

文章编号:1006-2106(2011)11-0030-06

高速铁路中等压缩性黏土沉降分析方法探讨^{*}

孙红林 陈尚勇^{**}

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要:研究目的:河流高阶地冲积成因中等压缩性黏土是京沪高速铁路广泛分布的一种地基土,具有较高的天然地基强度,通常不存在填土稳定性问题,天然条件或经浅层处理即可满足沉降控制不十分严格工程的要求。而高速铁路无砟轨道对路基工后沉降有严格的控制要求,对该类土的总沉降和工后沉降分析采用常规的理论计算方法其计算精度无法满足设计的要求。本文通过京沪高速铁路地基土基本特性分析和天然地基的现场填筑试验,研究该类土的沉降分析方法。

研究结论:总结了河流高阶地中等压缩性黏土的基本特性,特别是强结构性和高屈服强度的特性;分析了该类地基土在低荷载水平作用下的变形规律;提出了总沉降采用“弹性理论法”,以及工后沉降采用基于弹性理论的“沉降完成比例”的计算方法,通常荷载稳定放置 6 个月后,沉降完成比例可达 90% 以上。

关键词:高速铁路;中等压缩性黏土;地基沉降;弹性理论法

中图分类号:TU442 文献标识码:A

Discussion of Settlement Analysis Method for Mid - compressible Clay of High Speed Railway

SUN Hong - lin , CHEN Shang - yong

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd , Wuhan , Hubei 430063 , China)

Abstract: Research purposes: Alluvial mid - compressible clay on fluvial high terrace is widely distributed at the Beijing - Shanghai high speed railway , which has a characteristic of high natural strength. Generally , there is no stability problem of filling and it can meet the need of engineering with no strict requirement for settlement when it at natural condition or after shallow layer treatment. However , ballastless track in high speed railway has strict requirements for subgrade residual settlement; Furthermore , current theoretical methods for calculating total and residual settlement of this type of soil can not meet the design requirement. So , through analysis of the basic characteristics of foundation soil and in - situ filling experiment on natural ground of Beijing - Shanghai high - speed railway , the settlement analysis method of this type of soil is studied.

Research conclusions: Basic characteristics , especially strong structural characteristic and high yield strength characteristic of mid - compressible clay on fluvial high terrace are summarized in this paper. Deformation law of this kind of foundation soil under low loading level is analyzed; At last , different calculation methods are proposed to calculate different settlement , that is , elastic theory method and proportion of settlement - completion method based on elastic method can be used in total settlement and residual settlement calculation respectively. Generally speaking , after the load stable for 6 months , completion of the settlement ratio can be up to 90% .

Key words: high speed railway; mid - compressible clay; ground settlement; elastic theory method

^{*} 收稿日期:2011-09-02

^{**} 作者简介:孙红林,1973 年出生,男,教授级高级工程师;陈尚勇,1977 年出生,男,高级工程师。

高速铁路对线下工程铺轨后变形提出了严格的控制标准,路基一般地段不宜大于 15 mm^[1]。大量实测资料表明,路基工后沉降主要是铺轨后地基的残余沉降^[2]。通过长期的试验研究和工程应用,当前已经基本掌握了饱和软黏土的沉降机理、计算方法及处治对策^[3];而对于河流高阶地中等压缩性黏土,因具有较高的强度,简易浅层处理后便可满足普通道路工程、多层建筑物等对地基的要求,其沉降分析方法研究甚少,仅在建筑规范^[4]作过说明“一般多层建筑物在施工期间完成的沉降量,……对于中等压缩性土可认为已完成 20%~50%。”另外,对该类土,德、日、法等高速铁路发达国家仍建议按“饱和软黏土”进行分析,但已有测试数据与计算值存在明显差别。如京沪高速铁路昆山试验段实测沉降约为计算值的 0.6 倍,在荷载稳定 9 个月后沉降基本完成^[5];合宁线膨胀土试验段实测沉降约为计算值的 0.15~0.2 倍,路基填筑完成 6 个月后沉降基本不再发展^[6]。京沪高速铁路徐州至上海段“以桥代路”后路基主要位于河流高阶地,地基土多为中等压缩性黏土,开展天然地基基本特性测试和现场填筑试验,对指导工程建设具有重要意义。

