

DOI: 10.11779/CJGE2017S2009

# 柔性荷载刚性桩复合地基修正密度法稳定分析改进

刘吉福<sup>1</sup>, 郑刚<sup>2</sup>, 龚晓南<sup>3</sup>, 谢永利<sup>4</sup>, 陈昌富<sup>5</sup>

(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; 4. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 5. 湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 基于柔性荷载下刚性桩复合地基绕流滑动时的桩土作用分析, 改进了用于稳定分析的修正密度法。滑动面圆心外侧填料密度不作修正, 拉中性面以上的正摩擦力增大桩间土密度, 拉中性面以下的负摩擦力减小桩间土的密度, 并考虑了桩身抗拉强度对拉中性面位置和桩间土修正密度的影响, 将端阻力的反力换算到桩端土密度中。分析表明, 滑动面圆心外侧填料和桩间土密度修正方法的变化对稳定安全系数影响较小, 存在软土下卧层时, 桩端土密度修正对稳定安全系数影响较大。工程实例证明改进后的修正密度法分析结果与工程实际符合较好。

**关键词:** 柔性荷载; 刚性桩; 复合地基; 绕流滑动; 中性面; 修正密度法

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0033-04

**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、水运工程的施工、科研等工作。E-mail: LJFMXY@163.com。

## Improvement of revised density method for stability analysis of rigid-pile composite foundation under flexible loads

LIU Ji-fu<sup>1</sup>, ZHENG Gang<sup>2</sup>, GONG Xiao-nan<sup>3</sup>, XIE Yong-li<sup>4</sup>, CHEN Chang-fu<sup>5</sup>

(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; 4. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 5. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The revised density method is improved based on analysis of interactions between ground soil, fill and piles in flow sliding. The density of fill outside the center of sliding surface needn't be revised. The density of soils among piles outside the center of sliding surface is increased due to the positive frictional stress over the tensile neutral plane and decreased due to the negative frictional stress below the tensile neutral plane. The influences of tensile strength of piles on position of the tensile neutral plane and the revised density of soils among piles are taken into account. The counterforce of end resistance of piles is transformed into the soil density below piles. It is shown by analysis that the safety factor of stability is affected little by change of the revised method for density of fills and soils among piles outside the center of sliding surface, but is obviously affected by the revision of density of soils below piles when there is soft substratum. It is shown that the results of stability analysis of a sliding project by the improved revised density method for rigid-pile composite foundation coincides with the project practices.

**Key words:** flexible load; rigid pile; composite ground; flow sliding; neutral plane; revised density method

## 0 引言

现行规范对柔性荷载下刚性桩复合地基稳定分析时多假设桩土整体剪切滑动破坏, 稳定安全系数严重偏大, 可能导致失稳事故<sup>[1-3]</sup>。刘吉福等<sup>[3]</sup>提出的修正密度法可考虑单桩承载力、桩荷载率、桩土摩擦力等因素的影响, 简便实用, 但对滑动面圆心两侧采用相同的处理方法的作法不合理, 未考虑桩身抗拉强度的影响; 对桩底土密度未修正, 悬浮桩复合地基稳定安全系数偏大。在分析柔性荷载下刚性桩复合地基绕流

滑动时桩土作用的基础上, 改进了修正密度法, 并利用失稳工程验证了修正密度法的可行性。

## 1 绕流滑动时桩土作用

绕流滑动时, 滑动面圆心外侧桩间土隆起, 图1中1区填料中土拱作用于桩间土上, 桩间土承担几乎全部填料荷载; 滑动面圆心内侧桩间土沉降, 图1中

2 区填料中土拱作用于桩帽顶面, 桩帽对填料产生竖向反力  $P_p$ , 作用于桩间土的荷载很小。

滑动面圆心外侧、拉中性面以上区域(图 1 中 3 区), 桩间土相对刚性桩向上位移, 刚性桩对桩间土的摩擦力  $\tau$  向下; 滑动面圆心内侧、压中性面以上区域(图 1 中 4 区), 桩间土相对刚性桩向下位移, 刚性桩对桩间土的摩擦力向上; 滑动面圆心外侧、拉中性面以下区域(图 1 中 5 区), 桩间土相对刚性桩向下位移, 刚性桩对桩间土的摩擦力向上; 滑动面圆心内侧、压中性面以下区域(图 1 中 6 区), 桩间土相对刚性桩向上位移, 刚性桩对桩间土的摩擦力向下。桩底端对图 1 中 7 区土体的  $Q_{pk}$  向下。刚性桩对滑动体产生水平阻力  $q_h$ 。  $P_p$  和  $q_h$  均对绕流滑动有阻止作用, 圆心内侧负摩擦力和圆心外侧正摩擦力阻止绕流滑动, 圆心内正摩擦力和圆心外侧负摩擦力促进绕流滑动,  $Q_{pk}$  促进绕流滑动。用于地基处理的刚性桩抗裂弯矩很小, 能承受的  $q_h$  很小, 可忽略不计。

