

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.006

姜彦彬, 何宁, 林志强, 等. 路堤深厚软基管桩复合地基数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 43-51. (JIANG Yanbin, HE Ning, LIN Zhiqiang, et al. Numerical simulation of pipe pile composite foundation of deep soft foundation under embankment[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2): 43-51. (in Chinese))

# 路堤深厚软基管桩复合地基数值模拟

姜彦彬<sup>1</sup>, 何宁<sup>1</sup>, 林志强<sup>2</sup>, 姚明帅<sup>1</sup>, 李文轩<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 福建省建筑科学研究所, 福建 福州 350025)

**摘要:** 结合高速公路桥头深厚软基现场试验段工程, 对比了几种管桩复合地基单桩有限元数值建模方法, 认为轴对称接触有限元模型可以较准确地反映路堤下管桩复合地基的基本性状。基于数值分析结果, 详细探讨了管桩复合地基的受力特性和变形分布。结果表明: 填土越高, 桩顶承台应力集中越显著; 桩土应力比与高距比、桩土沉降差之间均存在较好的正相关性。填筑结束, 带承台管桩承担了 80% 的路堤荷载, 管桩外侧摩擦力承担了超过 90% 的承台受荷; 与在天然地基上堆载相比, 大部分荷载通过管桩传递到压缩性相对较小的深层地基中, 管桩复合地基的附加应力分布得到了优化, 桩长范围内地基的压缩率及压缩量大幅减小, 管桩复合地基的总沉降量仅为相应天然地基堆载沉降量的 18.5%, 深厚软基的总沉降减幅为 435 mm。

**关键词:** 管桩复合地基; 轴对称模型; 荷载分配; 荷载传递; 压缩变形; 压缩率

**中图分类号:** TU472

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2018)02-0043-09

我国高速公路建设里程长、增速快<sup>[1]</sup>, 深厚软基处理是东南沿海地区路线建设经常面临的重要工程问题之一。刚性桩复合地基法具有总沉降小、稳定性好、工期短等优点, 在土性差、工后沉降要求高的高速公路深厚软基处理工程中得到了重视和应用<sup>[2]</sup>。不同于刚性基础下的复合地基, 柔性基础(路堤)下的刚性桩复合地基中桩土相互作用影响因素众多, 土拱效应、桩土荷载传递、沉降控制等理论问题有待进一步深入研究; 短工期、长里程、深厚软基所带来的投入大、工后维护费用高的矛盾有待解决<sup>[3-4]</sup>。刚性桩复合地基的方案优化建立在对其工作性状深入了解的基础上。单桩有限元数值模型是复合地基中常用的建模方法<sup>[5-7]</sup>, 而不同建模方法的简化假设不同, 但很少对模型的有效性进行比对验证。

预应力混凝土管桩是桩承式路堤中常用的桩型, 结合承台(桩帽)及加筋垫层形成的桩网复合地基可以较好地提高承载力、控制不均匀沉降和工后沉降, 尤其适用于深厚软基路段和桥头段的地基处理<sup>[8-9]</sup>。本文结合杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路管桩复合地基加固试验段工程, 建立并对比了几种单桩加固范围常用的有限元模型, 对深厚软基中管桩复合地基的工作性状进行了较为深入地探讨。

## 1 工程概况及建模资料

### 1.1 现场试验段概况

杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路北起浙江省慈溪市庵东镇星华村, 终至宁波裘市镇两段枢纽互通立交与宁波绕城高速公路连接处, 路线全长 57.4 km。采用 6 车道设计标准, 行车限速 120 km/h。工程地处杭州湾以南平原水网地带, 软土厚度大部分为 25~35 m, 软基里程约占全线 70%。控制工后沉降的深厚软基处理是本工程的一个主要难点<sup>[2]</sup>。针对高速公路深厚软基处理的领先试验段分别采用预压固结和复合

收稿日期: 2017-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579152); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金资助项目(Y316011, Y316021); 浙江省宁波市交通科技委科技计划项目(201312)

作者简介: 姜彦彬(1989—), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事地基处理方面研究。E-mail: 903885593@qq.com

地基两大类共5种工法进行对比试验。其中N2重点试验段为桥头路段<sup>[10]</sup>,采用预应力空心薄壁管桩复合地基法进行处理,地质概况见图1和表1。软土层厚35.0 m,桩长36.0 m,穿过软土层,进入持力层1.0 m,管桩直径为400 mm,壁厚为65 mm,桩体强度要求达到C60。管桩平面为梅花形布置,桩间距2.4 m,桩顶设置边长1.0 m的正方形现浇钢筋混凝土承台,厚度0.3 m,铺设0.5 m厚的碎石垫层,并加铺一层刚塑土工格栅。施工结束时,垫层之上包括路基路面在内的填土厚度为3.756 m。

