

文章编号:1673-2049(2013)02-0087-08

# 路堤荷载下现浇 X 形桩复合地基 承载特性数值分析

於 慧<sup>1,2</sup>, 丁选明<sup>1,3</sup>, 刘汉龙<sup>1,3</sup>, 孔纲强<sup>1,3</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040; 3. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**以江苏省南京长江第四大桥北接线工程 N1 标段现浇 X 形桩软基加固段为工程背景,建立了路堤荷载作用下现浇 X 形桩复合地基数值分析模型,开展了现浇 X 形桩复合地基承载机理的分析,并采用现场实测沉降曲线验证了分析方法的合理性。就填土期和运营期地基土固结对现浇 X 形桩桩身轴力和桩侧摩阻力的影响进行分析,探讨了褥垫层模量、褥垫层厚度、桩体模量、桩端土模量对桩身轴力、桩侧摩阻力和桩土应力比的影响。结果表明:随着路堤的填筑和地基土的固结,桩土应力比先快速后缓慢增加并逐渐趋于稳定,中性点逐渐下移;褥垫层模量和厚度的增加对调节现浇 X 形桩桩土应力分配有明显的作用;由于现浇 X 形桩为摩擦刚性桩,桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担,桩端土模量和桩体模量对桩身轴力和中性点位置的影响较小;路堤荷载下现浇 X 形桩的桩土应力比可在 30 左右,褥垫层模量建议取为 20~50 MPa,厚度为 30~50 cm。

**关键词:**现浇 X 形桩;路堤荷载;承载特性;数值模拟;复合地基

**中图分类号:**TU435 **文献标志码:**A

## Numerical Analysis on Bearing Performance of Cast-in-place X-section Pile Composite Foundation Under Road Embankment

YU Hui<sup>1,2</sup>, DING Xuan-ming<sup>1,3</sup>, LIU Han-long<sup>1,3</sup>, KONG Gang-qiang<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory for Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co. Ltd., Shanghai 200040, China; 3. School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

**Abstract:** Based on the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge section N1 of Jiangsu Province, the numerical analysis model of cast-in-place X-section (XCC) pile composite foundation under road embankment loading was established and the bearing performance of XCC pile composite foundation was analyzed. The rationality of analytical method was verified by the field measured settlement. The effects of filling and consolidation process on pile shaft force and shaft friction were analyzed. Moreover, the effects of cushion modulus and thickness, pile modulus, soil modulus on pile shaft force, shaft friction and pile-soil stress ratio were discussed. The results show that with the embankment filling and foundation soil consolidating, pile-soil stress ratio increases rapidly at first, then slowly increases and gradually tends to stability, the location of the neutral point of shaft descends gradually at the same time; the increasing of cushion modulus

收稿日期:2012-12-23

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U1134207);江苏省交通科学研究计划项目(2010Y08)

作者简介:於 慧(1989-),女,江苏兴化人,河海大学工学硕士研究生,E-mail:yuhuigeo1989@163.com。

and thickness have significant effect on adjusting pile-soil stress ratio. Because XCC pile is a kind of frictional and rigid pile, shaft friction bears main load on pile top, as a result, soil modulus and pile modulus have little influence on pile shaft force and position of neutral point. The pile-soil stress ratio of XCC pile under road embankment loading is around 30, the cushion moduli are 20 to 50 MPa and the cushion thickness is 30 to 50 cm.

**Key words:** cast-in-place X-section pile; road embankment loading; bearing performance; numerical simulation; composite foundation

## 0 引言

江苏沿江地区分布着大量淤泥、淤泥质粘土和淤泥质粉质粘土,这使得高速公路建设过程中必须对这些性质很差的软土地基进行加固处理,以增加公路路基的稳定性和减少工后沉降。桩承式路堤是一种通过桩和水平加筋体联合处理软基的构筑物形式,它通过桩、盖板、水平加筋体和砂垫层的共同作用,获得加强路堤承载能力和减少路堤沉降的功能,已在很多国家和地区得到广泛应用和发展。

各国学者对路堤荷载下刚性桩承载特性从模型试验、数值模拟、理论分析和现场监测等方面进行了比较深入的研究。Eskisar 等<sup>[1]</sup>采用 X-射线 CT 技术更加直观地对比分析了不同填筑材料和桩间距下加固地基和天然地基的土拱效应。Abusharar 等<sup>[2]</sup>通过建立二维 PLAXIS 模型分析了桩承式路堤下复合地基的固结特性。Comodromos 等<sup>[3]</sup>通过建立三维非线性 FLAC 模型来分析桩基础中的负摩阻力分布形式。Liu 等<sup>[4-5]</sup>通过对比分析桩承式路堤的现场试验和三维有限元数值模拟,揭示了桩承式路堤的沉降、差异沉降和孔压消散规律。Chen 等<sup>[6]</sup>分析得到考虑土拱效应、桩侧摩阻力和地基土沉降的桩承式路堤一维压缩理论解。Chen 等<sup>[7]</sup>通过对现场监测数据的分析总结,研究了桩承式路堤的土拱效应和孔压消散规律。张波等<sup>[8]</sup>通过对现浇薄壁管桩复合地基进行数值模拟,分析了复合地基承载特性影响因素。

