

复合桩水泥土环作用和设计参数的理论分析

刘金波^{*1}, 汪宁², 张松¹

(1. 中国建筑科学研究院地基基础研究所 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 钢筋混凝土和水泥土复合桩与普通钢筋混凝土桩比, 具有承载力高、施工速度快、环保、经济等优点, 对于复合桩的这些优点, 复合桩的水泥土环起到关键作用。围绕水泥土的剪胀特性, 分析了水泥土环对承载力提高的作用、水泥土的强度要求和水泥土环的理想直径, 得出水泥土环的剪胀是复合桩承载力提高的主要原因之一; 水泥土的强度过高不利于承载力的提高, 满足和混凝土芯桩不出现滑移即可; 水泥土环直径与芯桩直径比为 2 左右是较理想设计参数等结论。

关键词: 复合桩; 芯桩; 水泥土环; 剪胀; 水泥土强度; 水泥土环与芯桩桩径比

作者简介: 刘金波(1964—), 男, 研究员, 博士, 主要从事地基基础研究与工程技术服务。E-mail: cabrljb@126.com。

The effect of cement-soil on composite piles: a theoretical model and parameter analysis

LIU Jin-bo^{*1}, WANG Ning², ZHANG Song¹

(1. Institute of Foundation Engineering China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The composite piles, which consist of a reinforced concrete core pile and its outer cement-soil material, has the advantage of high-bearing capacity, high speed and low-cost of construction, environmental-protection, etc. Most of the advantages above are due to the characteristic of the cement-soil column surrounding the concrete pile. Centering on the dilatancy of cement-soil material, a theoretical model is proposed for analyzing the effect of dilatancy on the foundation's vertical bearing capacity. The proper diameter and strength of the cement-soil column are also analyzed. The dilatancy of cement-soil material is found to be one of the main factors which rise the bearing capacity of the composite piles. The strength and rigidity of cement-soil column shows a negative correlation with the increase of bearing capacity. The strength of cement-soil also should not be too low to maintain the shear capacity of the interface of concrete pile and cement-soil. The example shows a diameter which is 2 times the core pile diameter is proper for the cement-soil column.

Key words: composite piles; core-pile; cement-soil column; dilatancy; strength of cement-soil; diameter ratio of core pile and cement-soil column

1 引言

复合桩是指由钢筋混凝土芯桩和水泥土外环同心结合在一起形成的桩, 如图 1 所示。混凝土芯桩可以是现浇混凝土桩, 也可以是预制混凝土桩, 现在应用广的为预制混凝土桩和水泥土桩的结合, 即在水泥土未凝固前插入预制桩。1998 年刘金波在河北省新河钻机厂进行了系列复合桩的试验研究^[1-2], 并和普通的泥浆护壁钻孔灌注桩进行对比试验。试验结果表明, 在相同地质条件、相同桩径和桩长情况下, 复合桩的承载力明显高于灌注桩, 并具有环保、施工速度快、质量稳定等优点。

复合桩的上述优点也得到了国内其他学者类似试验的证明, 如邓亚光等以混凝土管桩作为芯桩, 粉喷桩作为外环的复合桩, 试验发现仅使用 12m 长单节管桩形成的复合桩, 其竖向承载力可达到原设计 38m 长相同直径管桩承载力^[3]。岳建伟、凌光容在粉质黏土地中采用长 14m 截面 0.27m×0.27m 混凝土预制桩, 复合直径 0.6m

水泥土搅拌桩进行试验, 也获得了较好的水平承载力结果^[4]。

复合桩和普通混凝土桩的主要区别在于水泥土环, 本文以复合桩水泥土环作为分析对象, 通过对水泥土环受力的计算, 分析水泥土环对复合桩承载力提高的影响, 确定合理水泥土环与芯桩桩径比及水泥土强度的影响和要求。

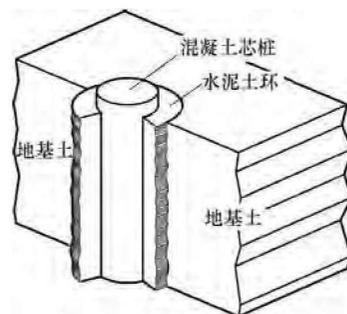


图 1 复合桩剖视图

Fig. 1 Cutaway view of a composite pile

2 理论模型与基本假设

理论模型的几何特征如图 2 所示。其中, R_1 为混凝土芯桩半径, R_2 为水泥土环外半径。 E 、 G 、 ν 分别为水泥土弹性模量、剪切模量和泊松比, ψ 为水泥土剪胀角。 F 为单位桩长对应的侧阻力 (亦即环形界面总剪力), 单位为 kN/m ; σ 为因剪胀产生的水泥土环外侧表面法向压力, 以受压为正方向; s 为剪胀作用下水泥土外壁的位移, 以向外侧为正方向。

