

文章编号:1671-1637(2015)03-0009-07

## 高速铁路路基下复合地基沉降计算方法

雷胜友<sup>1</sup>, 李肖伦<sup>2</sup>, 李 洋<sup>1</sup>, 李梦莎<sup>1</sup>, 惠会清<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 3. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**分别采用 Boussinesq 组合法、Boussinesq 直接法、Boussinesq 三角形法和德国 DB836 法计算地基附加应力, 采用复合模量、承载力比值法所得模量和弦线模量作为地基模量, 按 12 种组合形式来计算地基总沉降量, 并与某高速铁路试验段的实测沉降进行比较。计算结果表明:当附加应力分别按 Boussinesq 组合法、Boussinesq 直接法和德国 DB836 法计算, 选用复合地基载荷板试验所得弦线模量时, 计算所得的地基总沉降量同实测值非常接近, 相对差值在 1.57%~9.81%之间, 满足高速铁路对地基沉降控制的精度要求。建议采用附加应力-地基模量方法进行高速铁路路基工程的地基沉降计算时, 其中附加应力可按 Boussinesq 组合法、Boussinesq 直接法和德国 DB836 法计算, 地基模量选用弦线模量。

**关键词:**高速铁路; 复合地基; 附加应力; 弦线模量

**中图分类号:**U213.1 **文献标志码:**A

## Calculation method of composite foundation settlement under high-speed railway subgrade

LEI Sheng-you<sup>1</sup>, LI Xiao-lun<sup>2</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, LI Meng-sha<sup>1</sup>, HUI Hui-qing<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China; 3. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Boussinesq combination method, Boussinesq direct method, Boussinesq triangular method and German DB836 method were applied to calculate the foundation additional stress. Composite modulus, modulus calculated by bearing capacity ratio method, and chord modulus were applied as foundation modulus respectively. 12 combining forms were used to calculate the total foundation settlement, and the calculated results were compared with the measured settlements of test sections of high-speed railway. Calculation result shows that when foundation additional stress is calculated by Boussinesq combination method, Boussinesq direct method and German DB836 method, and foundation modulus is chord modulus calculated by composite foundation load plate test, the calculated total foundation settlements are very close to the measured value, and the relative differences are 1.57%-9.81%, which can meet the requirement of foundation settlement control for high-speed railway. Therefore, it is recommended to apply additional stress-modulus method to calculate the foundation settlement of subgrade construction for high-speed railway, in which the foundation addition stress can be calculated by Boussinesq combination method, Boussinesq direct method and German DB836 method, and chord modulus

收稿日期:2014-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(59479017);铁道部科技研究开发项目(2010G003-F)

作者简介:雷胜友(1965-),男,陕西渭南人,长安大学教授,工学博士,从事高速铁路地基处理与岩石力学研究。

is applied as foundation modulus. 2 tabs, 6 figs, 25 refs.