现浇 X 形混凝土桩技术是河海大学岩土工程科学研究所开发的一种具有自主知识产权的新型地基加固技术。由于 X 形桩具有较大的周长面积比,因而可以在不增加桩身混凝土用量的前提下大大提高单桩承载力,从而提高性价比<sup>[9-12]</sup>。X 形桩技术与其他地基加固方法相比,在桩承式路堤中有其自身的合理性、先进性及适用性,目前该技术已经在江苏高速公路和市政工程软基处理中推广应用。张敏霞等<sup>[13-14]</sup>通过足尺模型试验研究,对比分析了相同

截面面积的现浇 X 形桩与圆形桩的承载力和荷载传递机理。Lu 等<sup>[15]</sup>通过刚性基础下现浇 X 形桩单桩复合地基的现场试验和有限元数值模拟,分析了 X 形桩桩土应力比、桩身轴力和侧摩阻力的规律。现有研究表明:X 形桩与传统的等截面面积圆形浇筑桩相比,其竖向极限承载力与水平极限承载力均有较大幅度的提高。但以往对现浇 X 形桩承载特性的研究主要是针对单桩或刚性荷载,对柔性路堤荷载下其承载特性的研究尚未开展,因此进一步研究路堤荷载下现浇 X 形桩复合地基承载机理,从而完善 X 形桩的设计和施工规范非常必要。

本文中笔者基于江苏省南京长江第四大桥北接线工程 N1 标段现场试验,采用大型有限元软件 ABAQUS 对路堤荷载下现浇 X 形混凝土桩的承载特性进行分析,为柔性荷载下现浇 X 形桩的设计计算提供参考依据。

## 1 有限元计算模型及验证

### 1.1 模型建立

以江苏省南京长江第四大桥北接线工程 N1 标段为背景进行研究,该段分布有较深的淤泥质粘土层,层厚为 5~13 m。其中,K3+229~K3+254 路段为桥头过渡段,采用现浇 X 形桩复合地基进行加固,桩呈正方形布置,桩间距为 2.2 m,桩长为 18 m,盖板厚度为 0.2 m,截面面积为 1 m×1 m,填土高度为 4.4 m,分层填筑,填筑时间为 120 d。现浇 X 形桩外包方形边长为 611 mm,开弧间距为 120 mm,弧度为 130°,如图 1 所示。

基于 X 形桩异形对称截面的特性,选用三维实体模型,取实体的 1/4 进行分析(图 2)。桩体(桩帽)、填土采用空间 8 节点等参元离散,土体、垫层采用空间 8 节点孔压单元离散。

### 1.2 材料本构关系

地基土和路堤土均采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,桩为线弹性体。桩、土各界面采用接触面单元,以模拟桩土间的粘结、滑移、脱离,且认为分析过

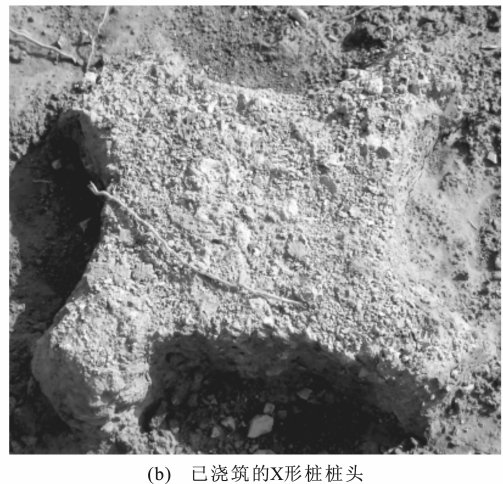
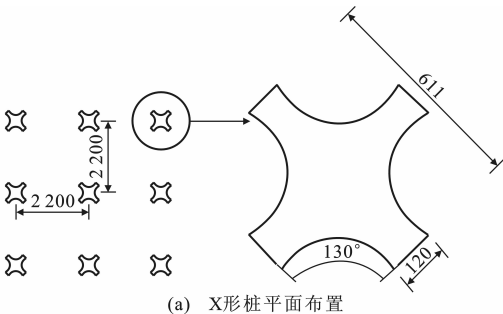


图 1 现浇 X 形桩截面 (单位:mm)  
Fig. 1 Cross-section of XCC Pile (Unit:mm)

