

考虑土体非线性特性的散体材料桩 复合地基沉降计算

张学飞¹, 刘聪², 李全军¹, 金丹丹², 李传勋²

(1. 江苏省地矿局第三地质大队, 江苏 镇江 212111; 2. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 225009)

摘要: 散体材料桩具有良好的加固效果且造价相对较低, 被广泛应用于工程中的软弱地基加固处理。散体材料桩复合地基的沉降计算是复合地基设计的重要内容之一, 然而目前规范中采用的应力修正法和复合模量法均未能考虑土体的非线性压缩特性, 即认为土体的压缩模量 E_s 为常数, 然后应用分层总和法开展复合地基的沉降计算, 由此导致计算的复合地基沉降量往往大于实测值。事实上, 土体具有典型的非线性压缩特性, 其压缩模量往往与作用土体的应力密切相关。鉴于此, 本文首先阐述了土体的非线性压缩特性, 引入经典 $e-\lg\sigma'$ 非线性关系, 推导建立土体压缩模量 E_s 随不同深度处有效应力变化的规律, 进而对规范中的应力修正法和复合模量法进行改进, 并通过分层总和法完成复合地基的沉降计算, 最终获得考虑土体非线性压缩特性的散体材料桩复合地基沉降计算公式。最后, 应用不同沉降计算方法对室内模型试验和某实际工程展开分析, 将改进后的沉降计算方法与规范方法及实测值开展对比分析, 结果表明, 本文提出的考虑土体非线性特性的复合地基沉降计算方法计算结果更接近于实际工程实测值。

关键词: 复合地基; 沉降计算; 复合模量法; 应力修正法; 非线性压缩

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2021)05-0361-07

Settlement calculation of composite foundation with granular material pile considering nonlinear compressibility of soil

ZHANG Xue-fei¹, LIU Cong², LI Quan-jun¹, JIN Dan-dan², LI Chuan-xun²

(1. Third Geological Team of Jiangsu Geology and Mineral Bureau, Zhenjiang 212111, Jiangsu, China;

2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 225009, Jiangsu, China)

Abstract: Granular material pile is widely used in the reinforcement of soft foundation in engineering because of its good reinforcement effect and relatively low cost. The settlement calculation of composite foundation with granular material pile is one of the important contents of composite foundation design. However, both the stress correction method and composite modulus method adopted in the current code for foundation design fail to consider the nonlinear compression characteristics of soil. This implies that the compression modulus E_s of soil is considered as a constant, and then the layered summation method is used to calculate the settlement of composite foundation, which leads to the calculated settlement of composite foundation is often greater than the measured value. In fact, soil has typical nonlinear compression characteristics, and its compression modulus is often closely related to the stress acting on the soil. In view of this, the nonlinear compression characteristics of soil are described, and the classical $e-\lg\sigma'$ nonlinear relation is taken to deduce the law of soil compression modulus E_s changing with the effective stress at different depths. Furthermore, the stress correction method and composite modulus method adopted in the code are improved. Finally, a formula for calculating the settlement of composite foundation with granular material piles considering the nonlinear compression characteristics of soil is obtained by using the improved method. Besides, comparisons are made among results of the indoor model tests, actual engineering data and theoretical calculation values by different settlement calculation methods. The results show that the improved settlement calculation method used in this paper presents a better agreement with the measured values than

that of the results from the code methods.

Key words: composite foundation; settlement calculation; composite modulus method; stress correction method; nonlinear compression

0 引言

散体材料桩由于造价相对较低、处理效果显著等优势广泛应用于软基处理,以减小软基的沉降变形及增强软土地基的稳定性。因此,散体材料桩复合地基的沉降计算是设计计算的主要内容。目前规范中对散体材料桩复合地基主要采用应力修正法和复合模量法开展沉降计算。