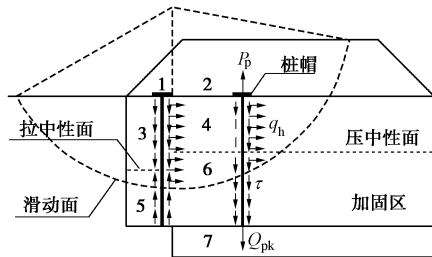


图 1 桩对滑动体的作用力

Fig.1 Interaction between sliding mass and piles of rigid-pile composite foundation

## 2 改进后的修正密度法

### 2.1 桩帽荷载确定

圆心内侧土拱效应控制的桩帽荷载  $P_{pa}$  可采用 HEWLETT 法计算<sup>[4]</sup>。  $P_{pa}$  大于单桩竖向极限承载力  $Q_{uk}$  时, 桩顶荷载  $P_p = Q_{uk}$ 。如  $P_{pa} < Q_{uk}$ ,  $P_p$  等于  $P_{pa}$  与格栅向桩帽转移荷载  $P_r$  之和。  $P_r$  可按格栅挠度  $S_g$  等于桩土沉降差  $S_f$  的原则计算<sup>[3]</sup>。

圆心外侧桩间土隆起, 土拱作用于桩间土上, 桩帽位于土拱下方, 桩间土荷载集度大于桩顶荷载集度, 桩帽荷载可近似取零。

### 2.2 确定用于稳定分析的中性面

圆心内侧刚性桩刺入破坏时, 由图 2 可得:

$$Q_s^n = \frac{Q_{uk} - P_p}{2} \quad (1)$$

按式(1)计算的  $Q_s^n$  确定的压中性面低于滑动面时, 该压中性面不是真正的压中性面, 但可保证稳定分析时滑动面内圆心内侧均为负摩擦力。

由图 2 可知, 圆心外侧刚性桩拔起时的竖向受力平衡条件为

$$Q_s^p = \frac{Q_{sk}}{2} \quad (2)$$

式中,  $Q_s^p$  为正摩擦力,  $Q_{sk}$  为总极限摩阻力。

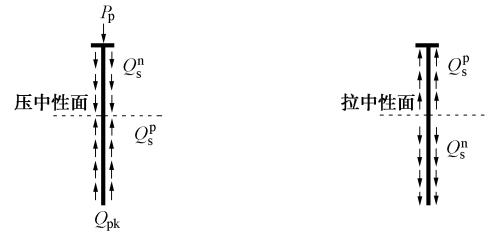


图 2 极限状态下桩的竖向受力

Fig.2 Vertical forces in limit states

根据  $Q_s^p$  确定的拉中性面低于滑动面时, 该拉中性面不是真正的拉中性面, 但可保证绕流滑动稳定分析时滑动面内圆心外侧均为正摩擦力。

如果  $Q_s^p$  大于桩身抗拉强度控制的抗拔力, 刚性桩阻止滑动的最大总摩擦力等于桩身抗拉强度控制的拉力,  $Q_s^p$  取桩身抗拉强度控制的抗拔力, 根据  $Q_s^p$  确定中性面, 并且中性面以下摩擦力取零。

### 2.3 修正密度计算

1 区: 圆心外侧填料中土拱作用于桩间土, 桩间土几乎承担全部荷载, 1 区填料密度不修正。

2 区: 该区促使桩间土滑动的是桩间荷载, 可按式对桩帽以上填料密度进行修正:

$$\rho_{fr} = \rho_f \frac{P_u - P_p}{P_u} \quad (3)$$

式中,  $\rho_{fr}$  为填料修正密度,  $\rho_f$  为填料密度,  $P_u$  为单桩负责区域桩帽以上荷载。

填料密度修正会减小填料中滑动面的摩擦力和剪切力, 新编或修改稳定分析软件时, 填料中滑动面正上方填料应采用未修正的填料密度。稳定分析表明, 由于填料中滑动面接近竖直, 直接利用现有软件时, 填料修正密度对稳定分析的影响可忽略不计。

3 区、5 区: 该区桩侧正摩擦力阻止桩间土滑动, 负摩擦力促进桩间土滑动, 可按式将摩擦力转换到桩间土密度中:

$$\rho_{sr} = (1 - m) \left[ \rho_s - \frac{u\tau}{D^2(1 - m)g} \right] \quad (4)$$

式中,  $\rho_{sr}$  为桩间土修正密度,  $m$  为置换率,  $\rho_s$  为桩间土密度,  $u$  为周长,  $\tau$  为摩擦力,  $D$  为桩间距,  $g$  为重力加速度。

