

# 混凝土芯砂石桩载荷试验及沉桩数值分析

叶观宝<sup>1,2</sup>, 张晴雯<sup>1,2</sup>, 赵维炳<sup>3</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;  
3. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘 要:**混凝土芯砂石桩能够有效地减少工后沉降和工后差异沉降。为进一步了解混凝土芯砂石桩复合地基的加固机理, 预制芯桩对复合地基承载力的提高作用以及砂石壳加速固结排水的作用, 采用基于 ABAQUS 有限元数值分析方法建立轴对称平面应变模型, 对混凝土芯砂石桩单桩及单桩复合地基载荷试验进行模拟, 并将结果与现场实测数据进行对比。对单桩沉桩过程进行了模拟, 并结合圆孔扩张理论和砂井固结理论进行分析。研究结果表明: 预制芯桩承担了大部分上部附加荷载, 最终荷载分担比约为 0.7, 有助于提高复合地基承载力; 沉桩至 5 m 深度处, 地基土隆起对沉桩引起的超孔压影响不大, 砂石桩的存在大大加快了地基土中超孔隙水压力的消散和桩周土强度的恢复。

**关键词:**道路工程; 地基处理; 数值模拟; 混凝土芯砂石桩; 载荷试验; 固结计算

**中图分类号:** U416.1; TU472

**文献标志码:** A

## Numerical analysis of loading test and pile penetration of concrete-core sand-gravel piles

YE Guan-bao<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing-wen<sup>1,2</sup>, ZHAO Wei-bing<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, Jiangsu, China)

**Abstract:** The concrete-cored sand-gravel columns can effectively reduce post-construction settlements and differential post-construction settlements. For a further study of the reinforcement mechanisms of the composite foundation improved by concrete-core sand-gravel columns, which includes the effects of the inner pile on improving the bearing capacity of the composited foundation and the influence of the sand-gravel shell on accelerating the consolidation rate of the subsoil, the axisymmetric plane-strain models were established based on the numerical software ABAQUS to simulate the single column loading test and single column composite foundation loading test, the results of which were compared with the field monitoring results. The single column sinking process was simulated and analyzed in combination with the cavity expansion theory and sand-well consolidation theory. The research results show that the inner pile takes

most of the overloads with a final load sharing ratio of 0.7, which contributes to improving the bearing capacity of the composite foundation. The soil heave does not affect the excess pore pressures caused by column sinking at 5 m depth, and the existence of the sand-gravel shell accelerates the dissipation of the excess pore pressures and the strength recovery of the surrounding subsoil. 1 tab, 14 figs, 19 refs.

**Key words:** road engineering; foundation improvement; numerical simulation; prefabricated concrete-core sand-gravel piles; loading test; consolidation calculation

## 0 引言

随着软土地基处理技术的不断发展,常规的单一地基处理方法逐渐转向由 2 种或多种处理技术联合使用的组合型复合地基处理方法,如长板-短桩组合型复合地基、劲芯搅拌桩复合地基、长短桩复合地基和混凝土芯砂石桩复合地基等<sup>[1-9]</sup>。混凝土芯砂石桩复合地基技术以深厚软土地基为对象,由竖向增强体和排水体系组成。其中竖向增强体为预制钢筋混凝土芯桩,截面尺寸为 20 cm×20 cm,由工厂集中预制而成,桩身质量容易控制且便于检测,具有高强度、低压缩性,有利于提高复合地基承载力。为防止荷载作用下芯桩产生向上的刺入破坏,成桩后控制芯桩顶低于地面 50 cm,经人工修整后在桩顶上形成比混凝土芯砂石桩直径稍大的圆锥形凹槽。排水体系由包围在芯桩周围的大直径砂石壳和桩顶水平碎石垫层组成。水平褥垫层中可设置一或二层土工格栅,避免应力集中。预压荷载下,砂石壳提供了大直径竖向排水通道,有利于消散超孔隙水压力,桩间土承受的荷载迅速转化为有效应力,使得施工扰动引起的桩周土强度下降迅速恢复。

近几年来,关于混凝土芯砂石桩复合地基的研究已经取得了一些成果。陈俊生等以镇江—溧阳高速公路 K63+046~K63+087 试验段为依托,研究了路堤荷载下的桩顶和桩间土的沉降和差异沉降、分层沉降、侧向位移和超静孔隙水压力等,结果表明混凝土芯砂石桩特别适用于对工后沉降和工后沉降差有严格要求的深厚软基处理<sup>[7]</sup>。程万钊等通过现场试验分析研究了桩间土地表沉降、桩顶和桩间土差异沉降、土体深层沉降等,结果表明当混凝土芯砂石桩应用于水利堤防工程时既能有效控制深厚软基的工后沉降,又能提高堤防边坡的稳定性<sup>[8]</sup>;谭桂华对混凝土芯砂石桩复合地基的沉降计算方法进行了研究,并利用有限差分软件对影响混凝土芯砂石桩单桩复合地基加固特性的参数进行了分析,包括芯桩直径、砂石壳厚度和桩长等<sup>[10]</sup>。以上对混凝土

