

DOI: 10.11779/CJGE201811005

附加应力法计算刚性桩复合地基路基沉降

刘吉福¹, 郑 刚², 龚晓南³

(1. 中国铁建港航局集团有限公司, 广东 珠海 519000; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 3. 浙江大学滨海与城市岩土工程研究中心,
浙江 杭州 310058)

摘要: 部分刚性桩复合地基实际沉降超过计算沉降的重要原因之一是现有沉降计算方法存在严重缺陷。在分析桩土沉降关系和桩土作用的基础上, 提出了路堤下刚性桩复合地基沉降计算新方法——附加应力法。首先根据桩土作用计算桩土附加应力, 然后采用分层总和法计算复合地基沉降。经工程实例验证后, 利用附加应力法研究了桩长、桩间距、扩底、桩帽等因素对路基沉降的影响, 并与现行方法计算的沉降进行对比。分析表明: 附加应力法可以考虑单桩竖向承载力、桩帽转移荷载能力、桩土相互作用等因素的影响, 计算沉降与实测沉降接近; 利用桩帽将路堤大部分荷载转移到桩顶可以有效减小路基沉降; 扩底比桩长加大更经济合理; 按“强桩、大间距、大桩帽”原则设计的复合地基比密桩复合地基更经济合理。

关键词: 刚性桩; 路基; 沉降; 附加应力法; 扩底桩; 桩帽; 等沉面法; 等沉区法

中图分类号: TU470 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)11-1995-08

作者简介: 刘吉福(1971-), 男, 山东阳谷人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事公路施工、监测、科研等工作。
E-mail: LJFMXY@163.com。

Superimposed stress method to calculate settlement of embankment with rigid-pile composite foundation

LIU Ji-fu¹, ZHENG Gang², GONG Xiao-nan³

(1. CRCC Harbour & Channel Engineering Group Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: An important cause for the practical settlement of some embankments with rigid-pile composite foundation larger than calculated settlement is the severe serious defects of the existing methods for settlement calculation. The superimposed stress method is proposed for calculating the settlement of a rigid-pile composite foundation under embankment by analyzing the differential settlements and interactions between piles and soils. The settlement of the composite foundation is gotten by the layer-wise summation method after the superimposed stresses of piles and soils among piles are calculated based on the analysis of interactions between piles and soils. The proposed method validated by a practical project is applied to investigate the influences of length, distance, enlarged base and cap of rigid piles on the settlements of composite foundation of embankment. The settlements calculated by the proposed method and the existing methods are compared. It is proven that the bearing capacity of piles, load transferred to piles by pile cap, interaction between piles and soils can be taken into account by the proposed method, and the calculated settlement is close to the practical settlement. The pile cap which transfers most embankment load to the piles can decrease settlement prominently. The under-reamed pile is more economical and reasonable than the length-increasing pile. The composite foundation consisting of sparse strong piles with large caps is more economical and reasonable than the composite foundation consisting of dense piles.

Key words: rigid pile; embankment; settlement; superimposed stress method; under-reamed pile; pile cap; equal settlement plane method; equal settlement zone method

0 引言

随着中国经济的发展, 刚性桩越来越多地用于路基地基处理。对软基深、路堤高、工期紧或工后沉降要求高的路基, 通常采用刚性桩进行地基处理。国外

对刚性桩路基多按桩承堤设计, 刚性桩按桩基设计, 路基沉降很小, 通常不需要进行沉降验算^[1]。由于高速铁路对路基的工后沉降要求非常高, 高速铁路对刚

性桩路基也按桩承堤设计^[2]。公路、市政、水运等行业等的路基容许工后沉降通常为 10~30 cm, 容许总沉降则更大。为降低工程造价, 公路、市政、水运等行业对路堤下刚性桩通常按复合地基设计, 由桩和桩间土共同承担路堤荷载^[3], 刚性桩竖向承载力安全系数小于 2.0, 并可能接近 1.0。大部分采用刚性桩复合地基的路基是成功的, 但也有不少路基的实际沉降过大^[4-5]。除了施工因素外, 路堤下刚性桩复合地基现有沉降计算方法不合理是一个重要原因。

工程实践中路堤下刚性桩复合地基沉降计算多参考水泥土桩复合地基的作法, 对刚性桩、桩间土的压缩模量按照面积加权平均得到复合模量, 然后采用复合模量计算沉降, 其适用条件是整个桩长范围内的桩土应力比等于桩土模量比。但是, 除非桩顶面为刚性基础、桩底端为压缩性很小的基岩外, 刚性桩两端附近的桩土应力比小于桩土模量比, 因此复合模量法计算的沉降小于实际沉降。

《建筑地基处理技术规范》JGJ79—2012 采用的复合模量与桩间土压缩模量的比值等于复合地基承载力与桩间土承载力的比值, 称之为承载力比法。该方法的适用条件是复合地基应力与桩间土应力的比值等于复合地基承载力与桩间土承载力的比值。但是, 路堤下刚性桩复合地基应力与桩间土应力的比值取决于路堤荷载、单桩承载力、基础向桩顶转移荷载的能力等, 往往与承载力比不相等。当单桩承载力较高、桩顶不设桩帽时, 复合地基应力与桩间土应力的比值和复合地基承载力与桩间土承载力的比值不相等的现象尤为突出。