应力修正法是通过应力修正系数计算得到桩间土体承担的应力,进而可通过传统分层总和法计算得到复合地基的沉降值。该方法的成败主要取决于应力修正系数 μ_s 的选取。应力修正系数 μ_s 与很多因素有关,因此想要得到精确的 μ_s 是比较困难的,基于对该问题的认识,刘吉福^[1]给出考虑上部填土厚度及弹性模量等因素的桩土应力比表达式。池跃君等^[2]研究外荷载作用下的刚性桩复合地基桩体、桩间土体承载力特性,对比分析不同因素对桩土应力比的影响。饶为国和赵成刚^[3]推导了考虑置换率、路堤荷载、网的刚度等因素的桩土应力比表达式。以上研究可发现目前对应力修正法的研究大多集中在桩土应力比方面的研究,但需注意的是,即使得到相对合理的应力修正系数,目前规范中的应力修正法仍然不能考虑土体的非线性压缩特性。

复合模量法是目前工程中应用最多且与工程实际结果符合度较好的一种方法,该方法的精确性取决于复合模量的确定。规范中给出的复合模量确定方法是对桩体压缩模量、桩间土体压缩模量按照一定比例复合,但该方法并不能真实反映复合土层复合模量的变化^[4]。鉴于此,王凤池等^[5]给出考虑桩长、桩端土性质等因素的修正复合模量表达式。郑俊杰等^[6]将参变量变分原理应用到复合模量的求解中,给出复合模量在不同状态下的解析解,该解析解还考虑外荷载对复合模量的影响。章定文和刘松玉^[7]利用分层总和法计算思路对复合模量进行反算,并引入修正系数 α 对反算的复合模量进行改进。朱奎等^[8]基于剪切位移法及基本假定,给出考虑桩长、桩体模量、桩周土体模量等参数影响的复合模量解析解。以上对复合模量法的研究中,大多认为土体的压缩模量为常数,仍然不能考虑土体具有的典型非线性压缩特性。

事实上,不同深度处土体的有效应力是不一样

的,即土体有效应力随着深度的变化而变化,这势必导致土体的压缩模量也在不断变化。因此,有必要在沉降计算中考虑土体的非线性压缩特性。正是基于以上认识,盛崇文^[9]根据实际工程的大型载荷试验来确定桩体和桩间土体的压缩模量,进一步提高了碎石桩复合地基沉降计算的可靠性。姜前^[10]对载荷试验数据拟合分析得到桩体、桩周土体应力-应变曲线关系,利用应力-应变曲线关系来求解压缩模量,进一步表明用载荷试验确定压缩模量的可行性。杨光华^[11]深入分析载荷试验得到的应力-应变曲线关系,给出考虑应力水平的切线模量表达式,通过该表达式得到的切线模量反映土体的非线性特点,计算结果更加接近工程实测值。在实际工程中对复合地基进行大型载荷试验的费用较高,一般情况下并不能给出其 $p-s$ 曲线。针对这一问题,邓文龙等^[12]通过土体侧限压缩试验曲线,对比分析不同深度处土体压缩模量 E_s 的变化规律,针对这一变化规律给出考虑深度影响的压缩模量表达式,但该表达式未考虑应力历史变化对压缩模量的影响。梅国雄等^[13]将 $e-p$ 曲线和 $e-\lg p$ 曲线的函数关系应用到土体压缩模量求解中,建立了压缩模量与应力之间的函数关系式,然而该函数关系式为需要进行分段考虑,不便于实际应用。郑俊杰等^[14]将参变量最小势能原理引入莫尔-库伦屈服准则中,建立弹性状态下、塑性状态下土体变形模量与压缩模量之间的换算关系,通过该关系式计算得到的压缩模量仍为一个常数。周翠英等^[15]对试验结果拟合分析,给出不同状态下淤泥质土在外荷载作用下的压缩模量随压力变化关系。陈福江等^[16]对现场采集到的试验数据和实测结果对比分析,给出反应深度变化的土体压缩模量计算方法,由于试验数据缺乏,尚需进一步的深入研究。

以上诸多研究表明天然地基沉降计算中考虑土体的非线性压缩特性已经取得诸多进展。但目前对于散体材料桩复合地基的沉降计算中还鲜见考虑土体非线性压缩特性的计算方法。本文利用经典 $e-\lg \sigma'$ (e 为孔隙比, σ' 为有效应力)非线性压缩关系,建立土体压缩模量 E_s 随有效应力的变化关系,然后基于考虑非线性压缩特性的压缩模量表达式对规范中的应力修正法和复合模量法进行改进,并通过分层总和法完成散体材料桩复合地基的沉降计算。

