

营口软土地区桩网复合地基沉降规律研究*

刘滨葭** 张 玲

(辽宁工程技术大学建筑与工程学院, 阜新 123000)

摘 要:为研究滨海软土地区高铁地基的沉降问题,以哈大高铁营口东站附近软土地基处理工程为研究对象,对路基填筑过程和工后长期地基沉降进行观测。利用有限元数值分析软件 ADINA 建立相应的数值计算模型,研究了地基表面沉降规律。研究表明:地基沉降主要发生在路基填筑施工期内,填筑期的沉降量占总沉降量的 70% 以上;路基填筑施工过程中,地基沉降曲线呈倒钟形,刺入现象明显,在 CFG 桩周沉降曲线呈“ $\cap$ ”形。基于现场实测数据,建立了工后长期地基沉降预测模型。对比分析结果表明,路基填筑完工三个月后(大约 100 d)预测公式精度较高,最终预测沉降量与观测值误差在 0.21% ~ 0.56% 之间,可以满足工后长期沉降预测要求。上述研究成果将为处理滨海地区高速软土路基工程,预测和控制工后沉降提供了合理的依据。

关键词:滨海地区;软土路基;桩-网复合地基;沉降;数值模拟

中图分类号:TU472 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1006-6055.2013.05.003

Research on Settlement Law of Pile-net Composite Foundation of High-speed Railway in Soft Soil area in Yingkou City*

LIU Bangjia** ZHANG Ling

(College of Architecture and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000)

Abstract:In order to research the foundation's settlement, the soft soil's foundation treatment project in Yingkoudong station of Ha'Da high-speed railway was taken as the research objects. The foundation's settlement has been continuously observed during the filling and post construction. The calculation model of the foundation has been established by ADINA software and the settlement law of pile-net composite foundation was researched. The research results show that the foundation's settlement mainly occurs in the embankment filling construction period. The foundation's settlement in filling construction period accounts for above 70 percent of the total settlement. The settlement curves show as inverted bell-shaped during the filling construction and has an obvious pierce phenomenon. The settlement curves around the cement fly-ash grave piles show as ' $\cap$ ' shape. The settlement's prediction empirical formula of the foundation's ground has been established basing on the field monitoring results. The comparison between the results shows that predictor formula has high precision after the embankment filling construction about three month or 100 days. The error is between 0.21% ~ 0.56% between the final predict values and observed values. Its prediction precision can meet engineering need. The above research achievements will provide a rational suggestion on the foundation's settlement prediction and post-construction control engineering of soft soil subgrade construction in coastal area.

Key words:coastal area; foundation of soft soil; pile-net composite foundation; settlement; numerical simulation

1 引言

随着我国高速铁路建设事业的迅速发展,滨海软土地区高速铁路地基的沉降问题越发突出。控制高速铁路路基变形和工后沉降,确保高速列车重复荷载作用下路基的稳定性与安全性,已成为我国高速铁路建设急需解决的关键难题之一^[1,2]。

目前滨海软土地区高速铁路地基处理主要采用强夯法、真空预压法、超载预压法以及复合地基等^[3-5],复合地基法应用比较普遍,主要有桩-筏复合地基和桩-网复合地基等几种类型,桩的类型包括水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)、水泥搅拌桩、预应力混凝土管桩(PHC 桩)、钢筋混凝土桩和现浇混凝土大直径管桩(PCC 桩)等^[6-8],沉降规律研究方法主要包括基于现场监测的经验法、基于有限元理论的数值模拟方法以及现场和室内模型试验等^[9-12]。

本文以哈大高铁营口东站附近滨海软土地区试验段为研究对象,在路基内设置沉降板,对采用“CFG 桩+褥垫层+高强土工格栅+褥垫层+高强土工格栅+褥垫层”复合地基加固形式的地基进行施工期沉降观测和工后长期沉降观测,

分析施工期和工后地基撑起沉降规律。利用有限元分析软件 ADINA 的单元生死功能,模拟了不同桩间距和桩径时该试验段软土路基填筑过程中地基沉降规律,获得了路基填筑施工过程中地基沉降值及变化规律。运用数学回归分析方法,基于路基实测数据建立了工后长期沉降预测公式,并将现场监测结果、数值模拟结果和预测结果进行了对比分析,验证了模型的可靠性。

