

刚性桩加固高速公路软基性状分析

曹卫平¹, 赵敏²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要: 刚性桩在高速公路软土地基处理中得到了广泛应用, 但目前对其承载变形机理还缺乏深刻认识。采用数值方法对端承型桩及摩擦型桩在路堤填筑及软基固结过程中桩土应力比、桩土沉降、桩身轴力、负摩阻力及中性点深度的发展变化规律进行了分析。分析结果表明: ①不论端承型桩还是摩擦型桩, 由于其刚度远大于桩间土刚度, 因此绝大部分路堤荷载由桩承担, 桩间土仅承担了少部分路堤荷载。桩间土土压力随着路堤填筑和软土固结经历了先增大、然后减小、最终趋于稳定的过程; ②路堤填筑及软基固结过程中, 端承型桩仅发生很小的沉降, 其大部分沉降发生在路堤填筑过程中, 摩擦型桩的沉降则较大, 其大部分沉降发生在路堤填筑完毕之后的软基固结过程中。端承型桩大部分区段桩身沉降小于桩侧土沉降, 而摩擦型桩大部分区段桩身沉降大于桩侧土沉降; ③无论是端承型桩还是摩擦型桩, 在路堤填筑过程中, 桩身轴力及负摩阻力增加均较快, 而在软基固结过程中增加则较慢。端承型桩的大部分桩段存在负摩阻力, 摩擦型桩的负摩阻力分布区段则较短; ④在路堤填筑及软基固结过程中, 桩身中性点位置经历了比较复杂的变化过程。

关键词: 高速公路; 软土; 端承型桩; 摩擦型桩; 负摩阻力; 中性点

中图分类号: TU471

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S2-0217-07

作者简介: 曹卫平(1969-), 男, 陕西杨凌人, 博士, 副教授, 主要从事土力学、地基处理等方面的教学与研究工作。

E-mail: caowp@xauat.edu.cn.

Behaviors of rigid piles for reinforcing highway embankments in soft soils

CAO Wei-ping¹, ZHAO Min²

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. College of Civil Engineering
Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Rigid piles have been widely used to reinforce highway embankments in soft soils due to their rapid construction, low costs, and small total and differential settlements, while their mechanism has been still incompletely understood till now. A numerical analysis is conducted to evaluate the variation of the soil stress concentration ratio, pile and soil settlements, pile shaft axial forces, negative skin friction and neutral plane for end-bearing piles as well as floating piles during the embankment filling and the consolidation of soft soils. The results indicate that the stress concentration ratio varies with the embankment filling and the consolidation of soft soils, and most of embankment load is born by the pile owing to that the pile stiffness is significantly greater than that of soft soils. The end-bearing pile settles a little and most of the settlement occurs during the embankment filling while the settlement of the floating pile is much greater and most of the settlement occurs during the soil consolidating. The settlement of most part of the end-bearing pile shaft is greater than that of the surrounding soil, but the settlements of most part of the floating pile shaft is less than that of the surrounding soil. The pile axial force and negative skin friction, for the end-bearing pile and the floating pile, develops more quickly during the embankment filling than during the soil consolidating. Negative skin friction develops along most part of the end-bearing pile shaft while only a small part for the floating pile. The location of the neutral plane exhibits a complicated variation.

Key words: highway; soft soils; end-bearing pile; floating pile; negative skin friction; neutral plane

0 引言

近年来, 刚性桩(预应力钢筋混凝土桩)在高速公路软土地基处理工程中得到了广泛的应用^[1-4]。当软

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078308); 陕西省教育厅科学研究计划项目(2010JK623)

收稿日期: 2011-08-03

土厚度不大时,常采用将桩打穿软土层支承在承载力较高的硬土层上的处理方法,此即端承型桩。当软土厚度较大时,将桩打穿全部软土层则不经济,因此常常仅打穿部分软土,桩端下还存在一定厚度的软土层,此即摩擦型桩。不论端承型桩还是摩擦型桩,其刚度均大于桩间软土的刚度,因此在路堤施工及运营过程中,桩上部区段作用着负摩阻力。负摩阻力一方面会增大桩的沉降,另一方面会使桩承受下拉荷载,有时会由于下拉荷载过大而发生桩身材料破坏^[5-7]。目前关于软土地基中桩基负摩阻力的研究绝大多数集中在单纯由于桩周软土固结而引起的负摩阻力问题上,对在桩顶荷载和桩周土表面荷载共同作用下的负摩阻力则很少研究。对于处理高速公路软基的刚性桩而言,桩顶荷载和桩周土表面荷载不但同时作用,而且这两个荷载随时间还不断变化^[3,8-9],因此其负摩阻力的变化比较复杂,目前还鲜见文献中开展相应的详细研究。本文分析了路堤填筑及软基固结过程中端承型桩及摩擦型桩桩土应力比、桩土沉降、桩身轴力、桩身负摩阻力及中性点深度的发展变化规律,可为工程设计提供有益的参考。

