

高速公路软土路基拓宽粉喷桩处治方案 分析与验证

刘观仕¹, 孔令伟¹, 李雄威¹, 丁 锋², 顾建武²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 沪宁高速公路镇江段扩建工程建设指挥部, 江苏 镇江 212028)

摘要: 交通量的迅速增长使越来越多早期建成的高速公路需要拓宽改建, 而软基路段新老路基变形协调控制是主要技术难题之一。以沪宁高速公路镇江段扩建工程中采用粉喷桩处理的典型软基路段为背景, 考虑老路基先期固结, 采用 FLAC^{3D} 程序分析桩长、桩距、桩侧摩阻力、铺设土工格栅与否及填土速率等对新老路基变形协调的影响。其过程为先分析桩长与桩距的影响, 然后在此基础上分析其他因素的影响。研究表明: 桩长和桩距对拓宽路基的影响最为显著, 桩长过大对减小沉降无太大意义, 桩距过大则不能满足沉降控制要求, 计算断面合理的桩长为进入持力层 2.5 m 左右, 且合理桩距为 1.1 m。实际桩侧摩阻力相对设计值降低量不超过 50% 时, 其对路基沉降的影响较小; 有桩和桩帽时在路基底铺设土工格栅对减小路基沉降和不均匀沉降的作用很小。路堤填土速率较大时对沉降速率有一定影响, 但对累计沉降基本无影响, 小于 10 kPa/d 的加载速率是可行的。基于以上结果, 确定优化的路基处治方案, 通过沉降监测证明计算结果与实测结果基本相符, 拓宽路基沉降满足设计要求。

关键词: 公路工程; 路基拓宽; 软基; 变形; 沉降计算

中图分类号: TU 44; O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)02 - 309 - 07

ANALYSIS OF TREATMENT SCHEME FOR SOFT FOUNDATION IN EXPRESSWAY WIDENING PROJECT AND ITS VERIFICATION

LIU Guanshi¹, KONG Lingwei¹, LI Xiongwei¹, DING Feng², GU Jianwu²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Zhenjiang Headquarters for Shanghai-Nanjing Expressway Widening Project, Zhenjiang, Jiangsu 212028, China)

Abstract: Due to the rapid increase of traffics, more and more early-built expressways will be reconstructed; and the control of differential settlements between old and new roadbeds on soft foundation is one of the key technical issues. Focusing on a typical soft foundation segment treated with dry jet mixing(DJM) piles in the Shanghai—Nanjing expressway widening project, the influences of pile length, pile distance, pile lateral friction force, geogrid and construction rate to the coordinated deformation between old and new roadbeds are analyzed with FLAC^{3D} programme. The procedure is firstly analyzed for the influence of different pile lengths and distances on the deformations of soft foundation. Then, based on the proposed pile length and distance, the influences of pile lateral friction force with/without laying geogrid and construction rate are considered. The results indicate that pile length and distance are the most significant influential factors while the others are relatively minor ones. It is also shown that the excess pile length has little effect on settlement reduction; and excess pile distance can not meet the settlement control standard. It is suggested that the rational pile length is to ensure piles embedded in supporting

收稿日期: 2007 - 05 - 21; **修回日期:** 2007 - 08 - 02

作者简介: 刘观仕(1974 -), 男, 1997年毕业于中南工业大学(现中南大学)资源环境与建筑工程学院勘察工程专业, 现为博士研究生、助理研究员, 主要从事软土地基与膨胀土路基变形方面的研究工作。E-mail: gslu@whrsm.ac.cn

soil layer about 2.5 m, and the rational pile distance is about 1.1 m. If actual pile lateral friction force is not 50% lower than the designed value, the influence is comparatively small on post-construction and differential settlements. Considering laying geogrid over the soft foundation treated with piles and pile caps has not distinct improvement on differential settlements; and the construction rate has potential influence on settlement rate but little influence on accumulated settlements with a loading rate of 10 kPa/d. According to the above results, an optimized treatment scheme for widening soft foundation is advanced and adopted. The settlement monitoring results show that the numerical calculation results agree well with the actual settlements; and the settlements indexes can meet the requests of engineering design.

