

# 高压旋喷桩复合地基在大型填充性溶洞处理中的应用

游 强, 游 猛

(宜宾学院经济与管理学院, 四川 宜宾 644000)

**摘 要:**以采用高压旋喷桩加固处理某隧道工程施工过程中遇到的填充性岩溶地质问题为例, 详细介绍了高压旋喷桩加固软基方法, 包括桩的平面布置、水泥浆配制、注浆量及注浆压力、施工工艺、复合地基强度计算和室内试验与现场检测效果评价等。指出采用高压旋喷桩复合地基处理填充性溶洞可操作性强, 加固效果及经济性良好, 可为类似工程的地基处理提供借鉴。

**关键词:**填充性溶洞; 高压旋喷桩; 复合地基; 加固; 检测

**中图分类号:** TU 472.6

**文献标识码:** B

高压旋喷桩是利用高压喷射水泥浆液与土混合固化处理软弱地基的一种方法。它是利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻至土层预定位置, 以高压发生装置(高压注浆泵)使水泥浆液或水以 20 MPa—40 MPa 的高压喷射流从喷嘴中高速喷出, 当其连续集中作用在土体上时, 高压喷射流巨大的冲击和搅动作用可使注入的水泥浆液和土拌合凝固为新的固结体(旋喷桩), 从而使地基获得加固。高压旋喷桩法的施工全过程可分为钻机就位、钻孔、置入注浆管、高压喷射注浆、拔出注浆管和机具清洗等工序。施工中一般分为两个工作流程, 即先钻后喷, 然后提升搅拌。高压旋喷桩法处理软基效果主要取决于喷射注浆压力及土质条件。

高压旋喷桩<sup>[1]</sup>适用于处理淤泥、淤泥质土、流塑、软塑或可塑粘性土、粉土、黄土、砂土、素填土和碎石土等地基。由于其具有处理深度较大(国内目前处理深度 30m 以上)、施工设备简单、轻便、噪声和振动小、施工速度快、机械化程度高和成本低用途广等优点, 在国内外得到广泛应用<sup>[2]</sup>。

## 1 工程设计与施工

### 1.1 工程概况

万(州)开(县)高速公路某隧道位于重庆市开县赵家镇境内, 隧道全长 4 828 米, 隧道进口开挖揭示发育一大型全充填溶洞, 主要充填有黄褐色软塑—硬塑粘土夹碎石、松散—中密块石土, 加固前粘土地基的承载力为 140 kPa。地基主要受力层范围内存在岩溶, 在附加荷载或振动作用下, 会使地基变形坍塌, 当其上覆土层厚度

不均或不厚时, 往往会导致地基产生不均匀沉降。本工程隧道在施工过程中, 就多次发生临时支护拱部开裂及大面积坍塌, 为保证隧道施工的安全及正常可靠运行, 有必要对该段软基进行加固处理。针对现场具体情况, 建设、设计及施工单位曾多次研究处理方案, 一开始曾提出采用换填处理、桥梁跨越或碎石桩等处理方案, 但考虑到换填工程量巨大而桥梁跨越或碎石桩方案则施工难度大、无操作空间、经济性差, 经仔细比较各种加固方法, 最终确定采用高压旋喷桩加固方案。

### 1.2 桩位布置

根据工程勘察资料, 隧底软基采用高压喷射注浆(旋喷桩)加固, 间距布置: 衬砌边墙外侧各采用一排  $\Phi 75$  斜向钢花管注浆加固, 交错布置, 纵向间距 65 cm, 横向间距 100 cm; 隧底采用 M7.5 浆砌片石换填。中间行车部分纵横向桩位间距 1 m, 梅花型布置; 基底加固深度根据岩溶深度确定: 若岩溶深度小于 15 米, 则其加固深度进入基岩不小于 50 cm; 若岩溶深度大于 15 米, 加固深度按 15 米控制; 具体桩位布置示意图如图 1 所示。

