

# 联合明德林解和布辛奈斯克解计算复合地基 沉降方法的推导

王士革<sup>1</sup>, 张宗领<sup>1</sup>, 袁一力<sup>2</sup>

(1. 信阳师范学院 建筑与土木工程学院, 河南 信阳, 464000; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安, 710055)

**摘要:** 路基在施工与使用过程中产生的沉降变形会造成路面裂缝、桥头跳车等工程缺陷。在路基施工中经过长短桩复合地基处理能够同时增加承载力并降低沉降大小。但是, 针对长短桩复合地基沉降理论计算的研究较少, 难以满足实践要求。对比分析了传统计算方法的优缺点与各自的适用性, 并基于长短桩复合地基的应力应变特性通过公式推导将明德林解与布辛奈斯克解相结合用于路基沉降值的理论计算, 最后对影响长短桩复合地基的沉降理论计算的因素进行了分析的影响因素, 为实际工程中长短桩复合地基沉降计算的精确性提供了理论依据。

**关键词:** 明德林解; 布辛奈斯克解; 地基沉降; 长短桩

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0820-06

## The calculation method Combined with Mindlin's solution and Boussinesq's analytical solutions to calculate composite foundation settlement

WANG Shige<sup>1</sup>, ZHANG Zongling<sup>1</sup>, YUAN Yili<sup>2</sup>

(1. School of architecture and civil engineering, Xinyang Normal University, Hennan Xinyang 464000, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The settlement of roadbed during construction and service process will result in pavement cracks, vehicle jump at bridge head and other engineering defects. In the construction of roadbed, the bearing capacity can be increased and the settlement can be reduced by the treatment of long short pile composite foundation. However, research on the theoretical calculation of the settlement of long short pile composite foundation is few, and the calculation method cannot meet the practical requirements. The advantages and disadvantages of traditional calculation methods and their applicability are comparatively analyzed. Based on the stress-strain characteristics of composite foundation with long short piles, Mindlin's solution and Boussinesq's solution are combined to calculate the settlement value of subgrade through formula deduction. Finally, the factors affecting the settlement calculation of composite foundation with long short piles are analyzed. The analysis of the influencing factors provides a theoretical basis for the accuracy of settlement calculation of long-short pile composite foundation in practical engineering.

**Key words:** mindlin's solution; boussinesq's solution; foundation settlement; long short pile

我国高速公路项目数量近年逐年增多, 其中有许多路基工程位于软土地区, 在软土地区施工时, 路基加固是高速公路施工过程中极为重要的一环。在软土地区进行的填方路基施工如果未能得到适当的地基处理, 则有可能导致路基产生较大的沉降变形进而影响高速公路的正常使用。未得到适当地基处理的路基可能会造成裂缝、路面塌陷等工程事故, 严重影响交通安全并提高路面的全寿命周期费用<sup>[1]</sup>。其中“桥头跳车”是一种典

型的路基沉降造成的路面缺陷, 其形成原因为桥头路面不均匀沉降而形成的路面高度错动, “桥头跳车”会降低交通运输流通速度, 并会严重降低行车过程中的舒适程度, 造成高速公路的优越性不能很好的发挥; 此外“桥头跳车”所引起的冲击作用会导致桥头路面与桥梁结构的加速老化。因而, 沉降变形在高速公路设计施工过程中的一项重要指标, 在相关规范中也有具体体现。针对软土地区填方路基的地基加固处理研究, 以及针对沉降

收稿日期: 2018-01-15

修改稿日期: 2018-11-05

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(18A560020); 河南省教育技术装备和实践教育研究课题(GZS069); 河南省高校省级大学生创新训练项目(201710477016)