Key words: highway engineering; subgrade widening; soft foundation; deformation; settlement calculation

1 引言

交通量的迅速增长, 使我国尤其是东部沿海地区越来越多早期建成的高速公路不得不进行拓宽改建^[1, 2]。拓宽建设中如何有效控制新老路基不均匀沉降以防止病害形成, 是设计和施工必须解决的根本性问题^[1, 3], 而对于相当部分建在软土地基上的高速公路拓宽工程而言, 新老路基变形协调控制成为主要技术难题之一。

目前国内外在道路拓宽方面尚未形成成熟、统一的拓宽设计方法。有些规范^[4]只有较简略的拓宽路基设计和施工说明。随着近年来国内对高速公路尤其是软基段拓宽的研究不断展开, 成果也逐渐增多。钱劲松和孙力彤^[5]分析了拓宽方式和宽度对差异沉降的影响, 指出分层总和法的不足。贾宁等^[1, 6, 7]采用有限元方法分析了新路堤荷载施加后新老路基、路面的应力分布和差异沉降。H. Wang 和 X. M. Huang^[8]进一步结合离心试验和有限元分析研究了拓宽后新老路基的沉降变形和应力集中现象。章定文等^[9, 10]分别对沉降隔离墙处理扩建部分软基进行了数值模拟, 但未考虑设计及施工参数的变化。孙伟等^[11]单独分析了地基与路堤土弹性模量变化对地基及填方路基沉降的影响。孟庆山等^[12]通过离心试验分析了高填方路基参数变化对拓宽路基变形的影响。M. Hiroshi 和 N. Mitsuo^[13]研究了深层搅拌桩减少拓宽软基沉降的设计方法。J. R. Lambrechts 等^[14]介绍了搅拌桩墙进行稳定性和沉降控制的设计分析。而国外更多研究则集中于室内模型试验与数值模拟, 结合路基加宽实例的分析不多。

总的看来, 国内外在计算分析方法、地基处理方案优选、新老路基结合部处治技术和加宽路堤允许工后沉降和新老路基差异沉降的控制标准等方面还存在不足, 还需进一步研究^[15]。本文以沪宁高速公路镇江段扩建工程为背景, 对采用粉喷桩处理

的典型软基路段, 考虑老路基先期固结, 分析计算桩设计参数、路基层层铺设土工格栅与否、桩侧摩阻力以及填土速率因素变化对新老路基变形协调的影响, 并通过实测结果进行验证。

2 工程概况

沪宁高速公路扩建工程是国内首条要求边施工边通车的扩建工程, 建设周期紧张, 其中镇江段的软土路基问题突出。由于拓宽后新老软土路基固结度与力学性质差异将引起不均匀沉降导致路面病害, 控制新老路基差异沉降和防止拼接路面开裂成为扩建工程软基处理中的技术关键。

水泥搅拌桩(粉喷桩)是全线软基处理采用的主要方案之一, 用于软土深度大于 3 m 而小于 10 m 的路段, 设计桩径为 $\phi 500$ mm, 梅花型布置, 成桩后浇注 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 桩帽, 然后铺筑碎石垫层和铺设钢塑土工格栅。老路堤边坡位置下路堤则采用 2 排 $\phi 500$ mm 的 C25 素混凝土边坡桩进行处理。

路堤拼接采用开挖台阶、铺设土工格栅、提高新拼接路堤压实度等技术方案。台阶一般尺寸为 $60 \text{ cm} \times 90 \text{ cm}$, 最上层台阶为 $100 \text{ cm} \times 150 \text{ cm}$ 。在路基层层铺设土工格栅并保证格栅有 1.5 m 伸入老路堤内, 在拼接路堤上路床顶面 20 cm 下铺设土工格栅, 保证伸入老路肩边缘 2 m; 提高拼接路堤的压实度: 下路堤从 90% 提高到 93%, 上路堤由 93% 提高到 94%, 路床、零填地段和路堑路床由 95% 提高到 96%。

3 变形分析方案与计算模型

3.1 变形分析方案

选取典型的 EK174 断面进行分析计算。该断面路堤设计高度为 3.4 m, 拓宽宽度为 8.25 m, 软土埋深为 6.0 m, 层厚为 7.0 m。采用有限差分法, 耦

合变形与固结, 计算新老路基变形。根据先期变形影响因素粗略计算分析, 主要考虑桩长、桩距、桩侧摩阻力、铺设土工格栅与否和填土速率等因素变化对拓宽路基变形的影响。计算过程为先模拟计算老路基运营 10 a 的地基固结变形, 再通过逐级施加拓宽路堤荷载, 模拟拓宽路堤施工过程及后续固结与通车运营后的路基变形。

