

【工程应用】

湖北咸宁三元路市政道路工程软基处理方法

刘庭, 万仁新, 李波

(中建三局工程设计有限公司, 湖北 武汉 420023)

摘要: 湖北为千湖之省, 沟塘湖汉众多, 市政道路施工过程中极易经过软基路段, 如何选用经济适用的软基处理方式, 值得研究。本文结合咸宁三元路市政道路工程, 分析了5种常用软基路基处理方式, 提出了4种软基处理方案, 并分别作了方案经济技术比选, 确定“软基厚 ≤ 3 m时采用换填碎石土方法, 软基厚 > 3 m时采用水泥搅拌桩方法”为最佳的软基处理方案。分析认为水泥搅拌桩在湖北地区应用广泛, 技术成熟, 且工程造价相对其他方案较为经济。通过沉降分析计算以及工后检测, 工程应用效果较好, 满足工程要求。

关键词: 软土路基; 水泥搅拌桩; 方案比选; 施工工艺; 工后检测

中图分类号: TV997

文献标志码: A

文章编号: 2096-7195(2021)04-0313-09

Treatment method for soft foundation of municipal road engineering of Sanyuan Road in Xianning, Hubei

LIU Ting, WAN Ren-xin, LI Bo

(China Construction Third Bureau Engineering Design Co., Ltd., Wuhan, Hubei 420023, China)

Abstract: Hubei is a province with thousands of lakes, and many channels, ponds and lakes formed by tributaries. It is likely to encounter soft foundation in municipal road construction. Selecting the economic and applicable soft foundation treatment methods is the main core of this research. Based on the municipal road engineering of Sanyuan Road in Xianning, five common soft foundation subgrade treatment methods are analyzed, four soft foundation treatment schemes are proposed, and the economic and technical comparisons of the schemes are made respectively. After comparison, the best soft foundation treatment scheme is proposed, such as “when the thickness of soft foundation is ≤ 3 m, the method of replacing gravel soil is recommended, and when the thickness of soft foundation is > 3 m, the method of cement mixing pile is recommended”. The analysis shows that the cement mixing piles are widely used in Hubei, the technology is mature, and the project cost is relatively economical compared with other schemes. Through settlement analysis, calculation, and post-construction inspection, the engineering application effect is justified and meets the engineering requirements.

Key words: soft soil subgrade; cement mixing pile; scheme comparison and selection; onstruction technology; post-construction inspection

0 引言

湖北地区由于地理位置特殊, 江河湖泊众多, 市政道路施工过程中软土路基较为常见, 咸宁三元路市政道路工程地势较低, 软基面积较大, 选择较好的软基处理方式对节省工程造价以及取得较好的工程效果意义重大。目前, 市政道路软基的处理方法主要有: 水泥搅拌桩法、换填法、塑料排水板法、碎石桩法、CFG桩法、强夯法、预压法等^[1]。

文献[2-8]分别研究了水泥搅拌桩法、塑料排水板法、碎石桩法、CFG桩法、强夯法、预压法在市政道路软基路段的应用, 分析了其软基处理机理、施工工法、工后检测及处理效果。

本文结合咸宁三元路市政道路工程软基路段地质情况, 对比分析了浅层换填法、水泥搅拌桩、塑料排水板、碎石桩法、CFG桩等5种工法, 提出了4种处理方案, 根据经济技术比较, 最终选择了“软基厚 ≤ 3 m时采用换填碎石土方法, 软基厚 > 3 m时

采用水泥搅拌桩方法”作为软基处理方式。

1 软基处理方案对比分析

1.1 项目概况

咸宁三元路市政道路工程全长2.426 km, 红线宽度48 m, 为城市主干路, 设计高程在22.898~24.62 m之间, 全线为填方路段, 填高为1.5~4.3 m。软土路基处理需满足《城市道路路基设计规范》6.2.8节要求, 城市主干路涵洞、通道处容许工后沉降值为 ≤ 0.2 m, 一般路段容许工后沉降值为 ≤ 0.3 m。

根据地勘报告, 主要地层为:

(1) 填土层

①素填土(Q^m): 黄褐色、灰色, 稍湿, 以粉质黏土为主, 局部为深灰色有机质土, 表层0.2~0.5 m为耕植土, 靠近道路及房屋处含砖渣、碎石。该层普遍分布于场区地表, 层厚0.50~2.60 m。土的侧阻力特征值为8 kPa。沿线广泛分布, 未经处理不能直接作路基持力层。

(2) 第四系湖积层

②₁淤泥(Q_4^1): 灰黑色, 饱和, 流塑, 味臭、污手, 富含有机质。该层主要分布于塘底及河沟表层, 层厚0.90~3.90 m。承载力特征值及压缩模量分别为 $f_{ak}=45$ kPa、 $E_s=2.0$ MPa, 土的侧阻力特征值为5 kPa。沿线局部分布, 未经处理不能直接作路基持力层。

②₂黏土(Q_4^1): 灰黑色, 饱和, 软塑, 局部流塑, 含有机质。该层主要分布于塘底及河沟下部, 层厚0.80~4.70 m, 层顶埋深0.50~5.00 m。承载力特征值及压缩模量分别为 $f_{ak}=60$ kPa、 $E_s=3.0$ MPa, 土的侧阻力特征值为9 kPa。沿线局部分布, 未经处理不能直接作路基持力层。

