

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.04.007

软土地基处理过程中搅拌桩下沉的机理和判别方法

黄 铭¹,徐永福^{2,3},黄 刚¹,褚飞飞³

(1. 泰州市公路管理处,江苏 泰州 225310; 2. 上海交通大学土木工程系,上海 200030;
3. 河海大学文天学院,安徽 马鞍山 243000)

摘要: 针对江苏某高速公路软土地基处理过程中的水泥搅拌桩下沉现象,通过现场测量桩周土中的超静孔隙水压力、土压力和剪切强度等,分析搅拌桩下沉机理,提出搅拌桩下沉的判别方法。超静孔隙水压力和土压力的现场测试结果表明,在搅拌桩下沉处,桩周土中的超静孔隙水压力大于土压力,桩周土出现了类似于液化的现象,可以以此作为搅拌桩下沉的判别方法。

关键词: 高速公路地基;软土地基处理;搅拌桩下沉;机理分析;桩下沉判别方法;超静孔隙水压力;土压力

中图分类号: TU47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)04-0325-05

Mechanisms and identification methods of sinking of mixing piles during process of soft soil foundation treatment

HUANG Ming¹, XU Yongfu^{2,3}, HUANG Gang¹, CHU Feifei³

(1. Road Administration Bureau of Taizhou City, Taizhou 225310, China;
2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
3. Wentian College, Hohai University, Ma'anshan 243000, China)

Abstract: Sinking of cement mixing piles has occurred in the treatment process of the soft soil foundation of an expressway in Jiangsu Province. Based on field data of the excess pore water pressure, earth pressure, and shear strength of the soil around piles, the mechanisms of the sinking of the mixing piles were analyzed, and methods for identifying the sinking are proposed. The field survey results show that the excess pore water pressure was larger than the earth pressure, and a phenomenon similar to liquefaction occurred in the soil around the piles when sinking occurred. This can be used as the identification criterion of the sinking of mixing piles.

Key words: expressway foundation; soft soil foundation treatment; sinking of mixing pile; mechanism analysis; identification methods of sinking of pile; excess pore water pressure; earth pressure

深层水泥搅拌桩因具有很高的性价比,经常被用于处理高速公路软土地基^[1-2]。但在高速公路软土地基处理过程中,水泥搅拌桩下沉现象时有发生^[3-4]。水泥粉体搅拌桩下沉现象最早出现在北京至上海高速公路宝应段,地基土质主要为淤泥和淤泥质软土,含水率高达80.4%,孔隙比达2.20,搅拌桩下沉现象表现为0.5~1.5m的含水空洞,空洞直径与桩径一致^[3]。粉喷桩的下沉发生在喷灰后复搅的过程中,复搅完后提钻时伴有大量地下水涌至地表。徐永福^[3]指出可以通过选择合理的施工工艺和施工参数防止粉喷桩下沉。具体措施为减小钻头叶片倾角、缩小螺距不同螺距、调整粉体含量及加固料配方、改进施工工艺和调整施工次序等。骆石平^[4]针对位于里下河古泻湖淤积平原区的某高速公路软基处理粉喷桩下沉现象,从地质资料不全、设计和施工工艺、施工机械设备局限和桩头成桩质量

收稿日期:2015-06-29

基金项目:江苏省交通厅科研项目(2012Y03-2);国家自然科学基金(41272318,41472251)

