

文章编号:1005-0523(2020)02-0038-08

路基填筑引起水泥搅拌桩复合地基变形监测分析

项瑞聪^{1,2}, 杨龙才^{1,2}, 王炳龙^{1,2}

(同济大学 1. 道路与交通工程教育部重点实验室; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201814)

摘要:针对目前水泥搅拌桩复合地基在路基填筑作用下变形特性研究不足的问题,依托我国海积软土地区某水泥搅拌桩加固铁路路基填筑施工案例,对水泥搅拌桩复合地基变形进行监测,分析路基填筑作用下水泥搅拌桩复合地基变形特性,并为路基填筑速率控制和水泥搅拌桩加固方案设计提供建议。研究结果表明:路基填筑作用下地基加固区压缩量占总沉降的56.1%,沉降速率最大为2.4 mm/d;素填土和淤泥层侧向变形显著,侧向变形速率最大为4.6 mm/d;路基坡脚7 m内、深度5 m以上地层受路基填筑施工扰动较大;坡脚侧向变形速率较地基沉降速率更接近于控制指标,填筑速率的控制应以控制坡脚侧向变形速率为主;本施工案例中水泥搅拌桩加固方案可满足各铁路类别的路基工后沉降的控制要求,类似工程中水泥搅拌桩设计应以控制路基填筑施工对邻近结构物的影响为主。

关键词:路基填筑;水泥搅拌桩复合地基;沉降;侧向变形;现场监测

中图分类号:TU413 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.02.006

近年来,我国的铁路建设取得了跨越式发展。即便目前大量高速铁路线路采用“以桥带路”的形式修建,仍有约30%为路基结构,城际铁路和客货共线铁路更是较多地采用路基形式作为轨下基础。

同时,我国软土地区分布较广,特别是东南沿海地区的软土强度低,工程性质差。路基填筑作为一种堆载形式,会引起地基及邻近地层发生沉降和侧向变形,尤其是在软土地区。一方面,铁路路基对沉降控制较为严格,为确保列车安全、舒适、平顺地运行,路基的工后沉降需控制在较小范围内。另一方面,堆载引起的地层侧向变形会造成邻近结构物的桩基产生弯矩和变形,从而影响上部结构的稳定与安全^[1-2],甚至引发工程事故,如:长期堆载引起上海某工业厂房屋顶坍塌^[3]、天津中板厂原料车间地面堆载致使厂房的桩基折断^[4]及公路路基填筑引起连云港某互通区跨线桥墩柱偏移事故^[5]。关于土在堆载作用下沉降变形的研究较多,而侧向变形相对于竖向变形更为复杂,影响因素多,目前研究不足。

为控制铁路路基工后沉降和邻近重要结构物的变形,需对软土地基进行加固处理,目前水泥搅拌桩较多地应用于加固铁路软土路基。目前关于水泥搅拌桩复合地基沉降特性的研究较多^[6-8],但是路基填筑作用下水泥搅拌桩复合地基的侧向变形规律和邻近地层侧向位移场尚不明确,基于控制邻近结构物变形如何设计水泥搅拌桩加固方案、如何控制路基填筑速率等问题有待进一步研究。

本文依托海积软土地区新建铁路路基填筑施工案例,对水泥搅拌桩复合地基的沉降和侧向变形开展现场监测并对监测结果进行分析,研究路基填筑作用下水泥搅拌桩复合地基沉降和侧向变形特性,确定邻近地层侧向位移场,并为路基填筑速率的控制和水泥搅拌桩加固方案设计提供建议。本研究可为海积软土地区邻近重要结构物的路基填筑工程设计与施工提供有益参考。

1 工程概况

现场试验段位于浙江省乐清市虹桥镇境内,周边地势平坦,附近多村庄及农田。该区域含有淤泥质软土

收稿日期:2019-08-29

基金项目:国家青年自然科学基金项目(51608384);国家自然科学基金项目(51778485)