**Key words:** high-speed railway; composite foundation; additional stress; chord modulus

**Author resume:** LEI Sheng-you(1965-), male, professor, PhD, +86-29-82335310, rongrong11085310@sina.com.

## 0 引 言

普通铁路路基下地基附加应力计算一般采取 Boussinesq 法,形成大家熟知的地基附加应力系数表,然后从所得土的压缩曲线上查找对应的孔隙比,求得地基各分层的压缩量,最后求和得到路基底部的总沉降量<sup>[1-8]</sup>。然而按这种方法计算的沉降量与实测值的差异往往很大,需通过所填筑道渣厚度的变化来调整其差异,以满足竣工后沉降的要求<sup>[9]</sup>。高速铁路一般为无砟轨道,即整体式道床,轨道扣件可调整的高度只有 15 mm,因此,要求高速铁路竣工后路基总沉降量不大于 15 mm,这样才能保证联调联试后高速列车的运行安全,所以精确计算和控制高速铁路的总沉降量是十分必要的<sup>[10-13]</sup>。但是目前对于高速铁路地基的沉降计算还没有比较好的方法,普遍还是套用工民建的计算方法,如李新召等采用复合模量法计算高速铁路地基的沉降量<sup>[14-16]</sup>,由于复合地基桩间土的模量还是采用土的压缩模量,取样的扰动,加之压缩模量是在有侧限的情况下计算所得,与实际土的受力情况不一致,导致桩间土的模量不能准确确定,此外,长桩的模量采用桩体材料单轴抗压强度试验所得模量,较实际情况偏小,计算出的沉降量需要做一些修正,且修正系数的人为因素使得计算结果很不客观;郑俊杰等采用有限元方法计算沉降量<sup>[17-21]</sup>,同样存在着复合地基桩和桩间土模量参数的取值问题,使得有限元计算结果差距更大。还有学者提出弹性土堤法,将路堤和地基看成一个整体来计算,这对于一般堤坝而言,在对沉降计算要求不是很准确的情况下,能够满足当时的要求,但对于高铁而言,还是显得粗糙,精度不高。本文认为高速铁路路基工程的总沉降通常是由路基上整体式道床、路基本体、路基下的水泥土格栅垫层以及垫层下地基的沉降组成。一般情况下,整体式道床的变形能很好控制和量测,对路基本体的沉降控制,可以通过人为方式严格控制路基填土层的压实度,形成千层饼,从而控制其变形,而水泥土格栅垫层通常情况下只有 80 cm 厚,其质量和变形也容易控制,这样整个高速铁路总沉降量的控制最终成为地基的总沉降量控制。所以准确计算地基的总沉降

量成为高速铁路竣工后沉降控制的关键所在,而地基在地面以下,比较隐蔽,其变形受地层结构、地下水位变化、地基处理措施、施工质量等影响,准确计算高速铁路地基的沉降变形非常困难。本文从复合地基附加应力和模量<sup>[22]</sup>入手,探讨高速铁路路基下地基沉降计算的合理方法,为高速铁路路基的设计和沉降计算提供参考。

## 1 高速铁路地基沉降计算的关键问题

高速铁路路基下地基沉降计算的关键问题是地基附加应力计算和对应地基模量的合理选取。对于前者,可按 Boussinesq 组合法、Boussinesq 直接法、Boussinesq 三角形法和德国 DB836 法计算<sup>[23]</sup>;对于后者,除了可选择大家熟知的复合模量外,还可选择载荷板试验所得弦线模量<sup>[24-25]</sup>。本文将按以上多种组合进行沉降计算,并同实测值进行比较,从而选出准确的计算方法。

### 1.1 地基附加应力计算方法简介

高速铁路路基下长短桩复合地基的附加应力可分别按 Boussinesq 组合法、Boussinesq 直接法、Boussinesq 三角形法和德国 DB836 法进行计算,下面对这些方法进行简要说明。

#### 1.1.1 Boussinesq 组合荷载算法

路堤底部的应力为路堤填料自重梯形分布荷载与路面矩形分布荷载组合,组合分布荷载在地基中产生的应力采用 Boussinesq 组合法计算确定,见图 1。该计算方法是将路面荷载等效成与路堤一样的填料荷载,所有填料荷载产生的附加应力从路基地面处算起,对于地基而言,认为所有荷载直接作用于地基顶面处。没有考虑路面荷载在路堤部分的

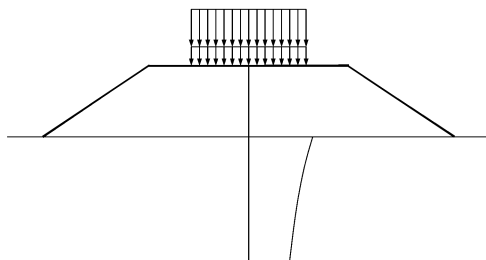


图 1 Boussinesq 组合荷载算法

Fig. 1 Boussinesq combined load calculation method

衰减。

### 1.1.2 Boussinesq 直接计算法

从轨道板底部向下,按 Boussinesq 直接法计算路基面荷载在路堤及地基中的产生的应力,地基中的附加应力还应加上路堤填料所产生的附加应力,路堤填料所产生的附加应力也按 Boussinesq 直接法计算,所以在地基顶面处出现了附加应力的突变,见图 2。这种计算方法认为路基面荷载直接作用于路堤顶面,即接触面从路堤顶面开始算起,把路基和地基考虑成一个整体,然后计算路堤顶面以下的附加应力,当路基高度很大时,路基面荷载的衰减就很明显,这与弹性土堤法一样。

