

复合地基黏性土路堤土拱效应分析

刘吉福¹, 余烈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. 东莞理工学院 生态环境与建筑工程学院, 广东 东莞 523015)

摘要: 现行规范中桩土应力比计算公式只适用于无黏性土路堤, 工程实践中对桩帽复合地基与桩梁复合地基的选择也常发生争议。对桩帽复合地基、桩梁复合地基分别推导了适用于黏性土路堤的桩土应力比计算公式。分析表明, 桩帽和连梁面积相同时, 设置桩帽的路堤桩土应力比、桩荷载率均大于设置桩梁的路堤桩土应力比、桩荷载率。对于拱脚、拱顶均为无黏性土的桩帽复合地基路堤, 路堤高度小时拱顶屈服, 路堤高度大时拱脚屈服。拱顶屈服时, 桩土应力比随路堤高度增大而增大; 拱脚屈服时, 桩土应力比不再随路堤高度增大而变化。对拱脚为无黏性土、拱顶为黏性土的桩帽复合地基路堤, 路堤高度小时土拱不屈服, 路堤高度较大时拱脚屈服, 路堤高度大时拱顶屈服。土拱不屈服或拱脚屈服时, 桩土应力比随路堤高度增大而增大; 拱顶屈服时, 桩土应力比随路堤高度增大而减小。对拱脚、拱顶均为黏性土的桩帽复合地基路堤, 路堤高度小时土拱不屈服, 路堤高度大时拱脚屈服。

关键词: 黏性土; 路堤; 复合地基; 桩帽; 连梁; 垫层; 土拱

中图分类号: TU74

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)02-0099-10

Soil arch effect analysis of cohesive soil embankment on composite foundation

LIU Ji-fu¹, YU Lie²

(1. Guangdong Province Communication Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510507, Guangdong, China;

2. School of Environment and Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523015, Guangdong, China)

Abstract: The calculation formulas of pile-soil stress ratio in the current codes are only applicable to the non-cohesive soil embankment. In engineering practice, the choice of composite foundation with pile caps and composite foundation with beams is often controversial. For composite foundation with pile caps and composite foundation with beams, the formulas of pile-soil stress ratio suitable for cohesive soil embankment are deduced respectively. It is shown that the pile-soil stress ratio and pile load ratio of the embankment with pile caps are larger than those of the embankment with pile beams when the area of pile caps and connecting beams is the same. For the composite foundation embankment with pile caps with non-cohesive soil at arch foot and vault, the soil of the vault reaches the yield state when the embankment height is small, and the soil of the arch foot reaches the yield state when the embankment height is large. The pile-soil stress ratio increases with the increase of embankment height when the vault soil yields, while the pile-soil stress ratio has no larger changes with the increase of embankment height when the foot soil yields. For the composite foundation embankment with pile caps with non-cohesive soil at the arch foot and cohesive soil at the vault, the soil arch does not yield when the embankment height is small, the soil at the arch foot yields when the embankment height is large, and the soil at the vault yields when the embankment height is higher. The pile-soil stress ratio increases with the increase of embankment height when the soil arch does not yield or the soil at the arch foot yields and decreases with the increase of embankment height when the soil at the vault yields. For the composite foundation embankment with pile caps with cohesive soil at arch foot and vault, the soil arch does not yield when the embankment height is small, and the soil of the arch foot reaches the yield state when the embankment height is large.

Key words: cohesive soil; embankment; composite foundation; pile cap; coupling beam; cushion; soil arch

0 引言

我国沿海地区河网密布,一方面高速公路被交道路和河道多,导致路堤普遍较高;另一方面,对高速公路的建设工期、质量要求不断提高。上述两方面的因素导致越来越多的高速公路软基路堤采用复合地基。随着砂石料价格不断上涨,除复合地基褥垫层可能采用砂石料等无黏性土外,路堤其余部分基本上均填筑黏性土,部分路基甚至取消了无黏性土褥垫层。路堤下复合地基桩间土沉降大于桩顶沉降,导致桩(帽)顶面以上的路堤中形成土拱。土拱效应分析对复合地基沉降计算、稳定分析等均非常重要^[1-4]。目前对土拱效应的研究常用方法有模型试验、现场测试、数值分析、理论分析^[5-13]等。BS 8006—2010采用计算涵洞应力的MARSTON公式和HEWLETT公式^[14]。我国公路规范采用陈云敏公式^[15]。MARSTON公式计算的桩土应力比、桩(帽)承担荷载与单桩负责面积内桩(帽)顶面以上路堤荷载的比例(简称桩荷载率)与填料性质无关,路堤高度较大时桩土应力比、桩荷载率偏小^[14]。HEWLETT等^[5]、陈云敏等^[6]、强小俊等^[7]对土拱效应进行理论分析时均假设土拱为球形。HEWLETT等^[5]、陈云敏等^[6]假设拱顶、拱脚均为无黏性土。HEWLETT等^[5]分别计算拱顶、拱脚屈服对应的桩帽荷载率并取其中的小者。陈云敏等^[6]认为路堤较低时拱脚、拱顶都未进入极限状态,按极限状态得出的桩顶荷载与桩间土荷载之和大于路堤重力;当路堤较高时由极限状态算出的桩顶荷载与桩间土荷载之和小于路堤重力;只有当路堤高度为某一特定值时才能满足荷载平衡条件。因此假设拱顶、拱脚屈服程度相同,对被动土压力系数乘以不大于1的屈服系数,通过试算计算桩帽荷载率和桩土应力比。强小俊等^[7]采用文献[6]的思路推导了黏性土路堤的土拱效应公式,需要试算计算桩土应力比,且路堤高度较小时计算的桩间荷载集度、桩土应力比为负值,明显不合理。

