

DOI: 10.11779/CJGE201911003

单桩承载力对刚性桩复合地基路堤稳定性的影响

刘吉福¹, 郑刚²

(1. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 现行规范中刚性桩复合地基路堤稳定分析方法不能反映单桩承载力、桩帽等对路堤稳定性的影响, 计算的路堤稳定安全系数严重偏大, 导致部分刚性桩复合地基路堤滑塌。为克服刚性桩复合地基路堤现有稳定分析方法的缺陷, 在研究刚性桩复合地基路堤滑塌原因的基础上, 分析了路堤滑塌时桩土相互作用, 及刚性桩提高路堤稳定性的机理。然后, 在分析刚性桩复合地基路堤现有稳定分析方法的缺陷的基础上, 将修正密度法完善为修正重度法。最后, 为研究单桩承载力对刚性桩复合地基路堤稳定性的影响, 利用修正重度法分析了刚性桩长度、间距、扩底、桩帽等对路堤稳定性的影响, 对比了不同稳定分析方法计算结果, 并对刚性桩复合地基路堤设计提出了建议。研究表明: 单桩承载力对密桩复合地基路堤稳定性影响很小, 对疏桩复合地基路堤稳定性影响很大; 增大单桩承载力比减小桩间距更合理; 刚性桩在持力层中扩底比加大桩长更有效; 利用桩帽、土拱等措施将大部分路堤荷载转移到桩顶方可发挥单桩承载力对路堤稳定性的作用; 软土强度随深度增大不明显时应慎用悬浮桩复合地基。刚性桩复合地基路堤宜采用“强桩大帽”的疏桩复合地基方案。

关键词: 刚性桩; 承载力; 路基; 稳定性; 悬浮桩; 修正重度法; 扩底桩; 桩帽

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)11-1992-08

作者简介: 刘吉福(1971—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事公路设计与科研等工作。E-mail: 617067152@qq.com。

Influences of bearing capacity of piles on stability of embankment with rigid pile composite foundation

LIU Ji-fu¹, ZHENG Gang²

(1. Guangdong Province Communication Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510507, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The influences of bearing capacity and cap of rigid piles on the stability of embankment with rigid pile composite foundation cannot be taken into account in the methods recommended by the existing Chinese codes. Some embankments with rigid pile composite pile foundation slid owing to that the factor of safety gotten by those methods is much larger than the real value. To avoid the defects of the existing methods, the interactions between the piles and the soil among piles during sliding are analyzed, and the mechanism of improving the embankment stability by rigid piles is analyzed by analyzing the causes of slides. Then the revised density method is improved to be the revised weight method by analyzing the defects of the existing stability methods. Finally, the influences of the length, distance, enlarged base and cap of rigid piles on the embankment stability are studied by use of the revised weight method, and the influences of their bearing capacity on embankment stability are evaluated. The analysis results of different methods are compared. Some design proposals for the embankment with rigid pile composite foundation are put forward. It is shown that the influences of bearing capacity of piles on the stability of embankment with dense pile composite foundation are little but great on the embankment with sparse pile composite foundation. Increasing the bearing capacity of piles is more reasonable than decreasing the distance of piles. The belled piles are more efficient than those increasing their length. The rigid piles with large bearing capacity can play an important role to increase the stability of embankment only if most loads of embankment are transferred to the piles by pile caps and soil arch. The hanging piles should not be used if the strength of soft clay increases little along depth. The rigid pile composite foundation under embankment should be designed as the sparse pile composite foundation with large bearing capacity and pile cap.

Key words: rigid pile; bearing capacity; embankment; stability; hanging pile; revised weight method; belled pile; pile cap

0 引言

近十几年来, 预制桩、灌注桩、注浆桩、组合桩

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078263)

收稿日期: 2019-02-18

等刚性桩越来越多地用于路堤地基处理, 特别是既有软基路堤改扩建工程。国外对刚性桩路堤普遍按桩承堤设计, 其中刚性桩按基桩设计, 桩间荷载和附加应力很小, 基本不需考虑路堤稳定问题^[1]。为控制沉降, 中国高速铁路对刚性桩路堤通常也按桩承堤设计^[2]。公路、普通铁路、城市道路一般路段路基容许工后沉降通常大于 30 cm, 刚性桩路堤按复合地基设计可充分利用天然地基承载能力、有效降低工程造价。另外, 桥涵附近的过渡段刚性桩路堤为实现工后沉降平顺过渡, 必须按复合地基设计^[3-8]。大部分刚性桩复合地基路堤是成功的, 但也出现不少路堤滑塌、开裂、沉降过大等事故^[4-8], 导致广东省、浙江省等地都针对刚性桩复合地基在路基工程中应用进行了限制。