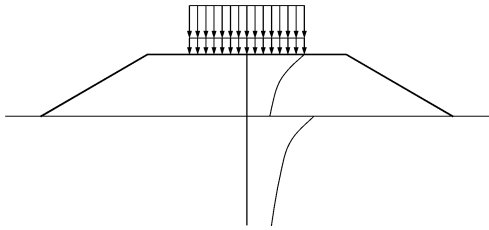


图2 Boussinesq 直接计算法

Fig. 2 Boussinesq direct calculation method

### 1.1.3 Boussinesq 三角形荷载计算法

路堤底部的应力按三角形分布,坡脚处的应力为0,路堤中心处的应力最大。三角形的面积与路基面荷载及路堤填料自重相平衡。三角形条形分布荷载在地基中产生的应力采用 Boussinesq 三角形法计算确定,见图 3。这种方法还是基于路堤荷载的分布特点来考虑,即路基坡脚处的应力为0,而路基中心线处的应力最大,简化为三角形分布,计算出的路基中心线处的地基附加应力也较大。

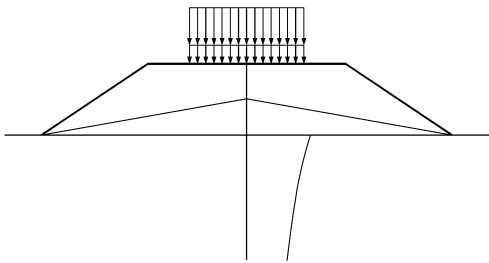


图3 Boussinesq 三角形荷载计算法

Fig. 3 Boussinesq triangular load calculation method

### 1.1.4 德国 DB836 计算法

参照德国 836 行业标准规定,路基面荷载从轨道底部两侧按 45° 向下扩散,路基面荷载在路堤及地基中不同深度处产生的应力与扩散面长度的积与路基面荷载相平衡,见图 4。地基中总的附加应力为路堤填料自重所产生的附加应力和路基面荷载所

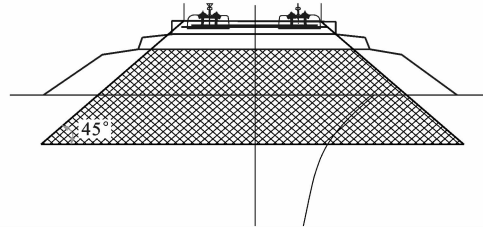


图4 DB836 计算法

Fig. 4 DB836 calculation method

产生的附加应力之和,其中路堤填料在地基中所产生的附加应力按 Boussinesq 法计算。这种计算方法认为路基顶面上整体道床的刚度很大,这样路基面荷载向下传播的扩散角就会增大,所以取 45°。

### 1.2 复合地基模量的选择

通常复合地基的沉降计算中所用的模量有桩间土压缩模量、复合模量、规范法中的承载力比值法确定的模量,本文将弦线模量用于复合地基的沉降计算<sup>[24]</sup>。

复合模量  $E_{sp1}$  为

$$E_{sp1} = [1 + m(n - 1)]E'_s \quad (1)$$

式中:  $m$  为面积置换率;  $n$  为桩土应力比;  $E'_s$  为加固后桩间土压缩模量。

规范法中承载力比值法确定的模量  $E_{sp2}$  为

$$E_{sp2} = \xi E_s \quad (2)$$

$$\xi = f_{spk} / f_{ak}$$

式中:  $E_s$  为天然地基土压缩模量;  $\xi$  为模量提高系数;  $f_{spk}$  为复合地基承载力特征值;  $f_{ak}$  为基础下天然地基土承载力特征值。

本文重点介绍弦线模量  $E_{ch}$ , 依据载荷试验资料的基底压力  $P$  和沉降量  $S$  可求出

$$E_{ch} = I_0 (1 - \mu^2) \frac{P_0 F}{S_0 d} \quad (3)$$

式中:  $P_0$  为  $S$  曲线上直线变形阶段末端对应的荷载;  $S_0$  为  $P_0$  所对应的沉降量;  $F$  为载荷板的面积;  $d$  为载荷板的直径或边长;  $I_0$  为载荷板位于地表的影响系数,对于圆形刚性板,  $I_0$  取 0.785,对于方形刚性板,取 0.815;  $\mu$  为地基土的泊松比。