第一作者: 王士革(1979—), 男, 讲师, 主要从事复合地基的研究工作与教学。E-mail: 517327969@qq.com

变形理论预测模型相关研究具有较高的实践意义。

复合地基技术在房建、高速公路等建设项目的施工过程中得到广泛应用,能够有效提高工程施工质量,提高工程安全性与经济性<sup>[2]</sup>。软土地区路基沉降是高速公路工程最重要的方面。本文提出通过长短桩复合地基来进行软土地区高速公路路基处理以进行其沉降变形的控制。长短桩复合地基技术的主要目的是控制沉降,大多是应用于刚性基础下,而在软土路基中的应用比较少<sup>[3]</sup>。因而本文针对长短桩复合地基在软土地区高速公路路基工程中的应用以及沉降变形理论计算方法进行了研究。

## 1 长短桩复合地基理论

### 1.1 复合地基的概念

复合地基通过对天然地基中的土体进行部分加强或替换的一种地基处理技术。复合地基在构成上由天然地基土体以及加强或替换土体两个部分组成。复合地基属于人工地基,是一种能够满足大多数工程地基加固处理的软弱地基处理技术。依据竖向增强形式的不同,桩体复合地基有三种形式:柔性桩复合地基、刚性桩复合地基和散体材料复合地基(图1)。

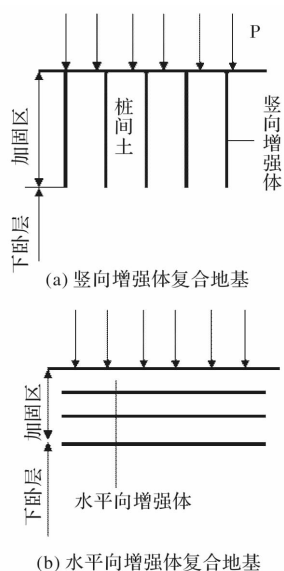


图1 复合地基的基本分类图

Fig. 1 Basic classification chart of composite foundation

依据增强体方向的不同,复合地基可以分为水平向增强体复合地基和竖向增强体复合地基两种(图2)。

### 1.2 长短桩复合地基

长短桩复合地基逐渐应用至房屋建筑的地基处理过程,是一种新兴的地基处理技术。依据长

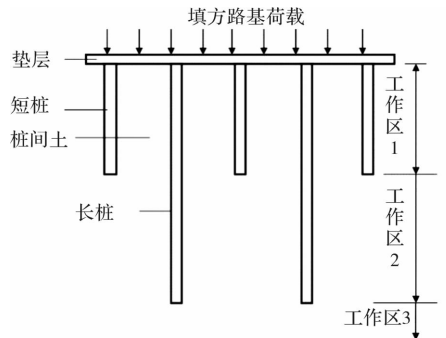


图2 复合地基示意图

Fig. 2 Schematic diagram of composite foundation

桩与短桩的布置,长短桩复合地基对地基土体的加固区域可划分为三个区域(图3):在工作区1中,长桩和短桩协同工作来增加地基承载能力;工作区2主要由长桩起作用,目的为降低沉降变形量;工作区3无长短桩加固的区域,承受上部结构与土体的荷载。三个区域协同工作形成了长短桩复合地基。

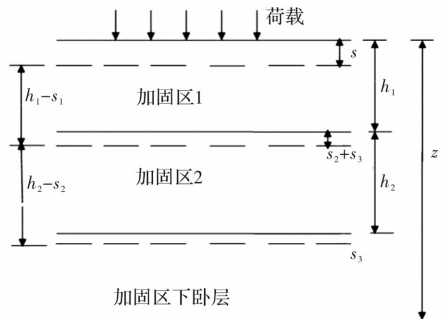


图3 长短桩复合地基工作区示意图

Fig. 3 A sketch map of the working area of long and short pile composite foundation

长短桩复合地基中的长桩能够有效增强地基土体承载能力,并减小沉降。长桩利用桩体将上部结构的荷载传递到更深部的地层,降低了上部土层的压缩量,还能够保护低刚度的短桩,与短桩形成的共同作用还能够有效降低地基土体的竖向变形。对于工作区1,桩体间具有一定的“挟持”与“遮挡”效应;对于工作区2,因为长桩和土体之间无法协同变形,因而桩尖对桩端土体会存在一些的刺入作用。