芯砂石桩复合地基的研究均是从控制工后沉降和差异工后沉降的思想出发,对混凝土芯砂石桩复合地基的承载力特性以及打桩过程中产生的挤土效应的研究则较少。

为进一步了解混凝土芯砂石桩复合地基的承载力特性、打桩引起的挤土效应以及砂石壳加快固结排水的作用,本文采用有限元分析方法对混凝土芯砂石桩复合地基的加固机理进行研究。以 ABAQUS 为平台,采用轴对称平面应变模型,对单桩及单桩复合地基载荷试验进行模拟,研究对象包括单桩及单桩复合地基承载力、芯桩及砂石壳上的竖向附加应力、桩土应力比和桩土荷载分担比。单桩沉桩过程的模拟结合圆孔扩张理论和砂井固结理论进行分析,对比有砂石壳存在和无砂石壳存在时,沉桩引起的超孔压的发展及消散情况,以及沉桩引起的地基土竖向位移和侧向位移。

## 1 单桩及复合地基载荷试验的模拟与分析

以文献[7]中工程为例,地基为深厚软土,采用混凝土芯砂石桩处理,桩长 22 m,正三角形布置,桩间距 1.9 m,地下水位距地表 1~2 m,采用振动沉管法施工。地基土的物理力学性能指标见下页表 1。

现场载荷试验中,单桩静载荷试验每级增加 75 kN 的荷载,最大加至 600 kN,卸载时每级卸荷为加载时的 2 倍,为 150 kN。单桩复合地基静载荷试验采用面积 3.13 m<sup>2</sup> 的载荷板,每级增加 37.5 kPa 的荷载,最大加至 300 kPa,卸载时每级卸荷为加载时的 2 倍,为 75 kPa。

利用 ABAQUS 进行数值模拟,把截面 20 cm×20 cm 的芯桩按照等截面法换算成直径为 23 cm 的圆柱形桩,简化为轴对称平面应变对单桩载荷试验及单桩复合地基载荷试验进行模拟。模型中地基土径向上取桩半径的 20 倍,竖向取 2 倍桩长。芯桩采用线弹性模型,地基土、砂石壳采用摩尔-库伦模型。芯桩与砂石壳及砂石壳与地基土间均设置为面-面接触,芯桩与砂石壳间摩擦因数为 0.4,砂石壳与地

基土间摩擦因数为 0.3。模型左右两边界及地基土底部均设置约束,地基土顶面自由变形,且孔压为 0。单桩及单桩复合地基载荷试验的计算模型如图 1 所示。

表 1 地基土物理力学性能指标  
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层编号	土层名称	层厚/m	含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙比 $e$	压缩系数 $a_{(1-2)}/(\text{MPa}^{-1})$	压缩模量 $E_{s(1-2)}/\text{MPa}$	直剪(快剪)	
								粘聚力 $c/\text{kPa}$	摩擦角 $\varphi/(\circ)$
①	杂填土	2.0~3.7							
②	粉质黏土	1.6~2.6	32.3	18.4	0.91	0.30	7.28	2.0	17.1
③	淤泥质粉质黏土	6.6~10.9	38.8	17.9	1.07	0.49	4.47	7.0	24.5
④-1	粉质黏土夹粉土	0.6~2.5	35.2	18.3	0.96	0.45	5.37	18.0	16.5
④-2	粉土夹粉质黏土	0.7~2.9	33.9	18.5	0.93	0.41	5.68	10.0	25.5
④-3	粉质黏土夹粉土	0~4.4	26.6	19.3	0.75	0.45	3.94	25.0	13.7
⑤	粉质黏土	9.6~10.1	18.7	18.7	0.93	0.43	5.29	13.0	12.2

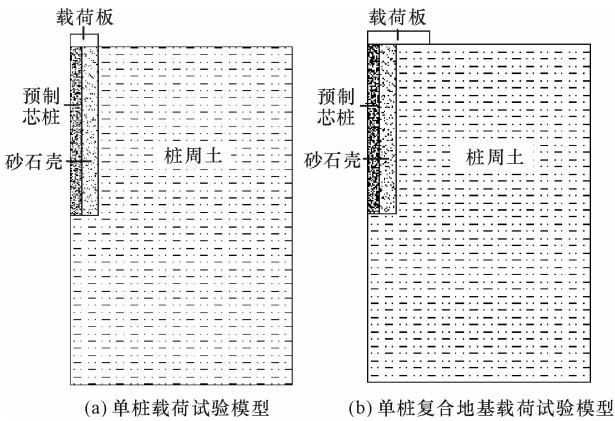


图 1 载荷试验模型  
Fig. 1 Loading test models

现场载荷试验及数值模拟结果如图 2 所示。  
由图 2 可知,数值分析模型较实际情况更早进入塑性变形阶段。试验单桩承载力特征值为 300 kN,数值分析单桩承载力特征值为 262.5 kN;试验单桩复合地基承载力特征值为 150 kPa,数值分析单桩复合地基承载力特征值为 131.25 kPa。