一般地基的弦线模量通常由地基载荷板试验所得,其获取方法是每级荷载增量除以变形增量,并考虑载荷板的形状修正系数,这样就得到弦线模量随荷载变化的曲线,用分层总和法计算得到地基总沉降量。以上方法虽然是从天然地基开始的,但是对于复合地基也是合适的。弦线模量的最大优点是它来自于原位试验,比较真实地反映了地基土的应力与应变关系,从这点上讲,它是优于一般的室内压缩试验所得的土的压缩模量,因为室内压缩试验所用

的土样是扰动过的试样,跟实际中的地基土有很大差别,因此,单从地基土模量角度分析,弦线模量比较符合实际情况,对复合地基,弦线模量更能显示出其优势。因为复合地基不同于天然地基,例如长短桩复合地基,若其中长桩为 CFG 桩,短桩为水泥土挤密桩,CFG 桩为刚性桩,水泥土挤密桩为柔性桩,桩间为经过挤密后的土,复合地基上部又覆以 60~80 cm 的水泥土格栅垫层,这样形成的地基,其结构复杂,不同于单一地基,两种桩、桩间土、垫层形成的复合地基的模量难以准确确定并给出表达式,因此,借助原位试验,如复合地基载荷板试验,反求其等代的地基模量,并将其用于复合地基的沉降计算是比较合理的。

### 1.3 地基沉降计算结果分析

本研究选择的工程试验段分别为某高速铁路客运专线试验段 1 和试验段 2,其地基处理情况如下。

试验段 1:采用长短桩处理地基,短桩采用水泥土挤密桩,桩径为 0.4 m,桩间距为 0.9 m,桩长为 8.0 m,长桩采用 CFG 桩,桩径为 0.4 m,桩间距为 1.8 m,桩长为 17.0 m,平面均采用正方形布置。试验段 2:采用长短桩处理地基,短桩采用预钻孔柱锤冲扩桩,桩径为 0.6 m,桩间距为 1.0 m,桩长为 10~13 m,

长桩采用 CFG 桩,桩径为 0.4 m,桩间距为 2.0 m,桩长为 13~16 m,平面均采用正方形布置,复合地基、路基与垫层的情况见图 5。地基处理完成后分别在试验段 1(DK601+000、DK601+050 两处)和试验段 2(DIK520+100、DIK520+340 两处)进行复合地基载荷板试验。

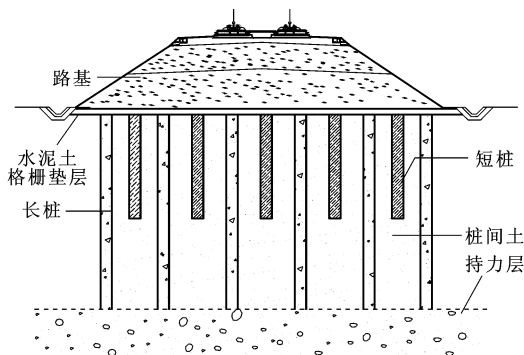


图 5 长短桩布置

Fig. 5 Arrangement of long and short piles

针对某高速铁路客运专线试验段 1、2 路基的填筑情况,采用前述的 4 种方法计算地基附加应力,分别选用复合模量、规范法所得模量(规范模量)和复合地基的载荷板试验所得弦线模量作为地基模量,计算地基总沉降值,并同实测值进行比较,结果见图 6。