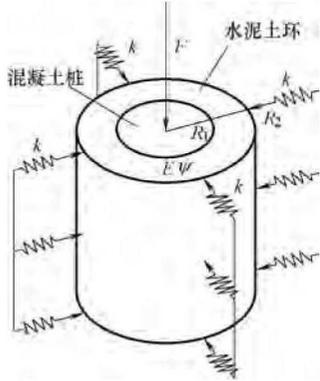


图 2 理论模型示意图

Fig. 2 Theoretical model of composite piles

理论模型采用如下边界条件:

(1) 假设水泥土环内侧混凝土桩刚度足够大, 外荷载由混凝土芯桩承担, 且桩与水泥土界面不会因挤压产生向桩心的压缩变形。这主要是因为混凝土材料相比水泥土, 弹性模量大约高 2 个数量级。

(2) 水泥土环外侧土压力与界面位移呈正比, 比值 k 表示侧向推动土体产生单位位移所需的压力, 其值应和土的压缩模量、扁铲侧胀试验参数有较直接的对应关系。

此外, 上述模型还采用如下基本假设:

(1) 水泥土环变形遵循平面应变假设, 桩对水泥土环内侧施加的剪力沿深度方向均匀;

(2) 水泥土环变形过程的应力应变遵循线弹性规律, E 和 k 为相关弹性参数;

(3) 当无周围土体约束时, 剪胀性带来的水泥土环体积增大效应可完全体现。

3 公式推导

水泥土环与周围土之间的压力对桩侧摩擦阻力的发挥有重要影响, 界面压力增大, 侧摩阻力提高。基于前面假设, 对水泥土环剪胀作用造成水泥土和土界面正压力变化的过程进行推导。

根据模型的上述边界条件和基本假设, 在剪胀作用下, 界面正应力的关键求解过程描述如下:

根据剪胀角的定义, 水泥土距离桩心 r 位置处, 在自由剪胀下的体积膨胀率为 (以体积膨胀为正):

$$\epsilon_{VS} = \tau/G \times \tan\psi \quad (1)$$

剪应力向桩外传递过程中, 其总竖向力不减少, 剪应

力随所在位置到桩心距离增大而减小。因此式 (1) 可继续写为如下形式:

$$\epsilon_{VS} = F \tan\psi / (2\pi r G) \quad (2)$$

假设上述剪胀量在不受外层土体约束 (即 $\sigma=0$) 的情况下得以完全转换为水泥土环的体积变化。对式 (2) 中体积应变在水泥土环范围内 (即 $R_1 \leq r \leq R_2$) 进行积分, 得到整个水泥土环的自由体积膨胀量:

$$V_S = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} F \tan\psi / (2\pi r G) \times r d\theta dr \quad (3)$$

$$= F(R_2 - R_1) \tan\psi / G$$

该体积膨胀量对应的自由膨胀半径为:

$$R_3 = \sqrt{F(R_2 - R_1) \tan\psi / \pi G + R_2^2} \quad (4)$$

根据水泥土环外侧位移为 s , 推导出水泥土环实际的体积膨胀量为:

$$V = \pi[(R_2 + s)^2 - R_2^2] = \pi(s^2 + 2sR_2) \quad (5)$$

同样根据水泥土环外侧位移为 s , 水泥土环外边界土压力表示为:

$$\sigma = ks \quad (6)$$

根据平面应变假设, 水泥环轴向应变为 0。假设水泥土环从自由膨胀半径 R_3 压缩到实际膨胀半径 $R_2 + s$ 。该过程中, 根据图 3, 假设径向应变分布均匀, 水泥土表面的三向应变可表示为式 (7) 中形式。

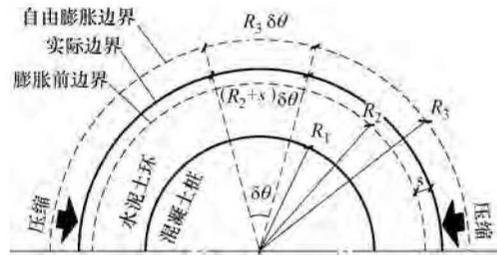


图 3 水泥土剪胀变化示意图

Fig. 3 Dilatancy of cement-soil column

$$\begin{cases} \epsilon_z = 0 \\ \epsilon_r = (R_3 - R_2 - s) / (R_3 - R_1) \\ \epsilon_c = (R_3 - R_2 - s) / R_3 \end{cases} \quad (7)$$

