

深厚软土桩-板-土复合地基有限元分析

贾一全

中铁上海设计院集团有限公司杭州院

摘要:通过不同桩板结构布置形式,建立数值模型,研究典型软土地区中桩-板-土共同作用下的受力状态及规律。提取桩间土应力、板应力以及桩-土相对位移数据,结果表明,软土地质下与桩间距5D、10D相比,桩间距7.5D时桩-板-土各自受力相对明确,桩间土应力增幅相对较大,占桩基所在土层地基承载力的百分比为30.6%,桩间土承载力提高百分比为16.5%。合理桩间距布置下,随荷载增加,桩基越接近极限承载力,桩间土载荷比才会更加明显,三者最终达到协调变形,7.5D桩间距下桩间土载荷分担比最终收敛于21.5%。

关键词:软土;桩-板-土共同作用;桩间距;桩间土;载荷比

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.04.008

引言

桩板结构最早是应用在铁路工程领域的一种复合地基处理形式^[1],其对提高地基承载力、控制路基沉降等效果显著。目前,已广泛应用于市政道路、公路以及引桥等实际工程中。

桩板结构受荷作用下,表现为群桩工作效应,其受力机理为桩-板-土共同作用。文献^{[2][3]}根据室内模型和数值模拟对桩-板-土共同作用进行非线性变化分析,文献^[4]利用有限元建立桩土共同作用模型,研究桩土特性对桩基沉降影响规律。但目前大多文献均是针对黏质粉土、砂土等土质较好情况的研究,对于深厚软土地区研究较少,且设计在结构计算中,通常基于若干简化假设的基础上,忽略地基土作用,对桩、板单独进行计算,简单的将上部荷载平均分配到下部桩基,即复合地基承载力是单桩极限承载力的叠加,设计偏于保守,如何使桩间土发挥其自身承载力优势成为优化设计的重难点。

已知土层地基承载力特征值和上部荷载,桩间土由于桩基施工影响,土体被扰动,对于软土,有挤土固结效应,故桩间土承载力较原土承载力有相应的增幅,可采用桩间土强度提高系数 α 来表示,其与桩间距有很

大关联。本文针对软土地区典型的软而厚、含水率高、压缩性强、力学强度低等土质特性,通过建立数值模型,研究桩基为摩擦桩的桩板结构中,桩-板-土相互作用的受力特征,根据计算分析得出在软土地质情况下合理的桩间距使三者受荷过程中达到变形协调作用,从而优化设计,降低造价。

一、桩-土共同作用受力机理

桩板结构受荷过程中,上部荷载 Q 通过板传递至下部结构,板、桩基上刺、下刺的动态平衡过程使桩与桩间地基土共同承担上部荷载。开始荷载值小,桩-板-土产生弹性协调变形,随荷载的增大,桩基首先达到极限承载力 P_u ,而后桩间土才产生承载力 P_c ,其 P_c 值可通过下式进行计算:

$$P_c = Q - nP_u^{[5]} \quad (1)$$

而通常桩板结构计算中,简化为上部荷载全部由下部桩基承担,即 $Q=nP_u$,故桩基设计相对保守。

二、理论计算

文献^[6]中提到针对软土地基,桩体复合地基的极限承载力 f_{spk} 可表示为:

$$f_{spk} = \lambda_p m \frac{R_a}{A_p} + \alpha(1-m)f_{sk} \quad (2)$$

其中 f_{sk} 为桩间土承载力特征值, R_a 为桩体竖向承载力特征值, A_p 为桩体横截面积, λ_p 为桩体承载力发挥度,取值范围为0.4~0.6, m 为复合地基置换率。

桩体竖向应力为 σ_p ,桩间土竖向应力为 σ_s ,则桩土应力比 n 和桩土荷载分担比 N 为:

