

稳定路基中刚性桩抗弯能力验算简易方法

刘吉福^{1, 2, 3, 4}, 郑刚¹, 安关峰²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 广州市市政集团有限公司, 广东 广州 510060; 3. 中国铁建港航局集团有限公司, 广东 珠海 519070; 4. 中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 511442)

摘要: 稳定路基的刚性桩复合地基会产生一定的侧向位移, 其刚性桩会承受一定的弯矩并可能开裂。为了保证刚性桩复合地基路基的长期稳定性, 应验算路堤下复合地基刚性桩的抗弯能力。为减小路堤下复合地基刚性桩的抗弯能力验算难度, 需要研究刚性桩弯矩简易计算方法。首先, 基于大量公路路基软基试验和监测工程, 对路基最大沉降与最大侧向位移的关系进行了统计研究, 得到了两者之间的经验关系式; 然后, 根据路堤下复合地基和刚性桩的侧向位移曲线形状, 提出刚性桩水平受力简化模型, 并对复合地基刚性桩弯矩与最大侧向位移之间的关系进行了理论推导。在上述研究的基础上, 提出了根据复合地基沉降得到桩身弯矩的简易方法。工程算例表明该方法简单、可行。研究表明, 刚性桩位移与桩间土位移基本相等, 可忽略不计桩土位移差对刚性桩弯矩的影响; 当刚性桩进入硬土层的长度超过 7 倍桩径时, 可认为刚性桩在软土层底面处固定。

关键词: 路基; 刚性桩; 抗弯能力; 侧向位移; 固定桩

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)08-1387-10

作者简介: 刘吉福(1971-), 男, 山东阳谷人, 博士, 教授级工程师, 主要从事公路、港口与航道工程的勘察设计、科研等工作。E-mail: LJFMXY@163.com。

Simple method for checking flexural capacity of rigid piles of stable embankment

LIU Ji-fu^{1, 2, 3, 4}, ZHENG Gang¹, AN Guan-feng²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Guangzhou Municipal Group Co., Ltd., Guangzhou 510060, China; 3. CRCC Harbour & Channel Engineering Group Co., Ltd., Zhuhai 519070, China; 4. CRCC Harbour & Channel Engineering Group Survey & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 511442, China)

Abstract: Since rigid-pile composite ground of a stable embankment deforms laterally, the rigid piles in the composite ground bear bending moment and may be cracked. The flexural capacity of rigid piles should be checked for the long-term stability of the embankment treated by rigid-pile composite ground. To reduce the difficulty of checking the flexural capacity of rigid piles in the composite ground under the embankment, the studies on simple methods for calculation of the bending moment of rigid piles are needed. First of all, the relationship between the maximum settlement and the maximum lateral deformation of embankments is statistically studied based on experimental and monitoring data of many soft ground and embankment projects of highways, and an empirical equation for the maximum settlement and the maximum lateral deformation of embankments is obtained. Then a simplified model for lateral forces of rigid piles is proposed using the lateral deformation curves of composite ground and rigid piles under embankments, and the relationship between the bending moment and the maximum lateral deformation of rigid piles is derived. The bending moment of rigid piles is suggested to be calculated according to the maximum settlement of embankments. The proposed method is proven to be simple and reasonable by an actual project. It is shown that the lateral deformation of piles is nearly equal to that of the surrounding soils, and the difference of lateral deformation between the piles and the soils can be neglected. The rigid piles can be thought to be fixed at the lower surface of soft stratum if their fixed length in underlying hard stratum is 7 times larger than their diameter.

Key words: embankment; rigid pile; flexural capacity; lateral deformation; fixed pile

0 引言

随着公路和铁路等工程建设速度的加快、软基处理深度的加大、路堤高度的增加、工后沉降要求的提

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078263)

收稿日期: 2012-07-08

高，预制管桩、CFG 桩等刚性桩复合地基越来越多地被用于路基工程地基处理。虽然刚性桩竖向承载力很高，但是路基失稳现象时有发生^[1]。采用刚性桩复合地基处理的路基即使处于稳定状态，复合地基和刚性桩仍然会产生一定侧向位移^[2-5]，刚性桩会承受一定弯矩并可能受弯开裂，影响工程耐久性，甚至导致路基滑塌。因此，稳定路堤下的刚性桩复合地基仍需要验算刚性桩抗弯性能^[6]。

地基的侧向位移是在路堤荷载下地基土水平伸长产生的，通常情况下通过路基坡脚的纵剖面上的地基侧向位移最大（如图 1 所示），离心试验、数值分析均证实了这一点^[7-9]。地基土侧向位移时带动刚性桩位移，地基侧向位移大的部位刚性桩侧向位移也大。由结构力学可知，其他参数相同时，刚性桩位移越大，刚性桩弯矩越大，因此，路基坡脚附近的刚性桩承受的弯矩最大，只要验算路基坡脚附近的刚性桩的抗弯性能即可。

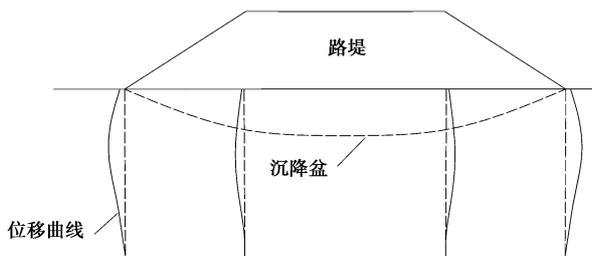


图 1 复合地基位移曲线与沉降盆

Fig. 1 Curves of displacement and depth and settlement basin of composite ground

路堤下刚性桩弯矩可利用有限单元法计算得到^[10-11]，但是有限单元法在工程中应用不是非常普遍，主要原因是所需的参数往往确定困难，因此有必要研究刚性桩弯矩简易计算方法。由结构力学可知，已知刚性桩的侧向位移，可以求得刚性桩的弯矩，因此可以根据路基坡脚附近刚性桩的侧向位移验算桩的抗弯性能。首先基于路基最大沉降与最大侧向位移的统计关系，由路基最大沉降得到路基最大侧向位移；然后基于梁的弯矩与挠度的理论关系，由桩的最大侧向位移得到桩的弯矩。

