

文章编号: 1006—2106(2009)04—0009—04

# 深厚压缩层地基条件下桩筏基础路基沉降特性研究<sup>\*</sup>

崔维孝<sup>\*\*</sup>

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

摘要: 研究目的: 研究深厚压缩层地基条件下桩筏基础路基沉降特性, 提出沉降计算及参数选取方法, 供高速铁路路基沉降控制设计参考。

研究结论: 单桩承载及沉降变形特性与群桩具有明显区别, 通过测试得到的加固区沉降实际上是由于桩对下卧层的刺入引起的, 在桩筏结构沉降分析中应优先选用 Geddes法。

关键词: 深厚压缩层; 桩筏基础; 路基; 沉降特性

中图分类号: TU433 文献标识码: A

## Research on the Settlement Characteristics of Subgrade with Piled Raft Foundation under Conditions of Thick Compressible Foundation

CUI Wei-xiao

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: Research purposes: This paper researched the settlement characteristics of subgrade with Piled raft foundation under conditions of thick compressible foundation and put forward the methods of settlement calculation and parameter selection, which can be used to design reference of settlement control of high speed railway subgrade. Research conclusions: There are obviously different about bearing and settlement disposition characteristics between single pile and pile group. The settlement obtained by testing in reinforced area is caused actually by the sub deformation (Piles pierce into substratum). The Geddes should be preferred to use in settlement analysis of the Piled raft foundation.

Key words: thick compressible foundation; Piled raft foundation; subgrade; settlement characteristics

京津城际轨道交通工程连接北京和天津两个直辖市, 线路长度 116.55 km, 沿线广泛分布新生界第四系松散堆积层, 厚度可达数百米。路基地段长度虽然只有 16.25 km, 但其沉降控制是线路建设过程中遇到的突出技术难题。

CFG桩、预制桩等高强度桩型的引入是深厚压缩层地基条件下路基沉降问题解决的必要手段, 为保证桩身承载及控制变形能力的充分发挥, 在京津城际路基地段地基沉降控制中主要采用了 2 种结构形式: 低路堤桩板结构和桩筏结构, 在铁路上均属首次采用。

其中桩筏基础结构形式采用较多, 并已经在京沪、哈大等客运专线中得到推广应用。为保证设计方案合理可靠, 查明其沉降特性, 优化设计方法和参数是必要的。

DK 84+000~DK 84+210.22 段路位于永定新河特大桥和武清站之间, 路堤高度平均 6.2 m, 被选定做为本次研究的试验段。

### 1 设计方案

试验段采用了路基面两侧设置扶壁式挡土墙的设计方案。为研究桩顶褥垫层设置对于沉降控制效果的

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008—12—26

<sup>\*\*</sup> 作者简介: 崔维孝, 1969 年出生, 男, 高级工程师。

影响,设计了桩与筏板直接接触(不设褥垫层)及设置0.15 m厚褥垫层2种方案,同时采用了CFG桩及预应力管桩2种加固桩型。加固桩采用矩形布置,顺线路方向桩间距1.5 m,沿横断面方向间距1.4~1.5 m,为

加快沉降发生速度,有效控制工后沉降,采用填土堆载预压,预压土高度3.5 m。其它沉降控制设计参数如表1所示。

表 1 试验段设计方案

序号	起讫里程	加固桩型	桩径/m	桩顶高程/m	桩底高程/m	桩长/m	桩顶结构
1	DK 84+000~+114.22	CFG桩	0.4	2.49	25.01	27.50	0.15 m碎石垫层+0.5 m钢筋混凝土板
2	DK 84+114.22~+162.22	CFG桩	0.4	2.64	25.01	27.65	0.5 m钢筋混凝土板
3	DK 84+162.22~+210.22	预制桩	0.45	2.64	27.36	30	0.5 m钢筋混凝土板