杨龙才等利用 Boussinesq 解计算桩间荷载产生的附加应力, 利用 Mindlin 解计算桩顶荷载产生的附加应力, 然后采用分层总和法计算沉降^[6]。齐昌广等^[7]、何宁等^[8]提出类似的方法。杨龙才等^[6]未考虑桩土相互影响。例如, 桩顶荷载为零时, 该方法计算的附加应力与天然地基计算结果相同, 不能体现桩的作用。另外, 齐昌广等^[7]对桩底刺入量采用文克尔模型, 当桩底接近刺入破坏时不适用。何宁等^[8]先假设中性面位置, 然后计算中性面以下桩土沉降, 两者相等时得到真正的中性面。当路基宽度较小, 沉降计算点影响范围内各根桩的中性面位置不同时, 计算难度很大。

在分析桩土沉降关系和桩土作用的基础上, 提出了附加应力法。经工程实例验证后, 利用附加应力法研究了桩长、间距、扩底、桩帽等对路基沉降的影响, 并与现行方法计算的沉降进行了对比。

1 桩土沉降关系和桩土作用

1.1 桩土沉降关系

对压缩模量沿深度不变化的均质地基, 刚性桩复合地基路基通常会出现路堤等沉区、桩身等沉区、下卧层等沉区等 3 个等沉区^[5]。但实际的地基由多个土层组成, 且同一层土的压缩模量也随着深度变化, 导致桩土模量比随深度不断变化, 刚性桩复合地基通常不会出现桩身等沉区。室内试验、现场试验均证实刚性桩复合地基没有桩身等沉区, 只有桩身等沉面^[6, 9-13], 如图 1 所示。

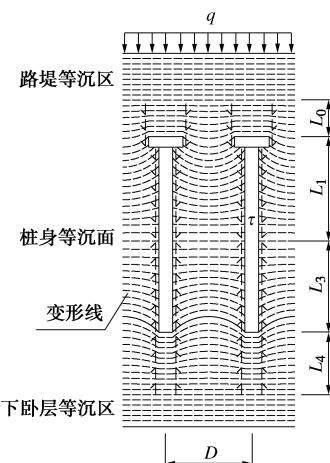


图 1 刚性桩复合地基路基沉降和桩土作用力
Fig. 1 Settlements and interactions between piles and soils of embankment with rigid-pile composite foundation

对深厚软土地基, 软土层中的桩土模量比沿深度变化不大, 当桩间距较小或路堤荷载集度较小时, 桩土附加应力沿深度变化不大^[12, 14], 桩土压缩量接近, 可近似认为桩身存在等沉区。

1.2 桩土作用

由于路堤下刚性桩复合地基的桩土沉降不相等, 桩土之间存在摩擦力 τ , 见图 1。桩身等沉面以上为负摩擦力, 桩身等沉面以下为正摩擦力。负摩擦力将部分桩间荷载向桩身转移, 导致桩身等沉面以上的桩间土附加应力随着深度增大而减小; 正摩擦力将桩身荷载向桩间土转移, 导致桩身等沉面以下的桩间土附加应力随着深度增大而增大。桩间土附加应力沿深度的分布如图 2 中 ADF 弧线所示, 图中 σ_{st} 为地表桩间土附加应力。

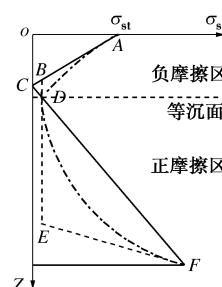


图 2 桩间土附加应力
Fig. 2 Superimposed stresses of soils among piles

2 附加应力法计算复合地基沉降

工程中关注重点是路基横断面的最大沉降。通常情况下路基中线附近的沉降最大, 因此研究路基中线附近沉降的计算方法。

针对路堤下刚性桩复合地基, 在考虑复合地基桩土相互作用的基础上, 计算桩土附加应力, 然后采用分层总和法计算沉降, 将该方法称为附加应力法。当假设桩身只存在等沉面时, 称为等沉面法; 当假设桩身内存在等沉区时, 称为等沉区法。

刚性桩复合地基桩间土附加应力通常较小, 为简化计算, 忽略桩间土附加应力对桩侧摩阻力的影响。

2.1 刚性桩复合地基沉降组成

路堤下刚性桩复合地基的桩顶沉降与桩间地面沉降不相等, 复合地基沉降可由桩顶沉降和桩间地面沉降按面积加权平均得到, 即

$$S = (1-m)S_s + mS_p \quad , \quad (1)$$

$$S_s = S_1 + S_2 \quad , \quad (2)$$

$$S_p = S_c + S_d + S_2 \quad , \quad (3)$$

式中, S 为复合地基沉降, m 为桩置换率, S_s 为桩间地面沉降, S_p 为桩顶沉降, S_1 为桩间土沉降, S_2 为下卧层沉降, S_c 为桩身压缩量, S_d 为桩底刺入量。