作者简介:项瑞聪(1995—),男,硕士研究生,研究方向为高速铁路路基地基处理。

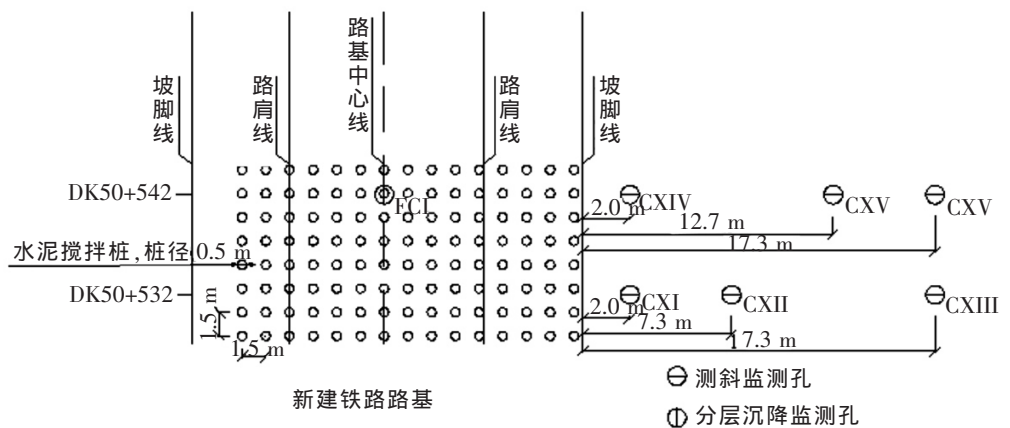
通讯作者:杨龙才(1971—),男,副研究员,博士,研究方向为高速铁路长期服役性能。

层,含水量较高,压缩性较强,强度较低,渗透性较差,属于典型的海积软土地区,地下稳定水位埋深为 0.4~1.0 m。土体物理力学性质统计如表 1。

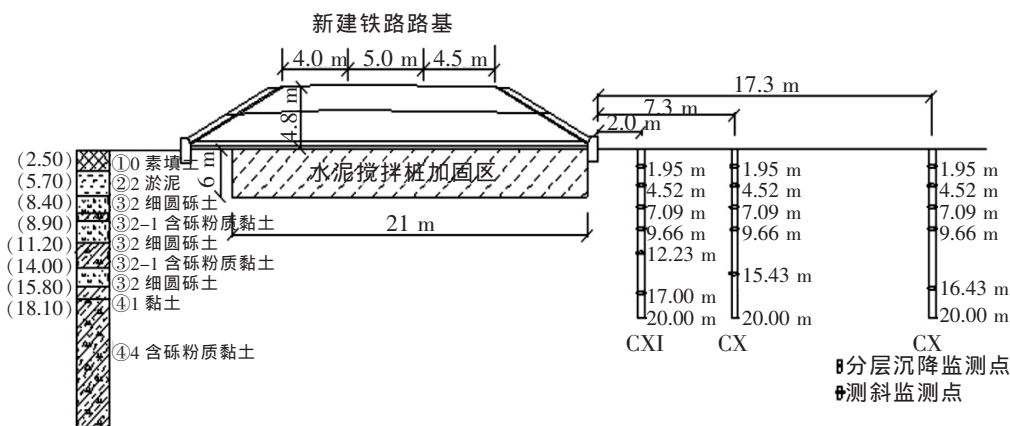
新建铁路为 级单线有砟铁路,设计速度为 80 km/h。路基填筑高度为 4.8 m,路基面宽度为 13.5 m,路基边坡坡率为 1:1.5。路基填筑采取横断面全宽、纵向分层填筑的方式。填筑区段完成一层卸土后,人工辅助推土机进行摊铺平整,最后光轮压路机配合重型振动压路机碾压进行填土压实作业。地基加固方式为水泥搅拌桩加固,加固设计方案为:桩径 0.5 m,桩间距 1.5 m,处理深度约为 6 m,穿透淤泥层,水泥掺入比约为 15%。路基及水泥搅拌桩加固方案见图 1。

表 1 施工现场岩土参数
Tab.1 Geotechnical parameters at construction site

土层名称	土层厚度/ m	天然含水 量 $\omega/\%$	天然密度 ρ_g / cm^3	天然孔隙 比 e	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	凝聚力 c/kPa	压缩模量 E_s / MPa	基本承载 力 σ_0 / kPa	岩土状态
① ₀ 素填土	2.5	-	-	-	-	-	-	-	潮湿,松软
② ₂ 淤泥	2.9~3.2	66.63	1.58	1.92	4.03	5.58	1.47	40	流塑,软弱土
③ ₂ 细圆砾 土	6.4~6.8	-	-	-	2.00	32.00	20.00	250	稍密~中密, 中硬土
③ ₂₋₁ 含砾 粉质黏土	3.3~4.0	20.75	2.05	0.60	15.00	10.00	5.00	150	软塑,软弱土
④ ₁ 黏土	1.2~2.3	38.73	1.82	1.09	12.60	28.67	1.82	150	软塑,软弱土
④ ₄ 含砾粉 质黏土	23.6	22.10	1.97	0.68	15.00	10.00	5.00	180	硬塑,中软土