造成数值模拟结果较早进入塑性变形阶段的原因是由于实际情况为群桩复合地基,在进行单桩载荷试验或单桩复合地基载荷试验时,试验结果会受到周围桩的影响,群桩的共同作用使得桩间土挤密,桩侧摩阻力增大,单桩承载力及复合地基承载力都得以提高。而在数值分析中,仅模拟了 1 根桩的情况,桩周无其他桩的共同作用,上部施加荷载的情况下,地基土较早进入塑性变形阶段。

由下页图 3、图 4 可知,加载阶段随上部施加荷载的增加,芯桩所受竖向附加应力及附加轴力都逐渐增大;且由于受到向上桩侧摩阻力的作用,桩身所受力随桩长逐渐减小。

卸荷阶段,桩身所受力随桩长先增大再减小。

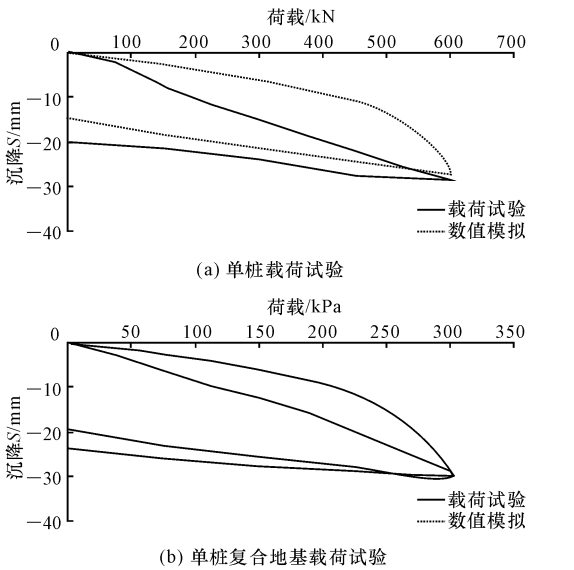
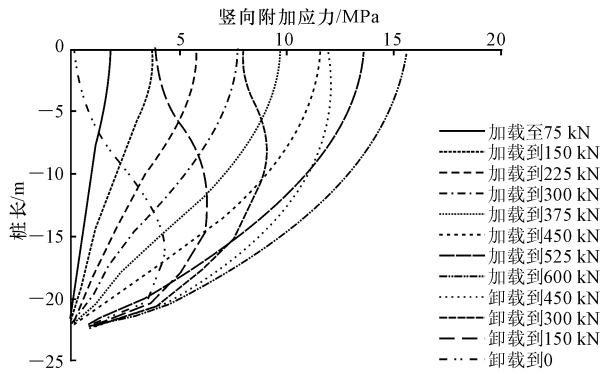


图 2 载荷试验的荷载-沉降曲线  
Fig. 2 Load-settlement curves of loading tests

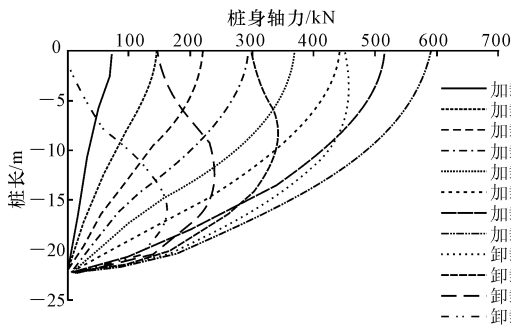
这是由于卸荷时,桩身上部回弹量大于芯桩周围砂石壳的回弹量,砂石壳给桩向下的侧摩阻力,导致桩身上部受力随深度增加而增加。而桩身下部仍然受到向上的侧摩阻力,所受力随桩长逐渐减小。且随卸荷量越大,桩身受力最大值处逐渐下移。

由下页图 5、图可知,载荷试验在砂石壳中的影响深度约为 2 m,2 m 以上范围砂石壳附加应力较大,随载荷板上荷载增大而增大。桩底端处砂石壳所受附加应力急剧增大,产生应力集中现象,随载荷板上施加荷载增大,应力集中越明显。

下页图 7 为单桩复合地基载荷试验加载过程中,芯桩顶与砂石壳顶竖向应力比及芯桩顶与载荷板下地基土表面平均竖向应力比。两应力比曲线的变化趋势是不同的。芯桩与砂石壳应力比随荷载增大呈先增大后减小的趋势,而芯桩与地基土应力比随荷载增加逐渐增加,芯桩上应力远远大于砂石壳