(3) 第四系冲洪积层

③₁粉质黏土(Q_4^{al+pl}): 黄褐色、灰色, 湿, 可塑偏软塑, 土质较均匀。该层在场区范围内普遍分布, 层厚0.30~3.90 m, 层顶埋深0.60~5.00 m。承载力特征值及压缩模量分别为 $f_{ak}=100$ kPa、 $E_s=5.5$ MPa, 土的侧阻力特征值为15 kPa。沿线广泛分布, 可作为路基持力层。

③₂粉质黏土(Q_4^{al+pl}): 黄褐色、灰黄色, 稍湿, 可塑偏硬塑, 局部硬塑, 含灰黑色铁锰质氧化物及灰白色高岭土条。该层在场区范围内普遍分布, 层厚2.00~4.60 m, 层顶埋深1.10~4.40 m。承载力特征值及压缩模量分别为 $f_{ak}=190$ kPa、 $E_s=8.5$ MPa, 土的侧阻力特征值为25 kPa。沿线广

泛分布, 可作为路基持力层。

③₃粉质黏土(Q_4^{al+pl}): 浅灰色, 很湿, 可塑偏软塑, 局部软塑, 含粉细砂, 含量10%~20%。该层在场区范围内局部分布, 层厚0.30~1.80 m, 层顶埋深4.60~7.10 m。承载力特征值及压缩模量分别为 $f_{ak}=95$ kPa、 $E_s=4.5$ MPa, 土的侧阻力特征值为15 kPa。沿线广泛分布, 可作为路基持力层。

④₂圆砾(Q_4^{al+pl}): 杂色, 饱和, 稍密-中密, 亚圆形为主, 骨架颗粒主要为灰岩、砂岩, 粒径一般2~10 mm, 含量50%~60%, 多为黏性土充填, 局部砂砾充填。该层在场区范围内普遍分布, 层厚0.20~3.40 m, 层顶埋深5.00~8.90 m。承载力特征值及压缩模量分别为 $f_{ak}=300$ kPa、 $E_s=19$ MPa, 土的侧阻力特征值为50 kPa。沿线广泛分布, 可作为路基持力层。

地下水位主要受气候因素的影响, 大气降水、地表水为其主要补给来源, 流动性差, 主要以蒸发的方式排泄。勘察期间在钻孔内测得上层滞水水位埋深0.10~1.50 m, 承压水水头标高约17.29~17.46 m, 水位年变幅1.00~2.00 m。

根据地勘报告可知②₁淤泥、②₂黏土为软土, 软土层部分路段深度达到5.0~6.9 m, 软土层具有的含水量和孔隙比较大、渗透系数比较小、较高的压缩性、很强的触变性和显著的流变性^[9], 且地下水埋深较浅, 软土路基处理的好坏将直接影响路基是否稳定。软土路基物理力学性质指标见表1, 各岩层土层承载力基本容许值及压缩模量建议值见表2。

1.2 软基处理方案的选择

咸宁三元路市政道路K0+000~K0+211段软基最深为6.9 m, 路基平均填高约3.5 m; K1+060~K1+146段软基最深为5.3 m, 路基平均填高约2.5 m; K1+294~K1+380.5、K1+396.5~K1+460段软基最深为5.0 m, 路基平均填高约2.65 m。

软土路基常用处理方法对比分析如表3。

(1) 软基厚度 ≤ 3 m时处理方案的选择

当软基厚度较薄时(一般 < 3 m), 采用浅层换填法处理, 可有效地置换不良地基土, 彻底改善影响路堤稳定的不良地质因素。该法主要适用于处理浅层软弱土层、膨胀土、季节性冻土、素填土和杂填土等。由于本项目地势较低, 地下水较高, 本项目选用水稳性较好的碎石土(土石比4:6)换填。

(2) 软基厚度 > 3 m时处理方案的选择

根据各种软基处理方式, 当软基厚度 > 3 m时选择了水泥搅拌桩、塑料排水板、碎石桩和CFG

桩4种处理方案,分别见图1~4。

各种处理方案的设计:

a) 水泥搅拌桩桩径采用0.5 m,桩间距1.3 m,采用等边三角形布置,桩体深入软土路基层以下不少于1 m,采用32.5硅酸盐水泥。

b) 塑料排水板采用B型,正三角形布置,间距1.2 m,排水板打入软基以下不少于1 m。

c) 碎石桩采用等边三角形排列,桩径为0.8 m,桩间距为1.3 m,桩体深入软土路基层以下不少于1 m。

d) CFG桩桩径采用0.5 m,桩间距1.3 m,采用等边三角形布置,桩体深入软土路基层以下不少于1 m。

对4种方案做了技术经济等对比,见表4。

水泥搅拌桩适宜处理深度<14 m的软土路基,本项目软基最深为6.9 m,较适合水泥搅拌桩处理,

处理后地基承载能力将会得到大幅度提高,稳定性得以保障,有效控制路基沉降,在道路施工中优势明显^[2]。

塑料排水板法造价较低,但需结合堆载预压法使用,工期较长,且处理质量不易控制。该方案工后易形成不均匀沉降,增加后期修护费用,整体不经济。考虑到本工程工期较紧,软基处理范围大等实际情况,塑料排水板法占用场地面积大,且需大量的堆载预压用料等缺点,本项目不适宜采用塑料排水板法。