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} \quad (3)$$

$$N = \frac{mn}{1-m} \quad (4)$$

故在桩型、桩径、板厚等相同边界条件下,不同土层地质、桩间距布置,桩土荷载分担比并不相同。

选取浙江温州典型软土地区的桩板结构为例,其中板厚70cm,桩径80cm,桩长36m,桩身穿透淤泥层,桩

表1 地质参数表

土层	层厚(m)	粘聚力(kPa)	摩擦角(°)	压缩模量(MPa)	地基承载力特征值(kPa)	侧阻力特征值(kPa)
黏土	1.5	27.1	14.4	3.54	80	20
淤泥	31.0	8.1	6.4	1.66	40	10
黏土	10.1	17.5	10.6	2.89	100	25
粉质黏土	6.8	18.6	11.2	5.32	180	45
黏土	13.1	21.1	12.9	6.0	200	60

底位于黏土层，地基承载力为100kPa，地质参数如表1所示。模型分桩间距5D、7.5D、10D三种，经计算，其置换率分别为5.22%、3.66%、2.81%，单桩竖向承载力为708kN，桩体承载力发挥度 λ_p 取0.4。根据公式(2)复合地基承载力特征值分别为278kN、208kN、170kN。

三、数值分析

利用Midas GTS NX有限元软件建立三维数值模型，模型分桩间距5D、7.5D、10D及无桩基载荷载板四种规模，模型整体尺寸为：X方向76m，Y方向66m，Z方向80m。

土体本构采用MMC模型，该模型由非线性弹性模型和弹塑性模型组合，适用于淤泥质土行为特性，主要非线性刚度参数取值按软土地区经验值取，分别为 $E_{50}^{ref}=E_s$ 、 $E_{oed}^{ref}=1.2E_{50}^{ref}$ 、 $E_{ur}^{ref}=5E_{50}^{ref}$ ，刚度应力相关幂指数 m 取0.5。混凝土结构均采用弹性本构模型，桩-土之间摩擦采用桩界面单元实现。模型假设桩与土体、板与土体始终是紧密接触，即在受荷过程中，没有相对滑动或脱离。主要分桩基、板施工、加载及运营状态四大工况，其上部荷载 Q 包含结构自重、道路荷载及道路附属设施等，荷载及运营时间增量均以等量逐步执行。

模型计算中忽略桩基、板施工时引起的沉降量，结果显示，在荷载作用下，四种模型的 $Q-s$ 曲线总体趋势保持一致，载荷载板的 $Q-s$ 曲线斜率变化很大，荷载作用下沉降速率较快。同一荷载下，桩间距越小，沉降量越小，相反桩间距为10D时，沉降量增大的趋势较明显，最大沉降量为43.38mm。

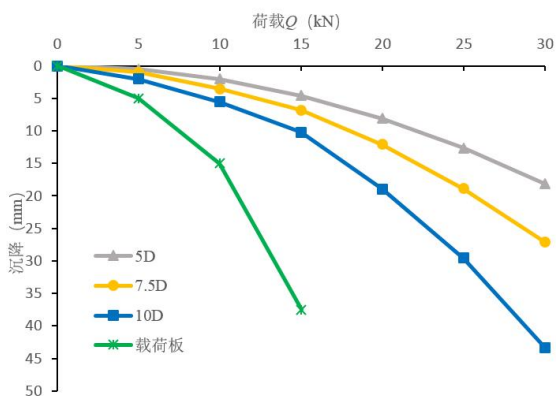
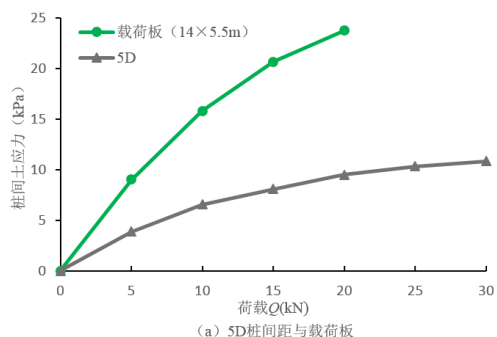


