

# 河床覆盖层高压旋喷灌浆效果检测

全 海

(中国水电顾问集团 成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 随着灌浆技术的提高, 运用灌浆来处理软弱基础得到充分利用。在水电工程中, 黏土覆盖层基础用灌浆方案处理还很少见, 采用何种有效灌浆方法仍在探索中。通过水电工程实例, 详细介绍河床覆盖层高压旋喷灌浆处理后, 运用钻孔取岩芯、压水试验、载荷试验、声波测试等一系列检测方法和手段, 取得相关技术指标, 综合评价河床覆盖层灌浆效果, 论证河床覆盖层经高压旋喷灌浆处理后不满足重要建筑物基础设计要求, 该复合地基不能用作重要建筑物的基础。

**关键词:** 岩土工程; 河床覆盖层; 高压旋喷灌浆; 效果检测; 物理力学性质; 载荷试验; 声波测试

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)02 - 0289 - 05

## DETECTION OF EFFECT OF HIGH-PRESSURE ROTARY SHOTCRETING GROUTING ON RIVER BED COVER

QUAN Hai

(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, China Hydropower Consulting Group, Chengdu, Sichuan 610072, China)

**Abstract:** With the development of grouting technique, it is widely used to treat soft soil. But in water conservancy and hydroelectric engineering, it is still very little to treat clay foundation with grouting. Through an engineering case, a series of detection methods, such as rock coring, high pressure water and loading test, and sonic test, ect., are described in detail. At the end, it is pointed out that the river bed cover treated with grouting can't be used as composite foundation.

**Key words:** geotechnical engineering; river bed cover; high-pressure rotary shotcreting grouting; effect detection; physico-mechanical property; loading test; sonic test

### 1 引言

近年来,随着灌浆技术和施工技术不断的提高,愈来愈多的工程中都运用了灌浆技术来处理软弱基础,在处理后的软基上修建重要的建筑物。

在中小型水电站工程中,永久性建筑物(如挡水泄水建筑物、厂房、开关站等)一般应建在基岩上。但有时坝址区地质条件差,覆盖层深,如果全部开

挖,工程量大,工期长,投资经费就要增大。利用现有的处理技术来改善软基的质量,使其能满足承载力、变形稳定等设计要求,减少投资额度,为一具有巨大经济效益的技术问题。河床覆盖层根据地质条件不同,其处理方法也不尽相同。河床覆盖层处理后,对其是否满足质量效果、满足设计需求作出评估,就必须对处理后的复合基础进行检测,取得一系列相关技术指标,来充分评价河床覆盖层处理效果,判断其是否满足设计要求。

**收稿日期:** 2005 - 08 - 29; **修回日期:** 2005 - 10 - 08

**作者简介:** 全 海(1974 - ),男,1997年毕业于西安理工大学水利水电工程专业,现任工程师,主要从事水利水电工程中岩石力学及工程检测等方面的研究工作。E-mail: quanhai2002@hotmail.com。

在四川雅砻江某一梯级水电工程中，电站永久性建筑物的基础为河床覆盖层，深达 20 m，开挖量约为  $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，岩石开挖量约为  $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。河床覆盖层从上至下分为 3 层：第 1 层为砂卵石层，厚度小；第 2 层为青灰色粉砂质黏土层，分布连续，较厚，右岸覆盖层深达 20 余米；第 3 层含漂卵石层，厚度小。为了减小开挖工程量、缩短施工工期，拟对覆盖层进行灌浆处理，检测评价处理后的复合地基能否满足设计要求。针对特定的地质条件，采用了高压旋喷灌浆技术进行试验。高压旋喷灌浆的工艺，在钻孔中通过高压气流切割扰动原黏土层，同时泵进高压水泥浆来置换扰动后的土层，待凝固后形成水泥和土胶结的复合地基。高压旋喷灌浆重点对象为河床覆盖层的第 2 层，论证能否充分利用处理后的覆盖层作为重要建筑物的基础。

## 2 灌浆效果检测方法

河床覆盖层主要为青灰色粉砂质黏土层，土层密实，比重大，不透水，易液化。依据基础设计技术要求，必须满足承载力、透水性等条件，同时评价灌浆工艺的可行性。根据围井高压旋喷灌浆工艺、目的及设计要求，主要研究河床覆盖层在高压旋喷灌浆处理前、后的物理力学性质等，制定了一套检测试验方案，综合评价覆盖层灌浆的效果<sup>[1~7]</sup>。检测试验主要包括检查孔内取芯观察、压水(或注水)试验，现场大型载荷试验，检查孔声波测试<sup>[8~11]</sup>，围井开挖目检等。检测试验均按相关规范和规程执行<sup>[12~14]</sup>。