1 路基坡脚侧向位移确定

路堤下刚性桩复合地基的侧向位移计算较困难，而路基的沉降计算相对简单，通过建立路基最大沉降与最大侧向位移的关系，可以通过路基最大沉降计算得到最大侧向位移。

1.1 侧向位移与沉降的关系

为了研究路基最大侧向位移与最大沉降的关系，统计了 10 个试验段、公路施工监测项目中 57 个监测断面的侧向位移面积和沉降盆面积的关系。大部分监测断面的侧向位移曲线如图 2 所示。路基一侧坡脚处的侧向位移面积取坡脚处测斜管测试的侧向位移曲线与竖轴包围的面积。

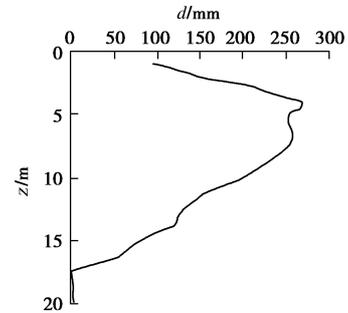


图 2 某 CFG 桩复合地基侧向位移曲线

Fig. 2 Curve of lateral deformation and depth of a CFG pile composite ground

假设沉降盆形状为抛物线，则沉降盆的面积为

$$A_s = \frac{2}{3}WS_m \quad (1)$$

式中， A_s 为沉降盆面积， W 为路基底面宽度， S_m 为路基最大沉降（通常位于路基中线处）。

按照上述处理方法得到的路基一侧坡脚处侧向位移面积和表面沉降盆面积关系见图 3（图中 A_d 为侧向位移面积）。

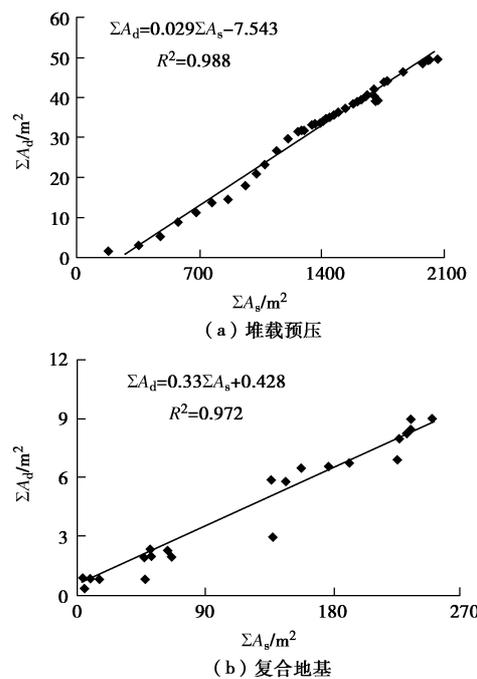


图 3 路基位移与沉降的关系

Fig. 3 Relationship between lateral deformation and settlement of embankment

路基软基试验工程和软土路基监测表明堆载预压地基与复合地基的侧向位移曲线形状相似, 沉降盆面及与侧向位移面积的比值关系也接近, 因此本文给出堆载预压地基的试验、监测结果, 以利于说明地基侧向位移面积与沉降盆面积的关系。

由图 3 可见, 路基一侧坡脚处侧向位移面积与沉降盆面积的比值对于排水固结平均为 2.76%, 复合地基平均为 3.3%。

路基侧向位移曲线可近似看作三角形, 并按照下式确定最大侧向位移:

$$y_m = \frac{2\eta S_m W}{3L}, \quad (2)$$

式中, y_m 为最大位移, η 为位移面积与沉降面积之比, 可取 2.5%~4.0%, L 为软土层深度。

由于地表面处侧向位移通常大于零, 按照式 (2) 近似确定的最大侧向位移稍偏大, 用于验算刚性桩抗弯性能偏于安全。

1.2 刚性桩复合地基沉降计算

可利用 Hewllet 土拱效应方法计算桩顶荷载和桩间荷载^[12], 然后利用 Bossinesq 法计算桩间荷载产生的附加应力, 利用 Mindlin 解计算桩侧摩擦力、桩端力产生的附加应力^[13]。确定桩侧摩擦力、桩端力时, 由于复合地基的刚性桩进入硬土层较浅, 可近似认为硬土层中桩侧阻力与桩端阻力发挥程度相同。为了便于计算, 可将硬土层的桩侧阻力看作桩端阻力。计算得到桩间土附加应力后, 采用分层总和法计算桩间软土层沉降。当桩帽覆盖率较大时, 也可采用桩间土应力减小比法计算软土层沉降^[14]。

2 桩身弯矩计算

2.1 地基侧向位移与桩身位移的关系

路基下刚性桩复合地基桩间土产生侧向位移时, 必然对刚性桩产生推压作用, 使其产生侧向位移, 因此路基下的复合地基刚性桩属于被动桩, 其位移小于桩间土位移。对于处于稳定状态的路基, 复合地基桩间土尚未发生绕流破坏, 因此桩间土位移与刚性桩位移差别不大, 后面的 2.3 节的算例也证实了这一点。为了检验路基下复合地基桩土位移关系, 在某高速公路路基坡脚附近的管桩内外侧分别埋设 1 根测斜管 (管桩内的测斜管与管桩内壁之间灌满中粗砂), 测试表明管桩的侧向位移曲线形状总体上与地基土的位移曲线接近, 地基土和管桩的位移曲线均呈 S 形, 最大区别是软土层中硬土夹层对管桩的侧向位移影响明显小于对地基中测斜管的影响, 管桩的位移曲线更加光滑^[15]。高长胜对设置抗滑桩的边坡进行的离心试验也

表明, 桩的位移与土体位移差别不大^[16]。

2.2 桩位移等于路基位移时的弯矩

(1) 刚性桩水平受力简化模型

胡勇刚等研究表明桩间距大于等于 3 倍桩间距时, 路堤下搅拌桩复合地基的侧向位移沿深度先增大后减小^[7]; Tavenas 等总结了 21 种软黏土地基上路堤的侧向变形发展状况, 并做了归一化处理 (如图 4 所示, D 为软基深度), 侧向变形最大值在地表下某深度处^[17-18], 余闯也得到了类似的结论^[19]。大量工程实践表明, 最大位移距离地面的距离 z 与软土层厚度 L 的比值 δ 通常为 0.10~0.4, 路基填土高度小、软土性质较好、地表存在硬壳层时 δ 较大, 反之 δ 较小。