3.2 计算模型与参数

(1) 计算模型

老路基为塑料排水板处理, 新路基采取边坡桩、粉喷桩结合的处理方式。采用平面应变有限差分法进行分析, 由于路基横向具有对称性, 故沿路中线对称面取 1/2 路基, 而路基纵向则通过模量等效将桩与承台作对称性处理, 取较小厚度 0.1 m 进行计算。计算剖面情况如图 1 所示。

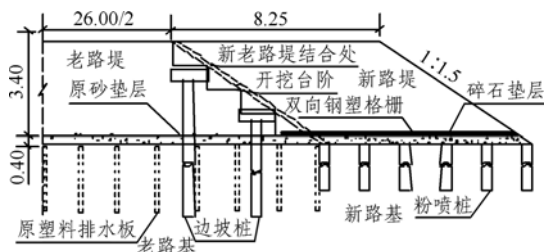


图 1 计算剖面示意图(单位: m)

Fig.1 Schematic diagram of calculation cross-section(unit: m)

路基计算宽度和深度分别取为 75 m(3.5 倍加固区宽度)和 40 m。粉喷桩及过渡区和边坡桩均由圆桩等代为纵向加固长度范围内的板桩, 分别采用实体单元和 pile 单元, pile 单元与土体间设接触面。模型侧面边界取为竖向滑动、侧向约束边界, 底端边界取为完全约束边界; 侧面和底端边界不透水, 顶端边界透水。土工隔栅采用 cable 单元模拟。除拓宽路堤荷载外, 路面荷载为 15 kPa, 考虑到行车荷载分布很复杂, 根据规范^[4]取为 20 kPa。地下水位埋深按 0.5 m 考虑。粉喷桩加固断面计算模型及网格划分见图 2。

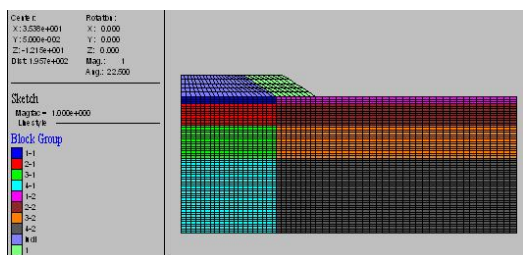


图 2 粉喷桩加固断面计算模型及网格划分

Fig.2 Calculation model and meshes of roadbed treated with DJM piles

(2) 材料模型

土体和砂垫层本构关系均采用国内外应用较多的 Mohr-Coulomb 弹塑性模型^[15], 而粉喷桩和边坡桩则采用弹性模型。考虑粉喷桩过渡区, 宽度为 1/2 桩径, 沿桩体轴对称分布^[16], 假设其弹性模量是由桩体模量逐渐过渡到土体模量。土工格栅亦采用弹性模型。

(3) 参数选取

先期对粉喷桩处理拓宽路基变形进行了参数敏感性分析, 表明路基土参数对计算结果的影响最大, 其中路基土的弹性模量对变形的影响最为显著, 其次为抗剪强度参数 c 和 ϕ , 原因可能是拓宽路基允许变形和拓宽荷载相对较小, 弹性变形所占比例比塑性变形大, 因而压缩模量对变形的影响最为明显; c, ϕ 值影响则较小, 而路堤与桩参数的模量参数影响则更小。为安全起见, 对路基土压缩模量 E_s 和抗剪强度参数 c, ϕ 取标准值, 而对路堤土等其他影响较小的参数则根据试验结果与相关文献资料综合取平均值, 具体如下:

① 路基土体计算参数: 计算厚度内路基土体分为 3 层, 各层参数如表 1 所示。

表 1 路基土体参数表

Table 1 Parameters of foundation soils

土层	埋深/m	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙 比	抗剪强 度参数 $c/\text{kPa} \quad \phi/(\text{°})$	压缩模 量/MPa	渗透系 数/ $(10^{-7} \text{cm} \cdot \text{m}^{-1})$	桩侧摩 阻力 /kPa
亚黏土	0.0~4.5	18.0	1.05	12.0 26.0	4.3	13.0	10
淤泥质 亚黏土	4.5~11.5	18.0	1.08	36.0 13.5	3.0	2.4	8
亚黏土	>11.5	19.0	0.77	40.2 19.9	6.3	0.6	5

② 桩体参数: 湿喷及边坡桩桩体参数见表 2。

表 2 桩体参数表

Table 2 Parameters of piles

桩型	桩径 /cm	桩长 /m	横向桩 距/m	纵向桩 距/m	桩帽尺寸 $(\text{cm} \times \text{cm} \times \text{cm})$	桩弹性模 量/GPa
粉喷桩	50	14 或 18	1.4 或 1.1	1.21 或 0.95	$1.5 \times 1.5 \times 0.3$	0.4
边坡桩	50	16	3.0	3.00	$1.5 \times 1.5 \times 0.3$	10.0