2 现场沉降观测

2.1 工程概况

哈大客运专线设计时速为 300 km/h,预留 350 km/h 的技术条件,轨道工程采用无砟、有砟两种形式,营口东站里程附近地基为滨海软弱土地区,轨道采用无砟轨道形式。根据路基沉降控制要求,采用“CFG 桩+褥垫层+高强土工格栅+褥垫层+高强土工格栅+褥垫层”的复合地基加固形式对该地段路基进行处理。

营口东站里程附近土层为典型的新生界第四系松散堆积层,在勘探深度范围内,该场地地层主要由人工填土、粘性土及花岗岩风化层组成。地层自上而下依次描述为:1)素填土:黄褐色~深褐色,主要由粘性土及风化岩碎屑组成,该层分布不均,钻孔揭露厚度在 0.4 ~ 1.2 m,地基承载力特征值 $f_{ak} = 110$ kPa;2)淤泥质土:层厚 2.40 ~ 3.30 m,平均厚度 3.1

* 国家自然科学基金(50978131)资助

** E-mail: ljs_intu19860408@163.com

m.,土性呈灰褐、深灰、灰黑色,局部见有腐木块、泥炭质,往下部细粉砂增多,有腥臭味,具海棉状和孔隙状结构,流塑~软塑状态,地基承载力 $f_0=82\text{ kPa}$;3)淤泥质粉细砂层:层厚0.70~9.30 m,平均厚度3.1 m,土性灰、灰黑、深灰色,以粉细砂为主,含淤泥质,不均匀含粘粒并具粘结性,饱和、松散~稍密,级配不良,地基承载力 $f_0=101\text{ kPa}$;4)粉质粘土:黄褐色~红褐色,呈硬塑状态,切面稍有光泽,无摇震反应,钻探揭露厚度在0.8~6.3 m,分布连续,厚度不均,地基承载力 $f_0=210\text{ kPa}$;5)中粗砂层:层厚0.60~7.20 m,土性浅灰、黄色、暗黄灰、杂色,松散~稍密,局部中密,饱和,以石英质中粗砂为主,不均匀含粘、粉粒,稍有粘结,地基承载力 $f_0=243\text{ kPa}$;

2.2 沉降观测点布置

该试验段采用沉降板法对路基进行沉降观测,数据采集仪为 Trimble DINI03 电子水准仪,按一等水准测量要求进行数据采集。以第一次观测杆顶标高为初始数据,随着路基填筑施工逐渐接高沉降板测杆和保护套管,每次接长高度约为0.6 m 接长前后测量杆顶标高变化量确定为接高量,金属测杆用内接头连接,保护套管用 PVC 管外接头连接。本段工程竖向沉降管布置特殊处理了 5 个断面 (DK162 + 345、DK162 + 365、DK162 + 385、DK162 + 405、DK162 + 425),每个断面在路基断面中点和距中点左右各 5.5 m 处布置 3 个观测点,共计 15 个测点,见图 1,测点布置见图 2。



图 1 高填方路基竖向沉降管布置示意图

Figure 1 Layout diagram of the vertical sedimentation tube in the high fill subgrade

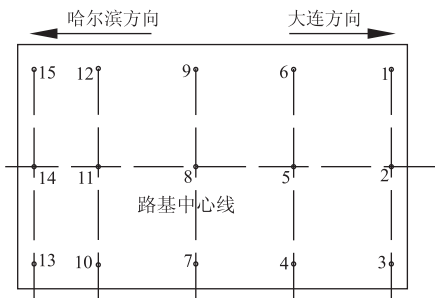


图 2 沉降观测点布置图

Figure 2 Layout of the settlement observation point

2.3 沉降观测结果分析

对上述 15 个沉降观测点进行长期观测,图 3 是左右两侧路肩的累计沉降量监测结果,图 4 为路基中心线处地基沉降量观测结果,监测开始时间为路基填筑工程开始日,路基填筑施工过程持续 45 d。