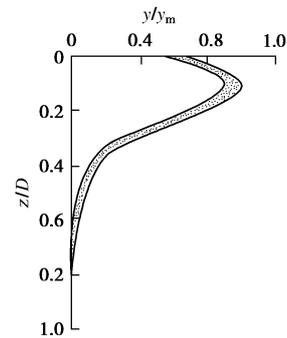


图 4 侧向变形随深度变化典型曲线

Fig. 4 Variation of lateral deformation with depth

与桩基工程不同, 路堤下复合地基刚性桩进入硬土层的长度 L_b 不大, 刚性桩侧向位移时, 位于硬土层的刚性桩段的位移接近于刚性体转动。将位于硬土层中的刚性桩段前后水平抗力按照 m 法计算, 可以证明刚性桩段以 $0.5 L_b$ 处为转轴转动时抵抗力矩最小, 因此可假设位于硬土层中的刚性桩段以 $0.5 L_b$ 处为转轴转动。软土层底面处桩的弯矩为

$$M_b = \frac{L_b^3}{12} \theta C_b b_0, \quad (3)$$

式中, θ 为硬土层中刚性桩段转角, C_b 为硬土层范围内的平均桩侧水平抗力系数, $C_b = (L + 0.5L_b) m_b$, m_b 为硬土水平抗力系数的比例系数, b_0 为桩的计算宽度, 桩直径 $d \leq 1$ m 时取 $b_0 = 0.9(1.5d + 0.5)$, 否则 $b_0 = 0.9(d + 1)$ ^[20]。

综上所述, 稳定路基下刚性桩的侧向位移曲线与一端固定、一端铰接、作用三角形线状荷载的直梁的挠度曲线类似, 只是铰接端在垂直梁轴线方向产生了位移, 桩底端未完全固定, 而是可以适当转动的弹性约束, 刚性桩的水平受力和位移简化为图 5。为计算简便起见, 本文假设硬土层以上全部为均质软黏土。当地基中存在硬土夹层时, 相当于增加了弹性支座, 刚性桩弯矩减小, 因此本文假设偏于安全。

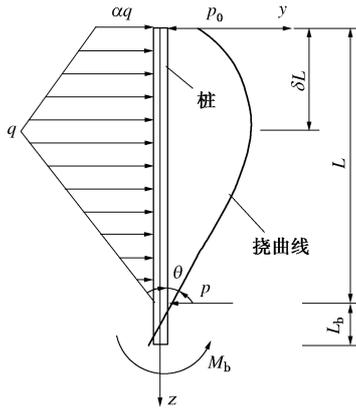


图5 刚性桩受力简化模型

Fig. 5 Simplified model for lateral forces of rigid piles

刚性桩承受的线荷载为

$$q_z = \begin{cases} \alpha q + (1-\alpha)q \frac{z}{\delta L} & (z \leq \delta L) \\ q - q \frac{z - \delta L}{L - \delta L} & (z \geq \delta L) \end{cases} \quad (4)$$

(2) 刚性桩弯矩分析

根据图5中刚性桩转动平衡条件可得到桩顶支座处水平集中力 p_0 为

$$p_0 = \frac{qL(2 - \delta + 3\alpha\delta - \alpha\delta^2)}{6} - \frac{M_b}{L} \quad (5)$$

式中, M_b 为软土层底面处桩弯矩。

沿桩长的弯矩为

$$M = \begin{cases} p_0 z - \frac{1}{2} \alpha q z^2 - \frac{1}{6\delta L} (1-\alpha) q z^3 & (z \leq \delta L) \\ p_0 z - \frac{1}{2} \alpha q \delta^2 L^2 - \frac{1}{6} (1-\alpha) q \delta^2 L^2 - \\ \frac{1}{2} (1+\alpha) q \delta L (z - \delta L) - \frac{1}{2} q (z - \delta L)^2 + \\ \frac{q(z - \delta L)^3}{6(L - \delta L)} & (z \geq \delta L) \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)两侧积分,并结合梁弯矩与挠度的关系可得

$$-EIy' = \begin{cases} \frac{1}{2} p_0 z^2 - \frac{1}{6} \alpha q z^3 - \frac{1}{24\delta L} (1-\alpha) q z^4 + C_1 & (z \leq \delta L) \\ \frac{1}{2} p_0 z^2 - \frac{1}{2} \alpha q \delta^2 L^2 z - \frac{1}{6} (1-\alpha) q \delta^2 L^2 z - \\ \frac{1}{4} (1+\alpha) q \delta L (z - \delta L)^2 - \frac{1}{6} q (z - \delta L)^3 + \\ \frac{q(z - \delta L)^4}{24(L - \delta L)} + C_2 & (z \geq \delta L) \end{cases} \quad (7)$$

式中, E 为刚性桩弹性模量, I 为刚性桩惯性模量。

$z = L$ 处, $y' = -\theta$, 并考虑 $z = \delta L$ 处 y' 连续性,

由式(5)、(7)可得

$$C_1 = \frac{qL^3}{24} (-1 - \delta + \delta^2 - 2\alpha\delta^2 + \alpha\delta^3) + EI\theta + \frac{1}{2} M_b L \quad (8a)$$

$$C_2 = \frac{qL^3}{24} (-1 - \delta + \delta^2 + 3\delta^3 - 2\alpha\delta^2 + 6\alpha\delta^3) + EI\theta + \frac{1}{2} M_b L \quad (8b)$$

对式(7)两侧积分得

$$-EIy = \begin{cases} \frac{1}{6} p_0 z^3 - \frac{1}{24} \alpha q z^4 - \frac{1}{120\delta L} (1-\alpha) q z^5 + \\ C_1 z + D_1 & (z \leq \delta L) \\ \frac{1}{6} p_0 z^3 - \frac{1}{4} \alpha q \delta^2 L^2 z^2 - \frac{1}{12} (1-\alpha) q \delta^2 L^2 z^2 - \\ \frac{1}{12} (1+\alpha) q \delta L (z - \delta L)^3 - \frac{1}{24} q (z - \delta L)^4 + \\ \frac{q(z - \delta L)^5}{120(L - \delta L)} + C_2 z + D_2 & (z \geq \delta L) \end{cases} \quad (9)$$