当桩底接近刺入破坏时, S_d 计算难度大。桩身等沉面以下桩身压缩量与桩底刺入量之和等于桩身等沉面以下桩间土沉降, 因此式 (3) 可改为

$$S_p = S_c - S_{c2} + S_{l2} + S_2 \quad , \quad (4)$$

式中, S_{c2} 为桩身等沉面以下桩身压缩量, S_{l2} 为桩身等沉面以下桩间土沉降。

相对土的压缩量, 刚性桩压缩量很小, S_c 和 S_{c2} 均可忽略不计。

2.2 桩土加权平均附加应力

路基下刚性桩复合地基容许沉降较大, 复合地基加固区与路基两侧地基之间的摩擦力可近似认为达到极限侧阻力, 如图 3 所示。

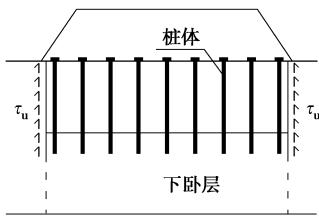


图 3 路堤下刚性桩复合地基两侧摩擦力

Fig. 3 Frictional stresses between rigid-pile composite foundation under embankment and nearby foundation

路基中线附近桩土按面积加权平均的附加应力可近似按下式计算:

$$\sigma_j = p \left(1 - \frac{2}{P} \sum_{i=1}^j \Delta z_i \tau_{ui} \right), \quad (5)$$

式中, σ_j 为第 j 层土处路基中线附近的桩土加权平均附加应力, p 为路基中线附近的荷载集度, P 为路基纵向每延米的路基总荷载, Δz_i 为第 i 层土厚度, τ_{ui} 为第 i 层土的极限侧阻力。

假设下卧层顶面分布着与路堤等宽的梯形荷载, 路基中线附近的荷载集度可按下式计算:

$$p_d = p \left(1 - \frac{2}{P} \sum_{i=1}^{n_l} \Delta z_i \tau_{ui} \right) \quad , \quad (6)$$

式中, p_d 为路基中线附近下卧层顶面荷载集度, n_l 为复合地基加固区土层数。

路基中线附近桩土加权平均附加应力也可近似按下式计算:

$$\sigma_j = p_d \left(1 + \frac{2}{P'} \sum_{i=1}^j \Delta z_i \tau_{ui} \right), \quad (7)$$

$$P' = P \frac{p_d}{p} \quad , \quad (8)$$

式中, P' 为沿路基纵向每延米的下卧层顶面总荷载。

式 (5)、(6) 中 i 自桩顶向下递增, 式 (7) 中 i 自桩底向上递增。

下卧层中的附加应力可根据 p_d 采用 Boussinesq 解计算。

2.3 等沉面法计算复合地基沉降

该方法假设桩身没有等沉区, 只有等沉面, 则桩间土沉降为

$$S_1 = S_{11} + S_{12} \quad , \quad (9)$$

式中, S_{11} 为桩身等沉面以上的桩间土沉降, S_{12} 为桩身等沉面以下的桩间土沉降。

(1) 等沉面深度

根据单桩竖向平衡条件可知, 当满足式 (10) 时, 桩底端发生刺入破坏。

$$P_p + Q_{uk} \leq 2Ap \quad , \quad (10)$$

式中, P_p 为桩顶荷载, Q_{uk} 为单桩竖向极限承载力, A 为单桩负责的面积。

P_p 可采用陈云敏等改进的 HEWLETT 法计算^[15]。

当桩底端发生刺入破坏时, 根据单桩竖向平衡条件可得到负摩擦力的计算公式^[16]

$$Q_s^n = \frac{Q_{uk} - P_p}{2} \quad , \quad (11)$$

式中, Q_s^n 为负摩擦力。

根据 Q_s^n 可以确定桩身等沉面深度 z_e 。

当桩底端不发生刺入破坏时, 为简化计算, 可近似假设桩身等沉面处桩间土附加应力等于零, 结合式 (5) 可得等沉面深度 z_e 的计算公式:

$$\sum_{i=1}^{n_2} \Delta z_i \tau_{ui} = \frac{Ap - P_p}{2Ap + \pi dP} P, \quad (12)$$

式中, n_2 为桩身等沉面以上的土层数, d 为桩直径。

式(12)中 i 自桩顶向下递增, 满足式(12)的深度为 z_e 。

(2) 桩身附加应力

复合地基的刚性桩均为摩擦型桩, 端阻力与正摩阻力发挥程度接近。为简化计算, 可近似假设正摩阻力与端阻力发挥水平相等, 负摩阻力发挥系数等于 1.0。因此, 桩身等沉面以上的桩身附加应力为

$$\sigma_{pj} = \frac{P_p}{A_p} + \frac{\pi d}{A_p} \sum_{i=1}^j \Delta z_i \tau_{ui}, \quad (13)$$