(a) 平面示意图



(b) DK50+532 断面横断面示意图

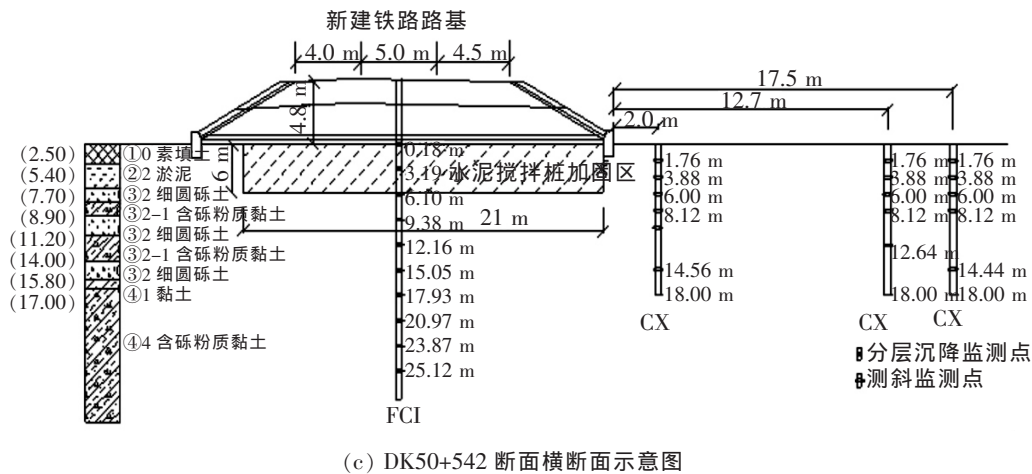


图 1 路基、水泥搅拌桩加固方案及测点布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of subgrade, cement mixing piles reinforcement scheme and measuring points layout

2 监测方案

采用分层沉降仪对路基填筑期间复合地基进行沉降监测。DK50+542 断面新建路基中心处布设分层沉降监测孔,编号为 FC。

采用 QXY600-30 型固定测斜仪对路基填筑期间复合地基及邻近地层进行侧向变形监测。DK50+532 断面距路基坡脚 2.0,7.3,17.3 m 处分别布设 3 个测斜监测孔,编号为 CX, CX 及 CX;DK50+542 断面距路基坡脚 2.0,12.7,17.5 m 处分别布设 3 个测斜监测孔,编号为 CX, CX 及 CX。

分层沉降监测共计 1 孔,10 测点;测斜监测共计 6 孔,32 测点。监测点布设位置见图 1。

3 监测结果分析与讨论

3.1 地基沉降特性

DK50+542 断面处,路基填筑作用下水泥搅拌桩复合地基沉降沿深度变化曲线见图 2(a),各土层的压缩量见图 2(b)。地基总沉降为 271 mm,随着深度增大,沉降和土层压缩量显著减小,深度 20 m 以下处土体沉降在 15 mm 以下。地基加固区主要为压缩性较强的素填土和淤泥层,压缩量为 152 mm,占总沉降的 56.1%;下卧层主要为细圆砾土和含砾粉质黏土,压缩量为 119 mm,占总沉降的 43.9%,说明本试验段水泥搅拌桩复合地基加固区的压缩变形是构成地基总压缩变形的主要部分。

图 3 为地基各分层沉降随加载时间变化曲线,图 4 为深 0.18 m 处地基沉降速率随加载时间变化曲线。地基不同深度处沉降发展规律类似,此处分析 DK50+542 断面深度为 0.18 m 处地基,其沉降发展规律可分为 4 个施工阶段来分析:

1) 路基填筑至 0.55 m。此阶段沉降变形和沉降速率均较小,沉降为 4 mm,最大变形速率仅为 0.2 mm/d

2) 施工间歇期。此阶段沉降仍在增长并逐渐收敛,沉降增长至 29 mm,沉降速率较小并逐渐收敛,最大沉降速率仅为 0.7 mm/d。

3) 连续填筑期,路基由 0.55 m 连续填筑至 4.85 m,期间无较长的施工间歇,共计 178 d。随着路基逐级填筑,沉降随之增加。填筑完成时,沉降增长至 265 mm。沉降速率相对较快,最大为 2.4 mm/d,平均 1.3 mm/d。

4) 路基静置期。路基填筑完成后,沉降仍在增长并逐渐收敛,沉降速率很快收敛。路基填筑完成后第 39 d,沉降为 271 mm,平均沉降速率仅为 0.2 mm/d。

图 5 为水泥搅拌桩复合地基加固区与下卧层压缩量比值随加载时间变化曲线。由图可知,当路基填筑至约 0.55 m 及后面的间歇期,该比值均保持在 0.5 以内,说明当填筑荷载较小时,水泥搅拌桩复合地基

