	GHZK4	2.347	1.643
未灌浆对比点	DZK1	2.143	0.986
	DZK2	2.200	1.232
	DZK3	2.450	1.972
	DZK4	2.140	0.986

3.3 回归分析

表 4 中岩体平均纵波波速为 2.140~2.450 km/s, 在此范围内岩基承载力与纵波波速呈线性相关, 如图 7 所示。通过图中关系式可以给出工程区波速范围在 2.1~2.5 km/s 的岩体承载力。

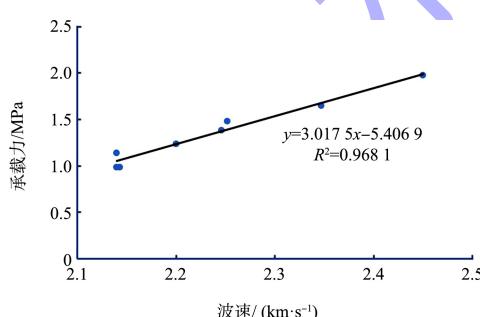


图 7 岩体承载力与纵波波速关系

4 结语

1) 尖子山船闸地基岩体内发育的石膏溶蚀孔隙多为相对孤立、连通性差的封闭孔隙, 浆液难以进入; 层间破碎带以碎块状为主, 局部软化, 透镜状分布, 与外界存在水力联系, 水泥浆可形成水泥柱体。二者可灌性差异大, 若采用单一指标评价岩体灌浆效果, 偏差较大。

2) 船闸区地基岩体的物性指标, 无论是天然密度还是纵波波速, 都体现出较强的离散性, 这与岩体内部溶蚀孔隙及石膏杂质的随机分布和发育关系密切。岩块单轴抗压强度与纵波波速测试值离散性强, 但其平均值呈正相关性, 即纵波波速越大, 岩块单轴抗压强度越大。

3) 通过现场荷载试验, 灌浆后岩石地基承载力特征值为 1.134 MPa, 未灌浆对比点承载力特征值为 0.986 MPa, 提高约 15%, 考虑到试验值的离散性及检测孔内取芯情况, 认为灌浆对承载力提升有限。

4) 承压板荷载试验测得地基承载力与持力层(承压板下方 2 m)范围内岩体纵波波速平均值呈较强的正相关性, 可在一定范围内推测工程区其他部位的地基承载力。

5) 灌浆对中风化砂质泥岩本身性能改善影响有限, 但对层间挤压破碎带胶结作用较为显著。可采用加密灌浆孔间距、减小孔深至穿透表层挤压破碎带的方向优化灌浆设计。

参考文献:

- [1] 全海.河床覆盖层高压旋喷灌浆效果检测[J].岩石力学与工程学报, 2006(2): 289-293.
- [2] 罗长军.帷幕灌浆技术在既有土坝可溶岩坝基中的应用[J].岩石力学与工程学报, 2004(22): 3910-3915.
- [3] 王川婴, LAWK T.钻孔摄像技术的发展与现状[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3440-3448.
- [4] 葛家良.化学灌浆技术的发展与展望[J].岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3384-3392.
- [5] 温帅, 汪家林, 刘道华, 等.辉绿岩脉复合灌浆试验加固效果研究[J].岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1231-1238.
- [6] 刘长武, 陆士良.水泥注浆加固对工程岩体的作用与影响[J].中国矿业大学学报, 2000(9): 454-458.
- [7] 冯海明.压水试验在岩溶路基注浆效果评价中的应用研究[J].中国岩溶, 2020, 39(2): 243-250.
- [8] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 水电水利规划设计总院, 中国电力企业联合会.工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S].北京: 中国计划出版社, 2013.