咸宁地区缺少碎石资源,采购运输等成本较高,造价较高。质量不易控制。

CFG桩相对于其他方案,处理效果最好,但造价较高,适宜处理软基厚度大于10 m的情况,否则不经济。

e) 方案比较结论

表1 软土路基物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soft soil subgrade

| 地层 编号 | 岩土 名称 | 统计 项目 | 含水 量/% | 湿重度/ (kN/m ³) | 孔隙比 | 液限/ % | 塑限/ % | 塑性 指数 | 液性 指数 | 压缩系 数/MPa ⁻¹ | 压缩模 量/MPa | 内聚力/ kPa | 内摩 角/(°) | 有机质 含量/% |
|----------------|----------|----------|-----------|------------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| ② ₁ | 淤泥 | <i>n</i> | 6.00 | 5.0 | 5.000 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 5.00 | 5.0 | 4.0 | 4.0 | 3.00 |
| | | max | 69.20 | 16.2 | 2.032 | 55.00 | 31.70 | 23.30 | 1.61 | 1.73 | 2.0 | 8.0 | 5.4 | 1.69 |
| | | min | 44.00 | 15.1 | 1.421 | 41.00 | 22.50 | 18.40 | 1.13 | 1.19 | 1.7 | 6.0 | 4.4 | 1.32 |
| | | Φ_m | 53.60 | 15.8 | 1.658 | 46.60 | 25.80 | 20.80 | 1.33 | 1.42 | 1.9 | 6.8 | 4.9 | 1.52 |
| | | σ | 9.27 | — | — | 5.03 | 3.22 | 1.96 | 0.18 | — | — | — | — | — |
| | | δ | 0.17 | — | — | 0.11 | 0.12 | 0.09 | 0.13 | — | — | — | — | — |
| | 标准值 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 6.4 | 4.7 | — | |
| ② ₂ | 黏土 | <i>n</i> | 5.00 | 4.0 | 4.000 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 4.00 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 3.00 |
| | | max | 41.40 | 19.3 | 1.205 | 52.60 | 29.70 | 22.90 | 0.81 | 0.62 | 4.9 | 17.0 | 10.5 | 1.91 |
| | | min | 26.70 | 17.3 | 0.756 | 33.20 | 18.80 | 14.40 | 0.51 | 0.38 | 3.3 | 11.0 | 5.9 | 0.85 |
| | | Φ_m | 36.00 | 18.1 | 1.024 | 42.60 | 24.30 | 18.30 | 0.64 | 0.50 | 4.1 | 14.3 | 7.9 | 1.31 |
| | | 标准值 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 12.7 | 6.9 | — |

表2 各岩土层承载力基本容许值及压缩模量建议值

Table 2 Basic allowable value of bearing capacity and recommended value of compression modulus of each layer

| 地层 编号 | 岩土 名称 | 室内试验 | | 静力触探 | | 标贯/动探 | | 建议值 | |
|----------------|----------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | <i>f_{ak}</i> /kPa | <i>E_s</i> /MPa |
| ① | 素填土 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| ② ₁ | 淤泥 | 50 | 1.9 | 45 | 2.3 | — | — | 45 | 2.0 |
| ② ₂ | 黏土 | 70 | 4.1 | 55 | 2.8 | — | — | 60 | 3.0 |
| ③ ₁ | 粉质黏土 | 107 | 5.9 | 110 | 5.6 | 118 | 7.8 | 100 | 5.5 |
| ③ ₂ | 粉质黏土 | 200 | 8.6 | 188 | 8.3 | 200 | 12.5 | 190 | 8.5 |
| ③ ₃ | 粉质黏土 | 102 | 5.4 | 95 | 4.7 | 100 | 5.6 | 95 | 4.5 |
| ④ ₁ | 细砂 | — | — | — | — | 140 | 12.5 | 140 | 12.0 |
| ④ ₂ | 圆砾 | — | — | — | — | 310 | 19.0 | 300 | <i>E₀</i> =19 |

表3 地基处理方案比较一览表
Table 3 Comparison of ground treatment schemes

| 方案 | 原理 | 优点 | 缺点 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 换土垫层法 | 将软弱土或不良土开挖至一定深度，回填抗剪强度较大、压缩性较小的土，如砂、砾、石渣等，并分层夯压实。垫层能有效扩散基地压力，提高地基承载力、减少沉降 | 施工简单方便、造价低，适用于软基厚≤3 m | 软基厚度大于 3 m 时不经济 |
| 塑料排水板 | 利用塑料排水板作为排水通道，结合堆载加压排水固结，处理深度小于 30 m | 该方法处理软土地基经济、适用，能够满足软土地基处理要求，施工快捷、方便 | 工期长，易形成不均匀沉降，施工质量较难控制 |
| 碎石桩 | 在软土地基内以锤击、振冲等方式成孔，在成孔内填充料，形成密实桩体。沉管碎石桩主要是通过振挤碎石桩法进行软土地基的处理，可将部分软土挤向桩周土体，并置换为抗压性能较高、排水性能较好的填充料，实现置换加筋目的，并且与软土地基形成复合地基，以此提高软土地基性能 ^[10] | 施工机具简单、操作方便、施工速度快，对软土地基形成良好的挤密效果 | 对环境影响较大，黏土层中产生较多污泥；较厚软土层由于桩间土的侧限阻力难以获得较好的挤密效果 |
| 水泥搅拌桩 | 利用深层搅拌机将水泥和地土原位搅拌形成圆柱状，形成复合地基以提高地基承载力，减少沉降，处理深度 6~14 m ^[11] | 工艺成熟，施工操作简单，浅层处理效果明显 | 控制工后沉降的效果有限，易对环境产生影响 |
| CFG 桩 | 也称水泥粉煤灰碎石桩，由碎石、石屑、砂、粉煤灰掺水泥加水拌和，用各种成桩机械制成的可变强度桩，处理深度小于 20 m | 无泥浆污染。承载力提高幅度大，地基变形小，处理效果较好 | 有一定的挤土效应；造价较高 |