工程实践中,刚性桩复合地基通常采用桩帽复合地基,也有专家认为桩梁复合地基更有利,导致设计人员非常纠结。

为使土拱效应分析更加符合工程实际情况,推导了可以考虑填料黏聚力的土拱效应公式。针对桩帽复合地基与桩梁复合地基优劣的争议,推导了桩顶设置连梁时的土拱效应公式,并通过计算分析了桩梁复合地基和桩帽复合地基的优劣。

1 桩帽复合地基

根据HEWLETT等^[5]的假设,对于正方形布置的刚性桩,4根桩之间的土拱可近似地拆分为两部分,一部分是两端直接作用于桩帽顶部的4个三棱形平面土拱,另一部分是作用于4个三棱平面土拱上的球形土拱。

1.1 拱顶屈服控制的桩土荷载

取球形土拱拱顶土单元进行受力分析,根据图1中土单元径向受力平衡条件可得:

$$\frac{d\sigma_R}{dR} + \frac{2(\sigma_R - \sigma_\theta)}{R} = -\gamma_1 \quad (1)$$

式中: σ_R 为球形土拱顶径向应力; R 为土单元与球形土拱中心的距离; σ_θ 为土拱切向应力; γ_1 为拱顶土重度。

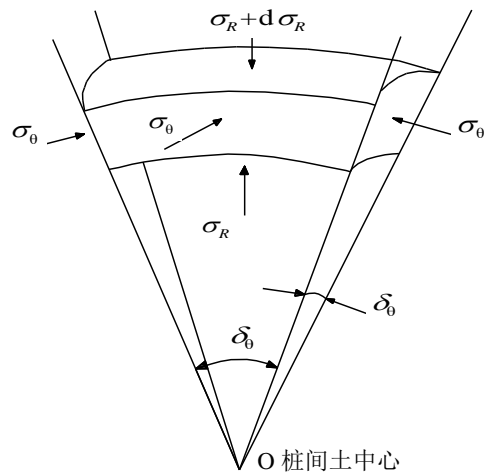


图1 拱顶土单元受力

Fig. 1 Stress of soil element of vault

当球形土拱拱顶屈服时,其径向和切向应力之间的关系为:

$$\sigma_\theta = 2c_1\sqrt{K_{p1}} + \sigma_R K_{p1} \quad (2)$$

式中: c_1 为拱顶土的黏聚力; K_{p1} 为拱顶土的被动土压力系数。

由式(1)、式(2)可得:

$$\frac{d\sigma_R}{dR} + \frac{2(1-K_{p1})}{R}\sigma_R = \frac{4c_1\sqrt{K_{p1}}}{R} - \gamma_1 \quad (3)$$

由式(3)可得:

$$\sigma_R = a_1 R^{2(K_{p1}-1)} + \frac{2c_1\sqrt{K_{p1}}}{1-K_{p1}} - \frac{\gamma_1 R}{3-2K_{p1}} \quad (4)$$

式中: a_1 为待定系数。

$R = \frac{D}{\sqrt{2}}$ 时, $\sigma_R = \gamma_1 \left(H - \frac{D}{\sqrt{2}} \right)$,结合式(4)可得:

$$a_1 = \frac{\gamma_1 \left(H - \frac{D}{\sqrt{2}} \right) + \frac{\gamma_1 D}{\sqrt{2}(3-2K_{p1})} - \frac{2c_1 \sqrt{K_{p1}}}{1-K_{p1}}}{\left(\frac{D}{\sqrt{2}} \right)^{2(K_{p1}-1)}} \quad (5)$$

式中: H 为路堤高度; D 为桩间距。

因此:

$$\sigma_R = \left(\frac{\sqrt{2}R}{D} \right)^{2(K_{p1}-1)} \gamma_1 \left[H - \frac{\sqrt{2}(1-K_{p1})D}{3-2K_{p1}} \right] - \frac{\gamma_1 R}{3-2K_{p1}} + \frac{2c_1 \sqrt{K_{p1}}}{1-K_{p1}} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{2}R}{D} \right)^{2(K_{p1}-1)} \right] \quad (6)$$

设 b 为桩帽边长, 当 $\sigma_{R=\frac{D-b}{\sqrt{2}}} < 0$ 时, 说明球形

土拱拱顶土单元达到屈服状态需要拱顶内侧径向应力为负值, 但是土体不能承受拉力, 拱顶内侧径向应力应为零, 此时球形土拱拱顶脱空时拱顶也不能达到屈服状态, 桩帽间荷载集度等于球形土拱内单位面积土体的重量, 即:

$$\sigma_{su} = \sigma_{sm} = \frac{D-b}{\sqrt{2}} \gamma_1 \quad (7)$$

式中: σ_{su} 为桩帽间荷载集度; σ_{sm} 为 σ_{su} 的最小值; $\bar{\gamma}_1$ 为球形拱内填料平均重度。

当 $\sigma_{R=\frac{D-b}{\sqrt{2}}} \geq 0$ 时, 桩帽间荷载集度等于拱顶

内侧应力与球形土拱内单位面积土体的重量之和, 即:

$$\sigma_{su} = \sigma_{R=\frac{D-b}{\sqrt{2}}} + \frac{D-b}{\sqrt{2}} \gamma_1 = (1-\delta)^{2(K_{p1}-1)} \gamma_1 \left[H - \frac{\sqrt{2}D(1-K_{p1})}{3-2K_{p1}} \right] + \frac{[(3-2K_{p1})\bar{\gamma}_1 - \gamma_1](D-b)}{\sqrt{2}(3-2K_{p1})} + \frac{2c_1 \sqrt{K_{p1}}}{1-K_{p1}} \left[1 - (1-\delta)^{2(K_{p1}-1)} \right] \quad (8)$$