长短桩复合地基中的短桩能够有效增加地基承载力,降低不均匀沉降。此外长桩和短桩相结合,能够将上部结构的荷载分布与工作区2与工作区3的底端土体,从而充分发挥地层土体的承载能力。在增加地基承载力与减小沉降变形的基础上,提高了工程的经济性。

在长短桩复合地基中褥垫层是另外一个最为

重要的组成部分.褥垫层在长短桩复合地基中对受力特性与变形特性有较大影响.复合地基受荷变形时桩间土是最先承受荷载的部分,然后由短桩承担过量的荷载,在其过程中褥垫层起到了调节受力协同变形的作用.褥垫层的存在能够更好的对地基沉降变形进行控制.

尽管长短桩复合地基可以有效加固地基土体并降低沉降变形,但并不能完全消除由地基沉降引起的工程缺陷的产生.沉降变形尤其是差异沉降是高速公路缺陷例如桥头跳车的产生原因.采用长短桩复合地基进行地基处理的主要目的不仅是要减少绝对沉降,同时还有减少差异沉降的功能.因此,在地基设计与施工过程中,长短桩复合地基的沉降理论计算十分重要.尤其是当长短桩复合地基以沉降量作为设计与施工指标时,沉降计算在设计中的地位更为重要.但是,现有的长短桩复合地基沉降计算理论研究较少,相应的计算能力远低于复合地基承载力的理论计算,难以满足实际工程设计中的理论计算应用需求.

## 2 传统长短桩复合地基沉降计算方法

在长短桩复合地基沉降计算中通常假定长短桩复合地基总沉降量 $s$ 由三部分组成:(1)加固区1变形 $s_1$ 、加固区2变形 $s_2$ 和加固区下卧层压缩量 $s_3$ (图4).图4中 $z$ 是荷载作用有效深度内的土层总厚度, $h_1$ 是复合地基加固区1的厚度, $h_2$ 是加固区2的厚度.

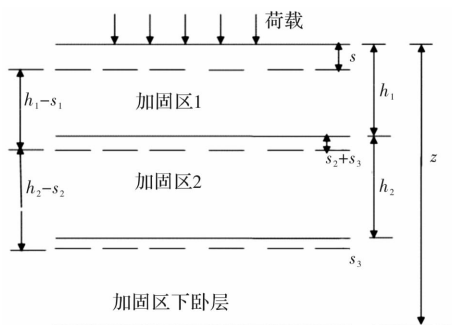


图4 长短桩复合地基沉降计算简图

Fig. 4 Settlement calculation of long short pile composite foundation

在进行复合地基沉降计算的过程中,通常把总沉降量划分为加固区变形和下卧层变形两部分:

### (1) 加固区

计算加固区变形的的方法主要有复合模量法、应力修正法与桩身压缩量法:

#### 1) 复合模量法:以等应变条件为前提,该方

法把加固区1与加固区2假定为复合材料,通过计算复合压缩模量结合分层总和法来进行加固区变形的计算;

2) 应力修正法:该方法忽略长短桩对土体压缩模量的影响,依据加固区桩间土所承受的荷载大小以及压缩模量大小,通过分层总和法分别得出加固区1与加固区2的变形量;

3) 桩身压缩量法:此方法通过计算桩体变形与桩体刺入土层的量来获得整体变形.其中桩身变形通过桩顶荷载与桩的变形参数计算得出.

### (2) 加固区下卧层

计算下卧层受力变形的的方法有:压力扩散法、等效实体法、改进的Geddes法与有限元法,其中压力扩散法与等效实体法最为常用:

1) 压力扩散法:此方法把长短桩复合地基中的加固区1与加固区2当做整体.把地基上部荷载简化为均布荷载,同时假设加固区应力扩散角,将变形计算转化为平面应变问题通过求解平面应变问题方程获得变形量的计算值;

2) 等效实体法:此方法同样将长短桩复合地基加固区1与加固区2当做整体,假定作用在复合地基下卧层顶面荷载的作用面与作用在复合地基表面的相同,将桩侧土体等效简化为摩阻力<sup>[4-5]</sup>.