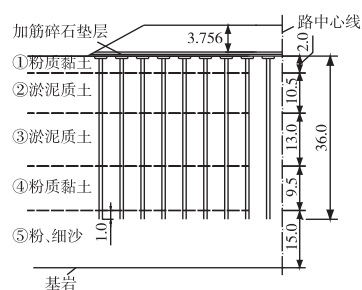


图1 管桩复合地基剖面(单位:m)

Fig. 1 Profile sketch of pipe pile composite foundation (unit: m)

表1 土的物理力学参数

Tab. 1 Physical mechanics parameters of soil

土层	厚度/m	W/%	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	e	w <sub>L</sub> /%	I <sub>p</sub>	E/MPa	$\nu$	c'/kPa	$\varphi$ '/°	$\psi$ '/°	k/(10 <sup>-3</sup> ·m·d <sup>-1</sup> )
①粉质黏土	2.0	34.3	18.60	0.964	33.6	12.8	4.20	0.35	20.0	18.0	0	5.20
②淤泥质土	10.5	37.6	18.30	1.029	30.4	9.7	2.90	0.40	11.3	15.0	0	13.00
③淤泥质土	13.0	42.5	17.62	1.209	36.2	13.8	2.18	0.40	12.6	8.9	0	0.78
④粉质黏土	9.5	30.2	18.83	0.853	30.8	11.5	8.60	0.35	22.2	9.8	0	3.50
⑤粉、细砂	15.0	30.1	18.89	0.712	--	--	12.50	0.30	0	20.0	0	620.00
路堤填土	3.833	--	19.20	--	--	--	30.00	0.25	6.0	30.0	0	--
碎石垫层	0.50	--	21.00	--	--	--	60.00	0.20	0	40.0	5	--

## 1.2 建模参数

以路堤中心位置的单桩加固范围为对象研究管桩复合地基的工作性状,惯用方法是将对应的桩间土和方形承台使用等横截面积的圆柱体予以代替<sup>[5]</sup>(图2),使用ABAQUS有限元软件建模分析。土层分布如图1所示,等效后承台和桩间土的半径分别为0.564和1.260 m。其中,将0.70 m厚的路面结构按照荷载等效原则转化为与路堤填土相同的材料,等效后的填土高度为3.833 m。

地基土、路堤填土及碎石垫层均采用摩尔库伦弹塑性本构模型(见表1)。管桩和承台均采用弹性本构模型,重度均取为25 kN/m<sup>3</sup>,泊松比分别为0.16和0.18,弹性模量分别为36和28 GPa。土工加筋(5 mm厚度)内嵌于碎石垫层中,并高于承台顶面5 cm,采用弹性本构模型,弹性模量为2.0 GPa,泊松比为0.2。现场地下水位埋深很浅,计算过程中认为地基土全部饱和,并将地表面设为排水面。网格划分时,地基土采用CAX4P单元,路堤填土、垫层、桩及承台均采用CAX4单元,土工加筋使用MAX1膜单元。

模型底部为固定端,侧面约束径向位移。垫层和路堤填筑与现场相对应,共计10次堆载(图3),自填筑垫层为计算起始时间,有实测数据的最长持续时间为2 008 d。

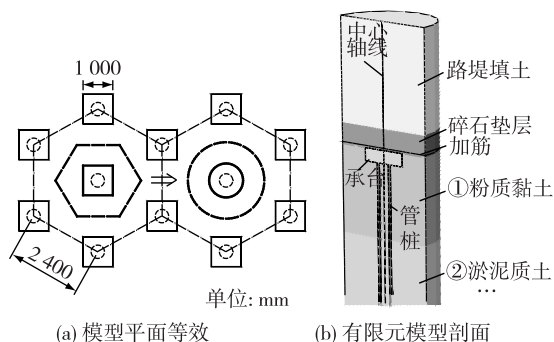


图2 单桩加固单元模型

Fig. 2 Schematic diagram of single pile reinforcement model

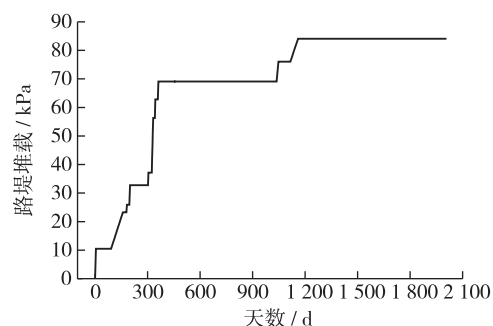


图3 路堤堆载过程曲线

Fig. 3 Surcharge process curve of embankment

## 2 数值模型对比验证

### 2.1 建模方法

针对管桩复合地基单桩加固范围,按照图2将横截面积等效后常用的几种数值建模方法<sup>[5, 11-12]</sup>有:

①复合桩模型(图4(a)):先将管桩空腔内的土芯按厚度进行加权平均得到复合土柱的模量为4.48 kPa,再将管桩及复合土柱按横截面积进行加权平均等效为一根“复合桩”(其等效模量为19.6 GPa),不允许桩土界面发生滑移,建立圆柱体坐标系轴对称模型。

②轴对称整体模型(图4(b)):不允许桩土界面滑移的管桩复合地基圆柱体坐标系的轴对称模型。

③三维实体模型(图4(c)):建立与轴对称整体模型相对应的三维实体模型,与轴对称模型相互验证。

④轴对称接触模型(图4(b)):建立桩土接触,允许桩土发生滑移;法向为硬接触,切向采用罚刚度算法建立接触,地基自上而下共5层,结合地基土性并参考相关文献<sup>[13]</sup>,桩土之间的摩擦系数分别取为0.4,0.3,0.22,0.58,0.75。

需要说明的是,将管桩按照侧面积等效转化为实体方桩进行建模的做法过分改变了主要研究对象(管桩)的几何外形,势必影响桩侧接触应力,进而影响侧摩阻力发挥,本文不予讨论此种建模方法。

### 2.2 模型计算结果对比

2.2.1 沉降对比 现场沉降观测工作从第1层填土后开始,对应数值计算的第159天,此时填土高度为1.164 m(包括碎石垫层)。4种模型桩间土沉降计算结果与相应的实测值吻合均较好(表2)。不同的是,除了允许桩土相对滑移的模型④计算结果比实测值稍大外,其他模型均略小于实测值;对于最终桩土沉降差值,模型①~③数值相等,且均小于模型④。

表2 各数值模型沉降对比

Tab. 2 Settlement comparison of numerical models

指标	实测	①复合桩模型	②轴对称整体模型	③三维实体模型	④轴对称接触模型
$S_{S-P}$	83	81	81	80	86
$\Delta S_{S-P}$	--	-2	-2	-3	3
$\Delta S_{S-P}$	--	7	7	7	12

注: $S_{S-P}$ 为与实测对应的桩间土沉降值; $\Delta S_{S-P}$ 为各模型计算值 $S_{S-P}$ 与实测的差值; $\Delta S_{S-P}$ 为桩土最终沉降差。

2.2.2 承台受力 最后一级堆载结束时,轴对称整体模型②与其所对应的三维实体模型③承台上的竖向总压力分别为305和309 kN,二者受力和沉降变形都只存在微小差别;三维实体模型与轴对称模型网格剖分差异及数据提取(轴对称模型只可以逐点提取求和)方法不同是主要误差来源。因此,当实体模型较为接近轴对称圆柱体时(图4(c)),用轴对称模型(图4(b))代替三维实体模型后,可以划分整齐规则的网格并加密应力集中区域的网格密度,可以提高计算效率和精度。

现场在现浇承台表面的中心及边缘位置布置3个界面土压力盒(图5),提取数值模型中与土压力盒对应位置的土压力。由承台顶面竖向应力均值可知(图6),相比复合桩模型及轴对称整体模型,允许桩土滑移的轴对称接触模型应力均值稍大,且在堆载后期更接近实测值。说明不考虑桩土界面接触滑移的轴对称整体模型在一定程度上人为地增加了桩土接触界面的强度,会使得桩土沉降差偏小(表2)。

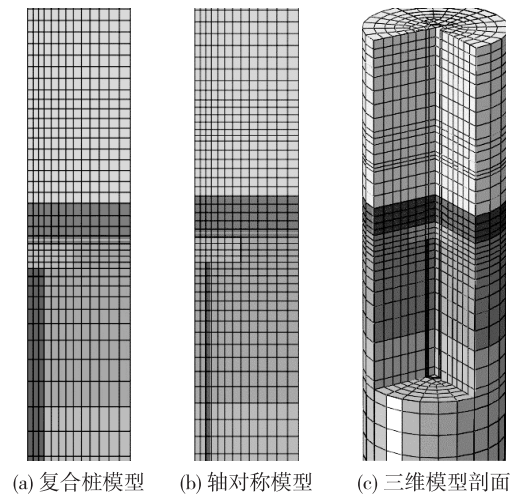


图4 有限元几何模型

Fig. 4 Finite element geometry model

综上所述,轴对称接触模型④对桩间土沉降和承台受力的模拟效果良好,且能反映桩土界面存在可能的滑移。下文选择轴对称接触模型的计算结果分析管桩复合地基的工作性状。

**2.2.3 轴对称接触模型验证** 轴对称接触模型数值计算桩间土沉降曲线与实测结果对应良好(图7)。观测后期沉降已稳定,由堆载引起的桩间土中心位置有限元计算最终沉降值为99 mm,第1300天通车时,沉降为86 mm,即在路基自身荷载作用下的固结度已达到87%,工后沉降量为13 mm。