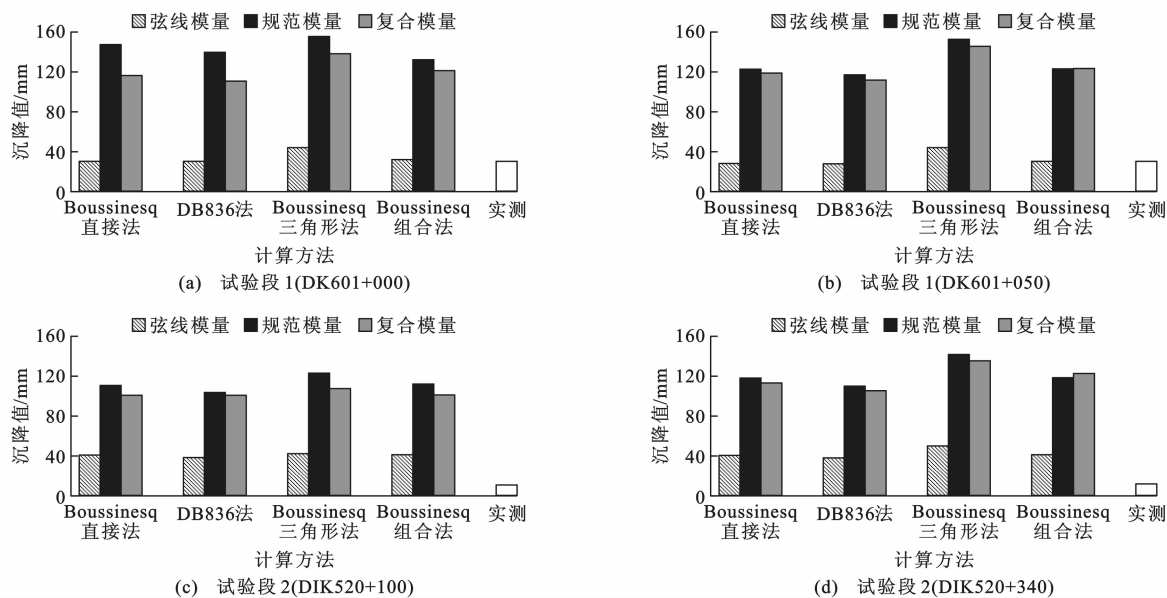


图 6 不同附加应力情况下路基中线处地基总沉降量对比

Fig. 6 Comparison of total foundation settlements in mid-line of subgrade under different additional stresses

从图 6(a)、(b)可以看出,用弦线模量计算出的路基中线处的地基总沉降量与实测值比较接近,而用规范模量和复合模量计算出的总沉降量与实测值差异较大。在弦线模量法的计算中,附加应力采用 Boussinesq 直接法、德国 DB836 法和 Boussinesq 组合法计算,所得到的总沉降量与实测值比较接近,而

采用 Boussinesq 三角形法所得到的总沉降量则比实测值稍大一点,这主要是 Boussinesq 三角形法所得地基附加应力在路基中心线处最大的原因。当地基模量采用其他方法计算,而附加应力仍然采用以上 4 种方法计算,所得地基的总沉降量均比实测值大很多。

从图 6(c)、(d)可以看出,用弦线模量法计算出的总沉降量较实测值大,其主要原因是由于实测值为阶段性总沉降值,而不是最终沉降值。尽管如此,用弦线模量计算出的沉降量还是较其他模量小很多,与实测值的差别最小。

为了更进一步比较各计算方法的优劣,表 1、2 分别列出了试验段 1、2 沉降计算值与实测值的对比,其中计算值减去实测值为绝对差值,绝对差值除以实测值为相对差值。从表 1 可以看出,对于每种附加应力计算方法,当地基模量选择弦线模量时,无论是绝对差值还是相对差值都最小,绝度差值的变化范围为 0.67~13.30 mm。其中 Boussinesq 直接法和德国 DB836 法所得绝对差值最小,且数值最为接近,对于试验段 1,其值分别为 0.67、0.73 mm,其相对差值分别为 2.2%、2.4%;对于试验段 2,其值分别为 1.5、2.8 mm,其相对差值分别为 4.92%、9.81%。Boussinesq 组合法所得绝对差值分别为 1.67、0.67 mm,其相对差值分别为 5.87%、1.57%。采用其他方法所得的绝对差值和相对差值都较大,其范围分别为 80.84~125.53 mm 与 265.22%~411.84%。