的压缩主要由下卧层的压缩变形引起。随着路基填筑至标高,该比值逐渐增大;填筑完成后该比值基本保持不变,为 1.3 左右。说明当填筑至一定高度后,地基加固区的压缩变形发展迅速,并成为地基压缩的主要部分。

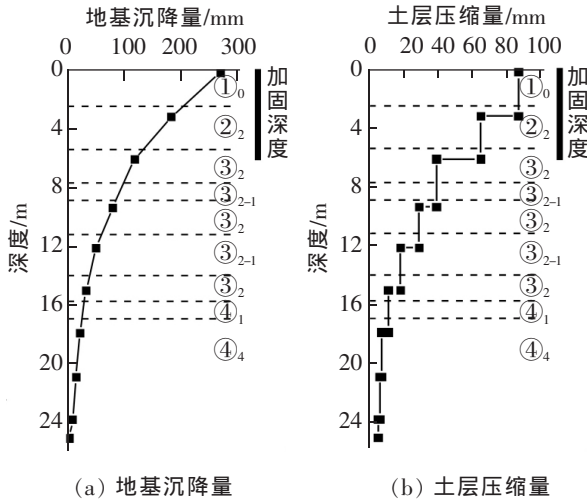


图 2 DK50+542 断面地基沉降

Fig.2 Foundation settlement of DK50+542 section

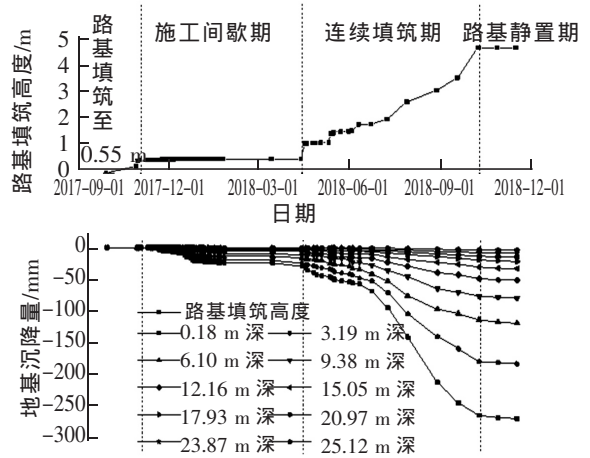


图 3 DK50+542 断面地基分层沉降时程曲线

Fig.3 Foundation settlement time-history curve of DK50+542 section

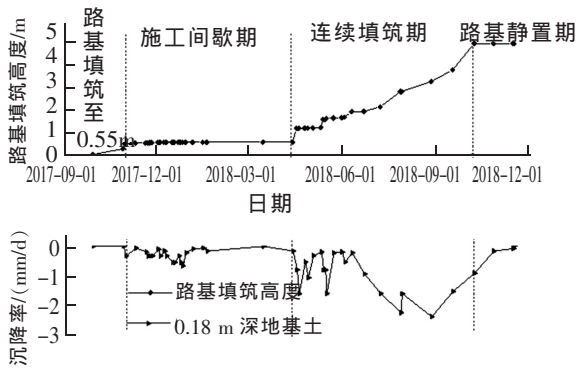


图 4 DK50+542 断面深 0.18 m 地基沉降速率时程曲线

Fig.4 Time-history curve of settlement rate of 0.18 m deep foundation of DK50+542 section

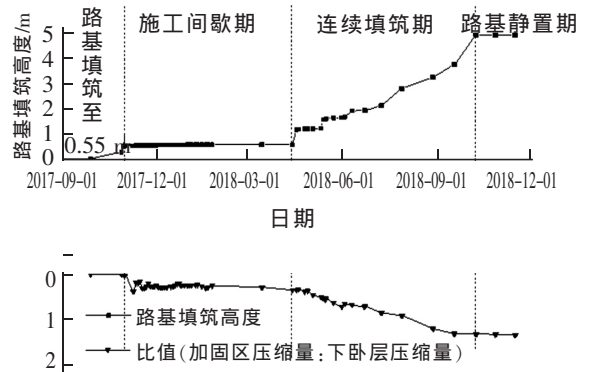


图 5 DK50+542 断面加固区与下卧层压缩量比值时程曲线

Fig.5 Time-history curve of compression ratio of reinforcement zone and underlying layer of DK50+542 section

基于实测数据采用双曲线法^[9]预测路基填筑作用下地基未完成的工后沉降,结果见表 2。经预测,地基在路基填筑完成后发生的工后沉降为 9.8 mm,平均沉降速率为 9.1 mm/年。我国《铁路路基设计规范》(TB 10001-2016)中规定 200 km/h 以下的 Ⅱ级有砟铁路的路基工后沉降控制限值为 300 mm,沉降速率控制限值为 60 mm/年^[10],监测断面处路基填筑施工引起地基工后沉降和沉降速率远小于控制指标。