其中, ϵ_z 、 ϵ_r 、 ϵ_c 分别表示土体沿竖向、径向和切向的正应变。

在上述应变状态下, 根据各向同性胡克定律推导表面径向应力:

$$\sigma = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu)\epsilon_r + \nu\epsilon_c] \quad (8)$$

联立式 (6)~式 (8) 解得:

$$s = \frac{R_3 - R_2}{k \frac{(1-2\nu)(1+\nu)R_3(R_3 - R_1)}{E(R_3 - R_1\nu)} + 1} \quad (9)$$

代入式 (6) 即可得到剪胀效应对水泥土环与土体界面正应力的影响:

$$\sigma = \frac{k(R_3 - R_2)}{k \frac{(1-2\nu)(1+\nu)R_3(R_3 - R_1)}{E(R_3 - R_1\nu)} + 1} \quad (10)$$

4 参数选取和计算分析

根据宋新江对水泥掺入比 12% 的水泥土的三轴剪切试验成果^[5], 等 p 剪切试验下水泥土试样体积应变和轴向应变关系 (以膨胀方向为正方向) 如图 4 所示。

地基土重度 $16\sim 18\text{kN/m}^3$ 较为常见, 结合图 4 可知, 20m 深度对应围压下水泥土仍具有较明显的剪胀性。取图中围压为 300kPa 和 400kPa 对应的曲线剪胀段作为水土剪胀性能参考, 根据三轴试验剪胀角的定义:

$$\tan\alpha = 2\sin\psi / (1 - \sin\psi) \quad (11)$$

其中, $\tan\alpha$ 为剪胀过程中, 体积应变和轴向应变的比值。

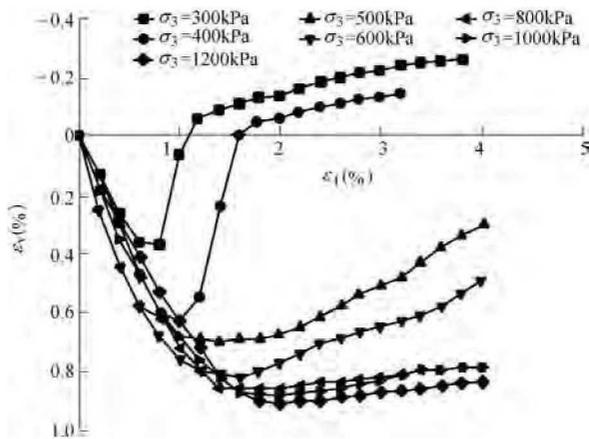


图 4 水土轴向应变-体变关系曲线 (宋新江, 2011)
Fig. 4 Relationship between axial and volume strain of cement-soil

根据式 (11) 计算图 4 中水土试样剪胀角约为 24° 。作为本模型中水土剪胀角的参考值。

根据上述理论解, 设定对照组工况其他参数如表 1 所示。其中水土材料弹性模量设置为 120MPa; 泊松比为 0.28^[6]; 混凝土芯桩桩径 0.5m, 水土环外径 0.9m^[1]。

对照组算例参数 表 1
Parameters of control example Table 1

参数	含义	单位	数值
E	水土弹性模量	kPa	120000
ν	水土泊松比		0.28
ψ	水土剪胀角	$^\circ$	24
μ	水土-土界面摩擦系数		0.4
R_1	混凝土桩半径	m	0.25
R_2	水土环外径	m	0.45
F	水土环侧阻力	kN/m	200
k	水土-土界面约束刚度	kN/m ³	150000

在上述工况下, 根据式 (10) 解得因剪胀性引起的水土-土界面正压力增量 σ 为 17.27kPa, 其可使桩轴线上每延米桩土界面侧摩阻力提高 19.53kN/m, 约占原侧摩阻力的 9.8%。

水土弹性模量发生改变时, 与土体界面正压力增量变化规律如图 5 所示。由图 5 可看出, 剪胀性对水泥

土-土体界面压力的增大效果随水土刚度的增大而减弱。二者关系呈近似双曲线的反比关系, 这主要是因为水土环的刚度增大直接导致了其剪应变的减小, 并进而阻碍了体积膨胀效果的发挥。