由图8可知,承台上平均竖向应力的计算结果与实测结果整体变化规律较为一致,但也存在一定的偏差,误差来源主要有:①有限元模型计算结果为承台上表面面积加权平均的竖向应力<sup>[5]</sup>,而实测结果只能得到3个土压力盒所在测点的平均竖向应力(图5),并非真正的承台平均竖向应力;②现场土压测值的影响因素众多<sup>[14]</sup>,土压传感器或因埋设不够精确而存在局部土拱效应及应力集中效应。

堆载后期,承台竖向应力实测值稍高于计算值;有限元计算对应土压力盒位置的3点平均竖向土压力也表现为略高于承台整体平均土压力,在第8级堆载填筑完成后,差值为13 kPa。随着堆载的增大,填土荷载明显向承台上集中,路基部分填筑结束时,有限元计算承台土压均值比桩间土平均加权竖向应力高一个数量级。

综上所述,本文建立的轴对称接触有限元模型可以较为准确地反映路堤下管桩复合地基的基本性状。在此基础上,数值模拟可以更多了解现场测试难以测得的规律;下文基于数值模拟结果对管桩复合地基的工作性状进行进一步探讨。

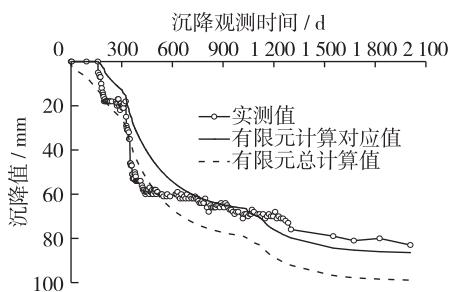
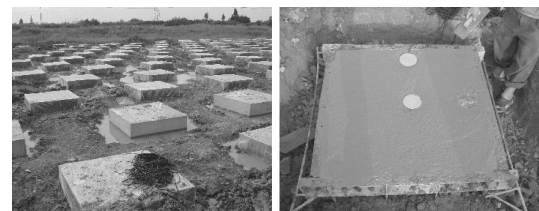


图7 桩间土沉降对比

Fig. 7 Settlement comparison of soil between piles



(a) 现场承台布置 (b) 承台界面土压力盒

图5 现场承台及界面土压力盒布置

Fig. 5 Arrangement of cap and earth pressure cell in-situ

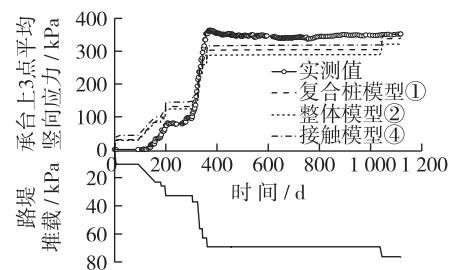


图6 承台上3点平均竖向应力对比

Fig. 6 Comparison of average vertical stress of three points on platform

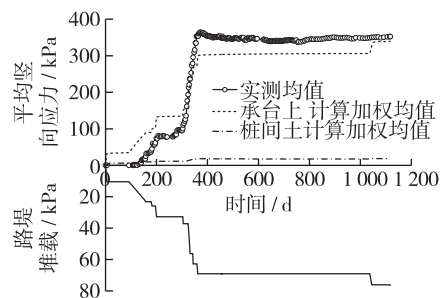


图8 桩、土应力随堆载的变化对比

Fig. 8 Comparison of stress distribution between pile and soil with surcharge loading

### 3 荷载分配与传递

#### 3.1 桩土荷载分配

顶部平均桩土应力比及荷载分担比均随填筑高度增大而增大(图9和10),所述“平均桩土应力比”是指经过面积加权平均的承台与桩间土竖向应力的比值,稳定值为19.1;稳定的桩土荷载分担比为4.7,即填筑

结束时,路堤中心置换率为 20%的带承台管桩承担了 80%的路堤荷载,并将荷载传递到地基深处,大大减小了浅层地基土附加应力。

如图 9 和 10 所示,桩土应力比及桩土荷载分担比整体上均随每级荷载的增加而呈阶梯状增长,即刚施加堆载时,短时间内曲线快速增长,在随后的预压时间里仅有小幅且缓慢的增长。由于桩的弹性模量比地基土高几个数量级,每级路堤堆载后,附加荷载在桩土之间的分配瞬间完成,且刚性的桩承担较多荷载,所以桩土应力比和桩土荷载分担比均瞬时增大;随着复合地基固结沉降发展,桩土沉降差有微小增长且增速越来越慢,路堤拱效应进一步发挥使桩顶承担更多附加荷载,因此后期桩土应力比和桩土荷载分担比均有缓慢增长,但相对于堆载阶段桩土应力比和桩土荷载分担比均不会有大幅变化。