## 3 联合应力法求解长短桩复合地基沉降

基于长短桩复合地基的应力应变特性通过公式推导将明德林解与布辛奈斯克解相结合用于路基沉降值的理论计算,通过算出竖向附加应力,从而得出地基的沉降量.方法将加固区桩与土体分别计算,通过明德林解得出桩端阻力和桩侧摩阻力引起的地基竖向附加应力,然后通过布辛奈斯克解计算桩间土均布荷载引起的附加应力,最后将计算所得的两个竖向附加应力叠加.如式(1)所示<sup>[6-9]</sup>:

$$\sigma_z = \sigma_s + \sigma_p = \sigma_s + \sigma_b + \sigma_c \quad (1)$$

式(1)中 $\sigma_s$ 为布辛奈斯克解求得的桩间土表面荷载引起的竖向附加应力; $\sigma_p$ 为桩身荷载在复合地基土体中产生的竖向附加应力; $\sigma_b$ 和 $\sigma_c$ 分别为桩端阻力与桩侧阻力引起的竖向附加应力.

### 3.1 桩间土表面荷载产生的附加应力

把桩间土上的均布荷载 $q_s$ 转换成集中荷载 $F_s$ ,作用在均布荷载中心位置.然后通过布辛奈斯克解(式(2)-(4))计算 $F_s$ 在地基土中任一点引起的附加应力 $\sigma_s$ :

$$\sigma_s = \frac{3 F_s}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{R^5} = \alpha \frac{F_s}{z^2} \quad (2)$$

$$F_s = q_s \cdot A_s \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{\left[\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (4)$$

式中  $\alpha$  为集中荷载地基竖向应力系数;  $A_s$  为桩间土面积; 其中  $r$  与  $R$  通过下式计算<sup>[10]</sup>:

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$$

$$R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}$$

### 3.2 桩身荷载产生的附加应力

#### (1) 桩端阻力引起的附加应力 $\sigma_b$

采用明德林解来计算桩端阻力在桩端下地基内任一点引起的竖向附加应力, 如下式所示:

$$\begin{aligned} \sigma_b = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{p_b}{8\pi(1-\mu)} \left[ -\frac{(1-2\mu)}{R_1^3} + \right. \\ & \frac{(1-2\mu)(z-L)}{R_2^3} - \frac{3(z-L)^3}{R_1^5} - \\ & \frac{3(3-4\mu)z(z+L)^2}{R_2^5} + \\ & \left. \frac{3L(z+L)(5z+L)^3}{R_2^7} - \frac{30zL(z+L)^3}{R_2^7} \right] \quad (5) \end{aligned}$$

式(5)中  $p_b$  为桩端阻力;  $m$ 、 $n$  为长(短)桩在水平面两个方向的根数;  $L$  为长(短)桩长;  $\mu$  为土体泊松比;

$$R_1 = \sqrt{(x_{ij} - x_0)^2 + (y_{ij} - y_0)^2 + (z-L)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{(x_{ij} - x_0)^2 + (y_{ij} - y_0)^2 + (z+L)^2}$$

$(x_{ij}, y_{ij})$  为桩端中心水平面坐标

#### (2) 桩侧摩阻力引起的竖向附加应力 $\sigma_c$

在采用明德林解计算桩端与桩侧摩阻力引起的竖向附加应力时, 首先应确定荷载分布形式. 荷载的分布形式和地基土层的构成对于计算结果有较大的影响. 桩侧摩阻力的分布可以通过应力分布进行估计(图5).