2 沉降计算

规范规定CFG桩加固地基沉降计算采用复合模量法,预制桩加固地基则采用桩基沉降计算方法,如Geddes法等。鉴于两种桩型强度差别不大,本次研究选取DK 84+050、DK 84+150和DK 84+200共3个断面,进行了详细地质勘察,查明了地层分布情况及物理力学参数,采用上述2种方法,按恒载、恒载+活载、预压3种工况进行沉降计算,计算结果如表2和表3(在工后沉降计算中施工期+静置期沉降按总沉降的70%进行计算)所示。

表 2 复合模量法计算沉降

计算断面	项目	恒载	恒载+活载	预压
DK 84+050	承载力提高倍数 $\zeta$	4.43	4.43	4.43
	沉降修正系数 $\psi$	0.365	0.355	0.369
	计算厚度/m	39.94	41.65	42.75
	固结沉降 $s_c$ /mm	72.6	77.6	89.8
	工后沉降/mm	9.74	14.74	—
DK 84+150	承载力提高倍数 $\zeta$	4.43	4.43	4.43
	沉降修正系数 $\psi$	0.317	0.314	0.327
	计算厚度/m	39.32	41.42	42.42
	固结沉降 $s_c$ /mm	58.2	64.5	74.2
	工后沉降/mm	6.26	12.56	—
DK 84+200	承载力提高倍数 $\zeta$	5.61	5.61	5.61
	沉降修正系数 $\psi$	0.2	0.2	0.2
	计算厚度/m	40.03	41.33	42.33
	固结沉降 $s_c$ /mm	30.2	33.8	37.2
	工后沉降/mm	4.16	7.76	—

表 3 Geddes法计算沉降

计算断面	项目	恒载	恒载+活载	预压
DK 84+050	沉降修正系数 $\phi_p$	1		
	计算厚度/m	43.85	45.25	46.25
	固结沉降 $s_c$ /mm	76.8	85.2	90.1
	工后沉降/mm	13.73	22.13	—

续表 3 Geddes法计算沉降

计算断面	项目	恒载	恒载+活载	预压
DK 84+150	沉降修正系数 $\phi_p$	1		
	计算厚度/m	44.12	44.91	45.91
	固结沉降 $s_c$ /mm	94.0	104.7	111.3
	工后沉降/mm	16.09	26.79	—
DK 84+200	沉降修正系数 $\phi_p$	1		
	计算厚度/m	39.03	40.03	40.23
	固结沉降 $s_c$ /mm	46.6	54.3	56.3
	工后沉降/mm	7.19	14.89	—

3 元件埋设

分别于DK 84+050、DK 84+150和DK 84+200 3个断面线路中心位置埋设了沉降管,布设了分层沉降磁环。

现场元器件埋设和测试工作从2006年3月14日正式开始,经过了钢筋混凝土板和挡土墙的施工、路堤本体的填筑、基床底层和表层的填筑以及预压土填筑的全过程。2007年3月27日路堤填筑至基床底层顶面,2007年3月31日预压土填筑完成,2007年7月31日预压历时122天后经过沉降预测评估卸除了预压土,2007年8月28日轨道底座板施工完成,2007年12月12日路基试验段铺轨完成。

