粉喷桩加固有下卧倾斜基岩的软土地基工程实例

单华刚　汪　稔
（中国科学院武汉岩土力学研究所，武汉，430071）
李　勇
（贵州省地质矿产局清镇工程勘察公司，清镇，551400）

提　要　本文介绍了软土层下具有大倾斜度下卧基岩的粉喷桩地基加固工程，提出该类山区地基处理设计中，关键是要重视控制地基沉降量及沉降差。地基沉降量计算采用实体墩基法较为合适。

一　概　述

按现行地基基础规范规定，下卧基岩层表面坡度超过 10° 的地基是一种典型的土岩组合山区地基，在设计中必须特别加以重视，并作变形验算。本文所介绍的粉喷桩加固工程，下卧倾斜基岩最大倾角达 45° 以上，而且基岩面上有层厚为 14.0m～23.0m 不等的淤泥质粘土，是一种少见的复杂地基。在工程设计中，选用长短桩组合的粉喷桩地基处理方法，不仅成功解决了软土地基承载力不足问题，而且减少了因倾斜下卧基岩层所产生的不均匀沉降问题。

二　工程概况

拟建住宅楼位于贵州省威宁县，楼房面积为 50.4m×9.0m,楼高七层，砖混结构，基础采用钢筋混凝土条形基础。要求地基处理后复合地基容许承载力 f_z=150kPa,沉降量符合 GBJ7-89 规定。

1.工程地质条件概况

施工场地地貌属于溶蚀洼地，地形平坦，地势较低洼，地下水位在 1.0m～3.0m 之间。场地东部地表为人工填土覆盖，西部地表为次生红粘土覆盖，下卧基岩为石炭系下统地层，具体地层描述如下：

(1)人工填土：褐黄、褐黑色，为粘土夹碎石，松散—稍密，厚 1.2m～2.0m；

(2-1)次生红粘土：黄色，可塑状，厚 0.6m～2.1m，天然地基承载力标准值为 140kPa；

(2-2)淤泥质粘土：灰黑色，可塑状，厚 2.0 m～3.4m，天然地基承载力标准值为 90kPa；

(3-1)淤泥质粘土：黑色，软塑状，厚 1.5m～3.3m，天然地基承载力标准值为 70kPa；

(3-2)淤泥质粘土：灰绿色，软塑状，局部地段为流塑状，厚 7.5m～18.6m，天然地基承载力标准值为 70kPa，压缩模量仅为 2.20MPa；

(4)基岩：中厚层灰岩，西部为灰岩夹薄层泥岩，中等风化，岩面埋深 15.6m～24.8m。

具体各地基土层物理力学特性指标见表 1。场地钻探平面布置图见图 1，图 2 是两个典型地层剖面图。

表 1　地基土层物理力学特性指标

土层编号	土层名称	重 度 (kN/m³)	含水量 (%)	孔隙比	塑性指数	内摩擦角	凝聚力 (kPa)	压缩模量 (MPa)	地基承载力 (kPa)
2-1	次生红粘土	18.1	35.8	1.026	19.7	5.8°	29.4	3.90	140
2-2	淤泥质粘土	17.1	40.1	1.090	16.2	3.3°	13.1	2.30	90
3-1	淤泥质粘土	16.9	48.1	1.278	17.9	3.1°	19.0	2.50	70
3-2	淤泥质粘土	16.8	49.1	1.273	17.5	2.2°	16.3	2.20	70