1 土体的非线性压缩特性

侧限条件下土体压缩特性可通过孔隙比 e 和有效应力 σ' 关系曲线描述,如图1所示。取曲线上任意两点连成直线的斜率作为土在侧限条件下的压缩系数 a ,表达式为^[17]:

$$a = -\frac{de}{d\sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\sigma'_2 - \sigma'_1} \quad (1)$$

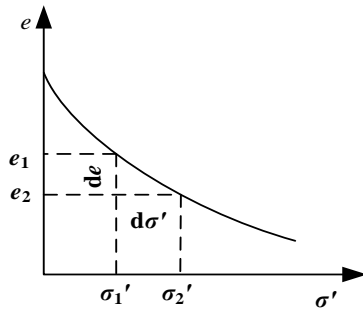


图1 $e-\sigma'$ 坐标系中土的压缩曲线

Fig. 1 Compression curve of soil in $e-\sigma'$ coordinate system

式中: e_1 为 $e-\sigma'$ 曲线与有效应力 σ'_1 对应的孔隙比; e_2 为 $e-\sigma'$ 曲线与有效应力 σ'_2 对应的孔隙比。

由图1可知土体的压缩系数 a 随有效应力 σ' 增加而减小,有效应力 σ' 越大,曲线的割线斜率越小,进一步反映出土体压缩性变小。为进一步说明这种压缩特性,将 $e-\sigma'$ 关系曲线转换为 $\sigma'-\varepsilon$ 关系曲线。某级有效应力下的侧限压缩模量 E_s 等于 $\sigma'-\varepsilon$ 曲线在该点的斜率,可表达为^[17]:

$$E_s = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)并考虑 $d\varepsilon = de/(1+e_0)$,可得土体压缩模量与压缩系数之间的关系为^[17]:

$$E_s = \frac{1+e_0}{a} \quad (3)$$

式中: a 为压缩系数; e_0 为初始孔隙比。

事实上,诸多试验结果^[18-21]表明 $e-\lg\sigma'$ 关系曲线在 $e-\lg\sigma'$ 坐标系中将呈现为直线,如图2所示:

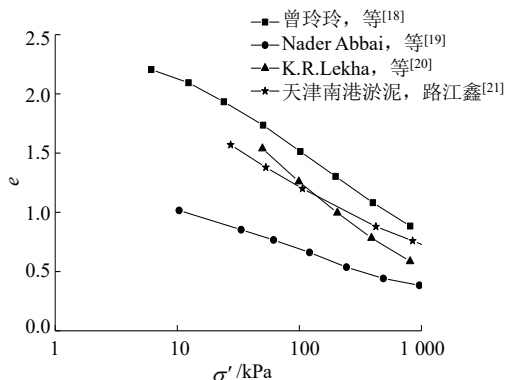


图2 $e-\lg\sigma'$ 曲线

Fig. 2 $e-\lg\sigma'$ curves

天然地基往往成层分布,每层土体的非线性关系可表达为:

$$e_i - e_{0i} = c_{ci} \lg(\sigma'_0 / \sigma'_i) \quad (4)$$

式中: e_i 为第 i 层土的孔隙比; e_{0i} 为第 i 层土 $e-\lg\sigma'$ 曲线与 σ'_0 相对应的初始孔隙比; c_{ci} 为第 i 层土的压缩指数; σ'_0 为初始有效应力; σ'_i 为第 i 层土的有效应力。

式(4)中由 e 对 σ' 求偏导可得:

$$a = -\frac{de_i}{d\sigma'_i} = \frac{c_{ci}}{\sigma'_i \ln 10} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),得到第 i 层土压缩模量 E_{si} 与第 i 层土有效应力 σ'_i 之间关系为:

$$E_{si} = \frac{1+e_{0i}}{a} = -(1+e_{0i}) \frac{d\sigma'_i}{de_i} = \frac{(1+e_{0i}) \ln 10 \sigma'_i}{c_{ci}} \quad (6)$$

