

B-M 法在京沪高速铁路济南西站 PHC 桩复合地基沉降计算中的应用

程艺梅, 王连俊, 张光宗

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: PHC 桩复合地基是一种有效的深厚软土地基加固处理方法。目前对 PHC 桩复合地基沉降尚未形成比较成熟的计算理论和方法, 以京沪高速铁路济南西站为依托, 分析了常规复合地基沉降计算方法在 PHC 桩复合地基沉降计算方面存在的问题, 提出了 Boussinesq-Mindlin 联合求解附加应力的方法, 再联合分层总和法计算 PHC 桩复合地基的沉降, 计算结果与现场实测结果较为接近。

关键词: 京沪高速铁路; 深厚软土; PHC 桩复合地基; 沉降; Boussinesq-Mindlin 联合求解法

中图分类号: U213.1⁴ **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-2954(2011)12-0027-03

Application of B-M Method in the Settlement Calculation of PHC Pile Composite Foundation in Ji'nan West High-speed Railway Station

Cheng Yimei, Wang Lianjun, Zhang Guangzong

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: PHC pile composite foundation is an effective means to reinforce deep soft soil foundation, but for it at present there is no relatively developed method and theory. Based on the project of Ji'nan west railway station on Beijing-Shanghai high-speed railway, this paper analyzes the existing problems of traditional settlement calculation methods when applied to PHC pile composite foundation, and puts forward Boussinesq-Mindlin combined method to obtain the additional stresses, and then using the layer to layer summation method to obtain the settlements of PHC pile composite foundation. The calculated results were close to measured ones.

Key words: Beijing-Shanghai high-speed railway; Deep soft soil; PHC pile composite foundation; Settlement; Boussinesq-Mindlin combined method

1 概述

PHC 桩复合地基是由预应力管桩、桩帽(桩板)、网(土工格栅、土工格室)以及桩间土构成的复合系统^[1-2]。桩作为竖向加强体,具有提高地基承载力、减小沉降量的作用,同时利用桩帽(桩板)和网的作用将上部荷载均匀分布在地基上,充分利用桩间土的承载力,从而控制桩与桩间土的差异沉降。PHC 桩复合地基于 2006 年首先应用于京津城际轨道交通工程高速铁路地基处理以控制路基沉降,在温福铁路、广梧高速、京沪高速铁路等工程中也得到了应用。

常规计算方法中,通常把 PHC 桩复合地基沉降量

分为两部分:加固区压缩量与下卧层压缩量。复合地基加固区土层压缩量的计算方法主要有复合模量法和应力修正法;复合地基下卧层土层压缩量的计算方法主要有等效实体法、Boussinesq 方法等。这些理论方法是在一定假设条件下建立的,与 PHC 桩复合地基的沉降规律不相符,计算结果与实测结果有一定的出入。而目前国内尚没有专门规范来指导 PHC 桩复合地基沉降的计算,以京沪高速铁路济南西站为依托,拟针对 PHC 桩复合地基的沉降计算方法展开研究和探讨。

2 常规复合地基的沉降计算方法

(1) 复合地基加固区沉降计算方法^[3-4]

复合模量法是使用较多的一种方法,它将复合地基加固区中增强体和土体两部分视为复合土体,采用复合压缩模量 E_c 来评价复合土体的压缩性,并采用分层总和法计算加固区土层沉降量 S_1 。

收稿日期:2011-10-20

基金项目:铁道部科研项目“京沪高速铁路深厚软土、松软土地段复合地基关键技术试验研究—管桩及 CFG 桩复合地基路基沉降试验研究”(2008G032-A)

作者简介:程艺梅(1986—),女,硕士,E-mail:ymcheng123@163.com。

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{spi}} H_i \quad (1)$$

式中, Δp_i 为第 i 层复合土体上附加应力增量; E_{spi} 为第 i 层复合土体上复合模量; H_i 为第 i 层复合土体厚度。

应力修正法考虑到竖向增强体的存在,使作用在桩间土上的荷载密度比作用在复合地基上的平均荷载密度要小。在采用应力修正法计算压缩量时,根据桩间土承担的荷载 p_s ,按照桩间土的压缩模量 E_s ,忽略增强体的存在,采用分层总和法计算加固区土层的压缩量 S_1 。

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_{si}}{E_{si}} H_i = \mu_s \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_s} H_i = \mu_s S_{1s} \quad (2)$$

式中, μ_s 为应力修正系数; S_{1s} 为未加固地基在荷载 p 作用下相应厚度内的压缩量; Δp_i 为复合地基中第 i 层桩间土的附加应力增量,相当于未加固地基在荷载 p_s 作用下第 i 层土上的附加应力增量。