载荷试验位置、检查孔和声波测试孔的布置见图 1。

## 3 检测成果及效果评价

### 3.1 钻孔取芯、标贯试验及压水(或注水)试验

灌浆试验三序孔待凝 14 d 后，在 3 个灌序桩上钻检查孔取芯，同时每 2 m 孔深进行一次标贯试验。检查孔上部 5 m 有较完整的岩芯，主要为水泥结石土，质轻性脆且大部分呈蜂窝状，在不排除机械破碎外也说明水泥结石土强度较低；下部主要为原状土，局部可见水泥结石。孔深 0~5 m 标贯试验平均击数为 30.6 击，相应承载力  $>0.7 \text{ MPa}$ ，比原状土

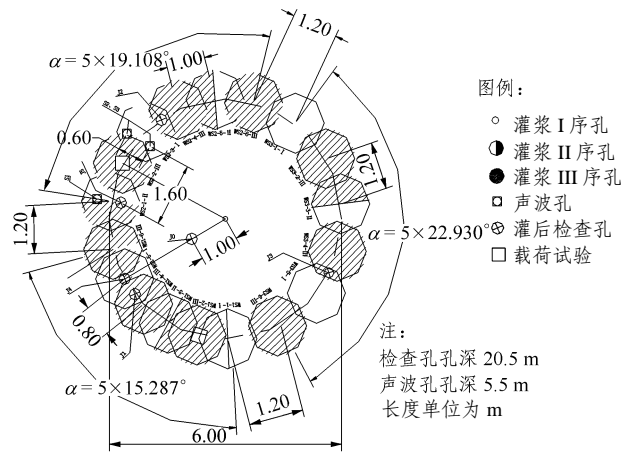


图 1 载荷试验、检查孔和声波测试孔布置图

Fig.1 Arrangement plan of checking bore, sonic test bore and loading test

的承载力有提高；5~20 m 击数为 11.0~15.6 击，承载力为 0.280~0.385 MPa，相对于原状土变化不大，承载力无明显提高。

在检查孔中进行全孔注水试验，计算出各孔段的渗透系数见表 1，渗透系数  $k$  值满足设计要求。

表 1 各孔段的渗透系数表

Table 1 Permeability coefficients of different sections in the checking bore

孔号	孔深/m	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
J1(灌后)	4.00	$4.5 \times 10^{-6}$
	8.00	$2.2 \times 10^{-5}$
J5(灌后)	20.55	$3.2 \times 10^{-7}$
J0(原状土)	20.50	$2.8 \times 10^{-7}$

### 3.2 土层灌浆前、后的物理力学性质

取灌浆前、后的土样，进行物理力学性质试验。土样分别取于不同灌浆序列和不同深度，具有较广泛的代表性，试验成果见表 2。

由表 2 可知，比较土体的干密度值，灌浆后比灌浆前干密度值偏低。表明灌浆后密实度降低，土样孔隙率大，与现场检查孔岩芯呈蜂窝状相吻合，分析成因与灌浆工艺中使用气流有关，部分气体被封闭形成较小气泡。灌浆前剪切试验，内摩擦角为  $21.8^\circ \sim 17.5^\circ$ ，黏聚力为 0.005~0.024 MPa；灌浆后抗剪强度提高不大，部分试点的抗剪强度还低于原状土。表明灌浆后水泥结石土较为疏松。灌浆前压缩试验，压缩系数  $a_{v0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}}$  为  $0.371 \sim 0.194 \text{ MPa}^{-1}$ ，

表 2 灌浆前、后物理力学性质试验成果  
Table 2 Results of physico-mechanical properties of clay and grouted clay