$z = L$ 处, $y = 0.5L_b\theta$, 并考虑 $z = \delta L$ 处 y 连续性,

由式(5)、(9)可得

$$D_1 = \frac{qL^4}{360} (7 + 7\delta - 3\delta^2 - 3\delta^3 + 10\alpha\delta^2 - 3\alpha\delta^4) - EI\theta \left(L + \frac{1}{2} L_b \right) - \frac{1}{3} M_b L^2 \quad (10a)$$

$$D_2 = \frac{qL^4}{360} (7 + 7\delta - 3\delta^2 - 3\delta^3 - 18\delta^4 + 10\alpha\delta^2 - 30\alpha\delta^4) - EI\theta \left(L + \frac{1}{2} L_b \right) - \frac{1}{3} M_b L^2 \quad (10b)$$

$z = \delta L$ 处, $y = y_m$, $y' = 0$, 由式(7)、(9)可得

$$y_m = a_1 q + b_1 \theta \quad (11a)$$

$$0 = a_2 q + b_2 \theta \quad (11b)$$

式中,

$$a_1 = \frac{L^4 (7 - 8\delta - 18\delta^2 + 32\delta^3 - 13\delta^4 + 10\alpha\delta^2)}{-360EI} + \frac{L^4 (-30\alpha\delta^3 + 30\alpha\delta^4 - 10\alpha\delta^5)}{-360EI}, \quad b_1 = \frac{L_b^3 C_0 b_0 L^2 (2 - 3\delta + \delta^3)}{72EI}$$

$$L + \frac{1}{2} L_b - \delta L, \quad a_2 = \frac{L^3 (-1 - \delta + 5\delta^2 - 3\delta^3 - 2\alpha\delta^2 + 4\alpha\delta^3 - 2\alpha\delta^4)}{24}$$

$$b_2 = \frac{1}{24} L_b^3 C_0 b_0 L (1 - \delta^2) + EI$$

由式(11)可得

$$q = \frac{b_2 y_m}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (12a)$$

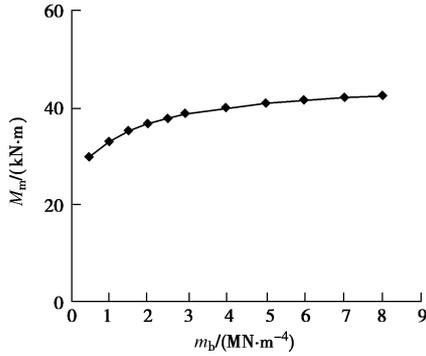
$$\theta = \frac{a_2 y_m}{a_2 b_1 - a_1 b_2} \quad (12b)$$

由式(3)、(5)、(6)、(12a)、(12b)可知, 已知

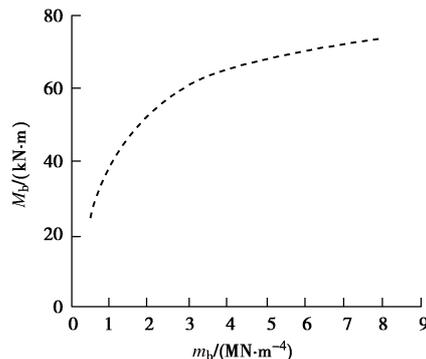
桩身最大位移及其对应的深度, 就可求得桩身弯矩。

$L=17\text{ m}$, $d=0.4\text{ m}$, $L_b/d=5$, $\delta=0.3$, $y_m=50\text{ mm}$, $E=25500\text{ MPa}$, $\alpha=0$ 。 M_b , 软土层弯矩极大值 M_m 与 m_b 的关系曲线见图 6。可见, m_b 大于 5 MN/m^4 以后, M_b , M_m 变化变缓。分析表明, 改变 L_b/d 等参数时, 现象类似。因此可将土的水平抗力系数的比例系数大于 5 MN/m^4 的土层看作硬土层。

$$\frac{1}{2}L(1-\delta^2)。$$



(a) 对 M_m 的影响



(b) 对 M_b 的影响

图 6 m_b 对 M_m , M_b 的影响

Fig. 6 Influence of m_b on M_m and M_b

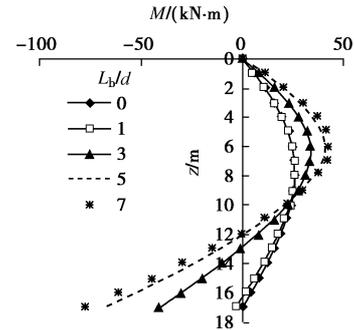
$L=17\text{ m}$, $d=0.4\text{ m}$, $m_b=5\text{ MN/m}^4$, $\delta=0.3$, $y_m=50\text{ mm}$, $E=25500\text{ MPa}$, $\alpha=0$ 。 L_b/d 分别取 0, 1, 3, 5, 7 对应的桩身弯矩、侧向位移曲线见图 7。 M_b , 软土层弯矩极大值 M_m 与 L_b 的关系见图 8。可见, 随着 L_b/d 的增大, M_m , M_b 均增大, 并逐渐逼近桩底端固定时的弯矩, L_b/d 大于等于 7 时可近似看作桩底端固定。改变 L 等参数时, 得到相同结论。由图 7 (b) 可知, 桩身位移曲线形状与地基常规位移曲线形状相同^[2-5, 17-18], 证明了本文方法的可行性。

当桩底端固结时, $\theta=0$ 。 $z=\delta L$ 处, $y=y_m$, $y'=0$, 由式 (7)、(9) 可得

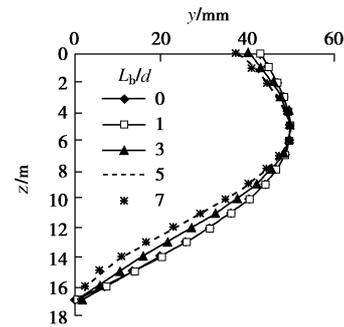
$$y_m = a_3q + b_3M_b, \tag{13a}$$

$$0 = a_4q + b_4M_b, \tag{13b}$$

式中, $a_3 = a_1$, $b_3 = \frac{L^2(2-3\delta+\delta^3)}{6EI}$, $a_4 = a_2$, $b_4 =$