表 1 试验段 1 沉降差值比较

Tab. 1 Settlement difference comparison at test section 1

计算方法		DK601+000		DK601+050	
		绝对差值/ mm	相对差值/ %	绝对差值/ mm	相对差值/ %
Boussinesq 直接法	弦线模量	0.67	2.20	1.50	4.92
	规范模量	117.88	386.75	91.92	301.57
	复合模量	86.52	283.86	88.19	289.34
DB836 法	弦线模量	0.73	2.40	2.80	9.19
	规范模量	109.90	360.56	85.75	281.33
	复合模量	80.84	265.22	80.85	265.26
Boussinesq 三角形法	弦线模量	13.30	43.64	13.20	43.31
	规范模量	125.53	411.84	121.50	398.62
	复合模量	108.96	357.48	114.49	375.62
Boussinesq 组合法	弦线模量	1.79	5.87	0.48	1.57
	规范模量	102.10	334.97	91.77	301.08
	复合模量	91.36	299.74	93.52	306.82

用 4 种方法计算地基附加应力时,选用弦线模量作为地基模量,计算出的地基总沉降量与实测值很接近,所以在高速铁路路基工程的地基沉降计算中,建议地基模量选用弦线模量,附加应力按 Boussinesq 直接法、德国 DB836 法和 Boussinesq 组合法计算。

表 2 试验段 2 沉降差值比较

Tab. 2 Settlement difference comparison at test section 2

计算方法		DK520+100		DK520+340	
		绝对差值/ mm	相对差值/ %	绝对差值/ mm	相对差值/ %
Boussinesq 直接法	弦线模量	29.99	249.71	28.26	235.30
	规范模量	99.00	824.31	105.29	876.69
	复合模量	89.31	743.63	100.49	836.72
DB836 法	弦线模量	27.94	232.64	25.36	211.16
	规范模量	92.52	770.36	97.32	810.32
	复合模量	89.76	747.38	93.29	776.77
Boussinesq 三角形法	弦线模量	31.99	266.36	37.26	310.24
	规范模量	111.18	925.73	128.89	1 073.19
	复合模量	97.23	809.58	122.44	1 019.48
Boussinesq 组合法	弦线模量	30.73	255.87	28.65	238.55
	规范模量	100.67	838.22	106.38	885.76
	复合模量	89.73	747.13	110.27	918.15

2 采用弦线模量计算地基沉降的合理性分析

地基载荷板试验曲线从实质上可以认为是一种广义本构关系,经过进一步整理可得地基附加应力和地基模量的关系,用于地基的沉降计算显然是合理的<sup>[22]</sup>。

载荷板下地基土实际上处于三维受力状态,对于长、大高速铁路路基而言为条形荷载,路基施加给地基的荷载为柔性荷载,整个地基土的变形为平面应变问题。

如果以分子  $x$  代表附加应力,分母  $y$  代表模量,则分数值  $x/y$  代表某层地基的竖向应变变量,只有竖向应变变量计算正确,分层沉降量才能计算正确,进而总沉降量才能计算正确。

对于  $x/y$  而言,只有分子、分母值都正确,分数值才正确,沉降计算才是正确的,即当附加应力和模量都正确的情况下,计算沉降值才是正确的,对于整个地基而言,在计算中不同深度处的附加应力值和地基模量值都能够反映真实的地基应力水平,则总的沉降量的计算才是准确的。所以每一层的竖向应变变量  $\epsilon_z$  等于附加应力除以地基模量,要想得到正确的  $\epsilon_z$  值,只有在以下情况下才能实现。