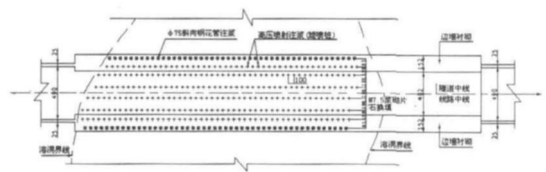


图 1 隧底加固高压旋喷桩位布置图

### 1.3 水泥浆的配制

注浆材料参考文献 [3] 采用强度等级为 32.5 的普

通硅酸盐水泥浆为主剂,并掺入 2% - 3% 速凝早强剂 CaCl<sub>2</sub>, 施工中采取的水灰比 W : C = 1 : 1 - 1.5 : 1。

### 1.4 注浆压力

根据该隧道岩溶揭示的充填物岩性特征,隧底采用高压喷射注浆(旋喷桩)加固,注浆压力 > 25 MPa。旋喷注浆治理过程中,压力选择为<sup>[4]</sup>: 0- 3 m 时,采用 27 MPa 3 m 以下时,采用 25 MPa。

### 1.5 注浆量

注浆量受岩土条件、浆液类型、注浆技术水平及岩土裂隙分布等多种因素影响。因此,计算注浆量往往与实际的注入量相差很大,一般通过试验注浆予以修正。设计时可用下式计算<sup>[5]</sup>:

$$Q = An\alpha(1 + \beta) \tag{1}$$

式中, Q 为总注浆量, m<sup>3</sup>; A 为注浆范围岩层体积, m<sup>3</sup>; n 为围岩空隙率(%);  $\alpha$  为浆液充填系数,一般在 0.7 - 0.9 之间;  $\beta$  为注浆材料损耗系数,通常 0.1 左右。

可把  $n\alpha(1 + \beta)$  统称为填充率,土质地层及岩石地层的填充率相差较大,表 1 为不同地层填充率的经验数值。

表 1 土质和岩石地层填充率

地质条件	填充率 (%)
粘土质地层	20- 40
砂砾质地层	40- 60

该隧道地质条件为粘土、碎石土、块石土和人工填土等土层。

土质地层(粘土质地层)每米的注浆量为:

$$Q = An\alpha(1 + \beta) = 3.14 \times \frac{0.45^2}{4} \times 0.40 = 0.064 \text{ m}^3$$

土质地层(砂砾质地层)每米的注浆量为:

$$Q = An\alpha(1 + \beta) = 3.14 \times \frac{0.45^2}{4} \times 0.60 = 0.096 \text{ m}^3$$

因为隧底每根桩的地质条件为粘土质土层厚: 砂砾质土层厚  $\approx 0.55 : 0.45$  所以该段旋喷桩的平均每米注浆量为

$$Q = \frac{0.064 \times 0.55 + 0.096 \times 0.45}{0.55 + 0.45} = 0.078 \text{ m}^3$$

因浆液配合比为 1 : 1, 根据现场试验配合比确定每方水泥浆液水泥用量为 750 kg 则每米旋喷桩的水泥用量为:  $750 \times 0.078 = 58.5 \text{ kg}$

根据现场施工情况,修正系数取 3.4 则每米旋喷桩的水泥用量为:  $S = 3.4 \times 58.5 = 198.9 \text{ kg}$

根据《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB50202- 2002), 桩径为 450 mm 的高压喷射注浆地基每米的水泥(强度为 32.5 普硅水泥)用量经插入法计算为 150 Kg - 200 Kg, 则现场施工的水泥用量与规范相符合,表明修正系数符合要求。

### 1.6 施工工艺要求

影响高压旋喷注浆增强体质量的因素很多,其中,施工工艺是主要因素之一。旋喷注浆时要求自下而上连续进行,若注浆管不能一次提升完成,需分成数次卸管时,卸管后再喷射注浆的搭接长度应不小于 100 mm,以保证桩体的连续和整体性。

### 1.7 防脱空措施

采用纯水泥浆液喷射时,在浆液与土粒搅拌混合后的凝固过程中,由于浆液析水作用,一般均会发生不同程度的收缩,从而在桩体顶部形成一个空穴,造成以加固的地基和基础间出现脱空现象,影响加固效果。为防止脱空,可采用超高旋喷(旋喷处理地基的顶面超过基础底面,其超高量大于收缩高度)。在本工程施工中,采取在溶洞桩位处填土,填土高度高出桩顶设计标高 0.6 m,有效防止了因浆液的凝固收缩而产生的脱空现象。