土样 编号	取土深度 $h/m$	物理性指标							分类	
		湿密度 $\rho$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	干密度 $\rho_d$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	孔隙比 $e$	含水率 $\omega$ /%	液限 $\omega_L$ /%	塑限 $\omega_p$ /%	塑性指数 $I_p$ /%		比重 $G_s$
J1	2.0~2.5	1.85	1.38	0.841	34.50	38.1	26.0	12.1	2.82	CL
J2	6.0~7.0	1.74	1.36	0.882	28.50	—	—	—	2.79	—
J3	7.0~7.5	1.87	1.57	0.845	18.90	—	—	—	2.62	—
J4	7.3~7.5	1.94	1.50	0.720	29.50	—	—	—	2.79	—
J5	9.0~10.0	1.77	1.35	0.904	31.30	—	—	—	2.57	—
6	1.5~1.6	1.49	1.45	0.800	3.01	—	—	—	2.61	—
7	9.5~9.6	1.43	1.32	0.970	8.60	—	—	—	2.60	—
Q1	0.5~1.0	1.85	1.38	0.986	34.30	—	—	—	2.74	—
Q2	13.0~14.0	1.93	1.48	0.851	30.50	33.5	21.4	12.1	2.81	CL
H1	0.5~1.0	1.54	1.13	1.221	36.30	—	—	—	2.51	—
H2	8.0~9.0	1.74	1.16	1.345	49.60	—	—	—	2.72	—
H3	12.0~130.0	1.57	0.96	1.510	64.00	—	—	—	2.41	—

为中压缩性土，压缩模量  $E_{s0.1 \sim 0.2 MPa}$  为 9.57 MPa；灌浆后，压缩系数  $a_{v0.1 \sim 0.2 MPa}$  为 0.208~0.206 MPa<sup>-1</sup>，为中压缩性土，压缩模量  $E_{s0.1 \sim 0.2 MPa}$  为 5.53~9.57 MPa。表明灌浆前、后土样压缩特性相当。灌浆前渗透系数为  $3.12 \times 10^{-4} \sim 1.92 \times 10^{-7} cm/s$ ，为较弱~极弱透水性土；灌浆后，渗透系数为  $5.23 \times 10^{-7} \sim 4.29 \times 10^{-5} cm/s$ ，为较弱~极弱透水性土，表明灌浆前、后土体渗透性相当的特性。上述分析反映了高压旋喷灌浆对于青灰色粉质黏土其可灌效果差异太大。

灌浆后水泥土磨片鉴定成果见表 3。鉴定定名均为弱胶结含钙质黏土岩。其均为不规则状细小孔隙较发育，看不到碳酸盐矿物，岩性较弱，一定程度上表明其灌浆效果较差。

3.3 现场载荷试验

灌浆后，在现场进行了 2 组水泥土载荷试验，承载板位于灌浆孔中心，成果见表 4 和图 2。表明现场承载试验成果可代表该高压旋喷灌浆后 0~3 m 范围内的承载能力。重粉质砂壤土在高压旋喷灌浆后，其浅部承载能力有较大的提高。

3.4 声波测试试验

采用灌浆前、后测试土体单孔测井和跨孔穿透声波速度，通过对比灌浆前、后声速的变化来评价灌浆的质量效果。灌浆前检查孔 J0 的单孔测井声速

表 3 磨片鉴定表  
Table 3 Name of the soil samples

野外 编号	钻孔取样 深度/m	岩样 编号	鉴定 定名	特征
TZK 1-1	1.50~ 1.60	13	弱胶结 含钙质 黏土岩	岩石组分主要由隐晶质黏土质成分组成，含少许石英碎屑及岩屑，不规则状细小孔隙较发育，并含少许细粒有机碳屑。加酸强烈起泡，但看不到碳酸盐矿物，岩性较弱
TZK 1-2	9.50~ 9.60	14	弱胶结 含钙质 黏土岩	隐晶质泥质结构。岩石组分主要由隐晶质黏土组成，含少许微粒状石英碎屑及绿帘石碎屑，不规则状细小孔隙较发育，并含较多呈细分散状分布的黑色碳屑。加酸强烈起泡，但看不到碳酸盐矿物，岩性较弱

表 4 现场载荷试验成果表  
Table 4 Results of loading test

试验 编号	试验位置	承载力 $P_f$ /MPa	相应沉 降量 $S$ /cm	变形模 量 $E_0$ /MPa
TWJHE1	0.8 m 序孔，距该 层顶部 1.0 m 处	0.85	0.26	118.6
TWJHE2	1.0 m 序孔，距该 层顶部 1.0 m 处	$\geq 0.90$	0.21	155.6