③ 老路堤与新路堤参数: 老路堤与新路堤土体参数取值见表 3。

④ 其他参数: 双层双向钢塑土工格栅的横向和纵向抗拉强度均取为 83 kN/m, 弹性模量取为 50 MPa。砂垫层厚度为 0.4 m, 内摩擦角为 30° , 弹性模量为 50 MPa, 重度为 22 kN/m^3 。

表3 老路堤与新路堤土参数表

Table 3 Parameters of old and new embankment

层位	填土厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	抗剪强度参数		弹性模量	泊松比	
			c/kPa	φ/(°)	E ₀ /MPa	v	
老路堤	95区	0.3	22	30.0	25.0	12	0.30
	93区	0.0	21	16.0	25.0	10	0.31
	90区	2.8	21	8.0	23.5	8	0.33
新路堤	96区	0.3	22	40.8	25.2	13	0.28
	94区	0.5	21	16.7	25.0	11	0.30
	93区	2.8	21	13.0	20.0	9	0.32

3.3 变形控制标准

本拓宽高速公路制定的变形控制标准为：拓宽路基总沉降量不大于 15 cm，工后沉降累计值不大于 5 cm，工后差异沉降值不大于 3 cm。施工期变形速率控制标准^[17]为：填土过程中沿路堤中线地面沉降速率每昼夜不大于 10~15 mm；坡脚水平位移每昼夜不大于 5 mm。

4 计算结果与分析

先考虑桩长和桩距变化对拓宽软基变形的影响，在此基础上再分析其他因素的影响，最后对处理方案进行综合分析选定。

4.1 桩长与桩距对变形的影响

采用了表 4 所列的 3 种计算方案，通车 5.0 a 的沉降见表 4 和图 3。不同桩长与桩距情况下，拓宽路基(半幅)的累计沉降和工后沉降均呈“长勺”形分布，新路基路肩附近沉降最大，老路基中心沉降最小，新路基整体沉降均大于老路基。路基沉降主要发生在路堤施工(1.5 a)，路基预压(0.5 a)和路面施工(0.5 a)过程中，通车 1.0 a 间的沉降趋势明显减小，而通车 1.0 a 后的沉降趋势均很小。

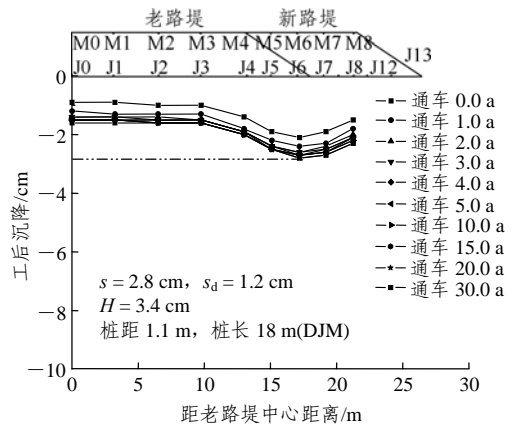
表4 不同桩距与桩长下的路面沉降对比表

Table 4 Pavement settlements under various pile distances and lengths

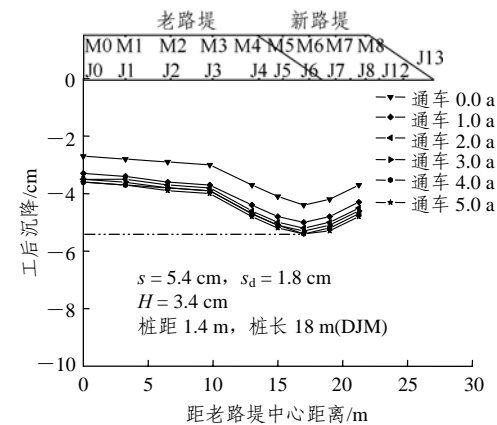
方案	桩距/m	桩长/m	通车 5.0 a 后最大沉降/cm		
			累计沉降	工后沉降	工后差异沉降
1	1.1	18	6.5	2.4	1.1
2	1.4	18	8.4	5.4	1.8
3	1.1	14	6.9	2.7	1.2