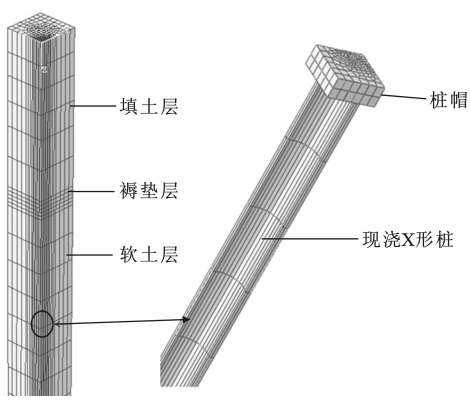


图 2 有限元网格  
Fig. 2 Finite Element Meshes

程中桩土间的摩擦因数不变。土层计算参数由土工试验得到(表 1),计算中弹性模量根据土体压缩模量换算而得。各类土的性质如下:①<sub>0</sub> 粉质粘土,灰黄色,可塑,土质欠均匀;①<sub>2</sub> 粉土,灰色,饱和,稍密状态;①<sub>1</sub> 淤泥质粉质粘土,岩性为灰色淤泥质(粉质)粘土,局部为淤泥,呈流塑状态,高压缩性,低抗剪强度;①<sub>11</sub> 粉质粘土,灰色,软塑,中等压缩性;②<sub>1</sub> 淤泥质粉质粘土,灰色,流塑,高压缩性;③<sub>1</sub> 粉质粘土,灰色,中密,饱和,强度高。路基填料平均重量为 20 kN · m<sup>-3</sup>。试验场地地基土层现场静力触

表 1 土层物理力学指标

Tab. 1 Physical and Mechanical Properties of Soils

土层	厚度/m	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	孔隙比	压缩模量/ MPa	压缩系数/ MPa <sup>-1</sup>	渗透系数/ (m · d <sup>-1</sup> )	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
① <sub>0</sub> 粉质粘土	2.4	1.91	27.5	1.159	7.44	0.233	0.100	15	14.6
① <sub>2</sub> 粉土	3.0	1.94	27.8	0.906	5.56	0.330	1.000	19	19.0
① <sub>1</sub> 淤泥质粉质粘土	8.5	1.77	44.6	1.730	3.50	0.655	0.001	4	9.5
① <sub>11</sub> 粉质粘土	2.0	1.89	31.8	0.960	4.14	0.460	0.100	22	4.4
② <sub>1</sub> 淤泥质粉质粘土	5.0	1.77	44.6	1.730	3.50	0.655	0.001	4	9.5
③ <sub>1</sub> 粉质粘土	24.7	1.98	26.2	0.921	7.76	0.232	0.100	23	10.1

探曲线如图 3 所示。

1.3 荷载作用形式

地下水位与桩顶齐平,先将桩视为与土具有一样的重度,进行地应力平衡,然后,将桩多余的重度作为外荷载加到桩单元,以便较好地模拟土体的初始应力状态。

为了模拟路堤填筑的实际工况,根据现场填筑的曲线进行适当的简化,如图 4 所示。计算中填土荷载分 4 次加载:垫层加载持续 12 d,填筑厚度为 0.3 m;第 1 层填土加载持续 33 d,填筑厚度为 1.6 m,第 2 层填土加载持续 43 d,填筑厚度为 1.3 m;第 3 层填土加载持续 38 d,填筑厚度为 1.2 m。地基土随着填土荷载的增加固结。

1.4 模型验证

为了验证所建模型的合理性,选取现场实测结果进行对比。路堤填筑自 2010 年 9 月 12 日开始,填筑时间为 120 d,现场监测自 2010 年 10 月 27 日开始,监测持续了 281 d。图 5 为实测沉降和有限元模拟随路堤填筑过程的变化曲线。由图 5 可以看出,有限元数值模拟结果与实测结果基本吻合,为后续的分析奠定了基础。

2 承载特性分析

现浇 X 形桩的异形效应使其具有较大的桩侧表面积,从而增加了侧摩阻力,同时也可以加速桩土应力比趋于稳定的过程。桩土应力比是一个变量,

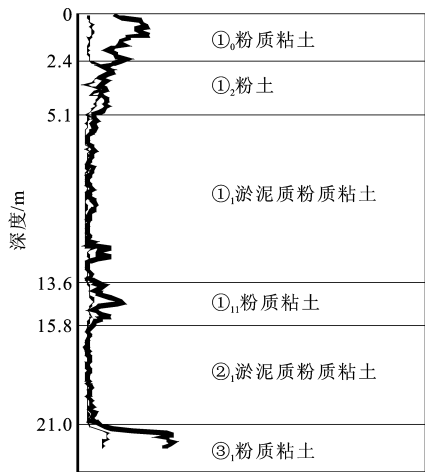


图3 地基土层静力触探曲线

Fig. 3 CPT Curve of Foundation Soil

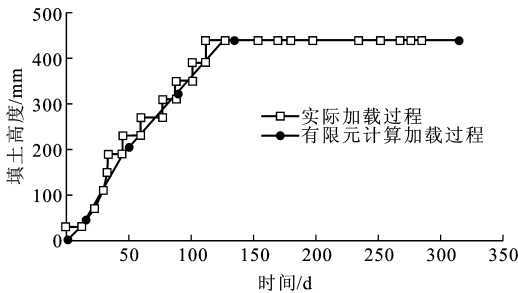


图4 路堤填筑过程的简化

Fig. 4 Simplified Procedure of Embankment Filling

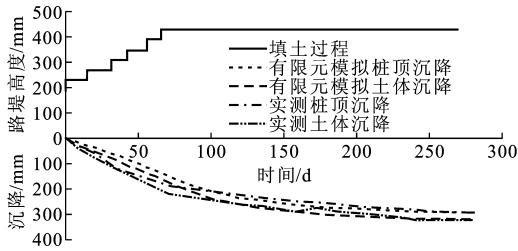


图5 实测沉降和有限元模拟随路堤填筑的变化曲线

Fig. 5 Variation Curves of Measured Settlement and Finite Element Simulation with Embankment Filling