式中: $\sigma'_i = \bar{\sigma}_{szi} + \bar{\sigma}_{zi}$; $\bar{\sigma}_{szi}$ 为第 i 层土有效自重应力平均值; $\bar{\sigma}_{zi}$ 为第 i 层土附加应力平均值。

式(6)为考虑非线性压缩特性的土体压缩模量 E_{si} 的表达式,从该表达式可以明显看出有效应力的改变会导致土体压缩模量也发生改变,更加真实反映土体的非线性压缩特性。

2 考虑土体非线性的应力修正法

规范中给出的应力修正法只考虑桩间土体的压缩变形,采用土体压缩模量按照分层总和法完成沉降计算。

规范中复合地基的总沉降 S 可应用应力修正法^[4]按照下式开展计算:

$$S = \mu_s \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_i}{E_{si}} H_i \quad (7)$$

式中: μ_s 为应力修正系数, $\mu_s = 1/\sqrt{1+m(n-1)}$; $\Delta\sigma'_i$ 为第 i 层复合土层上附加应力增量, $\Delta\sigma'_i = \bar{\sigma}_{zi}$; E_{si} 为基础底部第 i 层桩间土的压缩模量; H_i 为第 i 层复合土层的厚度; n 为桩土应力比; m 为面积置换率。

式(7)在计算过程中将桩间土体的压缩模量当作常数,这势必对计算结果带来偏差。因此,为了更好地反映有效应力与压缩模量之间的非线性关系,对规范中应力修正法中的土体压缩模量按照公式(6)做相应改进,应用改进后的应力修正法并通过分层总和进行复合地基沉降计算的表达式为:

$$S = \mu_s \sum_{i=1}^n \frac{c_{ci} \Delta\sigma'_i}{(1+e_{0i}) \ln 10 \sigma'_i} H_i \quad (8)$$

3 考虑非线性特性的复合模量法

相较于应力修正法,规范中的复合模量法同时

考虑桩体、桩周土体的压缩变形。其计算过程中对桩体压缩模量、桩周土体压缩模量按照一定比例确定出每层土体的复合模量，再利用得到的复合模量并结合分层总和法完成复合地基的沉降计算。

规范中应用复合模量法开展复合地基沉降计算的公式为^[4]：

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_i H_i}{E_{spi}} \quad (9)$$

式中： S 为复合地基的总沉降； $\Delta\sigma'_i$ 为第*i*层土的附加应力； E_{spi} 为第*i*层复合土层的复合模量； H_i 为第*i*层土的厚度。

复合地基复合土层压缩模量 E_{spi} 可通过桩体置换率计算得到，表达式为：

$$E_{spi} = mE_p + (1-m)E_{si} \quad (10)$$

式中： E_p 为桩体的压缩模量； E_{si} 为第*i*层土体的压缩模量； m 为桩体置换率。

从式(10)可看出复合模量 E_{spi} 仅与3个参数有关，并不能反映土体所具有的典型非线性压缩特性，也无法反映复合模量随有效应力变化而发生的真实改变。

由式(6)并结合式(10)，给出考虑置换率 m 、有效应力 σ'_i 等影响的复合模量 E_{spi} 表达式：

$$E_{spi} = mE_p + (1-m) \frac{(1+e_{oi}) \ln 10 \sigma'_i}{c_{ci}} \quad (11)$$

对公式(11)拟合分析，给出置换率分别为0.125、0.25、0.5时复合模量与有效应力间的变化关系，如图3所示：

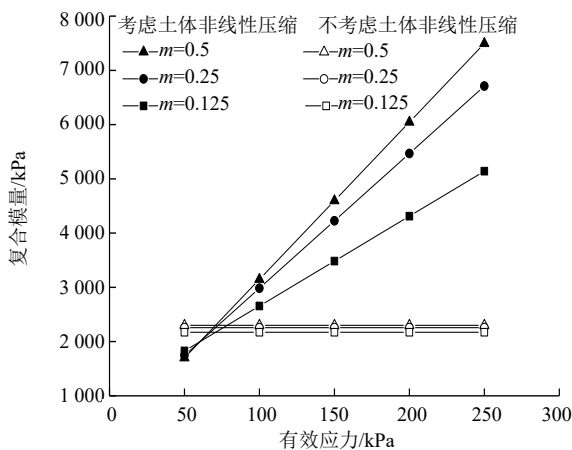


图3 有效应力与复合模量的变化关系
Fig. 3 Relationship between effective stress and composite modulus