4 实测数据及分析

4.1 地表沉降

各断面填土—时间—沉降实测曲线如图1~图3所示。

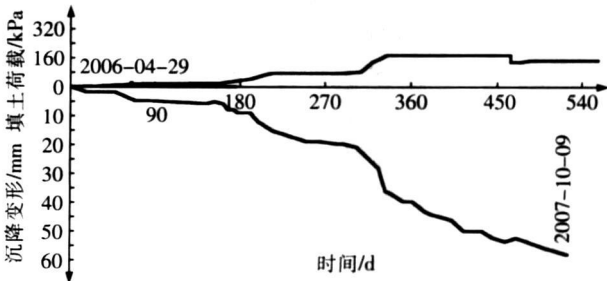


图 1 DK 84+050线路中心实测沉降—时间—填土曲线

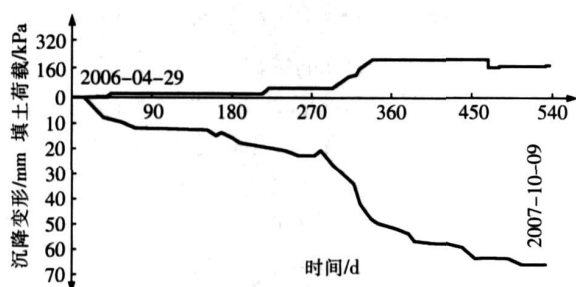


图 2 DK 84+150断面线路中心实测填土—时间—沉降曲线

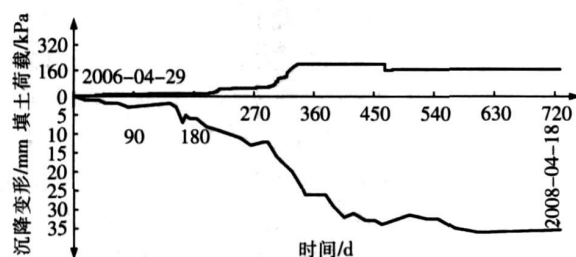


图 3 DK 84+200断面线路中心实测填土—时间—沉降曲线

可以看出,伴随着加荷过程,沉降随即出现加速,预压土加载后约 4 个月沉降出现收敛迹象,根据以上沉降曲线采用修正指数法进行了预测拟合,DK 84+050、DK 84+150、DK 84+200 3 个断面 60 年后总沉降将分别达到 67.6 mm、77.9 mm、40.1 mm。底座板施工完成后已发生沉降占总沉降的比例分别为 78.4%、82.2%和 82.3%,与平均值 81.0%最大偏差 3.1%,剩余沉降分别为 14 mm、15 mm 和 7 mm。

采用复合模量法计算的总沉降值分别为 72.6 mm、58.2 mm、30.2 mm,对应的理论计算沉降修正经验系数分别为 0.365、0.317、0.2。根据实测数据及预测确定的沉降修正系数为 0.340、0.424、0.266。

采用 Geddes 法计算的总沉降值分别为 76.8 mm、94.0 mm、46.6 mm,根据实测数据及预测确定的 Geddes 法沉降修正系数为 0.880、0.829、0.861,各修正系数与平均值 0.857 最大偏差 3.2%。

#### 4.2 分层沉降

根据分层沉降观测数据,按总沉降相同的原则对于复合模量法及 Geddes 法沉降计算数据进行修正,绘制了 DK 84+050、DK 84+150、DK 84+200 3 个断面的分层沉降、分层应变实测与计算对比曲线,如图 4~图 6 所示。

根据 DK 84+050 断面分层沉降数据得到的压缩层厚度为 52 m,此时根据 Boussinesq 公式(复合模量法)及 Mindlin 应力公式(Geddes 法)确定附加应力/自重应力均约为 0.06。DK 84+150、DK 84+200 断面虽然比较遗憾的未能获得压缩层厚度的足够信息,可