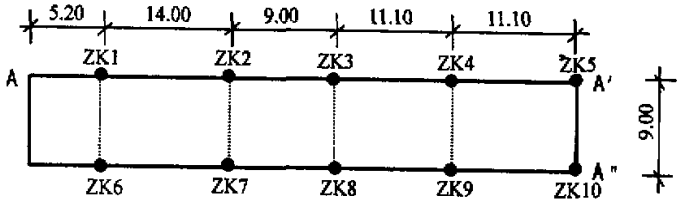


图 1 粉喷桩工程场地平面布置图及钻孔位置示意图

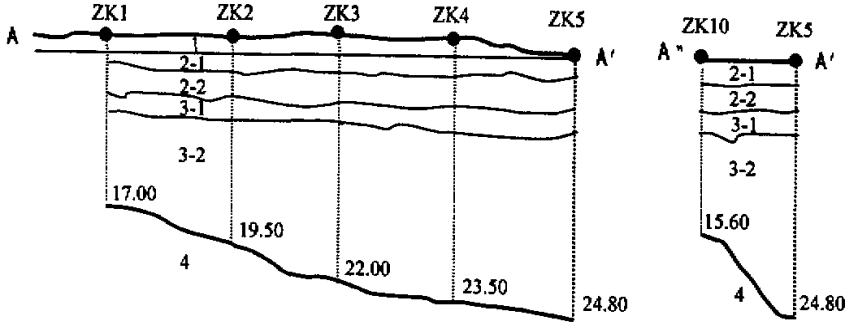


图 2　钻孔地层剖面图 A-A′、A′-A″

2. 场地不良地质条件分析

(1)软土地基：场地内有较厚的淤泥质粘土，属高压缩性土，承载力较低，远远不能符合地基设计要求，而且厚薄不均，易引起不均匀沉降。

(2)下卧倾斜基岩：基岩面倾斜度大，最大处达 45.6° (详见图 2)，呈立体倾斜。

3. 地基基础设计分析

(1)人工填土层较松散，土质不均，不能作为地基持力层；用次生红粘土层作为天然地基持力层，则承载力不够；

(2)下卧基岩埋藏较深，而且倾斜度大，基岩上为淤泥质粘土，对于钻孔灌注桩，若入岩深度小，则桩基不稳定，易倾斜；若入岩深度大，则施工难度大，造价太高；

(3)本工程最终选用粉喷桩地基处理方法，在首先保证承载力足够的前提下，采用长短桩组合来控制沉降量。实践证明，这是一种切实可行、经济的方法。

三　地基处理设计计算

本工程粉喷桩桩径为 Φ500mm，桩位布置基本采用梅花形布置，置换率为 20%。粉喷材料为 325 号普通硅酸盐水泥，水泥喷灰量地层上部 5m 内为 55kg/m，下部为 40～45 kg/m，上部复喷 5m，停灰面位于地表以下 500mm。设计桩长为 10.5m～14m 多种，原则上随基岩埋深控制，埋深大则桩身长，埋深小则桩身短，但桩端必须进入第(3-2)层淤泥质粘土内。为安全起见，在条形基础外围再布置一排长 14m 的粉喷桩。

1.粉喷桩复合地基承载力计算

(1)单桩承载力标准值计算参考文献[2]。对于本工程中最危险的桩(有效桩长以 10 计)，按桩身强度计算得单桩竖向承载力 R^d_k 为 110kN，按单桩桩端及桩侧阻力计算得承载力 R^d_k 为 116.5kN，因此，最后取单桩竖向承载力标准值 R^d_k 为 110kN。

(2)复合地基承载力标准值 $f_{sp,k}$

$$f_{sp,k}=m\frac{R^d_k}{A_p}+\beta(1-m)f_{s,k}=0.2\times\frac{110\text{kN}}{0.19635\text{m}^2}+0.8(1-0.2)\times 70\text{kPa}=156.8\text{kPa}$$

计算所得复合地基承载力标准值大于设计承载力 150kPa。

(3)软弱下卧层顶面承载力验算

软弱下卧层顶面承载力验算按国家标准《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89)进行。对于最有可能出问题的有效桩长为 10m 的粉喷桩，软弱下卧层顶面承载力验算按假想实体条形基础进行。取水泥实体基础平均浮重度为 9kN/m³，条形基础宽度为 1.4m。可得，在基础下 10m 的软弱下卧层顶面，自重压力 p_{cz} 为 90kPa,建筑物荷载所产生的附加压力 p_z:

$$p_z=\frac{fA-2A_sq_s}{A}=\frac{150\text{kPa}\times 1.4\text{m}^2-2\times 10\text{m}^2\times 8\text{kPa}}{1.4\text{m}^2}=35.7\text{kPa}$$