式中, σ_{pj} 为第 j 层土处桩身附加应力, A_p 为桩身横截面面积。

桩身等沉面以下的桩身附加应力为

$$\sigma_{pe} = \sigma_{pe} - \frac{\pi d}{A_p} \sum_{i=1}^j \Delta z_i \tau_i, \quad (14)$$

$$\tau_i = \frac{\tau_{ui}}{K}, \quad (15)$$

$$K = \frac{Q_{uk} - Q_s^n}{P_p + Q_s^n}, \quad (16)$$

式中, σ_{pe} 为桩身等沉面处的桩身附加应力, τ_i 为第 i 层土的桩侧阻力, K 为单桩竖向承载力安全系数。

式(13)中 i 自桩顶向下递增, 式(14)中 i 自桩身等沉面向下递增。

(3) 桩间土附加应力

桩间土附加应力可采用下式计算:

$$\sigma_{sj} = \frac{\sigma_j - m\sigma_{pj}}{1-m}, \quad (17)$$

式中, σ_{sj} 为第 j 层桩间土的附加应力。

等沉面法计算的桩间附加应力沿深度的分布如图 2 中的 ACF 所示。

(4) 复合地基沉降计算

采用分层总和法按式(2)、(9)计算桩间地面沉降, 按式(4)计算桩顶沉降, 按式(1)计算复合地基沉降。当桩底扩径时, 扩底段应采用其相应的桩直径 d_1 、截面面积 A_{p1} 、置换率 m_1 等参数。

2.4 等沉区法计算复合地基沉降

对桩间土压缩模量按土层厚度加权平均得到平均压缩模量, 进而得到桩土模量比, 桩土应力比等于桩土模量比的桩段为桩身等沉区, 因此桩身等沉区的桩身附加应力为

$$\sigma_{pj} = \frac{R_E \sigma_j}{1-m+mR_E}, \quad (18)$$

式中, R_E 为桩土模量比。

桩间土沉降为

$$S_1 = S_{11} + S_e + S_{12}, \quad (19)$$

式中, S_{11} 为桩身等沉区以上的桩间土沉降, S_e 为桩身等沉区的桩间土沉降, S_{12} 为桩身等沉区以下的桩间土沉降。

(1) 等沉区深度

由图 1 可知, 刚性桩两端附近的桩土沉降差较大。为简化计算, 近似假设正、负摩阻力均达到极限状态。设桩身等沉区顶面的深度为 z_{eu} , 由式(5)、(13)、(18)可推导得到 z_{eu} 的计算公式:

$$\sum_{i=1}^{n_2} \Delta z_i \tau_{ui} = \frac{pA_p R_E - P_p(1-m+mR_E)}{P(1-m+mR_E)\pi d + 2pA_p R_E} P, \quad (20)$$

式中, n_2 为桩身等沉区以上的土层数, R_E 为桩土模量比。

式(20)中 i 自桩顶向下递增, 满足式(20)的深度为 z_{eu} 。

文献[17]利用土拱效应计算桩底荷载 P_b , 计算简便。但是, 由于该方法与单桩竖向承载力无关, 当桩顶设置桩帽、桩间距较大时可能出现桩底荷载与桩侧摩阻力之和小于桩顶荷载、桩身等沉区底面的深度 z_{ed} 为负值的不合理情况。

根据式(20)确定的 z_{eu} 计算负摩阻力 Q_s^n , 然后按式(16)计算 K 。如果 $K < 1$, 则桩底端发生刺入破坏, 桩身等沉区的长度变为零, 桩身等沉区变为桩身等沉面。设桩身等沉面的深度为 z_e , 根据单桩竖向平衡条件可得到 z_e 的计算公式:

$$\sum_{i=1}^{n_1} \Delta z_i \tau_{ui} = \frac{P_b + \pi d \sum_{i=1}^{n_1} z_i \tau_{ui} - P_p}{2\pi d}, \quad (21)$$

$$P_b = A_p q_p, \quad (22)$$

式中, P_b 为桩底荷载, q_p 为极限端阻力。

式(21)中 i 自桩顶向下递增, 满足式(21)的深度为 z_e 。

如果 $K > 1$, 桩底端不会发生刺入破坏, 此时桩身附加应力可表示为

$$\sigma_{pj} = \frac{P_b}{A_p} + \frac{\pi d}{A_p} \sum_{i=1}^j \Delta z_i \tau_{ui}, \quad (23)$$

$$P_b = A_p \frac{q_p}{K}, \quad (24)$$

设桩身等沉区底面的深度为 z_{ed} , 由式(7)、(18)、(23)可推导得到 z_{ed} 的计算公式:

$$\sum_{i=1}^{n_3} \Delta z_i \tau_{ui} = \frac{p_d A_p R_E - P_b(1-m+mR_E)}{P'(1-m+mR_E)\pi d - 2p_d A_p R_E} P', \quad (25)$$

式中, n_3 为桩身等沉区以下桩间土层数。

式(23)、(25)中 i 自桩底向上递增, 满足式(25)