(1)正确的  $\epsilon_z$  等于正确的附加应力除以正确的地基模量。

(2)正确的  $\epsilon_z$  等于比较大的附加应力除以比较大的地基模量。

(3)正确的 $\epsilon_z$ 等于比较小的附加应力除以比较小的地基模量。

从情况(2)、(3)可以看出,当附加应力和地基模量都是真值的某一个倍数时,这时计算出的竖向应变值才是正确的,因此,上述情况也可用下面的叙述形象说明。

(1)正确的分子值除以正确的分母值得到正确分数值。

(2)扩大同倍数的分子值除以扩大同倍数的分母值得到正确分数值。

(3)缩小同倍数的分子值除以缩小同倍数的分母值得到正确分数值。

同理,在以下情况下可能得不到正确的 $\epsilon_z$ 值。

(1)不正确的附加应力除以正确的地基模量得到不正确的 $\epsilon_z$ 。

(2)正确的附加应力除以不正确的地基模量得到不正确的 $\epsilon_z$ 。

(3)不正确的附加应力除以不正确的地基模量得到不正确的 $\epsilon_z$ 。

从以上分析可以看出,只有每一层的地基附加应力计算正确和地基模量选择合理,才能计算出合理的总沉降量。

### 3 结 语

本文在分析了高速铁路路基总沉降量组成的基础上,认为路基本体和其下垫层的填筑都是通过严格技术把关和质量控制的,其沉降比较容易控制和计算,所以问题的难点转化为路基下地基沉降的精确计算问题。为此,本文从高速铁路地基附加应力和地基模量入手,采用4种方法计算地基附加应力,3种方法计算地基模量,并采用分层总和法计算地基的总沉降量,最后将计算值同实测值进行了比较,发现当地基附加应力采用 Boussinesq 直接法、德国 DB836 法和 Boussinesq 组合法计算,模量选用地基载荷试验所得的弦线模量(切线模量),采用分层总和法计算总沉降量时,计算出的地基总沉降量同实测值比较接近,其相对差值的范围为 1.57%~9.81%,满足高速铁路沉降控制的精度要求。同理,本文方法还适合于高速铁路路基下其他类型地基(包括软基)以及高速铁路其他建筑物地基的沉降计算。

#### 参 考 文 献 :

#### References :

[1] 杨龙才,王炳龙,赵国堂,等. CFG 桩网复合地基沉降计算方

法研究[J]. 铁道建筑,2009(7):19-23.

YANG Long-cai, WANG Bing-long, ZHAO Guo-tang, et al. Study on the settlement calculation of CFG pile-net composite foundation[J]. Railway Engineering, 2009(7): 19-23. (in Chinese)

[2] 马明正,海振雄,叶阳升,等. 高速铁路 CFG 桩复合地基沉降计算适用方法研究[J]. 中国铁道科学,2014,35(2):7-13.

MA Ming-zheng, HAI Zhen-xiong, YE Yang-sheng, et al. Applicable method for settlement calculation of CFG pile composite foundation for high speed railway[J]. China Railway Science, 2014, 35(2): 7-13. (in Chinese)

[3] 王长丹,王炳龙,周顺华,等. 高速铁路刚性桩网复合地基沉降计算方法与实测数据对比分析[J]. 铁道学报,2013,35(8):80-87.

WANG Chang-dan, WANG Bing-long, ZHOU Shun-hua, et al. Calculation method of settlement of rigid pile-geogrid composite foundation of high-speed railways and comparison with measured data[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(8): 80-87. (in Chinese)

[4] 陈福江,马建林,朱 林,等. 考虑压缩模量深度效应的深厚软土桩基沉降计算[J]. 岩土力学,2012,33(增2):167-172.

CHEN Fu-jiang, MA Jian-lin, ZHU Lin, et al. Settlement calculation of pile foundation in deep-soft soil considering depth effect of compression modulus [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 167-172. (in Chinese)

[5] 张敏静,罗 强,詹学启,等. 高速铁路穿透型 CFG 桩复合地基沉降计算修正系数分析[J]. 岩土力学,2013,34(2):519-525,545.

ZHANG Min-jing, LUO Qiang, ZHAN Xue-qi, et al. Research on settlement calculation empirical coefficient of end-bearing CFG pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 519-525, 545. (in Chinese)

[6] 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.

LIU Jun-fei. Study on working mechanism and calculation method of settlement control for railway's roadbed using CFG-pile composite foundation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)

[7] 张占荣. 武广高铁红黏土地基沉降计算方法研究[J]. 铁道工程学报,2011,4:9-14,87.

ZHANG Zhan-rong. Research on computation method for settlement of red clay foundation of Wuhan-Guangzhou passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 4: 9-14, 87. (in Chinese)

[8] 赵明华,张 玲,李立新,等. 长短桩复合地基沉降计算方法研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2005,21(4):310-314.