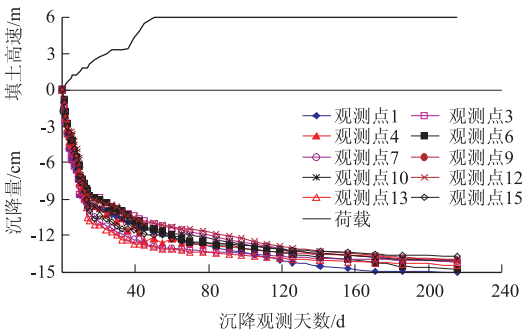


图 3 各观测断面左、右路肩沉降观测结果

Figure 3 The observation results of right and left shoulder settlement

图 3 表明,不同断面处两侧路肩的沉降规律相同,路基填筑完工初期路肩沉降变化迅速,此一过程大约历时 45 d,之后路肩两侧沉降速率逐渐减小,至工后 120 d 后,沉降率几乎降低为 0,沉降值趋于稳定。路基填筑完工后 216 d 现场沉降观测结果表明,路肩沉降最大值为 14.8 cm,出现在 DK162 + 345 里程处;最小值 13.69 cm,出现在 DK162 + 425 里程处。同一断面处,左右两侧路肩沉降观测结果差别较小。

图 4 表明,路基中心线处沉降观测结果规律大致相同,随着时间的增加,地基沉降值逐渐增加,至趋于平稳。路基填筑施工期,地基沉降变形较快,变形速率较大,路基填筑施工 45 d 时,路基中心线地基沉降量占观测期 (216 d) 总沉降量的 70.5%~85.0%,路基两肩沉降量占观测期 (216 d) 总沉降量的 77.3%~90.6%,高速铁路路基沉降主要发生在路基填筑施工期。

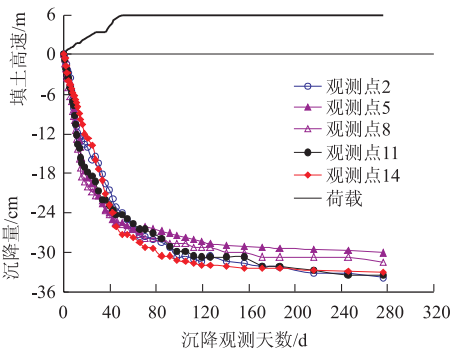


图 4 各观测断面路基中心线沉降观测及预测结果

Figure 4 The center line settlement observation results

3 数值模拟研究

3.1 数值模型的建立

为研究高速铁路桩-网复合地基沉降变形规律,合理预测施工后地基沉降,以哈大客运专线 DK162 + 345 断面为研究对象,建立三维路基计算模型^[13]。路基断面形式见图 5,路基数值计算模型见图 6。

考虑到路基的对称性,取半幅地基和路基进行分析,CFG 桩径 0.5 m,桩间距 1.5 m,采用梅花形布桩方式布置。路基高度 5.5 m,路基顶面宽度 13.0 m。填筑施工采用分层填筑的方式,第一层填土厚度 2.3 m (垫层 0.7 m + AB 组填

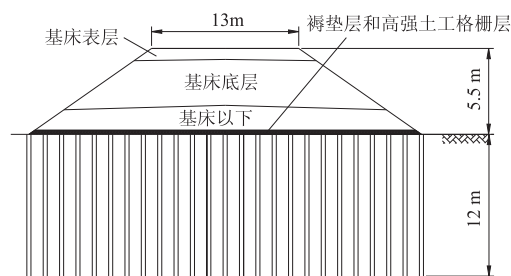


图5 DK162 + 345 路基断面形式

Figure 5 The subgrade section's type in DK162 + 345

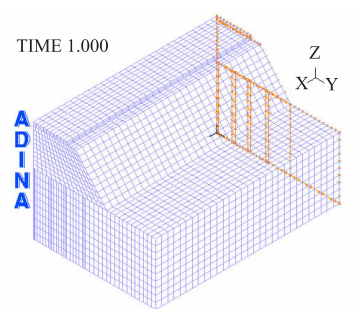


图6 路基数值计算网格模型图

Figure 6 Calculation model of foundation

料 1.6 m), 第二层 AB 组填料 1.5 m, 第三层填土 1.3 m (AB 组填料), 第四层铺级配碎石厚度为 0.4 m, 边坡斜率为 1: 1.5, 模型的计算深度为 18.5 m。

3.2 参数选取

为研究路基填筑过程中, CFG 桩-网复合地基沉降规律, 根据施工的实际情况, 桩径取为 0.5 m 桩间距取 1.5 m, 各层土和材料的物理力学指标如表 1 所示。采用 4 节点实体单元, 土体为 Mohr Coulomb 弹塑性模型; CFG 桩、级配碎石、AB 组填料等材料为各向等性的理想弹性体, 采用 Elastic Isotropic 模型; 边界条件: 底部为竖向固定, 侧面为水平固定; 填筑过程以及堆载预压过程用 ADINA 中的 birth time 功能来实现, 工后沉降利用时间步来控制。

