

DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2024.04.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于割线模量的散体材料桩 复合地基沉降计算

李传勋, 刘聪

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 基于土体侧限条件下的应力-应变关系曲线均为双曲线的现象,且应用割线模量计算土体的竖向应变更有助于实现程序计算,首先利用土体割线模量与压缩指数和压缩模量的关系,得到桩周土体割线模量的确定方法.在此基础上,基于等应变假设条件得到考虑土体非线性压缩的桩土应力比,并提出改进的应力修正法和复合模量法,以实现散体材料桩复合地基非线性沉降计算.最后结合模型试验和实际工程算例,对2个改进的沉降计算方法开展验证分析.研究结果表明:室内模型试验中,改进的应力修正法和复合模量法的沉降计算值与试验值误差均小于1.00 mm,表明改进的沉降计算方法具有一定的可靠性;实际工程算例中,改进的复合模量法计算值与实测值间误差为8.70%,远小于JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》中规定的复合模量法误差(55.06%),改进的应力修正法计算值与实测值误差为8.73%,远小于JGJ 79—2012中规定的应力修正法误差(55.11%).对比分析表明,改进的沉降计算方法优于JGJ 79—2012中的复合模量法和应力修正法,且改进方法计算值更接近实测值,说明改进方法具有更好的可靠性和适用性.

关键词: 复合地基; 散体材料桩; 沉降计算; 复合模量法; 应力修正法

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-7775(2024)04-0482-08

引文格式: 李传勋, 刘聪. 基于割线模量的散体材料桩复合地基沉降计算[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 482-489.

Settlement calculation of stone columns-improved composite foundation based on secant modulus

LI Chuanxun, LIU Cong

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The stress-strain relationship of soils under confining conditions is hyperbolic. In this case, secant modulus can be adopted to calculate the vertical strain of soils, which is helpful to realize the settlement calculation. The secant modulus of the soil around stone columns was determined according to the relationship between the secant modulus and the compression index and compression modulus. The column-soil stress ratio considering the nonlinear compressibility of soils was proposed based on the assumption of equal strain, and the improved stress correction method and composite modulus method for nonlinear settlement calculation of composite foundations with stone columns were further provided. The two improved methods for the settlement calculation were verified by the model test and actual project. The results show that for the laboratory model test, the differences between the measured results and the

收稿日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42377183)

作者简介: 李传勋(1978—),男,吉林榆树人,教授,博士生导师(lichuanxun@yeah.net),主要从事岩土工程的研究.

刘聪(1995—),男,江苏徐州人,硕士研究生(1c10044001@163.com),主要从事复合地基的研究.

calculated results by the improved composite modulus method and modified stress correction method are less than 1.00 mm, which indicates that the improved method for settlement calculation is reliable. For the actual project, the error between the improved composite modulus method and the measured results is 8.70%, which is less than the specified error of 55.06% by the composite modulus method in the JGJ 79—2012. The error between the improved stress correction method and the measured results is 8.73%, which is less than the specified error of 55.11% by the stress correction method in the JGJ 79—2012. The comparative analysis shows that the improved settlement calculation method is better than the composite modulus method and stress correction method in the JGJ 79—2012, and the calculated results by the improved method are closer to the measurement results, which indicates that the improved method has better reliability and applicability.

Key words: composite foundation; stone columns; settlement calculation; composite modulus method; stress correction method

基于土体孔隙比-有效应力曲线的分层总和法是目前软土地基沉降计算最常用的方法,该方法反映了土体压缩模量随应力增加而发生的变化。但由于土体孔隙比-有效应力曲线较难应用数学式表达,且单纯依靠图形获取孔隙比难免出现误差,因而极不利于实现地基沉降的程序计算。针对以上的问题,魏汝龙^[1]提出应用割线模量整理压缩试验数据的方法,应用割线模量开展软土的沉降计算,不再需要查取土体孔隙比-有效应力曲线,不受初始孔隙比的影响。杨光华^[2]认为在进行地基非线性沉降计算时,割线模量与切线模量同样适用。孔洋等^[3]将割线模量引入至 Gunary 模型的应力-应变关系中,并实现了填方区的沉降计算。杨晶等^[4]将割线模量应用于压实黄土地区的路堤沉降计算。可见,割线模量已广泛应用于地基的非线性沉降计算。实际工程中,还需要对天然地基进行加固处理,因而有关加固处理后地基的沉降计算更是人们关注的热点^[5]。散体材料桩复合地基因其加固效果显著、造价低等优点已广泛应用于软土地基的加固处理。沉降计算是复合地基设计的主要内容,但目前散体材料桩复合地基沉降计算较为常用的方法仍然为 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》推荐的复合模量法和应力修正法。这两种方法均涉及土体压缩模量,其主要确定方法为现场原位测试和室内试验。现场原位测试的土体压缩模量更具真实性,但地勘报告中给出的压缩模量无法体现土体压缩模量随有效应力变化而发生的改变。室内试验虽然能够反映土体压缩模量随应力而发生的改变,但无法避免取样过程对土样产生的扰动影响。同时,复合模量法中土体压缩模量通常取常数,不能反映土体的非线性压缩特性。对于应力修正法,即使得到了较为准确的