式中: δ 为桩帽边长 b 与桩间距 D 的比值。

由复合地基顶面竖向受力平衡条件可得:

$$P_{pa} = D^2 H \bar{\gamma} - \sigma_{su} (D^2 - b^2) \quad (9)$$

式中: P_{pa} 为桩帽顶面竖向荷载; $\bar{\gamma}$ 为桩帽顶面以上路堤填料平均重度。

桩土应力比为:

$$n = \frac{P_{pa}}{A_c \sigma_{su}} \quad (10)$$

式中: n 为桩帽顶面竖向荷载集度与桩帽间荷载集度的比值, 简称桩土应力比; A_c 为桩帽面积。

1.2 拱脚屈服控制的桩土荷载

取三棱形平面土拱拱脚土单元进行受力分析,

根据图 2 中土单元径向受力平衡条件可得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (11)$$

式中: σ_r 为三棱形平面土拱拱脚径向应力; r 为土单元与三棱形平面土拱中心的距离。

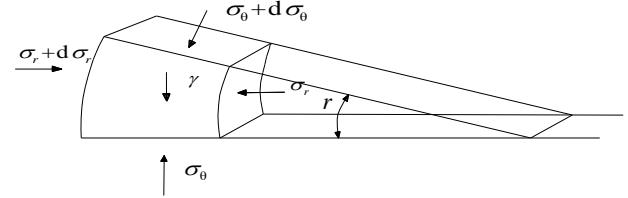


图 2 拱脚土单元受力

Fig. 2 Stress of soil element of arch foot

当三棱形平面土拱拱脚土单元屈服时, 径向应力和切向应力之间的关系为:

$$\sigma_\theta = 2c_2 \sqrt{K_{p2}} + K_{p2} \sigma_r \quad (12)$$

式中: c_2 为拱脚土黏聚力; K_{p2} 为拱脚土的被动土压力系数。

由式 (11)、式 (12) 得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1-K_{p2}}{r} \sigma_r = \frac{2c_2 \sqrt{K_{p2}}}{r} \quad (13)$$

由式 (13) 可得:

$$\sigma_r = a_2 r^{K_{p2}-1} + \frac{2c_2 \sqrt{K_{p2}}}{1-K_{p2}} \quad (14)$$

式中: a_2 为待定系数。

$r = \frac{D-b}{2}$ 时, $\sigma_r = 2c_2 \sqrt{K_{p2}} + K_{p2} \sigma_{su}$, 结合式 (14) 可得:

$$a_2 = \frac{K_{p2} \sigma_{su} - \frac{2c_2 K_{p2}^{1.5}}{1-K_{p2}}}{\left(\frac{D-b}{2} \right)^{K_{p2}-1}} \quad (15)$$

因此:

$$\sigma_r = \left(\frac{2r}{D-b} \right)^{K_{p2}-1} \left(K_{p2} \sigma_{su} - \frac{2c_2 K_{p2}^{1.5}}{1-K_{p2}} \right) + \frac{2c_2 \sqrt{K_{p2}}}{1-K_{p2}} \quad (16)$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{2r}{D-b} \right)^{K_{p2}-1} K_{p2} \left(K_{p2} \sigma_{su} - \frac{2c_2 K_{p2}^{1.5}}{1-K_{p2}} \right) + \frac{2c_2 \sqrt{K_{p2}}}{1-K_{p2}} \quad (17)$$

把桩帽顶面土体切向应力 σ_θ 在桩帽顶部范围内积分, 即得桩帽顶面竖向荷载:

$$P_{pa} = 8 \int_{0.5(D-b)}^{0.5D} (0.5D-r) \sigma_\theta dr = \frac{2D^2}{1+K_{p2}} \left(K_{p2} \sigma_{su} - \frac{2c_2 K_{p2}^{1.5}}{1-K_{p2}} \right) \left[(1-\delta)^{1-K_{p2}} + (\delta-1)(1+\delta K_{p2}) \right] + \frac{2c_2 \sqrt{K_{p2}} b^2}{1-K_{p2}} \quad (18)$$

由式(9)、式(18)可得:

$$\sigma_{su} = \frac{(1+K_{p2})H\bar{\gamma}D^2 - \frac{2c_2K_{p2}^{0.5}(1+K_{p2})b^2}{1-K_{p2}}}{2K_{p2}[(1-\delta)^{1-K_{p2}} + (\delta-1)(1+\delta K_{p2})]D^2 + (1+K_{p2})(D^2-b^2)} + \frac{\frac{4c_2K_{p2}^{1.5}}{1-K_{p2}}[(1-\delta)^{1-K_{p2}} + (\delta-1)(1+\delta K_{p2})]D^2}{2K_{p2}[(1-\delta)^{1-K_{p2}} + (\delta-1)(1+\delta K_{p2})]D^2 + (1+K_{p2})(D^2-b^2)}} \quad (19)$$

当式(19)计算值小于 σ_{sm} 时,说明拱脚未达到屈服状态,此时 σ_{su} 应取 σ_{sm} , P_{pa} 由式(9)计算得到, n 由式(10)计算得到。

1.3 基于土拱应力分析确定的桩土荷载

当拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度大于拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度时,如果采用拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度,则会导致式(2)不成立。因此,此时拱脚不屈服,应采用拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度,即采用式(8)计算桩帽间荷载集度。

当拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度小于拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度时,如果采用拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度,则会导致式(12)不成立。因此,此时拱顶不屈服,应采用拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度,即采用式(19)计算桩帽间荷载集度。

如果按式(8)、式(19)计算的桩帽间荷载集度均小于 σ_{sm} ,则代表土拱不屈服,桩帽间荷载集度应取 σ_{sm} 。

因此,桩土荷载、桩土应力比应根据土拱实际屈服位置的受力分析确定,即桩帽间荷载集度应取拱顶屈服、拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度中的大者,桩帽荷载应取拱顶屈服、拱脚屈服对应的桩帽荷载中的小者,桩土应力比应取拱顶屈服、拱脚屈服对应的桩土应力比中的小者。