4 区、6 区: 该区桩侧正摩擦力促进桩间土绕流滑动, 负摩擦力阻止桩间土绕流滑动, 因此:

$$\rho_{sr} = (1-m) \left[ \rho_s + \frac{u\tau}{D^2(1-m)g} \right] \quad (5)$$

7 区: 该区作用是将  $Q_{pk}$  转换到桩底土密度中, 其厚度可取 0.5~1 m, 其修正密度为

$$\rho_{sr} = (1-m) \left[ \rho_s + \frac{Q_{pk}}{D^2 g T_g} \right] \quad (6)$$

式中,  $Q_{pk}$  为总极限端阻力,  $T_g$  为 7 区厚度。

#### 2.4 桩间土抗剪强度指标处理

由于加固区分析对象为桩间土, 需按下式将桩间土黏聚力或不排水抗剪强度均化到整个加固区<sup>[3]</sup>。

$$c_r = c(1-m) \quad (7)$$

式中,  $c_r$  为黏聚力或不排水抗剪强度修正值,  $c$  为黏聚力或不排水抗剪强度。

#### 2.5 稳定分析

忽略桩, 采用修正密度和抗剪强度指标, 稳定分析分析得到绕流滑动稳定安全系数  $F_f$ 。

由于  $P_p$  和中性面位置随荷载增大而变化, 可先对设计密度乘以稳定安全系数  $F_s$  再验算绕流滑动稳定安全系数  $F_f$ 。验算是否绕流滑动时  $F_s$  取 1,  $F_f < 1$  时绕流滑动; 验算是否满足规定的安全系数  $[F_s]$  时  $F_s$  取  $[F_s]$ ,  $F_f > 1$  时满足规定安全系数; 验算  $F_s$  具体值时,  $F_s$  取不同值进行试算直至  $F_f = 1$ 。

修正密度法基于桩间土绕流滑动时的桩土作用分析<sup>[3]</sup>, 适用于不发生弯断或倾斜破坏的刚性桩复合地基。当桩弯断或倾斜破坏时, 桩间土位移较大, 仍可采用修正密度法, 只是对应的  $F_f$  大于 1.0。

### 3 方法改进前后对比分析

某路基顶宽 35 m, 路堤高 10 m, 边坡坡率为 1:1.5。路堤土黏聚力为 25 kPa, 内摩擦角为 25°, 密度为 2041 kg/m<sup>3</sup>。软土厚 26 m, 密度为 1680 kg/m<sup>3</sup>, 不排水抗剪强度为 25 kPa。采用 CFG 桩复合地基处理, 桩身混凝土强度等级为 C15, 桩长 20 m, 直径 0.4 m, 正方形布置, 桩间距 2 m, 单桩竖向极限承载力为 725 kN。桩帽边长 1.2 m, 桩帽顶面设置 2 层双向土工格栅, 格栅抗拉强度为 80 kN/m。

考虑桩身拉断时, C15 混凝土抗拉强度为 1.27 MPa, 拉中性面位于地面下 5.08 m 处, 按图 1 计算的稳定安全系数为 1.157; 不考虑桩身拉断时, 拉中性面位于地面下 10 m 处, 按图 1 计算的稳定安全系数为 1.153, 误差为 0.3%。按图 3 计算的稳定安全系数为 1.159, 误差为 0.2%。按文献[3]计算的稳定安全系数为 1.221, 误差为 5.5%。可见, 滑动面圆心内外侧填料和桩间土密度修正方法改变对稳定安全系数影响不

大; 存在软土下卧层时, 桩底土密度修正对稳定安全系数影响较大。

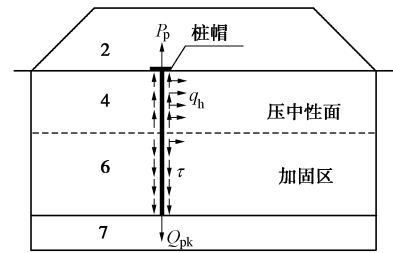


图3 修正密度法简化等效处理示意图

Fig. 3 Simplified equivalent transformation for revised density method

### 4 案例分析<sup>[1, 5]</sup>

#### 4.1 参数确定

精矿和垫层物理力学指标按照文献[5]取值, 精矿和砂石料的黏聚力取 0 kPa, 精矿内摩擦角取 37°, 砂石料取 35°。由文献[1, 5]得到地层情况见表 1。表 1 中淤泥质黏土层带\*的为失稳后调查结果。由文献[1]得粉质黏土层顶面平均高程为 1.33 m, 平均厚度为 2.3 m; 淤泥质黏土层顶面高程平均为 -0.97 m, 平均厚度为 30 m。由文献[1]可知淤泥质黏土层静力触探锥尖阻力随深度呈线性增长, 将其按照 5 m 一层, 划分为 6 个亚层, 每个亚层土的不排水抗剪强度根据该层中点对应的锥尖阻力按《铁路工程地质原位测试规程》(TB10018—2003) 计算得到。淤泥质黏土层顶面锥尖阻力 0.080 MPa 根据上覆土粉质黏土层厚度 2.3 m 计算得到。