土体压缩模量,但应力修正系数仍与桩土应力比和面积置换率有关,还会受到土体非线性压缩的影响。若能在复合模量法、应力修正法中反映土体的非线性压缩特性,无疑会提高散体材料桩复合地基沉降计算的精准性,但目前相关研究尚鲜见报道。

为此,笔者首先建立割线模量与压缩指数和压缩模量之间的关系,在此基础上,提出考虑土体非线性压缩影响的桩土应力比计算方法。再将割线模量引入散体材料桩复合地基的沉降计算中,提出改进的散体材料桩复合地基沉降计算的复合模量法及应力修正法。最后结合模型试验及工程实例,对所提出的两种方法进行验证。

1 土体割线模量的概念及参数确定

1.1 土体割线模量的概念

压缩试验的结果(孔隙比与竖向应力的关系曲线)可转换为土体的竖向应变与竖向应力($\varepsilon_{vs}-\sigma_s$)的关系曲线,如图1所示, E_{s1-2} 为土体竖向应力从 σ_{s1} 至 σ_{s2} 的压缩模量。由图可知, $\varepsilon_{vs}-\sigma_s$ 曲线可近似看作为双曲线。

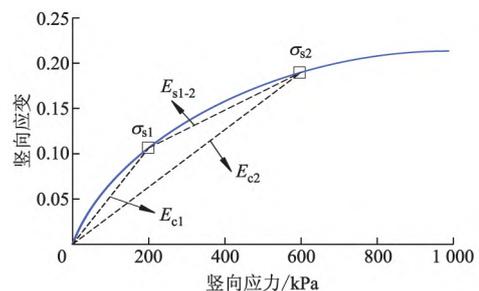


图1 土体竖向应变-竖向应力曲线

竖向应变与竖向应力的双曲线关系^[6]表达为

$$\varepsilon_{vsi} = \frac{\sigma_{si}}{a+b\sigma_{si}}, \quad (1)$$

式中: ε_{vsi} 为第 i 级竖向应力下土体的竖向应变; σ_{si} 为作用于土体的第 i 级竖向应力; a 为土体的初始割线模量; b 为直线斜率.

定义第 i 级竖向应力对应的割线模量为 $E_{ci} = \sigma_{si} / \varepsilon_{vsi}$, 则式(1)可变换为 E_{ci} 与 σ_{si} 的线性关系式:

$$E_{ci} = a + b\sigma_{si}. \quad (2)$$

利用式(2)采用传统的坐标转换法,可以直接确定割线模量与竖向应力的关系曲线.

1.2 土体割线模量的确定

1.2.1 参数 a 、 b 与压缩指数的关系

通过将双曲线关系转化为线性关系后才能确定参数 a 、 b . 故有必要建立参数 a 、 b 与压缩指数的关系, 以便直接应用压缩指数就能确定割线模量. 对正常固结土, 土体的孔隙比与竖向应力的关系式^[7]为

$$e_i = e_0 + c_c \log(\sigma_{s0} / \sigma_{si}), \quad (3)$$

式中: e_i 为孔隙比-竖向应力曲线上与 σ_{si} 相对应的土体孔隙比; σ_{s0} 为土体初始有效应力; e_0 为与 σ_{s0} 相对应的土体初始孔隙比; c_c 为土体的压缩指数.

由式(3)可分别计算得到竖向应力 σ_{s1} 与 σ_{s2} 作用下土体的竖向应变 ε_{vs1} 和 ε_{vs2} , 即

$$\varepsilon_{vs1} = c_c \log(\sigma_{s1} / \sigma_{s0}) / (1 + e_0), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{vs2} = c_c \log(\sigma_{s2} / \sigma_{s0}) / (1 + e_0). \quad (5)$$

如前所述, 在竖向应力 σ_{s1} 与 σ_{s2} 作用下, 土层竖向应变又可由式(1)得到:

$$\varepsilon_{vs1} = \frac{\sigma_{s1}}{a + b\sigma_{s1}}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{vs2} = \frac{\sigma_{s2}}{a + b\sigma_{s2}}. \quad (7)$$

联立方程(4)-(7)可得参数 a 、 b 分别为

$$a = \frac{1 + e_0}{\sigma_{s1} - \sigma_{s2}} \frac{\sigma_{s1} \sigma_{s2} \log(\sigma_{s1} / \sigma_{s2})}{c_c \log(\sigma_{s0} / \sigma_{s2}) \log(\sigma_{s0} / \sigma_{s1})}, \quad (8)$$

$$b = \frac{1 + e_0}{\sigma_{s1} - \sigma_{s2}} \frac{\sigma_{s2} \log(\sigma_{s0} / \sigma_{s1}) - \sigma_{s1} \log(\sigma_{s0} / \sigma_{s2})}{c_c \log(\sigma_{s0} / \sigma_{s1}) \log(\sigma_{s0} / \sigma_{s2})}. \quad (9)$$

