

# 高速铁路桩承式结构路基地基沉降计算方法

王长丹<sup>1,2</sup>, 周顺华<sup>1</sup>, 王炳龙<sup>1</sup>, 邹春华<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. McMaster 大学 工程学院土木工程系, Hamilton L8S4L7)

**摘要:** 采用 Mindlin-Boussinesq 联合求解桩间土的附加应力, 再根据  $e\text{-}lgp$  曲线法( $e$  为孔隙比,  $p$  为土体压力)计算地基沉降的方法对高速铁路两种刚性桩承式结构地基进行了沉降计算, 并与现行计算方法及现场实测数据进行对比分析。分析表明: 现有规范计算方法对高速铁路路基荷载作用下刚性桩承式结构, 及超固结或结构性较强的地基土体沉降计算有局限性; Mindlin-Boussinesq 联合求解刚性桩承式结构地基中桩间土的附加应力沿深度的分布规律符合实际工程分布情况; Mindlin-Boussinesq 联合求解附加应力并根据  $e\text{-}lgp$  曲线法计算地基沉降的方法的计算沉降值与实测值较为接近, 并能考虑刚性桩复合结构地基设置参数情况及地基土应力历史等影响因素。

**关键词:** 铁路工程; 沉降计算; 刚性桩; 桩承式结构; Mindlin-Boussinesq 联合法

**中图分类号:** TU470.3; U213.1

**文献标志码:** A

## Settlement Calculation of Rigid Piled-structure Embankment in High-speed Railway

WANG Changdan<sup>1,2</sup>, ZHOU Shunhua<sup>1</sup>, WANG Binglong<sup>1</sup>, ZOU Chunhua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Civil Engineering, McMaster University, Hamilton L8S4L7, Canada)

**Abstract:** The Mindlin-Boussinesq uniting solution is used to calculate the additional stress, and the settlement is calculated with the method of  $e\text{-}lgp$  curve. And then, the calculation results are analyzed comprehensively by comparing with the existing calculation methods and the in-situ measurement data. The research results show that the limitation exists in the settlement calculation of rigid piled-structure embankment under embankment loads and over-consolidated or strong structural soil by the method of existing code. The Mindlin-Boussinesq uniting solution is used to calculate the additional

stress of soil between piles in rigid piled-structure embankment. The distribution along depth can accord with the actual engineering situation; and the settlement calculated by method of  $e\text{-}lgp$  curve is relatively close to in-situ measurement data, which can take the parameters of the rigid piled-structure embankment and stress history of foundation soil into consideration.

**Key words:** railway engineering; settlement calculation; rigid pile; piled-structure embankment; Mindlin-Boussinesq uniting solution

高速铁路路基工程作为轨道结构的基础, 要求强度高、刚度大、稳定性好等工程性质。控制路基工后沉降是高速铁路路基设计的关键, 而控制路基工后沉降的关键主要是控制地基的工后沉降<sup>[1]</sup>。高速铁路路基对工后沉降控制的要求比高速公路及建筑工程地基都要严格很多, 因此高速铁路软弱地基的处理主要采用刚性桩承式结构路基等土工结构处理措施来控制路基沉降。刚性桩承式结构地基形式在建筑工程中应用, 研究, 试验的较多, 并初步形成了相应的计算方法与设计规范<sup>[2-3]</sup>。而高速铁路刚性桩承式结构与建筑工程中相比存在着以下几点不同: (1) 建筑工程基础为刚性垫层, 较高速铁路路基为柔性基础而言, 复合地基中桩和桩间土分担荷载更为明确; (2) 建筑工程主要为静荷载, 工后阶段桩土荷载分担比较为稳定; 而铁路路基, 尤其是低矮路堤还要承受动荷载作用, 工后阶段桩土荷载分担比变化较大; (3) 建筑工程地基以控制总沉降及不均匀沉降为目标; 高速铁路路基主要控制工后沉降量, 沉降速率和不均匀沉降量, 且控制标准极为严格<sup>[4-5]</sup>。在目前的高速铁路刚性桩承式结构地基设计计算中主要是参考建筑工程地基基础设计规范中柔性桩复合地基沉降计算方法, 还没有形成针对性

收稿日期: 2012-09-17

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA11Z116); 铁道部科技研究开发计划(2010G003-A)

第一作者: 王长丹(1982—), 男, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为高速铁路路基新结构形式和地基处理。