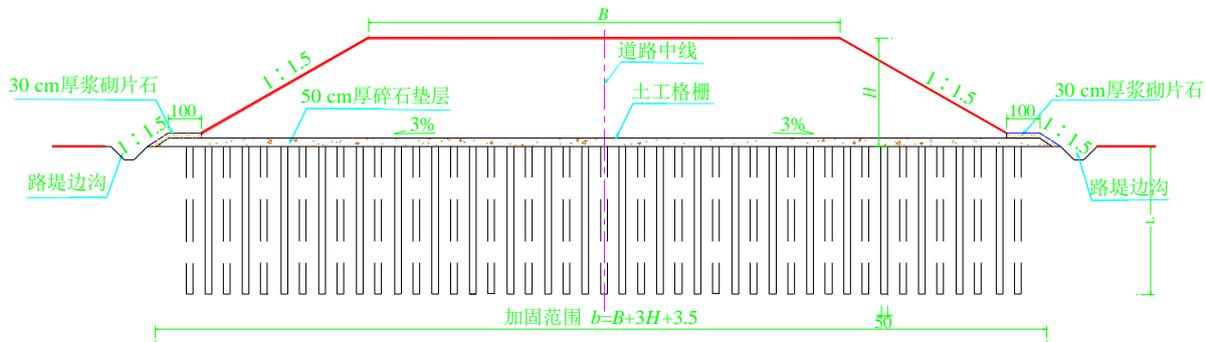


图1 水泥搅拌桩处理横断面图

Fig. 1 Cross section of cement mixing pile treatment

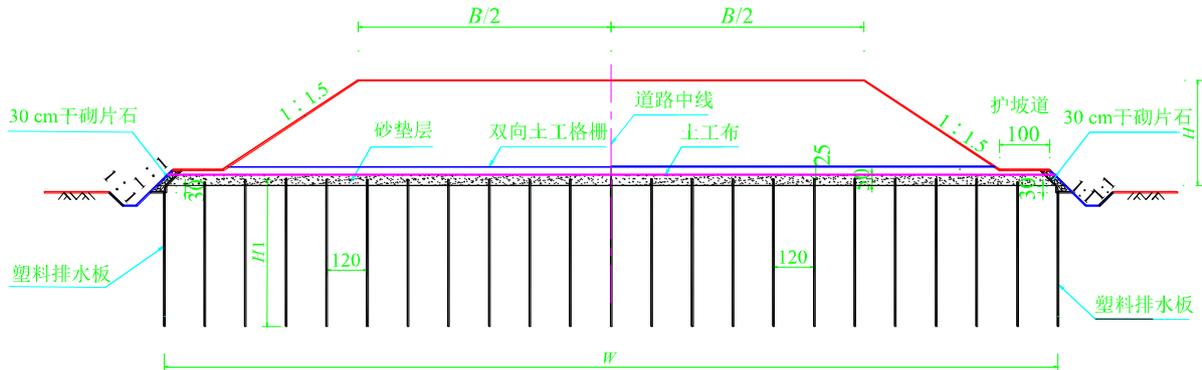


图2 塑料排水板处理横断面图

Fig. 2 Cross section of plastic drainage board treatment

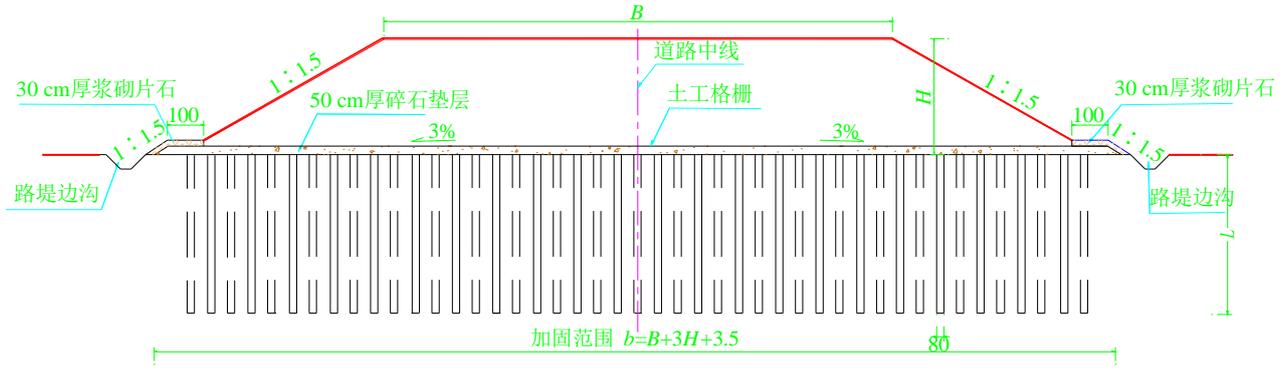


图3 碎石桩处理横断面图

Fig. 3 Cross section of gravel pile treatment

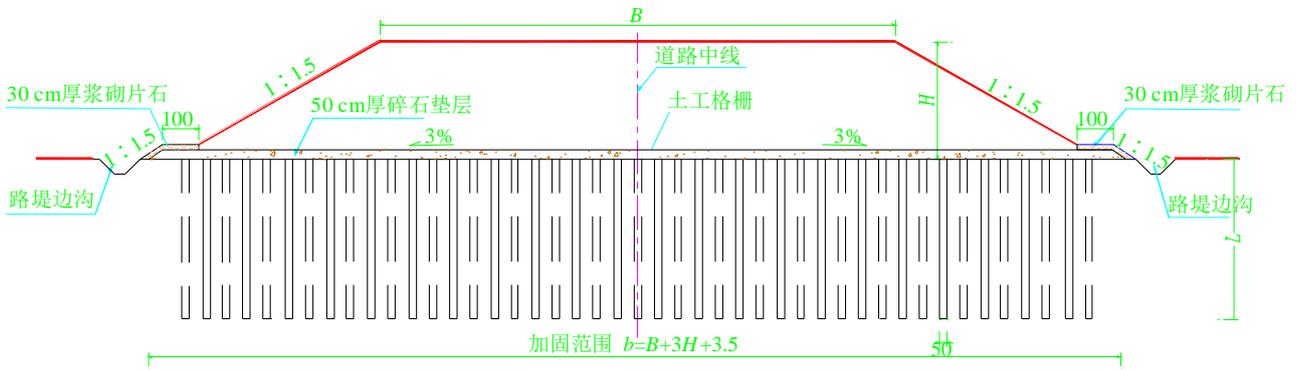


图4 CFG桩处理横断面图

Fig. 4 Cross section of CFG pile treatment

表4 处理方案经济技术对比

Table 4 Economic and technical comparison of treatment schemes

| 方案 | 质量控制 | 总概算价 (含浅层换填) | 工期 | 环保 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| 水泥搅拌桩 | 工艺成熟, 应用广泛, 质量较易控制 | 水泥搅拌桩综合单价为 60 元/m, 路基处理总概算价为 5 870 万 | 工期较短, 经过 28 d 工后检测合格即可做后续工程施工 | 水泥浆对环境会产生影响 |
| 塑料排水板 | 需结合堆载预压排水固结, 该法在沿海深厚软基路段应用较多, 施工质量不易控制 | 塑料排水板综合单价为 8 元/m, 路基处理总概算价为 5 087 万 | 需结合堆载预压法使用, 堆载预压一般时间较长 (不小于 6 个月) [12] | 对环境有一定影响, 需要大量加载土方, 应防止扬尘、泥浆等污染环境 |
| 碎石桩 | 在市政道路中应用较少, 需大量石料, 质量不易控制 | 碎石桩综合单价为 140 元/m, 路基处理总概算价为 7 166 万 | 工期较短 | 对环境影响较小 |