1 河流高阶地中等压缩性黏土的基本特性

1.1 一般工程地质特征

京沪高速铁路河流高阶地中等压缩性土主要为第四系上更新统黏土,冲积成因,褐黄色,硬塑状,弱膨胀潜势,具垄岗地貌景观,多呈垄岗与沟谷相间。在前期查明分布特征和基本物理力学指标的基础上选取代表性工点进行了详细的综合勘探测试,采用的勘察手段包括机动钻探、土工试验以及静力触探、平板载荷试验、螺旋板载荷试验、扁板侧胀试验、旁压试验等多种原位测试手段,揭示的地基土的物理力学指标如表 1 所示。由表 1 可知,该类土是具有低含水率、小孔隙比、高液限、高强度、中等~中等偏低压缩性、低渗透性、不完全饱和及具有强结构性等特征的硬塑状黏土。

表 1 地基土一般物理力学参数统计表

项目	范围值	平均值
天然含水率 $\omega/\%$	20.4~25.8	22.9
天然孔隙比 e	0.58~0.82	0.69
液限 $\omega_L/\%$	32.1~51.0	37.6
塑限 $\omega_p/\%$	15.0~19.9	17.7
液性指数 I_L	0.16~0.46	0.26
饱和度 $S_r/\%$	0.78~0.98	0.92
快剪	C/kPa	37.0~91.0
	$\varphi/(\text{^\circ})$	12.6~26.4

续表 1 地基土一般物理力学参数统计表

项目	范围值	平均值
固快	C/kPa	30.0~62.0
	$\varphi/(\text{^\circ})$	17.7~39.0
残剪	C/kPa	34.0~38.0
	$\varphi/(\text{^\circ})$	19.0~22.5
压缩系数 $a_{0.1-0.2}/\text{MPa}^{-1}$	0.11~0.23	0.15
渗透系数 $k_v/(\times 10^{-8}\text{ cm/s})$	1.8~5.7	2.9
前期固结压力 P_c/kPa	328~469	405
压缩指数 C_c	0.12~0.27	0.19
回弹指数 C_s	0.01~0.02	0.015
比贯入阻力 P_s/MPa	2.47~5.25	-
基本承载力 σ_0/kPa	-	240(深度 1.3 m)

1.2 高压压缩试验和平板载荷试验下的变形特征

典型高压压缩试验曲线如图 1 所示,该类土具有较高的前期固结压力,屈服强度达到 451 kPa,小于屈服强度时回弹率可达 80%,且卸荷曲线与再加荷曲线之间的闭合圈很小。理论上,只有经过多次卸荷-再加荷两者之间才能形成完全闭合的直线,说明该类土曾经经历过类似的应力历史。

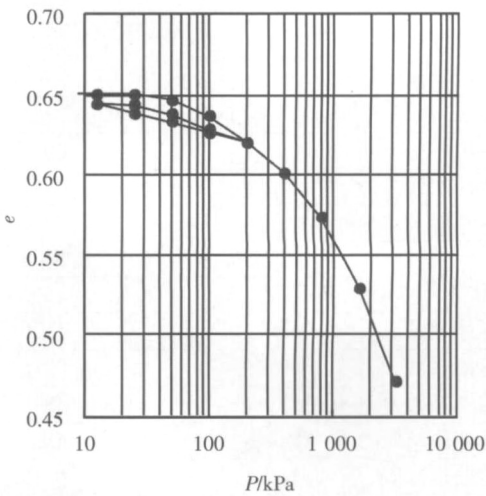


图 1 典型高压压缩曲线

典型慢法平板载荷试验曲线如图 2 所示。与高压压缩试验具有相同的特点,即在低荷载水平(200 kPa)作用下,地基土表现为以弹性变形为主的变形特性,卸荷回弹率为 75.6%;当荷载水平较高时,变形急剧增加,卸荷回弹率大大降低。以目前高速铁路的填高 6 m 路桥分界高度,路基荷载应位于低荷载水平范围以内,地基土的变形应以弹性为主。