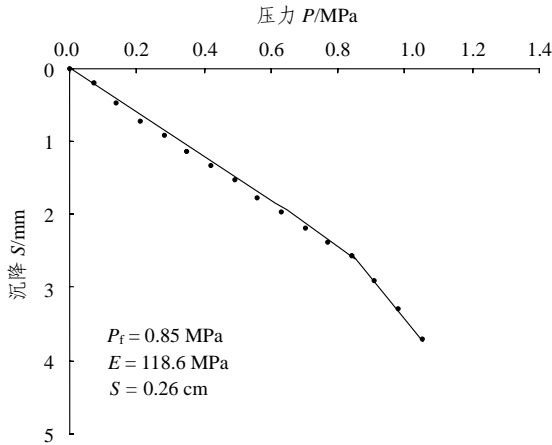


图2 TWJHE1 现场载荷试验 P-S 关系曲线

Fig.2 Relationship between P and S of in-situ loading test of TWJHE1

随孔深变化幅度小，总体趋势是声速随深度增加略微增大，在短间距内较稳定。该地层较均匀，成分及物理性质较稳定，单孔测井声速与该孔的地层相吻合。灌浆后各单孔测井声速随深度增加而减小，深部声速与原状土相近。

在灌浆后孔深 0~5 m 的单孔测井声速比灌浆前有所提高，但提高幅度不大。分析原因为：(1) 孔径不稳定；(2) 水泥结石土呈蜂窝状，灌浆前、后的干湿密度对比也佐证了水泥结石土不密实。从孔位分析，J1, J2, J3, S1, S2, S3 位于桩的搭接处或桩边沿，J4, J5 位于桩中，将它们的单孔测井声速进行对比分析发现，其与孔深 0~5 m 的声速平均值相当，表明浅层灌浆效果在铅直方向基本一致，比灌前有一定的提高。在桩中心 J4 单孔测井声速比其他的大，通过开挖后的目检发现桩中心的水泥结石多、强度高。

在灌浆后孔深 5~20 m 内，单孔声速值都较低，部分单孔测井声速大于灌浆前平均声速，表明灌浆后声速有所改善，或者是孔壁直径有变化。在检查孔深部，部分测段灌浆前、后单孔声速相当，变化甚微，且有一定的差异，反映出深部灌浆效果较差，从深部取芯的水泥结石含量也得到佐证。

在灌浆后孔深 0~5 m 的穿透声速变化幅度大，不稳定，表明桩与桩之间搭接后的介质不完善、不均匀。声速大的部位桩间搭接范围大，反之搭接范围小，所有桩都有不同程度的变径现象。在深部穿透声速变化幅度较小，与灌浆前声速值相当，通过岩芯及标贯的无扰动芯也发现水泥结石少、甚至为原状土层。

声波测试成果充分反映了灌浆液在灌浆孔水平方向和铅直方向的扩展及延伸状况，在一定程度上也反映了水泥结石的含量状况。开挖后目检结果与声速反映的情况完全相吻合。

### 3.5 开挖检查

为了验证灌浆检测手段的可靠性和科学性，在现场开挖整个围井内侧，深度为 15 m，目检各个灌浆间距和灌序灌浆效果。围井 2 m 以上灌浆效果最好，桩的强度较高，桩之间互相搭接范围大，无变径现象。在 2~3 m 之间出现局部搭接不连续现象，7 m 以下桩径普遍缩径，桩体与原状土的区别越来越小，甚至两者区分不开。从不同孔距分析，0.8 和 1.0 m 孔距的桩在 3~7 m 搭接紧密、连续性较好，随着深度增加桩间搭接状态越来越差；1.2 m 孔距的桩搭接较少，个别有不搭接现象，深部与浅部的桩型差异较大。

## 4 结 论

四川雅砻江水电工程河床覆盖层经过高压旋喷灌浆处理，通过灌浆前后检测，围井浅部整体性较好，深部出现缩径和消失现象，表现为灌浆搭接不完善、不均匀，灌浆效果不理想。所采取的声波检测结果也表明了这一点，现场开挖目检也得到充分验证。

围井浅部土体的干密度变小，孔隙率变大，质轻性脆且部分呈蜂窝状，标贯、渗透率、压缩特性等指标均无明显变化。0.8 或 1.0 m 灌浆序列形成的水泥土都有较高的承载能力和较大的变形模量值。高压旋喷灌浆后对 0~3 m 重粉质砂壤土有明显的力学性能改善作用。深部土体接近原状土或就是原状土，说明高压旋喷灌浆对于青灰色粉质黏土可灌效果差异太大。