图1 不同桩间距的 $Q-s$ 曲线

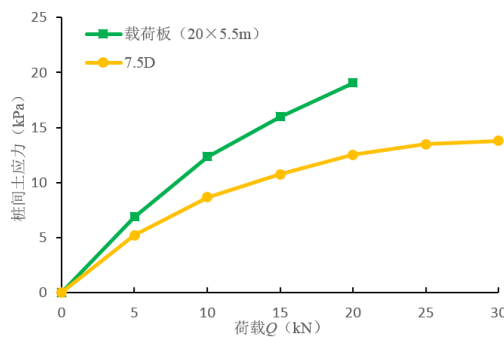
(一) 桩间土受力分析

分别提取桩间土应力和板应力变化值，随着荷载增大，桩间土应力开始呈现出递增趋势，后趋于平缓，达到收敛状态，说明在软土地质情况下，桩间土提供的承载力是极为有限的。由图2所示，载荷载板受荷下，基底土应力均大于相对应的桩板结构的桩间土应力，基底土应力的变化接近线性变化，且由于存在尺寸效应，载

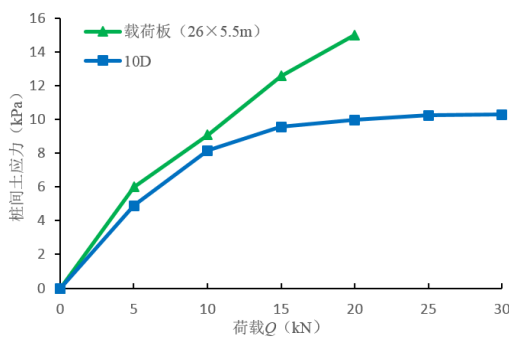
荷载的尺寸越大，基底土应力越小。由图2(a)、图3所示，桩间距为5D时，载荷载板的基底土应力相对桩板结构桩间土的应力增长幅度较快，荷载主要由桩基承担，各跨中板的应力值相对较小，故桩间土承担的荷载相对较少；桩间距为7.5D时，随着跨中板的变形影响，桩间土应力增幅相对较大，各跨中板应力呈现出较明显的变化，说明板-土发生共同作用，桩间土分担了部分荷载。桩间距为10D，荷载较小时，载荷载板基底土应力与桩板结构桩间土应力相近，随荷载增大，桩间土应力趋于平缓，说明10D桩间距情况下，桩间土呈现出了天然地基土状态。



(a) 5D桩间距与载荷载板



(b) 7.5D桩间距与载荷载板



(c) 10D桩间距与载荷载板

图2 桩间土应力变化

当桩间距为5D、7.5D、10D时，桩间土应力占桩基所在软土层的地基承载力的百分比分别为24.1%、30.6%、19.5%。与载荷载板平均承载力相比，5D、7.5D、10D桩间距下桩间土承载力提高百分比分别为19.8%、16.5%、2.7%，当桩间距更大时，桩间土呈现天然地基

土特性，其承载力提高百分比几乎是零。

根据每个单元节点处板应力值显示，三种模型均呈现出中间小两边大的马鞍形分布，且桩间距越大，各跨板的应力分布越显著。

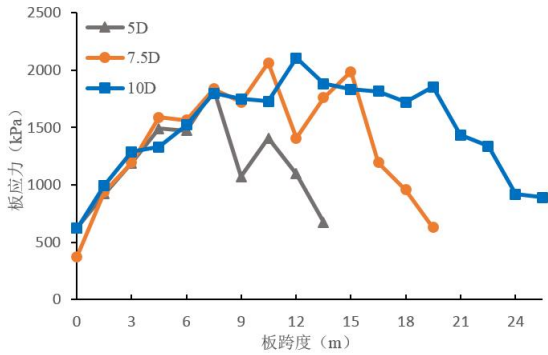


图3 板应力变化

（二）桩-土受力分析

桩-土共同作用时，桩的存在可有效提高地基土承载力，增加桩间土侧向应力和摩阻力。查看三种桩间距模型中桩身轴力，其轴力大小沿桩埋深方向逐渐减小。同一荷载下，桩身轴力减小速度情况为10D>7.5D>5D，由于桩间土压缩，桩侧摩阻力增大，从而加速了桩身轴力减小的速度。