表 1 DK162 + 345 断面各层土路基填料物理力学性质

Table 1 Physical-mechanical properties of foundation-filling of each layer in DK162 + 345

土层	名称	材料类型	厚度 /m	密度 ρ_d / (kg/m^3)	弹性模量 E /MPa	粘聚力 /kPa	摩擦角 φ / $(^\circ)$	泊松比 μ
轨道垫层	级配碎石	EI	0.4	2 100	420			0.15
填土	AB 组土	EI	5.2	1 950	298			0.25
路基垫层	土工格栅	EI	0.05		440			0.20
	级配碎石	EI	0.25	2 100	420			0.15
	淤泥质土	MC	3.1	1 850	19	13	12	0.35
	淤泥质粉细砂	MC	3.8	1 650	19	11	9	0.40
地基土	粉质粘土	MC	4.6	1 880	27	17	19	0.35
	中粗砂	EI	1.1	2 000	210			0.25
	CFG 桩	EI	12.0	2 400	2 086			0.22

3.3 数值模拟结果分析

利用 ADINA 中的生死单元功能, 实现模拟路基填筑过程。路堤填筑过程中各层填土后路基的沉降变形如图 7 所示。

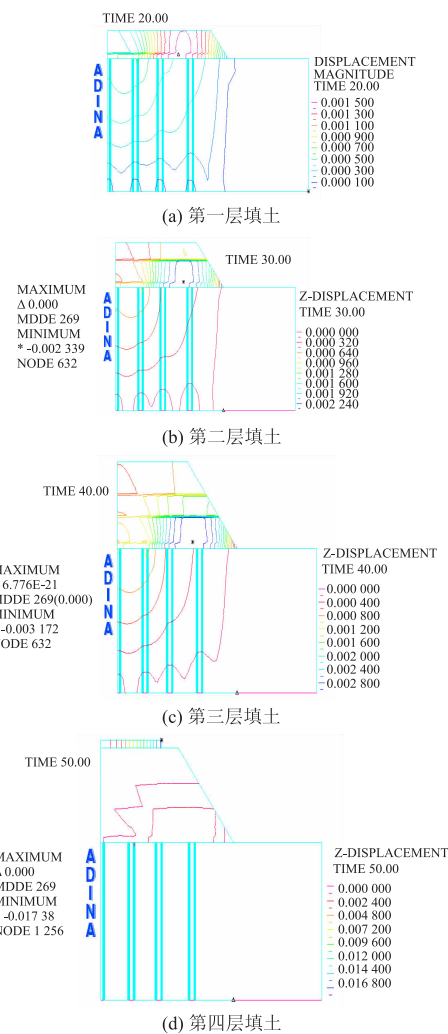


图7 路基填筑过程中沉降曲线

Figure 7 Settlement curves during the subgrade filling engineering process

数值模拟结果表明, 路基填筑施工过程中, 地基沉降曲线呈倒钟形, 刺入现象明显。路基填筑过程会引起地基沉降的变化, 填筑初期地基沉降较小, 随着路堤填筑厚度的增加, 地基沉降增加, 这与现场监测结果是一致的。通过分析图 7 可知, 路基填筑初期, 路基填土荷载对桩-网复合地基沉降影响较大, 桩间土沉降变化明显。随着填土荷载的增加, 桩间土的沉降反应逐渐减弱, 即由于摩擦作用, 桩分担的荷载比例逐渐增加, 桩间土分担的荷载比例逐渐减小, 故而桩间土的沉降反应减弱。

图 7 还表明由于 CFG 桩桩体的强度比周围土体大得多, 使得桩底端周围土体的沉降较小, 沉降曲线呈“ $\cap$ ”形。图 8 为通过数值模拟得到的 DK162 + 345 断面的地基面沉降曲线。

图 8 表明路基填筑施工时, 地基表面沉降量增加速度较大, 填筑施工完成后地基沉降量逐渐减小, 左、右路肩在路基填筑施工期内沉降量分别占总沉降量 (216 d 沉降量) 的 75.14% 和 74.87%, 路基中心线沉降量占总沉降量的 70.77%, 可见路基沉降主要发生在路基填筑施工期内, 这与