众多学者对刚性桩复合地基路堤稳定性开展了研究。郑刚等^[9-10]、李帅^[11]、刘力^[12]、熊传祥等^[13]、王哲明等^[14]利用离心试验、数值分析等方法研究了刚性桩抗弯承载力对路堤稳定性的影响, 研究表明受弯断裂是路堤刚性桩的主要破坏模式, 且刚性桩发生渐进性破坏, 不同部位的刚性桩对路堤稳定性的作用不同。刘吉福等^[8]提出的修正密度法可以合理分析滑塌工程稳定性, 但刚性桩承载力发挥程度远大于桩间土承载力发挥程度的路堤计算的安全系数偏大。文献[15]对修正密度法进行了改进, 但不适用横断面局部采用刚性桩复合地基的路段。文献[6, 7]提出的稳定分析方法是修正密度法的雏形, 但将稳定分析的中性面、摩擦力与沉降计算的中性面、摩擦力混淆了。俞建霖等将受压区刚性桩抗滑力矩取滑动面以下承载力与力臂之积^[16]。上述研究大部分未考虑刚性桩竖向承载力对稳定性的影响, 文献[16]考虑了滑动面以下桩段承载力的影响, 但未考虑桩帽的影响, 不能考虑实际发挥的承载力。

在研究刚性桩复合地基路堤滑塌原因的基础上, 分析了路堤滑塌时桩土之间的作用力, 及刚性桩提高路堤稳定性的机理, 指出了现有稳定分析方法的缺陷, 将修正密度法完善为修正重度法。利用修正重度法分析了单桩承载力对路堤稳定性的影响, 对刚性桩复合地基路堤设计提出了建议。

1 刚性桩提高路堤稳定性的机理

1.1 刚性桩复合地基路堤滑塌原因

刚性桩抗剪强度非常高, 刚性桩复合地基路堤通常不会产生整体剪切滑动。滑塌案例、离心模型试验等均表明, 刚性桩复合地基路堤滑塌的主要原因是刚性桩竖向承载力不足或桩帽太小导致桩间土附加应力过大, 引起较大的桩间土沉降和位移, 桩间土出现绕流滑动趋势甚至绕流滑动^[6-7]。桩间土水平位移或绕流

滑动时对刚性桩产生较大水平推力, 刚性桩受弯断裂或倾倒(如图 1 所示), 最终导致路堤滑塌。因此, 刚性桩受弯断裂是路堤滑塌的中间环节, 其前面环节是桩间土因附加应力过大出现绕流滑动趋势或绕流滑动, 其后面环节是路堤滑塌。因此, 避免刚性桩复合地基路堤滑塌的关键措施是避免桩间土附加应力过大, 评价刚性桩复合地基路堤稳定性的主要指标是桩间土绕流滑动稳定性。

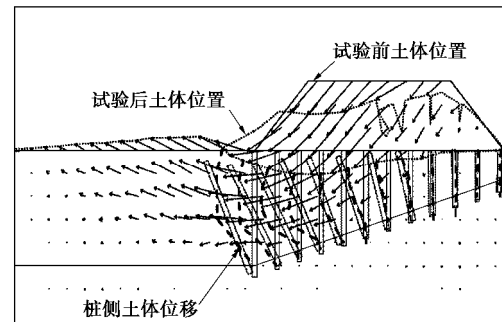


图 1 离心模型试验得到的滑塌路堤桩土位移关系
Fig. 1 Displacements of rigid piles and soils of sliding embankment gotten by centrifugal model tests

1.2 刚性桩提高路堤稳定性的机理

路堤出现绕流滑动趋势或绕流滑动时, 桩间土水平位移大于刚性桩水平位移, 滑动面圆心内侧桩间土沉降, 圆心外侧桩间土隆起。由图 2 可知, 滑动面圆心内侧刚性桩对路堤和桩间土的作用力包括: 桩帽对路堤的顶力 P_p 、滑动面或压中性面(压中性面高于滑动面时)以上的向上的摩擦力 t 、滑动面或压中性面(压中性面高于滑动面时)以下的向下的摩擦力 t 、水平力 q_h 、对桩底土的 Q_{pk} 。 P_p 、 q_h 及向上的摩擦力阻止桩间土和路堤滑动, 向下的摩擦力和 Q_{pk} 促进桩间土滑动。用于地基处理的刚性桩能承受的 q_h 很小, 可忽略不计。因此, 滑动面圆心内侧刚性桩主要通过桩帽顶力 P_p 和向上的摩擦力 t 阻止桩间土下沉、提高路堤稳定性。