它随着荷载水平、土体固结时间而不断地调整。本文中的桩土应力比是指桩顶应力与桩间土平均应力的比值。桩土应力比的变化经历了3个过程:加载初期,桩土应力比随着加载时间的增加而急剧增加;加载后期至路堤填筑完毕,桩土应力比随着加载时间的增加而增加,但是增加速率减小;固结期间,桩土应力比随着地基土的固结而缓慢增加,最终趋于稳定值。

2.1 填筑过程的影响

图6为填土高度对桩身轴力分布的影响。由图6可以看出,桩身轴力沿深度先增加后减小,最大桩

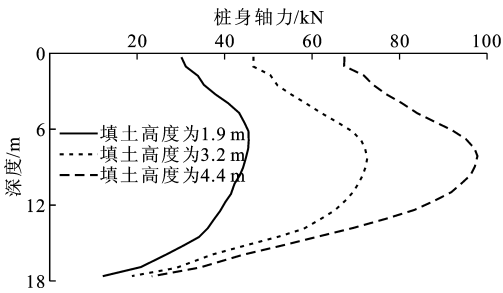


图6 填土高度对桩身轴力分布的影响

Fig. 6 Effects of Filling Height on Pile Shaft Forces

身轴力出现在桩身的中上部。深度在0~8 m内桩身轴力曲线随填土荷载的增加近似平行移动,深度在8 m以下桩身轴力急剧减小,这说明现浇X形桩桩端侧摩阻力充分发挥。随着填土高度的增加,桩身轴力增加,最大桩身轴力趋于明显并且位置逐渐下移,分别在6.85、8.25、8.3 m深度处。

图7为填土高度对桩侧摩阻力分布的影响。由图7可以看出,随着填土高度的增加,桩侧摩阻力增加,负摩阻力最大值的位置不断向下发展。随着填土高度的增加,桩土应力比急剧增加,中性点也随之下移。中性点由0.38倍桩长处逐渐下移,然后基本保持不变,这与桩身轴力反映的规律一致。

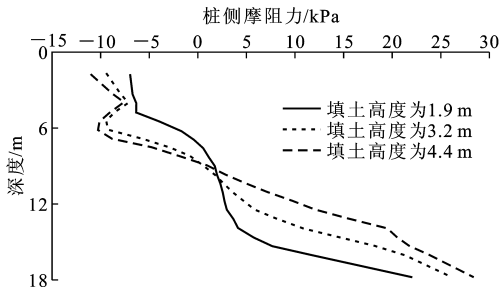


图7 填土高度对桩侧摩阻力分布的影响

Fig. 7 Effects of Filling Heights on Shaft Frictions

2.2 固结时间的影响

固结时间对桩身轴力分布的影响如图8所示。当路堤填筑完毕后,路堤总荷载不再增加,桩身轴力的变化主要受地基土固结的影响。在路堤填筑完毕的一段时间内,路堤荷载继续由土体向桩体转移,桩身轴力增加。固结时间对桩身轴力的影响主要在桩身中部深度7~12 m处,该深度处分布有淤泥质粉质粘土和粉质粘土,孔隙水压力随固结时间的增加变化较大,故桩身轴力随固结时间的增加变化明显。填土结束100 d后,桩身轴力逐渐稳定,地基固结稳定。

图9为固结时间对桩侧摩阻力分布的影响。中性点的位置随着地基土固结时间的增加而有所下降,其下移速率逐渐减小。固结100 d以后,桩侧摩

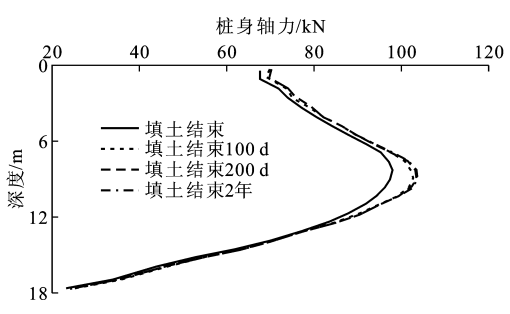


图 8 固结时间对桩身轴力分布的影响  
Fig. 8 Effects of Consolidation Time on Pile Shaft Forces

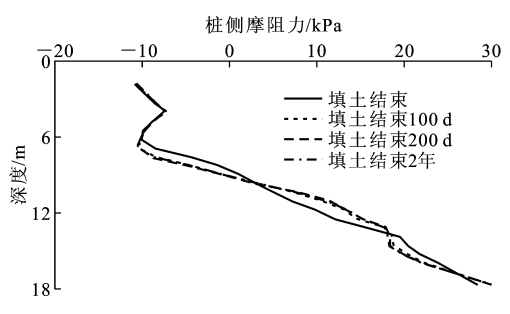


图 9 固结时间对桩侧摩阻力分布的影响  
Fig. 9 Effects of Consolidation Time on Shaft Frictions

阻力变化不明显,中性点位置趋于稳定。由于现浇 X 形桩特有的异形截面,中上部区域为负摩阻力区,深度较浅时,现浇 X 形桩凹弧段半闭塞效应不明显,随着深度的增加,凹弧段半闭塞效应增加,即凹弧内部土体的应力变小,使得桩侧法向应力变小,桩侧摩阻力减小。