根据文献[8]可知 $e_0 = 3.12$ $c_c = 1.27$ 竖向有效应力(σ_{s1} , σ_{s2})分别取(200, 300)、(300, 400)和(400, 500), 则由式(8)和(9)计算得到参数 a 和 b , 进而得到割线模量(称之为由压缩指数法确定的割线模量)与竖向应力的关系曲线. 图2为通过压缩指数法和坐标转换法得到的割线模量与竖向应力的关系曲线.

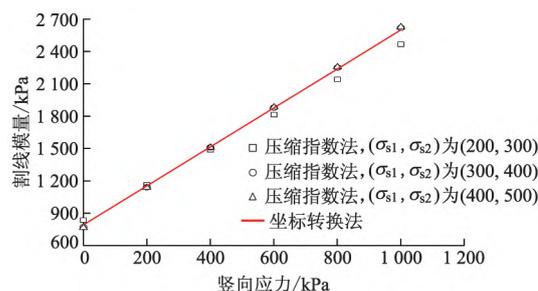


图2 由压缩指数法和坐标转换法得到的割线模量与竖向应力的关系曲线

由图2可知, 两种方法确定的割线模量十分接近, 说明由压缩指数法确定割线模量的方法十分可靠, 从而为实际工程中获得土体割线模量提供了简便方法.

1.2.2 参数 a 、 b 与压缩模量的关系

由土体压缩模量 E_s 的定义^[7]可得

$$E_s = \frac{\Delta\sigma_s}{\Delta\varepsilon_{vs}}, \quad (10)$$

式中: $\Delta\sigma_s$ 为作用于土体的竖向应力增量, 即土体竖向附加应力; $\Delta\varepsilon_{vs}$ 为 $\Delta\sigma_s$ 作用下的压缩应变增量. 在土体 $\varepsilon_{vs}-\sigma_s$ 曲线为双曲线的前提下, 竖向应力由 σ_{s1} 增加到 σ_{s2} 时对应的土体压缩模量 E_{s1-2} 为

$$E_{s1-2} = \frac{\sigma_{s2} - \sigma_{s1}}{\varepsilon_{vs2} - \varepsilon_{vs1}} = \frac{(a + \sigma_{s1}b)(a + \sigma_{s2}b)}{a}. \quad (11)$$

同理, 竖向应力由 σ_{s2} 增加到 σ_{s3} 时土体的压缩模量 E_{s2-3} 为

$$E_{s2-3} = \frac{\sigma_{s3} - \sigma_{s2}}{\varepsilon_{vs3} - \varepsilon_{vs2}} = \frac{(a + \sigma_{s2}b)(a + \sigma_{s3}b)}{a}. \quad (12)$$

联立式(11)与(12)得到参数 a 、 b 分别为

$$a = \frac{(\sigma_{s1}E_{s2-3} - \sigma_{s3}E_{s1-2})^2}{(\sigma_{s1} - \sigma_{s3}) [(\sigma_{s1} - \sigma_{s2})E_{s2-3} + (\sigma_{s2} - \sigma_{s3})E_{s1-2}]}, \quad (13)$$

$$b = \frac{(\sigma_{s1}E_{s2-3} - \sigma_{s3}E_{s1-2})(E_{s1-2} - E_{s2-3})}{(\sigma_{s1} - \sigma_{s3}) [(\sigma_{s1} - \sigma_{s2})E_{s2-3} + (\sigma_{s2} - \sigma_{s3})E_{s1-2}]}. \quad (14)$$

根据式(13)、(14)和压缩模量可确定参数 a 、 b , 进而获得割线模量与竖向应力之间的变化关系, 该割线模量称之为由压缩模量法确定的割线模量. 利用勘察报告中不同应力区间土体的压缩模量可确定参数 a 、 b , 并获得割线模量随应力变化的规律. 利用实际工程中3种不同土体试验数据^[9], 探讨根据压缩模量法确定割线模量的可行性. 根据压缩模量法和坐标转换法得到的割线模量与竖向应力的关系曲线见图3.