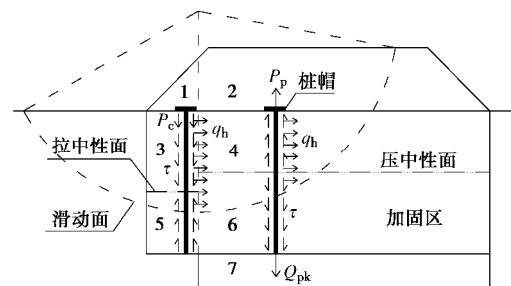


图 2 桩对滑动体的作用力

Fig. 2 Forces to sliding mass by rigid piles

滑动面圆心外侧刚性桩属于抗拔桩, 对桩间土的作用力有: 桩帽对桩间土的顶力 P_p 、滑动面或拉中性面(拉中性面高于滑动面时)以上的向下的摩擦力 t 、

滑动面或拉中性面（拉中性面高于滑动面时）以下的向上的摩擦力 t 、水平力 q_h 。 P_c 、 q_h 和向下的摩擦力阻止桩间土绕流滑动。同理， q_h 可忽略不计，滑动面圆心外侧刚性桩主要通过 P_c 和向下的摩擦力阻止桩间土隆起、提高路堤稳定性。圆心外侧桩阻止桩间土隆起的能力不但取决于 P_c 和向下的 t ，而且还取决于桩身抗拉能力。当圆心外侧桩的上拔力大于桩身抗拉能力时，刚性桩会断裂。由于刚性桩抗拉能力较小，圆心外侧的刚性桩抗滑能力较小。

多个滑塌路堤表明，刚性桩复合地基路堤滑动面比天然地基路堤滑动面更靠近路肩（图3），滑动面圆心外侧的刚性桩较少。因此，刚性桩复合地基路堤主要通过滑动面圆心内侧刚性桩的 P_p 和向上的 t 承担大部分路堤荷载、减小桩间荷载来提高路堤稳定性。



(a) XT高速公路



(b) GZB高速公路

图3 刚性桩复合地基路堤滑塌范围

Fig. 3 Sliding range of embankment with rigid pile composite foundation

2 现有稳定分析方法缺陷

2.1 复合抗剪强度法

将刚性桩看作“剪力键”，假设桩土一起剪切破坏^[3]。刚性桩抗滑作用与桩帽大小、单桩承载力、滑动面下桩段长度等均没有关系。每根桩处只设置1根钢筋，稳定安全系数也满足要求，明显不合理。

2.2 折减荷载法（等效荷载法）

根据桩间荷载率折减路堤高度后将地基看作天然地基^[7]，未考虑桩土作用对路堤稳定性影响。

2.3 砂桩法

认为路堤滑塌前刚性桩已经断裂，将刚性桩看作“砂桩”，桩土应力比取5.8~8.4^[18]。离心模型试验揭

示刚性桩在软土层中部和底部附近断裂（见图4），且断裂面多水平，与滑动面位置和方向均不一致，滑动面处仍是完整桩段^[19]。因此“砂桩法”与实际情况不符，许多正在安全运营的高填方刚性桩复合地基路堤采用“砂桩法”计算的稳定安全系数小于1.0，说明“砂桩法”过于保守。



(a) 软土厚度不变路堤



(b) 软土厚度变化路堤

图4 刚性桩断裂形状

Fig. 4 Crack behavior of rigid piles

2.4 抗滑桩法

根据刚性桩在滑动面受弯断裂时滑动面内桩土水平力计算到刚性桩等效抗剪强度^[11]，其实质是将刚性桩看作抗滑桩，未考虑桩顶竖向力的抗滑作用，得到的稳定安全系数严重偏小。

2.5 支撑法

将刚性桩看作阻止滑动体滑动的“支撑”，并将桩简化为滑动体的支顶力^[1]。该方法未考虑支顶力会减少滑动面上桩间土法向应力及相应的摩擦力；未考虑桩顶力与向上的摩擦力之和小于滑动面以下桩段承载力的情况；未考虑纵向间距对稳定的影响；未考虑桩所占空间对土体黏聚力的减少；只能判断路堤稳定性是否满足要求，无法计算具体的安全系数。

3 修正重度法

修正密度法克服了支撑法的缺点，且可直接利用现有路堤稳定分析软件分析刚性桩复合地基路堤的稳定性，并经多个滑塌路堤验证^[8, 15]。由于桩、土承载力发挥程度往往不同，为得到路堤稳定安全系数 F_s ，需对路堤土密度乘以不同的 F_s 进行试算，直至绕流滑动安全系数 F_f 等于1.0。文献[8]中 F_s 取1，将 F_f 作为