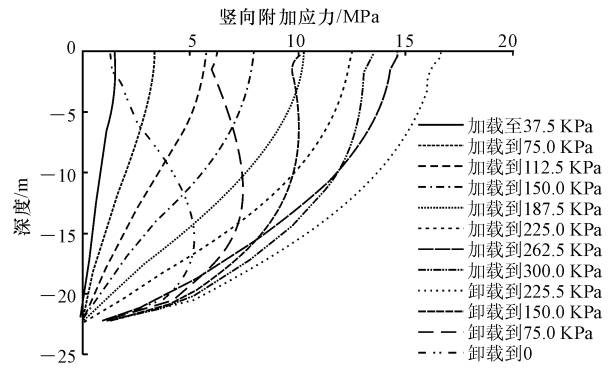
(a) 芯桩竖向附加应力



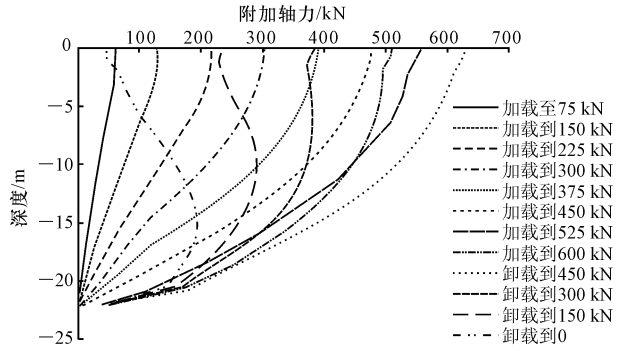
(b) 芯桩附加轴力

图3 单桩载荷试验中芯桩受力曲线

Fig. 3 Vertical load-carrying curves of the inner pile in single pile loading test



(a) 芯桩竖向附加应力



(b) 芯桩附加轴力

图4 单桩复合地基载荷试验中芯桩受力曲线

Fig. 4 Vertical load-carrying curves of the inner pile in single pile composite foundation loading test

及地基土的应力。

下页图8为单桩复合地基载荷试验加载过程中,芯桩、砂石壳及载荷板下地基土的荷载分担比曲线。由图8可知,加载瞬间,几乎由芯桩承担全部荷载,然后又迅速将荷载转移给周围地基土,地基土承载力很快发挥到最大值,载荷板上再增加的荷载就由芯桩来承担。故芯桩荷载分担比曲线呈先急剧减小再随施加荷载的增加而缓慢增加,而地基土荷载分担比曲线先增加至最大值,再随施加荷载增加而逐渐变小。图8中,芯桩荷载分担比曲线始终在地基土荷载分担比曲线之上,芯桩始终承担了大部分荷载,故芯桩的存在能够大大提高地基承载力。

## 2 单桩贯入模拟及理论固结计算

混凝土芯砂石桩属于挤土桩,挤土过程中会引起桩周土超孔压。相比于传统桩如水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)等,混凝土芯砂石桩的一个特点是,砂石壳的存在能够有效缩短排水路径,加快超孔压的消散,有利于桩周土的固结。为研究混凝土芯砂石桩沉桩所引起的超孔压及砂石壳对孔压消散的影响,本文采用数值模拟和理论计算相结合的方法。

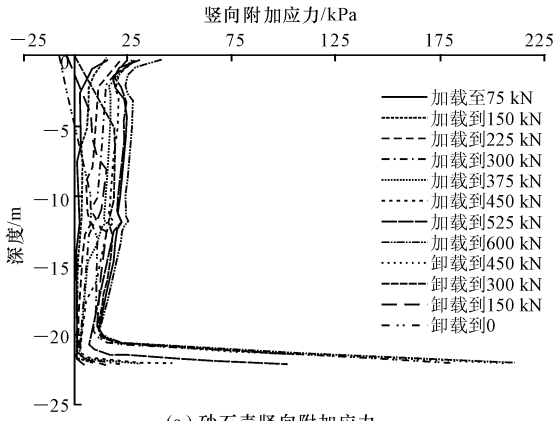
尽管预制芯桩的存在使得砂石壳的过水断面小于同等直径的砂井,计算结果表明预制芯桩的存在对地基土固结速率的影响较小,可以采用砂井固结理论<sup>[9]</sup>。文中,桩的贯入采用圆孔扩张理论,砂石壳采用理想砂井固结理论<sup>[12-17]</sup>。为简化计算,本文只模拟了单桩沉入地基土中5 m深的情况,但也足以反映混凝土芯砂石桩挤土产生的超孔压及孔压消散趋势。

### 2.1 圆孔扩张理论

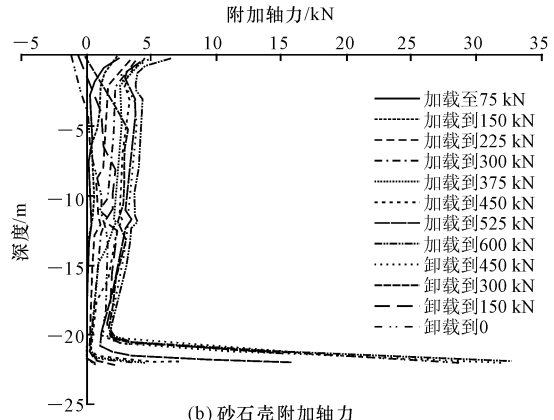
采用圆孔扩张理论是把桩的贯入过程看作在无限体中扩张出一个与桩径相同的圆柱形小孔,假设土为理想弹塑性体,服从Mohr-Coulomb屈服准则,轴对称平面应变状态下沉桩引起塑性区内总应力增量为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta\sigma_r}{c_u} &= 2\ln\left(\frac{R}{r}\right) + 1 \\ \frac{\Delta\sigma_t}{c_u} &= 2\ln\left(\frac{R}{r}\right) - 1 \\ \frac{\Delta\sigma_v}{c_u} &= 2\ln\left(\frac{R}{r}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\sigma_r$ 、 $\sigma_t$ 、 $\sigma_v$ 分别为径向、切向和竖向的总应力增量; $R$ 为塑性影响区半径, $u$ 为泊松比; $E$ 为弹性模量; $R=R_0\sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)c_u}}$ , $R_0$ 为成桩半径; $r$ 为塑性区