注：通车后指施加了路面荷载和行车荷载。

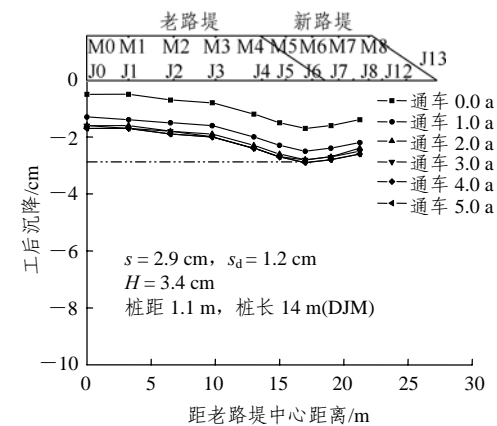
综合 3 种方案结果来看，桩距较大或桩长较小时，路面沉降较大，反之则路面沉降较小。当桩距为 1.4 m 时，即使桩长为 18 m(进入亚黏土持力层约 6.5 m)，工后沉降亦不满足设计要求，而当桩距为



(a)



(b)



(c)

图3 桩长与桩距对路面变形的影响

Fig.3 Influences of pile lengths and distances on pavement deformations

1.1 m 时，桩长为 14 和 18 m 时均能满足工后沉降要求，但两者沉降相差很小，这表明桩距较大时，加大桩长也不能满足设计要求，而当粉喷桩进入亚黏土持力层 2.5 m 以后，再增加桩长对减小沉降意义不大。通车 5.0 a 时，方案 1 和 3 的路面变形均满足要求，进一步计算表明通车 30.0 a 的沉降同样都满足要求，但方案 3 显然更经济，以下计算分析均以此该方案为基础进行。

4.2 桩侧摩阻力对变形的影响

粉喷桩的施工质量差异将导致桩侧摩阻力分布不均匀。通过对桩侧摩阻力的计算值进行折减, 研究实际桩侧摩阻力小于设计值时引起的地基变形增加情况。图 4 给出了通车 5.0 a 时的沉降情况, 可以看出, 桩侧摩阻力减小使地基沉降增加, 对累计沉降影响最大, 对工后差异沉降和工后沉降的影响次之, 桩侧摩阻力折减率小于 50% 时的影响较小; 折减率达 50% 时的累计沉降、工后沉降和工后差异沉降分别增加到约 8.8, 4.0 和 2.2 cm, 增幅分别为 104%, 28% 和 32%。当折减率达到约 85% 时, 工后沉降已经超过 5 cm, 不能满足设计要求。

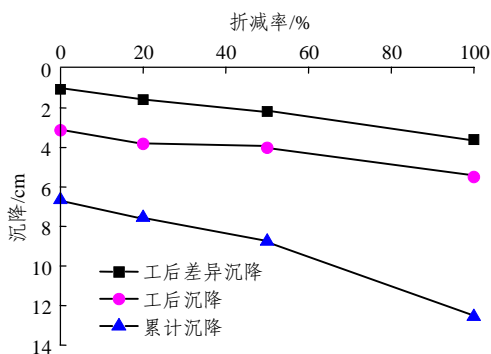


图 4 地基沉降与桩侧摩阻力关系图

Fig.4 Relationship between foundation settlements and pile lateral friction forces

4.3 土工格栅对变形的影响

在路基底层铺设土工格栅后, 图 5 所示路基计算最大沉降仅减小 0.1 mm, 工后沉降减小 0.1 mm。可见, 对粉喷桩处理段路基, 铺设土工格栅对减小沉降和不均匀沉降作用很小。