然而, 考虑到水土变形刚度和强度一般存在正相关性, 片面追求刚度降低将导致剪力相对较大的内圈水土率先发生剪坏, 反而使剪力无法向桩周土传递。故应根据土的侧摩阻力, 首先确保水土和芯桩之间不发生剪坏, 这可根据水土桩和芯桩桩径比, 考虑一定的安全系数算出; 一般水土强度大于对应原状土强度 8 倍时, 可保证不在水土环与混凝土芯桩间发生破坏, 而是在水土环与土之间发生破坏。

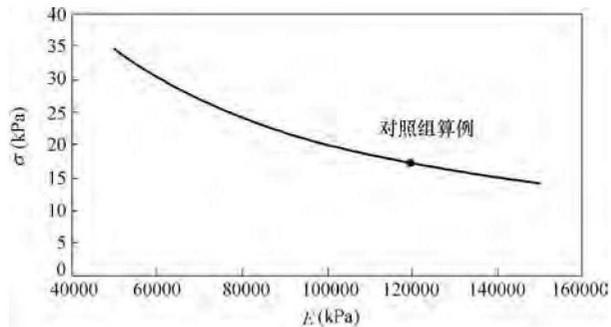


图 5 水土刚度对水土-土体界面压力的影响
Fig. 5 Effect of E on σ

水土环外圈范围发生改变时, 与土体界面正压力增量变化规律如图 6 所示。水土环外圈界面正压力起初随水土环厚度增大而增大, 且增长幅度逐渐减小并在曲线后段逐渐变为负增长。这一方面是由于越远离桩心, 水土剪力衰减越显著, 剪胀效果越不明显, 因此扩大水土桩外径对体积膨胀量的增大效果会越来越小; 另一方面, 扩大水土桩外径会减小在相同体积膨胀量下的外侧膨胀位移, 进而减小对周边地基土的挤压作用。根据图 6 中曲线, 水土环径与混凝土芯桩桩径比在 2 以内时, 对界面压力的影响较为明显。

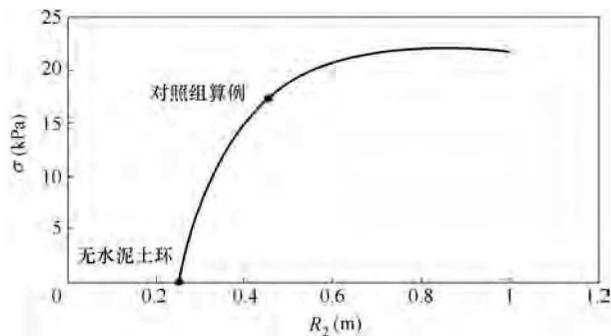


图 6 水土环径对水土-土体界面压力的影响
Fig. 6 Effect of R_2 on σ

此处应注意到, 水土环外径在一定范围内的增大不仅加大了与地基土的界面压力, 也增大了界面总面积, 进而对承载力有着双重提升效果。外径增大对每延米界面竖向承载力的提高量如图 7 所示。由图 7 可见, 综合考虑上述两种增益作用后, 界面竖向承载力提高量与外径

R_2 呈近似的线性正相关关系, 斜率随 R_2 增大略有减小。

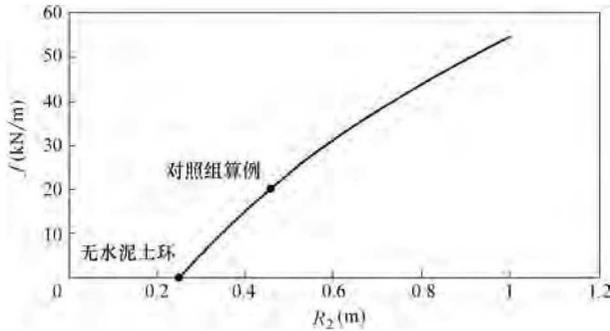


图7 水泥土环径对每延米水泥土-土体界面抗剪承载力的影响
Fig. 7 Effect of R_2 on f

对比图6和图7归纳出: 线性段的前半段, 水泥土环和地基土界面面积虽大但剪胀性尚未发挥, 承载力提高量受剪胀效应影响; 后半段, 虽剪胀效应引起的界面压力增量趋于稳定, 但地基土界面面积不断增大, 承载力提高量主要受界面面积变化的影响。可见, 图7虽总体表现为近似的线性特征, 但其增长过程隐含了剪胀性和界面面积这两种增益因素主次地位的变化。