| CFG 桩 | 强度较大, 具有施工简单、沉降变形小、承载力高、适用范围较广和经济效益明显等优点, 处理效果较好 [13], 在工程中应用较多, 质量较易控制 | CFG 桩综合单价为 190 元/m, 路基处理总概算价为 7 986 万 | 工期较短, 检测合格即可进行后续工程施工 | 对环境影响较小 |

水泥搅拌桩技术在公路、市政工程等软土地基加固方面应用广泛，且湖北地区使用广泛，工法较为成熟，质量较易控制。通过技术经济比较，选择水泥搅拌桩法处理软基厚度>3 m的软土路基。

(3) 三元路软基处理方式如下为：

K0+000~K0+211 采用单根桩长 8 m 水泥搅拌桩处理，K1+060~K1+146、K1+294~K1+380.5、K1+396.5~K1+460 采用单根桩长 6 m 水泥搅拌桩处理。其余路段全部采用换填碎石土方式处理，换填厚度为 1.2~3 m。

2 水泥搅拌桩设计参数及施工工艺

选取最不利孔位 SYK 04 孔（桩号 K0+160）计算单桩承载力以及复合地基承载力，该孔地质纵断面见图 5。根据《建筑地基处理技术规范》（JGJ 79—2012），单桩承载力以及复合地基承载力可按式计算得到。

(1) 单桩承载力

单桩承载力可根据以下两式（取小值）得到：

$$R_a = u_p \times \sum q_{si} \times l_{pi} + a_p \times f_{ak} \times A_p \quad (1)$$

式中：桩周长 $u_p=1.57$ m；桩面积 $A_p=0.196$ m²；土的侧阻力特征值 q_{si} 根据地勘报告取值；桩端阻力发挥系数 $a_p=0.6$ ； f_{ak} 桩端阻力特征值根据地勘报告取值； l_{pi} 桩长范围内第 i 层土的厚度。

计算结果为 204.53 kN。

$$R_a = \eta \times f_{cu} \times A_p \quad (2)$$

式中：边长 70.7 mm 的立方体标准养护条件下 90 d 的抗压强度平均值 $f_{cu}=2.4$ MPa；桩身强度折减系数 $\eta=0.25$ 。

计算结果为 117.6 kN。

单桩承载力取两式计算结果较小值，故单桩承载力取 118 kN。

(2) 复合地基承载力

$$f_{spk} = \lambda \times m \times R_a / A_p + \beta \times (1 - m) \times f_{sk} \quad (3)$$