E-mail: 2008wangchangdan@tongji.edu.cn

设计指南、规定或标准来指导实际设计工作。对高速铁路路基荷载作用下的刚性桩桩承式结构地基的作用机理、沉降控制的研究较少,不能满足工程应用的需要。结合高速铁路路基工程特点,开展路堤荷载作用下刚性桩桩承式结构地基沉降计算方法的研究工作对理论研究和实际工程应用都具有重要意义。

从国内外桩承式结构路基的试验,理论研究及工程实践综合分析来看,桩承式结构路基的设计主要以承载力控制原则为主,这是由于工程对沉降,尤其是工后沉降的要求较低。目前对桩承式结构路基设计有相应技术规范的主要为欧洲(如英国 BS8006、德国规范、北欧 Nordic 手册)及日本(搅拌桩基础设计施工手册),其设计理论主要包括荷载传递与分配、加筋垫层格栅的张拉力和路堤横向滑移、桩的设计、地基水平位移计算以及边坡稳定计算<sup>[6-8]</sup>,没有制定刚性桩桩承式结构地基沉降计算方法,国外的研究也主要集中在褥垫层的受力分析上<sup>[9-10]</sup>。文献[11]对国外刚性桩桩承式结构的加筋垫层和土工格栅计算理论进行了对比分析,发现上述4种规范的计算结果差异很大,并对我国的高速铁路桩承式结构路基研究方向提出了设想和建议。目前我国对于高速铁路刚性桩桩承式结构地基沉降大多借用建筑工程复合地基的设计理论与方法进行初步设计计算,依靠现场实测资料的推算来估算其沉降,带有很强的经验性。

本文采用广义 Mindlin-Boussinesq 方法求解附加应力并联合孔隙比  $e$ -土体压力  $p(e-\lg p)$  曲线计算沉降的方法对某高速铁路试验段不同设计断面刚性桩桩承式结构地基(包括桩网结构和桩筏结构)沉降进行了计算,在与建筑地基处理技术规范方法计算值及现场实测数据比较分析的基础上探讨了此方法及现有计算方法的适用性。为理论研究及工程实践提供一种新的思路和方法。

## 1 Mindlin-Boussinesq 联合附加应力求解方法的几个关键问题

高速铁路刚性桩桩承式结构路基是通过垫层的调整作用由刚性桩桩体和桩间土体共同承受路基,轨道及行车荷载的一种土工结构物形式。刚性桩桩承式结构地基中的附加应力可简化分析认为主要由桩体荷载在土体中产生的附加应力及地基表面荷载在桩间土体产生的附加应力构成。广义 Mindlin-Boussinesq 联合附加应力的求解方法(简称 M-B 联

合法)就是首先明确桩体和桩间土体的荷载分担比例,通过 Mindlin 解和 Boussinesq 解(经典理论计算公式文中不再赘述)分别计算桩间土体中点各深度处由桩荷载及地基表面荷载产生的附加应力。在对两者附加应力叠加计算的基础上按照孔隙比-土体压力曲线法(简称  $e-\lg p$  曲线法)计算地基沉降量。对方法中存在的几个关键问题,分析如下:

### 1.1 桩土荷载分担比的计算

高速铁路路基荷载首先通过垫层(加筋网垫)的作用调整复合地基中桩体和桩间土体的荷载分配。如何较好地计算桩土应力分担比是 Mindlin-Boussinesq 联合附加应力的求解方法的一个关键问题。在通过室内模型试验验证比较国内外几种土工模型的基础上<sup>[11-12]</sup>,文中推荐采用的计算模型参考德国规范<sup>[13]</sup>如图1所示,图中, $s$ 为桩间距, $h$ 为垫层厚度, $d$ 为桩帽(或桩顶)尺寸,若为圆形桩帽,则  $d$  为其直径,如果是其他形状,可按照  $d = \sqrt{4A_s/\pi}$  转换,其中, $A_s$ 为柱帽(或柱顶)面积, $r_1$ 和 $r_2$ 分别为拱上微单元土体上表面和下表面的曲面半径;模型中作用于桩体上的位于拱上微单元土体上表面的曲面参数和下表面的曲面参数分别以  $\delta\Phi_1$  和  $\delta\Phi_2$  表示, $\delta\phi_u$ 和 $\delta\phi_d$ 分别为拱上微单元土体上表面和下表面的曲面体弧度, $\delta S_m$ 为拱上微单元土体上表曲面弦长, $\delta l_1$ 为拱上微单元土体上表曲面弧长, $S_d$ 为拱两支撑点间的距离, $\delta\phi_m$ 为拱上微单元土体中表面的曲面体弧度, $r_o$ 和 $r_u$ 分别为拱上微单元土体上表面和下表面的曲面体半径, $dA_o$ 和 $dA_u$ 分别为拱上微单元土体上表面和下表面的曲面体表面积, $\gamma$ 为土体容重。