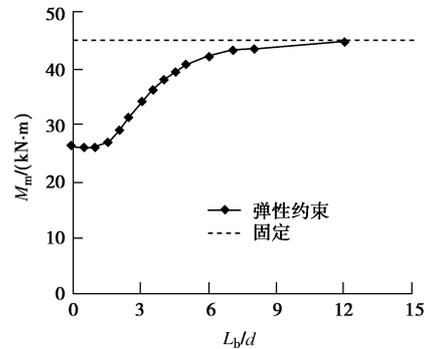
(a) 桩身弯矩



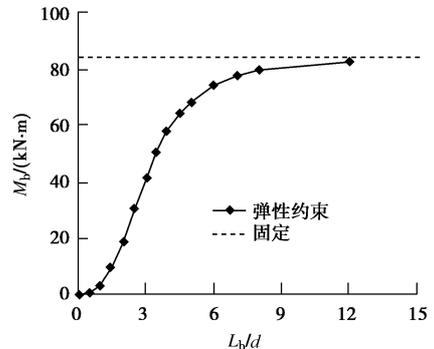
(b) 桩身位移

图 7 L_b/d 对 M 和 y 的影响

Fig. 7 Influence of L_b/d on M and y



(a) 对 M_m 的影响



(b) 对 M_b 的影响

图 8 L_b/d 对 M_m , M_b 的影响

Fig. 8 Influence of L_b/d on M_m and M_b 由式 (13a)、(13b) 可得

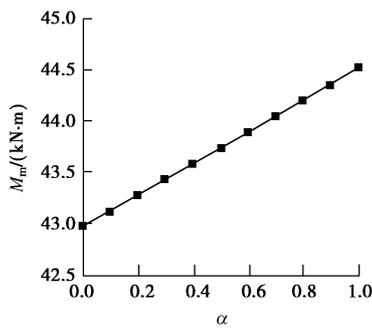
$$q = \frac{b_4 y_m}{a_3 b_4 - a_4 b_3}, \quad (14a)$$

$$M_b = \frac{a_4 y_m}{a_4 b_3 - a_3 b_4}. \quad (14b)$$

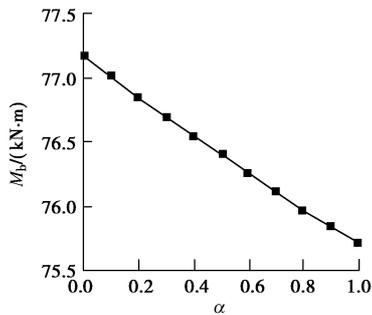
由式(5)、(6)、(14a)、(14b)可知,当桩底端固结时,已知桩身最大位移及其对应的深度,就可求得桩身弯矩。

$L=17\text{ m}$, $d=0.4\text{ m}$, $L_b/d=7$, $m_b=5\text{ MN/m}^4$, $\delta=0.3$, $y_m=50\text{ mm}$, $E=25500\text{ MPa}$, M_m , M_b , 地表位移 y_0 与 α 的关系见图9。可见, α 对 M_m , M_b 的影响较小; 随 α 的增大, M_m 稍有增大, M_b 稍有减小, y_0 减小; M_b 大于 M_m 。改变 y_m 等参数时, 得到相同的结论。因此, 桩底端固定时, 刚性桩最大弯矩计算时可偏安全地假定 $\alpha=0$, 且由式(14a)、(14b)得

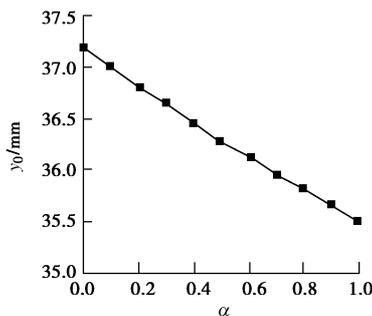
$$M_b = \frac{30EI(1+\delta-5\delta^2+3\delta^3)y_m}{L^2(3+3\delta-40\delta^2+70\delta^3-45\delta^4+7\delta^5+2\delta^6)}. \quad (15)$$



(a) 对 M_m 的影响



(b) 对 M_b 的影响



(c) 对 y_0 的影响

图9 α 对 M_m , M_b , y_0 的影响

Fig. 9 Influence of α on M_m , M_b and y_0

2.3 考虑桩土位移差时的桩身弯矩

由于路基下复合地基刚性桩属于被动桩, 桩土之间存在水平土压力 q_z , 桩土之间存在一定位移差, 桩的位移小于地基的位移。对于稳定路基, 复合地基桩间土尚未发生绕流破坏, 可将刚性桩看作弹性地基梁, 则桩土位移差为

$$\Delta y = \frac{q_z}{b_0 m_s z}, \quad (16)$$

式中, Δy 为桩土位移差, m_s 为桩间软土水平抗力系数的比例系数。

刚性桩的侧向位移为

$$y_p = y - \Delta y. \quad (17)$$

因此, 由式(17)可求得刚性桩的最大位移及其相应的深度, 然后按照2.2节方法计算得到桩的弯矩。

$L=17\text{ m}$, $d=0.4\text{ m}$, $L_b/d=7$, $m_b=5\text{ MN/m}^4$, $\delta=0.3$, 桩间土 $y_m=50\text{ mm}$, $E=25500\text{ MPa}$, $\alpha=0$, $m_s=0.5\text{ MN/m}^4$ 对应的地基与桩的位移见图10, 桩土位移差见图11。不同 m_s 对应的桩土最大位移差、桩最大位移深度 z_{pmax} 见表1。