式中：单桩承载力发挥系数 $\lambda=1.0$ ；面积置换率 $m=0.134$ ；桩间土承载力发挥系数 $\beta=0.25$ ；桩间天然土承载力特征值为：

$$f_{sk} = (3.9 \times 45 + 1.6 \times 60 + 0.5 \times 95 + 1.2 \times 300) / (3.9 + 1.6 + 0.5 + 1.2) = 94.31 \text{ kPa}$$

计算结果为 101.1 kPa，复合地基承载力取 100 kPa。

根据计算结果，设计要求现场 28 d 水泥土搅拌

桩桩身无侧限抗压强度不小于 1.2 MPa，复合地基承载力不小于 100 kPa，单桩承载力不小于 118 kN。

(3) 最不利断面的验算

根据《城市道路路基设计规范》（CJJ 194—2013），主干路路基允许工后变形应符合：桥台与路堤相邻处≤10 cm，涵洞通道处≤20 cm，一般路段≤30 cm。

根据地勘报告 SYK 04 孔（桩号 K0+160）、SYK 35 孔（桩号 K1+432）地质情况较差，填高分别为 3.2、3.32 m，软基深度分别为 6.6、5.3 m，水泥搅拌桩桩长分别为 8、6 m，见图 5~6。

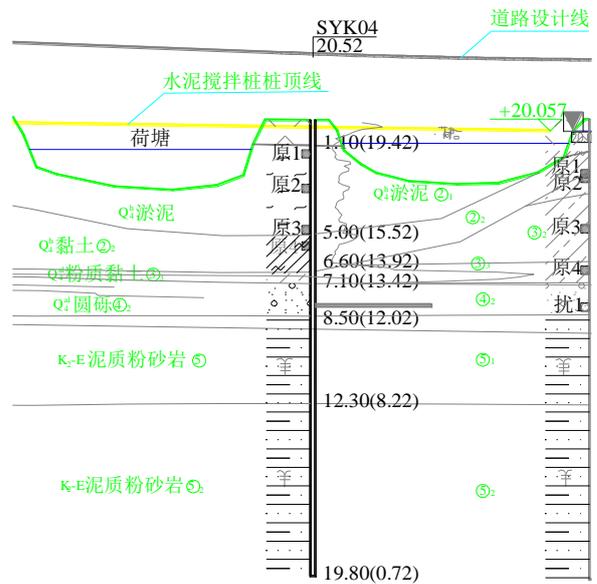


图5 SYK 04 孔地质纵断面图
Fig. 5 Geological profile of hole SYK 04

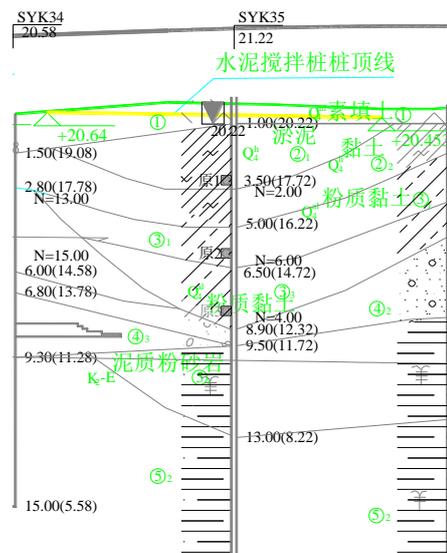


图6 SYK 35孔地质纵断面图
Fig. 6 Geological profile of hole SYK 35

最不利断面验算采用理正岩土工程计算分析

软件进行验算。工后 14 年内, SYK 04 孔路基出现 17.5 cm 沉降, SYK 35 孔路基出现 15.3 cm 沉降。这一数值低于一般路段 30 cm 的容许工后沉降值,同时也低于涵洞通道基础 20 cm 容许工后沉降值,符合标准要求。

(4) 施工工艺

水泥搅拌桩试桩施工采用“二喷四搅”(喷浆法), 工艺主要流程为如图 7。

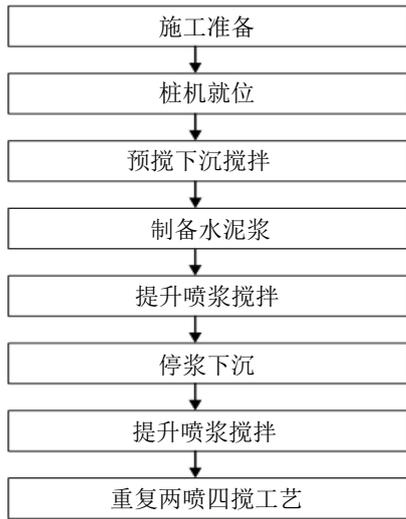


图7 水泥搅拌桩工艺流程图

Fig. 7 Process flow chart of cement mixing piles

3 水泥搅拌桩工后检测结果分析

(1) 检测手段

水泥搅拌桩工后主要做 4 项检测: a) 轻型动力触探检测; b) 开挖检测; c) 取芯检验; d) 静载试验检测。

(2) 检测结果

K1+060~K1+146 路段共有 3 375 根水泥搅拌桩, 桩径为 0.5 m, 单根桩长为 6 m, 选择 34 根桩做静载试验, 其中 17 根进行复合地基荷载试验(检测结果见表 5), 另外 17 根做单桩竖向抗压静载实验(检测结果见表 6)。并另选 17 根桩进行取芯检验, 芯样见图 8, 选择代表性的一根桩的检测结果。(检测结果见表 7)。