表 2 路基填筑作用下地基工后沉降预测

Tab.2 Prediction of post-construction settlement of foundation under subgrade filling

断面	路基填筑完成后时间/d		最终沉降量 mm
	39	365	
DK50+542	6.0	9.1	9.8

3.2 地基侧向变形特性

路基填筑作用下水泥搅拌桩复合地基侧向变形沿深度变化曲线见图6。路基填筑会引起坡脚外地基土向远离路基方向发生侧向变形。距坡脚2 m处地表处侧向变形约为140 mm,侧向变形沿深度变化曲线呈“弓”形,即随着深度增加,侧向变形先增大后减小,最大侧向变形发生在地表以下约3 m处,位于②₂淤泥层中,DK50+532、DK50+542断面最大侧向变形分别为281 mm和254 mm。素填土和淤泥层侧向变形显著,下部细圆砾土层和含砾粉质黏土层侧向变形迅速减小。

图7为地基侧向变形随时间变化曲线,图8为地基侧向变形速率随时间变化曲线。2个监测断面不同水平距离处地层侧向变形发展规律类似,此处分析DK50+532断面距坡脚2 m处地基,其侧向变形发展规律可分为4个施工阶段分析:

- 1) 路基填筑至0.55 m。此阶段侧向变形和变形速率均较小,侧向变形为4 mm,最大变形速率仅为0.8 mm/d。
- 2) 施工间歇期。此阶段侧向变形仍在增长并逐渐收敛,侧向变形增长至13 mm,最大变形速率仅为0.6 mm/d,变形速率较小并逐渐收敛。
- 3) 连续填筑期,路基由0.55 m连续填筑至4.8 m,期间无较长的施工间歇,共计184 d。随着路基逐级填筑,侧向变形随之增加。填筑完成时,侧向变形增长至266 mm。变形速率较大,最大为4.6 mm/d,平均1.4 mm/d。
- 4) 路基静置期。路基填筑完成后,侧向变形仍在增长并逐渐收敛,变形速率很快收敛。路基填筑完成后第60 d,侧向变形为281 mm,平均变形速率仅为0.2 mm/d。