当 c_1 、 c_2 等于0时,式(8)、式(18)、(19)变成 HEWLETT 公式相同^[5]。因此, HEWLETT 公式可看作本文公式的一个特例。

2 桩梁复合地基

桩顶框架梁的作用与桩帽的作用相同,其中横向连梁同时可以减少刚性桩的水平位移,因此只分析桩顶设置横向连梁的情况,设连梁宽度为 b ,此时仅有垂直连梁的平面土拱。

2.1 拱顶屈服控制的桩土荷载

取平面土拱拱顶土单元进行受力分析,根据土

单元径向受力平衡条件可得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = -\gamma_1 \quad (20)$$

拱顶土单元屈服时,径向应力和切向应力之间的关系为:

$$\sigma_\theta = 2c_1\sqrt{K_{p1}} + \sigma_r K_{p1} \quad (21)$$

由式(20)、式(21)可得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1-K_{p1}}{r}\sigma_r = \frac{2c_1\sqrt{K_{p1}}}{r} - \gamma_1 \quad (22)$$

由式(22)可得:

$$\sigma_r = a_1 r^{K_{p1}-1} + \frac{2c_1\sqrt{K_{p1}}}{1-K_{p1}} - \frac{\gamma_1 r}{2-K_{p1}} \quad (23)$$

$r = \frac{D}{2}$ 时, $\sigma_r = \gamma_1\left(H - \frac{D}{2}\right)$,结合式(23)可得:

$$a_1 = \frac{\gamma_1\left(H - \frac{D}{2}\right) + \frac{\gamma_1 D}{2(2-K_{p1})} - \frac{2c_1\sqrt{K_{p1}}}{1-K_{p1}}}{\left(\frac{D}{2}\right)^{K_{p1}-1}} \quad (24)$$

因此:

$$\sigma_R = \left(\frac{2R}{D}\right)^{K_{p1}-1} \gamma_1 \left[H + \frac{(K_{p1}-1)D}{2(2-K_{p1})} \right] - \frac{\gamma_1 R}{2-K_{p1}} + \frac{2c_1\sqrt{K_{p1}}}{1-K_{p1}} \left[1 - \left(\frac{2R}{D}\right)^{K_{p1}-1} \right] \quad (25)$$

当 $\sigma_{r=\frac{D-b}{2}} < 0$ 时,说明平面土拱拱顶达到屈服

状态需要拱顶内侧径向应力为负值,但是土体不能承受拉力,此时拱顶内侧径向应力应为零,平面土拱拱顶未达到屈服状态,连梁间荷载集度等于平面土拱内单位面积土体的重量,即:

$$\sigma_{su} = \sigma_{sm} = \frac{D-b}{2} \gamma_1 \quad (26)$$

式中: σ_{su} 为连梁间荷载集度; σ_{sm} 为 σ_{su} 的最小值。

当 $\sigma_{su} = \sigma_{r=\frac{D-b}{2}} > 0$ 时, σ_{su} 等于拱顶内侧应力与

平面土拱内单位面积土体的重量之和,即:

$$\sigma_{su} = \sigma_{r=\frac{D-b}{2}} + \frac{D-b}{2} \gamma_1 = (1-\delta)^{K_{p1}-1} \gamma_1 \left[H + \frac{D(K_{p1}-1)}{2(2-K_{p1})} \right] + \frac{(D-b)\left[(2-K_{p1})\bar{\gamma}_1 - \gamma_1\right]}{2(2-K_{p1})} + \frac{2c_1\sqrt{K_{p1}}}{1-K_{p1}} \left[1 - (1-\delta)^{K_{p1}-1} \right] \quad (27)$$

式中: δ 为连梁宽度 b 与桩间距 D 的比值。

由复合地基顶面竖向受力平衡条件可得:

$$P_{pa} = DH\bar{\gamma} - \sigma_{su}(D-b) \quad (28)$$

式中: P_{pa} 为单位长度连梁顶面竖向荷载。

桩土应力比为:

$$n = \frac{P_{pa}}{b\sigma_{su}} \quad (29)$$

式中: n 为连梁顶面竖向荷载集度与连梁间荷载集度的比值, 简称桩土应力比。

2.2 拱脚屈服控制的桩土荷载

取平面土拱拱脚土单元进行受力分析, 由土单元的径向受力平衡条件可得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (30)$$

拱脚屈服时, 径向应力和切向应力之间的关系为:

$$\sigma_\theta = 2c_2\sqrt{K_{p2}} + K_{p2}\sigma_r \quad (31)$$

由式 (30)、式 (31) 得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1 - K_{p2}}{r}\sigma_r = \frac{2c_2\sqrt{K_{p2}}}{r} \quad (32)$$

由式 (32) 可得:

$$\sigma_r = a_1 r^{K_{p2}-1} + \frac{2c_2\sqrt{K_{p2}}}{1 - K_{p2}} \quad (33)$$

$r = \frac{D-b}{2}$ 时, $\sigma_r = 2c_2\sqrt{K_{p2}} + K_{p2}\sigma_{su}$, 结合式 (33) 可得:

$$a_1 = \frac{K_{p2}\sigma_{su} - \frac{2c_2K_{p2}^{1.5}}{1 - K_{p2}}}{\left(\frac{D-b}{2}\right)^{K_{p2}-1}} \quad (34)$$

因此:

$$\sigma_r = \left(\frac{2r}{D-b}\right)^{K_{p2}-1} \left(K_{p2}\sigma_{su} - \frac{2c_2K_{p2}^{1.5}}{1 - K_{p2}}\right) + \frac{2c_2\sqrt{K_{p2}}}{1 - K_{p2}} \quad (35)$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{2r}{D-b}\right)^{K_{p2}-1} K_{p2} \left(K_{p2}\sigma_{su} - \frac{2c_2K_{p2}^{1.5}}{1 - K_{p2}}\right) + \frac{2c_2\sqrt{K_{p2}}}{1 - K_{p2}} \quad (36)$$