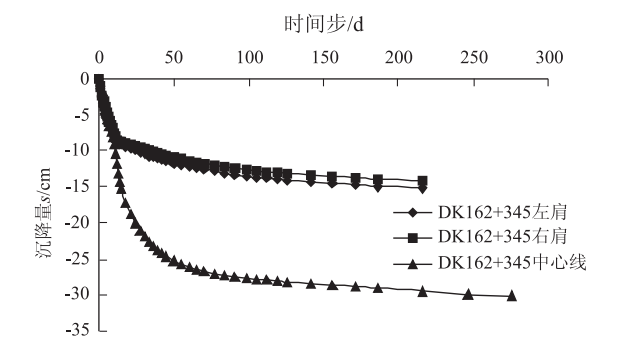


图 8 地基沉降曲线

Figure 8 Settlement curves of the foundation

现场监测结果是一致的。路基填筑施工完成后三个月内的沉降量分别占总沉降量的 92.33% (路基中心线)、95.15% (左路肩) 和 93.84% (右路肩), 沉降速率分别为 0.012 mm/d (路基中心线), 0.006 7 mm/d (左路肩) 和 0.009 9 mm/d (右路肩), 沉降速率较小。

4 预测模型

4.1 地基沉降预测模型

目前,基于路基实测资料的沉降预测方法,可分为地基参数法和数学分析法两大类^[14]。地基参数法是主要包括 Asaoka 法和固结度指数法等,需要较多的计算大量的地基参数,反演计算量大,工程上并不适用;数学分析法所建立的模型大多没有明确的力学意义,包括回归曲线分析法、神经网络分析法和基于系统分析和控制理论的灰色模型等^[15,16]。

为实现对高速铁路地基工后沉降的合理预测,基于数学回归分析法,根据施工期和工后 216 d 的长期沉降观测结果,利用数学分析软件 1stopt 对 5 个断面路基中心线的工后地基沉降进行拟合,得到滨海软土地区高速铁路地基工后长期沉降预测公式,见式(1)。

$$S = S_0 + a(1 - e^{-\frac{t}{b}}) + c(1 - e^{-\frac{t}{d}}) \tag{1}$$

式中, S 为地基沉降量,cm; S_0 为路基填筑施工结束时沉降量,cm; t 为自施工填筑期完成后算起的观测时间,d; $a \sim d$ 为拟合参数,见表 2。

表 2 路基填筑期各断面中心线沉降公式拟合系数

Table 2 The fitting coefficients of each section's settlement formula during the subgrade filling

拟合参数	DK162 + 345	DK162 + 365	DK162 + 385	DK162 + 405	DK162 + 425
S_0	-25.50	-25.74	-23.96	-24.23	-27.27
a	-4.93	-0.67	-6.20	-0.06	-6.41
b	90.63	8.29	25.86	0.22	37.73
c	-0.04	-5.18	-2 725.29	-9.15	0.87
d	0.18	82.79	167 135.40	63.14	0.07
R^2	0.979 5	0.980 9	0.989 2	0.975 7	0.993 7
S_∞	-30.47	-31.59	-	-33.44	-32.81

从表 2 可以看出本文所建立的软土地区高速铁路路基沉降预测经验公式相关系数较高($R^2 > 0.97$),说明公式具有较好的拟合精度。但 DK162 + 385 处拟合得到的参数 c 和 d 的值却与其余 4 个断面的值相差较大,说明 DK162 + 385 处地基沉降拟合系数是不可靠的,在数据分析中应予舍弃。

根据数学中的极限思想可知,工后长期沉降为当 $t \rightarrow \infty$ 时的 S 的值,即

$$\begin{aligned} S_\infty &= \lim_{t \rightarrow \infty} \{ S_0 + a(1 - e^{-\frac{t}{b}}) + c(1 - e^{-\frac{t}{d}}) \} \\ &= S_0 + a(1 - e^{\lim_{t \rightarrow \infty} (-\frac{t}{b})}) + c(1 - e^{\lim_{t \rightarrow \infty} (-\frac{t}{d})}) \\ &= S_0 + a + c \end{aligned} \tag{2}$$