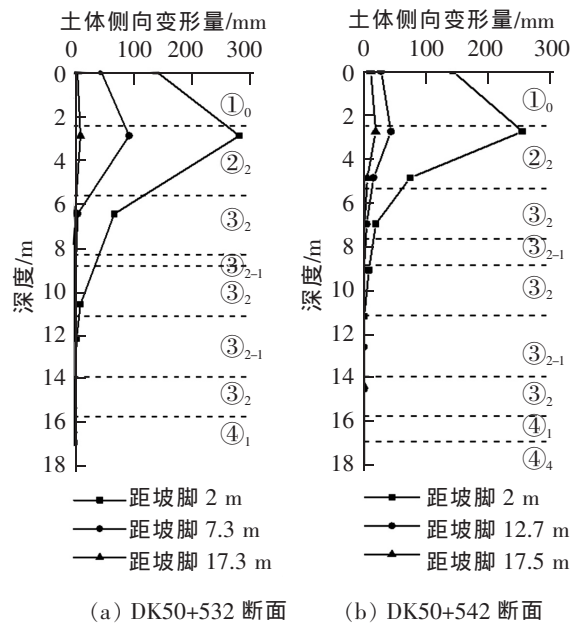


图6 地基侧向变形量
Fig.6 Lateral deformation of foundation

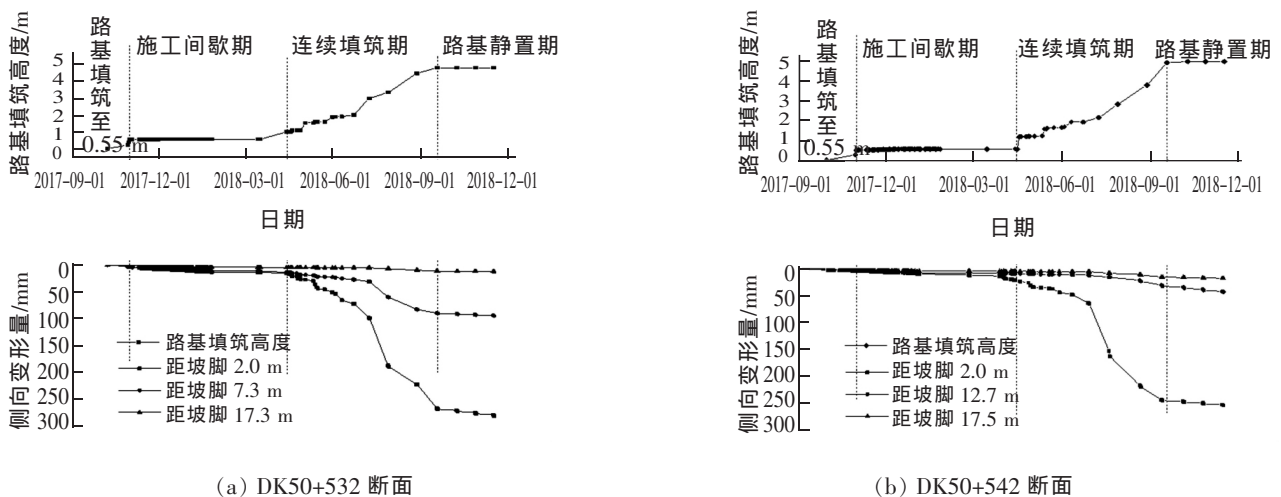


图7 地基侧向变形时程曲线

Fig.7 Time-history curve of lateral deformation of foundation

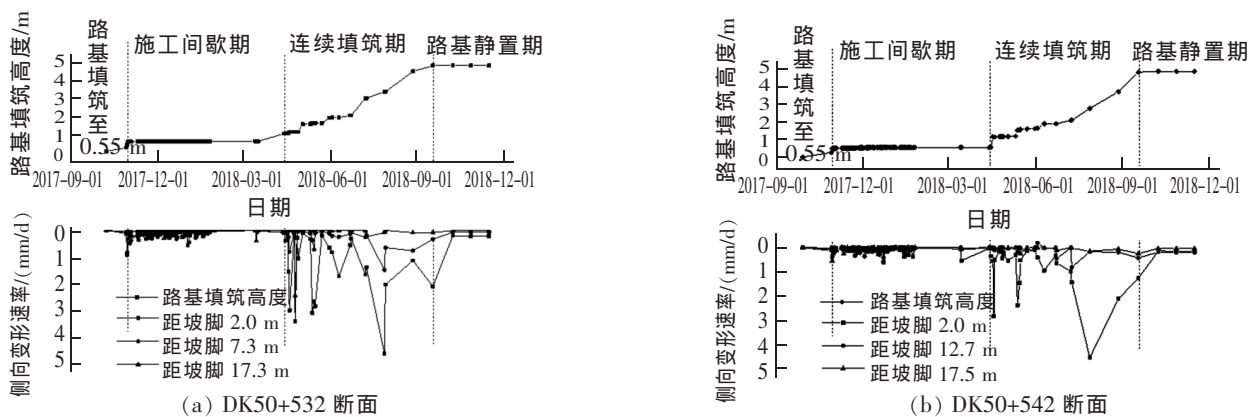


图 8 地基侧向变形速率时程曲线

Fig.8 Time-history curve of lateral deformation rate of foundation

3.3 邻近地层侧向位移场

DK50+532 和 DK50+542 断面相距较近,路基高度和地质条件一致;因此可将 CX ~CX 测斜孔各测点的侧向位移绘制入一幅等值线图中,得到路基填筑作用下邻近地层侧向位移场,见图 9。邻近地层不同水平距离处侧向位移沿深度分布规律一致,即先增大后减小,最大值在深度 3 m 处。水平方向上,随着距离增大侧向位移明显减小,等值线深度方向上较水平方向密集,可见侧向位移在深度方向上较水平方向收敛快。同时可确定该现场工程条件下路基填筑施工引起邻近地层侧向位移的影响范围,即路基坡脚 16 m 外或深度 7 m 以下地层侧向位移小于 2 cm,可以不考虑路基填筑施工对该区域结构物的影响,路基坡脚 7 m 内、深度 5 m 以上地层侧向位移大于 100 mm,受路基填筑施工扰动较大。

3.4 路基填筑速率控制建议

软土地基上填筑路基需严格控制地基稳定性以保证工程安全^[11]。目前我国相关规范^[12]采用地基沉降速率 10 mm/d、坡脚侧向变形速率 5 mm/d 作为控制指标。地基的变形速率与路基填筑速率有密切关系^[13],为保证地基稳定性需对填筑速率进行控制。

由图 4 可知路基填筑期间地基沉降速率最大值为 2.4 mm/d,小于沉降速率控制指标。由图 8 知两监测断面距坡脚 2 m 处地基侧向变形速率最大值均达 4.6 mm/d,与 5 mm/d 的控制指标较为接近。选取几个特殊施工节点分析如表 3,可见地基侧向变形速率不仅取决于填筑速率,还与填筑高度相关,当路基填筑至较大高度时,较小的填筑速率也会引起较大的侧向变形速率。