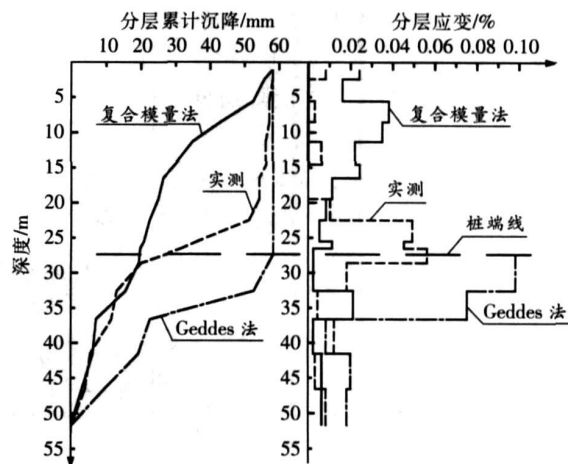


图 4 DK 84+050 断面实测与计算分层沉降对比

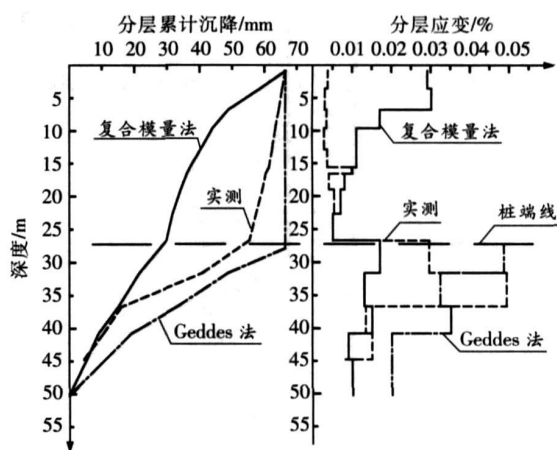


图 5 DK 84+150 断面实测与计算分层沉降对比

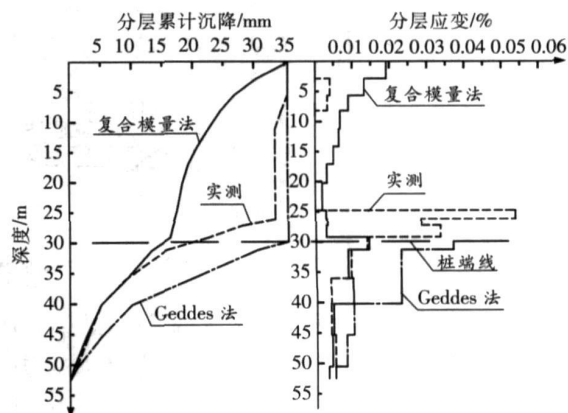


图 6 DK 84+200 断面实测与计算分层沉降对比

以肯定的是,压缩层厚分别大于 45 m 和 50.5 m,均较根据附自比 0.1 确定的压缩层厚度大。

实测数据与复合模量法及 Geddes 法分层沉降的吻合程度均令人失望,同时可以看出,最大应变地层均发生于桩端附近,实测沉降主要发生在桩端上下一定

范围内,与土性关联不明显;淤泥质粉质黏土层并未表现出较大的变形,3个断面桩端以上5 m至桩端以下15 m范围内沉降均占到总沉降的80%以上。

#### 4.3 加固区与下卧层沉降

鉴于复合模量法与Geddes法最大的区别在于加固区沉降量的计算,为了解加载开始后,加固区和下卧层沉降发展规律,绘制了各断面加固区与下卧层沉降—时间曲线(图7~图9)。

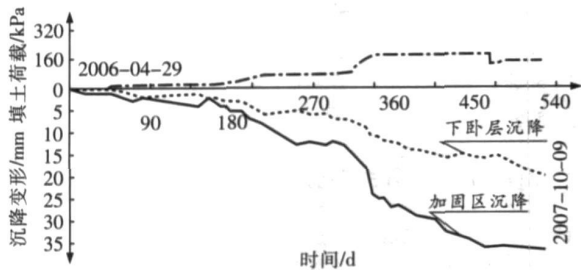


图7 DK 84+050断面实测加固区与下卧层沉降—时间曲线

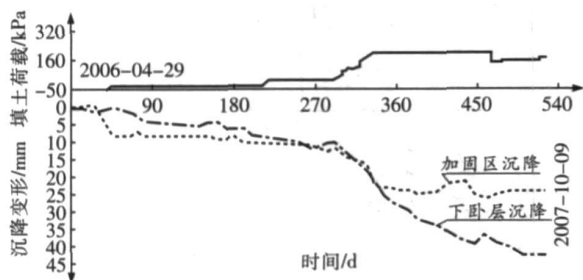


图8 DK 84+150断面实测加固区与下卧层沉降—时间曲线

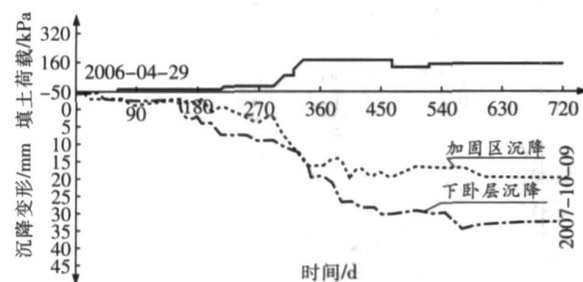


图9 DK 84+200断面实测加固区与下卧层沉降—时间曲线

通过以上曲线可以看出加固区沉降占总沉降的比例 DK 84+050、DK 84+150、DK 84+200断面分别为65%、36%和39%,加固区沉降与下卧层沉降比例在沉降稳定之前处于变化状态,加固区沉降曲线收敛比下卧层沉降曲线快。