1 计算模型

参照台华高速公路工程部分路段^[8],本文进行数值分析时路堤高度取为 5.0 m,桩长 15 m,桩身直径 0.4 m,桩间距 2.0 m,软土厚 15 m(端承型桩)或 20 m(摩擦型桩),桩帽为 0.8 m×0.8 m×0.3 m(厚)的钢筋混凝土板,地下水位在软土层顶面处。

研究表明^[10-11],桩间距大于 5*d* 时,群桩效应不明显甚至消失。刚性桩处理高速公路软基时,桩间距一般不小于 5*d*,因此本文分析时取单桩及其处理范围内的软土和路堤填土作为计算单元。对于端承型桩,由于桩端持力层坚硬,因此取桩端所在平面为计算单元底边界,对于摩擦型桩,取桩端持力层下硬土层顶面为底边界。底边界为零位移边界,侧边界仅竖向自由,上边界为位移自由边界。底边界及软土层厚度范围内的侧边界均为不透水边界,其余边界为透水边界,计算模型如图 1 所示。

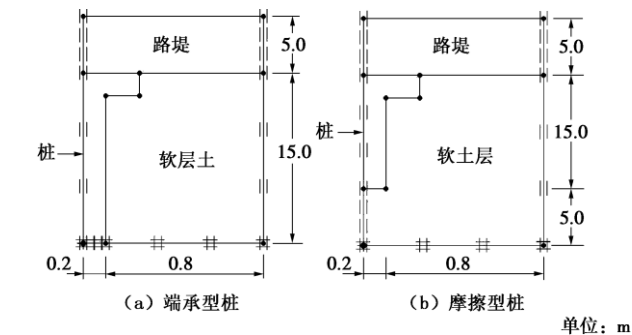


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculating model

钢筋混凝土刚性桩假定为无孔隙弹性材料,路堤填料及软土均假定为 Mohr-Coulomb 材料, Mohr-Coulomb 破坏准则需要 5 个参数,即压缩模量 E_s 、泊松比 ν 、黏聚力 c 、摩擦角 ϕ 及剪胀角 ψ ,见表 1。路堤荷载施加参照台华高速公路工程施工过程,以 50 cm 路堤高度为一个加载步(对应的时间为 2.5 d),即瞬时加载高度为 50 cm,然后等载固结 2.5 d,再进行下一个荷载步的施加,直到路堤高度达到要求,路堤填筑完毕后,继续固结直到软土中超静孔压不大于 1 kPa。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials								
材料	γ_d /(kN m ⁻³)	γ_{sat} /(kN m ⁻³)	k /(m d ⁻¹)	E_s /MPa	ν	c /kPa	ϕ /(°)	ψ /(°)
软土	14	16.7	0.001	0.5	0.35	1.5	18	0
路堤	22	24	1.0	9	0.25	3.0	35	5
桩	24	24	—	30000	0.17	—	—	—

2 计算结果及分析

2.1 桩顶土压力及桩间土土压力的变化

路堤填筑及软基固结过程中桩顶及桩间土土压力的变化如图 2 所示。从图 2 中可以看出,无论是采用端承型桩还是摩擦型桩,桩顶及桩间土土压力的发展变化均可以分为三个阶段。第一阶段即 0~22.5 d 之间,随着路堤填高,桩顶及桩间土土压力均逐渐增大,但桩顶土压力大于桩间土土压力,在 22.5 d 时,端承型桩及摩擦型桩的桩顶土压力分别为 1053.4, 974.8 kPa,相应的桩间土土压力分别达到其最大值 47.9, 66.9 kPa;第二阶段即 22.5~62 d 之间,桩间土土压力逐渐减小而桩顶土压力迅速增大;第三阶段即 62 d 以后,随着软基的继续固结,桩顶及桩间土土压力逐渐趋近于各自的稳定值,软基固结基本完成时,端承型桩的桩顶土压力及相应的桩间土土压力分别为 1391.3, 34.9 kPa,摩擦型桩的桩顶土压力及桩间土土压力分别为 1352.9, 45.1 kPa。