(a) 砂石壳竖向附加应力



(b) 砂石壳附加轴力

图 5 单桩载荷试验中砂石壳受力曲线

Fig. 5 Vertical load-carrying curves of the sand-gravel shell in single pile loading test

内某点到桩中心的距离;  $c_u$  为土的不排水抗剪强度。

根据土的有效应力原理,不排水条件下地基土中超孔压的计算式为

$$\Delta u = \beta \Delta \sigma_{oct} + \alpha \Delta \tau_{oct} \quad (2)$$

式中:  $\Delta u$  为孔隙水压力增量;  $\Delta \sigma_{oct}$  为八面体正应力增量,  $\Delta \sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\Delta \sigma_r + \Delta \sigma_t + \Delta \sigma_v)$ ;  $\Delta \tau_{oct}$  为八面体剪应力增量,  $\Delta \tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\Delta \sigma_r - \Delta \sigma_t)^2 + (\Delta \sigma_t - \Delta \sigma_v)^2 + (\Delta \sigma_v - \Delta \sigma_r)^2}$ ;  $\beta$ 、

$\alpha$  为孔隙水压力参数,对饱和粘性土  $\beta = 1$ ;  $\alpha$  与 Skempton 孔隙水压力系数  $A_f$  之间的关系为  $\alpha = 0.707(3A_f - 1)$ 。

沉桩刚结束时塑性区的超孔压计算式为

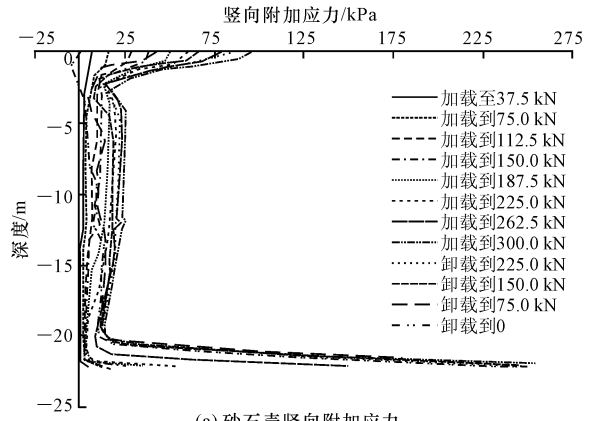
$$\frac{\Delta u}{c_u} = 2 \ln \left( \frac{R}{r} \right) + 1.73A_f - 0.58 \quad (3)$$

当  $R = R_0$  时,得到桩土界面处最大超孔压

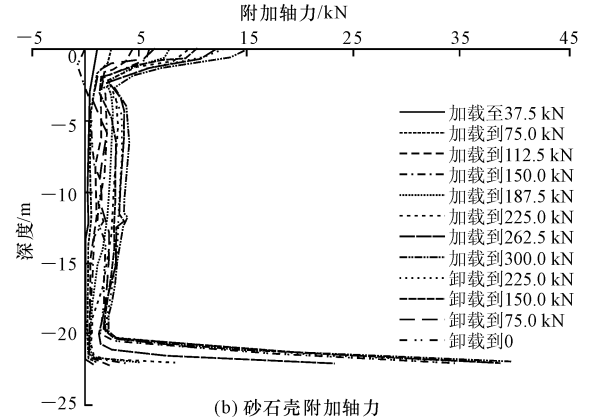
$$\frac{\Delta u_{max}}{c_u} = \ln \left( \frac{E}{3c_u} \right) + 1.73A_f - 0.58 \quad (4)$$

## 2.2 理想砂井固结理论

本文混凝土芯砂石桩采用砂井固结理论,且不



(a) 砂石壳竖向附加应力



(b) 砂石壳附加轴力

图 6 单桩复合地基载荷试验中砂石壳受力曲线

Fig. 6 Vertical load-carrying curves of the sand-gravel shell in single pile composite foundation loading test