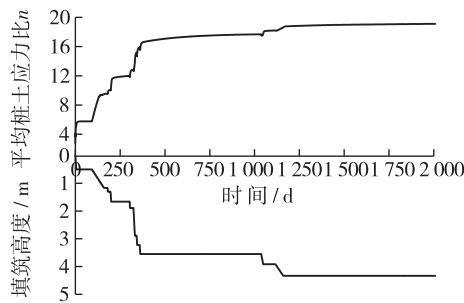


图 9 平均桩土应力比随堆载的变化

Fig. 9 Variation of averaged stress ratio of pile soil to with surcharge

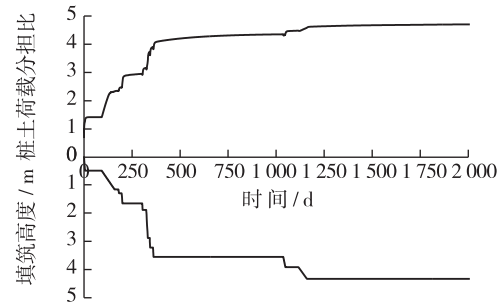


图 10 桩土荷载分担比随堆载的变化

Fig. 10 Variation of pile soil load sharing ratio with surcharge

将路堤填高  $H$  (包括碎石垫层) 与净距  $L$  (等于桩间距  $D$  减承台边长  $d$ , 本文为 1.4 m) 的比值定义为高距比  $k$ , 即  $k = H/L$ 。无量纲的平均桩土应力比  $n$  与高距比  $k$  间具有较好的正相关线性关系 (图 11), 高距比  $k$  每增加 1, 相应的桩土应力比  $n$  增加 4.38。

桩顶承台上具有明显的应力集中现象,图 12 为不同堆载阶段桩土顶部竖向应力的径向分布 (以管桩中心轴为起点)。随着堆载的增加承台上竖向应力明显增加,而桩间土竖向应力相对缓慢增加,与图 9 所示桩土应力比随填高增大而增长的现象相一致。同级荷载作用下,承台上不同位置桩土应力分布不一,峰值出现在承台中心和边缘位置,波谷在靠近边缘位置。同时,承台上竖向应力极差随填土荷载增大而增大。

第 7 层堆载填筑后承台顶部的垫层及填土中最大压应力等值线图 (图 13) 直观地展示了桩顶的应力集中现象,即所谓的“土拱效应”。

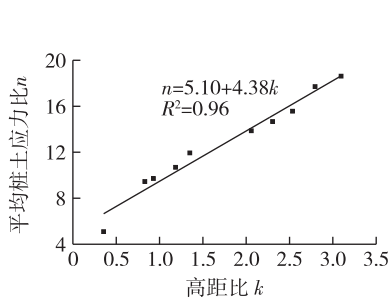


图 11 平均桩土应力比  $n$  与高距比  $k$  的相关性

Fig. 11 Relationships between averaged stress ratio  $n$  of pile to soil and ratio of height to net  $k$

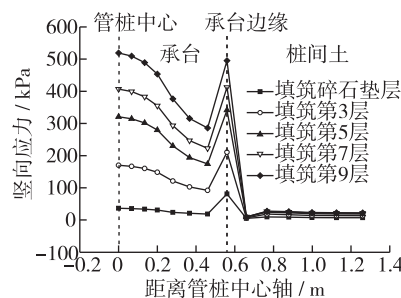


图 12 不同时间顶部竖向应力的径向变化

Fig. 12 Radial variation of vertical stress with different time

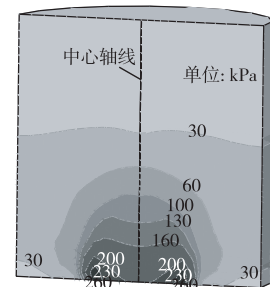


图 13 第 7 层堆载后垫层及填土的最大主应力等值线

Fig. 13 Contour of maximum principal stress of cushion and fill after seventh layer loading

### 3.2 荷载传递

对比不同加荷阶段由路堤堆载产生的管桩内外总摩阻力增量(图14)可知,内摩阻力较小且只占外摩阻力的0~6.8%,在设计时可作为安全储备看待。

桩外侧摩阻力分布如图15所示,中性点位于6~12 m的深度范围内,中性点之上为负摩阻力,之下为正摩阻力,越靠近桩端,土性越好,桩土相对位移越大,正摩阻力成数量级增长。相对桩外侧正摩阻力,每个填筑阶段的负摩阻力均较小(图16),正、负摩阻力之比为5.0~8.2。工程管桩较长(36 m),桩端为粉、细砂,尽管桩端存在应力集中(图17),但由于桩端面积较小,总桩端阻力并不大,只占外摩阻力的1.5%~8.1%(图18)。因此,本工程下的桩承式复合地基管桩外摩阻力为路堤提供了主要支撑,占承台承担总荷载的91%~96%,占总填筑荷载的56%~82%,所以承台下的管桩为典型的摩擦型桩。