路堤稳定安全系数, 可用于判断路堤是否滑动, 但是当单桩承载力发挥程度远大于桩间土承载力发挥程度时, 计算的稳定安全系数偏大。以一极端案例说明: 地基软土层厚 20 m, 软土抗剪强度为 1 kPa。路堤高 5 m, 采用扩底桩+桩帽方案, 单桩极限承载力为 900 kN, 软土层桩侧阻力为 0。桩间荷载集度为 1 kPa, 桩顶荷载等于其极限承载力。按文献[8]中修正密度法计算的稳定安全系数为 5.14。由于刚性桩承载力安全系数为 1.0, 继续加载时新增荷载全部由桩间土承担。新增荷载集度 4.25 kPa 时, 路堤稳定安全系数就小于 1.0 了, 很显然, 路堤稳定安全系数 5.14 是不合理的。其主要原因是文献[8]中修正密度法未考虑单桩承载力安全系数对路堤稳定性的影响。

对路堤密度乘以 F_s 可以增大路堤荷载, 可以同时增大桩间土和桩顶荷载, 从而考虑单桩承载力对路堤稳定性的影响。文献[15]先对路堤密度乘以 F_s 再进行绕流滑动稳定分析, 将 F_f 等于 1 时的 F_s 作为路堤稳定安全系数, 但未给出具体计算方法, 且不适用横断面局部采用刚性桩复合地基的路段。下面针对横断面局部地基处理的情况提出对策, 给出 F_s 的计算方法, 并改称修正重度法以适应工程界广泛采用重度的现状。

3.1 路堤分区

对横断面局部设置刚性桩复合地基的改扩建路堤、山区半填半挖路堤, 为合理稳定分析, 应根据路堤情况进行分区。可能的区域有坡脚外未加固区、边坡未加固区、边坡加固区、路肩内加固区、路肩内未加固区等, 如图 5 所示。桩间距、桩长或单桩承载力不同时也应单独分区。路堤下均布置刚性桩时, 可只划分为加固区和未加固。

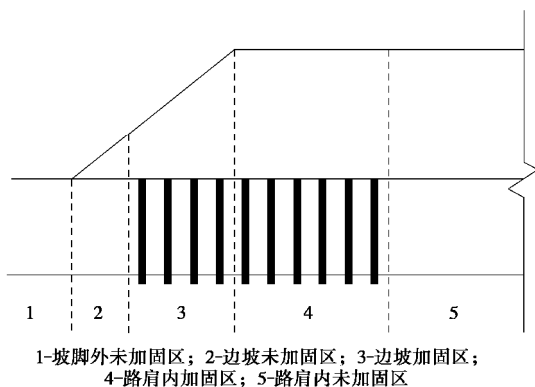


图 5 路堤分析

Fig. 5 Zones of embankment

3.2 土拱控制的桩顶荷载

滑动面圆心外侧的桩间土隆起, 土拱拱脚位于桩间土上, 桩顶荷载很小, 可以忽略不计。

滑动面圆心内侧的刚性桩复合地基区域, 土拱控

制的桩顶荷载 P_{pa} 宜采用路堤设计重度按土拱效应计算^[20]。对土拱高度, 北欧 Nordic 假定桩网复合地基平面土拱的形式为三角形楔体^[21], 顶角取 30° , 土拱高度为桩帽净间距的 1.87 倍。考虑空间拱因素, 对 2 倍桩(帽)净间距高度范围的填料按厚度加权平均确定土拱高度内的综合内摩擦角 j , 即

$$\tan j = \frac{h_m \tan j_m + [2(D-b) - h_m] \tan j_f}{1(D-b)}, \quad (1)$$

式中 h_m 为褥垫层厚度; j_m 为褥垫层内摩擦角; D 为桩间距; b 为桩帽边长; f_f 为褥垫层以上填料内摩擦角。

3.3 路堤稳定安全系数 F_s 试算过程

(1) 对每个刚性桩复合地基区域, 桩顶荷载 P_p 取 $F_s P_{pa}$ 与单桩竖向极限承载力 Q_{uk} 中的小者。

(2) 对圆心内侧的刚性桩复合地基区域, 中性面应根据式(2)计算的负摩擦力确定。

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

式中, Q_s^n 为单桩负摩擦力。

对圆心外侧的刚性桩复合地基区域, 中性面应利用桩身正摩擦力确定。桩身正摩擦力取式(3), (4)计算值的小者, 小于零时取零。

$$Q_s^p = \frac{Q_{sk} - (A_c - A_p) f_{su}}{2}, \quad (3)$$

$$Q_s^p = \frac{Q_{tk} - (A_c - A_p) f_{su}}{2}. \quad (4)$$

式中 Q_s^p 为正摩擦力; Q_{sk} 为总极限摩阻力; A_c 为桩帽面积; A_p 为桩身横界面面积; f_{su} 为桩间土极限承载力; Q_{tk} 为刚性桩抗拉断极限承载力。