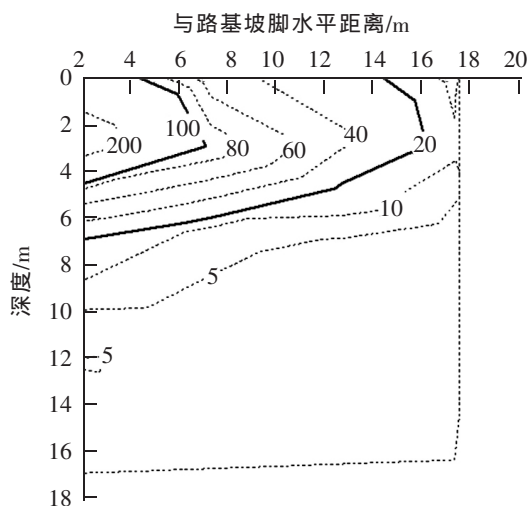


图 9 邻近地层侧向位移场等值线图(单位:mm)

Fig.9 Contour map of lateral displacement field in adjacent strata (Unit: mm)

表 3 地基侧向变形速率与填筑高度、填筑速率关系

Tab.3 Relationship between lateral deformation rate of foundation and filling height and filling rate

断面	填筑高度/m	填筑速率/(m/d)	侧向变形速率/(mm/d)
DK50+532 断面	0.4	0.17	0.85
	1.0	0.09	3.01
	3.3	0.02	4.64
DK50+542 断面	0.5	0.22	0.11
	1.5	0.17	2.41
	2.8	0.04	4.60

由上分析可知,路基填筑作用下水泥搅拌桩复合地基的坡脚侧向变形速率较地基沉降速率更接近于控制指标,路基填筑速率的控制应以控制坡脚侧向变形速率为主。地基侧向变形速率与填筑速率和填筑高度相关,当路基填筑至较大高度时,应当降低填筑速率。

3.5 水泥搅拌桩加固方案设计要求及建议

水泥搅拌桩加固方案设计应该基于控制路基工后沉降和邻近结构物侧向变形 2 个角度。

路基工后沉降由路基填土压密下沉、行车引起的累计塑性变形和地基产生的路基工后沉降三部分组成,截至目前的研究经验,路基填土压密下沉、行车引起的工后沉降很小,可不计入路基工后沉降,控制路基工后沉降主要是控制地基的工后沉降^[14]。不同类别的铁路对路基工后沉降的控制标准不同,我国《铁路路基设计规范》(TB 10001-2016)中给出了不同类别铁路的路基工后沉降控制标准,见表 4。可见,在本试验段的现场施工条件下,该水泥搅拌桩加固方案可满足各铁路类别的路基工后沉降的控制要求。

表 4 路基工后沉降控制标准

Tab.4 Control standard of settlement for post-construction subgrade

铁路类别		一般地段工后沉降/mm	路桥过渡段工后沉降/mm	沉降速率/(mm/d)	
有 砟 轨 道	200 km/h	≤150	≤80	≤40	
	客货共线铁路	级	≤200	≤100	≤50
		200 mm/d 以下 级	≤300	≤150	≤60
	高速铁路	300,350 km/h	≤50	≤30	≤20
		250 km/h	≤100	≤50	≤30
	城际铁路	200 km/h	≤150	≤80	≤40
160,120 km/h		≤200	≤100	≤50	
重载铁路		≤200	≤100	≤50	
无砟轨道		≤15	5	-	

当新建路基邻近变形控制严格的结构物时,还需控制路基填筑施工对邻近结构物的影响。结合本施工方案和表 4,当路基工后沉降控制要求较易满足时,水泥搅拌桩加固方案的设计应以控制路基填筑施工对邻近结构物的影响为主,可参考本施工方案中邻近地层侧向位移场(图 9),同时结合邻近结构物与新建路基距离、结构物的变形控制要求来进行水泥搅拌桩加固方案设计。

4 结论

1) 现场施工条件下,路基填筑引起海积软土地区水泥搅拌桩复合地基沉降特性为

地基总沉降为 271 mm。随着深度增大,沉降和土层压缩量显著减小。地基加固区压缩量占总沉降的 56.1%,加固区与下卧层压缩量之比逐渐增大,最后稳定在 1.3 左右。路基连续填筑期间沉降速率相对较快,最大值为 2.4 mm/d,路基填筑初期和静置期的沉降速率很小。监测断面处路基填筑施工引起的地基工后沉降和沉降速率远小于控制指标。