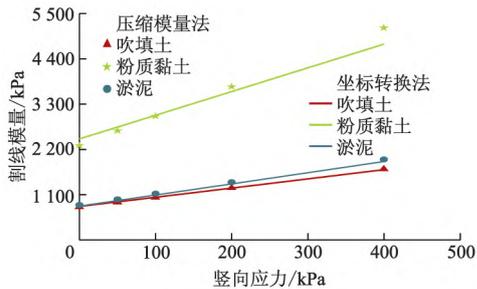


图3 由压缩模量法和坐标转换法得到的割线模量与竖向应力的关系曲线

根据文献[9], σ_s 分别为 50 和 100 kPa 时, 吹填土、淤泥和粉质黏土的土体压缩模量分别为 1.272、1.311 和 3.477 MPa; σ_s 分别为 100 kPa 和 200 kPa 时, 3 种土体的压缩模量分别为 1.812、1.861 和 4.882 MPa。则由式(13)和(14)可得到土体割线模量与应力的关系曲线, 同时亦可通过坐标转换法确定割线模量与应力间的关系。可见, 由压缩模量法确定的割线模量随应力的变化规律与由坐标转换法确定的割线模量变化规律基本一致, 说明由压缩模量法确定土体割线模量的方法具有可行性。

2 基于割线模量的复合地基沉降计算

前述割线模量确定方法中, 考虑土体的非线性变形特性, 且容易实现程序计算。为此, 本节将其应用于散体材料桩复合地基的非线性沉降计算。

2.1 基本假设条件

以散体材料桩及桩周土体为研究对象, 开展复合地基的非线性沉降计算, 作如下基本假设条件。

1) 桩体与桩周土体等应变假设条件成立。由于散体材料桩桩身刚度较小, 桩土变形协调, 散体材料桩体与桩周土体任一点的竖向变形相等, 故该假设条件基本符合散体材料桩复合地基的基本特性。

2) 等应变假设条件下忽略桩土界面处的摩阻力。

3) 大面积堆载下, 认为散体材料桩复合地基不发生侧向变形。

4) 散体材料桩桩体自身为均质、各向同性的线弹性体。

5) 桩周土体竖向应力与竖向应变的关系符合双曲线模型。

2.2 桩土应力比分析

桩土应力比是散体材料桩复合地基设计计算的重要参数。JGJ 79—2012 中规定散体材料桩复合

地基的桩土应力比合理取值范围为 2~4, 实际工程中将桩土应力比作为定值应用于复合地基的沉降分析^[10-12]。上述确定桩土应力比的方法无法考虑土体非线性压缩的影响, 因为一旦考虑土体非线性压缩, 散体材料桩复合地基的桩土应力比将不是常量。

研究^[13-14]表明散体材料桩复合地基的桩土应力比会随应力变化而变化。竖向应力增大常导致桩周土体压缩模量增大, 桩土应力比减小, 故桩土应力比的计算方法需要反映桩间土体压缩模量随应力而变化的特性。由基本假设条件 4) 可知, 桩体的竖向应力增量 $\Delta\sigma_p$ 与桩体竖向应变增量 $\Delta\varepsilon_{vp}$ 的关系服从胡克定律 (Hooke's law), 则关系式为

$$\Delta\varepsilon_{vp} = \Delta\sigma_p / E_p, \quad (15)$$

式中: E_p 为散体材料桩的压缩模量。

由基本假设条件 5) 可知, 桩间土体竖向应力由初始有效竖向应力 σ_{s1} 增大至初始有效竖向应力和竖向附加应力之和 σ_{s2} 时, 桩周土体的竖向应变增量 $\Delta\varepsilon_{vs}$ 为

$$\Delta\varepsilon_{vs} = \frac{\sigma_{s2}}{a+b\sigma_{s2}} - \frac{\sigma_{s1}}{a+b\sigma_{s1}} = \frac{a\Delta\sigma_s}{(a+b\sigma_{s2})(a+b\sigma_{s1})}, \quad (16)$$

式中: $\Delta\sigma_s = \sigma_{s2} - \sigma_{s1}$ 。

根据等应变假设条件 1) 式(16)进一步改写为

$$n_{ps} = \frac{\Delta\sigma_p}{\Delta\sigma_s} = \frac{aE_p}{(a+b\sigma_{s2})(a+b\sigma_{s1})} = \frac{aE_p}{E_{c1}E_{c2}}, \quad (17)$$

式中: n_{ps} 为桩土应力比。

如果已知任意土层的自重应力与附加应力, 则由式(17)得到相应土层的桩土应力比表达式:

$$n_{ps} = \frac{aE_p}{E_{c1}E_{c2}}. \quad (18)$$

该桩土应力比表达式简洁, 且能反映土体非线性压缩特性。

2.3 基于割线模量的应力修正法

采用 JGJ 79—2012 中的应力修正法计算散体材料桩复合地基的沉降, 表达式为

$$S = \mu_s \sum_{j=1}^n \frac{\Delta\delta_{avj}}{E_{sj}} H_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

式中: S 为复合地基的沉降值; n 为划分的土层数; $\Delta\delta_{avj}$ 为第 j 层土体的平均附加应力, 可通过弹性解确定; H_j 为第 j 层土体的厚度; E_{sj} 为第 j 层土体的压缩模量; μ_s 为应力修正系数, 其计算式为

$$\mu_s = \frac{1}{1+m(n_{ps}-1)}, \quad (20)$$

式中: m 为面积置换率。

由式(20)可知,应力修正系数与面积置换率和桩土应力比有关.面积置换率由设计确定,故桩土应力比的变化会影响应力修正系数.联合式(18)和式(20),应力修正系数可表达为

$$\mu_s = \frac{1}{1+m[aE_p/(E_{c1}E_{c2})-1]} \quad (21)$$

面积置换率和桩体压缩模量是确定的,竖向应力变化后导致桩周土体割线模量不断变化,应力修正系数会随竖向应力的变化而变化.选用淤泥、亚黏土、粉土、粉质黏土4种土样进行分析^[6],参数*a*和*b*的计算值如表1所示.