加固区沉降的发生是值得探讨的,因为桩身强度较高,CFG桩设计强度不低于C20,预制管桩强度达到C80,因此桩身压缩变形非常小,而且桩身压缩变形属于弹性变形范畴,伴随加载过程可以在较短时间内完成。荷载在作用过程中同时对于桩及表层桩间土实施

压缩,由于桩顶钢筋混凝土板的调节作用,将逐步形成桩土共同承载、协同变形的情况。

需要说明的是,单桩沉降变形特性与群桩地基存在较大区别,试验点进行了2根(位置分别为DK 84+027.47、DK 84+147.47) CFG桩及2根(位置分别为DK 84+163.22、DK 84+190.22)预应力管桩单桩极限承载力测试。在CFG桩承载力测试中,第1根荷载加到1 250 kN时,桩头出现破坏,此前一级荷载为1 125 kN,变形值为6.07 mm;另外一根荷载加到1 500 kN时,桩头出现破坏,此前一级荷载为1 250 kN,变形值为8.90 mm。在预应力管桩测试中,相同荷载条件下,变形值与CFG桩非常接近。通过前面的计算,恒载条件下单桩分担荷载不足300 kN,考虑不均匀因素也在400 kN以下,对应的单桩下沉变形均在2 mm以下,因此单桩条件下,侧摩阻将成为单桩承载力的主要来源。从各断面地表沉降曲线我们可以看到,在单桩所承载荷载相同的情况下,其沉降值远远大于单桩沉降,这是由于桩周土需同时提供侧壁摩阻力给周围桩基,由于桩间距较小,使得提供给每一根桩基的侧摩阻力大打折扣,也同时由于桩间距较小,桩土间摩阻力使得桩与桩间土共同形成承载体,对于桩端土地基形成压缩。虽然在荷载传递过程中,存在由于桩土共同承载体周围侧壁摩阻的影响引起的衰减,荷载的绝大部分将传递给桩下土体。

值得注意的是,当桩顶设置褥垫层时,由于褥垫层为散体材料,刚度较低,在向桩基及桩间土传递由其上钢筋混凝土板传来的荷载时,将使得桩间土产生更大的压缩变形,从而产生桩顶向褥垫层方向的刺入。此现象在DK 84+050断面地基表层应变(图4)有所体现。在路堤荷载作用下由于桩侧壁摩阻力的不足,在桩端附近桩与桩间土出现摩擦错动,桩端刺入桩下土体。在上部荷载作用下,桩带动桩间土对于桩下地基实施压缩,桩与桩间土之间的摩擦错动并不表现为破坏,只是由于桩间土提供的侧壁摩阻力不足,在桩端出现应力集中现象导致刺入发生。桩端土因刺入受到压缩,强度提高,同样不会表现为破坏。桩端刺入桩下土体在受到桩下土体的抗拒的同时,也受到桩间土体的抗拒作用,桩端刺入的过程实际上是桩土荷载进一步向桩间土转移的过程,因此在非端承条件下桩端附近桩间土强度与桩下土强度对于沉降控制具有同样重要的作用。

下卧层沉降则是在桩土共同承载体作用下,下卧层的压缩变形。曲线揭示的加固区沉降比例 DK 84+050断面偏大不宜直接解释为是由于褥垫层的设置,

(下转第25页)

(5) 第一次大规模地采用  $100\text{ m}^2$  内净空的超大断面隧道。

(6) 隧道防水标准大幅度的提高到地下工程一级防水标准。

## 5 结论

在武广客运专线线设计中, 学习、运用项目的知识、方法和技术, 把系统工程的思想贯穿到项目管理的全过程, 较好地把握了铁路总体设计, 在合理选择铁路主要技术标准和重大线路方案、运输质量、满足地方需求和控制工程投资等方面均取得了较好的效果, 另外, 在铁路选线和路基、桥梁、隧道、轨道结构等工程设计方面也有所创新和突破。为我国修建高标准铁路通道积累了成功的经验。