(3) 对每个刚性桩复合地基区域, 路堤土修正重度表示如下:

$$g_{fr} = F_s g_f \frac{F_s P_u - P_p}{F_s P_u}, \quad (5)$$

$$g_{idr} = F_s g_{id} (1 - m_p) + \frac{u_p t}{A_u}. \quad (6)$$

式中 g_{fr} 为桩帽上路堤土修正重度; g_f 为桩帽上路堤土设计重度; P_u 为利用路堤设计重度计算的单桩分担面积内桩帽以上荷载; g_{idr} 为桩间路堤土修正重度; g_{id} 为桩间路堤土设计重度; m_p 为桩置换率; u_p 为桩周长; t 为桩侧摩擦力, 圆心内侧中性面以上取负值, 圆心外侧中性面以上取正值; A_u 为单桩分担面积。

(4) 对每个刚性桩复合地基区域, 桩间地基土修正重度为

$$g_{sr} = g_s (1 - m_p) + \frac{u_p t}{A_u}, \quad (7)$$

式中, g_{sr} 为地基土修正重度, g_s 为地基土重度。

(5) 对每个刚性桩复合地基区域, 刚性桩未穿透软土层时, 桩端土修正重度为

$$g_{sr} = g_s + \frac{Q_{pk}}{D^2 T_e}, \tag{8}$$

式中, Q_{pk} 为总极限端阻力, T_e 为桩端土厚度, 可取 0.5~1.0 m。

(6) 对每个刚性桩复合地基区域, 桩间土黏聚力、不排水抗剪强度修正值为

$$c_r = c(1 - m_p), \tag{9}$$

$$C_{ur} = C_u(1 - m_p). \tag{10}$$

式中 c_r 为黏聚力修正值; c 为黏聚力; C_{ur} 为不排水抗剪强度修正值; C_u 为不排水抗剪强度。

(7) 忽略桩, 刚性桩复合地基区域采用 g_{fr} , g_{fdr} , g_{sr} , c_r , C_{ur} , 其他区域采用未修正指标, 利用稳定分析软件计算绕流滑动安全系数 F_f 。

(8) 当 F_f 大于 1.0 时, 应增大 F_s ; 当 F_f 小于 1.0 时, 应减小 F_s , 然后重复步骤 (1)~(7), 直至 F_f 与 1.0 的偏差小于 0.005。

(9) 当试算得到的 F_s 小于 1.0 时, 尚需分析桩(帽)以上路堤自身的稳定性, 此时地基土黏聚力取值不宜小于 100 kPa。

当只需要验证路堤稳定安全系数是否大于规范要求的安全系数[F_s]时, F_s 直接取[F_s], 按步骤 (1)~

(7) 计算的 F_f 大于 1.0 时, 满足规范要求, 否则不满足规范要求。

3.4 修正重度法验证

采用修正重度法分析文献[8]中的工程案例, 得到的稳定安全系数见表 1。4 个位于滑塌范围的断面路堤稳定安全系数平均值为 1.020, 与工程实际情况相符, 证实了该方法的可行性。

表 1 滑塌路基稳定分析结果

Table 1 Results of stability analysis for sliding embankment

序号	断面	Q_{uk}/kN	P_u/kN	F_s
1	K64+080	590	827	0.980
2	K64+100	590	880	0.959
3	K64+120	686	1215	1.221
4	K64+160	536	1166	0.921

4 单桩承载力对路堤稳定性影响

为研究单桩竖向承载力对路堤稳定性的影响, 利用修正重度法分析桩长、间距、扩底、桩帽等对稳定安全系数的影响。

某段路堤长 100 m, 顶宽 26 m, 高 9 m (包括路面和汽车荷载等效厚度), 边坡坡率 1:1.5。地基土层见表 2。软土和粉质黏土的不排水抗剪强度 C_u 与桩侧摩阻力 q_s 相等。

表 2 地层情况

Table 2 Conditions of strata

土层名	厚度/m	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	q_s/kPa	q_p/kPa
淤泥	6	15.6	12	—
淤泥	6	16.0	15	—
淤泥	6	16.3	18	600
粉质黏土	10	18.0	80	2500

复合地基中 C30 素混凝土桩按正方形布置, 桩直径为 0.4 m。桩帽厚 0.35 m。桩帽顶面以下工作垫层厚 1 m, 重度 $g_{fd}=18 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c_{fd}=15 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $j_{fd}=15^\circ$, 桩侧摩阻力 $q_s=30 \text{ kPa}$ 。桩帽顶面铺设 0.5 m 厚的碎石垫层, 重度 $g_c=20 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c_c=0 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $j_c=35^\circ$ 。褥垫层以上路堤土重度 $g_f=20 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c_f=20 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $f_f=20^\circ$ 。9 种复合地基方案见表 3, 其中方案 8 桩底部 0.5 m 范围扩径至 1.0 m。