式中, S_∞ 为地基最终沉降量,cm,计算结果见表 2。

从表 2 可知,各有效观测断面路基中心线最终沉降量分别为 30.47cm (DK162 + 345 处)、31.59 cm (DK162 + 365 处)、33.44 cm (DK162 + 345 处) 和 32.81 cm (DK162 + 345 处)。由此可见,采用“CFG 桩 + 褥垫层 + 高强土工格栅 + 褥垫层 + 高强土工格栅 + 褥垫层”复合地基加固形式的地基各断面沉降差较小,可以保证线路的平顺性。

4.2 模型的验证

为验证预测模型(1)的可靠性,以各里程断面路基中心线沉降数据为例,将路基填筑施工后的实测沉降数据、数值模拟结果和预测公式进行对比分析。由于路基填筑施工期路基沉降预测是没有意义的,因此图 9 和图 10 中的沉降量是以路基填筑施工结束时的沉降量为零点。

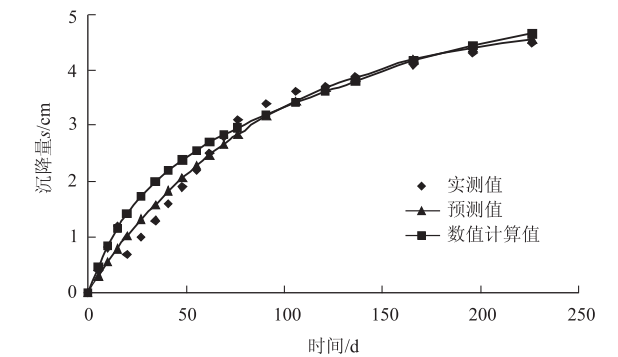


图 9 实测沉降值、数值模拟值与预测模型曲线

Figure 9 The field monitoring values, numerical simulation results and predict model calculated values

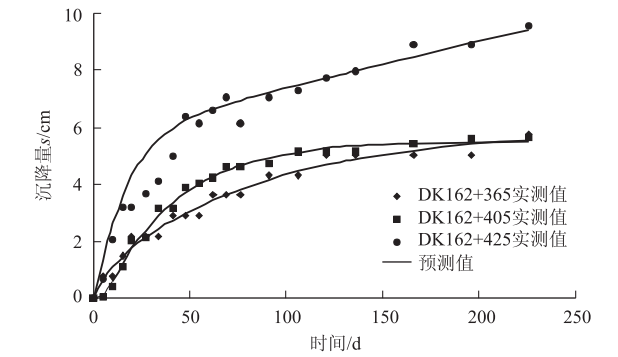


图 10 实测沉降值与预测模型曲线

Figure 10 The settlement curves of field monitoring values and predict model calculated values

图 9 表明 DK162 + 345 里程路基中心线实测沉降值和本文所建立的路基沉降预测模型在路基填筑施工刚刚完成时,预测精度稍差,但当路基填筑施工完成 120 d 后,实测值与预测值相差较小,216 d 沉降误差为 0.21%,吻合度较高,说明

了本文预测模型对于预测路基工后长期沉降预测的准确性。数值计算结果比实测沉降值略大,这也是因为在数值计算中对路基模型进行了简化所引起的,但可以看出二者差别不大,数值计算结果误差在 3.5% 以内,可以满足路基沉降预测精度的要求。

图 10 为 DK162+365、DK162+405 和 DK162+425 里程路基中心线沉降实测值与依据式(1)计算得到的工后沉降曲线。由表 2 可知,DK162+385 处拟合参数 c 和 d 较其他断面异常,因此在验证模型可靠性时不考虑 DK162+385 处沉降量。

图 10 表明各断面路基中心线沉降曲线与本文所建立预测模型得到的沉降曲线吻合度较好。与图 9 相同,在路基填筑施工完成后的 3 个月内,模型预测结果与实测沉降结果相差较大,而 3 个月后模型预测结果与实测结果逐渐接近,216 d 沉降误差分别为 0.36%、0.28% 和 0.56%,吻合度较好

5 结论

以哈大客运专线营口东站 DK162+345~425 试验段为研究对象,利用有限元分析软件 ADINA 模拟对路基填筑过程和工后沉降进行分析,建立了软土地区桩网复合地基沉降预测公式,获得主要结论如下:

1) 路基中心线和左、右路肩地基沉降变化规律相同,即路基填筑施工时,地基沉降速率较大,路基填筑施工期引起的地基沉降量占总沉降的 70% 以上,可以说沉降主要发生在路基填筑施工期内。