取土拱中任一微单元体,建立数值( $Z$ )方向土体的平衡方程并在其数值解和试验观测的竖向应力  $\sigma_z$  的分布,得到该方程的解能正确反映竖向应力的分布情况。根据结论,刚性桩桩承式结构地基面土体应力可计算如下<sup>[13]</sup>:

$$\sigma_{z0} = \lambda_1^x \cdot \left( \gamma + \frac{p}{h} \right) \cdot \left( h \cdot (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2) \right)^{-x} + h_g \cdot \left( (\lambda_1 + \frac{h_g^2 \cdot \lambda_2}{4})^{-x} - (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2)^{-x} \right) \quad (1)$$

式中: $p$ 为外荷载,包括静荷载  $p_j$  和动荷载  $p_d$ ;  $h$ 为垫层厚度; $h_g$ 为土拱高度;当  $h \geq s/2$  时,  $h = s/2$ , 当  $h < s/2$  时,  $h_g = h$ ;  $\lambda_1 = \frac{1}{8} \cdot (s - d)^2$ ;  $\lambda_2 = \frac{s^2 + 2ds - d^2}{2s^2}$ ;  $x = \frac{d \cdot (K_{crit} - 1)}{\lambda_2 \cdot s}$ , 其中,  $k_{crit}$  为被动土压力系数,且  $K_{crit} = \tan^2[45^\circ + \frac{\varphi'}{2}]$ ,  $\varphi'$  为内摩擦角。

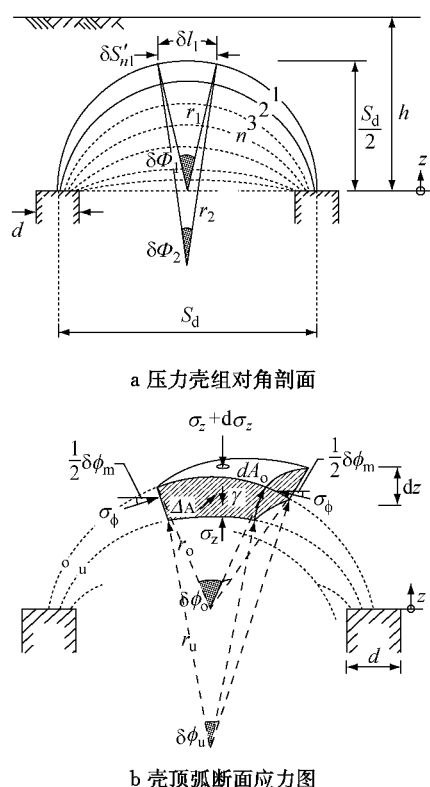


图1 路堤荷载下桩承式结构路基多壳压力拱理论模型  
Fig.1 Piled-structure embankment shells pressure arching theory model under embankment loading

土拱效应桩顶平均应力可计算如下:

$$\sigma_{zs} = ((\gamma h + p) - \sigma_{z0}) \frac{A_E}{A_s} + \sigma_{z0} \quad (2)$$

式中:  $A_E$  为总面积,  $\sigma_{z0}$  为  $\sigma_z$  在  $z=0$  (即土体表面处) 的数值。

## 1.2 计算中基本假定条件

计算采用 Mindlin 解计算桩体承受荷载在土中产生的应力, 而地基表面桩间土荷载产生的附加应力可按 Boussinesq 公式求出, 两者叠加即为桩间土总的附加应力, 采用该附加应力结合孔隙比-土体压力 ( $e-\lg p$ ) 曲线法计算沉降。计算过程中为了简化计算采用了一些假定条件:

### 1.2.1 桩侧摩阻力和桩端阻力假定

对于桩基时, Mindlin 解导出了单桩荷载下土中应力的三种解: 桩底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, 如图 2 所示。图中,  $Q$  为桩体承受荷载,  $L$  为桩体长度,  $q_s$  为桩体侧摩阻力,  $q_b$  为桩底压力,  $q_r$  为桩体均匀分布摩阻力,  $q_t$  为桩体随深度呈线性增长分布的摩阻力。

而对于刚性桩复合地基中对桩侧摩阻力和桩端

阻力研究较少, 根据现有的一些研究成果<sup>[12]</sup> 假设桩侧摩阻力的两种分布形式: ①沿桩身线性增长成三角形分布; ②沿桩身线性增长并且在桩体上部 3 m 范围内存在负摩阻力。

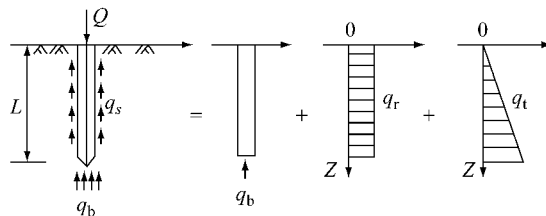


图2 桩身荷载的分解示意图  
Fig.2 The decomposition of the pile loading

基于以上假定, 根据《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008), 可计算出桩侧极限阻力和桩端极限阻力与单桩极限承载力之比, 作为复合地基中各桩的端阻、侧阻的比例  $\alpha$ 、 $\beta$ 。

### 1.2.2 群桩的应力叠加效应

计算路基中心线桩间土的附加应力, 要计算中点周围各桩作用在该点的附加应力的叠加。考虑到桩的“加筋效应”, 距离中点较远的桩对该点的作用较小, 因此可以仅考虑路基中心周围一定范围内的桩体附加应力在该点的叠加。通过对几组桩体附加应力叠加数值及差值增量的比较<sup>[12]</sup>, 认为在较大的增加计算桩体数量对计算数值影响不大, 因此本文中计算范围采用 12 根桩体 (井字形布桩) 的附加应力叠加作用。

## 2 试验段现场情况

### 2.1 试验段设计参数

某设计时速 350 km · h<sup>-1</sup> 高速铁路工程是我国铁路路网建设的重要组成部分, 在其刚性桩承式结构路基试验段设计方案中, 有桩网结构及桩筏结构两种形式, 路基高度有 6.9~7.7 m。路基 (填土容重为 20 kN · m<sup>-3</sup>) 及轨道结构荷载换算 (CRTS II 型板式无砟轨道, 分布宽度 3.25 m, 高度 2.6 m, 土体容重 20 kN · m<sup>-3</sup>) 参数参照设计规范。路基试验段计算断面的设计参数见表 1。

### 2.2 工程地质与地层物理力学指标情况

断面 1, 2, 3 试验段属位于天津特大桥与青仓特大桥之间, 地形平坦, 地势开阔, 地面标高 4.2~5.0 m。试验段主要工程地质情况 (自上而下) 见表 2。

表 1 路基试验段桩承式结构路基设计参数

Tab.1 The design index of the piled-structure embankment in the test section

断面	填高 /m	桩长 /m	桩径 /m	桩间 距/m	桩帽直 径/m	垫层结构
1	6.9	23.4	0.5	1.7	1.0	0.6 m 碎石垫层+两 层土工格栅
2	6.9	23.4	0.5	1.8		0.15 m 碎石垫层+ 0.5 m 钢筋混凝土板
3	7.7	30.4	0.5	2.0		0.15 m 碎石垫层+ 0.5 m 钢筋混凝土板

试验段地下水具有硫酸盐侵蚀性,主要受大气降水及地表水补给,环境作用等级为 H1。土壤最大冻结深度 0.7 m。地震动峰值加速度 0.10 g(g 为重力加速度)。

表 2 试验段土层物理力学指标

Tab.2 The mechanical indexes of each stratum

土层	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	含水量/%	孔隙比	液限/%	塑限/%	超固结比	压缩模量 /MPa	粘聚力 /kPa	摩擦角 /(°)
黏土	18.6	31.2	0.919	42.0	22.8	3.42	4.6	38.4	11.0
粉质黏土	19.4	27.0	0.786	34.4	19.8	4.4	4.9	45.3	10.2
粉土	19.5	26.3	0.759	27.1	18.8	1.58	6.9	19.2	30.8
粉砂	19.7	23.1	0.667			1.41	15.1	19.0	33.0
粉质黏土	19.9	26.3	0.735	31.6	18.3	1.04	5.4	44.0	9.1