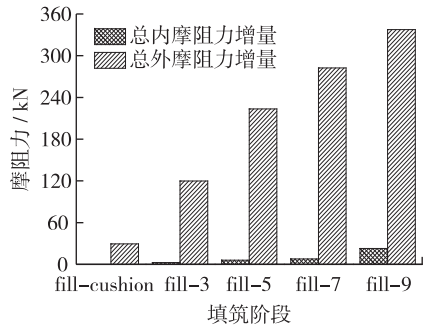


图14 管桩内、外侧总摩阻力对比

Fig. 14 Comparison of total internal friction between inside and outside of pipe pile

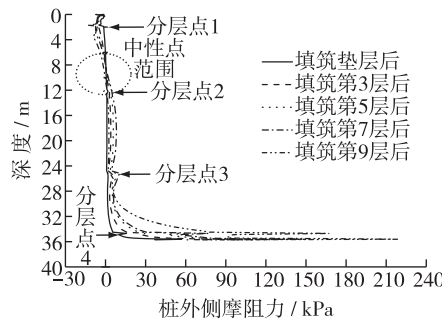


图15 管桩外侧摩阻力沿深度分布变化

Fig. 15 Distribution of outside friction resistance along pile

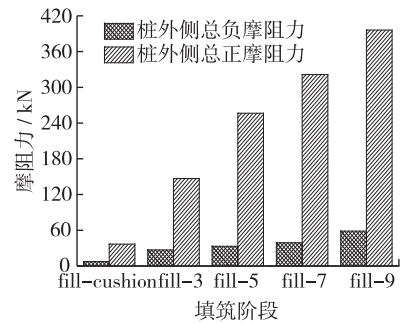


图16 管桩外侧正、负总摩阻力对比

Fig. 16 Comparison of positive and negative total frictional resistance outside of pipe pile

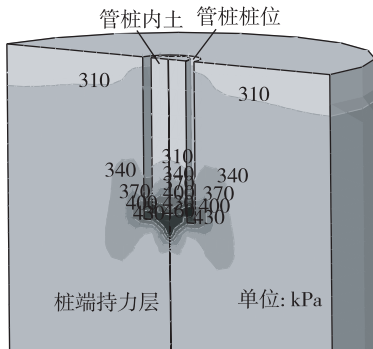


图17 第7层堆载后桩端附近地基土最大主应力等值线

Fig. 17 Maximum principal stress contour of soil near pile end after seventh layer loading

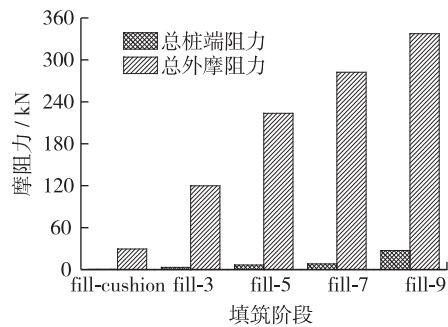


图18 外摩阻力与桩端阻力对比

Fig. 18 Comparison of external friction resistance and pile tip resistance

## 4 压缩变形分析

堆载过程中的桩、土差异沉降是荷载向承台集中的必要条件,轴对称接触有限元模型结果表明桩、土平均沉降(面积加权平均)差随路堤填筑而缓慢增大(图19),平均桩土应力比  $n$  与桩土沉降差  $s$  表现出较好的正线性相关(图20),拟合式为:  $n = 2.97 + 1.45s$ 。当桩、土最终沉降差达到 11.9 mm 时,平均应力比为 20.2。

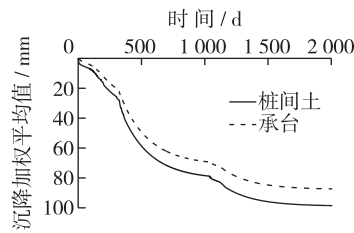


图 19 桩间土及承台加权平均沉降

Fig. 19 Weighted average settlements of pile plate and soil

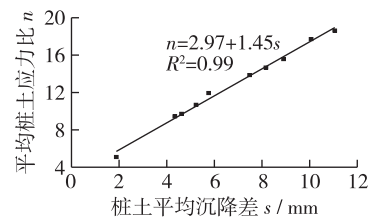


图 20 桩土应力比  $n$  与平均沉降差  $s$  的相关性

Fig. 20 Correlation between stress ratio  $n$  of pile to soil and its average settlement difference  $s$

建立与管桩复合地基对应的无桩、无加筋的天然地基数值模型, 可得堆载使天然地基所产生的最终沉降为 534 mm, 而桩承式加筋路堤下桩间土的最终沉降仅为 99 mm, 只有天然地基沉降的 18.5%, 可见管桩复合地基可以大大减小最终沉降 (缩减幅度为 435 mm), 从而大幅削减路堤补方用量。