作者简介:黄铭(1967—),男,江苏泰兴人,高级工程师,主要从事道路建设管理研究。E-mail:huangming@hotmail.com

通信作者:徐永福,教授。E-mail:yongfuxu@sjtu.edu.cn

等方面分析了沉桩原因,提出解决措施。徐永福等^[5]针对某高速公路软基处理中出现的水泥湿喷桩下沉现象,通过测量孔隙水压力和土压力,比较水泥湿喷桩施工过程中桩周土中的土压力与超静孔隙水压力的大小,将水泥湿喷桩下沉的原因归结为饱和粉土的触变,并根据现场静力触探试验和室内土力学试验结果,分析湿喷桩施工扰动下饱和粉土的触变性。黄杨华^[6]、吴伟忠^[7]和鲍立敏^[8]报道了某高等级公路水泥粉体搅拌桩下沉的现象,该软土土质为淤泥、淤泥质黏土,在59根粉体搅拌桩中有21根出现了下沉现象,下沉深度为1.1~4.5 m不等。黄杨华^[6]和鲍立敏^[8]分析了粉体搅拌桩下沉的原因:(a)淤泥含水量高达90%以上,每延米掺加50 kg水泥粉,不足以吸干桩体范围内软土中的水分;(b)搅拌桩施工引起桩间土体扰动破坏,土体下沉,在搅拌桩侧产生侧摩阻力;(c)水泥粉掺入桩体,使桩体质量增加。吴伟忠^[7]提出了防止粉体搅拌桩下沉的措施:(a)改粉喷为浆喷;(b)改喷四搅法为四喷四搅法,全长复搅;(c)添加早强剂,早强剂的含量为水泥用量的0.8%;(d)提高水泥掺量,由50 kg/m提高至55~75 kg/m;(e)局部含腐木的软土地段在桩心插入1根与桩等长的 $\Phi 16$ 螺纹钢,增强搅拌桩的抗拉和抗压刚度;(f)减小搅拌桩间距,由1.4 m减至1.0 m;(g)调整桩机的施工技术参数,减少钻机下钻和提升速度,控制喷浆压力和喷浆速度,桩底持续喷浆搅拌时间大于30 s,充分保证搅拌的均匀性。徐永福^[3]和丁力^[9]给出搅拌桩下沉的补救措施:重新制桩、接桩和回填灰土并夯实等。

当前对搅拌桩下沉机理和原因的解釋都是在土力学的合理假设基础上提出的,缺乏真实数据支撑^[5]。搅拌桩施工过程中出现下沉现象的公认原因是搅拌桩施工扰动,引起土体强度降低,甚至丧失,造成搅拌桩下沉^[3,5]。已有关于搅拌桩施工扰动影响的研究成果很多,邓永锋等^[10]围绕水泥土搅拌桩施工性状,采用圆孔扩张理论分析了施工过程中桩周土的受力情况,采用Sekiguchi和Ohta(关口-太田)模型计算了桩周土体积应变,根据Hong和Onitsuka扰动度定义分析了搅拌桩施工桩周土的扰动度变化。王道华^[11]基于某软土路基水泥土搅拌桩加固工程,现场测量了施工过程中周围土体中孔隙水压力和土体位移变化情况,分析水泥土搅拌桩施工对周围土体的扰动影响。蒋波等^[12]针对某软土路基加固工程中搅拌桩下沉现象,现场监测搅拌桩施工过程中桩周土体中的土压力和超静孔隙水压力的变化情况,得到土压力和孔隙水压力随搅拌桩距离和钻入深度的变化关系,明确了搅拌桩施工时大面积连续作业的扰动累积效应。本文描述某高速公路软土地基处理施工中的水泥浆体搅拌桩(湿喷桩)下沉现象,现场测量湿喷桩施工过程中的超静孔隙水压力和土压力,分析湿喷桩的下沉机理,提出湿喷桩下沉的判别方法。

1 水泥浆体搅拌桩下沉现象

江苏某大型公路大桥北接线高速公路A02标(桩号:K8+700~K12+795)位于长江三角洲冲积平原,沿线土质主要为第四系冲积成因的淤泥、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉细砂等组成。地层自上而下分层为1-1粉土、1-1a粉土、1-1粉土、1-3粉细砂、1-1粉土。全新统(Q4)分为2层(1-2层),总体上以松散粉细砂为主,局部夹软塑至流塑状粉质黏性土。水泥浆体搅拌桩(湿喷桩)施工过程中或施工完成后数小时内,湿喷桩出现零星下沉或多根连片下沉现象。湿喷桩下沉现象如图1所示,搅拌桩施工总数近200根,出现24根搅拌桩下沉现象,采用钢卷尺从搅拌桩下沉孔的孔口测量下沉深度。湿喷桩下沉情况统计于表1中。