式中 f 为地基承载力设计值(kPa)；A 为单位长度的条形基础的表面积(m²)；A_s 为单位长度的条形基础下，假想实体条形基础侧表面积(m²)；q_s 为作用在假想实体基础侧壁上的平均容许摩阻力(kPa)。

软弱下卧层顶面处，经深度修正后地基承载力设计值 f_z 为 143kPa，所以得

$$p_z+p_{cz}=125.7\text{kPa}<f_z$$

软弱下卧层承载力满足要求。

2. 粉喷桩复合地基承载力计算

在本地基处理工程中，由于存在大倾斜度下卧基岩，使粉喷桩复合地基沉降计算显得格外重要，特别是对基岩埋深最深处(24.8m)和基岩埋深最浅处(15.6m)进行对比验算。

在基岩埋深最深处，有效桩长为 13.5m；在基岩埋深最浅处，有效桩长为 10m。计算方法仍按实体条形基础法。复合地基沉降量 S 由实体基础加固体的压缩量 S_1 和下卧层沉降量 S_2 组成。实体基础加固体的压缩量 S_1 由下式计算：

$$S_1 = \frac{(p + p_0)l}{2E_c}$$

式中 p 为地基承载力设计值(kPa)；p_0 为实体基础对下卧层顶面的附加压力(kPa)；l 为有效桩长，即实体基础深度(m)；E_c 为实体基础等效变形模量(kPa)。其中

式中第三项为原天然土体对下卧层顶面的自重压力。经计算得，短桩(有效桩长为 10m)p_0

$$p_0 = p_z + p_{cz} - \sum_{i=1}^{n}\gamma_i h_i$$

值为 55.7kPa；长桩(有效桩长为 13.5m)p_0 值为 27kPa，并取 E_c 为 20MPa，代入上式得根据文献[1]中的分层总和法，实体基础底面中点的沉降量 S_2，因此，倾斜基岩最浅处沉降量 S 为 108.1mm，最深处沉降量 S 为 90.1mm，两者相差 18 mm，对于宽度为 9 m 的条形基础住宅楼，沉降差为 2‰，符合现行相关规范要求。

$$S_{1短} = \frac{150\text{kPa} + 55.7\text{kPa}}{2 \times 20000\text{kPa}} \times 10\text{m} = 51.4\text{mm}$$

$$S_{1长} = \frac{150\text{kPa} + 27\text{kPa}}{2 \times 20000\text{kPa}} \times 13.5\text{m} = 59.7\text{mm}$$

$$S_{2短} = 56.7\text{mm}\ ,\quad S_{2长} = 30.4\text{mm}$$

四　加固质量检验

(1)对于复合地基承载力最小的粉喷桩(有效桩长为 10m)加固区，进行竖向平板载荷试验，成桩后 28d 的承载力标准值分别为 182kPa、169kPa、161kPa，均符合设计要求。

(2)该住宅楼建成投入使用半年后，沉降差在 2‰以内，符合原设计要求。

五　结　论

通过本次粉喷桩地基加固工程，可以得到以下几点结论：

(1)采用长短桩组合粉喷桩加固具有下卧倾斜基岩的软土地基是可以成功的；

(2)粉喷桩加固具有下卧倾斜基岩的软土地基时，关键是控制沉降量和沉降差；

(3)若淤泥层较深，在地基区域外侧，增设 1～2 排支挡桩，有利于减小沉降量。

参考文献

[1] 《建筑地基基础设计规范》GBJ7-89，北京，中国建筑工业出版社，1990。

[2] 《建筑地基处理技术规范》JGJ79-91，北京，中国建筑工业出版社，1992。

[3] 叶书麟，韩杰，叶观宝编著：《地基处理与托换技术》，北京，中国建筑工业出版社，1994。

[4] 《土工基础》编辑部：《粉喷桩的工程特性与应用设计计算方法》，载《土工基础》，1999 年增刊。