把连梁顶面土体切向应力 σ_θ 在连梁顶部单位长度范围内积分, 即得连梁顶面单位长度竖向荷载:

$$P_{pa} = 2 \int_{0.5(D-b)}^{0.5D} \sigma_\theta dr = D \left(K_{p2}\sigma_{su} - \frac{2c_2K_{p2}^{1.5}}{1 - K_{p2}} \right) \left[(1-\delta)^{1-K_{p2}} + (\delta-1) \right] + \frac{2c_2\sqrt{K_{p2}}b}{1 - K_{p2}} \quad (37)$$

由式 (28)、式 (37) 可得:

$$\sigma_{su} = \frac{DH\gamma + \frac{2c_2K_{p2}^{1.5}D}{1 - K_{p2}} \left[(1-\delta)^{1-K_{p2}} + \delta - 1 \right] - \frac{2c_2K_{p2}^{0.5}b}{1 - K_{p2}}}{K_{p2} \left[(1-\delta)^{1-K_{p2}} + \delta - 1 \right] D + D - b} \quad (38)$$

进而由式 (29) 求得桩土应力比。

当式 (38) 计算值小于 σ_{sm} 时, 说明拱脚未达到屈服状态, 此时 σ_{su} 应取 σ_{sm} , P_{pa} 由式 (28) 计算得到, n 由式 (29) 计算得到。

2.3 基于土拱应力分析确定的桩土荷载

与 1.3 节同样道理, 连梁间荷载集度取拱顶屈服、拱脚屈服对应的连梁间荷载集度中的大者, 连梁荷载取拱顶屈服、拱脚屈服对应的连梁荷载中的小者, 桩土应力比取拱顶屈服、拱脚屈服对应的桩土应力比中的小者。

3 工程验证与方法对比

3.1 工程验证

(1) 案例 1

文献[8]中广东佛山一环城市快速路乐从试验段 F 区右幅管桩正方形布置, 间距 2.4 m, 桩长 12 m, 以穿透第一层软土进入硬土层 2 m。桩帽边长 1 m。桩帽顶面铺设一层钢塑土工格栅, 格栅以上填筑细砂, 细砂厚度为 3.2 m, 格栅以上桩土应力比实测值为 9.35。由于细砂经过碾压, 内摩擦角取 30°, 黏聚力取 0 kPa, 重度取 18 kN/m³。按照各种方法得到的桩土应力比见表 1。由于管桩未穿透第二层软土, MARSTON 方法按照摩擦桩计算。可见, 本文方法计算的桩土应力比更接近实测值。

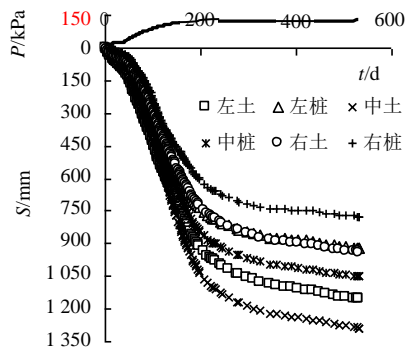
表 1 各种方法得到的桩土应力比

Table 1 Pile-soil stress ratio obtained by various methods

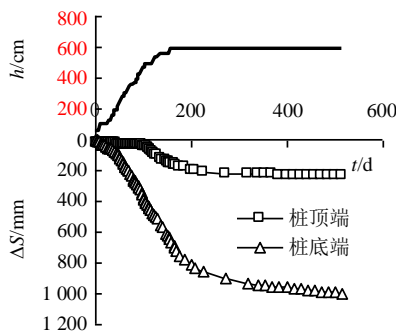
方法	桩土应力比	
	案例 1	案例 2
陈云敏方法	4.73	—
强小俊方法	4.73	0.86
MARSTON 方法	2.91	2.49
HEWLETT 方法	8.14	—
本文方法	8.14	19.25
监测	9.35	20.5~30.2

(2) 案例 2

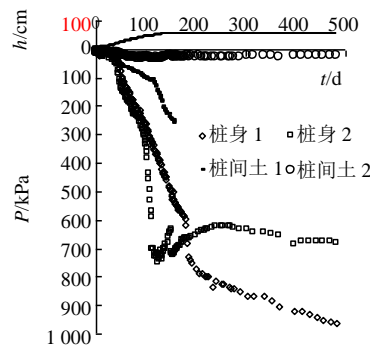
文献[16]中广州西二环南段高速公路 K32+065 附近路堤高 6 m, 采用 CFG 桩正方形布置, 桩间距为 2.2 m。CFG 桩桩顶设置一直径 70 cm 的圆形盖板, 褥垫层采用 0.5 m 厚的中粗砂, 褥垫层顶部铺设一层 TGSG20-20 型双向拉伸格栅, 延伸率不大于 11%, 抗拉强度不小于 20 kN/m。褥垫层以上填筑黏性土。实测桩土沉降差、荷载集度、桩帽顶面处桩土应力比见图 3。



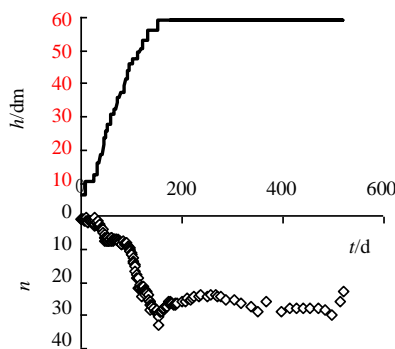
(a) 桩土沉降



(b) 桩土沉降差



(c) 桩土荷载集度



(d) 桩土应力比

图3 监测结果

Fig. 3 Monitoring results

根据桩土沉降差可得到土工格栅向桩帽转移约 10.2 kN, 剔除其影响后, 填土高 5.8 m 时桩帽顶面处桩土应力比为 20.5~30.2。中粗砂内摩擦角取

35°, 黏聚力取 0 kPa。虽然本工程沉降达到 1.25 m, 但是拱顶仍位于地下水位以上, 因此黏性土内摩擦角取 20°, 黏聚力取 25 kPa。中粗砂和黏性土的重度均取 20 kN/m³。采用各种方法得到的桩土应力比见表 1。由于桩底端桩土沉降差较大, MARSTON 方法按照摩擦桩计算。本工程拱顶为黏性土, 陈云敏方法、HEWLETT 方法不适用。可见, 本文方法计算的桩土应力比更接近实测值。