通过轻型动力触探法、开挖法检测以及取芯检验, 桩体成桩均匀性以及桩体直径均满足设计要求, 28 d 水泥石搅拌桩桩身无侧限抗压强度均远大于 1.2 MPa, 桩体强度符合设计及使用要求。

根据设计要求进行单桩荷载和复合地基荷载试验, 检测各点复合地基承载力均大于 100 kPa, 单桩承载力均大于 118 kN, 均符合设计及使用要求, 施工质量较好。

表5 复合地基荷载试验结果汇总表

Table 5 Load test results of composite foundation

| 桩编号 | 最大试验荷载 | | 极限承载力 | | 承载力特征值 | |
|-----|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | kN | 沉降/mm | ≥kN | 沉降/mm | kPa | 沉降/mm |
| 1 | 242 | 20.50 | 242 | 20.50 | 100 | 5.80 |
| 2 | 242 | 18.54 | 242 | 18.54 | 100 | 5.00 |
| 3 | 242 | 19.18 | 242 | 19.18 | 100 | 4.69 |
| 4 | 242 | 23.76 | 242 | 23.76 | 100 | 6.50 |
| 5 | 242 | 20.70 | 242 | 20.70 | 100 | 5.56 |
| 6 | 242 | 21.36 | 242 | 21.36 | 100 | 6.08 |
| 7 | 242 | 19.04 | 242 | 19.04 | 100 | 4.90 |
| 8 | 242 | 19.20 | 242 | 19.20 | 100 | 4.76 |
| 9 | 242 | 17.64 | 242 | 17.64 | 100 | 4.59 |
| 10 | 242 | 19.45 | 242 | 19.45 | 100 | 4.06 |
| 11 | 242 | 19.18 | 242 | 19.18 | 100 | 4.71 |
| 12 | 242 | 21.42 | 242 | 21.42 | 100 | 5.66 |
| 13 | 242 | 16.92 | 242 | 16.92 | 100 | 3.90 |
| 14 | 242 | 17.75 | 242 | 17.75 | 100 | 3.92 |
| 15 | 242 | 17.26 | 242 | 17.26 | 100 | 4.24 |
| 16 | 242 | 19.16 | 242 | 19.16 | 100 | 4.67 |
| 17 | 242 | 18.73 | 242 | 18.73 | 100 | 4.38 |

表6 单桩竖向抗压静载实验结果汇总表

Table 6 Experimental results of vertical compressive static load of single piles

| 桩编号 | 最大试验荷载 | | 极限承载力 | | 承载力特征值 | | 残余沉降量/mm |
|-----|--------|-------|-------|-------|--------|-------|----------|
| | kN | 沉降/mm | ≥kN | 沉降/mm | kN | 沉降/mm | |
| 18 | 236 | 26.30 | 236 | 26.30 | 118 | 5.78 | 20.56 |
| 19 | 236 | 27.64 | 236 | 27.64 | 118 | 5.26 | 21.72 |
| 20 | 236 | 25.78 | 236 | 25.78 | 118 | 5.00 | 19.09 |
| 21 | 236 | 26.83 | 236 | 26.83 | 118 | 5.92 | 20.18 |
| 22 | 236 | 22.54 | 236 | 22.54 | 118 | 4.96 | 16.98 |
| 23 | 236 | 23.84 | 236 | 23.84 | 118 | 4.90 | 17.98 |
| 24 | 236 | 24.75 | 236 | 24.75 | 118 | 5.84 | 18.42 |
| 25 | 236 | 24.86 | 236 | 24.86 | 118 | 5.48 | 18.46 |
| 26 | 236 | 26.60 | 236 | 26.60 | 118 | 4.12 | 20.68 |
| 27 | 236 | 27.30 | 236 | 27.30 | 118 | 5.39 | 21.06 |
| 28 | 236 | 29.44 | 236 | 29.44 | 118 | 5.56 | 22.34 |
| 29 | 236 | 29.88 | 236 | 29.88 | 118 | 6.44 | 22.75 |
| 30 | 236 | 26.18 | 236 | 26.18 | 118 | 5.08 | 19.92 |
| 31 | 236 | 25.40 | 236 | 25.40 | 118 | 4.37 | 19.61 |
| 32 | 236 | 25.70 | 236 | 25.70 | 118 | 4.72 | 20.17 |
| 33 | 236 | 27.60 | 236 | 27.60 | 118 | 5.60 | 21.18 |
| 34 | 236 | 28.24 | 236 | 28.24 | 118 | 5.88 | 21.68 |

表7 取芯检测试验结果汇总表

Table 7 Coring test results

| 桩号 | 部位 | 单块芯样抗压强度/MPa | 取芯深度/m | 设计强度/MPa |
|-------|---------|--------------|---------|----------|
| 14-29 | 0.3~0.4 | 13.6 | 0~2.0 | ≥1.2 |
| | 0.5~0.6 | 13.5 | | |
| | 1.1~1.2 | 14.2 | | |
| | 2.2~2.3 | 13.1 | 2.0~4.0 | |
| | 3.1~3.2 | 13.9 | | |
| | 3.5~3.6 | 14.3 | | |
| | 4.2~4.3 | 14.1 | | |
| | 4.4~4.5 | 14.1 | 4.0~6.0 | |
| | 5.1~5.2 | 14.6 | | |