2 天然地基填筑试验

2.1 试验工点工程地质条件

经比选,选取安徽省滁州市南谯区保家站作为天然地基现场填筑试验工点,对应京沪高速铁路正线里程为

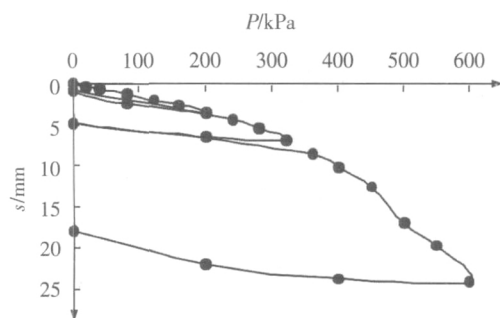


图2 平板载荷试验曲线

DK 960 + 850 ~ DK 961 + 000。场地属长江二级阶地，呈垄岗式地貌，地面标高约 33 m，设计填高 4.2 ~ 6.5 m。地基土自上而下共分两层，上部为 Q_3^{al} 均质黏土，厚 10 ~ 12 m，表层 0.5 m 为种植土；下伏 K_2 泥岩，全风化 ~ 弱风化，揭示厚度大于 15 m，动探 $N_{63.5} = 13.4$ 击，弱风化岩单轴饱和抗压强度 $R_c = 2.74$ MPa。黏土层主要物理力学指标如表 2 所示。

表2 试验工点地基土物理力学指标

项 目		平均值
天然含水率 $\omega / \%$		22.7
天然孔隙比 e		0.674
液限 $\omega_{\text{L}} / \%$		37.2
塑限 $\omega_{\text{p}} / \%$		20.0
液性指数 I_{L}		0.17
饱和度 $S_{\text{r}} / \%$		92.0
快剪	C / kPa	64.4
	$\varphi / (^\circ)$	16.2
压缩模量 $E_{\text{s}0.1-0.2} / \text{MPa}$		11.0
压缩系数 $a_{\text{v}0.1-0.2} / \text{MPa}^{-1}$		0.16
渗透系数 $k_{\text{v}} / (\times 10^{-8} \text{ cm/s})$		2.0
前期固结压力 $P_{\text{c}} / \text{kPa}$		402.3
压缩指数 C_{c}		0.19
回弹指数 C_{s}		0.015
超固结比 OCR		1.4 ~ 7.7
比贯入阻力 $P_{\text{s}} / \text{MPa}$		3.53

2.2 试验工点测试方案

选取对应正线里程 DK 960 + 900、+ 950 的保养点断面作为 1[#]、2[#] 测试断面，填土高度分别为 4.25 m、5.5 m，填土顶部宽度 19 m，边坡坡度 1 : 1.5，测试内容包括基底竖向土压力、地基表面沉降、分层沉降、侧向位移和孔隙水压力等，元器件布置如图 3 所示。

3 测试结果分析

试验工点填土自 2008 年 11 月开始，至 2009 年 3 月结束，填筑速率大于 1 m/月，实测土压力与理论计算值较为接近，1[#] 断面中心为 81.3 kPa，2[#] 断面中心为

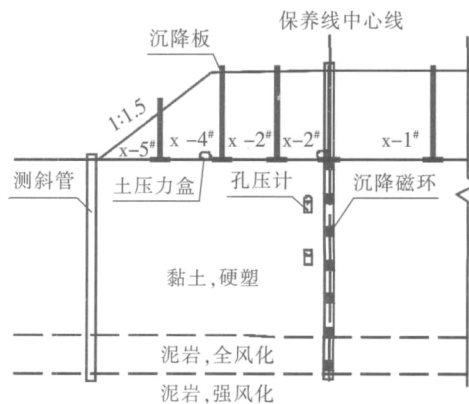
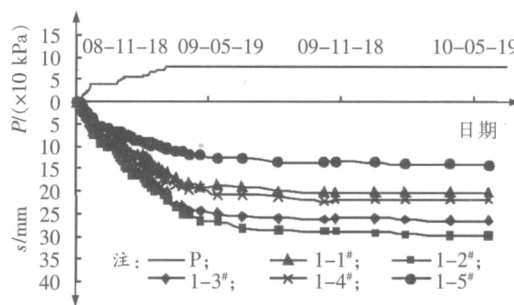
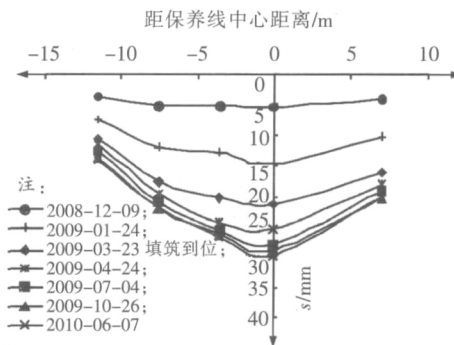