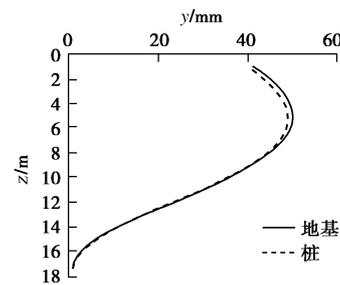


图10 桩与地基侧向位移

Fig. 10 Lateral deformations of piles and ground

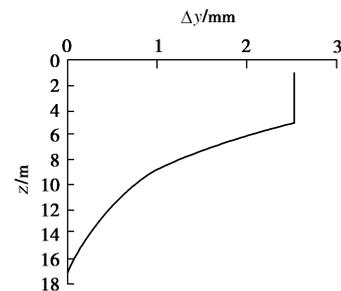


图11 桩土位移差

Fig. 11 Difference lateral deformations of piles and soils

表1 Δy_{max} 和 z_{pmax}

Table 1 Values of Δy_{max} and z_{pmax}

$m_s / (\text{MN} \cdot \text{m}^{-4})$	$\Delta y_{max} / \text{mm}$	z_{pmax} / m
0.5	1.28	5
1.0	0.64	5
1.5	0.42	5
2.0	0.32	5
2.5	0.25	5
3.0	0.21	5

由图 10, 11 和表 1 可知, 刚性桩的位移与地基位移差非常小, 且两者最大值对应的深度相等, 而刚性桩的弯矩与最大位移成正比, 因此可不考虑桩土位移差对刚性桩弯矩的影响。改变 y_m 等参数时, 得到相同的结论。刚性桩弯矩也可对不考虑桩土位移差的刚性桩弯矩乘以 λ 得到, λ 为 δL 处桩土位移比。刚性桩在硬土层为弹性约束时, 由式 (12a)、(16) 和 (17a)、(17b) 可得

$$\lambda = 1 - \frac{b_2}{(a_1 b_2 - a_2 b_1) b_0 m_s \delta L} \quad (18a)$$

刚性桩在硬土层为固定时, 由式 (14a)、(16) 和 (17a)、(17b) 可得

$$\lambda = 1 - \frac{b_4}{(a_3 b_4 - a_4 b_3) b_0 m_s \delta L} \quad (18b)$$

本文中对刚性桩承担的三角形分布的线状荷载是假设的, 沿刚性桩的实际线状荷载应为曲线分布形式。为研究图 5 中线状荷载分布形状对刚性桩弯矩、位移的影响, 将图 5 中三角形荷载改为矩形荷载 (见图 12, 图中 q 在数值上不一定等于图 5 中的 q), 并按照类似方法求解刚性桩弯矩与位移。

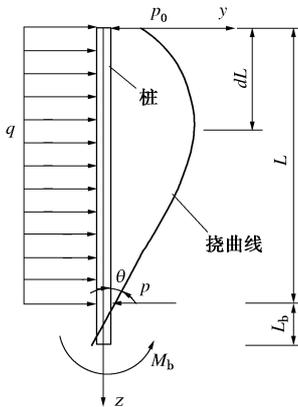


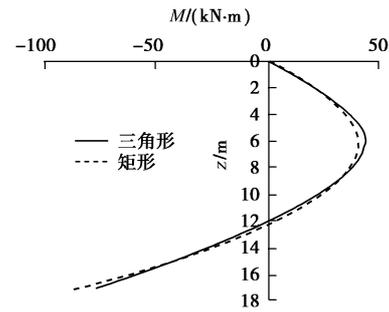
图 12 矩形线状荷载和挠度

Fig. 12 Rectangular linear force and deflection of piles

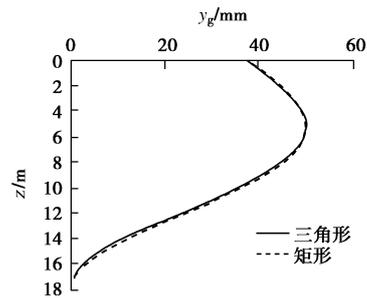
对两种线状荷载形状, 均取 $L=17\text{ m}$, $d=0.4\text{ m}$, $L_b/d=7$, $m_b=5\text{ MN/m}^4$, $y_m=50\text{ mm}$, $E=25500\text{ MPa}$, $\delta=0.3$, $m_s=0.5\text{ MN/m}^4$ 。三角形荷载 $\alpha=0$ 。计算结果见图 13 和表 2。

可见, 矩形荷载与三角形荷载对应的刚性桩弯矩、刚性桩位移、均非常接近。矩形荷载对应的 M_m 稍小于三角形荷载对应的 M_m , M_b 稍大于三角形荷载对应的 M_b ; 矩形荷载对应的 y_0 稍小于三角形荷载对应的 y_0 。改变 y_m 等参数时, 得到相同的结论。因此, 沿刚性桩的线状荷载形状对弯矩和位移影响较小, 采用本文假设的线状荷载分布形状不会对桩身弯矩和位移

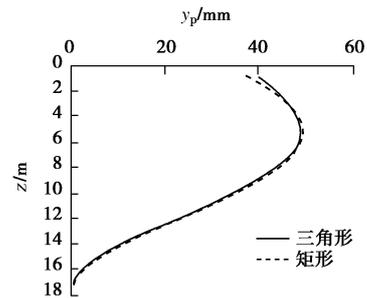
造成较大误差。



(a) 弯矩



(b) 地基位移



(c) 桩位移

图 13 线状荷载形状对 M , y 的影响

Fig. 13 Influence of shape of linear load on M and y

表 2 线荷载形状对 M_m , M_b , y_0 的影响

Table 2 Influence of shape of line load on M_m , M_b and y_0

荷载形状	$M_m / (\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_b / (\text{kN}\cdot\text{m})$	y_0 / mm
三角形	42.98	77.17	37.19
矩形	39.98	86.52	34.60

3 刚性桩抗弯能力

预制管桩抗裂弯矩 M_k 和极限弯矩 M_u 可在规范中查到, 钢筋混凝土桩的抗弯承载力可采用管桩规范中的公式计算得到, 素混凝土桩的 M_k 可为

$$M_k = \frac{\pi}{32} d^3 f_{tk} \quad (19)$$

式中, f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值。

由前面分析可知, 刚性桩的最大弯矩通常出现在

桩底端硬土层中。当刚性桩在硬土层中受弯开裂后，该处弯矩降低为零，相当于 L_0 变小，由图 7, 8 可知，桩身受到的最大弯矩降低。当刚性桩在 M_m 位置处开裂时，该处承受的弯矩减小直至为零；随着地基侧向位移的增加，刚性桩其他位置也可能受弯开裂，以此类推，刚性桩可能成为若干桩段。由于刚性桩抗弯性能较差，刚性桩受弯开裂后，相邻桩段的位移差通常远小于桩直径，因此刚性桩受弯开裂后也能继续承担竖向荷载，并不一定导致路基在短期内滑塌。CFG 桩断桩现象非常普遍^[21-22]，但是仍然在不少工程中成功应用，如图 2 对应的广州西二环高速公路工程等。也就是说，图 2 中 CFG 桩最大位移超过 240 mm，按照本文计算已经断裂，但是仍能承担竖向荷载，CFG 桩位移大和断裂并不排斥本文计算方法对其的适用性。