表1 4种土样的参数计算值

土样类型	<i>a</i> /kPa	<i>b</i>
淤泥	700	3.750
亚黏土	830	7.133
粉土	2 130	5.850
粉质黏土	850	10.125

散体材料桩压缩模量 $E_p = 4\,000.000$ kPa,面积置换率 $m = 0.125$,竖向应力从 50 kPa 开始逐级增加,修正后的应力修正系数和竖向应力的关系曲线如图4所示.由图可知,当面积置换率和桩体压缩模量保持不变时,随着竖向应力的增加,应力修正系数逐渐增大,尤其是对于淤泥、粉质黏土和亚黏土土层的应力修正系数变化幅度较大.若将应力修正系数当作定值,对这3种土质下的复合地基沉降进行计算,会引起较大误差.

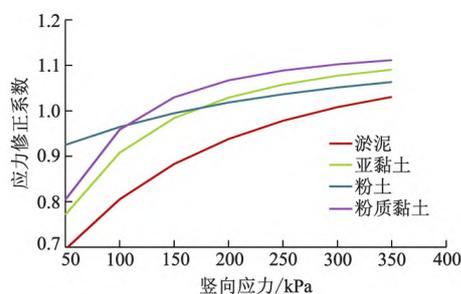


图4 应力修正系数与竖向应力的关系曲线

据分层总和法的思想,将地基土体共划分 n 个土层.当竖向应力由初始自重应力 σ_{s1} 增加到自重应力和附加应力之和 σ_{s2} 时,第 j 层土体在该应力区间内的压缩模量为 E_{sj} ,可以采用割线模量得到其计算式:

$$E_{sj} = \frac{\Delta\sigma_{sj}}{\Delta\varepsilon_{vsj}} = \frac{\sigma_{s2j} - \sigma_{s1j}}{\varepsilon_{vs2j} - \varepsilon_{vs1j}} = \frac{E_{c1j}E_{c2j}}{a}, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (22)$$

式中: $\Delta\sigma_{sj}$ 和 $\Delta\varepsilon_{vsj}$ 分别为第 j 层土体的竖向附加应力和竖向应变增量; σ_{s1j} 为第 j 层土体的初始自重应

力; σ_{s2j} 为第 j 层土体自重应力与竖向附加应力之和; ε_{vs1j} 和 ε_{vs2j} 分别为 σ_{s2j} 和 σ_{s1j} 作用下的第 j 层土体竖向应变; E_{c1j} 为第 j 层土体受到上部自重应力下的割线模量; E_{c2j} 为第 j 层土体受到自重应力与附加应力共同作用下的割线模量.

将式(21)、(22)代入式(19),得到改进的散体材料桩复合地基沉降的应力修正法计算公式:

$$S = \sum_{j=1}^n \mu_{sj} \frac{a\Delta\delta_{avj}}{E_{c1j}E_{c2j}} H_j, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (23)$$

式中: μ_{sj} 为第 j 层土体的应力修正系数, $\mu_{sj} =$

$$\frac{1}{1+m[aE_p/(E_{c1j}E_{c2j})-1]}$$

2.4 基于割线模量的复合模量法

JGJ 79—2012 中计算散体材料桩复合地基沉降的复合模量法计算式为

$$S = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta\sigma_j}{E_{spj}} H_j, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (24)$$

式中: $\Delta\sigma_j$ 为作用于第 j 层复合地基的竖向附加应力; E_{spj} 为第 j 层复合地基的复合模量,其表达式为

$$E_{spj} = mE_p + (1-m)E_{sj}, \quad j=1, 2, \dots, n. \quad (25)$$

复合模量法是以分层总和法为基础,需要考虑土体压缩模量随附加应力沿深度的变化.为反映土体的非线性压缩特性,将前述的割线模量引入复合模量法,从而使改进的复合模量法能反映桩周土体的非线性压缩特性.根据等应变假设条件,如果复合地基的复合模量为 E_{sp} ,则第 j 层复合地基的复合模量为

$$E_{spj} = \frac{\Delta\sigma_j}{\Delta\varepsilon_{vj}}, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (26)$$

式中: $\Delta\varepsilon_{vj}$ 为第 j 层复合地基在竖向附加应力作用下产生的压缩应变增量.散体材料桩复合地基由桩体和桩周土体共同承担荷载,第 j 层复合地基的静力平衡方程为

$$A\Delta\sigma_j = A_1\Delta\sigma_{pj} + (A-A_1)\Delta\sigma_{sj}, \quad (27)$$

式中: $\Delta\sigma_{pj}$ 第 j 层复合地基桩体承担的附加应力; $\Delta\sigma_{sj}$ 第 j 层复合地基土体承担的附加应力; A 为复合地基的面积; A_1 为散体材料桩的面积.