湿喷桩下沉后主要表现为:(a)打桩机钻进及提升时在软土深度范围内有突然加速现象,在软土深度范围外打桩机钻进及提升速度又趋于正常。(b)湿喷桩在施工完成后立即出现下沉,桩顶的下沉量最大达到100 cm,在桩周伴有大量细砂翻涌出来。(c)湿喷桩施工完成静置1昼夜后,部分搅拌桩出现下沉,桩顶沉降量在30~70 cm范围,桩顶出现大量细砂。(d)未明显下沉的湿喷桩桩头开裂2~5 cm,沿深度方向呈贯穿裂缝。(e)在湿喷桩钻芯检测时,在邻近2 m范围内的另一根搅拌桩桩顶冒泥浆,泥浆柱最高达20 cm。



(a) 示例1

(b) 示例2

图1 湿喷桩下沉现象

Fig. 1 Sinking phenomenon of wet jetting piles

表 1 湿喷桩下沉情况统计
Table 1 Statistics of sinking of wet jetting piles

检测时间	位置	起讫桩号	桩长/m	下沉桩数/根	下沉现象描述
8 月 15—16 日	D 匝道	DK0+227.5~DK0+252.5	14.1	2	下沉量分别为 25 cm 和 37 cm
8 月 28—30 日	D 匝道	DK0+227.5~DK0+252.5	14.1	1	下沉量为 30 cm
9 月 27—30 日	北接线主线	K12+770~K12+800	14.1	5	下沉量分别为 30 cm、30 cm、25 cm、30 cm 和 50 cm
		K12+800~K12+840	14.1	5	下沉量分别为 40 cm、40 cm、40 cm、50 cm 和 45 cm
10 月 5—10 日	北接线主线	K12+770~K12+800	14.1	2	下沉量分别为 40 cm 和 30 cm
		K12+800~K12+840	14.1	2	下沉量分别为 30 cm 和 20 cm

注:检测时间为 2009 年。

2 现场测试

2.1 测点位置和布置

搅拌桩设计直径为 50 cm,间距为 1.2 m,长度为 14.1 m。现场监测内容主要是孔隙水压力和土压力,孔隙水压力计和土压力计埋设在搅拌桩桩间土中,埋设深度分别为 3 m 和 6 m。孔隙水压力计和土压力计均通过钻孔埋设,孔隙水压力计和土压力计埋设断面如图 2 所示。为了保证孔隙水压力测量精度,每个钻孔中只埋设 1 个孔隙水压力计,钻孔深度超过孔隙水压力传感器埋设深度 30 cm,用黏土泥丸填实 20 cm,再填 10 cm 的干净细砂,将孔隙水压力计放入钻孔中,填充干净细砂,将孔隙水压力计全部埋入细砂中,在细砂上部再回填黏土泥丸,填满密封钻孔。土压力计捆绑在 PVC 管上,PVC 管内填满混凝土,增加 PVC 管的刚度,减小土压力计的水平位移。