表 3 素混凝土桩复合地基参数

Table 3 Parameters of concrete pile composite foundation

方案	间距/m	桩长/m	Q_{uk}/kN	桩帽边长/m
1	1.2	18.0	429.8	—
2	1.2	19.5	741.4	—
3	1.2	25.0	1294.3	—
4	2.4	18.0	429.8	1.2
5	2.4	19.5	741.4	1.2
6	2.4	25.0	1294.3	1.2
7	3.0	25.0	1294.3	1.5
8	3.0	19.5	2466.2	1.5
9	3.0	25.0	1294.3	—

按照修正重度法、文献[8]中修正密度法得到的路堤稳定分析结果见表 4 和图 6。

表 4 修正重度法稳定分析结果

Table 4 Results of stability analysis

方案	修正重度法		修正密度法	
	F_s	滑弧深度/m	F_s	滑弧深度/m
1	0.935	6.0	0.937	6.0
2	0.935	6.0	0.937	6.0
3	0.935	6.0	0.937	6.0
4	0.785	18.0	0.716	18.0
5	1.090	18.0	1.190	18.0
6	1.603	18.0	1.733	6.0
7	1.239	18.0	1.576	6.0
8	1.560	6.0	1.576	6.0
9	0.559	6.0	0.579	11.4

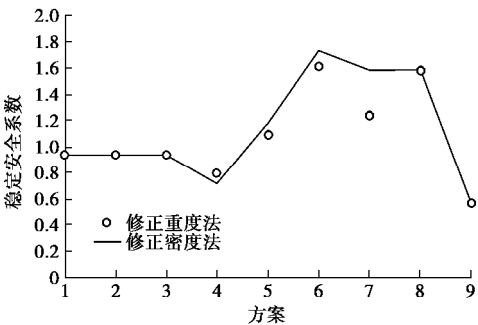


图 6 两种方法的稳定安全系数

Fig. 6 Factors of safety by two methods

由表 3, 4 和图 6 可知:

(1) 除方案 7 外, 修正重度法与修正密度法稳定安全系数接近。按路堤设计重度, 方案 7, 8 土拱效应控制的桩间荷载均为 61.5 kPa, 桩顶荷载均为 1025.1 kN, 此时方案 7 单桩承载力安全系数为 1.26, 方案 8 单桩承载力安全系数为 2.41, 因此方案 8 的路堤稳定安全系数应大于方案 7。按文献[8]中修正密度法计算的方案 7 路堤稳定安全系数却与方案 8 相同。因此, 修正重度法更能合理反映单桩承载力对路堤稳定性的影响。

(2) 方案 1~3 均采用密桩复合地基, 三个方案单桩承载力差别悬殊, 但路堤稳定安全系数相等, 其主要原因是密桩复合地基路堤最危险滑动面深度较小, 受桩长和单桩承载力影响较小。

(3) 方案 4, 5 为桩间距相同的疏桩复合地基。方案 4 桩长为方案 5 的 92.3%, 方案 4 单桩承载力为方案 5 的 58.0%, 方案 4 路堤稳定安全系数为方案 5 的 72.0%。因此, 单桩承载力对疏桩复合地基路堤稳定性影响较大, 软土强度随深度增大不明显时应慎用悬浮桩复合地基。

(4) 方案 5, 6 桩间距相同, 桩帽也相同, 但方案 6 单桩承载力是方案 5 的 1.746 倍, 方案 6 路堤稳定安全系数是方案 5 的 1.471 倍。因此, 单桩承载力对疏桩复合地基路堤稳定性影响较大。

(5) 方案 7, 8 为桩间距相同的疏桩复合地基。方案 7 桩长是方案 8 的 1.28 倍, 方案 7 单桩承载力是方案 8 的 52.5%, 方案 7 路堤稳定安全系数是方案 8 的 79.4%。因此, 单桩承载力对疏桩复合地基路堤稳定性影响较大, 持力层扩底桩比桩长加大更有效。

(6) 方案 2, 5 单桩承载力相同, 方案 2 刚性桩数量为方案 5 的 4 倍, 但方案 2 路堤稳定安全系数为方案 2 的 85.8%; 方案 3, 7 单桩承载力相同, 方案 3 刚性桩数量为方案 7 的 6.25 倍, 但方案 3 路堤稳定安全系数为方案 7 的 75.5%。因此, 对路堤稳定性而言, 设置桩帽的疏桩复合地基优于密桩复合地基。

(7) 方案 7, 9 为桩间距、桩长、单桩承载力均相同的疏桩复合地基, 但方案 9 路堤稳定安全系数只有方案 7 的 45.1%。因此, 单桩承载力对疏桩复合地基路堤稳定性的作用与桩帽有关。只有利用桩帽将路堤大部分荷载转移到桩顶时, 单桩承载力对路堤稳定性的作用才能有效发挥。