的深度为 z_{ed} 。

当桩底扩径时, 先利用扩径后的桩直径 d_1 、截面面积 A_{pl} 、置换率 m_1 分别代替式(24)、(25)的 d 、截面面积 A_p 、置换率 m 并计算 z_{ed} 。如 z_{ed} 小于扩径顶面深度, 由式(7)、(18)、(23)可推导得计算 z_{ed} 的以下公式:

$$\sum_{i=2}^{n_3} \Delta z_i \tau_{ui} = \frac{P_d A_p R_E - P_{bl}(1-m+mR_E)}{P'(1-m+mR_E)\pi d - 2p_d A_p R_E} P' - \frac{P'(1-m+mR_E)\pi d_1 - 2p_d A_p R_E}{P'(1-m+mR_E)\pi d - 2p_d A_p R_E} \Delta z_1 \tau_{ul}, \quad (26)$$

$$P_{bl} = A_{pl} \frac{q_p}{K}, \quad (27)$$

式中, τ_{ul} 为扩径段桩侧极限摩阻力, Δz_1 为扩径段长度。

式(26)中 i 自桩底向上递增, 满足式(26)的深度为 z_{ed} 。

(2) 附加应力

桩身等沉面以上的桩身附加应力按式(13)计算, 桩身等沉区的桩身附加应力按式(18)计算, 桩身等沉区以下的桩身附加应力按式(23)计算。桩间土的附加应力可采用式(17)计算。扩底段应采用其相应参数。等沉区法计算的桩间土附加应力沿深度分布如图2中 $ABEF$ 所示。

(3) 复合地基沉降计算

采用分层总和法按式(2)、(19)计算桩间地面沉降, 按式(4)计算桩顶沉降, 按式(1)计算复合地基沉降。由图2可知, 桩间土实际附加应力介于等沉面法和等沉区法计算的附加应力之间, 因此实际沉降应介于等沉面法和等沉区法计算的沉降之间。稳妥起见, 可采用两者的平均值。

3 工程实例验证

广东省新会一台山高速公路南延线某路段管桩复合地基与排水固结法联合应用。K64+125—K63+136 路基滑塌后卸除路基中线附近未滑塌的路堤土, 根据桩帽前后高程得到路基中线附近的沉降为 1088 mm, 计算得到软土层固结度为 75.9%^[16]。假设实际沉降中软土层沉降与总沉降的比例等于表1中计算的软土层沉降与总沉降比例, 可得路基中线附近实际最终沉降为 1149 mm。

由文献[16]可知, 土拱控制的桩顶荷载大于单桩竖向极限承载力, 桩底端发生刺入破坏, 等沉区长度等于零, 等沉面位于桩顶, 桩顶沉降近似等于桩间地面沉降, 等沉区法和等沉面法计算结果相同。根据文献[16]中的地质资料, 采用附加应力法计算的 K64+

120 路中线附近的桩间土附加应力和沉降见表1, 总沉降为 828 mm。

表 1 桩间土附加应力和沉降

Table 1 Superimposed stresses and settlements of soils among piles

| 土层名 | 厚度 /m | 压缩模量 /MPa | 桩间土附加应力 /kPa | 分层沉降 /mm |
|----------|-------|-----------|--------------|----------|
| 素填土 | 0.65 | 10.3 | 75.3 | 75.3 |
| 粉质黏土 | 0.65 | 2.6 | 84.6 | 84.6 |
| 淤泥 | 9.3 | 1.8 | 87.4 | 87.4 |
| 淤泥质细砂 | 1.2 | 3.8 | 90.1 | 90.1 |
| 淤泥 | 2.3 | 2.0 | 91.5 | 91.5 |
| 中砂 | 1.64 | 20.0 | 93.3 | 93.3 |
| 粉质黏土(桩间) | 2.26 | 3.6 | 98.4 | 98.4 |
| 粉质黏土(桩底) | 1.10 | 3.6 | 118 | 118.0 |
| 全风化层 | 5.0 | 5.0 | 93.6 | 93.6 |

承载力比法计算的沉降为 597 mm, 复合模量法计算的沉降为 155 mm。可见, 附加应力法计算沉降最接近实测沉降, 承载力比法次之, 复合模量法误差最大。

计算沉降小于实测沉降可能的原因有: 计算沉降未考虑地基侧向挤出产生的沉降; 路基滑塌时牵引作用导致路基中心附近沉降偏大; 根据桩帽前后高程确定的沉降存在一定误差。

从该工程实例可知, 计算沉降需要乘以沉降修正系数。由于资料齐全的工程实例较少, 尚不能推荐沉降修正系数取值。

4 算例与参数影响分析

4.1 工程情况

某段路基长 100 m, 路堤顶面宽 26 m, 路堤高 7.3 m(包括路面结构的等效厚度), 路堤坡率为 1:1.5, 路基底面宽 47 m。路堤土重度为 20 kN/m³, 综合内摩擦角为 30°。地基土层情况见表2。

路基采用素混凝土桩复合地基, 桩直径为 0.4 m, 正方形布置, 混凝土强度等级为 C25, 弹性模量为 28000 MPa。桩帽厚度为 0.35 m, 混凝土强度等级为 C25。6 种复合地基方案见表3, 其中方案 5 桩下部 0.5 m 范围内直径扩大至 1.0 m。