当然，刚性桩开裂会导致路基的抗震性能、整体滑动稳定性、工程耐久性降低。为了保证工程长期安全，应避免刚性桩受弯开裂。

4 工程算例

4.1 工程概况

采用文献[10, 11]中算例，路面宽度 23 m，路堤高度 5 m，边坡比（坡率）1:1.5，路面荷载为 15 kPa。路堤填土重度取 19 kN/m³，弹性模量取 30 MPa，泊松比 0.3，黏聚力 15 kPa，摩擦角 28°。

4.2 地质情况

地基土层情况见图 14。地基土体的泊松比取为 0.35，计算中取土体弹性模量为 4 倍土体压缩模量，强度及其它参数如图 14。

4.3 地基处理情况

地基采用钢筋混凝土桩复合地基处理，桩直径 0.5 m，桩长 28 m，C30 混凝土，均匀配置 10Φ25 II 级钢筋、Φ8@150 箍筋，其抗弯承载力为 189 kN·m，抗剪承载力 469 kN。桩体泊松比为 0.2，弹性模量为 30 GPa。

4.4 弯矩计算

(1) 单排桩时弯矩计算

在路基坡脚设置一排桩，路基下地基为天然地基，取沉降修正系数为 1.2，按照分层总和法计算得到软土层底面以上天然地基最大沉降为 788.7 mm。取 $\eta=0.03$ ，按照式 (2) 得到最大侧向位移为 36.3 mm，刚性桩进入硬土层超过 7 倍桩径，最大弯矩位于软土层底面附近。取 $\delta=0.3$ ，按照式 (15) 计算得到刚性桩最大软土层底面的弯矩为 186 kN·m。因此，按照本文方法确定的坡脚刚性桩最大弯矩位置与文献[10]相同、大小基本相同。

		$E_{s0.1-0.2 \text{ MPa}}$	$w/\%$	c/kPa	$\phi/(\text{°})$
0	填土	5.0		10.0	5.0
GL-1.5 m	黏土	3.4	33.0	20.0	4.3
GL-2.5 m	淤泥	3.0	39.6	8.6	6.2
GL-7.0 m	淤泥	2.1	54.6	9.4	5.9
GL-12.0 m	淤泥质黏土	3.0	40.3	14.6	11.2
GL-16.5 m	粉土	12.1	21.6	13.0	33.5
GL-84 m	桩				

图 14 土层剖面图

Fig. 14 Soil profile

(2) 群桩时弯矩计算

桩间距 2.0 m，正方形布置，桩顶未设置土工格栅。综合内摩擦角取 33°，桩土应力比为 14.4，桩间土承担荷载为 66.4 kPa，桩顶荷载为 187.6 kN。将硬土层侧阻力看作桩端阻力的一部分，中性面位于地面以下 8 m 处^[20]，均布负摩擦力为 130 kN，桩端力 180 kN，中性面以下均布侧阻力为 70 kN，三角形分布侧阻力为 67.6 kN。采用 Bossinesq-Mindlin 联合法求得的桩间土附加应力见图 15。

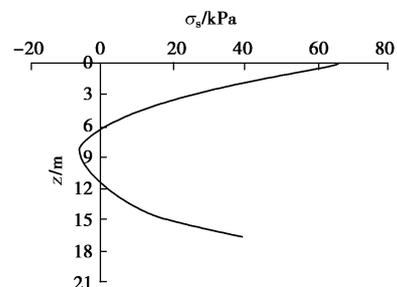


图 15 桩间土附加应力

Fig. 15 Superimposing stress of soils among piles

取沉降修正系数为 1.2，按照图 15 计算得到的最大沉降为 197.2 mm。取 $\eta=0.03$ ，按照式 (2) 得到最大侧向位移为 9.1 mm，刚性桩进入硬土层超过 2 m，最大弯矩位于软土层底面附近。取 $\delta=0.3$ ，按照式 (15) 计算得到刚性桩最大软土层底面的弯矩为 46.5 kN·m。因此，按照本文方法确定的坡脚刚性桩最大弯矩位置与文献[11]相同、大小基本相同。

可见，本文方法计算的桩身最大弯矩与有限元方法计算结果接近，且方法简单，易于工程应用。

5 结论

(1) 处于稳定状态的刚性桩复合地基路基也应验

算刚性桩的抗弯能力。

(2) 稳定路基中刚性桩位移与地基位移基本相等, 可忽略桩土位移差对刚性桩弯矩的影响。

(3) 根据复合地基最大沉降按照本文公式计算刚性桩弯矩的方法简单可行。

(4) 刚性桩进入硬土层的长度大于 7 倍桩径时, 可按照桩底端固结情况, 采用式 (15) 计算刚性桩最大弯矩。

参考文献:

- [1] 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. Analysis of cause of slide of approach embankment of Xinwei viaduct of Guangzhou-Zhuhai North Expressway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(4): 27 - 29. (in Chinese))
- [2] 连 峰. 桩网复合地基承载机理及设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2009(4): 33 - 34. (LIAN Feng. Bearing mechanism and design method of pile-reinforced earth composite foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009(4): 33 - 34. (in Chinese))
- [3] 徐立新. 桩承式加筋路堤的设计计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 104. (XU Li-xin. Study on design and computation method of geosynthetic reinforced pile-supported embankments[D]. Hangzhou: Zhenjiang University, 2007: 104. (in Chinese))
- [4] 鲁绪文. 路堤荷载下长短桩复合地基加固深厚软土路基的试验与研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007: 33. (LU Xu-wen. Experiment and study of composite foundation with long-short piles to improve deep soft soil under embankment load[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007: 33. (in Chinese))
- [5] 徐小庆, 刘吉福. 筒桩复合地基和 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))
- [6] 刘吉福, 郑 刚, 安关峰. 刚性桩复合地基路基隆流滑动稳定分析[J]. 工程勘察, 2013(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(6): 17 - 22. (in Chinese))
- [7] 胡勇刚, 罗 强, 张 良, 等. 基于离心模型试验的水泥土搅拌法加固斜坡软弱土地基变形特性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2207 - 2213. (HU Yong-gang, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Deformation characteristics analysis of slope soft soil foundation treatment with mixed-in-place pile by centrifugal model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2207 - 2213. (in Chinese))
- [8] 张师德, 阵绪禄. 软土地基上土工结构物的离心模拟试验[J]. 上海地质, 1988(4): 30 - 39. (ZHANG Shi-de, CHEN Xu-lu. Centrifuge tests for geotechnical construction on muddy clay foundation[J]. Shanghai Geology, 1988(4): 30 - 39. (in Chinese))
- [9] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 83 - 94. (GONG Xiao-nan. Theory and practice of composite foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 83 - 94. (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)—存在问题及单桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1648 - 1657. (ZHENG Gang, LIU Li, HAN Jie. Stability of embankment of soft subgrade reinforced by rigid inclusions(II)—background and single pile analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1648 - 1657. (in Chinese))
- [11] 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 of soft subgrade reinforced by rigid inclusions(II)—group piles analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1811 - 1820. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 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, ZHAO Guo-tang, et al. Study on calculation method of settlement of pile-net composite ground[J]. Railway Engineering, 2009(7): 19 - 23. (in Chinese))
- [14] 余 闯, 刘松玉, 杜广印. 桩承式路堤沉降简化计算方法

- 及其应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(10): 1495 - 1497, 1509. (YU Chuang, LIU Song-yu, DU Guang-yin. Simplified method of settlement calculation and its application to piled embankments[J]. Journal of Hefei University of Technology[J], 2009, 32(10): 1495 - 1497, 1509. (in Chinese))
- [15] 林壮宏, 李根存, 林文强. 某高速公路填石路基滑塌分析及处理方案[M]// 高速公路地基处理理论与实践. 北京: 人民交通出版社, 2005: 559 - 566. (LIN Zhuang-hong, LI Gen-cun, LIN Wen-qiang. Slide clause analysis and treatment schemes of a expressway embankment with block stone[M]// Theory and Practice of Expressway Ground Improvement. Beijing: China Communication Press, 2005: 559 - 566. (in Chinese))
- [16] 高长胜, 魏汝龙, 陈生水. 抗滑桩加固边坡变形破坏特性离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 31(1): 145 - 148. (GAO Chang-sheng, WEI Ru-long, CHEN Sheng-shui. Centrifugal model tests on deformation of slopes reinforced with piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 31(1): 145 - 148. (in Chinese))
- [17] TAVENAS F, MIEUSSENS C, BOURGES F. Lateral displacements in clay foundations under embankments[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16: 532 - 550.
- [18] TAVENAS F, LEROUEIL S. The behavior of embankments on soft foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17: 236 - 259.
- [19] 余 闯, 刘松玉. 路堤侧向变形性状及预测模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 29(5): 1305 - 1309. (YU Chuang, LIU Song-yu. Study on the characteristic and prediction model for lateral deformations under embankments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 29(5): 1305 - 1309. (in Chinese))
- [20] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 63 - 64. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 63 - 64. (in Chinese))
- [21] 陈 旻. CFG 桩复合地基质量事故分析与加固设计[J]. 工程勘察, 2009(5): 26 - 30. (CHEN Min. Analysis on the quality accident of composite foundation with CFG piles and its strengthening design[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(5): 26 - 30. (in Chinese))
- [22] 刘吉福. 沉管灌注桩断桩率减小措施试验研究[J]. 公路, 2012(6): 96 - 102. (LIU Ji-fu. Experiment about measures to deduce broken pile of sinking-pipe concrete piles[J]. Highway, 2012(6): 96 - 102. (in Chinese))

第八届港口工程技术交流大会暨第九届工程排水与加固技术研讨会 1 号通知: 论文征集

由中国土木工程学会港口工程分会与工程排水与加固专业委员会联合主办的第八届港口工程技术交流大会暨第九届工程排水与加固技术研讨会将于 2014 年 5 月在江苏省连云港市举办, 会议由连云港港口(集团)有限公司承办。本次会议将邀请水运行业及工程排水与加固领域知名专家做特邀和专题报告, 为行业管理和工程技术人员提供新技术、新设备、新工艺的交流平台。

会议议题与征文内容:

(1) 港口工程领域: ①水运工程建设过程中的新成果、新技术与新工艺; ②沿海、内河航道泥沙运动与安全防护技术; ③绿色、低碳港口生产与运营技术创新; ④人工岛设计、施工、建设创新技术; ⑤港工建筑物建设、维修、营运创新技术; ⑥通航建筑物生产与运营的创新技术; ⑦重大工程案例和港工技术发展探讨。

(2) 工程排水与加固领域: ①软土工程特性与理论; ②超软地基围堰填筑与造陆技术; ③地基处理的新技术、新方法

与测试技术的发展; ④基坑、边坡等岩土工程的设计理论与加固技术; ⑤新型土工合成材料的研制、应用及检测方法; ⑥围海造陆工程的环境监控与生态保护; ⑦重大工程实录及关键技术、经验交流。

论文格式与要求参照《岩土工程学报》征稿启事, 英文部分暂不要求。论文字数一般不超过 8000 字(包括图表和公式)。投稿稿件按要求排版后发至 PSJG2014@163.com。经专家评审合格的论文以会议论文集的形式正式出版, 同时推荐部分优秀论文在《岩土工程学报》、《水运工程》等核心期刊发表。2013 年 11 月 30 日前提交全文, 2013 年 12 月 30 日前通知审稿专家修改意见, 2014 年 1 月 30 日前提交修改稿, 通知录用结果。

学会及总联系人: 关云飞(025-85829531, 13770938628); 土工合成材料技术联系人: 郑澄锋(025-85829513, 13851747826); 工程技术与加固联系人: 徐锴(025-85829552, 13912974088); 技术展览与厂商联系人: 钟祥海(025-85829517, 13851672098)。

(中国土木工程学会港口工程分会
中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会 供稿)