从图3可以明显看出考虑土体非线性压缩特性对复合模量的取值有很大影响，而规范中给出的计算复合模量方法没有考虑土体非线性压缩特性，通

过该方法得到的复合模量始终是一个定值。

最后将式(11)代入式(9)，得到考虑土体非线性压缩特性的复合模量法通过分层总和计算沉降的表达式为：

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_i}{mE_p + (1-m) \frac{(1+e_{oi}) \ln 10 \sigma'_i}{c_{ci}}} H_i \quad (12)$$

4 案例计算

4.1 室内模型试验

采用文献[22]中模型试验进一步验证本文所提出的计算方法。对传统砂桩复合地基开展分级静力加载试验，砂桩桩长600 mm，桩体直径89 mm，置换率 $m=8.8\%$ ，桩体压缩模量 $E_p=21$ MPa，试验土体为软黏土，液限含水率42.76%，塑性含水率21.61%，不排水抗剪强度 $c_u=22.25$ kPa，压缩指数 $c_c=2.528$ ，初始孔隙比 $e_0=2$ ，土体压缩模量 $E_s=0.73$ MPa，黏聚力 $c_s=6.04$ ，摩擦角 $\phi_s=7.1^\circ$ 。由于模型试验给出的数据不完整，故只对考虑土体非线性压缩特性的复合模量法与规范中的复合模量法及试验值对比分析，结果如图4所示。

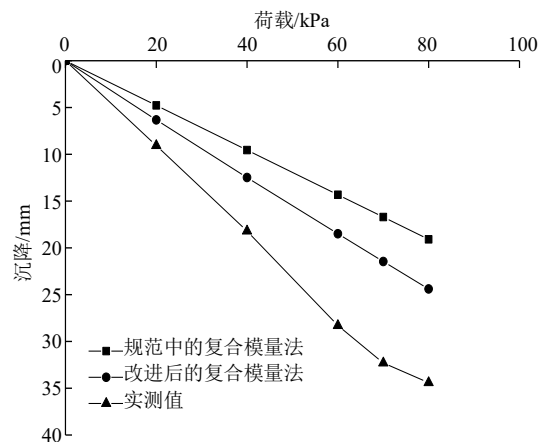


图4 静载试验荷载-沉降关系曲线
Fig. 4 Load-settlement relation curves of static load test

由图4可以看出，规范中的复合模量法与试验值偏差大，而考虑土体非线性压缩特性的复合模量法计算结果与试验值接近，进一步表明本文计算方法具有一定的可靠性。

4.2 实际工程案例

采用文献[23]中工程案例来验证本文所提出的计算方法。测试场区是一个堆料场(约0.5 km²)，用于存放钢板生产所用的原矿和煤矿。拟采用压实碎石柱来加固地基，减少地基沉降。碎石桩长11 m，

直径0.8 m, 中心间距2 m, 正方形布桩, 置换率 $m=0.125$, 桩土应力比 $n=2$, 桩体压缩模量 $E_p=2 \text{ MPa}$ 。上部填土高度5.3 m, 地基土层自地面以下分为: ①砂层, 厚度2 m; ②软黏土I, 厚度2 m; ③软至中硬黏土, 厚度3 m; ④软黏土III, 厚度3 m, 其中, 砂层当作工作平台, 便于施工设备的进入。堆料场下部土层的剖面图如图5所示, 各土层计算参数如表1所示。

采用以上方法计算散体材料桩复合地基的沉降并与规范中给出的方法进行对比, 结果如表2所示。

由表2计算结果可知, 采用规范中的复合模量法得到的计算结果与工程实测值偏差最大, 偏差可达到171.06 mm, 偏差率达到33.16%, 而改进后的应力修正法与实测值偏差4.86 mm, 偏差率0.94%, 改进后的复合模量法与实测值偏差22.78 mm, 偏差率4.42%。产生以上差异的原因是规范给出的散体材料桩复合地基沉降计算方法未考虑土体非线性压缩特性。此外, 由前文论述可知, 土体的侧限压缩模量与有效应力存在函数关系, 即随着土层深度增