将式(27)代入式(26)得

$$E_{spj} = \frac{m\Delta\sigma_{pj} + (1-m)\Delta\sigma_{sj}}{\Delta\varepsilon_{vj}}, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (28)$$

式中: $m = A_1/A$. 结合等应变假设条件 1), 即 $\Delta\varepsilon_{vj} = \Delta\varepsilon_{vpj} = \Delta\varepsilon_{vsj}$, 可得

$$E_{spj} = mE_p + \frac{a(1-m)}{(a+b\sigma_{s1j})(a+b\sigma_{s2j})}. \quad (29)$$

将式(29)代入式(24)得到考虑土体非线性压缩特性的改进复合模量法计算公式:

$$S = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta\sigma_j}{mE_p + \frac{a(1-m)}{(a+b\sigma_{s1j})(a+b\sigma_{s2j})}} H_j \quad (30)$$

式中: σ_{s1j} 为作用于第 j 层土体的自重应力; σ_{s2j} 为作用于第 j 层土体的自重应力与附加应力之和。

3 算例分析

3.1 室内模型试验分析

采用文献[15]中的室内模型试验验证本研究中改进的复合地基沉降计算方法。室内模型试验选用的模型桶的高和直径均为 1.00 m, 圆形荷载板半径为 0.06 m, 下卧层土体高 0.20 m, 桩间土体高度与桩长均为 0.60 m, 桩体压缩模量 E_p 为 2.100 GPa, 面积置换率 m 为 0.062 5。

3.1.1 压缩曲线

试验土样选自陕西省杨凌地区的黄土。3 种干密度黄土试样的孔隙比与竖向应力关系曲线如文献[5]所示, 其中一、二、三号试样干密度分别为 1.35、1.45 和 1.55 g/cm^3 。根据 3 种试样孔隙比与竖向应力的关系曲线, 采用坐标转换法可得到土体割线模量与竖向应力间的关系曲线。同时, 亦可由压缩指数和压缩模量确定土体割线模量与竖向应力的关系曲线。将 3 种方法确定的关系曲线进行对比分析, 结果如图 5 所示。其中 E_{s1-2} 、 E_{s2-3} 分别为土体竖向应力为 50~100、100~150 kPa 时的土体压缩模量, 一、二、三号黄土试样的压缩指数分别为 0.051、0.035、0.030, 初始孔隙比分别为 1.015、0.876、0.755。

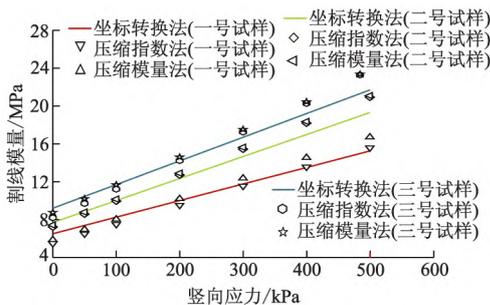


图 5 3 种方法确定的割线模量与竖向应力关系曲线

由图 5 可知, 笔者提出的由压缩模量和压缩指数确定的割线模量与坐标转换法得到的结果相差不大。但笔者提出的由压缩模量和压缩指数确定割线模量的方法更为简单, 便于工程应用。

3.1.2 考虑土体非线性压缩的复合模量法

模型试验沉降计算分为上部 0.6 m 的加固区和下部 0.2 m 的下卧层。加固区采用复合模量法进行沉降计算, 下卧层采用分层总法进行沉降计算, 二者之和为复合地基总沉降量。考虑土体非线性压缩特性, 依据复合模量法计算得到沉降与应力关系曲线如图 6 所示, 其中土体竖向应力为 100~200 kPa 时土体压缩模量为 12.000 MPa。

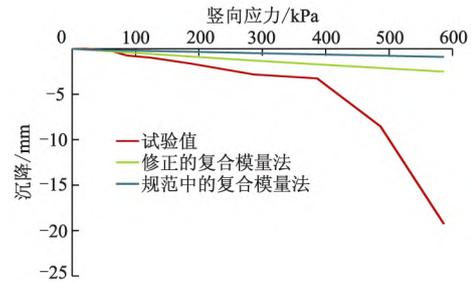


图 6 复合地基沉降-竖向应力关系曲线

由图 6 可知: 当应力小于 400 kPa 时, 改进的复合模量法计算结果优于规范中给出的复合模量法, 更接近试验值; 当应力大于 400 kPa 时, 由于复合地基发生了塑性破坏, 导致计算结果与试验值偏差较大。