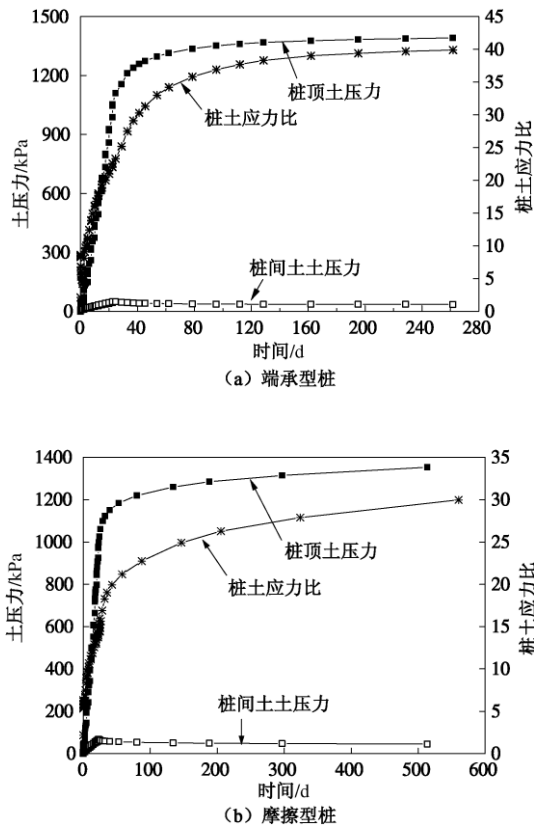


图 2 土压力随时间的变化

Fig. 2 Variation of soil pressure and stress ratio with time

图 2 同时给出了桩土应力比的变化。可以看出, 桩土应力比在路堤填筑期间增加很快, 之后, 其增大的速率逐渐减缓, 地基固结基本完成时, 端承型桩的桩土土应力比接近 40, 而摩擦型桩的桩土应力比仅为 30。上述分析表明, 不论采用端承型桩还是摩擦型桩进行软基处理, 对桩顶、桩间土土压力的发展变化规律没有影响, 但与摩擦型桩相比, 端承型桩承担了更多的路堤荷载。

2.2 桩及桩间土沉降的变化

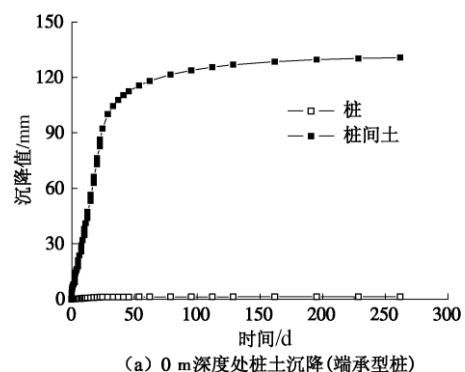
计算结果表明, 不同深度处桩身及桩间土的沉降随时间表现出不同的变化规律, 本文在此仅给出几个深度处桩及桩间土沉降随时间的变化曲线(图 3)。从图 3(a)可以看出, 当采用端承型桩时, 0 m 深度处(即桩顶)桩及桩间土的沉降随时间的变化可以分为两个阶段。第一阶段即路堤填筑过程中, 桩及桩间土的沉降均逐渐增大, 但桩间土沉降增大的速率远大于桩沉降增大的速率, 路堤填筑完成时, 桩顶沉降约为 1.1 mm, 而桩间土的沉降达 94 mm; 第二阶段即从路堤填筑完成到软基固结基本结束, 在这一阶段, 不论桩还是桩间土的沉降都有所增大, 但增加的幅度都很小, 如 262 d 时, 桩顶沉降约为 1.3 mm, 桩间土的沉降约为 130 mm。从图 3(b)可以看出, 当采用摩擦型桩时, 0~80 d 桩、土沉降增加较快, 而 80 d 以后