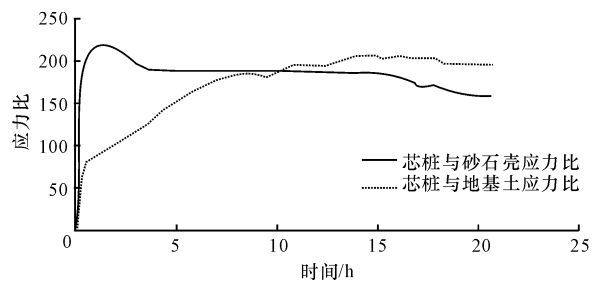


图 7 加载阶段应力比随时间变化曲线

Fig. 7 Stress ratio variation curves during loading stages

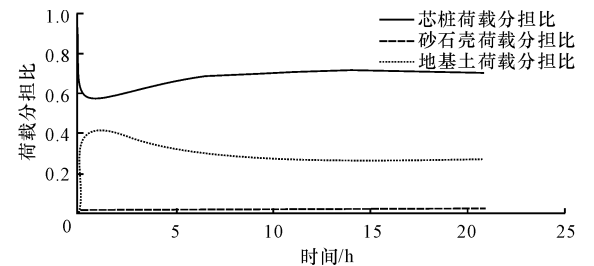


图 8 加载阶段荷载分担比随时间变化曲线

Fig. 8 Loading sharing ratio variation curves during loading stages

考虑井阻和涂抹作用。分为竖向固结和径向固结,竖向固结采用 Tezaghi 一维固结理论,径向采用理

想情况下 Barron 等应变固结解。按照 Carrillo 定理,水平排水和垂直向排水共同作用下超孔隙水压力  $u=u_0\left(\frac{u_r}{u_0}\right)\left(\frac{u_z}{u_0}\right)$ ,它满足

$$C_h\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u}{\partial r}\right)+C_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}=\frac{\partial u}{\partial t}\tag{5}$$

边界条件为

$$u|_{r=r_w}=u|_{z=0}=0$$

$$\frac{\partial u}{\partial r}|_{r=r_e}=\frac{\partial u}{\partial r}|_{z=H}=0$$

$$u=u_0$$

式中: $u_0$  为初始超孔压; $u_r$  为径向超孔压; $u_z$  为竖向超孔压; $C_h$ 、 $C_v$  分别为径向和竖向固结系数; $r_w$  为砂井半径; $r_e$  为砂井影响区半径。

总固结度计算公式为

$$\bar{U}=1-(1-\bar{U}_z)(1-\bar{U}_r)\tag{6}$$

式中: $\bar{U}_r$ 、 $\bar{U}_z$  分别为径向和竖向平均固结度。

数值模拟桩的贯入一般有 3 种方式,力贯入法、位移贯入法<sup>[18-19]</sup>,和圆孔扩张法<sup>[12-13]</sup>。本文研究采用位移贯入法,用向下的位移边界条件来控制桩的沉降,共模拟了混凝土芯砂石壳桩和传统无砂石壳桩 2 种方案。沉桩过程中地基土表面孔压设为 0,与实际情况一致。

图 9 为沉桩刚结束时桩周土中超孔压。其中理论值为按照圆孔扩张理论计算的离桩中心不同距离处超孔压,距离桩中心径向距离越大,地基土中的超孔压越小,在桩土接触面处引起的超孔压是最大的。数值模拟结果中,5 m 深处超孔压分布曲线最接近理论计算值,这是由于模型模拟实际情况,设置地基土表面孔压为 0,沉桩过程中可排水,导致浅部地基土中孔压小于理论值。

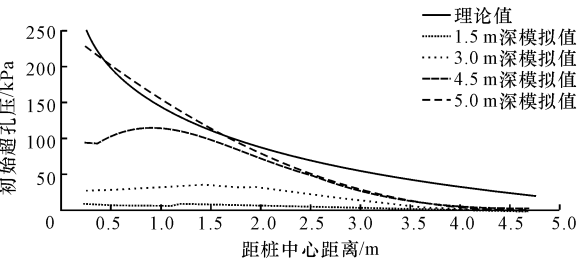


图 9 沉桩结束时不同深度处地基土超孔压分布  
Fig. 9 Excess pore pressure at the end of pile penetration

模拟结果中,地基土 1.5、3.0、4.5 m 深处沉桩完成时,超孔压分布曲线呈先微增加再减小,是由于沉桩引起桩周地基土隆起(图 10),使得土中孔隙增大,孔压有所减少,这与文献[13]中结论一致。随着径向距离的增大,超孔压先增至正常状态,随径向距

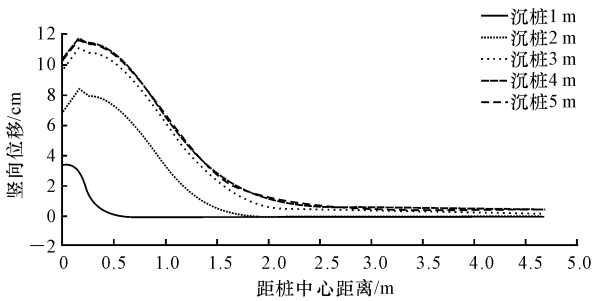


图 10 沉桩过程中地基表面竖向位移  
Fig. 10 Vertical displacement of foundation surface during pile penetration

离增大,沉桩的挤土效应变小,超孔压减小。

图 11 为无砂石壳桩方案中,距路基中心 0.5 m 不同深度处超孔压随时间发展曲线。横坐标表示从桩开始贯入到固结完成的时间,采用自然对数坐标。由图 11 和图 12 可知,沉桩至某深度时,该深度处桩周土超孔压和侧向位移达到最大值;且随桩贯入深度的增加,桩周土所能达到的最大超孔压值和最大侧向位移值也增大。图 11 中,1.5 m 和 3 m 深处超孔压曲线达到最大值时急剧减小甚至为负值,也是由于沉桩至该深度时,引起该处桩周土向上隆起,孔压减小,而后超孔压再随时间逐渐恢复和消散。4.5 m 和 5 m 深处超孔压发展曲线中,由于埋深较大,沉桩引起桩周土隆起量小,地基土隆起对超孔压的影响不大,超孔压在到达最大值后随时间逐渐消散。