综上所述, 从路堤稳定性角度出发, 刚性桩复合地基路堤采用“强桩大帽”的疏桩复合地基方案更合理。

设计时宜根据工程经验选择桩间距、桩帽尺寸的

取值范围, 然后利用修正重度法进行稳定分析, 利用附加应力法计算沉降^[22], 然后选择路堤稳定性、工后沉降均满足要求且造价最低的桩间距、桩帽尺寸取值。

5 其他方法稳定分析结果

为对比不同稳定分析方法的区别, 对表 3 中的方案采用其他方法进行稳定分析。

加固区复合黏聚力根据桩土面积加权得到, 复合内摩擦角的计算如下:

$$\tan j_{sp} = \frac{(1 - m_p) \tan j_s + m_p n \tan j_p}{1 - m_p + m_p n} \quad (11)$$

式中 j_{sp} 为复合内摩擦角; j_s 为土的内摩擦角; n 为桩土应力比; j_p 为桩的内摩擦角。

复合抗剪强度法中取桩身黏聚力取 15000 kPa, 内摩擦角取 0°; 砂桩法中断桩黏聚力取 0 kPa, 内摩擦角取 30°, 桩土应力比取 7。表 5 中 F_{s1} 是复合抗剪强度法计算的路堤稳定安全系数, F_{s2} 是砂桩法稳定安全系数, F_{s3} 是折减荷载法稳定安全系数。不同方法得到的路堤稳定安全系数见图 7。

表 5 其他方法稳定分析结果

Table 5 Results of stability analysis

方案	F_{s1}	F_{s2}	F_{s3}
1	1.694	0.862	0.767
2	1.694	0.886	0.767
3	1.694	0.886	0.767
4	1.694	0.646	1.460
5	1.694	0.647	1.460
6	1.694	0.647	1.460
7	1.694	0.603	1.405
8	1.694	0.603	1.405
9	1.694	0.603	0.536

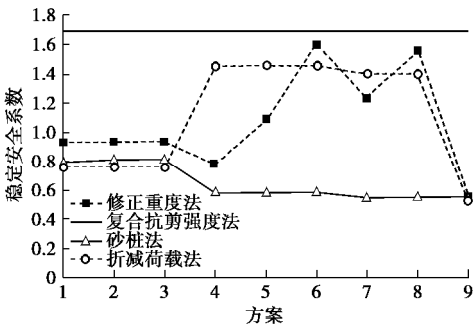


图 7 不同方法稳定分析结果

Fig. 7 Results of stability analysis by differential methods

由表 5 和图 7 可知:

(1) 复合抗剪强度法对所有方案的路堤稳定安全系数均相等, 且最危险滑动面均位于路堤内, 不能反映单桩承载力、桩帽、桩间距、桩长的影响, 得到的稳定安全系数偏大。

(2) 砂桩法得到的路堤稳定安全系数均小于 1.0, 不能合理反映单桩承载力的影响, 不能反映桩帽的影响。

(3) 折减荷载法可反映桩帽的影响, 但不能合理反映单桩承载力的影响。

6 结 论

在分析刚性桩提高路堤稳定性机理的基础上, 分析了现有稳定分析方法的缺陷, 将修正密度法完善为修正重度法, 分析了单桩承载力对路堤稳定性的影响。主要研究结论如下:

(1) 单桩承载力对密桩复合地基路堤稳定性影响很小, 对疏桩复合地基路堤稳定性影响很大。

(2) 桩帽对疏桩复合地基中刚性桩作用的发挥影响很大。

(3) 修正重度法可以合理反映单桩承载力和桩帽对路堤稳定性的影响。

(4) 路堤下刚性桩复合地基宜采用大承载力、大桩帽、大间距的设计原则。

参考文献:

- [1] BS8006—1:2010 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S]. BSI Standards Publication, 2010.
- [2] TB 10106—2010 铁路工程地基处理技术规程[S]. 2010. (TB 10106—2010 Technical code for ground treatment of railway engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [3] JTG/T D31—02—2013 公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (JTG/T D31—02—2013 Technical guidelines for design and construction of highway embankment on soft ground[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [4] 朱旭华, 舒国明. 广珠北新围高架桥桥头路基滑移原因分析[J]. 中外公路, 2006, 26(4): 27 - 29. (ZHU Xu-hua, SHU Guo-ming. Causes analysis of embankment slide near Xinwei viaduct of Guangzhou-Zhuhai north expressway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(4): 27 - 29. (in Chinese))
- [5] 黎爱清. CFG 桩加固某软土路基的病害分析[J]. 铁道标准设计, 2012(6): 36 - 39. (LI Ai-qing. Failure analysis on CFG pile used for reinforcement of soft soil embankment[J]. Railway Standard Design, 2012(6): 36 - 39. (in Chinese))
- [6] 刘吉福, 郑 刚, 安关峰. 折减荷载法分析刚性桩复合地基路堤绕流滑动稳定性[J]. 广西大学学报, 2013, 38(1): 176 - 181. (LIU Ji-fu, ZHENG Gang, AN Guan-feng. Load reduction method for stability analysis of flow-slide of embankment on rigid-piles composite foundation[J]. Journal of Guangxi University, 2013, 38(1): 176 - 181. (in Chinese))
- [7] 刘吉福, 郑 刚, 安关峰. 刚性桩复合地基路堤绕流滑动稳定分析[J]. 工程勘察, 2013, 35(6): 17 - 22. (LIU Ji-fu, ZHENG Gang, AN Guan-feng. Stability analysis of flow-slide of embankment on rigid-piles composite ground[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 35(6): 17 - 22. (in Chinese))
- [8] 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堤绕流滑动稳定性[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))
- [9] 郑 刚, 杨新煜, 周海祚. 基于渐进破坏的路堤下刚性桩复合地基的稳定性分析及控制[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 581 - 591. (ZHENG Gang, YANG Xin-yu, ZHOU Hai-zuo. Stability and control strategy of ground improved with rigid piles to support embankments based on progressive failure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 581 - 591. (in Chinese))
- [10] 郑 刚, 刘 力, 韩 杰. 刚性桩加固软弱地基上路堤的稳定性问题(II): 群桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1811 - 1820. (ZHENG Gang, LIU Li, HAN Jie. Stability of embankment on soft subgrade reinforced by rigid piles(II): group piles analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1811 - 1820. (in Chinese))
- [11] 李 帅. 刚性桩复合地基支撑路堤的失稳破坏机理及其稳定分析方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (LI Shuai. Research on failure mechanisms and stability analysis method of embankment supported on composite ground reinforced with rigid piles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [12] 刘 力. 刚性桩加固路堤稳定分析方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. (LIU Li. Research on the stability analysis of rigid pile supported embankment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese))
- [13] 熊传祥, 王艺霖, 陈福全. 路堤荷载下刚性桩复合地基稳定性计算[J]. 中南大学学报, 2017, 48(10): 2745 - 2752. (XIONG Chuan-xiang, WANG Yi-lin, CHEN Fu-quan. Stability calculation of rigid pile composite foundation under embankment load[J]. Journal of Central South University, 2017, 48(10): 2745 - 2752. (in Chinese))

- 2017, **48**(10): 2745 - 2752. (in Chinese))
- [14] 王哲明. 桩承式软基路堤侧滑变形机理及稳定分析[D]. 福州: 福州大学, 2015. (WANG Zhe-ming. Side slide deformation mechanism and stability analysis of pile supported embankment on soft foundation[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2015. (in Chinese))
- [15] 刘吉福, 郑 刚, 龚晓南, 等. 柔性荷载刚性桩复合地基修正密度法稳定分析改进[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 2): 33 - 36. (LIU Ji-fu, ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, et al. Improvement of revised density method for stability analysis of rigid-pile composite foundation with flexible load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S2): 33 - 36. (in Chinese))
- [16] 俞建霖, 李俊圆, 王传伟. 考虑桩体破坏模式差异的路堤下刚性桩复合地基稳定分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 2): 37 - 40. (YU Jian-lin, LI Jun-yuan, WANG Chuan-wei. Stability of composite foundation improved by rigid piles under embankment considering different failure modes of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S2): 37 - 40. (in Chinese))
- [17] GDJTG/T E01—2011 广东省公路软土地基设计与施工技术规定[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (GDJTG/T E01—2011 Design and construction specification of soft clay ground of Guangdong highway[S]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [18] JGJ79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (JGJ79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [19] 苗德山, 刘吉福. 基于离心模型试验的路堤下 CFG 桩破坏模式研究[J]. 广东公路交通, 2016(4): 10 - 13. (MIAO De-shan, LIU Ji-fu. Study of failure mode of CFG pile in composite foundation under embankment by centrifugal model test[J]. Guangdong Highway Communications, 2016(4): 10 - 13. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] ROGBECK Y, FRANZÉN G, SCANDIACONSULT C A, et al. Nordic guideline for reinforced soils and fills[R]. Baraboo: Nordic Geotechnical Group, 2005.
- [22] 刘吉福, 郑 刚, 龚晓南. 附加应力法计算刚性桩复合地基路基沉降[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(11): 1995 - 2002. (LIU Ji-fu, ZHENG Gang, GONG Xiao-nan. Superimposed stress method to calculate settlement of embankment with rigid-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(11): 1995 - 2002. (in Chinese))