图3 试验断面元器件埋设图

104.5 kPa，路肩部分稍小。

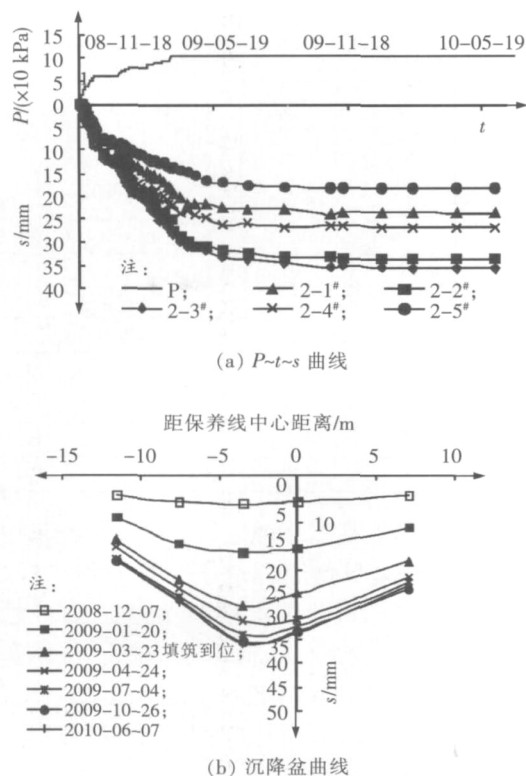
3.1 地表沉降特征

图 4、图 5 分别为 1[#]、2[#] 断面地基表面 $P \sim t \sim s$ 曲线和横向沉降盆曲线。由图可知，两个断面的沉降特性基本一致，只是 2[#] 断面填土荷载大于 1[#] 断面，其地表沉降值稍大一些；但是总体上均较小，2010 年 6 月最大值分别 29.9 mm 和 35.8 mm，且在填筑完成 6 个月后趋于稳定。横向表现为不均匀沉降特征，边坡中部沉降约为中心沉降的 47% ~ 51%，横向差异沉降率 0.13% ~ 0.14%，较软土地基小。荷载稳定 6 个月后，沉降基本不再发展。

(a) $P \sim t \sim s$ 曲线

(b) 沉降盆曲线

图4 1[#]断面地基表面沉降曲线

图 5 2[#]断面地基表面沉降曲线

3.2 分层沉降特征

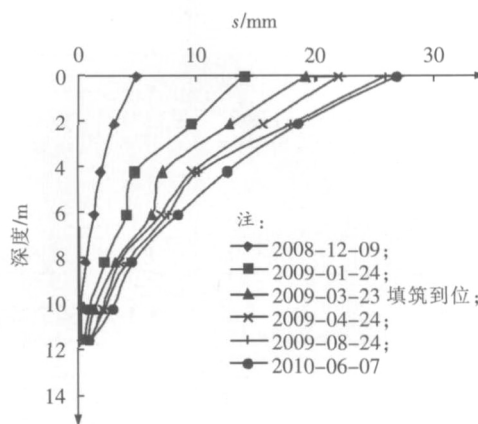
图 6 为 1[#]测试断面不同时期的分层沉降曲线, 第一个磁环测出的沉降量与地表沉降板观测的沉降量基本一致。2010 年 6 月份 1[#]断面磁环测出的地表沉降为 26.9 mm, 比沉降板测试数值小 3.0 mm, 10.2 m 以下沉降极小, 仅为 2.2 mm。2[#]断面分层沉降测试结果与 1[#]断面类似, 磁环测出的地表沉降为 34.2 mm, 比沉降板测试数值小 1.6 mm, 11.1 m 以下沉降为 3.2 mm。分析表明, 施加荷载后的变形主要发生在黏土层, 占全部变形比例超过 94%。分层沉降随时间的变化情况与地表沉降基本一致。