3.2 计算方法对比

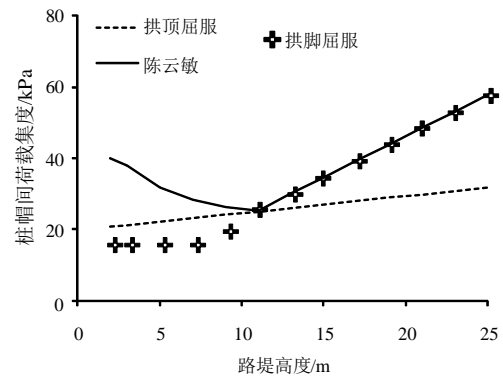
(1) 利用工程实例对比

由 3.1 节工程实例可知, MARSTON 方法计算结果严重偏低, 强小俊方法计算结果不合理, HEWLETT 方法只适用无黏性土路堤, 本文方法适用范围广、且计算结果更接近工程实测值。

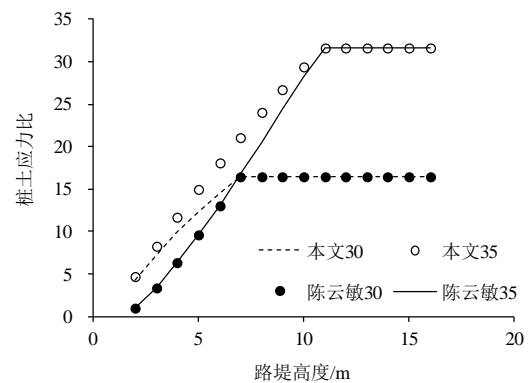
(2) 利用工程算例对比

由于陈云敏方法已列入公路行业规范^[15], 下面主要对陈云敏方法与本文方法进行对比。

刚性桩正方形布置, 桩间距取 2.4 m, 桩帽边长为 1.2 m, 路堤土重度为 20 kN/m³。路堤填料采用内摩擦角为 35°的无黏性土。本文方法和陈云敏方法的计算结果见图 4。图 4 (b) 中分别计算了内摩擦角为 30°、35°时的桩土应力比。



(a) 桩帽间荷载集度-路堤高度的关系曲线



(b) 桩土应力比-路堤高度的关系曲线

图4 不同方法计算结果对比

Fig. 4 Comparison of calculation results of different methods

由图 4 (a) 可知, 路堤高度小于 10.86 m 时拱顶屈服, 路堤高度大于 10.86 m 时拱脚屈服。当拱脚屈服时, 本文方法与陈云敏方法计算桩间土荷载集度相同。当拱顶屈服时(路堤高度小于 10.86 m), 本文方法计算的桩间荷载集度随路堤高度增大而增大, 陈云敏方法计算的桩间荷载集度随路堤高度增大而减小。大量工程实测结果表明桩间荷载集度随填土高度增大而增大^[8-13]。因此, 陈云敏方法计算的桩间荷载集度与实测结果不符。

由图 4 (b) 可知, 路堤高度小于 6.94 m 时, 按照陈云敏方法计算的桩土应力比不随内摩擦角变化, 违反了抗剪强度随内摩擦角增大的常识。按本文方法, 拱顶屈服时桩土应力比随内摩擦角增大而增大, 与付海平等^[17]、杨庆年等^[18] 的研究结论相同。路堤高度为 2 m 时, 陈云敏方法计算的桩土应力比为 1.0, 明显不合理。

(3) 理论

对拱顶为无黏性土的路堤, 由于无黏性土等黏聚力等于零, 当桩间土沉降导致拱下土体对拱顶反力为零时, 拱顶在切向力作用下必然屈服, 因此低路堤土拱也会屈服, 不存在文献[6]认为的土拱不屈服的情况。桩顶荷载根据拱顶或拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度按照复合地基顶面竖向荷载平衡条件计算得到, 不存在文献[6]认为复合地基顶面竖向荷载不平衡的问题。另外, 拱顶、拱脚只有某个特定路堤高度下才同时屈服, 大部分情况下只有拱顶或拱脚屈服, 文献[6]关于拱顶、拱脚屈服程度相同的假设不合理。

综上所述, 采用本文方法更合理、适用范围更广, 且不需要试算。

4 影响因素分析

本节通过算例分析拱脚填料、拱顶填料、桩帽和连梁对桩土应力比、桩荷载率的影响。

路堤填料重度为 20 kN/m³, 抗剪强度指标见表 2。

表 2 路堤类型与抗剪强度指标

Table 2 Embankment types and shear strength indexes

路堤类型	拱脚土		拱顶土	
	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)
s	0	35	0	35
c	0	35	20	20
cc	20	20	20	20

注: s 代表无黏土路堤; c 代表褥垫层为无黏土, 其他为黏性土的路堤; cc 代表黏性土路堤。

刚性桩正方形布置, 桩间距取 2.4 m, 桩帽边长为 1.2 m, 连梁面积与桩帽面积相等。桩帽(连梁)间荷载集度、桩土应力比、桩荷载率与路堤高度的关系见图 5~8。