3.1.3 考虑土体非线性压缩的应力修正法

以干密度为 1.35 g/cm^3 的土样为例, 考虑土体非线性压缩的应力修正法沉降计算值与试验值如表 2 所示。

表 2 改进的应力修正法的沉降计算值与试验值的对比

附加应力/kPa	应力修正系数	沉降计算值/mm	沉降试验值/mm
24.45	0.050	0.142	0.013
59.95	0.058	0.205	0.182
86.45	0.067	0.151	0.550
125.00	0.076	0.218	0.245
186.45	0.091	0.343	0.637
283.45	0.117	0.543	1.194
386.45	0.153	0.522	0.443

由表 2 可知: 应力修正系数并非是一个定值, 而是随附加应力的变化而变化; 通过不同的应力修正系数修正后的沉降计算值与试验值相差不大, 表明改进后的应力修正法是可行的。

3.2 工程算例的计算分析

3.2.1 实际工程数据

采用文献[16]的实际工程数据验证本研究改进的计算方法。试验路堤宽为 18.00 m, 高为 5.35 m。采用烧结料进行填充(重度为 28.0 kN/m^3)。路堤荷

载为 149.8 kPa。上层为 1.80 m 厚的砂土,为便于桩基施工,将该部分作为砂垫层。砂垫层以下是 8.00 m 厚的软黏土。软黏土下部为低压缩性的硬砂层,其沉降忽略不计。散体材料桩长为 11.00 m,置换率为 0.125。桩体压缩模量为 4 000.000 kPa。复合地基最终沉降量实测值为 550.000 mm。软黏土饱和重度为 14.5 kN/m³,压缩指数为 1.260,压缩模量为 750.000 kPa。复合地基的剖面图如图 7 所示。

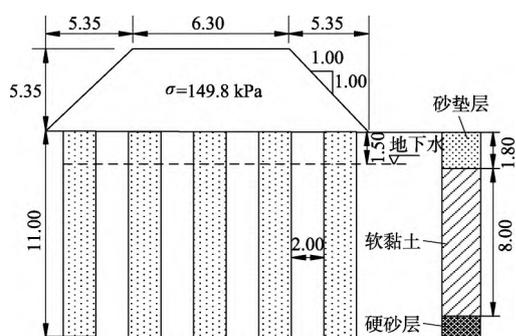


图 7 复合地基剖面图(单位:m)

3.2.2 改进复合模量法的计算分析

将地基划分为若干层,每层计算深度均为 1.00 m。每层的沉降计算点为中点位置。深度为 0~1.80 m 的土层是砂垫层,该部分沉降可忽略不计。采用改进的复合模量法计算分层沉降值,结果如图 8 所示。

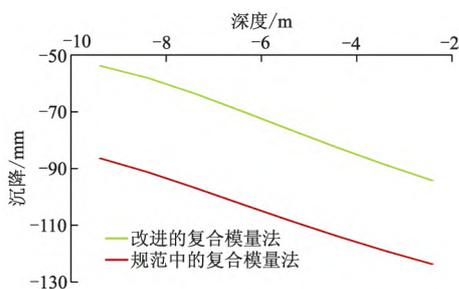


图 8 复合模量法计算的复合地基分层沉降

由图 8 可知,考虑土体非线性压缩的复合模量法(简称改进的复合模量法)计算结果要小于规范中的复合模量法。总沉降实测值为 550.000 mm,由图 8 得到改进复合模量法的总沉降计算结果为 598.010 mm,与实测值相差 48.010 mm,相对误差为 8.70%;由图 8 得到 JGJ 79—2012 中的复合模量法总沉降计算结果为 852.850 mm,与实测值相差 302.850 mm,相对误差为 55.06%。可见,与 JGJ 79—2012 中的复合模量法相比,改进复合模量法方法更具优势。

3.2.3 改进的应力修正法的计算分析

桩体压缩模量为 4 000.000 kPa,桩周土体的压缩模量为 750.000 kPa,桩土应力比为 5.330。应用规

范中的应力修正法计算得到复合地基总沉降为 853.080 mm,与实测值(550.000 mm)相差 303.080 mm,相对误差为 55.11%。应用改进应力修正法计算的复合地基沉降计算结果如表 3 所示。

表 3 应用改进应力修正法得到的复合地基沉降

计算点	桩土应力比	应力修正系数	沉降/mm
1	3.307	0.776	93.636
2	3.215	0.783	88.770
3	3.132	0.790	83.270
4	3.055	0.796	77.432
5	2.982	0.801	71.583
6	2.911	0.807	66.100
7	2.841	0.813	60.980
8	2.773	0.819	56.270
总沉降			598.041