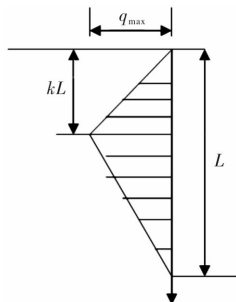


图5 复合地基中桩侧摩阻力简化示意图

Fig.5 Simplified sketch map of pile side friction in composite foundation

从图5能够看出, 桩顶位置摩阻力值很小, 事

实上实际情况下有可能出现负值, 因此计算过程中近似为0, 桩侧摩阻力于桩身中间靠上位置达到峰值, 峰值往下逐渐线性降低, 到达桩底时摩阻力的值约为0. 将图5所示分布假设成填方路基受荷时的单桩桩侧摩阻力分布形式. 桩侧摩阻力于 $kL$ 深度达到最大, 在桩底变为0. 设峰值摩阻力为 $q_{\max}$ , 根据力学平衡条件得:

$$2\pi r_0 \frac{q_{\max} L}{2} = p_p \quad (6)$$

则 $q_{\max}$ 可由下式表示:

$$q_{\max} = \frac{p_p}{\pi r_0 L} \quad (7)$$

其中 $p_p$ 为桩顶荷载,  $r_0$ 为桩体半径, 假定填方路基荷载为 $P$ , 桩土应力承担比为 $n$ , 则:

$$\frac{nP}{n+1} = \frac{p_p}{A} = \frac{p_p}{\pi r_0^2} \quad (8)$$

由式(7)~(8)可以得到:

$$q_{\max} = \frac{npr_0}{(n+1)L} \quad (9)$$

桩侧摩阻力于复合地基内部任一点产生的附加应力, 可按以下两个步骤计算:

#### (1) 计算 $kL$ 处的摩阻力 $\sigma_{c1}$ ;

(2) 计算 $kL$ 到桩底上的摩阻力 $\sigma_{c2}$ . 则桩侧摩阻力在复合地基内部任一点引起的附加应力能够用下式表示:

$$\sigma_c = \sigma_{c1} + \sigma_{c2} \quad (10)$$

假设桩顶至 $kL$ 位置的摩阻力为线性变化, 最大摩阻力为 $q_{\max}$ 时, 则在桩顶至桩体 $kL$ 这一区段任一深度 $x$ 处的摩阻力为:

$$q_1 = \frac{q_{\max} x}{kL} \quad (11)$$

假定桩体 $kL$ 至桩底上的摩阻力也为线性分布, 则桩体 $kL$ 至桩底任一深度 $x$ 处的桩侧摩阻力可由下式表示:

$$q_2 = \frac{q_{\max} (L-x)}{(1-k)L} \quad (12)$$

所以在桩体区段内深度 $x$ 处的微元段上的集中力为:

$$\left. \begin{aligned} & \text{当 } 0 \leq x < kL \text{ 时,} \\ & dP_1(x) = \frac{2\pi r_0 q_{\max} x}{kL} dx \\ & \text{当 } kL \leq x < (1-k)L \text{ 时,} \\ & dP_2(x) = \frac{2\pi r_0 q_{\max} (L-x)}{(1-k)L} dx \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

依据明德林解, 复合地基内任一点的竖向附加应力可由下式得出<sup>[11-12]</sup>:

$$\sigma_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \int_0^L \left\{ \frac{dp(x)}{8\pi(1-\mu)} \right. \\ \left[ -\frac{(1-2\mu)(z-x)}{R_1^3} + \frac{(1-2\mu)(z-x)}{R_2^3} - \right. \\ \left. \frac{3(z-x)^3}{R_1^5} - \frac{3(3-4\mu)z(z+x)^2}{R_2^5} \right. \\ \left. + \frac{3x(z+x)(5z-x)^3}{R_2^5} - \frac{30zx(z+x)^3}{R_2^7} \right] \Big\} \\ (14)$$

式中:

$$R_1 = \sqrt{(x_{ij} - x_0)^2 + (y_{ij} - y_0)^2 + (z - x)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{(x_{ij} - x_0)^2 + (y_{ij} - y_0)^2 + (z + x)^2}$$