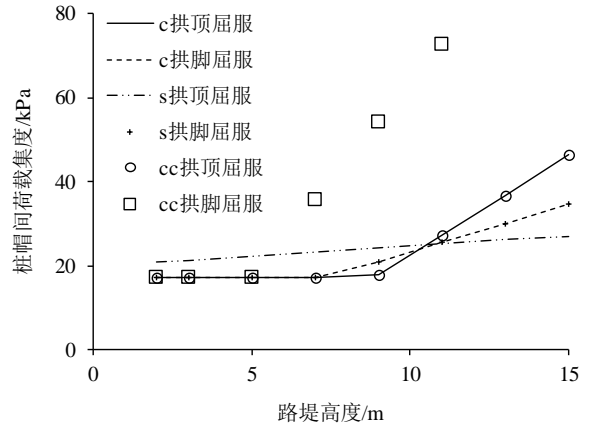


图 5 桩帽间荷载集度-高度关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of load concentration between pile caps and embankment height

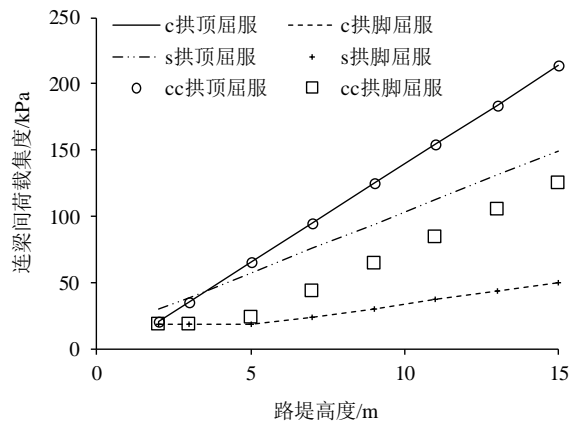


图 6 连梁间荷载集度-高度关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of load concentration between coupling beams and embankment height

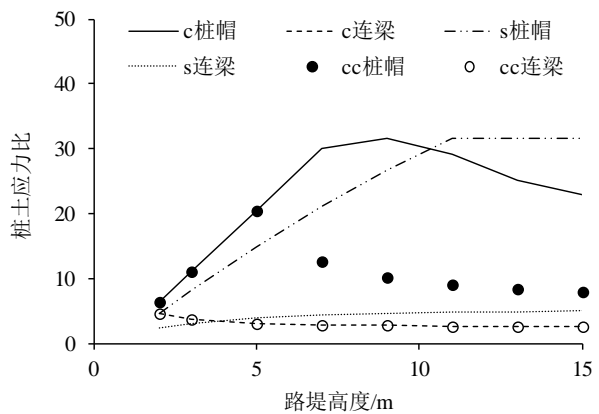


图 7 桩土应力比-高度关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between pile-soil stress ratio and embankment height

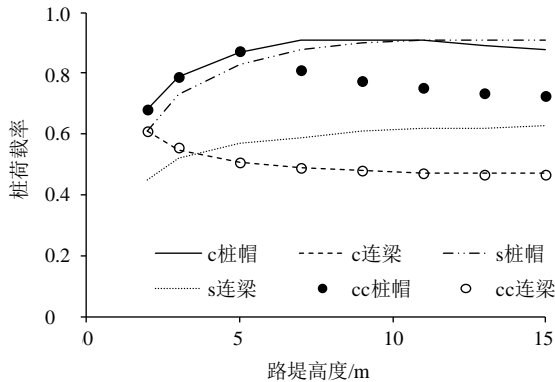


图8 桩荷载率-高度关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between pile load rate and embankment height

由图5~8可知:

(1) 对桩帽复合地基

a) 对s型路堤, 桩帽上路堤高度小于7m时, 拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度不随路堤高度变化, 说明拱顶脱空时拱脚也不屈服。桩帽上路堤高度小于10.86m时, 拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度大于拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度, 拱顶屈服, 桩土应力比随桩帽上路堤高度增大而近似线性增大, 桩荷载率随桩帽上路堤高度增大而增大。桩帽上路堤高度等于10.86m时, 拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度等于拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度, 拱顶、拱脚同时屈服。桩帽上路堤高度大于10.86m时, 拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度小于拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度, 拱脚屈服, 桩土应力比、桩荷载率不随路堤高度变化。

b) 对c型路堤, 桩帽上路堤高度小于7.38m时, 拱脚屈服、拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度均不随路堤高度变化, 土拱不屈服, 桩土应力比随桩帽上路堤高度增大而线性增大, 桩荷载率随桩帽上路堤高度增大而增大。路堤高度介于7.38~10.20m时, 拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度大于拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度, 拱脚屈服, 桩土应力比、桩荷载率随桩帽上路堤高度增大而增大。桩帽上路堤高度等于10.20m时, 拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度等于拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度, 拱顶、拱脚同时屈服。路堤高度大于10.20m时, 拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度大于拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度, 拱顶屈服, 桩土应力比、桩荷载率随桩帽上路堤高度增大而减小。

c) 对cc型路堤, 桩帽上路堤高度小于4.99m时, 拱脚屈服、拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度均

不随路堤高度变化, 土拱不屈服, 桩土应力比随桩帽上路堤高度增大而线性增大, 桩荷载率随桩帽上路堤高度增大而增大。路堤高度大于4.99m时, 拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度小于拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度, 拱脚屈服, 桩土应力比、桩荷载率随桩帽上路堤高度增大而减小。

d) 路堤较小时, 拱顶为黏性土的路堤桩土应力比大于拱顶为无黏性土的路堤桩土应力比。

(2) 桩梁复合地基

a) 对3种类型路堤, 拱顶屈服对应的桩帽间荷载集度均大于拱脚屈服对应的桩帽间荷载集度, 即均是拱顶屈服。

b) s型路堤的桩土应力比、桩荷载率随连梁上路堤高度增大而增大, 且增速逐渐减小。

c) c型路堤与cc型路堤的桩土应力比、桩荷载率相等。桩土应力比、桩荷载率随连梁上路堤高度增大而减小, 且减速逐渐减小。

(3) 对相同填料的路堤, 采用桩帽复合地基的桩土应力比、桩荷载率均远大于桩梁复合地基的桩土应力比、桩荷载率, 性价比更高。

5 结 论

本文推导了可以考虑填料黏聚力的桩土应力比计算模式, 研究表明本文方法适用各种填料的路堤, 计算结果与工程实测结果接近。分析比对和案例验证表明:

(1) 拱顶、拱脚填料种类对桩土应力比均有影响, 不同填料的路堤桩土应力比大小及其变化规律不同。

(2) 桩土应力比根据土拱屈服位置的受力分析确定, 不需要试算。对无黏性路堤宜采用HEWLETT公式。

(3) 复合地基刚性桩桩顶设置桩帽的性价比高于桩顶设置连梁。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘吉福, 郑刚. 单桩承载力对刚性桩复合地基路堤稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 33-36.
LIU Ji-fu, ZHENG Gang. Influence of bearing capacity of pile to stability of embankment with rigid pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 33-36.
- [4] 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, 41(11): 33-36.
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): 33-36.
- [5] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3): 12-18.
- [6] 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.
- [7] 强小俊, 赵有明, 胡荣华. 桩网结构支承路堤土拱效应改进算法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 7-12.
QIANG Xiao-jun, ZHAO You-ming, HU Rong-hua. Improved algorithm for the soil arching effect of pile-net supported embankment[J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 7-12.
- [8] 刘吉福, 黄腾. 珠三角软基处理试验工程报告集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
LIU Ji-fu, HUANG Teng. Experiment Reports of Improvement of Soft Ground in Pearl River Delta[M]. Beijing: China Communication Press, 2012.
- [9] 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.
XU Li-xin. Study on design and computation method of geosynthetic reinforced pile-supported embankments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [10] 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: 南京水利科学研究所, 2007.
LU Xu-wen. Experiment and study of composite foundation with long-short piles to improve deep soft soils under embankment load[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007.
- [11] 李海芳, 龚晓南, 温晓贵. 桥头段刚性桩复合地基现场观测结果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2780-2785.
LI Hai-fang, GONG Xiao-nan, WEN Xiao-gui. Field survey of composite foundation with rigid piles under embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2780-2785.
- [12] 连峰, 龚晓南, 崔诗才, 等. 桩-网复合地基承载性状现场试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1057-1062.
LIAN Feng, GONG Xiao-nan, CUI Shi-cai, et al. Field study of bearing behavior of pile-net composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1057-1062.
- [13] 黄茂松, 李波, 程岳. 长短桩组合路堤桩荷载分担规律离心模型试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2543-2550.
HUANG Mao-song, LI Bo, CHENG Yue. Centrifuge model tests and numerical simulation of load sharing law for composite embankment with long and short piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2543-2550.
- [14] British standards institution. Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and other Fills: BS 8006—1:2010[S]. BSI Standards Publication, 2010.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路软土地基路堤设计与施工技术细则: JTG/T D31—02—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
Ministry of transport of the People's Republic of China. Technical Guidelines for Design and Construction of Highway Embankment on Soft Ground: JTG/T D31—02—2013[S]. Beijing: China Communication Press, 2013.
- [16] 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 1): 796-802.
LIU Ji-fu. Three-Equal-Settlement-Zone model for composite ground under embankment[J]. Rock and Soil

Mechanics, 2007, 28(S1): 796-802.

- [17] 付海平, 郑俊杰, 赖汉江. 桩承式路堤“土拱结构”形成演化规律离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2050-2057.

FU Hai-ping, ZHENG Jun-jie, LAI Han-jiang. Discrete element analysis of the development and evolution of 'soil arching' within a piled embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11):

2050-2057.

- [18] 杨庆年, 郑俊杰, 程科. 桩承式路堤土拱效应分析的改进有限元分析[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 39(4): 19-23, 38.

YANG Qing-nian, ZHENG Jun-jie, CHENG Ke. Modified finite element model to analyze soil arching effect in piled embankments[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 39(4): 19-23, 38.

【简 讯】

第十七届全国地基处理学术讨论会（二号通知）

为加强地基处理学术交流, 提供新理论、新技术、新理念、新设备的探讨平台, 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会将于 2022 年 8 月 26—28 日在宁夏银川举办第十七届全国地基处理学术研讨会。会议以“黄河流域高质量发展中地基处理的责任与担当”为主题, 展示地基处理领域的最新成果与发展趋势, 设置“地基处理新技术的开发和应用; 复合地基理论与实践; 地基处理工程勘察技术; 地基处理设计计算理论; 地基处理施工设备; 地基处理质量检测方法; 岩土试验新方法及本构理论; 西北采煤迹地地基处理; 寒旱区路基处理; 沙漠公路和铁路路基处理等”专题讨论。为此, 组委会诚邀您参加本次研讨会, 与全国各地的同仁们就地基处理技术方面共同关心的问题进行交流 and 研讨, 聆听国内外著名专家学者的特邀报告。

主办单位:

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

承办单位:

宁夏大学

宁夏力学学会

宁夏物理学会

中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会

会议形式:

根据疫情防控形式, 会议采用线上+线下结合的方式

会议注册:

仅限参加线下会议注册, 参加线上会议暂不注册

注册链接:

<https://www.wjx.top/vm/wYHvHkg.aspx>

注册费（缴费通道预计 6 月份开通）:

正式代表: 6 月 17 日前, 1300 元/人

6 月 17 日后, 1500 元/人

学生代表: 800 元/人（报到时请携带学生证）

缴费方式:

线上支付: 在会议网站注册之后在线缴费（网银、支付宝、微信），可绑公务卡

现场缴费: 现金, 刷卡, 支付宝, 微信均可

联系方式:

李学丰: 13995181829

lixuefeng1928@163.com

张 刚: 13639508696

宁夏大学贺兰山校区格物楼 122 室

宁夏大学怀远校区物理与电子电气工程学院