对比管桩复合地基和天然地基各层压缩量及压缩率 (图 21 和 22), 可以发现: ①刚性桩复合地基压缩主要发生在下卧层 (73 mm), 在桩长范围 (36 m) 内的压缩量只有 26 mm, 占总沉降量的 26.3%; ②天然地基堆载时, 对应于复合地基桩长 (36 m) 范围内的压缩量为 464 mm (占总沉降的 87%), 下卧层压缩量为 70 mm, 地基沉降主要发生在相对较浅的地层。可见, 管桩复合地基通过桩侧摩擦和桩端刺入可以将填土荷载传递至压缩性更弱的深层地基土中, 从而大幅减小了桩长范围内软土的压缩率 (图 22), 实现了附加应力优化配置, 从而减小了地基沉降量。

第 3 层堆载后管桩复合地基中超静孔压沿深度的分布如图 23 所示, 桩长范围内超静孔压随深度逐渐增大, 且均小于桩端以下土层的超静孔压值, 说明刚性桩复合地基可以将附加荷载传递至压缩性较小的深层地基中, 优化配置填土荷载, 减小地基的总沉降。

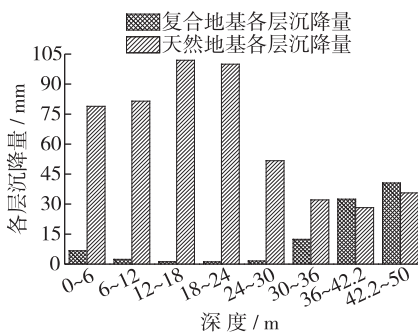


图 21 管桩复合地基与天然地基各层压缩量对比

Fig. 21 Comparison between compression capacity of composite foundation with pipe pile and natural foundation

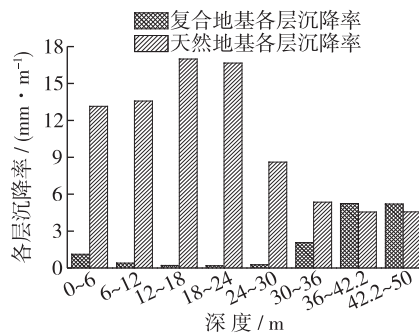


图 22 管桩复合地基与天然地基各层沉降率对比

Fig. 22 Comparison between settlement rate of composite foundation with pipe pile and natural foundation

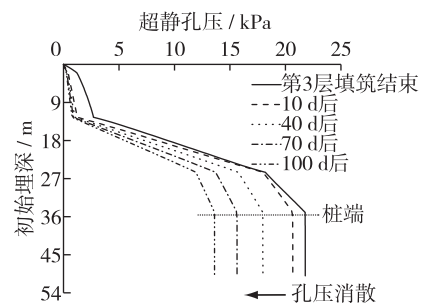


图 23 第 3 层堆载后复合地基土中超静孔压沿深度分布变化

Fig. 23 Changes of excess pore pressure distribution along depth in composite foundation after third layer loading

## 5 结 语

本文结合高速公路桥头深厚软基管桩复合地基试验段工程, 对比了 4 种单桩有限元数值建模方法, 并基于轴对称接触模型结果对荷载分配、传递和沉降变形等进行了较为细致的研究。主要结论如下:

(1) 基于桩间土沉降及承台上土压实测结果, 对比验证了常用几种复合地基单桩有限元建模方法。轴对称接触模型可以较为准确地模拟路基中心位置单桩加固范围复合地基的工作性状。

(2)数值模拟结果表明填土越高,桩顶承台上的应力集中越显著,桩土应力比 $n$ 与高距比 $k$ 、桩土沉降差 $s$ 均呈现出较好的正相关线性关系;路堤填筑结束时,管桩承担了80%的路堤荷载,且外侧摩阻力承担了超过90%的承台负荷,表明本文所述路堤下管桩复合地基中的管桩属于典型的摩擦型桩。

(3)刚性桩复合地基通过桩侧摩擦和桩端刺入将填土荷载传递到压缩性相对较小的深层地基中,与天然地基上堆载相比,优化了附加应力分布,大幅减小了桩长范围内土层的压缩率和压缩量,从而大幅减小了沉降量。