ZHAO Ming-hua, ZHANG Ling, LI Li-xin, et al. Research on settlement calculation of the long-short-pile composite foundation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2005, 21(4): 310-314. (in Chinese)

[9] TB 10106—2010,铁路工程地基处理技术规程[S].

TB 10106—2010, technical code for ground treatment of railway engineering[S]. (in Chinese)

- [10] TB 10621—2009, 高速铁路设计规范[S].  
TB 10621—2009, code for design of high speed railway[S].  
(in Chinese)
- [11] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范[S].  
JGJ 79—2012, technical code for ground treatment of buildings[S].  
(in Chinese)
- [12] GB 50025—2004, 湿陷性黄土地区建筑规范[S].  
GB 50025—2004, code for building construction in collapsible loess regions[S]. (in Chinese)
- [13] 蒋关鲁, 王力伟, 杭红星. 路桥交界处地基附加应力修正计算方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 208-218.  
JIANG Guan-lu, WANG Li-wei, HANG Hong-xing. Modified method for additional stress of bridge-approach foundation under subgrade load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 208-218. (in Chinese)
- [14] 李新召. 湿陷性黄土区 DDC 复合地基沉降计算研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.  
LI Xin-zhao. Study on calculation of settlement of DDC composite foundation in collapsible loess area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese)
- [15] 姚笑青. 桩基沉降中的附加应力计算方法分析[J]. 结构工程师, 2004, 20(4): 64-67, 17.  
YAO Xiao-qing. Method of additional stress calculation in settlement of pile foundations[J]. Structural Engineers, 2004, 20(4): 64-67, 17. (in Chinese)
- [16] 刘从友. 湿陷性黄土地区挤密桩复合地基沉降计算[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.  
LIU Cong-you. The settlement calculation of compaction pile composite foundation in collapsible loess areas[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009. (in Chinese)
- [17] 郑俊杰, 马强, 韦永美, 等. 复合地基沉降计算与数值模拟分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 95-98.  
ZHENG Jun-jie, MA Qiang, WEI Yong-mei, et al. Calculation and numerical simulation of composite foundation settlement[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(8): 95-98. (in Chinese)
- [18] 张占荣, 刘庆辉, 杨艳霜, 等. 高填土路堤沉降计算方法分析[J]. 铁道标准设计, 2011, 2: 5-8.  
ZHANG Zhan-rong, LIU Qing-hui, YANG Yan-shuang, et al. High fill embankment settlement calculation methods[J]. Railway Standard Design, 2011, 2: 5-8. (in Chinese)
- [19] 汤连生, 林沛元, 吴科, 等. 交通荷载下层状路基动附加应力的弹性计算模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2208-2214.  
TANG Lian-sheng, LIN Pei-yuan, WU Ke, et al. Elastic calculation model for dynamic additional stresses in layered subgrade under traffic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2208-2214. (in Chinese)
- [20] 程艺梅. 京沪高速铁路宽站场深厚软土 PHC 桩复合地基沉降计算与结构设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
CHENG Yi-mei. Study on the settlement calculation and structure design of PHC pile composite foundation in deep soft soil of Beijing-Shanghai high-speed railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [21] 郭在旭. 路堤荷载下 CFG 桩复合地基沉降计算研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
GUO Zai-xu. Study of settlement calculation of CFG pile composite foundation under embankment load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [22] 长安大学, 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 高速铁路路基技术深化研究[R]. 西安: 长安大学, 2015.  
Chang'an University, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Further research of high speed railway bed technique[R]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [23] 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 铁道部工程设计鉴定中心. 高速铁路深化研究细则[R]. 西安: 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2010.  
China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Engineering Design Authentication Center of Ministry of Railways. Further research of high-speed railway rules[R]. Xi'an: China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 2010. (in Chinese)
- [24] 焦五一. 地基变形计算的新参数——弦线模量的原理和应用[J]. 水文地质工程地质, 1982(1): 30-33, 29.  
JIAO Wu-yi. New coefficient of deformation calculation of foundation—the principle and application of chord modulus[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982(1): 30-33, 29. (in Chinese)
- [25] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程, 2008, 27(4): 679-686.  
YANG Guang-hua. New computation method for soil foundation settlements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 679-686. (in Chinese)