(2) 复合地基下卧层沉降计算方法

应力扩散角法是国内规程使用的主要方法,是将复合地基视为双层地基,由加固区土层和下卧层土层组成。通过应力扩散角简单地求得未加固区顶面应力的数值,再按弹性理论法求得整个下卧层的应力分布,按分层总和法求下卧层压缩量。由于铁路路基类似条形基础,仅考虑宽度方向扩散,其加固区底面的应力 P_b 。

$$P_b = \frac{Pb}{(b + 2htan\alpha)} \quad (3)$$

式中, P 为复合地基顶面承担的荷载, kPa; b 为基础宽度, m; h 为复合地基加固深度, m; α 为压力扩散角。

Boussinesq 解是在半空间弹性体边界上作用有集中力 P 时,半空间体内任一深度 z 处的竖向附加应力参见公式(4)

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} \quad (4)$$

式中, $R = \sqrt{r^2 + z^2}$, r 为力的作用线到所求附加应力点的水平距离。

根据叠加原理,可以推导出均布的、三角形分布的线荷载、带状荷载等各种分布荷载作用下的地基中某点处的附加应力,进而按分层总和法求得下卧层的沉降 S_2 。

3 PHC 桩复合地基沉降 Boussinesq-Mindlin 联合求解法

布辛尼斯克(J. Boussinesq)对弹性均质半空间体在单个集中荷载作用下的应力与位移计算作出了理论解,在近代土力学得到了广泛的应用。明德林

(Raymond. D. Mindlin)提出了在各向同性半无限空间弹性均质体表面下某一深度处的垂直和水平集中力影响下的应力场与位移场的 Mindlin 解。Boussinesq 解和 Mindlin 解研究对象都是半无限均质弹性空间,不同之处在于 Boussinesq 解中作用点在半无限弹性空间表面,而 Mindlin 解中作用点在半无限弹性空间内部。

PHC 桩复合地基土中的应力是由桩和桩间土承担的荷载两部分引起的,采用 Boussinesq—Mindlin 联合求解法,分别计算桩荷载和桩间土荷载在复合地基中产生的附加应力,两部分附加应力线性叠加,然后根据计算出来的附加应力再用分层总和法计算复合地基路堤中心处加固区和下卧层沉降值。

(1) 桩荷载在地基中产生的附加应力

Geddes^[5]导出了下列 3 种情况下土中竖向应力的表达式:桩端压力引起的竖向应力、均匀分布摩阻力引起的竖向应力和随深度呈线性增长分布的摩阻力引起的竖向应力,荷载地基中任意一点处引起的应力计算,参见公式(5)

$$\sigma_z = \sigma_{zb} + \sigma_{zr} + \sigma_{zn} = \frac{Q_b}{L^2} I_b + \frac{Q_r}{L^2} I_r + \frac{Q_n}{L^2} \left[\alpha I_b + \beta I_r + (1 - \alpha - \beta) I_n \right] \quad (5)$$

式中, α 为桩端荷载分配系数、 β 为矩形分布形式的侧摩阻力荷载分配系数。 I_b 为桩端力应力系数; I_r 为桩侧矩形分布摩阻力应力系数; I_n 为桩侧三角形分布摩阻力应力系数(应力系数的计算参见文献[6])。

(2) 桩间土荷载在地基中产生的附加应力

桩间土承担的荷载为路堤总荷载减去桩体承担的荷载,其在地基土中产生的应力,可以认为是作用在路基地面宽度范围内梯形分布的条形荷载(分布集度 q_i 等于桩间土压力)和作用在桩轴线处的集中荷载 $q_{si} = q_i A_p$ (A_p 为桩截面面积, i 为桩的编号)所产生的应力叠加。

在路堤荷载作用下,地基中任意一点处的附加应力为桩荷载和桩间土荷载引起的应力叠加。

4 算例分析

(1) 工程概况

济南西站正线里程 DIK417+453.54 ~ DIK421+053.36 范围均为深厚松软土层的软弱地基,采用 PHC 桩复合地基和 CFG 桩复合地基的形式来加固地基,正线无砟轨道板基础按 1:1 放坡至地面范围以内部分,路堤基底设置 0.5 m 厚的 C30 钢筋混凝土板,板下设 0.15 m 厚碎石垫层,垫层下采用 PHC 桩,直径 0.4 m,桩长 35 m,采用正方形布置的方式,间距为 2 m;辅线部分设 0.6 m 厚的碎石垫层,中间铺设 2 层高强度土

工格栅。垫层下采用 CFG 桩,直径 0.5 m,沿线路方向间距为 1.5 m,横向间距为 1.6 m,桩长 25 m。

利用复合模量法联合 Boussinesq 法以及 Boussinesq-Mindlin 联合求解法对 B 断面(DIK419+002)的沉降进行计算分析。B 断面位于济南西站北京方向的咽喉部位,由于对称性采用半断面观测模式,并选取西边半幅作为试验断面,半幅宽 58.8 m,设置 5 排、35 m PHC 桩和 33 排、桩长 25 m CFG 桩。B 断面主要物理力学指标见表 1,沉降板位置示意图见图 1。