桩、土沉降增加较慢, 513 d 时, 桩、土沉降分别为 425.6, 541.9 mm。

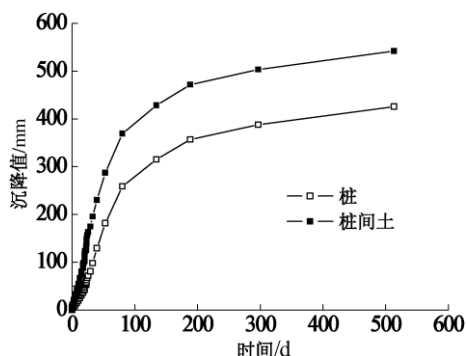
显然, 当采用端承型桩时, 桩及桩间土的沉降大部分发生于路堤填筑过程中, 而采用摩擦型桩时, 桩及桩间土的沉降大部分发生于路堤填筑完毕以后软基固结过程中。端承型桩的沉降主要来自于桩身压缩变形, 而摩擦型桩的沉降除了桩身压缩变形外, 还有桩端持力层软土的固结变形。从图 2 可知, 不论端承型桩还是摩擦型桩, 桩顶荷载在路堤填筑完成后变化不大, 因此桩身压缩变形在路堤填筑期间已完成大部分, 而桩端持力层软土的固结变形较大且排水距离较长, 因此其固结变形完成需要的时间较长, 这就是端承型桩及桩间土的沉降大部分发生于路堤填筑过程中, 而摩擦型桩及桩间土的沉降大部分发生于路堤填筑完毕以后软基固结过程中的原因。

对比图 3(a)、(c)可以看出, 对于端承型桩, 6 m 深度处与 0 m 深度处桩的沉降规律基本相同, 但桩间土的沉降变化却表现出不同的变化规律。6 m 深度处桩间土沉降随时间的变化可以分为三个阶段。第一阶段即路堤填筑过程中, 桩间土的沉降迅速增大, 路堤填筑完成时, 桩间土的沉降达到其最大值 9 mm; 第二阶段即 22.5~62 d 之间, 随着地基土的固结, 桩间土的沉降迅速减小, 62 d 时, 桩间土的沉降约为 3.6 mm; 第三阶段即 62 d 以后, 桩间土的沉降又逐渐增大, 软基固结基本完成时, 桩间土的沉降约为 5.8 mm, 即 6 m 深度处桩间土的沉降存在从最初的迅速增大、之后迅速减小到最后的逐渐增大并趋于稳定值这样一个比较复杂的变化过程, 但该深度处桩间土的沉降始终大于桩的沉降。从图 3(d)可以看出摩擦型桩 6 m 深度处桩、土沉降随时间的变化规律基本相同, 而且沉降量比较接近, 但该深度处桩沉降大于桩间土的沉降。

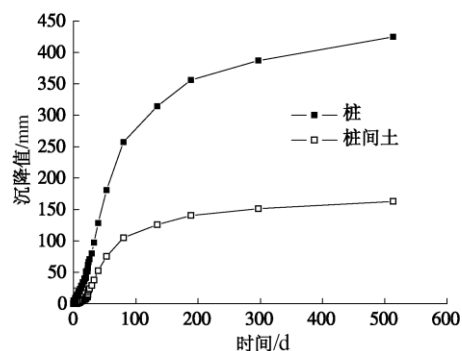
图 3(e)给出了端承型桩 13.5 m 深度处桩及桩间土沉降随时间的发展变化过程。显然, 该深度处桩及桩间土沉降随时间的变化规律与 6 m 深度处的基本相似, 不同的是从约 112 d 开始直到 195 d 为止这个时间段内, 13.5 m 深度处桩间土的沉降小于桩的沉降, 而



(a) 0 m 深度处桩土沉降(端承型桩)



(b) 0 m深度处桩土沉降(摩擦型桩)



(f) 13.5 m桩深度处土沉降(摩擦型桩)

图3 桩及桩间土的沉降随时间的发展变化

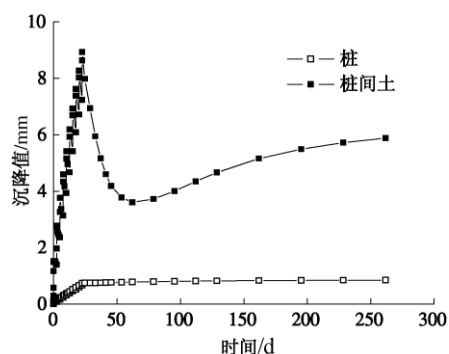
Fig. 3 Variation of settlements of pile and soil with time