3.3 深层水平位移特征

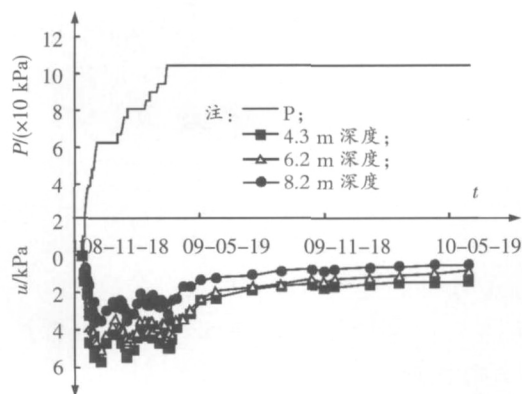
采用高精度测斜管对地基深层水平位移进行测试。实测地基深层侧向位移极小, 1[#]、2[#]断面最大值接近地表处, 分别为 7.1 mm 和 5.4 mm, 主要发生在距地表 4 m 深度范围内, 表明地基土尚处于竖向压密阶段, 基本未产生横向塑性变形。

3.4 超孔隙水压力变化特征

图 7 为 2[#]断面荷载-时间-超孔压($P \sim t \sim u$)关系曲线。由图可知, 在填筑荷载作用下, 地基土不同深度内产生了超静孔隙水压力, 但是其幅值较小, 最大值不足 6 kPa, 占所处位置附加应力的 5.5%。6 kPa 超孔压引起的水力梯度远小于黏土临界水力梯度, 不会

图 6 1[#]断面分层沉降曲线

形成渗流, 与饱和软黏土有效应力原理和排水固结理论假设初始附加应力完全由孔隙水压力承担截然不同。采用排水固结理论分析该类土的沉降时间特性似有不妥。由地基土基本特性可知, 其渗透性极低, 土中孔隙水多以结合水的形式存在, 分析认为外部施加的荷载主要由土粒骨架承担, 这与平板载荷试验所测得的低荷载水平下地基土以弹性变形为主是一致的。

图 7 2[#]断面 $P \sim t \sim u$ 曲线

4 沉降分析方法探讨

4.1 实测沉降推算总沉降及各阶段沉降完成比例

选取荷载稳定后最后 6 个月的沉降板实测数据, 采用双曲线法方法拟合, 求得两个断面的总沉降分别为 31.2 mm 和 36.7 mm, 各时段沉降量及沉降完成比例如表 3 所示。

4.2 天然地基总沉降分析方法探讨

分别按 $e \sim P$ 曲线、规范^[4]修正系数法, 考虑前期固结应力的 $e \sim \log P$ 曲线法及弹性理论法计算天然地基沉降, 并与实测推算值进行比较, 如表 4 所示。需要指出的是, 在 $e \sim P$ 曲线法、规范修正系数法、 $e \sim \log P$ 曲线法计算时, 考虑到地基土中的水多以结合水形式存在, 自重应力按水土合算取天然容重求得。

表 3 不同时段沉降量完成比例

断面 编号	推算总 沉降量 /mm	填筑完成时			荷载稳定 3 个月			荷载稳定 6 个月			荷载稳定 12 个月		
		实测 沉降 /mm	剩余 沉降 /mm	完成沉 降比例 /%	实测 沉降 /mm	剩余 沉降 /mm	完成沉 降比例 /%	实测 沉降 /mm	剩余 沉降 /mm	完成沉 降比例 /%	实测 沉降 /mm	剩余 沉降 /mm	完成沉 降比例 /%
1 [#]	31.2	21.4	9.8	68.6	27.7	3.5	88.8	28.8	2.4	92.3	29.7	1.5	95.2
2 [#]	36.7	27.8	8.9	75.7	33.6	3.1	91.6	35.0	1.7	95.4	35.7	1.0	97.3