粉质黏土、淤泥质黏土为饱和黏性土, 且未设置竖向排水体, 其排水固结作用可忽略不计, 堆场失稳后调查结果也证实了这一点<sup>[1, 5]</sup>, 稳定分析采用表 1 中地基处理前的不排水抗剪强度。粉质黏土不排水变形模量取表 1 中压缩模量的 10 倍, 淤泥质黏土的不排水变形模量取表 1 中  $C_u$  的 1200 倍<sup>[6]</sup>。

根据淤泥质黏土层锥尖阻力随深度基本呈线性增长的特点, 计算得到 28 m 桩长范围内淤泥质黏土的平均锥尖阻力和桩底面处的锥尖阻力, 然后根据《铁路工程地质原位测试规程》(TB10018—2003) 计算平均极限侧阻力, 根据《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008) 计算总极限端阻力, 单桩极限承载力计算结果见表 2。

#### 4.2 修正密度法稳定分析结果

精矿填筑高度为 6.5m 时位移速率 37~38 mm/d、最大沉降达到 2.41 m。按文献[4]计算堆场中线附近桩

表 1 地层情况

Table 1 Conditions of soil strata

土名	$h$ /m	$\rho_s$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$e$	$I_l$	$w$ /%	$q_c$ /MPa	$f_s$ /kPa	$f_{ak}$ /kPa	$E_s$ /MPa	$c_{cu}$ /kPa	$\varphi_{cu}$ /( $^\circ$ )	$c_u$ /kPa	$\rho_{sr}$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
精矿	8.0	2500								0	37		1623
垫层	2	1940								0	35		1259
粉质黏土	1.67	1900			32.7			90	4.0	8.5	11.4	39.4	644
淤泥质黏土	5											9.3	1422
	5											17.0	1188
	5	1760	1.251	1.23	44.6	0.60	9.68	60	2.2	6.2	7.8	24.6	958/2451*
	5											32.2	2681
	5											39.8	2912
	5											47.5	3146
淤泥质黏土*	30		1.275	1.42	45.4	0.47	10.00			8.7	3.1	21.9	
粉质黏土	7.2	1880			32.5			75	3.0	12.5	13.5		
黏土	>15	1930			30.5			140	6.0	19.0	12.5		

注：淤泥质黏土“/”前后数据分别为中性面上下的修正密度。

表 2 单桩极限承载力计算结果

Table 2 Calculated results of ultimate resistance of piles

项目	粉质黏土	淤泥质黏土
$h/\text{m}$	1.67	26.33
桩身 $q_c$ 平均/MPa		0.536
$c_u$ 平均值/MPa	39.4	25.6
$Q_{sk}/\text{kN}$	88.1	902.1
桩底 $q_c$ /MPa		0.993
$Q_{pk}/\text{kN}$		94.4
$Q_{uk}/\text{kN}$	1084.5	

顶荷载为 311.30 kN。按文献[3]方法计算得格栅挠度为 79.76 mm，兜提力为 11.16 kN/m，转移荷载为 1.79 kN，桩顶荷载为 313.09 kN，桩间土荷载率为 64.7%，桩身中性点位于桩顶面以下 15.37 m 处。修正密度计算结果见表 1。

利用理正软土地基路基设计软件得到的绕流稳定安全系数  $F_t$  为 0.965，稳定分析结果与工程情况吻合较好。

5 结 论

(1)滑动面圆心内外侧填料和桩间土密度修正方法改变对稳定安全系数影响不大;存在软土下卧层时,桩底土密度修正对稳定安全系数影响较大。

(2)改进的修正密度法可以考虑软土下卧层、圆心外侧桩间土隆起等因素，更加合理。

参考文献:

[1] 吕文志. 柔性基础下桩体复合地基性状与设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 100 - 105. (LU Wen-zhi. Study of characteristic of design method of pile composite ground under flexible foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University,

2009: 100 - 105. (in Chinese))  
[2] 刘吉福, 郑 刚, 安关峰. 折减荷载法分析刚性桩复合地基路基绕流滑动稳定性[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: Nat. Sci Ed, 2013, 38(1): 176 - 181. (in Chinese))  
[3] 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))  
[4] 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))  
[5] 莫景逸, 黄向平. 某矿料堆场地基失稳原因分析[J]. 水运工程, 2013(10): 212 - 217. (MO Jing-yi, HUANG Xiang-ping. Analysis of foundation failure of mineral ore yard[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(10): 212 - 217. (in Chinese))  
[6] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1990. (GONG Xiao-nan. Soil plastic mechanics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)