$(x_{ij}, y_{ij})$ 为桩中心于水平面上的坐标; $(x_0, y_0, z)$ 为计算点的坐标。

### 3.3 长短桩复合地基沉降计算深度的确定

根据《建筑地基基础设计规范》,地基沉降计算深度 $z_n$ 需满足式(15)<sup>[13]</sup>:

$$\Delta S'_n \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta S'_i \quad (15)$$

式中 $\Delta S'_n$ 为在由计算深度 $z_n$ 向上取厚度为 $\Delta z$ 的土层计算变形值, $\Delta z$ 按表1确定; $\Delta S'_i$ 为在计算深度 $z_n$ 范围内,第 $i$ 层土的计算变形值。

表1  $\Delta z$ 的取值

Tab. 1 The value of  $\Delta z$

$b(\text{m})$	$B \leq 2$	$2 < b \leq 4$	$4 < b \leq 8$	$8 < b$
$\Delta z(\text{m})$	0.3	0.6	0.8	1.0

当无相邻荷载的影响,基础宽度 $b$ 在1~30m范围内时,路基中线上的点的沉降计算深度可按式简化计算:

$$z_n = b(2.5 - 0.4 \ln b) \quad (16)$$

### 3.4 长短桩复合地基的沉降计算

基于3.1~3.2的分析,利用明德林解和布辛奈斯克解联合计算长短桩复合地基加固区与下卧层中的附加应力,然后通过《规范》法进行填方路基长短桩复合地基的沉降量计算<sup>[14-15]</sup>:

$$s = \varphi_s s' = \varphi_s \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) \quad (17)$$

式中 $s(\text{mm})$ 为复合地基总沉降量; $\varphi_s$ 为沉降计算经验系数,依照经验与区域资料确定,经验取值见表2; $s'(\text{mm})$ 为通过分层总和法得出的地基变形值; $\sigma_{zi}$ 为按联合求解法计算出的复合地基中第 $i$ 层顶面的竖向附加应力(KPa); $E_{si}$ 为路基底面第 $i$ 层土的压缩模量(MPa); $z_{i-1}, z_i$ 为路基底面至第 $i-1$ 层土、第 $i$ 层土底面的距离(m); $\alpha_{i-1}, \alpha_i$ 为路基底面至第 $i-1$ 层土、第 $i$ 层土底面范围内平均附加应力系数。

表2 沉降计算经验系数 $\varphi_s$

Tab. 2 Empirical coefficient  $\varphi_s$  of settlement calculation

各层顶面 附加应力	压缩模量当量				
	2.5	4.0	7.0	15.0	20.0
$\sigma_{zi} \geq f_{ak}$	1.4	1.3	1.0	0.4	0.2
$\sigma_{zi} \geq 0.75 f_{ak}$	1.1	1.0	0.7	0.4	0.2

### 3.5 长短桩复合地基沉降计算的影响因素

(1)模型的不确定性.土体是一种高度非线性弹塑性材料,尚未有能够准确描述其力学特性的通用本构模型.尽管现有的各类本构关系很多,但均不能准确地反映土体的受力变形特性。

(2)计算参数的不确定性.土体的计算参数能够由室内实验、现场实验或经验进行取值.但土体是空间离散性很强的材料,难以以单一的材料参数准确描述其物理力学特性。

(3)荷载的不确定性.对于高速公路而言,涉及到的荷载主要有填方路基自重与交通荷载.路基在填筑施工中施工方式和施工速度不同,其沉降就不同;对于交通荷载造成复合地基的沉降,目前也没有十分可靠的方法。

(4)尺寸效应。

(5)初始条件和边界条件的不确定性。

## 4 结论

(1)基于对国内外大量文献的阅读,对目前传统的长短桩复合地基沉降计算方法进行了汇总分析,比较了各个计算方法的优缺点和适用范围.该类方法在现阶段长短桩复合地基沉降计算应用中都存在一定的不足,低于复合地基承载力的计算水平,也落后于实际工程运用的需要。

(2)充分了解了柔性基础下长短桩复合地基的研究现状,经过理论分析和数值模拟,推导了联合明德林解和布辛奈斯克解计算复合地基沉降的方法,并分析了填方路基下长短桩复合地基沉降计算的影响因素.为实际工程中长短桩复合地基沉降计算的精确性提供了一个理论依据。