加, 有效应力在不断变化, 土体压缩模量不再是一个常数。本文提出的改进计算方法, 较好的考虑这一变化特点, 因而更接近实际情况。

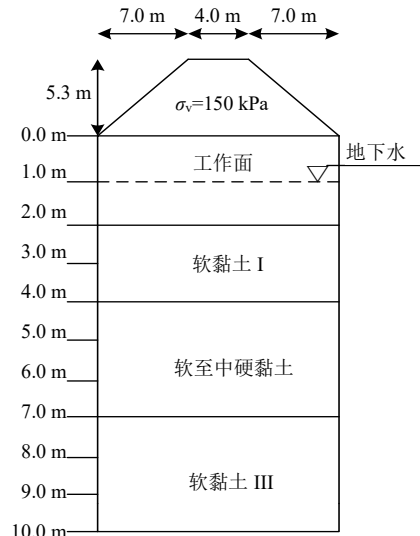


图5 土层剖面图
Fig. 5 Soil layer profile

表1 主要计算参数

Table 1 Main calculation parameters

名称	厚度/m	重度 γ' /(kN/m ³)	压缩指数 c_c	初始孔隙比 e_0	压缩模量 E_s /kPa
软黏土 I	2~4	4.00	1.24	2.81	739.40
软至中硬黏土	4~7	7.10	1.27	3.12	1 253.50
软黏土 III	7~10	7.80	0.13	0.87	2 342.40

表2 复合地基沉降计算结果的比较

Table 2 Comparison of settlement calculation results of composite foundation

名称	规范中的应力修正法 ^[4]	规范中的复合模量法 ^[4]	改进后的应力修正法	改进后的复合模量法	实测值
软黏土 I	329.43	305.51	206.10	213.40	515.79
软至中硬黏土	247.19	258.82	257.81	267.81	
软黏土 III	106.92	122.53	47.01	57.37	
总沉降/mm	683.55	686.85	510.93	538.57	

5 结 论

本文给出了考虑土体非线性压缩特性的散体材料桩复合地基沉降计算方法。主要得出以下结论:

(1) 通过引入经典的 $e-\lg\sigma'$ 表达式, 给出土体压缩模量与有效应力之间的变化关系, 进而利用这一变化关系给出改进后的复合模量法、改进后的应力修正法计算公式。

(2) 较于规范中散体材料桩复合地基沉降计算方法, 改进后的计算方法充分考虑土体非线性压缩特性, 通过考虑土体压缩模量随有效应力不断变化进而真实反映散体材料桩复合地基沉降变化特点。