表 2 地层情况

Table 2 Conditions of soil strata

| 序号 | 土层名 | 厚度 /m | 极限侧阻力 /kPa | 极限端阻力 /kPa | 压缩模量 /MPa |
|----|------|-------|------------|------------|-----------|
| 1 | 淤泥 | 6 | 12 | — | 1.5 |
| 2 | 淤泥 | 6 | 15 | — | 2.0 |
| 3 | 淤泥 | 6 | 18 | 600 | 2.5 |
| 4 | 粉质黏土 | 10 | 80 | 2500 | 10.0 |
| 5 | 基岩 | — | — | — | — |

表3 CFG 桩复合地基参数

Table 3 Parameters of CFG composite foundation

| 方案 | 桩间距/m | 桩长/m | 桩数/根 | 总桩长/m | 桩帽边长/m |
|----|-------|------|------|-------|--------|
| 1 | 1.2 | 17.0 | 3264 | 55488 | — |
| 2 | 1.2 | 18.5 | 3264 | 60384 | — |
| 3 | 1.2 | 25.0 | 3264 | 81600 | — |
| 4 | 3.0 | 25.0 | 522 | 13050 | 1.8 |
| 5 | 3.0 | 18.5 | 522 | 9657 | 1.8 |
| 6 | 3.0 | 25.0 | 522 | 13050 | — |

4.2 附加应力法计算结果

图4是等沉面法计算的不同方案对应的桩间土和下卧层附加应力。表4是等沉面法的计算参数，其中 R_σ 为桩土加权平均附加应力与桩间土平均附加应力的比值。表5是等沉面法的计算结果。表6是等沉区法的计算参数，表7是等沉区法的计算结果。

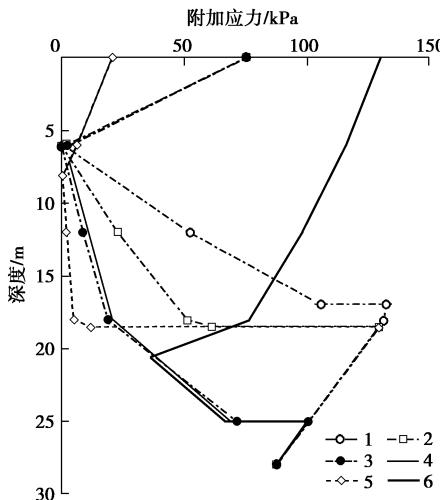


图4 等沉面法计算的桩间土附加应力

Fig. 4 Superimposed stresses of soils among piles by equal settlement plane method
settlement plane method

表4 等沉面法计算参数

Table 4 Indexes of equal settlement plane method

| 方案 | Q_{uk}/kN | P_p/kN | z_e/mm | K | R_σ |
|----|-------------|----------|-----------------|------|------------|
| 1 | 392.1 | 111.4 | 6.13 | 1.46 | 3.03 |
| 2 | 703.7 | 111.4 | 6.14 | 2.99 | 4.64 |
| 3 | 1357.2 | 111.4 | 6.14 | 6.18 | 4.73 |
| 4 | 1357.2 | 1132.9 | 7.15 | 1.00 | 5.87 |
| 5 | 2302.8 | 1132.9 | 8.10 | 1.72 | 23.1 |
| 6 | 1357.2 | 160.6 | 20.58 | 1.00 | 1.35 |

表5 等沉面法计算的沉降

Table 5 Settlements calculated by equal settlement plane method

| 方案 | 桩间土沉降/mm | 桩顶沉降/mm | 复合地基沉降/mm | 软土层沉降/mm |
|----|----------|---------|-----------|----------|
| 1 | 556 | 401 | 542 | 394 |
| 2 | 382 | 228 | 369 | 277 |
| 3 | 259 | 104 | 245 | 199 |
| 4 | 170 | 114 | 169 | 111 |
| 5 | 168 | 112 | 167 | 65 |
| 6 | 1087 | 51 | 1073 | 1022 |

表6 等沉区法计算参数

Table 6 Indexes of equal settlement zone method

| 方案 | z_{eu}/mm | z_{ed}/mm | z_e/mm | K | P_b/kN | R_σ |
|----|--------------------|--------------------|-----------------|------|-----------------|------------|
| 1 | 6.13 | 10.15 | — | 1.46 | 51 | 4.06 |
| 2 | 6.13 | 16.42 | — | 2.99 | 105 | 9.24 |
| 3 | 6.13 | 24.00 | — | 6.19 | 51 | 8.80 |
| 4 | 8.69 | — | 7.15 | 0.95 | 314 | 6.15 |
| 5 | 7.86 | 18.38 | — | 1.73 | 1135 | 19.93 |
| 6 | 24.20 | — | 20.58 | 0.35 | 314 | 1.35 |

表7 等沉区法计算的沉降

Table 7 Settlements calculated by equal settlement zone method

| 方案 | 桩间土沉降/mm | 桩顶沉降/mm | 复合地基沉降/mm | 软土层沉降/mm |
|----|----------|---------|-----------|----------|
| 1 | 459 | 304 | 446 | 350 |
| 2 | 268 | 113 | 255 | 163 |
| 3 | 196 | 33 | 181 | 163 |
| 4 | 161 | 105 | 160 | 103 |
| 5 | 166 | 104 | 165 | 60 |
| 6 | 1087 | 51 | 1073 | 1022 |