## 参考文献 References

- [1] 鲁绪文.路堤荷载下长短桩复合地基加固深厚软土路基的试验与研究[D].南京:南京水利科学研究院,2007.  
LU Xuwen. Experiment and study on reinforcement of deep soft soil subgrade under embankment load[D]. Nanjing: Nanjing Institute of water science, 2007.
- [2] 龚晓南.复合地基理论及工程应用[M].北京:中国建筑

- 筑工业出版社,2002.
- GONG Xiaonan. Theory and engineering application of composite foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [3] 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 Minghua, ZHANG Ling, LI Lixin, 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.
- [4] MINDLIN R. D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid [J]. Physics, 1936, 7(5): 195-202.
- [5] 王士杰,张梅,张吉占. 对明德林解求地基附加应力的进一步探讨[C]//中国土木工程会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京:万国学术出版社,1999,247- 250.
- WANG Shijie, ZHANG Mei, ZHANG Jichan. Calculating the vertical additional stress in soil by using Mindlin' s formula [C]//Proceedings of the Eighth China Civil Engineering Society' s Eighth Conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Beijing: International Academic Publishers, 1999, 247-250.
- [6] 汤连生,张庆华,廖化荣. 公路软基工后沉降研究进展[J]. 岩土力学与工程学报,2006,25(增2):3449-3454.
- ZHANG Qinghua, TANG Liansheng, LIAO Huarong. Advance in Post-Construction Settlement of Soft Subgrade Soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25 (S2): 3449-3454.
- [7] 高庆丰. 软土地基路堤工后沉降计算与预测[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- GAO Qingfeng. Calculation and prediction of Settlement after-construction for Embankment in soft clay [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [8] 李海芳. 路堤荷载下复合地基沉降计算方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- LI Haifang. Study of computation method of composite foundation under embankment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [8] 赵明华,张玲,杨明辉. 基于剪切位移法的长短桩复合地基沉降计算[J]. 岩土工程学报,2005,27(9): 994-998.
- ZHAO Minghua, ZHANG Ling, YANG Minghui. Settlement calculation of the long-short-pile composite foundation with shear displacement method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27 (9): 994-998.
- [9] 王士革. 填方路基下长短桩复合地基沉降特性研究[D]. 郑州:郑州大学,2010.
- WANG Shige. Research on the Settlement Characteristics of Composite Foundation with Long-short Piles under Fill Subgrade[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [10] 魏焕卫,宋丰波,杨敏,等. 基于明德林解的土钉内力计算方法[J]. 岩土力学,2011,32(S1):6-14+32.
- WEI Huanwei, SONG Fengbo, YANG Min, et al. Calculation method of inner force of soil nailing based on Mindlin solution [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (S1): 6-14+32.
- [11] 陈甦. 均质地基中的桩基础沉降计算[J]. 岩土力学,1996,(1):61-70.
- CHEN Su. Calculation of total settlement of pile foundation in homogeneous subsoil [J]. Rock and Soil Mechanics, 1996(1):61-70.
- [12] 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范:GB 50007-2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社.
- Chinese Academy of Building Research. Code for design of building foundation: GB 50007-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press.
- [13] 杨光华,李俊,贾恺,等. 改进的地基沉降计算的工程方法[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S2): 4229-4234.
- YANG Guanghua, LI Jun, et al. Improved settlement calculation method for engineering practice [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(S2):4229-4234.
- [14] 侯亚玲,巨玉文,王文正,等. 黄土填料高填方路堤沉降计算方法及填料压缩特性研究[J]. 施工技术,2016,45(17): 87-91.
- HOU Yaling, JU Yuwen, WANG Wenzheng, et al. Study on settlement calculation method and packing compression feature of high fill embankment with loess filler [J]. Construction Technology, 2016, 45(17): 87-91.

(编辑 吴海西)