表 3 复合结构地基计算参数汇总表

Tab.3 Calculating parameters summary of composite structure

断面	天然地基承载力 特征值/kPa	桩间土承载力 特征值/kPa	单桩承载力 特征值/kN	桩径/m	桩长/m	复合地基承载力 特征值/kPa	计算复合地基承载力 特征值/kPa	扩散角 /(°)
1	107	112	850	0.5	10.0	323	384	20
2	107	107	850	0.5	16.0	<330	502	23
3	107	107	980	0.5	16.0	<330	410	23

### 3.2 附加应力计算结果分析

根据上述计算方法及假定条件,使用 Mindlin-Boussinesq 联合求解方法,对试验段三个刚性桩桩承式结构路基断面附加应力进行计算(其中 Mindlin

## 3 计算结果及对比分析

### 3.1 复合结构地基计算参数

根据现场试验及地基检测数据,确定的天然地基承载力特征值和桩间土承载力特征值。根据现场检测试验分析计算中单桩承载力特征值。根据单桩承载力特征值按《JGJ79—2002,建筑地基处理技术规范》CFG 桩(水泥粉煤灰碎石桩)复合地基承载力特征值设计计算式,计算复合地基承载力特征值,与现场测试所得的复合地基承载力特征值及扩散角(表 3)。

应力为分担计算后桩体承受荷载在土体中应力值, Boussinesq 应力为分担计算后桩间土承受荷载在土体中应力值)。各断面地基附加应力沿深度分布规律如图 3 所示:

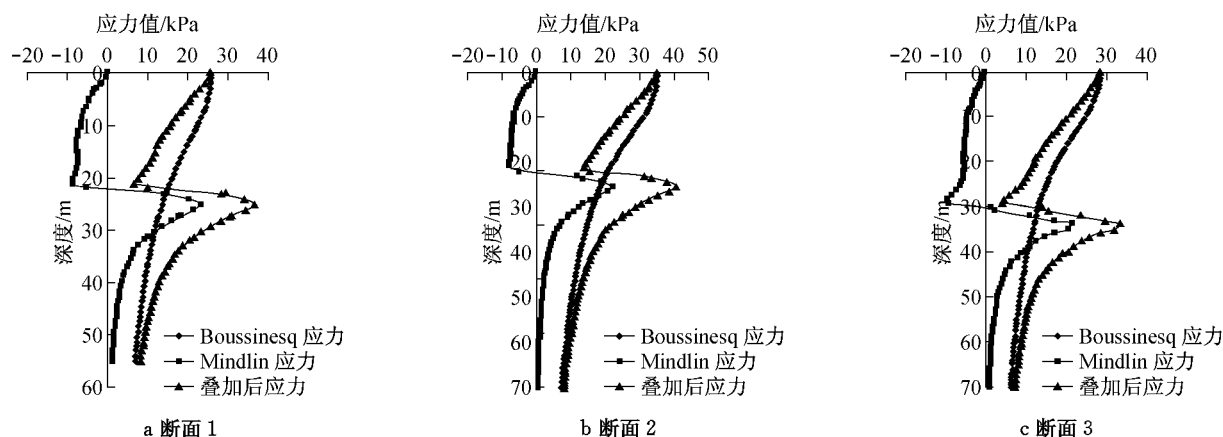


图 3 附加应力沿深度分布规律

Fig.3 Relationship between additional stress and depth

从图3可以看出,根据Mindlin解的应力系数公式,桩端力及桩侧三角形分布力将引起桩端上方土体产生受拉变形,但由于土体的重力作用及结构特性,实际上不会出现土体受拉现象<sup>[14]</sup>。地基中桩间土的附加应力沿深度的分布规律为:从地基面往下,附加应力衰减较快,接近桩端以上约2~2.5 m处开始附加应力又开始显著增加,到桩端下约2 m处出现最大值。此点向下附加应力沿深度衰减。

按Mindlin-Boussinesq联合附加应力求解计算方法,在桩端附近土体中附加应力的显著增大,和使用Boussinesq解计算结果差异较大,这一变化规律与刚性桩复合地基数值分析结果和现场实测数据中的土体应力场变化趋势较为吻合<sup>[15]</sup>,这也证明了Mindlin-Boussinesq联合附加应力求解计算方法计算刚性桩复合地基中附加应力的变化规律较Boussinesq解更符合实际情况。