### 2.3 褥垫层模量的影响

褥垫层是复合地基的核心技术<sup>[16]</sup>。褥垫层保证桩、土共同承担荷载,从而形成复合地基;另外,桩间土的沉降一般大于桩体,随着桩间土沉降的发展,褥垫层发生流动补偿,使基础的一部分荷载传递到桩间土上,保证桩与桩间土共同发挥作用。此外,褥垫层可以调节桩与桩间土的荷载分担比例,减少基底应力集中的作用。

本文中保持褥垫层的厚度为 30 cm 不变,取褥垫层模量分别为 10,20,50,100 MPa,研究褥垫层模量变化对现浇 X 形桩复合地基力学性状的影响规律。图 10 为褥垫层模量对桩身轴力分布的影响。由图 10 可以看出:在深度 0~10 m 处,桩身轴力随着褥垫层模量的增加而增加,但增加速率逐渐变缓;在深度 10 m 以下,桩身轴力增加不显著。褥垫层模量较小时,桩身轴力增加明显,褥垫层模量达到 50 MPa 时,桩身轴力变化较小,所以褥垫层模量建议取为 20~50 MPa。

图 11 为褥垫层模量对桩侧摩阻力分布的影响。

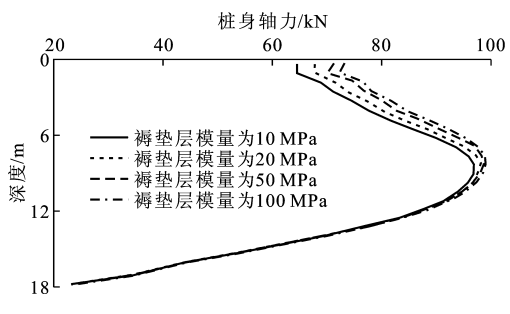


图 10 褥垫层模量对桩身轴力分布的影响  
Fig. 10 Effects of Cushion Moduli on Pile Shaft Forces

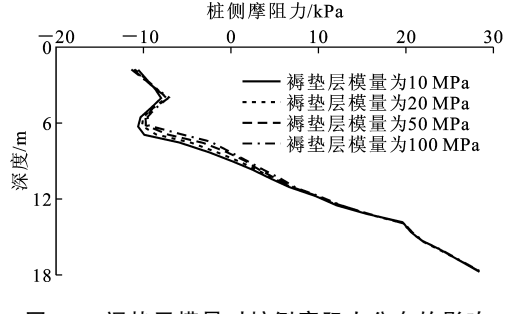


图 11 褥垫层模量对桩侧摩阻力分布的影响  
Fig. 11 Effects of Cushion Moduli on Shaft Frictions

由图 11 可以看出,褥垫层模量对桩侧摩阻力的影响主要集中在桩身较浅处,随着褥垫层模量的增加,褥垫层调节作用充分发挥,桩承担的荷载增加,中性点上移,负摩阻力减小,正摩阻力增大。

图 12 为褥垫层模量对桩土应力比的影响。褥垫层模量的增加对土拱效应的发挥是不利的,但褥垫层的抗变形能力得到提高,其刚性承台作用增强,同时对桩头的约束作用也增强,所以桩土应力比也是随之增大的。由此可见,褥垫层模量的增加对桩土应力的调整过程和结果都有比较大的影响。

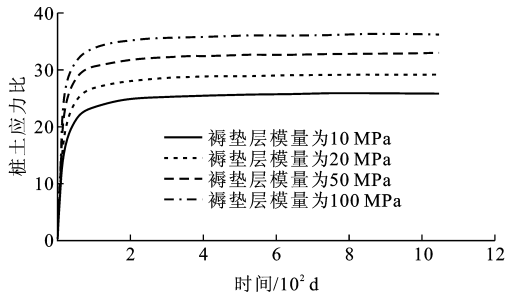


图 12 褥垫层模量对桩土应力比的影响  
Fig. 12 Effects of Cushion Moduli on Pile-soil Stress Ratios

### 2.4 褥垫层厚度的影响

复合地基中褥垫层的厚度是影响复合地基力学性状的一个重要因素。路堤柔性荷载下,褥垫层与上部填土的模量差异,导致褥垫层较上部填土对桩顶通常有更强的限制作用,增加褥垫层厚度实际上