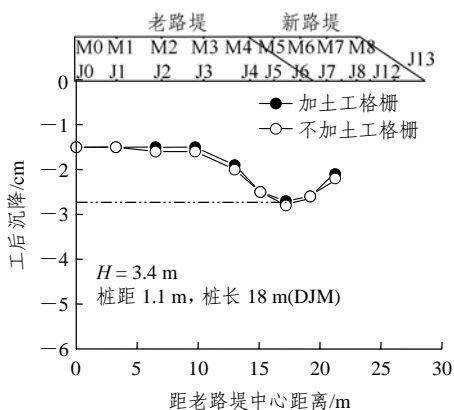


图 5 土工格栅对路面工后沉降的影响

Fig.5 Influences of geogrid on post-construction settlements of pavement

4.4 填土速率对变形的影响

模拟了施工中可能出现的 5 种加荷速率, 分别为 0.8, 1.3, 2.0, 5.0, 10 kPa/d, 计算路基位移动速率与加荷速率的关系, 计算结果表明: 路基总沉降量和差异沉降量基本不变, 最大水平位移动速率分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1.0 mm/d, 最大竖向位移动速率分别为 0.5, 0.6, 1.2, 2.9, 5.6 mm/d, 如图 6 所示。加荷速率对竖向位移动速率影响明显, 而对水平位移动速率影响很小, 但 2 种位移动速率都大大低于位移动速率控制标准(水平 5 mm/d 和竖向 10 mm/d), 因而在粉喷桩处理路段, 根据需要采用较快的填土速率是可行的, 同时有利于加大前期沉降量, 有利于减小工后沉降量。殷宗泽等^[18]也提出填土速率对最终沉降基本无影响, 但其“加荷速度快的, 工后沉降就较大”的观点是基于路堤施工完成后马上进行路面施工的前提, 这与路堤完成后一般要放置一段时间且全路段路基基本完工后才进行路面施工的实际情况是不相符的。

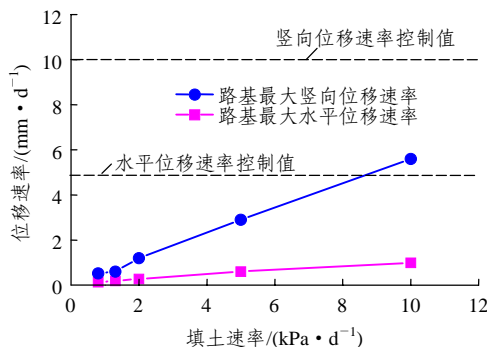


图 6 位移速率与填土速率关系

Fig.6 Relationship between displacement rate and construction rate

4.5 处治方案分析

上述计算结果表明: (1) 桩距与桩长是影响粉喷桩处理效果的控制因素。桩必须进入持力层一定深度, 但继续增加长度则对减小沉降意义不大; 而桩距决定了单桩承担的荷载大小, 桩距超过一定值时也不能满足沉降控制要求。(2) 实际桩侧摩阻力稍低于设计值时, 路基沉降增加较小, 只有当桩侧摩阻力大幅降低时路基沉降才会超出控制指标, 因此只要设计参数取值合理, 实际桩侧摩阻力小范围变化不会引起沉降的明显增加。(3) 桩及桩帽的存在使新老路基发生的差异变形很小, 在路基底层铺设土工格栅对减小不均匀沉降的作用不明显, 但考虑到施工质量和超载等变化因素, 将土工格栅作为路基不协调变形控制的安全储备是可行的。(4) 根据位移动速率控制可知, 采用 ≤ 10 kPa/d(相当于 1 d 填筑 2 层) 的填土速率是可行的。综合上述分析, 最终采用的方案如表 5 所示。

表5 路基处治设计与施工参数

Table 5 Parameters for the designs of foundation treatment and embankment construction

横向桩距/m	纵向桩距/m	桩长/m	桩侧摩阻力/kPa	填土速率/(kPa·d ⁻¹)	基底铺设土工格栅
1.10	0.95	14	10	≤10	是

4.6 讨论

为避免分析过程过于复杂及篇幅限制，本文仅限于对特定断面的分析，因而不考虑新老路基土层变化、路堤高度、新路堤宽度等因素变化对处治方案效果的影响。另外，计算结果表明在新老路基结合处附近的沉降最大，据此，在预计沉降较大位置采用较长的桩长和较小的桩距，而沉降较小位置采用较短的桩长和桩距，这样对减小新老路基不均匀沉降可能更为合理，但本文方案分析与实际设计都将粉喷桩在路基横断面方向作等桩长和等桩距处理，这固然考虑了设计与施工控制的方便，但其不合理处也很明显。下步研究宜对上述影响因素作进一步的分析。

5 监测验证与沉降预测

5.1 监测验证

图7为所选断面沉降变形计算与实测值^[19]对比情况，实际监测时间到路堤施工结束约5个月时终止，计算结果的时间与其一致。由图7可知，计算结果与实测沉降量和沉降规律符合较好，沉降随着路堤升高而增加，路堤施工完成后继续增加，但经过一段时间后趋于稳定。C1(新老路堤结合处)，C2(新路堤中心)和C3(新路肩)的沉降计算值比实测值大，后期沉降分别大0.8、0.6和1.8cm，原因可能是：实测沉降是从路堤施工了约1.0m时才开始，这部分初始沉降未反映到监测值中；沉降计算时有关参数取值偏于安全所致。监测结果表明累计沉降量小