图8 桩号14-29芯样

Fig. 8 Core sample of pile No. 14-29

4 结 论

本文主要介绍了5种处理方式的原理、优缺点。结合咸宁三元路市政道路工程,当软基厚度 $>3\text{ m}$ 时提出了4种处理方案。

(1) 结合三元路市政道路工程,本项目软土层部分路段深度达到 $5\sim 6.9\text{ m}$,必须处理后才能进行路基填筑。浅层换填、水泥搅拌桩、塑料排水板、碎石桩法、CFG桩5种工法可供选择,分析了其原理及优缺点,提出了4种软基处理方案,通过经济技术对比,认为“软基厚 $\leq 3\text{ m}$ 时采用换填碎石土

方法,软基厚 >3 m时采用水泥搅拌桩方法”为最优方案。根据地勘报告,选取2个地质情况不利孔位进行工后沉降验算,工后14年内沉降均小于20 cm,满足规范要求,处理效果较为理想。

(2)工后通过轻型动力触探法、开挖法、取芯检验以及静载试验法对桩体进行工后检验,桩体质量较好,满足工程质量要求。

(3)通过研究可知,“软基厚 ≤ 3 m时采用换填碎石土方法,软基厚 >3 m时采用水泥搅拌桩方法”处理软基是可行的,该方案值得湖北地区同类工程借鉴,应用空间较大。但水泥搅拌桩处理软基深度不易过深,一般处理深度不能超过14 m,对于软基深度较深的情况,需慎重选择水泥搅拌桩方案。

参考文献

- [1] 曾小刚. 市政道路软基处理方案设计调整研究[J]. 基础工程设计, 2020(17): 35-37.
ZENG Xiao-gang. Design and adjustment of soft foundation treatment scheme for municipal road[J]. Basic Engineering Design, 2020(17): 35-37.
- [2] 李惠. 水泥搅拌桩在市政道路软土地基加固中的应用分析[J]. 福建建筑, 2017(5): 65-66, 95.
LI Hui. Application analysis of cement mixing pile in municipal road soft soil foundation reinforcement[J]. Fujian Architecture Fujian Architecture, 2017(5): 65-66, 95.
- [3] 刘韧. 塑料排水板法在市政道路软基处理中的应用[J]. 科技创新与应用, 2012(15): 166.
LIU Ren. Application of plastic drainage board method in municipal road soft foundation treatment[J]. Innovation and Application of Science and Technology, 2012(15): 166.
- [4] 张达德, 王淳讷, 方力. 塑料排水板加固软土地基失效案例分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2034-2039.
ZHANG Da-de, WANG Chun-huan, FANG Li. Failure analysis of soft soil foundation reinforced by plastic drainage board[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 2034-2039.
- [5] 许少雄. 振动沉管碎石桩在软基加固中的应用[J]. 四川建材, 2020, 46(11): 81-82.
XU Shao-xiong. Application of vibration driven gravel pile in soft foundation reinforcement[J]. Sichuan Architecture, 2020, 46(11): 81-82.
- [6] 董里, 曾青林. 市政道路工程中的软土路基处理 CFG桩应用实例[J]. 建筑与工程, 2010(15): 696-697.
DONG Li, ZENG Qing-lin. Application of CFG pile in soft soil subgrade treatment of municipal road engineering[J]. Architecture and Engineering, 2010(15): 696-697.
- [7] 刘强. 强夯法施工技术在市政道路软土路基处理中的应用[J]. 城市建设理论研究, 2019(4): 158.
LIU Qiang. Application of dynamic compaction construction technology in soft soil subgrade treatment of municipal road[J]. Research on Urban Construction Theory, 2019(4): 158.
- [8] 张旭东. 市政道路软土路基应用真空联合堆载预压法施工实践[J]. 中国建设信息化, 2018(7): 82-83.
ZHANG Xu-dong. Application of vacuum combined surcharge preloading method in soft soil subgrade construction of municipal road[J]. Informatization of China's Construction, 2018(7): 82-83.
- [9] 谢德杰. 道路工程软土路基的处理技术[J]. 交通世界, 2019(20): 80-81.
XIE De-jie. Treatment technology of soft soil subgrade in road engineering[J]. Transportation World, 2019(20): 80-81.
- [10] 谢全福, 李浩然, 郑尔发. 某高速公路软土地基碎石桩处理及效果分析[J]. 北方交通, 2020(11): 49-53.
XIE Quan-fu, LI Hao-ran, ZHENG Ee-fa. Treatment and effect analysis of gravel pile in soft soil foundation of an expressway[J]. Northern Transportation, 2020(11): 49-53.
- [11] 欧阳光. 高速公路桥头深厚软土地基的水泥搅拌桩处理[J]. 交通标准化, 2013(1): 139-142.
OU Yang-guang. Cement mixing pile treatment of deep soft soil foundation at bridge head of expressway[J]. Traffic Standardization, 2013(1): 139-142.
- [12] 鲍富军. 塑料排水板在市政道路软土路基处理中的应用分析[J]. 建材与装饰, 2016(40): 217-218.
BAO Fu-jun. Application analysis of plastic drainage board in municipal road soft soil subgrade treatment[J]. Building Materials and Decoration, 2016(40): 217-218.
- [13] 陈蓉. CFG桩在市政道路中的应用[J]. 中华民居, 2014(1): 241.
CHEN Rong. Application of CFG pile in municipal road[J]. Chinese Folk Houses, 2014(1): 241.