提取桩顶平均沉降值以及最后一个工况的桩界面单元与桩间土之间的相对位移值。由于桩基沉降变形主要是由桩侧摩阻和桩端刺入沉降变形组成，故桩基沉降为非线性变化。数据显示，桩间距为5D、7.5D、10D时，桩顶平均沉降值占各自总沉降值的百分比分别为32.9%、26.8%、18.9%，再次说明5D桩间距时，上部荷载主要由桩基承担，而10D桩间距时，由于桩间距较大，地基土承载力有限，桩基虽然承担了大部分荷载，但相对总沉降量来讲，占比却相对较小。

桩与桩间土相对位移主要发生在上部1/2桩身长度范围内，沿桩深桩体负摩阻力增大，相对位移逐渐减小。不同桩间距，相对位移减小速率不同，但下部1/2桩身长度范围内，其变化基本相近。桩侧摩阻力受桩间土相对位移变化，故桩间土相对位移与桩侧摩阻力呈非线性关系，桩-板-土亦呈非线性共同作用特征。

（三）桩-土受荷比

受荷情况下，当桩基越接近极限状态，桩间土分担的荷载 P_c 才越明显，并随着荷载的增大，逐渐趋于稳定，桩间距过小或过大都会引起桩间土未达到或过早达到承载极限状态。通过计算分析，7.5D桩间距的布置形式下，桩间土承载力随荷载增加逐渐发挥了其自身作用，整个桩-土共同作用过程中，桩间土分担荷载比为21.5%。

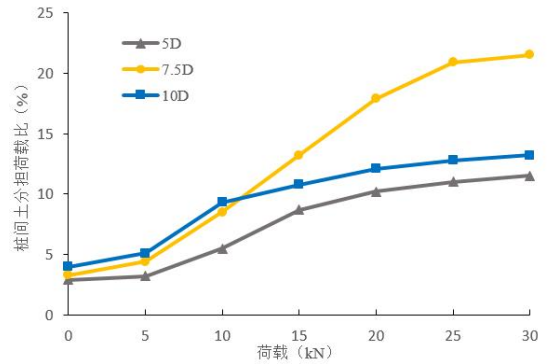


图4 桩间土分担荷载比（单位：%）

四、结论

通过有限元三维数值分析结果，桩间土承担了部分上部荷载，在设计计算中应充分考虑桩间土作用，不仅可以减少桩长，优化结构设计，而且还降低工程造价。计算结果显示，7.5D桩间距是三者共同作用下相对较优的桩布置形式，其桩间土分担比最终收敛于21.5%。

在软土地区，桩板结构作为刚性桩复合地基，在控制沉降变形是较优的选择。桩间土性能由于桩基施工引起土体扰动，桩周形成负摩阻力而得到一定提升。桩间距越小，桩间土承载力相对天然地基土提高的百分比越高。桩板受荷过程中，若使三者共同作用，达到协调变形，除需要布置合理的桩间距外，还必须引起桩端的刺入变形，桩端阻力才会产生。

参考文献

- [1] 中铁二院工程集团有限公司. TB10106-2010铁路工程地基处理技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [2] 李雄威, 蒋刚, 宰金珉等. 群桩非线性工作机理的研究[J]. 工程勘察. 2017, 11: 8-13.
- [3] 肖宏, 冯雁, 龚小平. 桩板结构桩-板-土相互作用模型试验研究[J]. 岩土力学. 2013, 34 (增刊2): 81-87.
- [4] 唐玲, 郭小刚. 桩土共同作用的数值模拟分析[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版). 2014, 26 (1): 57-60.
- [5] 宰金珉. 桩土明确分担的荷载的复合桩基及其设计方法[J]. 建筑结构学报. 1995, 16 (4): 66-74.
- [6] 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, 2018.

作者简介:

贾一全(1986-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事岩土、桥梁工程设计工作。

课题名称: 下穿铁路桩板桥自动化设计程序开发。
课题编号: T013300020029