是增加了这种约束作用,限制了桩体的上刺以及荷载向桩周土的转移。分析过程中,保持褥垫层模量 20 MPa 不变,填土高度 4.4 m 不变,褥垫层厚度分别取为 10,30,50,70 cm,得到的桩身轴力如图 13 所示。桩身轴力随着褥垫层厚度的增加而增加,但当褥垫层厚度达到 50 cm 后,褥垫层厚度的增加对桩身轴力的影响变小,可见,存在一个最佳的褥垫层厚度,既能充分发挥褥垫层的作用,又经济合理。褥垫层厚度对桩侧摩阻力分布的影响见图 14。由图 14 可以看出,褥垫层厚度对桩侧摩阻力影响不大,中性点位置随着褥垫层厚度的增加略有增大。

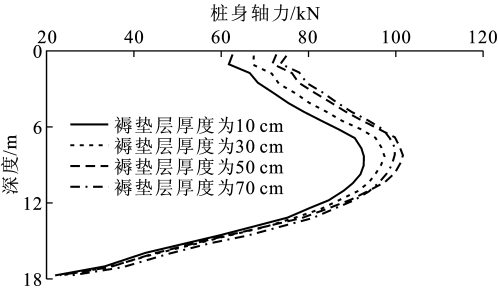


图 13 褥垫层厚度对桩身轴力分布的影响

Fig. 13 Effects of Cushion Thickness on Pile Shaft Forces

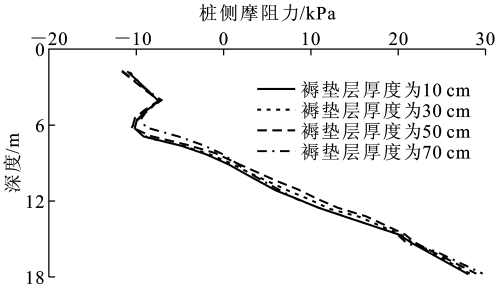


图 14 褥垫层厚度对桩侧摩阻力分布的影响

Fig. 14 Effects of Cushion Thickness on Shaft Frictions

图 15 为褥垫层厚度对桩土应力比的影响。由图 15 可以看出,随着褥垫层厚度的增加,桩土应力比逐渐增加。这个结论与刚性基础下桩土应力比的变化趋势相反,出现这种相反结论的原因在于褥垫层上基础类型的不同。刚性基础对桩头有很强的约束作用,限制其上刺,但随着桩体与基础之间褥垫层厚度的增加,基础对桩顶的约束作用逐渐减弱,通过褥垫层的调节,桩周土承担的荷载增加,这就导致桩土应力比减小;但在路堤荷载下,通常褥垫层较路堤对桩顶有更强的限制作用,增加褥垫层厚度实际是增加了这种约束作用,限制了桩体的上刺以及荷载向桩周土的转移,因此桩土应力比增大了。

由图 15 还可以看出:当褥垫层厚度较小时,桩土应力比增加不明显;当褥垫层厚度达到 30 cm 时,

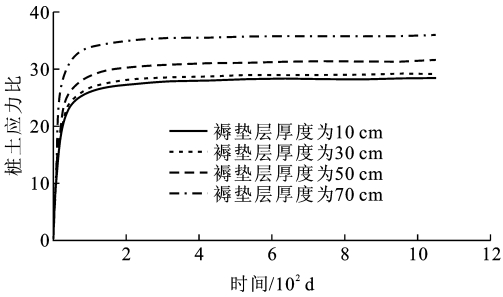


图 15 褥垫层厚度对桩土应力比的影响

Fig. 15 Effects of Cushion Thickness on Pile-soil Stress Ratios

褥垫层的约束作用可以充分发挥,褥垫层厚度增加时桩土应力比随之增大。因此,建议褥垫层厚度不小于 30 cm,本文中推荐褥垫层厚度为 30~50 cm。

2.5 桩体模量的影响

计算过程中桩体模量分别取为 10,17.5,20,25.5,30 GPa,桩身轴力和桩侧摩阻力的分布分别如图 16,17 所示。由于桩土模量比相差较大,桩身轴力和桩侧摩阻力随着桩体模量的增加略有增大,但并不显著。

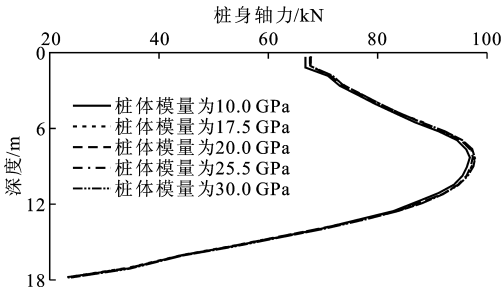


图 16 桩体模量对桩身轴力分布的影响

Fig. 16 Effects of Pile Moduli on Pile Shaft Forces

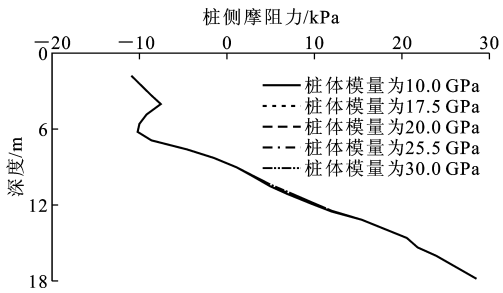


图 17 桩体模量对桩侧摩阻力分布的影响

Fig. 17 Effects of Pile Moduli on Shaft Frictions

图 18 为桩体模量对桩土应力比的影响。由图 18 可以看出,桩土应力比随桩体模量的增加略有增大,但并不显著。这主要是因为 X 形桩是现浇混凝土振动成桩,属于刚性桩范畴,增大桩体模量对桩土应力比的影响不大。