当水泥土环外径不变, 混凝土桩桩径扩大时, 土体界面正应力变化规律如图8所示。计算结果显示, 水泥土环外边缘界面压力随混凝土芯桩直径增大而单调减小, 且二者大致呈线性关系。这说明, 在相同外径的情况下, 混凝土芯桩占比越大, 越不利于水泥土环剪胀性的发挥以及外侧界面压力的增长。这可以解释试验^[1]中900mm直径的混凝土桩承载力为什么低于相同直径复合桩。

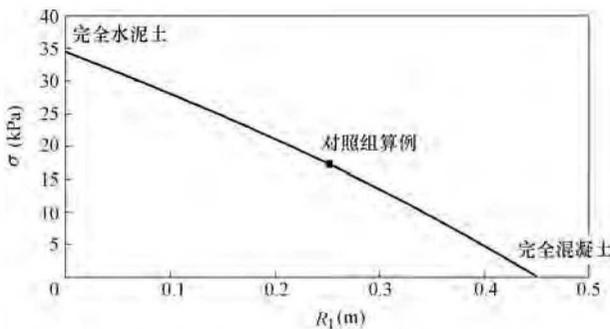


图8 混凝土芯桩桩径对水泥土-土体界面压力的影响
Fig. 8 Effect of R_1 on σ

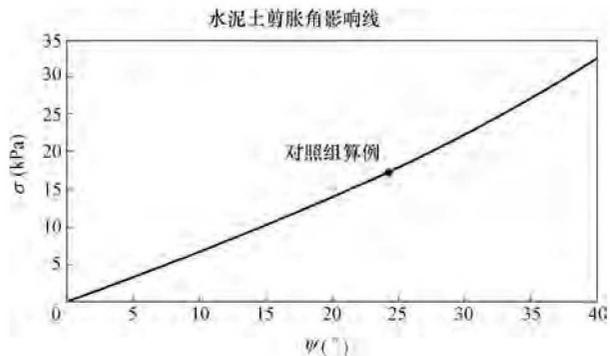


图9 水泥土剪胀角对水泥土-土体界面压力的影响
Fig. 9 Effect of ψ on σ

水泥土剪胀角发生改变时, 土体界面正压力增量变化规律如图9所示。在计算参数范围内, 水泥土环外边界正压力与剪胀角近似呈正比例、正相关关系, 曲线斜率随剪胀角增大而略有增大。

5 结论

(1) 水泥土的剪胀作用可使水泥土环与混凝土芯桩、环外土之间的界面压力提高, 利于桩侧摩阻力的发挥, 由于剪胀作用, 水泥土环与外围土间侧摩阻力可提高10%左右;

(2) 水泥土强度只要保证复合桩的破坏面不发生在水泥土环和芯桩之间, 而是发生在水泥土环和土之间即可, 过高的强度不利于其剪胀性能的发挥, 且造成浪费;

(3) 在混凝土桩桩径不变的条件下, 水泥土环外径在一定限度内的扩大有利于界面压力的提高, 但扩大到芯桩直径约2倍时, 对水泥土环和土的界面压力的影响将不再显著甚至发生负增长, 即水泥土环径和芯桩桩径比为2是理想的设计参数;

(4) 在相同水泥土环径下, 提高混凝土芯桩所占截面比例, 使水泥土环体积减小, 不利于剪胀性能发挥和桩侧摩阻力的提高, 且增加造价;

(5) 水泥土环剪胀性产生的外边界压力升高值近似与土体剪胀角呈正比;

(6) 模型计算结果显示, 水泥土剪胀性仅能使桩侧阻力提高约10%, 远不及模型试验^[1]中的承载力提高量, 说明侧摩阻力的提高, 还受桩土界面几何不规则性、水泥土施工时对周围土的挤压、水泥浆的外渗等因素影响, 如果将上述影响与剪胀性共同考虑, 将是下一步需要关注的研究方向之一。

参考文献:

- [1] 刘金砺, 刘金波. 水下干作业复合灌注桩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 536-539.
- [2] 刘金波. 干作业复合灌注桩的试验研究及理论分析[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2000.
- [3] 邓亚光, 郑刚, 陈昌富, 等. 劲性复合桩技术综述[J]. 施工技术, 2018, 47(S4): 262-264.
- [4] 岳建伟, 凌光容. 软土地基中组合桩水平受荷作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(6): 1284-1289.
- [5] 宋新江. 轴对称条件下水泥土强度特性试验研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 1-6.
- [6] 许胜才, 张信贵, 马福荣, 等. 水泥土桩加固边坡变形破坏特性及模型试验分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 187-196.