### 3.3 沉降计算结果分析

刚性桩桩承式结构路基加固区和下卧层分别采用不同计算方法的沉降计算结果见表4—5。

表4 桩承式结构地基加固区沉降计算值

Tab.4 Settlement calculating value of reinforced area in the rigid piled-structure embankment

断面	复合模量法/mm	应力修正法/mm	M-B联合法/mm	
			压缩模量( $E_s$ )法	$e\text{-}l\text{-}g\text{-}p$ 曲线法
1	126.5	68.2	44.6	26.7
2	142.9	81.3	68.8	32.0
3	152.8	69.5	62.5	33.0

表5 桩承式结构地基下卧层沉降计算值

Tab.5 Settlement calculating value of substratum in the rigid piled-structure embankment

断面	压缩模量( $E_s$ )法/mm		$e\text{-}l\text{-}g\text{-}p$ 曲线法	
	Boussinesq解	应力扩散角	M-B联合法	M-B联合法/mm
1	187.2	218.3	48.5	43.9
2	174.3	204.2	52.6	36.3
3	126.0	170.3	32.3	19.6

从表4刚性桩桩承式结构地基加固区沉降计算结果可看出:加固区复合模量法计算沉降最大,按Mindlin-Boussinesq联合 $e\text{-}l\text{-}g\text{-}p$ 曲线法计算沉降最小。从表5中可看出:桩承式结构地基下卧层按Boussinesq和应力扩散角计算沉降最大,按Mindlin-Boussinesq联合 $e\text{-}l\text{-}g\text{-}p$ 曲线法计算沉降最小。

桩承式结构地基按建筑地基处理规范法和Mindlin-Boussinesq联合 $e\text{-}l\text{-}g\text{-}p$ 曲线法计算的总沉降与实测总沉降<sup>[20]</sup>的对比见表6。

从表6中可看出:对于高速铁路刚性桩桩承式

结构地基沉降计算按《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)方法计算的沉降量与现场实测值相差较大。广义Mindlin-Boussinesq联合 $e\text{-}l\text{-}g\text{-}p$ 求解的方法与实测值相比较为接近,且规律性较好。

表6 桩承式结构地基总沉降量

Tab.6 Settlement calculating value of foundation in the rigid piled-structure embankment

断面	建筑地基处理规范法/mm	规范法修正值/mm	M-B联合 $e\text{-}l\text{-}g\text{-}p$ 求解法/mm	现场实测沉降量/mm
1	313.7	73.1	70.6	60.3~69.3
2	317.2	74.0	68.3	50.3~49.1
3	278.8	55.8	52.6	40.2~44.7

### 3.3 计算方法适用性评价

通过对高速铁路刚性桩桩承式结构地基沉降的计算值与实测值比较分析表明,采用《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)方法计算的沉降量与现场实测值有一些差别,分析其主要原因有:

规范方法将加固区土层视为均质土,采用天然地基Boussinesq解计算附加应力场,这与实际情况存在较大差别。规范中按均质体的计算方法尤其在复合地基面积较大、桩数较多的情况下与实际附加应力场的差别较大;另一方面,复合地基加固区土体模量实际的增大系数 $\xi$ 不等于 $f_{sp}$ (复合地基承载力特征值)与 $f_{ak}$ (基础底面下天然地基承载力特征值)的比值, $\xi$ 反映的是整个受力范围内土体的贡献,仅对加固区这样处理欠妥<sup>[15]</sup>;此外,也与路基、建筑地基两者之间的基础结构形式不同、土的结构性有很大关系。建筑工程基础为刚性基础,而高速铁路路基荷载为柔性结构,两者在荷载传递上存在较大差异;《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)方法中加固区采用复合模量法,无法较好考虑应力历史等因素的影响,对超固结土或结构性较强的土,即使针对建筑工程地基沉降进行计算,也是不完全适合的。

根据Mindlin-Boussinesq联合求解路基横断面中心点桩间土的附加应力,再按 $e\text{-}l\text{-}g\text{-}p$ 曲线法计算沉降的方法,其计算值比实测值稍大,主要原因为采用Boussinesq求解桩间土附加应力时,未能考虑桩体相互影响,实际加固区桩间土中附加应力较Boussinesq计算值小。本文方法计算值与实测值较为接近,能反映土体应力历史及结构性等因素的作用。