195 d以后直到软基固结基本完成,桩间土的沉降略大于桩身沉降。从图3(f)可以看出,摩擦型桩13.5 m深度处桩及桩间土的沉降量在路堤填筑过程中比较接近,但桩沉降略大于桩间土的沉降,随着软土的固结,桩身沉降远远大于桩间土的沉降,513 d时,桩沉降为424.5 mm,而桩间土的沉降为162.8 mm。

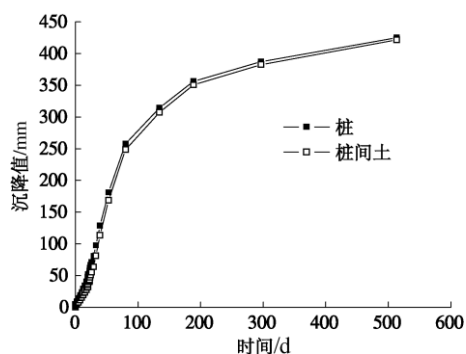
从上述分析可以看出,在相同的路堤高度下,端承型桩与摩擦型桩沉降表现出不同的变化规律,端承型桩的绝大部分区段桩身沉降小于桩侧土的沉降,只是在靠近桩端处的很短一部分区段,桩身沉降才略大于桩侧土的沉降,而摩擦型桩的大部分区段桩身沉降大于桩侧土的沉降,这预示端承型桩与摩擦型桩的轴力、桩身摩阻力也将存在显著差异。

2.3 桩身轴力、负摩阻力及中性点的变化

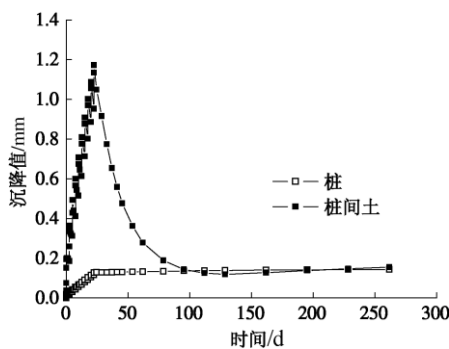
图4为桩身轴力随时间的发展变化曲线。从图4可以看出,无论是端承型桩还是摩擦型桩,在路堤填筑过程中,桩身轴力增加均较快。如对于端承型桩,2.5 d时,桩身最大轴力为99.5 kN,路堤填筑完成时(22.5 d),桩身最大轴力为338.9 kN,比2.5 d时的最大轴力增加了241%,在之后的软基固结过程中,桩身轴力增加的幅度则较小,如软基固结基本完成时,桩身最大轴力为383.3 kN,比路堤填筑完成时的桩身最大轴力增加了13.1%。而对于摩擦型桩,2.5 d时,桩身最大轴力为58.9 kN,路堤填筑完成时(22.5 d),桩身最大轴力为230.7 kN,比2.5 d时的最大轴力增加了291%,在之后的软基固结过程中,桩身轴力增加的幅度则较小,如软基固结基本完成时,桩身最大轴力为286.9 kN,比路堤填筑完成时的桩身最大轴力增加了24.4%。在路堤填筑过程中,路堤荷载一直增加,由于土拱效应,桩承担了大部分路堤荷载,因此桩身轴力增大较快,而在路堤施工完成后,由于地基土的继续固结,原来由桩间土承担的部分路堤荷载转由桩承担,因此在路堤填筑过程中桩身轴力增加较快,而路堤填筑完成后,桩身轴力还会有所增大,但增加的



(c) 6 m深度处桩土沉降(端承型桩)



(d) 6 m深度处桩土沉降(摩擦型桩)



(e) 13.5 m深度处桩土沉降(端承型桩)

幅度较小。

从图 4 (a) 可以看出, 在路堤填筑施工前期, 端承型桩轴力随着深度一直增加, 而在路堤施工后期及软基固结过程中, 桩身上部区段轴力随着深度一直增加, 接近桩端时, 桩身轴力随着深度则逐渐减小, 这说明端承型桩桩身大部分区段上作用有负摩阻力。图 4 (b) 则说明在路堤填筑施工前期, 摩擦型桩桩身轴