表 1 断面 B(DIK419+002)主要物理力学指标

序号	土层名称	土层厚度/m	容重/(kN/m ³)	弹模/kPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	粉质黏土 1	12	19.11	15 000	0.31	45	18.5
2	细砂	3	18.62	30 000	0.28	15	32
3	粉质黏土 2	29	19.11	21 000	0.35	40	21
4	卵石	61	21.36	81 000	0.3	10	45

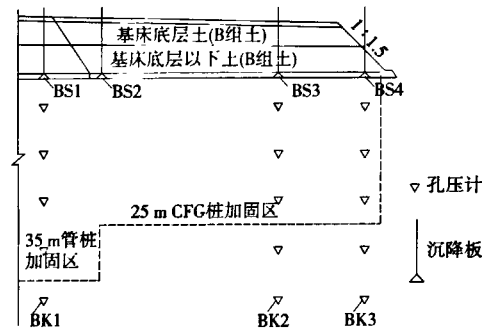


图 1 B 断面沉降板位置示意

(2) 计算结果分析

利用 Boussinesq 法计算得到典型地基中附加应力沿深度的分布,见图 2。

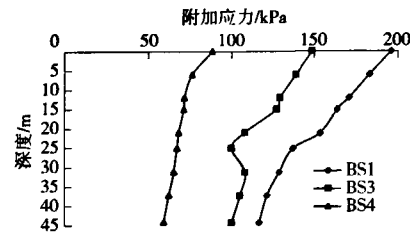


图 2 B 断面 BS1、BS3、BS4 路基处 Boussinesq 解附加应力

基于 Boussinesq-Mindlin 联合求解法计算得到典型的地基中附加应力沿深度的分布,见图 3。

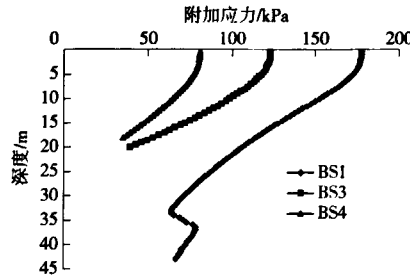


图 3 B 断面 BS1、BS3、BS4 路基处 Boussinesq-Mindlin 解附加应力

将上述方法计算的沉降量与各断面实测沉降值进行对比,对比分析结果见表 2 和图 4。

由表 2 与图 4 可知,复合模量法—Boussinesq 法计算得到的沉降值与实测结果相差较大。Boussinesq—Mindlin 解联合分层总和法求解获得的沉降与复合模量法—Boussinesq 法相比较小,并且与现场实测沉降量较为接近。

表 2 计算断面与实测沉降对比 mm

断面	位置	复合模量-B 法	B-M 联合法	实测结果
B	BS1	92.46	70.824	73.63
	BS3	108.10	56.648	79.40
	BS4	60.74	31.887	29.87

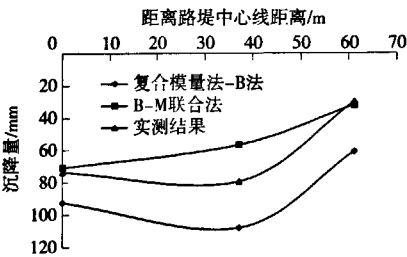


图 4 计算断面与实测沉降对比

5 结论

(1) 常规复合地基沉降的计算理论与 PHC 桩复合地基的沉降规律不相符,地基中的附加应力计算不准确,所以计算结果与现场实测数据差别较大。

(2) Boussinesq-Mindlin 联合求解法考虑了桩和土之间的相互作用关系,以 Mindlin 解为基础的 Geddes 积分来计算复合地基中桩荷载在土中产生的附加应力,而地基表面桩间土荷载产生的附加应力由 Boussinesq 公式计算出,两部分应力叠加作为地基土中总附加应力,然后按分层总和法即可计算出 PHC 桩复合地基的沉降量,计算结果与实测结果相接近,表明用 Boussinesq-Mindlin 联合求解 PHC 桩复合地基的附加应力是合适的。

参考文献:

[1] 饶为国. 桩—网复合地基沉降机理及设计方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2002.
[2] 赵平. 桩—网复合地基技术在软土路基中的应用[J]. 施工技术, 2005, 9(34): 22-24.
[3] 王炳龙编著. 高速铁路路基工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
[4] 龚晓南编著. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
[5] Geddes J D. Stresses In Foundations Soils due to Vertical Subsurface Load[J]. Geotechniques, 1966, 16(2): 231-256.
[6] 中国建筑科学研究院. JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.