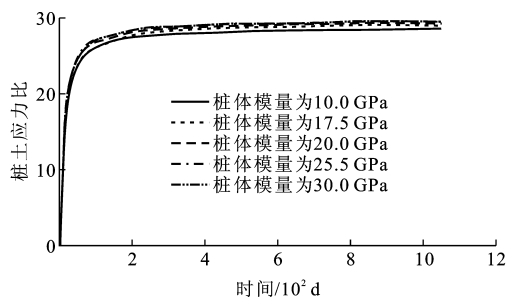


图 18 桩体模量对桩土应力比的影响

Fig. 18 Effects of Pile Moduli on Pile-soil Stress Ratios

## 2.6 桩端土模量的影响

桩端土模量分别取为 3.5, 5, 10, 15 MPa, 图 19, 20 分别为桩端土模量对桩身轴力、桩侧摩阻力分布的影响。由于现浇 X 形桩为摩擦桩, 较圆形桩在节省混凝土的基础上, 增加了桩侧表面积, 在极限承载力状态下, 桩顶荷载大部分由桩侧摩阻力承担, 桩尖部分承受的荷载较小, 因此桩身轴力和中性点位置随着桩端土模量的增加变化较小。

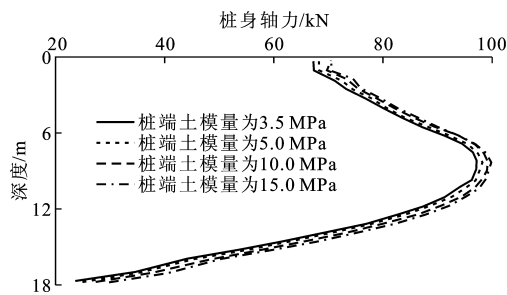


图 19 桩端土模量对桩身轴力分布的影响

Fig. 19 Effects of Soil Moduli on Pile Shaft Forces

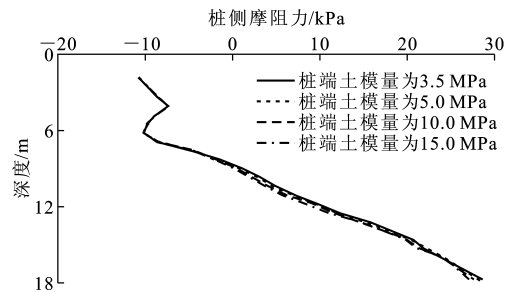


图 20 桩端土模量对桩侧摩阻力分布的影响

Fig. 20 Effects of Soil Moduli on Shaft Frictions

图 21 为桩端土模量对桩土应力比的影响。随着桩端土性质的改善, 桩土应力比增加, 桩体承担更多的荷载, 但并不显著, 这也说明了现浇 X 形桩是一种以桩侧摩阻力为主的摩擦桩或摩擦端承桩。

## 3 结 语

(1)随着填土高度以及固结时间的增加, 桩身轴

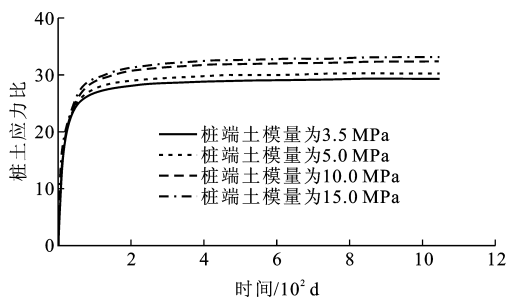


图 21 桩端土模量对桩土应力比的影响

Fig. 21 Effects of Soil Moduli on Pile-soil Stress Ratios

力和桩侧摩阻力增加, 中性点位置下移, 但当地基固结基本完成时, 桩身轴力和桩侧摩阻力不再增加; 由于现浇 X 形桩具有较大的桩侧表面积, 可加速桩土荷载相互调整的过程, 桩土应力比随着填土荷载的增加先急剧增大, 路堤填筑完毕后, 随着地基土的固结, 桩土应力比缓慢增大, 最后趋于稳定。

(2)当褥垫层模量增加时, 桩身轴力和桩侧摩阻力增加, 中性点上移。由于褥垫层的约束作用加强, 桩土应力比增大。综合考虑, 在实际工程中推荐褥垫层模量取为 20~50 MPa。