河床覆盖层高压旋喷灌浆后在 0~3 m 效果较好，但整体效果不理想，建议不采用高压旋喷灌浆围井方案。分析原因可能与土体的组分有关，土体为粉砂质黏土层，黏土含量高，可灌性较差；在高压旋喷灌浆工艺中，使用高压气流切割土体后置换时气体很难排尽，导致灌浆后土体疏松，各项物理力学指标无明显变化，反映了高压旋喷灌浆对于青灰色粉质黏土可灌效果较差。

综上所述，对于青灰色粉质黏土覆盖层采用高压旋喷灌浆处理后，复合地基均匀性较差，孔隙比

较大,承载力不足,不满足建筑物基础的要求,不能作为重要建筑物的基础。

### 参考文献(References):

- [1] 白冰. 冲击荷载作用下饱和软黏土强度预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 645 - 649.(Bai Bing. Model for predicting shear strength of saturated soft clay after impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 645 - 649.(in Chinese))
- [2] 郑俊杰, 袁内镇, 张小敏. 多元复合地基的承载力计算及检测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 391 - 393.(Zheng Junjie, Yuan Neizhen, Zhang Xiaomin. Computation and testing methods for the bearing capacity of multi-element composite foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 391 - 393.(in Chinese))
- [3] 谢婉丽, 王家鼎, 张林洪. 土石粗粒料的强度和变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 430 - 437.(Xie Wanli, Wang Jiading, Zhang Linhong. Testing study on characteristics of strength and deformation for coarse materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 430 - 437.(in Chinese))
- [4] 朱志刚. 北京夕照寺小区4#住宅楼CFG桩复合地基质量问题分析处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 165 - 170.(Zhu Zhigang. Analysis and treatment of a quality problem of composite foundation of CFG piles for building No.4 in Xizhaosi residential area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 165 - 170.(in Chinese))
- [5] 阎明礼. 复合地基技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.(Yan Mingli. Technology of Composite Foundation[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.(in Chinese))
- [6] 陈铁林, 周成, 沈珠江. 结构性黏土压缩和剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 31 - 35.(Chen Tielin, Zhou Cheng, Shen Zhujiang. Compression and shear test of structured clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 31 - 35.(in Chinese))
- [7] 马海龙, 陈云敏. 水泥土桩长等对承载力及模量影响的定量分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 720 - 723.(Ma Hailong, Chen Yunmin. Quantitative analysis of the influence of pile length and other factors on capability and moduli of cement stabilized soil composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 720 - 723.(in Chinese))
- [8] 范留名, 李 宁. 软弱夹层的透射模型及其隔震特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 456 - 2 462.(Fan Liuming, Li Ning. Transmission model of weak intercalation and its vibration isolation properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2 456 - 2 462.(in Chinese))
- [9] 彭苏萍, 谢和平, 何满潮, 等. 沉积相变岩体声速速度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 831 - 2 837.(Peng Suping, Xie Heping, He Manchao, et al. Experimental study on velocity characteristics of lithofacies transition rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 831 - 2 837.(in Chinese))
- [10] 徐鸣洁, 钟 锴, 余 缙, 等. 南京地铁工程勘察中声波测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1 018 - 1 024.(Xu Mingjie, Zhong Kai, Yu Jin, et al. Acoustic measurement and analysis of Nanjing subway engineering investigation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1 018 - 1 024.(in Chinese))
- [11] 赵明阶, 吴德伦. 工程岩体的超声波分类及强度预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 89 - 92.(Zhao Mingjie, Wu Delun. The ultrasonic identification of rock mass classification and rock mass strength prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 89 - 92.(in Chinese))
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程(DLJ204 - 81, SLJ2 - 81)[S]. 北京: 水利出版社, 1982.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Engineering(DLJ204 - 81, SLJ2 - 81)[S]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1982.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程(SL264 - 2001)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Engineering(SL264 - 2001)[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程(补充部分)(DL5006 - 92)[S]. 北京: 水利电力出版社, 1993.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Engineering(Supplemental Part)(DL5006 - 92)[S]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1993.(in Chinese))