由表 3 可知:考虑土体非线性压缩的散体材料桩复合地基的桩土应力比约为 3,符合 JGJ 79—2012 规定取值范围(2~4)要求。考虑土体非线性压缩的应力修正法(简称改进的应力修正法)总沉降量计算结果(598.041 mm)与实测值相差 48.041 mm,相对误差为 8.73%。进一步说明改进的应力修正法具有一定的可靠性,该方法明显提高散体材料桩复合地基的沉降计算精度。

4 结 论

1) 基于割线模量,提出了改进的散体材料桩复合地基沉降计算的复合模量法和应力修正法,改进后的方法能够考虑土体非线性压缩对桩土应力比、应力修正系数及复合模量的影响。

2) 改进后的计算方法涉及的模型参数能够通过常规压缩试验确定,分别给出了模型参数与压缩指数、压缩模量之间的关系式。

3) 为验证改进方法的可靠性,分别针对模型试验和实际工程展开计算分析,计算结果表明改进后的沉降计算方法更贴近于试验值和实测值。

参考文献(References)

- [1] 魏汝龙. 整理压缩试验资料的一种新方法[J]. 水利水运科学研究, 1980, 11(3): 90-93.
WEI R L. A new method for sorting and compressing test data[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1980, 11(3): 90-93. (in Chinese)
- [2] 杨光华. 现代地基设计理论的创新与发展[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 1-18.

- YANG G H. Innovation and development of modern theories for foundation design [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 1-18. (in Chinese)
- [3] 孔洋 阮怀宁 黄雪峰. 黄土丘陵沟壑区压实回填土地基沉降计算方法[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊1): 218-223.
- KONG Y, RUAN H N, HUANG X F. Method for calculating foundation settlement of compacted backfill in hilly and gully regions of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Sup1): 218-223. (in Chinese)
- [4] 杨晶 白晓红. 压实黄土非线性压缩应力-应变关系在地基沉降计算中的应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1002-1008.
- YANG J, BAI X H. Nonlinear compression stress-strain relationship of compacted loess and its application to calculation of foundation settlement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 1002-1008. (in Chinese)
- [5] 王伟 宰金珉 卢廷浩. 软土工后沉降双曲线模型与指数曲线模型分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2008, 29(2): 173-176.
- WANG W, ZAI J M, LU T H. Analysis on hyperbolic model and exponential model for post-construction settlement of soft soil [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2008, 29(2): 173-176. (in Chinese)
- [6] 刘保健 张军丽. 土工压缩试验成果分析方法与应用[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 37-41, 100.
- LIU B J, ZHANG J L. Application and analysing method for soil compression test [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(1): 37-41, 100. (in Chinese)
- [7] 李广信 张丙印 于玉贞. 土力学[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2022.
- [8] 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.
- [9] 姚宝宽 刘聪 李全军, 等. 真空井点降水、挤密砂桩联合浅层强夯在软基处理中的应用[J]. 地基处理, 2021, 3(2): 118-125.
- YAO B K, LIU C, LI Q J, et al. Application of vacuum well point dewatering and sand compaction pile combined with dynamic compaction method in soft foundation treatment [J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(2): 118-125. (in Chinese)
- [10] 张玲 张旭波 徐泽宇, 等. 基于辛体系的筋箍碎石桩受力变形分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2040-2049.
- ZHANG L, ZHANG X B, XU Z Y, et al. Stress and deformation analysis of geosynthetic-encased stone columns based on symplectic system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 2040-2049. (in Chinese)
- [11] 孙林娜 龚晓南. 散体材料桩复合地基沉降计算方法的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 846-848.
- SUN L N, GONG X N. Research on settlement calculation method of composite foundation of discrete material piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 846-848. (in Chinese)
- [12] 张玲 赵明华. 考虑鼓胀变形的散体材料桩复合地基沉降计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 120-124.
- ZHANG L, ZHAO M H. Settlement calculation of granular material pile composite foundation with consideration of lateral bulging [J]. Journal of Hunan University (Nature Science), 2016, 43(5): 120-124. (in Chinese)
- [13] 余震 张玉成 张玉平. 振冲碎石桩加固软土地基试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(6): 57-61.
- YU Z, ZHANG Y C, ZHANG Y P. Test study on vibro replacement stone columns to improve soft soil foundation [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(6): 57-61. (in Chinese)
- [14] 曹文贵 刘海涛 张永杰. 散体材料桩复合地基桩土应力比计算新方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(7): 1-5.
- CAO W G, LIU H T, ZHANG Y J. A new pile-soil stress ratio calculation method of composite foundation with friable material piles [J]. Journal of Hunan University (Nature Science), 2009, 36(7): 1-5. (in Chinese)
- [15] 徐龙飞. 黄土地区复合地基承载力机理室内模型试验研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2014.
- [16] HOSSEINPOUR I, RICCIO M, ALMEIDA M S S. Numerical evaluation of a granular column reinforced by geosynthetics using encasement and laminated disks [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42: 363-373.

(责任编辑 赵 鸥)