## 4 结论

根据对高速铁路刚性桩桩承式结构地基不同沉

降计算方法及与实测结果对比分析,得出以下结论:

(1) 刚性桩桩承式结构地基加固区地基沉降采用《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)复合模量法对超固结土或结构性较强的土适用性较差。

(2) 基于 Mindlin-Boussinesq 联合求解复合地基中桩间土的附加应力沿深度的分布规律:从地基面往下,附加应力衰减较快,接近桩端以上约 2~2.5 m 处开始附加应力又开始显著增加,到桩端下约 2 m 处出现最大值。此点向下附加应力沿深度衰减。此分布规律较为符合实际工程观测情况。

(3) 基于 Mindlin-Boussinesq 联合求解法的计算沉降值与实测值较接近,考虑应力历史等影响因素。计算刚性桩桩承式结构地基表面桩间土附加应力时可考虑柔性垫层的特性等因素。建议高速铁路刚性桩桩承式结构地基沉降采用 Mindlin-Boussinesq 联合求解桩间土的附加应力,再根据  $e\text{-lg}p$  曲线法计算地基沉降的计算方法是可行的。但其计算过程优化仍需要进一步的开展研究工作。

## 参考文献:

- [1] 王炳龙. 高速铁路路基工程[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007.  
WANG Binglong. High-speed railway subgrade engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [2] 宰金珉. 复合桩基理论与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.  
ZAI Jinmin. Theory and application of composite pile foundation [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2004.
- [3] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.  
GONG Xiaonan. Theory and engineering application of composite foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [4] 杨光华, 苏卜坤, 乔有梁. 刚性桩复合地基沉降计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2193.  
YANG Guanghua, SU Bukun, QIAO Youliang. Method for calculating settlement of rigid-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2193.
- [5] 王长丹, 王炳龙, 王旭, 等. 高速铁路湿陷性黄土桩筏复合地基沉降控制效应[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 34(5): 686.  
WANG Changdan, WANG Binglong, WANG Xu, et al. Settlement controlling effect in pile raft composite foundation on collapsible loess in high speed railway [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 34(5): 686.
- [6] British Standard 8006. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S]. London: British Standard Institute, 1995.
- [7] Nordic Geotechnical Society. Nordic handbook. reinforced soils and fills[S]. Stockholm: Nordic Geotechnical Society, 2002.
- [8] Railway Technology Research Institute. The design and construction handbook of mixing piled foundation (machine mixing) [M]. Tokyo: Railway Technology Research Institute, 2001.
- [9] Gabr M, Han J. Geosynthetic reinforcement for soft foundation: US perspectives[J]. International Perspective on Soil reinforcement Application, ASCE Geotechnical Special Publication, 2005, 141: 73.
- [10] Hufenus R, Rueegger R, Banjac R, et al. Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24: 21.
- [11] 周镜, 叶阳升, 蔡德钧. 国外加筋垫层桩支承路基计算方法分析[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 1.  
ZHOU Jing, YE Yangsheng, CAI Dejun. Analysis of calculation method for foreign geosynthetic reinforced pile supported embankments[J]. China Railway Science, 2007, 28(2): 1.
- [12] 同济大学交通运输工程学院. 高速铁路 CFG 桩复合地基计算理论和设计方法研究报告[R]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2009.  
College of Transportation Engineering of Tongji University. Research report of CFG pile composite foundation calculation theory and design method in high speed railway[R]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2009.
- [13] DGGT Deutsche gesellschaft für Geotechnik. Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern[S]. [S.l.]; German Recommendations for Geosynthetic Reinforced Earth Structures, 2003.
- [14] 杨敏, 王树娟, 王伯钧, 等. 使用 Geddes 应力系数公式求解单桩沉降[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1997, 25(4): 379.  
YANG Min, WANG Shujuan, WANG Bojun, et al. On analysis of single pile by using geddes stress formula[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1997, 25(4): 379.
- [15] 池跃君, 宋二祥, 陈肇元. 刚性桩复合地基沉降计算方法的探讨及应用[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 19.  
CHI Yuejun, SONG Erxiang, CHEN Zhaoyuan. A simplified method for settlement of rigid-pile composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 19.