## 2 加固效果评价

### 2.1 室内试验

在施工完成后,对桩身强度进行室内试准验,以得到相关参数。在室内制作了 3 组标试件进行无侧限抗压强度,具体试验结果见表 2

表 2 水泥土试验结果

28d 无侧限抗压强度 (MPa)	容重 (KN/m <sup>3</sup> )	C (MPa)	$\phi$ (°)	泊松比	割线模量 (MPa)	平均模量 (MPa)
5.4 - 18.8	17 - 21.5	1.2 - 3.5	41 - 45	0.28 - 0.35	4.1 - 20.7	6.3 - 18.5

### 2.2 旋喷桩加固后复合地基强度计算

确定加固后复合地基的承载力时,首先要明确其破坏模式,根据文献[6]介绍,竖向增强的复合地基主要具有桩身破坏和桩体与桩间土组成的复合地基的整体失稳两种破坏模式。

根据室内试验与地质勘察资料,旋喷桩加固该填充性岩溶地基的承载力特征值计算如下。

#### 2.2.1 单桩竖向承载力标准值

根据上述室内试验成果与地质勘察资料,旋喷水泥土桩单桩竖向承载力特征值  $R_a$  应分别按式(2)与式(3)计算,然后取两式计算值的较小者。

$$R_a = \eta \cdot f_{cu} \cdot A_p \tag{2}$$

式中,  $R_a$  为单桩竖向承载力标准值 (KN);  $f_{cu}$  为旋喷桩桩身试块(边长为 70.7 mm 的立方体)的无侧限抗压强度平均值,根据上述室内试验,取 28 d 强度值为 5400 kPa  $\eta$  为强度折减系数,取为 0.40  $A_p$  为桩身截面积,桩平均直径为 0.5 m, 则:  $A_p = \pi \times 0.5^2 / 4 = 0.196 \text{ (m}^2\text{)}。$

代入以上数据,求得

$$R_a = 0.4 \times 5400 \times 0.196 = 424 \text{ KN}$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} \cdot l_i + A_p q_p \tag{3}$$

式中,  $u_p$  为桩身截面平均周长  $u_p = \pi d = 3.14 \times 0.5 = 1.57 \text{ m}$   $n$  为桩长范围内所划分的土层数,取为 1;  $h_i$  为桩周第  $i$  层土的厚度,取为 18 m;  $q_{si}$  为桩周第  $i$  层土的摩擦力标准值,可采用钻孔灌注桩桩侧壁摩擦力标准值,取为 15 kPa  $q_p$  为桩端天然地基土的承载力标准值,取 140 kPa

代入以上数据,得

$$R_a = 1.57 \times 18 \times 15 + 0.196 \times 140 = 452 \text{ KN}$$

式(2)与式(3)计算结果取小值,则单桩竖向承载力特征值  $R_a$  为 424 KN。

### 2.2.2 复合地基承载力标准值

若按第二种破坏模式,即按复合地基考虑,则复合地基承载力标准值为:

$$f_{pk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{sk} \quad (4)$$

式中,  $f_{pk}$  为复合地基承载力特征值 (kPa);  $m$  为桩土面积置换率,  $m = \frac{A_p}{A_c}$ ;  $A_c$  为 1 根桩承担的处理面积, 根据本工程桩位布置经计算得  $A_c = 0.937\text{m}^2$ ;  $A_p$  为桩的平均截面积, 取  $0.196\text{m}^2$ , 于是,  $m = \frac{A_p}{A_c} = \frac{0.196}{0.937} = 0.209$ ;  $f_{sk}$  为桩间土天然地基承载力特征值, 取为  $40\text{kPa}$ ;  $\beta$  为桩间天然地基土承载力折减系数, 在无试验资料时, 取为  $0.40$ ;  $R_a$  为单桩竖向承载力特征值, 按上述计算结果取为  $424\text{KN}$ .

代入以上数据, 则得:

$$f_{pk} = 0.209 \times \frac{424}{0.196} + 0.4 \times (1 - 0.209) \times 40 = 464.8\text{KN}$$

综上所述可知, 加固后复合地基的承载力比加固前承载力  $140\text{kPa}$  提高了  $2.32$  倍, 且大于加固要求达到的承载力  $400\text{kPa}$ , 这说明选用高压旋喷桩加固可以提高隧底填充性岩溶软基的承载力, 且加固效果显著.