采用等沉区法计算时，方案4～方案6的单桩竖向承载力安全系数均小于1，桩身等沉区变为桩身等沉面，等沉面法、等沉区法计算的桩间土附加应力相同；采用等沉区法计算时，方案1～方案3的单桩竖向承载力安全系数均大于1，等沉面法、等沉区法计算的桩间土附加应力不同，见图5。图5中方案号右上角有“’”的为等沉区法计算的桩间土附加应力。

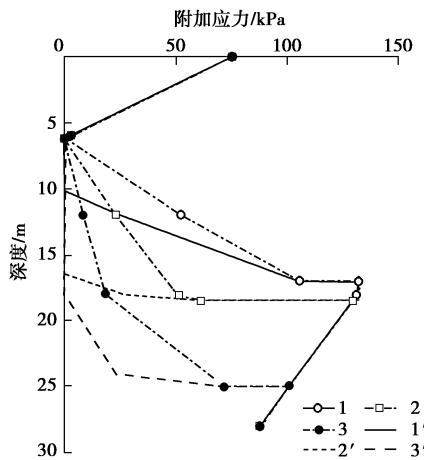


图5 两种方法计算的土中附加应力

Fig. 5 Superimposed stresses on soils calculated by two methods
等沉面法和等沉区法计算的沉降对比见图6。

由表4～7、图4～6可知：

(1) 对疏桩复合地基，等沉区法计算时桩身只有等沉面，等沉面法和等沉区法计算的沉降相等；对密桩复合地基，等沉区法计算时桩身有等沉区，等沉面法计算的沉降大于等沉区法计算的沉降。

(2) 方案1～方案3桩间距相同，等沉面法得到

的三个方案的等沉面位置相同, 等沉面以上附加应力也相同, 方案 1 等沉面以下附加应力和沉降最大, 方案 2 次之, 方案 3 最小, 因此, 增大单桩承载力可有效减少沉降, 应慎用悬浮桩。

(3) 方案 4 桩和方案 5 桩间距相同, 方案 4 桩长比方案 5 多 35%, 但是两者沉降基本相等, 说明持力层扩径比桩加长更经济合理。

(4) 方案 4 和方案 6 桩间距和桩长均相同, 但是未设桩帽的复合地基附加应力和沉降均远大于设置桩帽的复合地基, 说明设置桩帽将大部分路堤荷载转移到桩顶非常重要。

(5) 方案 3 和方案 4 桩长相同, 方案 4 的桩数只有方案 3 的 1/6, 但是方案 4 的沉降小于方案 3, 因此刚性桩宜按带帽疏桩复合地基设计。

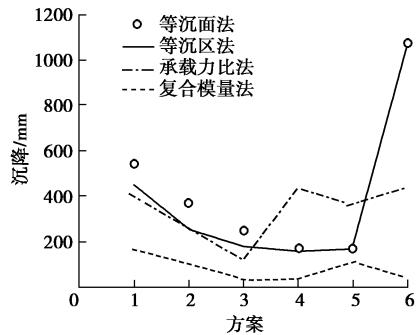


图 6 不同方法计算的沉降

Fig. 6 Settlements calculated by different methods

4.3 现行方法计算沉降

承载力比法计算的沉降见表 8, 复合模量法计算的沉降见表 9。

表 8 承载力比法计算的沉降

Table 8 Settlements calculated by bearing capacity ratio method

| 方案 | 复合地基承载力 / 桩间土承载力 | 复合地基沉降 /mm | 软土层沉降 /mm |
|----|------------------|------------|-----------|
| 1 | 5.33 | 399 | 290 |
| 2 | 8.80 | 253 | 150 |
| 3 | 16.15 | 115 | 82 |
| 4 | 3.43 | 436 | 384 |
| 5 | 5.13 | 361 | 256 |
| 6 | 3.43 | 436 | 384 |

表 9 复合模量法计算的沉降

Table 9 Settlements calculated by composite modulus method

| 方案 | 复合地基模量 / 桩间土模量 | 复合地基沉降 /mm | 软土层沉降 /mm |
|----|----------------|------------|-----------|
| 1 | 1241 | 163 | 54 |
| 2 | 1103 | 105 | 1 |
| 3 | 577 | 30 | 1 |
| 4 | 93 | 37 | 6 |
| 5 | 177 | 109 | 6 |
| 6 | 93 | 37 | 6 |

由表 8、9 和图 6 可知:

(1) 复合模量法计算的沉降最小, 与附加应力法计算的沉降差别较大。

(2) 对密桩复合地基, 承载力比法计算沉降与等沉区法计算沉降接近; 对疏桩复合地基, 承载力比法与附加应力法计算沉降差别较大。

(3) 由方案 4 和方案 6 可知, 与附加应力法不同, 承载力比法和复合模量法不能反映桩帽等基础向桩顶转移荷载能力对沉降的影响。

(4) 当复合地基应力与桩间土应力的比值和复合地基承载力与桩间土承载力的比值接近时, 承载力比法计算的沉降与附加应力法计算的沉降仍可能不接近。

5 结 论

(1) 附加应力法可以考虑单桩承载力、基础转移荷载能力、桩土相互作用等重要因素, 合理简便。

(2) 利用桩帽等基础将路堤大部分荷载转移到桩顶可以有效减小路基沉降。

(3) 持力层扩底比桩长加大更经济合理。

(4) 按“强桩、大间距、大帽”原则设计的复合地基比密桩复合地基更经济合理。

参考文献:

- [1] BS8006—1:2010 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S]. 2010.
- [2] TB 10106—2010, J1078—2010 铁路工程地基处理技术规程 [S]. 2010. (TB 10106—2010, J1078—2010 Technical code for ground treatment of railway engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [3] JTGT D31—02—2013 公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S]. 2013. (JTGT D31—02—2013 Technical guidelines for design and construction of highway embankment on soft ground[S]. 2013. (in Chinese))
- [4] 徐小庆, 刘吉福. 简桩复合地基和 CFG 桩复合地基处理公路软基效果对比[J]. 水运工程, 2010(8): 129 - 132. (XU Xiao-qing, LIU Ji-fu. Comparison of performance of pipe pile composite ground and CFG pile composite ground under embankment of highway[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(8): 129 - 132. (in Chinese))
- [5] 刘吉福. 路堤下复合地基“三等沉区模型”[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 796 - 802. (LIU Ji-fu. Three-equal-settlement-zone model for composite ground under embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S0): 796 - 802. (in Chinese))
- [6] 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, ZHANG Guo-tang, et al. Study on

- calculation method of settlement of CFG pile-net composite foundation[J]. Railway Engineering, 2009(7): 19 - 23. (in Chinese))
- [7] 齐昌广, 刘汉龙, 陈永辉, 等. 塑料套管混凝土桩承载试验及沉降计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2302 - 2308. (QI Chang-guang, LIU Han-long, CHEN Yong-hui, et al. Bearing capacity tests and settlement calculation method of plastic tube cast-in-place concrete pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2302 - 2308. (in Chinese))
- [8] 何 宁, 娄 炎. 路堤下刚性桩复合地基的设计计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 797 - 802. (HE Ning, LOU Yan. Design and calculation method for rigid pile composite foundation under embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 797 - 802. (in Chinese))
- [9] 王明山. 复合地基桩土承载力发挥系数的研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2005. (WANG Ming-shan. Study on the effect of piles and soil in composite foundation[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2005.(in Chinese))
- [10] 赵 阳. 岸边软土区带帽刚性桩复合地基模型试验与理论研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015. (ZHAO Yang. Experimental and theoretical study of capped rigid pile composite foundation in soft soil area[D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese))
- [11] 王长丹, 王炳龙, 王 旭, 等. 湿陷性土桩网复合地基沉降控制离心模型试验[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 84 - 92. (WANG Chang-dan, WANG Bin-long, WANG Xu, et al. Analysis on settlement controlling effect of pile-net composite foundation on collapsible loess by centrifugal model tests[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4): 84 - 92. (in Chinese))
- [12] 李永国. 刚性桩承式加筋路堤承载与变形机制研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. (LI Yong-guo. Study on the load-bearing and deformation mechanism of rigid pile-supported and geosynthetic-reinforced embankment[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese))
- [13] 向先超, 朱长歧. 悬浮桩复合地基内部变形特性试验研究 [J]. 公路, 2009(3): 75 - 78. (XIANG Xian-chao, ZHU Chang-qi. Test and study on internal deformation feature of hanging pile composite roadbed[J]. Highway, 2009(3): 75 - 78. (in Chinese))
- [14] 陈桂奇, 戴济群, 唐彤芝, 等. CFG 桩复合地基处理高速公路深厚软基试验研究[J]. 岩土工程界, 2008, 11(3): 71 - 75. (CHEN Gui-qi, DAI Ji-qun, TANG Tong-zhi, et al. Experimental study on CFG pile composite foundation to treat thick soft soil of expressway[J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 11(3): 71 - 75. (in Chinese))
- [15] 陈云敏, 贾 宁, 陈仁朋. 桩承式路堤土拱效应分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 1 - 6. (CHEN Yun-min, JIA Ning, CHEN Ren-peng. Soil arch analysis of pile supported embankments[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 1 - 6. (in Chinese))
- [16] 刘吉福, 郭舒洋, 肖昌建. 修正密度法分析混凝土桩复合地基路基绕流滑动稳定性[J]. 广东公路交通, 2016(5): 12 - 20. (LIU Ji-fu, GUO Shu-yang, XIAO Chang-jian. Revised density method for stability analysis of flow slide of embankment with concrete-pile composite foundation[J]. Guangdong Highway Communications, 2016(5): 12 - 20. (in Chinese))
- [17] 刘吉福, 郑 刚, 安关峰. 路堤下刚性桩复合地基沉降计算简易方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(增刊): 92 - 98. (LIU Ji-fu, ZHENG Gang, AN Guan-feng. A simple settlement calculation method for rigid-piles composite ground under embankment[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(S0): 92 - 98. (in Chinese))