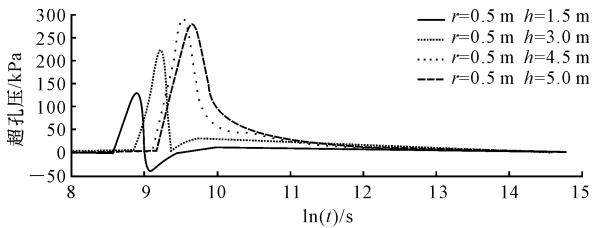


图 11 不同深度处超孔压随时间发展  
Fig. 11 Excess pore pressure variation in different depths with the changes of time

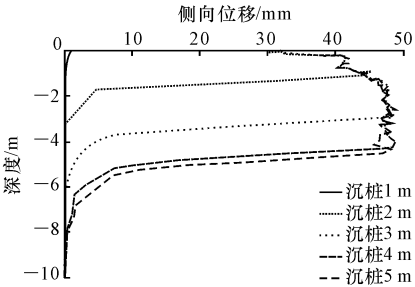


图 12 沉桩过程中距桩中心 0.5 m 处地基土侧向位移  
Fig. 12 Lateral displacement of subsoil being 0.5 m way from pile center during pile penetration

图13为数值模拟的混凝土芯砂石桩和无砂石壳桩两种方案中,桩端5 m深处距桩中心不同径向距离处超孔压的消散情况。横坐标为沉桩完成后孔压消散时间,采用自然对数坐标。由图可知,砂石壳增加了排水通道,缩短了排水路径,加快了桩周土的固结。在有砂石壳桩的模拟方案中,孔压消散快于无砂石壳桩的方案。

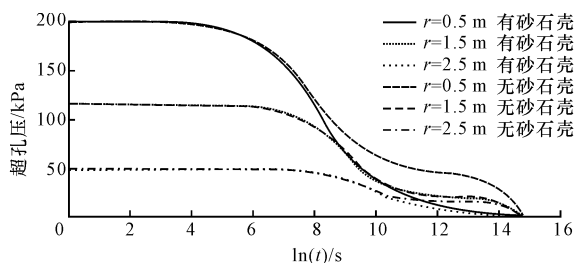


图13 沉桩完成后超孔压消散

Fig. 13 Excess pore pressure dissipation after pile penetration completion

图14中,数值模拟结果为5 m深处距桩中心不同距离处地基土固结度的发展,理论计算值为桩周地基土平均固结度。模拟结果中,混凝土芯砂石桩方案中,距离砂石壳越近地基土固结越快,且该方案中地基土固结速度快于无砂石壳桩的方案。理论计算结果也表明,砂石壳存在大大加速了地基土的固结。

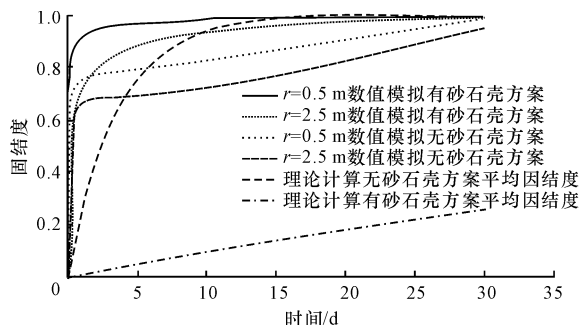


图14 沉桩完成后固结度随时间发展

Fig. 14 Consolidation degree variation after pile penetration completion

### 3 结 语

(1) 混凝土芯砂石桩复合地基中,芯桩承担了大部分施加在载荷板上的力,能够有效提高地基承载力,包围芯桩的砂石壳有助于缩短排水路径,加快由沉桩或上部加载引起的超孔压的消散,加速桩周土的固结。

(2) 混凝土芯砂石桩属于摩擦桩,芯桩承担了大部分附加荷载,并最终通过桩侧摩阻力传递给深部地基土。

(3) 同一深度处,距桩中心越远沉桩引起的超孔压越小。沉桩至某深度时,该深度处桩周土超孔压及侧向位移达到最大,且沉桩引起的深部地基土超孔压及侧向位移最大值大于浅部地基土超孔压及侧向位移最大值。