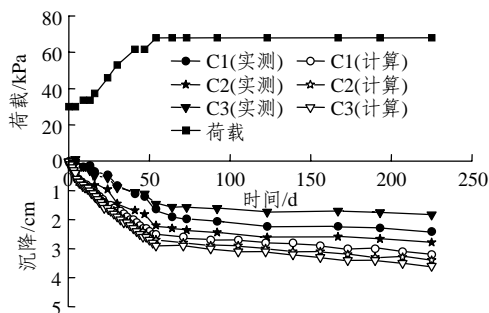


图7 计算与实测沉降对比图(EK174+145断面)

Fig.7 Comparison between calculated and monitored settlements(cross-section EK174+145)

于控制标准，采用的处治方案可行。

5.2 沉降预测

对上述方案的路面工后沉降进行了预测，从表6和图8的结果可知，运营期内断面的工后沉降预测值小于5cm，工后差异沉降预测值小于3cm，均满足控制标准。

表6 典型断面沉降预测

Table 6 Settlements prediction for typical section cm

工序沉降名称	通车时间/a									
	0	1	2	3	4	5	10	15	20	30
工后沉降	2.07	2.44	2.56	2.62	2.65	2.67	2.72	2.74	2.76	2.77
差异沉降	1.17	1.19	1.19	1.20	1.20	1.20	1.21	1.21	1.21	1.21

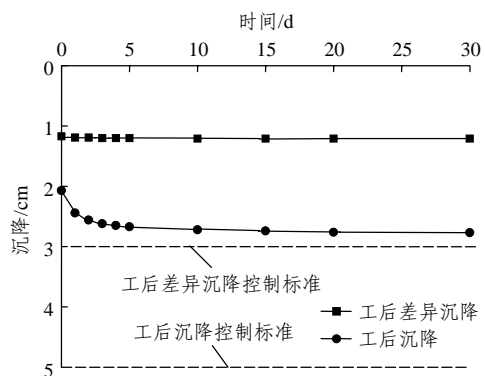


图8 工后沉降与时间关系图

Fig.8 Relationship between post-construction settlement and time

6 结论

通过对典型粉喷桩处理段拓宽软基处治方案进行数值计算分析和监测验证，得出的主要结论和建议如下：

(1) 采用粉喷桩进行拓宽软基处理时，桩长和桩距是影响变形的控制性因素，桩长过大对减小沉降无意义，桩距过大则不能满足沉降控制要求，本计算断面合理的桩长为进入持力层约2.5m，桩距约1.1m；桩侧摩阻力的降低对拓宽路基累计沉降的影响最大，对工后差异沉降和工后沉降的影响次之，但桩侧摩阻力降低幅度小于设计值的50%时，对沉降的影响较小；有桩和桩帽时在路基底层铺设土工格栅对减小差异沉降作用不明显；填土速率仅对拓宽路基变形速率产生影响，对累计变形基本上无影响，采用较快的填土速率是有利的。

(2) 现场监测的拓宽路基变形与数值计算结果基本相符，证明采用的数值模型和计算方法可行，所采用的处治方案合理。

(3) 建议进一步研究在路基横断面方向采用不

等桩长和桩距以及不同路堤高度下的拓宽软基处治设计方案, 以获得更加全面合理的优化结果。

参考文献(References):