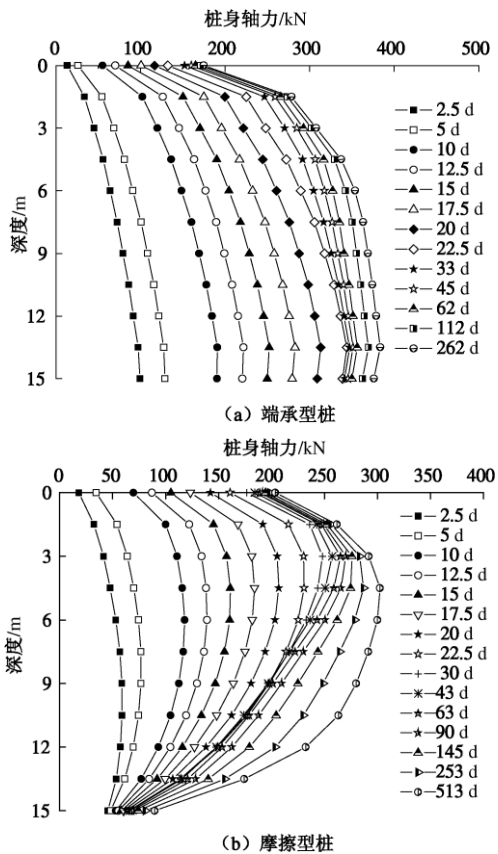


图 4 桩身轴力的变化

Fig. 4 Variation of pile axial force

力随着深度逐渐增大, 在靠近桩端处, 桩身轴力随着深度逐渐减小, 而在路堤填筑施工后期及之后的软基固结过程中, 桩身轴力开始减小的深度比较靠近桩顶, 这说明摩擦型桩在路堤施工前期, 大部分桩段作用有负摩阻力, 而在路堤施工后期及软基固结过程中, 桩身只有上部小部分区段作用有负摩阻力, 而下部大部分区段作用有正摩阻力。

图 5 给出了桩身摩阻力随时间的发展变化曲线。从图 5 可以看出, 不论是端承型桩还是摩擦型桩, 在路堤填筑及软基固结过程中, 负摩阻力最大值均出现在桩顶附近, 随着深度增加, 负摩阻力逐渐减小, 但端承型桩在接近桩端处负摩阻力才转化为正摩阻力, 而摩擦型桩在桩身上部, 负摩阻力就减小为零并转变为正摩阻力。从图 5 还可以看出, 路堤填筑过程中负摩阻力增大的速率明显大于软基固结过程中的增大速率, 如对于端承型桩, 22.5 d 时 (路堤填筑完成), 桩

顶负摩阻力为-49.3 kPa, 比 5 d 时的桩顶负摩阻力 (-15.0 kPa) 增大了 228%, 而软基固结基本完成时 (262 d), 桩顶负摩阻力为-53.4 kPa, 仅比路堤填筑完成时增大了 8%。而对于摩擦型桩, 22.5 d 时 (路堤填筑完成), 桩顶负摩阻力为-11.69 kPa, 比 5 d 时的桩顶负摩阻力 (-4.16 kPa) 增大了 181%, 而软基固结基本完成时 (513 d), 桩顶负摩阻力为-12.32 kPa, 仅比路堤填筑完成时增大了 5%。桩身摩阻力的大小主要决定于桩土相对位移的大小及桩间土作用于桩侧的法向有效应力的大小。从图 3 可知, 桩顶处桩土相对位移较大, 随着深度增加, 桩土相对位移迅速减小, 另外, 靠近桩顶处超静孔压消散最快, 所以由路堤荷载在该位置引起的有效应力也较大, 因此桩顶处的负摩阻力最大。

从图 5 还可以看出在路堤填筑过程中, 端承型桩桩身全长作用着负摩阻力桩, 但在软基固结过程中, 桩身上部大部分区段作用着负摩阻力, 下部靠近桩端的小部分区段则作用着正摩阻力。而对于摩擦型桩, 在路堤填筑过程中, 桩身上部小部分区段作用着负摩阻力, 而下部大部分区段作用着正摩阻力。显然, 软基固结完成后, 端承型桩负摩阻力分布区段明显大于摩擦型桩负摩阻力分布区段。