(4) 混凝土砂石桩的排水固结理论采用砂井理论。相对于传统无砂石壳桩的方案,混凝土芯砂石桩能够加快由沉桩引起的超孔压消散,加速桩周土强度的恢复。

(5) 本文仅对单桩的加固机理进行了研究,并未考虑群桩复合地基的加固特性。实际工程中群桩复合地基的挤土效应、承载力特性和固结特性等则更为复杂,需待进一步的研究。

### 参考文献:

### References:

- [1] Ye G B, Zhang Z, Xing H F, et al. Consolidation of a composite foundation with soil-cement columns and prefabricated vertical drains[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71 (1): 87-98.
- [2] Ye G B, Zhang Z, HAN J, et al. Performance evaluation of an embankment on soft soil improved by deep mixed columns and prefabricated vertical drains [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(5): 614-623.
- [3] Ye G B, Cai Y S. Bearing capacity and settlement calculation of stiffened deep cement mixing (SDCM) pile [C]. Chinese Institution of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering International Symposium on Geotechnical Engineering for High-Speed Transportation Infrastructure. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012: 320-328.
- [4] 杨庆光, 刘 杰, 张可能, 等. 深厚软土中水泥土长短桩复合地基承载特性试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 19-23.  
YANG Qing-guang, LIU Jie, ZHANG Ke-neng, et al. Bearing characteristic experiment of cement-soil long-short pile composite foundation in deep soft soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (3): 19-23. (in Chinese)
- [5] 李 波, 黄茂松, 程 岳, 等. 路堤荷载下长短桩组合型复合地基现场试验与数值模拟[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 9-14.  
LI Bo, HUANG Mao-song, CHENG Yue, et al. Field test and numerical analysis of composite foundation with long and short piles under embankment[J]. Chi-

- na Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 19-23. (in Chinese)
- [6] 赵维炳, 刘国楠, 李荣强. 控制工后变形新一代软基处理技术的发展[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 78-81.  
ZHAO Wei-bing, LIU Guo-nan, LI Rong-qiang. Development of new improving techniques for controlling post-construction deformation of soft soil ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(6): 78-81. (in Chinese)
- [7] 陈俊生, 唐彤芝, 赵维炳, 等. 混凝土芯砂石桩复合地基现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 957-962.  
CHEN Jun-sheng, TANG Tong-zhi, ZHAO Wei-bing, et al. Field tests on composite foundation with concrete-cored sand-gravel piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 957-962. (in Chinese)
- [8] 程万钊, 乐茂华, 王富永, 等. 混凝土芯砂石桩复合地基加固堤防软基试验研究[J]. 水利学报, 2007(增1): 675-681.  
CHENG Wan-zhao, LE Mao-hua, WANG Fu-Yong, et al. Field tests study of concrete-cored sand-gravel piles applied to strength embankment engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S1): 675-681. (in Chinese)
- [9] 唐彤芝, 赵维炳, 陈俊生, 等. 高填土路堤荷载下混凝土芯砂石桩复合地基变形与承载力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1829-1836.  
TANG Tong-zhi, ZHAO Wei-bing, CHEN Jun-sheng, et al. Experimental study of deformation and bearing capacity of composite foundation with concrete-cored sand-gravel piles under high embankment load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1829-1836. (in Chinese)
- [10] 谭桂华. 混凝土芯砂石桩复合地基的沉降及受力分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.  
TAN Gui-hua. The settlement and mechanical analysis of concrete-core sand-gravel pile composite foundation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [11] 王富永, 唐彤芝, 吴良冰, 等. 砼芯砂石桩复合地基排水固结的理论及试验研究[J]. 岩土工程界, 2009, 12(2): 37-41.  
WANG Fu-yong, TANG Tong-zhi, WU Liang-bing, et al. Theoretical and experimental study on drainage consolidation of composite foundation with concrete-cored sand-gravel piles[J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(2): 37-41. (in Chinese)
- [12] 胡士兵. 沉桩挤土球孔扩张理论研究和数值模拟分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
HU Shi-bing. Study on pile driving effect applying cavity expansion theory and finit element method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [13] 姚孟洋. 沉桩挤土圆孔扩张理论研究和数值模拟分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
YAO Meng-yang. Study on pile driving effect applying cylindrical cavity expansion theory and Numerical Analysis[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [14] 邹金锋, 罗恒, 彭建国, 等. 应变软化土体扩孔问题的大变形解析[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 20-26.  
ZOU Jin-feng, LUO Heng, PENG Jian-guo, et al. Large-deformation analysis for gravity expansion in strain-softening soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 20-26. (in Chinese)
- [15] 孔纲强, 周航. 扩底楔形桩沉桩挤土效应理论分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 9-16.  
KONG Gang-qiang, ZHOU Hang. Theoretical analysis of soil compaction effect of belled wedge pile[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 9-16. (in Chinese)
- [16] 谢康和. 砂井地基固结理论、数值分析与优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 1987.  
XIE Kang-he. Sand drained ground; analytical & numerical solutions of consolidation and optimal design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1987. (in Chinese)
- [17] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.  
SHEN Zhu-jiang. Theoretical soil mechanics[D]. Beijing: Chinese Water Power Press, 2000. (in Chinese)
- [18] 张明义, 邓安福, 干腾君. 静力压桩数值模拟的位移贯入法[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 113-117.  
ZHANG Ming-yi, DENG An-fu, GAN Teng-jun. Displacement penetration method used for numerical simulation to jacked pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 113-117. (in Chinese)
- [19] 雷华阳, 李肖, 陆培毅, 等. 管桩挤土效应的现场试验和数值模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1007-1012.  
LEI Hua-yang, LI Xiao, LU Pei-yi, et al. Field test and numerical simulation of squeezing effect of pile pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1007-1012. (in Chinese)