(3)随着褥垫层厚度的增加, 褥垫层对桩顶的限制作用加强, 桩身轴力先迅速增加而后减缓, 桩侧摩阻力变化不明显, 桩土应力比增大, 推荐褥垫层厚度为 30~50 cm。

(4)由于现浇 X 形桩为摩擦桩, 其侧表面积较大, 在极限承载力状态下, 桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担, 桩尖部分承受的荷载很小, 因此桩身轴力和中性点位置随着桩端土模量的增加变化较小。随着桩端土性质的改善, 桩土应力比增大。

(5)现浇 X 形桩属于刚性桩范畴, 并且桩端土模量差异较大, 故桩体模量的增加对桩身轴力、桩侧摩阻力和桩土应力比的影响均不大。

## 参考文献:

### References:

- [1] ESKISAR T, OTANI J, HIRONAKA J. Visualization of Soil Arching on Reinforced Embankment with Rigid Pile Foundation Using X-ray CT[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 32: 44-54.
- [2] ABUSHARAR S W, ZHENG J J, CHEN B G. Finite Element Modeling of the Consolidation Behavior of Multi-column Supported Road Embankment[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(4): 676-685.
- [3] COMODROMOS E M, BAREKA S V. Evaluation of Negative Skin Friction Effects in Pile Foundations Using 3D Nonlinear Analysis[J]. Computers and

- Geotechnics, 2005, 32(3): 210-221.
- [4] LIU H L, NG C W W, FEI K. Performance of a Geogrid-reinforced and Pile-supported Highway Embankment over Soft Clay: Case Study [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12): 1483-1493.
- [5] LIU H L, CHU J, DENG A. Use of Large-diameter Cast-in Situ Concrete Pipe Piles for Embankment over Soft Clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(8): 915-927.
- [6] CHEN R P, CHEN Y M, HAN J, et al. A Theoretical Solution for Pile-supported Embankments on Soft Soils Under One-dimensional Compression [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(5): 611-623.
- [7] CHEN R P, XU Z Z, CHEN Y M, et al. Field Tests on Pile-supported Embankments over Soft Ground [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(6): 777-785.
- [8] 张波, 刘汉龙. 现浇薄壁管桩复合地基竖向承载特性分析 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1251-1255.
- ZHANG Bo, LIU Han-long. Analysis of Bearing Performance of Composite Foundation with Cast-in-situ Concrete Thin-wall Pipe Piles Under Vertical Loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1251-1255.
- [9] 王智强, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 现浇 X 形桩竖向承载特性足尺模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 903-907.
- WANG Zhi-qiang, LIU Han-long, ZHANG Min-xia, et al. Full Scale Model Tests on Vertical Bearing Characteristics of Cast-in-place X-section Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 903-907.
- [10] 孔纲强, 刘汉龙, 丁选明, 等. 现浇 X 形桩复合地基桩土应力比及负摩阻力现场试验 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 8-12, 20.
- KONG Gang-qiang, LIU Han-long, DING Xuan-ming, et al. Field Test of Pile-soil Stress Ratio and Negative Skin Friction of Composite X-section Cast-in-place Pile Foundation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 8-12, 20.
- [11] 刘汉龙, 吕亚茹, 丁选明, 等. 现浇 X 形桩复合地基桩侧摩阻力分布特性 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 17-23.
- LIU Han-long, LU Ya-ru, DING Xuan-ming, et al. Behavior of Side Friction of X-section Cast-in-place Concrete Pile Composite Foundation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 17-23.
- [12] 孔纲强, 丁选明, 陈育民, 等. 现浇 X 形群桩竖向抗拔特性及影响因素分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(3): 49-54.
- KONG Gang-qiang, DING Xuan-ming, CHEN Yumin, et al. Vertical Uplift Capacity Characteristics and Influence Factor Analysis of Cast-in-situ X-section Reinforced Concrete Pile Group [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(3): 49-54.
- [13] 张敏霞, 刘汉龙, 丁选明. 加固软土路基的现浇 X 形混凝土桩力学特性 [J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 11-17.
- ZHANG Min-xia, LIU Han-long, DING Xuan-ming. Mechanical Property for Cast-in-situ X-shape Concrete Pile of Reinforced Soft Roadbed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 11-17.
- [14] 张敏霞, 刘汉龙, 丁选明, 等. 现浇 X 形混凝土桩与圆形桩承载性状对比试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1469-1476.
- ZHANG Min-xia, LIU Han-long, DING Xuan-ming, et al. Comparative Tests on Bearing Capacity of Cast-in-situ X-shaped Concrete Piles and Circular Pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1469-1476.
- [15] LU Y R, LIU H L, DING X M, et al. Field Tests on Bearing Characteristics of X-section Pile Composite Foundation [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011, 26(2): 180-189.
- [16] 谭慧明. PCC 桩复合地基褥垫层特性足尺模型试验研究与分析 [D]. 南京: 河海大学, 2008.
- TAN Hui-ming. Full Scale Model Test and Analyses on Characteristics of Cushion [D]. Nanjing: Hohai University, 2008.