表 4 不同沉降计算方法计算沉降与实测沉降比较表

断面	实测推算 /mm	$e \sim P$ 曲线法		规范方法		$e \sim \log P$ 法		弹性理论法	
		沉降/mm	相对误差/%	沉降/mm	相对误差/%	沉降/mm	相对误差/%	沉降/mm	相对误差/%
1 [#]	31.2	90	188.5	46.2	48.1	35.0	12.2	31.1	0.3
2 [#]	36.7	120	227.0	63.8	73.8	41.0	11.7	41.5	13.1

弹性理论法按式(1)计算:

$$s = C_d P b \frac{1 - \mu^2}{E_0} \quad (1)$$

式中 C_d ——与荷载面积、形状、压缩层厚度、沉降计算点位置等有关的系数^[7];

P ——均布荷载;

b ——荷载宽度;

μ ——泊松比,取 0.25(实测侧向变形最大值与竖向沉降比值为 0.15~0.27);

E_0 ——地基土的变形模量,取 $2.5E_{s0.1-0.2}$ 。

由表 4 可以看出,采用 $e \sim P$ 曲线法和规范方法求得地基总沉降与实测沉降相差较大,相对误差分别达到 188.5%~227.0% 和 46.2%~63.8%,而采用 $e \sim \log P$ 法和弹性理论法分析求得的地基沉降与较为接近,相对误差只有 0.3%~13.1%。分析认为, $e \sim \log P$ 曲线法计算时考虑了前期固结压力,当荷载水平小于前期固结压力时,变形处于“回弹指数”段,实质上反映的是弹性压密阶段的变形(对应于平板载荷试验的地基土压密直线段),只是没有考虑侧向变形引

起的竖向沉降。而地基土强度较高时侧向变形引起的竖向变形很少,故与弹性理论法计算的结果较接近。弹性理论法是考虑低荷载水平下,地基土以弹性变形为主,并计入侧向变形的沉降分析方法。从地基土基本特性、平板载荷试验、荷载水平结合实测对比,笔者认为,对该类土的沉降分析方法应采用弹性理论法,这与沉降完成的过程也较吻合。

4.3 天然地基工后沉降分析方法探讨

按双向排水考虑,采用排水固结法求解不同阶段固结度来计算固结沉降,并与分阶段实测沉降进行比较,如表 5 所示。由表 5 可知,采用排水固结法求解的不同阶段沉降量与实测沉降量的差别较大,不适用于该类土的工后沉降分析。若将地基沉降理解为“似弹性沉降”(由于地基土是由三相组成的材料,非绝对意义上的弹性变形),按不同阶段“沉降完成比例”求解工后沉降较为准确,也更能反映此类土的沉降变形特性。从本试验工点来看,荷载稳定 6 个月后,沉降完成比例达到 92.3%~95.4%。

表 5 排水固结法求解分段沉降与实测沉降比较

断面 编号	推算总 沉降量 /mm	填筑完成时			荷载稳定 3 个月			荷载稳定 6 个月			荷载稳定 12 个月		
		实测 沉降 /mm	计算 沉降 /mm	相对 误差 /%	实测 沉降 /mm	计算 沉降 /mm	相对 误差 /%	实测 沉降 /mm	计算 沉降 /mm	相对 误差 /%	实测 沉降 /mm	计算 沉降 /mm	相对 误差 /%
1 [#]	31.2	21.4	5.7	73.4	27.7	8.9	67.9	28.8	11.2	61.1	29.7	14.8	50.2
2 [#]	36.7	27.8	6.2	77.7	33.6	9.7	71.1	35.0	12.2	65.1	35.7	16.1	54.9

5 结论

(1) 京沪高速铁路高阶地中等压缩性黏土是具有低含水率、小孔隙比、高液限、高强度、中等~中等偏低压缩性、低渗透性、不完全饱和、强结构性等特性的硬塑状黏土。高压回弹试验和平板载荷试验表明,低荷