(3) 对本文提出的散体材料桩复合地基沉降计算方法与室内模型试验和实际工程开展对比分析, 结果表明理论值与试验值及实测值均比较接近, 说明本文计算方法对散体材料桩复合地基的变形设计具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 刘吉福. 路堤下复合地基桩、土应力比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 674-677.
LIU Ji-fu. Analysis of pile-soil stress ratio for composite ground under embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 674-677.
- [2] 池跃君, 宋二祥, 陈肇元. 刚性桩复合地基在不同荷载下的桩土分担特性[J]. 天津大学学报, 2003, 36(3): 359-363.
CHI Yue-jun, SONG Er-xiang, CHEN Zhao-yuan. Proportion of loads carried by the piles and the soil of rigid pile composite-foundation under varying loads[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(3): 359-363.
- [3] 饶为国, 赵成刚. 桩-网复合地基应力比分析与计算[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 74-80.
RAO Wei-guo, ZHAO Cheng-gang. The behavior of pile-net composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2): 74-80.
- [4] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [5] 王凤池, 朱浮声, 王晓初. 复合地基复合模量的理论修正[J]. 东北大学学报, 2003, 24(5): 491-494.
WANG Feng-chi, ZHU Fu-sheng, WANG Xiao-chu. Theoretical analysis on the modulus of construction composite foundation[J]. Journal of Northeastern University, 2003, 24(5): 491-494.
- [6] 郑俊杰, 区剑华, 袁内镇, 等. 一种求解复合地基压缩模量的新方法[J]. 铁道工程学报, 2003(1): 117-119, 116.
ZHENG Jun-jie, QU Jian-hua, YUAN Nei-zhen, et al. A new way to calculate modulus of compressibility of composite foundation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2003(1): 117-119, 116.
- [7] 章定文, 刘松玉. 路堤荷载下柔性桩复合地基沉降实用计算方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1133-1138.
ZHANG Ding-wen, LIU Song-yu. Practical method for settlement calculation of flexible columns composite foundation under embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1133-1138.
- [8] 朱奎, 魏纲, 徐日庆. 刚-柔性桩复合地基复合模量的一种解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 3104-3109.
ZHU Kui, WEI Gang, XU Ri-qing. An analytical solution to composite modulus of composite foundation with rigid-flexible piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3104-3109.
- [9] 盛崇文. 碎石桩复合地基的沉降计算[J]. 土木工程学报, 1986(1): 72-80.
SHENG Chong-wen. Calculation of the settlement of stone-column composite ground[J]. China Civil Engineering Journal, 1986(1): 72-80.
- [10] 姜前. 计算碎石桩复合地基变形模量的新方法[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(4): 53-58.
JIANG Qian. Analysis and computation of the deformation modulus of the pile in the composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 14(4): 53-58.
- [11] 杨光华. 地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1927-1931.
YANG Guang-hua. Undisturbed soil tangent modulus method for calculation of nonlinear settlement of foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1927-1931.
- [12] 邓文龙, 周正茂. 土的压缩模量 E_s 的一种取值方法[J]. 工业建筑, 1996, 26(10): 33-35.
DENG Wen-long, ZHOU Zheng-mao. A calculation method for soils modulus of compressibility E_s [J]. Industrial Construction, 1996, 26(10): 33-35.
- [13] 梅国雄, 宰金珉, 赵维炳. 土体侧限压缩模量简易计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1057-1059, 1064.
MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, ZHAO Wei-bing. A simplified calculation method of oedometric modulus of soil and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 1057-1059, 1064.
- [14] 郑俊杰, 区剑华, 邢泰高. 参变量变分原理求解土的变形模量与压缩模量间的关系[J]. 固体力学学报, 2004, 25(1): 53-57.
ZHENG Jun-jie, QU Jian-hua, XING Tai-gao. Application of the parametric variational principle in determining the relation between the moduli of soil deformation and soil compression[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25(1): 53-57.
- [15] 周翠英, 林春秀, 林鲁生, 等. 外荷载作用下软土压缩模量的动态演化规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2040-2044.

- ZHOU Cui-ying, LIN Chun-xiu, LIN Lu-sheng, et al. Research on dynamic evolution law of compression modulus of soft clay under external loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2040-2044.
- [16] 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(S2): 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.
- [17] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [18] 曾玲玲, 洪振舜, 陈福全. 压缩过程中重塑黏土渗透系数的变化规律[J]. *岩土力学*, 2012, 33(5): 1286-1292.
- ZENG Ling-ling, HONG Zhen-shun, CHEN Fu-quan. A law of change permeability coefficient during compression of remolded clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(5): 1286-1292.
- [19] NADER A, HASSAN R, AKBAR A J, et al. Finite difference approach for consolidation with variable compressibility and permeability[J]. *Computers and Geotechnics*, 2006, 34(1): 41-52.
- [20] LEKHA K R, KRISHNASWAMY N R, BASAK P. Consolidation of clays for variable permeability and compressibility[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(11): 1001-1009.
- [21] 路江鑫. 淤泥质吹填土压缩-渗透非线性特性试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- LU Jiang-xin. Experimental study on nonlinear characteristics of permeability and compressibility of soft clay[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [22] 段园煜. 土工袋装桩型复合地基受力变形特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- DUAN Yuan-yu. Mechanical and deformation performance of composite foundation with geosynthetics encased columns[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [23] HOSSEINPOUR I, ALMEIDA M S S, RICCIO M. Full-scale load test and finite-element analysis of soft ground improved by geotextile-encased granular columns[J]. *Geosynthetics International*, 2015, 22(6): 428-438.