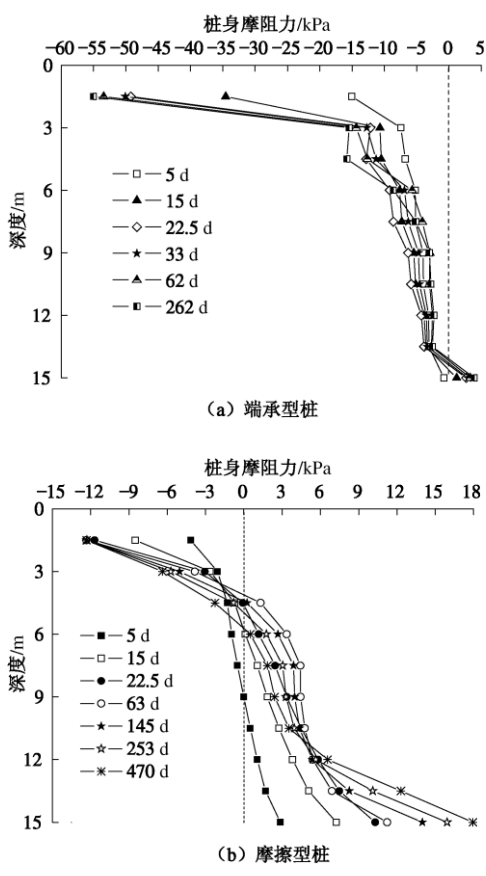


图 5 桩身摩阻力的变化

Fig. 5 Variation of skin friction

从上文分析可知,在路堤填筑及软基固结过程中,不同深度处桩及桩间土的相对位移不断发生变化,这决定了桩身中性点的深度会发生较为复杂的变化,图6给出了桩身中性点深度随时间的发展变化曲线。可以看出,对于端承型桩,路堤开始填筑后,桩身中性点接近桩端,路堤填筑完成时,中性点深度为14.2 m。之后随着软基的固结,中性点位置逐渐向上移动,如62 d时,中性点深度为13.8 m,软基固结基本完成时,中性点深度基本稳定在13.6 m。对于摩擦型桩,路堤开始填筑后,桩身中性点位于10.7 m,路堤填筑过程中中性点快速向上移动,路堤填筑完成时,中性点深度为4.6 m,之后随着软基的固结,中性点位置则逐渐向下移动,如253 d时,中性点深度为4.96 m,软基固结基本完成时,中性点深度基本稳定在5.73 m。

从上述分析可以看出,在路堤填筑及软基固结过程中,桩中性点经历了比较复杂的变化过程。端承型桩的中性点先向下移动、之后向上移动最后稳定在某一深度,而摩擦型桩中性点先向下移动,再向上移动,路堤填筑完成后,中性点随着软基的固结则缓慢向下移动最后稳定在某一深度处。中性点的上述变化规律与曹卫平通过解析方法计算得到的中性点深度变化规律是相似的^[12]。对于本文所研究的端承型桩,在路堤施工及软基固结过程中,中性点深度比在0.9~0.95之间变化,而对于摩擦型路堤桩,在路堤填筑过程中,中性点深度比在0.71~0.31之间变化,而在软基固结过程中,中性点深度比在0.31~0.38之间变化。

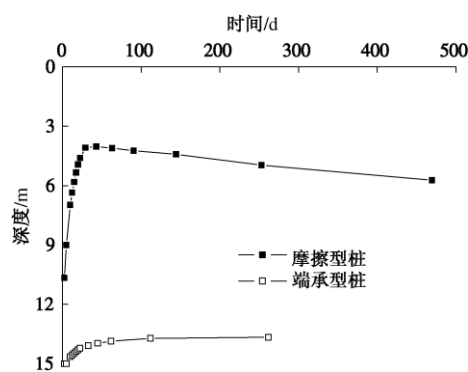


图6 中性点的变化

Fig. 6 Variation of location of neutral plane

3 结 论

本文对端承型桩及摩擦型桩在路堤填筑及软基固结过程中的承载变形性状进行了比较分析,可以得到以下几点结论。

(1)在路堤填筑过程中,桩顶及桩间土土压力均逐渐增大,在软基固结过程中,桩间土土压力逐渐减小最终趋于稳定值。对于本文所分析的算例,软基固

结基本完成时,端承型桩的桩土应力比接近40,而摩擦型桩的桩土应力比接近30,即不论是采用端承型桩还是摩擦型桩进行高速公路路基处理,大部分路堤荷载均由桩承担,桩间土仅承担了少部分路堤荷载。