2) 现场施工条件下,路基填筑引起起海积软土地区水泥搅拌桩复合地基侧向变形特性为

坡脚外地基土向远离路基方向发生侧向变形,侧向变形沿深度变化曲线呈“弓”形,最大值发生在地表以下约 3 m 处淤泥层中,素填土和淤泥层侧向变形显著。路基连续填筑期间侧向变形速率较大,最大为 4.6 mm/d,路基填筑初期和静置期的侧向变形速率很小。

3) 得到了现场施工条件下,路基填筑引起的邻近地层侧向位移场,侧向位移在深度方向较水平方向收敛快,路基坡脚 16 m 外或深度 7 m 以下地层侧向位移小于 2 cm,路基坡脚 7 m 内、深度 5 m 以上地层受路基填筑施工扰动较大。

4) 路基填筑作用下水泥搅拌桩复合地基的坡脚侧向变形速率较地基沉降速率更接近于控制指标,路

基填筑速率的控制应以控制坡脚侧向变形速率为主。地基侧向变形速率与填筑速率和填筑高度相关,当路基填筑至较大高度时,应适当降低填筑速率。

5) 本施工案例中水泥搅拌桩加固方案可满足各铁路类别的路基工后沉降的控制要求,当路基工后沉降控制要求较易满足时,水泥搅拌桩加固方案的设计应以控制路基填筑施工对邻近结构物的影响为主。

参考文献:

- [1] 赵彤雯. 软土地区大面积堆载对场地以及临近桩基础的影响[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [2] ASHOUR M, PILLING P, NORRIS G. Lateral behavior of pile groups in layered soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(6): 580-592.
- [3] 杨敏,朱碧堂,陈福全. 堆载引起某厂房塌塌事故的初步分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 446-450.
- [4] 李忠诚,朱小军. 地面超载条件下土体侧移模式及对邻近桩基影响分析[J]. 岩土力学, 2007(S1): 809-814.
- [5] 张浩,石名磊,胡伍生,等. 互通区跨线桥邻近路基墩柱偏移事故分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 617-623.
- [6] 肖宇松,侯德军. 深厚淤泥质软土地区多向水泥搅拌桩的优化设计研究[J]. 路基工程, 2016(2): 154-157.
- [7] 郭彦荣. 水泥搅拌桩在某沿海铁路软土路基的应用研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(8): 100-102.
- [8] 叶春玺. 水泥搅拌桩在铁路软基处理中的应用[J]. 建筑技术开发, 2018, 45(24): 99-100.
- [9] 段天骁. 新建快速铁路软基加固段地表沉降计算与预测研究[D]. 南昌:华东交通大学,2017.
- [10] 铁道第一勘察设计院. 铁路路基设计规范(TB 10001-2016)[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
- [11] 高彦斌,张松波,郭永发. 软土地基的变形速率及稳定性控制[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 11-17.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范(JGJ79-2012)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [13] 邓胜强. 路堤填土速率与软土地基变形关系的研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [14] 王炳龙,杨新文,周宇,等. 高速铁路路基与轨道工程[M]. 上海:同济大学出版社,2015.

Monitoring Analysis on Composite Foundation Deformation of Cement Mixing Piles Under Subgrade Filling

Xiang Ruicong^{1,2}, Yang Longcai^{1,2}, Wang Binglong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201814, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201814, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient research on deformation characteristics of cement mixing piles composite foundation under subgrade filling at present, based on a construction case of railway subgrade filling reinforced by cement mixing piles in marine soft soil areas of China, this study monitored the deformation of composite foundation for cement mixing piles during subgrade filling. The deformation characteristics of composite foundation of cement mixing piles under subgrade filling were analyzed, and suggestions for subgrade filling rate control and cement mixing piles reinforcement scheme design were provided. The results show that the compression of the foundation reinforcement zone accounts for 56.1% of the total settlement under subgrade filling, and the maximum settlement rate is 2.4 mm/d. The lateral deformation of plain fill and silt layer is significant, and the maximum lateral deformation rate is 4.6 mm/d. The strata within 7 m from the foot of subgrade slope and above the depth of 5 m are greatly disturbed by the construction of subgrade filling. The lateral deformation rate of the slope is closer to the control index than the settlement rate of the foundation and the subgrade filling rate should be controlled mainly by controlling the lateral deformation rate of the slope. In this construction case, the cement mixing piles reinforcement scheme can meet the control requirements for post-construction settlement of subgrade of all railway types, the design of cement mixing piles in similar projects mainly controls the influence of subgrade filling construction on adjacent structures.

Key words: subgrade filling; composite foundation of cement mixing piles; settlement; lateral deformation; field test