武广铁路客运专线在中国铁路建设史上意义非凡, 其建设要达到世界一流的客运专线水平。其具体的目标是要达到 3 个一流, 即一流的工程质量、一流的装备水平和一流的运营管理。设计者们严格按质量标

准与规范进行工程勘察、工程设计和工程咨询, 牢固树立以人为本、服务运输、强本简末、系统优化、着眼发展的观念指导整个武广客运专线的建设, 按社会主义市场经济和体制的要求, 学习借鉴国内外的先进经验与方法, 用智慧和汗水绘制出这条客运专线的宏伟蓝图, 在波澜壮阔的铁路建设黄金机遇中, 设计者们立志创新, 为伟大祖国设计出世界一流的高标准铁路。

## 参考文献:

- [1] 铁道部第二勘察设计院. 新建铁路武汉至广州线韶关至花都段初步设计线路设计说明 [J]. 成都: 铁道第二勘察设计院, 2004
- [2] 铁道部第四勘察设计院, 铁道部第二勘察设计院. 新建铁路武汉至广州线初步设计总说明书 [J]. 武汉: 铁道部第四勘察设计院, 2004
- [3] 铁建设 [2003] 13 号, 京沪高速铁路设计暂行规定 [S].

(编辑 赵立兰)

(上接第 12 页)

因为 DK 84+050 断面地基表层附近变形并未表现出明显偏大 (图 4)。从受力机理分析, DK 84+150、DK 84+200 断面由于桩与板直接接触, 荷载向桩的传递应该更加直接而快速, 更容易发生对于下卧层的刺入, DK 84+050 断面刺入量更大表明, 褥垫层的设置并没有影响荷载向桩的有效传递, 刺入量大小的决定因素是桩端附近一定范围内土体的强度。

## 5 结论

根据 3 个断面的沉降观测数据, 可初步得出以下结论:

(1) 复合模量法与 Geddes 法在桩筏基础分层沉降分析中均存在一定缺陷, 但是, 在总沉降的计算中, 其吻合程度令人满意, 主要根据复合模量法计算确定的试验工程方案能够满足无砟轨道路基变形要求, 且控制效果接近临界。

(2) 试验段 3 个断面采用相同的系数修正后, Geddes 法计算的总沉降与实测预测值较为吻合, 因此可优先采用 Geddes 法分析桩筏结构路基地基沉降。

(3) 试验点方案施工期沉降占总沉降的比例较为接近, 在桩筏结构工后沉降分析中, 可采用经验系数法。

(4) 试验点桩筏结构路基压缩层厚度大于根据附加应力/自重应力小于 0.1 确定的厚度。

(5) 预应力管桩加固地基与 CFG 桩加固地基沉降特性相近, 可采用相同的沉降分析方法。

(6) 群桩沉降及承载特性与单桩区别较大, 无法直接根据单桩载荷试验变形曲线确定群桩沉降。

(7) 试验点所测到的加固区沉降实际上是桩基的下刺变形, 由于下刺变形在总沉降中的比例较大, 进行群桩桩端刺入变形的相关研究很有必要。

(8) 深厚压缩层非端承群桩设计时桩端以上一定范围 ( $5\text{ m}$  左右) 及桩端持力层应尽可能选择低压缩性土层。

(9) 桩与桩顶板结构之间设置一定厚度褥垫层不影响荷载向桩的有效传递。由于褥垫层对于各桩间的受力具有良好的调节作用, 有利于对桩的保护, 设置褥垫层是必要的。

## 参考文献:

- [1] 崔维孝, 赵成刚. 深厚压缩层地基条件下路基沉降控制 [J]. 铁道工程学报, 2007 (12): 28-31.
- [2] JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范 [S].
- [3] GB 50007-2002 建筑地基基础设计规范 [S].
- [4] JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范 [S].
- [5] 铁建设 [2005] 754 号, 客运专线无砟轨道铁路设计指南 [S].

(编辑 曹淑荣)