(2)在路堤荷载作用下,端承型路堤桩仅发生很小的沉降,浅层桩间土的沉降随着时间一直增大,深层桩间土的沉降经历了先增大、之后减小,然后有所增大最终趋于稳定的过程,仅在靠近桩端的小部分桩段,桩身沉降大于桩侧土的沉降;而摩擦型桩的沉降较大,在靠近桩顶的小部分桩段,桩身沉降小于桩侧土的沉降,而其余桩段的桩身沉降大于桩侧土的沉降。

(3)不论端承型桩还是摩擦型桩,在路堤施工前期,桩身轴力随着深度一直增加,而在路堤施工后期及软基固结过程中,桩身轴力随着深度增加到某一深度后则逐渐减小,即桩身上部区段存在负摩阻力,端承型桩的负摩阻力分布长度远远大于摩擦型桩的负摩阻力分布区段。

(4)在路堤填筑及软基固结过程中,端承型桩中性点深度比约为0.95~0.9,而摩擦型桩中性点深度比约为0.71~0.31。

参考文献:

- [1] 陈小庭, 夏元友, 芮 瑞, 等. 管桩加固软土路堤桩土应力比现场试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 12 - 18. (CHEN Xiao-ting, XIA Yuan-you, RUI Rui, et al. Field experiment on pile-soil stress of soft subgrade reinforced by pre-stress concrete piles[J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 12 - 18. (in Chinese))
- [2] 贾 宁, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 755 - 760. (JIA Ning, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Theoretical Analysis and Measurement for widening project of Hangzhou-ningbo expressway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 755 - 760. (in Chinese))
- [3] 夏元友, 芮 瑞. 刚性桩加固软土路堤竖向土拱效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 327 - 331. (XIA Yuan-you, RUI Rui. Experimental research on vertical soil arching effect of embankment reinforced by rigid piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 327 - 331. (in Chinese)).
- [4] HAN J, GABR M A. Numerical analysis of Geosynthetic reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(1): 44 - 53.

- [5] 袁灯平, 黄宏伟, 程泽坤. 软土地基桩侧负摩阻力研究进展初探[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(2): 53 - 60. (YUAN Deng-ping, HUANG Hong-wei, CHEN Ze-kun. Recent research on the negative skin friction of piles in soft soils[J]. China Journal of Civil Engineering, 2006, **39**(2): 53 - 60. (in Chinese))
- [6] CHARLES W W Ng, POULOS H G, CHAN V S H, et al. Effects of tip location and shielding on piles in consolidating ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(9): 1245 - 1260.
- [7] LEUNG C F, RADHAKRISHNAN R, TAN S A. Performance of precast driven piles in marine clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **117**(4): 637 - 657.
- [8] 曹卫平, 陈云敏. 台华高速公路路堤失稳原因分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(7): 1504 - 1510. (CAO Wei-ping, CHEN Yun-min. Analyses on the failure mechanism and treatment for taihua highway embankment slope over soft soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(7): 1504 - 1510. (in Chinese))
- [9] ORIANNE J, DANIEL D, RICHARD K. Soft ground improvement by vertical rigid piles two-dimensional physical modelling and comparison with current design methods[J]. Soils and Foundations, 2005, **45**(6): 15 - 30.
- [10] LAM S Y, CHARLES W W Ng, LEUNG C F, et al. Centrifuge model and numerical modeling of axial load effects on piles in consolidating ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(1): 10 - 24.
- [11] JEONG S, KIM S, BRIAUD J L. Analysis of downdrag on pile groups by the finite element method[J]. Computers and Geotechnics, 1997, **21**(2): 143 - 161.
- [12] 曹卫平, 陈云敏, 陈仁朋. 考虑路堤填筑过程与地基土固结相耦合的桩承式路堤土拱效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(8): 1610 - 1617. (CAO Wei-ping, CHEN Yun-min, CHEN Reng-peng. Analysis of soil arching in piled embankments considering coupled effect of embankment filling and soil consolidation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(8): 1610 - 1617. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)