2) 根据 DK162+345 断面实际情况,建立了三维路基沉降数值模型。数值模拟结果表明,随着路基填筑厚度的增加,地基的沉降量变大。初次填土时,地基表面桩间土反应灵敏,沉降速率大。之后随着桩分担荷载比例的增加,桩间土的沉降反应逐渐减弱。CFG 桩附近沉降曲线呈“ $\cap$ ”形。

3) 基于数学回归分析方法,根据施工期和工后 216 d 的长期沉降观测结果,得到了滨海软土地区高速铁路地基工后长期沉降预测公式。实测值与预测值对比分析结果表明填筑施工完成后三个月内的预测模型精度不高,但工后 120 d 后,本文所建立的模型预测结果与实测结果吻合较好,说明本文所建立的模型可以很好的预测工后的长期沉降。

参考文献

- [1] 刘俊飞. 铁路 CFG 桩复合地基沉降控制机理与计算方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
- [2] 铁道第三勘察设计院,铁道第四勘察设计院. 新建时速 300~350 公里客运专线铁路设计暂行规定[S]. 北京:中国铁道出版社,2007.
- [3] ATAMATZIDIS D K, ATHANASOPOULOS G A, PAPANTONOPOULOS C I. Sand-geotextile interaction by triaxial compression testing[C]. The 5th International Conference on Geosynthetics. Singapore: Southeast Asia Chapter International Geosynthetics Society, 1994.
- [4] 王长丹,王炳龙,王旭,等. 湿陷性黄土桩网复合地基沉降控制离心模型试验[J]. 铁道学报,2011,33(4):84-93.
- [5] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京:中国铁道出版社,2006.
- [6] SA C T, PALMEIRA E M, DELLABIANCAL M A, et al. Numerical analysis of reinforced embankments on soft soils[Z]. Land marks in Earth Reinforcement, Sweets & Zeitlinger, 2001;265-270.
- [7] 雷学文,陈凯杰. 桩-网复合地基承载及变形特性的有限元分析[J]. 岩土力学,2007,28(增):819-823.
- [8] 徐林荣,牛建东,吕大伟,等. 软基路堤桩-网复合地基试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(10):2149-2156.
- [9] 苏维,杨怀志,马建林,等. 高速铁路深厚松软土层 CFG 桩桩筏和桩网复合地基沉降特性的试验研究[J]. 铁道建筑,2009,(7):66-69.
- [10] 连峰,龚晓南,崔诗才,等. 桩-网复合地基承载性状现场试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(4):57-63.
- [11] 汪莹鹤,赵新益,陈占,等. 郑武客专线粉质土地基沉降观测数据异常值判别及沉降预测研究[J]. 长江科学院院报,2013,4(30):79-84.
- [12] 胡汉兵,胡胜刚. 软土路堤工后沉降监测、分析与控制[J]. 长江科学院院报,2010,21(4):40-43.
- [13] 姚志勇,程谦恭,王寒冰. 潮汕车站深厚软土桩网复合地基沉降规律数值分析[J]. 路基工程,2011,(6):95-99.
- [14] 何良德,姜晔. 双曲线曲线模型在路基沉降预测中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(2):200-205.
- [15] 张留俊,黄晓明,冯伟,等. 人工神经网络在路堤沉降预测中的应用[J]. 公路交通科技,2006,23(5):7-10.
- [16] 辜清华,何良德. 预测路基沉降的一种新模型[J]. 石家庄铁道学院学报,2006,19(2):64-67.

作者简介

刘滨霞(1971-),男,汉族,副教授,主要研究方向:地基与基础。

(上接第 581 页)

- [7] KOO Y S, KANG T, LEE I R et al. Thermal cycle model of ladle for steel temperature control in melt and its application [J]. 1989 Steel-making conference, 1989:415-420.
- [8] ILEGBUSI O J, SEZEKELY J. Melt stratification in ladle [J]. Transaction Iron and Steel Institute of Japan, 1987:27.
- [9] WANG X C, ZHI H Q. Application of artificial neural networks and

genetic algorithms in inverse heat conduction problems [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2004,4:33-12.

- [10] 李斌,刘林华. 一种基于边界元离散的导热问题几何边界识别算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(20):38-43.
- [11] 朱丽娜,王广军,陈红. 采用共轭梯度法求解多综量稳态传热反问题[J]. 中国电机工程学报,2011,31(8):58-61.