- [1] 贾 宁, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 755 - 760.(JIA Ning, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin, et al. Theoretical analysis and measurement for widening project of Hangzhou—Ningbo expressway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 755 - 760.(in Chinese))
- [2] 高 翔, 刘松玉, 石名磊. 软土地基上高速公路路基扩建加宽中的关键问题[J]. 公路交通科技, 2004, 21(2): 29 - 33.(GAO Xiang, LIU Songyu, SHI Minglei. Key problems in embankment widening of expressway on soft ground[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(2): 29 - 33.(in Chinese))
- [3] 黄琴龙, 凌建明, 唐伯明, 等. 旧路拓宽工程的病害特征和机制[J]. 同济大学学报, 2004, 32(2): 197 - 201.(HUANG Qinlong, LING Jianming, TANG Boming, et al. On distress characteristics and mechanism in road widening engineering[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(2): 197 - 201.(in Chinese))
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D30 - 2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG D30 - 2004 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [5] 钱劲松, 孙力彤. 老路拓宽差异沉降计算的研究[J]. 兰州铁道学院学报(自然科学版), 2003, 22(4): 91 - 94.(QIAN Jinsong, SUN Litong. Study on differential settlement of widened road[J]. Journal of Lanzhou Railway University(Natural Sciences), 2003, 22(4): 91 - 94.(in Chinese))
- [6] 周志刚, 郑健龙. 旧路拓宽设计中的有限元分析[J]. 力学与实践, 1995, 17(5): 18 - 20.(ZHOU Zhigang, ZHENG Jianlong. Finite element analysis of road widening design[J]. Mechanics in Engineering, 1995, 17(5): 18 - 20.(in Chinese))
- [7] 蒋 鑫, 邱延峻. 旧路拓宽全过程三维有限元分析[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 419 - 423.(JIANG Xing, QIU Yanjun. Three-dimensional numerical simulation of pavement performance in widened roads[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 419 - 423.(in Chinese))
- [8] WANG H, HUANG X M. Centrifuge model test and numerical analysis of embankment widening on soft ground[C]// Proceedings of the International Conference on Applications of Advanced Technologies to Transportation Engineering. Beijing: American Society of Civil Engineers, 2004: 548 - 553.
- [9] 章定文, 刘松玉. 深层搅拌桩隔离墙应用于软基高速公路扩建工程的数值分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 10 - 13.(ZHANG Dingwen, LIU Songyu. Numerical analysis of the diaphragm wall for expressway widening on soft ground[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(11): 10 - 13.(in Chinese))
- [10] 苏 超, 徐泽中, 吴 钰, 等. 锡澄与沪宁高速公路沉降隔离墙工作状态的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(2): 52 - 54.(SU Chao, XU Zezhong, WU Yu, et al. Numerical calculation of the separation walls of Wuxi—Jiangyin expressway and Shanghai—Nanjing expressway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18(2): 52 - 54.(in Chinese))
- [11] 孙 伟, 龚晓南, 孙 东. 高速公路拓宽工程变形性状分析[J]. 中南公路工程, 2004, 29(4): 53 - 55.(SU Wei, GONG Xiaonan, SU Dong. Analysis of deformation in widening project of freeway[J]. Central South Highway Engineering, 2004, 29(4): 53 - 55.(in Chinese))
- [12] 孟庆山, 孔令伟, 郭爱国, 等. 高速公路高填方路堤拼接离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 580 - 586.(MENG Qingshan, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Centrifugal modeling test study on high-embankment widening of highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 580 - 586.(in Chinese))
- [13] HIROSHI M, MITSUO N. Design and numerical analysis of road embankment with low improvement ratio deep mixing method[C]// Geotechnical Engineering for Transportation Projects: Proceedings of Geo-Trans 2004. Reston, VA: ASCE, 2004: 1395 - 1402.
- [14] LAMBRECHTS J R, GANSE M A, LAYHEE A. Soil mixing to stabilize organic clay for I - 95 widening, Alexandria, VA[C]// Proceedings of the Third International Conference: Grouting and Ground Treatment. New Orleans, Louisiana, USA: ASCE, 2003: 575 - 585.
- [15] 聂 鹏, 曲向进, 刘奉侨, 等. 沈大高速公路改扩建工程路基加宽容许工后不均匀沉降指标研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 18 - 21.(NIE Peng, QU Xiangjin, LIU Fengqiao, et al. Allowable differential settlement for widened roadbed in Shenyang—Dalian expressway reconstruction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(11): 18 - 21.(in Chinese))
- [16] 李 涛, 洪宝宁, 宋法宝. 考虑过渡区影响的粉喷桩复合地基承载特性的有限元数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(3): 289 - 292.(LI Tao, HONG Baoning, SONG Fabao. Finite element analysis of bearing capacity of DJM piles composite foundation considering the influence of transition between piles and soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(3): 289 - 292.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ 017 - 96 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ 017 - 96 Technical specifications for design and construction of highway embankment on soft ground[S]. Beijing: China Communications Press, 1996.(in Chinese))
- [18] 殷宗泽, 朱 泓, 吴 钰. 沪宁高速公路地基沉降有限元计算分析[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(2): 22 - 26.(YIN Zongze, ZHU Hong, WU Yu. Finite element analysis of foundation settlement of Shanghai—Nanjing expressway embankment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18(2): 22 - 26.(in Chinese))
- [19] 刘观仕, 孔令伟, 丁 锋, 等. 高速公路扩建工程软基拓宽的沉降监测与分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 331 - 335.(LIU Guanshi, KONG Lingwei, DING Feng, et al. Settlement monitoring and analysis of soft foundation of an expressway widening project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 331 - 335.(in Chinese))