载水平下,该类土具有以弹性为主的变形特性,卸荷回弹率达到了 75% 以上。

(2) 两个现场测试断面观测期总沉降均较小,分别为 29.9 mm 和 35.8 mm,沉降收敛速度较快,荷载稳定 6 个月后,沉降基本稳定。变形主要发生在厚 10~12 m 的黏土层,泥岩下卧层的压缩量只有 3 mm

左右。实测最大深层水平位移 5 ~ 7 mm , 主要发生在距地面 4 m 深度以内。加荷过程中地基土的超孔隙水压力极小, 不会形成渗流。

(3) $e \sim P$ 曲线法和规范方法计算的总沉降量与实测推算值误差很大, 不适宜于该类土的沉降计算; 考虑该类土的基本特性, 结合实测变形特征, 建议采用弹性理论法进行沉降计算, 采用 $e \sim \log P$ 法计算时, 应计入侧向变形对沉降的影响。

(4) 工后沉降分析方法采用排水固结理论是不合适的, 可采用“似弹性分析”法按“沉降完成比例”进行工后沉降。试验工点实测数据表明, 荷载稳定 6 个月, 沉降完成比例达到 90% 以上。

(5) 建议下步继续深化该类土微观结构研究, 并采集工程建设实测数据, 反演分析, 验证沉降分析方法的合理性。

参考文献:

- [1] TB 10621—2009, 高速铁路设计规范(试行) [S].
TB 10621—2009, Code for Design of High Speed Railway [S].
- [2] 李小和. 客运专线路基地段铺设无砟轨道有关问题的探讨[J]. 铁道工程学报, 2005(5): 20—24.
Li Xiaohu. Discussion on Some Problems about Construction of Ballastless Track in the Passenger Transportation Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005(5): 20—24.
- [3] 铁道部第四勘测设计院. 软土地基试验研究文集[G]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001.
The Fourth Survey and Design Institute of Ministry of Railways. Soft Soil Ground Test Research Essays [G]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001.
- [4] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S].
GB 50007—2002, Code for Design of Building Foundation [S].
- [5] 中铁第四勘察设计院. 软土地基路桥设计参数试验研究总报告[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院, 2004.
China Railway Siyuan Survey and Design Institute. Road and Bridge Design Parameters Test and Research Report on Soft Soil [R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Institute, 2004.
- [6] 中铁第四勘察设计院. 合宁铁路膨胀土处治技术研究报告[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院, 2007.
China Railway Siyuan Survey and Design Institute. Expansive Soil Treatment Technology Research Report in He—Ning Railway [R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Institute, 2007.
- [7] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础(第三版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Gu Xiaolu, Qian Hongjin, Liu Huishan, etc. Ground and Foundation (The Third Edition) [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.

(上接第 23 页)

果预测的海平面上升变成现实, 那么珠江三角洲将会发生一系列的环境地质问题: 大片低地被淹没(珠江三角洲平原区地面高程 < 0.6 m 的面积达 804 km²、0.6 ~ 1.0 m 高程的有 666 km²、1 ~ 2 m 高程的有 2 229 km²、2 ~ 3 m 高程的有 1 388 km²、> 3 m 高程的有 1 100 km²), 风暴潮加剧、咸潮入侵范围将更加大、水厂吸水口将不断在江河中上移或关闭、土地盐渍化、堤围失去防洪能力、地下水位上升、城市现有的排水排污系统亦会因排污口高程过低而失效, 非桩基的低层建筑会出现地基液化和软化的危险等。

参考文献:

- [1] 编写委员会. 工程地质手册(第三版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
Preparation of the Commission. Engineering Geology Handbook (Third Edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994.
- [2] 程鉴基. 覆盖型岩溶地基化学灌浆补强加固处理[J]. 铁道工程学报, 1996(4): 73—79.
Cheng Jianji. Chemical Grouting Treatment on Covered Karst Foundation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1996(4): 73—79.
- [3] 陈伟坚, 林慧常. 海平面上升对珠江三角洲地区土层液化的影响[J]. 广东土木与建筑, 2008(8): 57—58.
Chen Weijian, Lin Huichang. The Effect of Sea Level Rise to Soil Liquefaction [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2008(8): 57—58.