(4)本文所述数值建模方法及相关规律适用于所述深厚软基工况下路堤中心位置管桩复合地基单桩加固范围,复合地基的三维边界效应需另行讨论。

## 参 考 文 献:

- [1] 郑育彬, 韩先科. 我国高速公路发展的总体判断和“十三五”时期发展重点[J]. 综合运输, 2015, 37(5): 13-17. (ZHENG Yubin, HAN Xianke. Strategy of expressway development during the Thirteenth Five-year period [J]. China Transportation Outlook, 2015, 37(5): 13-17. (in Chinese))
- [2] 娄炎, 何宁, 娄斌. 高速公路深厚软基工后沉降控制成套技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 91-104. (LOU Yan, HE Ning, LOU Bin. Complete settlement control technology for deep soft foundation of expressway [M]. Beijing: China Communications Press, 2011: 91-104. (in Chinese))
- [3] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 57-70. (GONG Xiaonan. Composite foundation theory and engineering application [M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2007: 57-70. (in Chinese))
- [4] 何宁, 娄炎. 路堤下刚性桩复合地基的设计计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 797-802. (HE Ning, LOU Yan. Design and calculation method for rigid pile composite foundation under embankments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 797-802. (in Chinese))
- [5] 雷金波, 徐泽中, 黄玲, 等. 带帽PTC管桩复合地基荷载传递试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 232-236. (LEI Jinbo, XU Zhezong, HUANG Ling, et al. Experimental study on load transfer of prestressed thin-wall concrete (PTC) pile with cap composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Suppl): 232-236. (in Chinese))
- [6] NUNEZ M A, BRIANÇON L, DIAS D. Analyses of a pile-supported embankment over soft clay: Full-scale experiment, analytical and numerical approaches [J]. Engineering Geology, 2013, 153(2): 53-67.
- [7] 陈仁朋, 徐正中, 陈云敏. 桩承式加筋路堤关键问题研究[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 7-12. (CHEN Renpeng, XU Zhengzhong, CHEN Yunmin. Research on key problems of pile-supported reinforced embankment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 7-12. (in Chinese))
- [8] 庄妍, 崔晓艳, 刘汉龙. 桩承式路堤中土拱效应产生机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊1): 118-123. (ZHUANG Yan, CUI Xiaoyan, LIU Hanlong. 3D FE analysis of arching in a piled embankment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Suppl1): 118-123. (in Chinese))
- [9] 莫海鸿, 黄文锋, 房营光. 不同桩长对无持力层刺入工况下刚性网格-桩加固路基的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊1): 2944-2950. (MO Haihong, HUANG Wenfeng, FANG Yingguang. Influence of different pile lengths on rigid grid-pile reinforced subgrade without bearing stratum penetration [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Suppl1): 2944-2950. (in Chinese))
- [10] 宁波市高等级公路建设指挥部, 南京水利科学研究院, 辽宁省交通规划设计院, 等. 杭州湾跨海大桥南岸接线深厚软基沉降控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010: 1-20. (Ningbo High Grade Highway Construction Command, Nanjing Hydraulic Research Institute, Liaoning Traffic Planning and Design Institute, et al. Settlement control technology of soft foundation for connection of south bank of Hangzhou Bay sea crossing bridge [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 1-20. (in Chinese))
- [11] 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. (LU Xuwen. Experimental study of composite foundation with long-short piles improving deep soft soils under embankment load [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [12] GIROUT R, BLANC M, DIAS D, et al. Numerical analysis of a geosynthetic-reinforced piled load transfer platform - Validation on centrifuge test [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(5): 525-539.



- [13] 宋兵. 桩侧摩阻力特性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (SONG Bing. Study on the characteristics of shaft soil resistance of pile[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [14] 娄炎, 何宁. 地基处理监测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 271-303. (LOU Yan, HE Ning. Monitoring technology of foundation treatment[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015: 271-303. (in Chinese))

## Numerical simulation of pipe pile composite foundation of deep soft foundation under embankment

JIANG Yanbin<sup>1</sup>, HE Ning<sup>1</sup>, LIN Zhiqiang<sup>2</sup>, YAO Mingshuai<sup>1</sup>, LI Wenxuan<sup>1</sup>

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Fujian Academy of Building Research, Fuzhou 350025, China*)

**Abstract:** Combined with the in-situ test results of the piled embankment with deep soft foundation at the bridge-head of expressway, several axisymmetric finite element numerical modeling methods for single pipe pile in composite foundation are compared and verified. It is considered that the axisymmetric contact finite element model can accurately reflect the basic properties of the pipe pile composite foundation under embankment. The mechanical characteristics and deformation distribution of the piled embankment composite foundation are discussed in detail based on the numerical analysis results. The numerical calculation results show that the higher the fill is, the more prominent the stress concentration is at the top of the pile cap. The pile-soil stress ratio and the ratio of embankment height to pile spacing, as well as the settlement difference between the pile and soil, shows that there have the relatively good positive linear relationships. At the end of embankment filling, 80% of the embankment load is carried by the pipe pile with the cap, and more than 90% of the load on the cap is undertaken by lateral friction resistance of the pile. Most of the load is transferred to the deep foundation with relatively low compressibility compared with surcharge on the natural foundation, and the additional stress distribution of the rigid pile composite foundation is optimized, both of the compression rate and compression of the foundation are significantly reduced within the length of pile. The total settlement of pipe pile composite foundation is only 18.5% of the corresponding natural foundation with the same load, and the total settlement of the deep soft foundation is reduced by 435 mm.

**Key words:** composite foundation with pipe pile; axisymmetric model; load distribution; load transfer; compression deformation; compression ratio