### 2.3 旋喷桩加固后复合地基检测试验

#### 2.3.1 开挖检查

成桩 28 天后, 即可开挖检查. 由于固结体完全暴露出来, 因此能比较全面地检查旋喷水泥土桩的垂直度及成桩质量. 本工程开挖检查 20 个旋喷桩, 从开挖出来的桩来看, 旋喷桩垂直度较好, 固结体形态基本呈圆柱状, 扩径与缩径现象不明显, 开挖检查结果符合设计要求.

#### 2.3.2 钻孔检查

本工程成桩 28 天后钻孔检查了 25 根旋喷桩, 从钻取的岩芯观察到旋喷固结体整体性好, 最好的岩芯长达  $3\text{m}$  多, 其旋喷桩长度达到设计要求.

#### 2.3.3 荷载试验

对旋喷桩进行了 2 组载荷载板试验. 检查结果为单桩承载力大于  $410\text{KN} - 470\text{KN}$ , 桩间土的承载力大于  $210\text{kPa} - 230\text{kPa}$ , 满足设计要求 (经高压喷射注浆处理

后的复合地基承载力  $f_{pk} > 400\text{kPa}$ ).

综上所述, 填充性岩溶经过旋喷桩注浆处理后, 填充体变得致密, 复合地基整体性及强度得到大幅提高. 通车运营以来, 路面无下沉现象, 处理达到了预期效果.

### 3 结 论

(1) 该隧道工程的处理效果证明采用高压旋喷桩加固隧底大型填充性岩溶地基是一种“技术上可行, 经济上合理”的方案. 它具有技术成熟可靠, 施工速度快, 所用设备简单, 操作空间要求不大, 工程量较小, 投资省的优点. 经方案比较, 本工程采用旋喷桩的处理费用是其它方法的  $1/3 - 2/3$ . 如本工程曾计划采用预应力箱梁跨越溶洞区, 该法约需  $240$  万元左右, 采用换填处理费用约为  $310$  万左右, 分别较采用高压旋喷桩处理的  $150$  万元多出  $90$  万元和  $160$  万元.

(2) 隧底溶洞经高压喷射注浆处理后, 大大改善了填土的强度, 增强了基底土的整体性, 使得基底位移变形量以及地表土体沉降变形量明显减少, 大大增强了地基的稳定性及承载力;

(3) 旋喷桩作为填充性大型溶洞的处理方法, 可以有效降低换填的巨大工程量, 为填充性溶洞软弱地基的处理提供一个新思路, 尤其是高深基底无法换填时采用旋喷桩复合地基进行处理不失为一个较优的加固方法.

### 参 考 文 献:

- [1] JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范 [S].
- [2] 林目国, 李明华. 高压旋喷桩复合地基在整治隧道岩洞中的应用 [J]. 铁道工程学报, 2006(2): 64-66.
- [3] 左名麒, 刘永超, 孟庆文. 地基处理实用技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005
- [4] 李治国. 隧道岩溶处理技术 [J]. 铁道工程学报, 2002(4): 61-67.
- [5] 于洋, 周海鹰. 高压旋喷桩在工程中的应用研究 [J]. 四川建筑, 2007(1): 41-43
- [6] 谭世霖. 高压旋喷桩在高速公路软基处治中的试验研究 [J]. 水运工程, 2007(11): 33-36

## Application of High Pressure Jet Grouting Pile Composite Foundation in Large Filling Karst Cave Treatment

YOU Qiang<sup>1</sup>, YOU Meng<sup>2</sup>

(College of Economy and Management Yibin University, Yibin 644000, China)

**Abstract** Filling of the karst geological problems which meets in some tunneling construction process uses the high pressure jet grouting pile composite foundation to carry on reinforcement processing is the example. The high pressure jet grouting pile to reinforce the soft foundation method was introduced in details including pile plane layout, cement mortar disposition, the volume of slurry injection, the pressure of slurry injection, construction craft, composite foundation strength calculation, laboratory test and scene examination effect appraisal and so on. Pointing out that using high pressure jet grouting pile composite foundation treatment large filling karst cave treatment feasibility, the reinforcement effect and the economy are good, may provide for the similar project ground treatment processing for reference.

**Key words** filled karst cave; high pressure jet grouting pile; soft ground; reinforce; examination