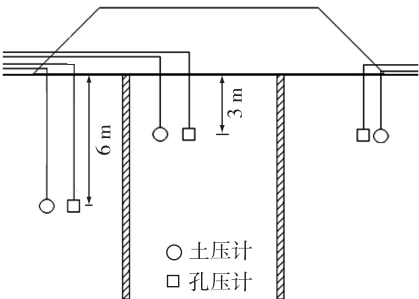


图 2 传感器埋设位置示意图

Fig. 2 Sketch of positions of buried sensors

2.2 测试结果分析

分析搅拌桩施工过程中的超静孔隙水压力和土压力测试结果时,选取搅拌桩出现下沉和没有下沉 2 个路段的测量数据,分别进行对比分析。

图 3 是搅拌桩施工过程中超静孔隙水压力和土压力随时间变化曲线。超静孔隙水压力随时间的发展规律与土压力类似。超静孔隙水压力和土压力随距离增加而减小,超静孔隙水压力和土压力都有明显的累积效应,即前一根搅拌桩引起的超静孔隙水压力未消散的部分,累积到后一根搅拌桩施工时引起的超静孔隙水压力和土压力上。因此,搅拌桩由远及近施工中,超静孔隙水压力和土压力越来越大的原因除了距离近引起的超静孔隙水压力和土压力外,还有超静孔隙水压力和土压力的累积效应。通常情况下,搅拌桩施工引起的土压力大于超静孔隙水压力,但在搅拌桩出现下沉的地方,搅拌桩施工产生的孔隙水压力大于土压力。当土体中的超静孔隙水压力大于土压力时,土体中产生了类似“液化”破坏,土体产生触变破坏^[5]。土体产生触变破坏后,土体的强度丧失,导致搅拌桩下沉。

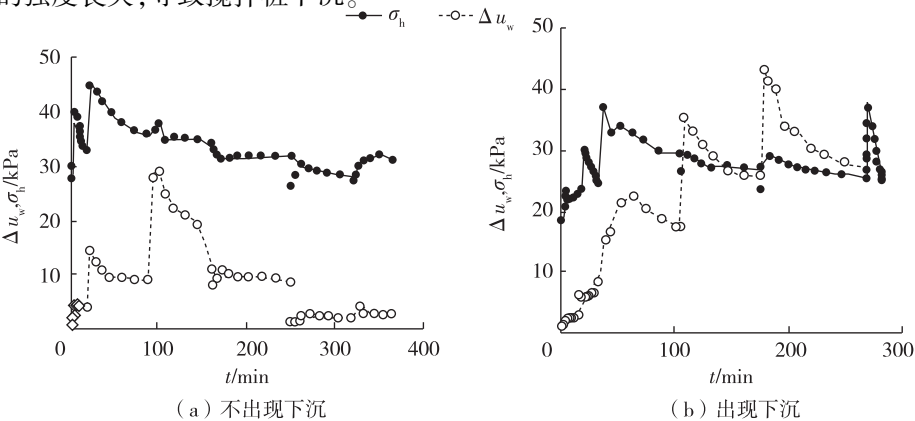


图 3 搅拌桩施工引起的超静孔隙水压力 Δu_w 和土压力 σ_h 发展规律

Fig. 3 Development rules of excess pore water pressure Δu_w and earth pressure σ_h caused by construction of mixing piles

根据图3中超静孔隙水压力和土压力随时间的变化特性,得到以下规律:(a)水泥浆体搅拌桩连续施工引起超静孔隙水压力和土压力累积增加,当距离超过超静孔隙水压力和土压力的影响范围后,超静孔隙水压力和土压力不会再增加,而发生快速消散。(b)搅拌桩由远及近施工引起的超静孔隙水压力和土压力的最大值和影响范围比由近及远施工引起的超静孔隙水压力和土压力最大值和影响范围大,且累积效应更加明显。(c)超静孔隙水压力和土压力地影响范围随深度增加而增加,埋深3 m处的超静孔隙水压力的影响范围在2.5 m左右,埋深6 m处超静孔隙水压力影响范围在3.0~3.6 m。

3 搅拌桩下沉判别

3.1 搅拌桩下沉机理

将搅拌桩出现下沉区域测得的超静孔隙水压力与土压力进行比较,如图4所示。在搅拌桩出现下沉区域的超静孔隙水压力全部大于土压力,如图4中的 $y=x$ 直线的上方所示;在搅拌桩没有出现下沉区域的超静孔隙水压力基本小于土压力,如图4中的 $y=x$ 直线的下方所示。因此,在搅拌桩出现下沉的区域,超静孔隙水压力大于土压力,土体产生触变破坏。

在搅拌桩出现下沉的区域,在距离搅拌桩不同距离的地方取样,测量土体的含水量 w ,所得结果见图5(w_0 为土体初始含水量, r 为搅拌桩半径, l 为离桩芯距离,虚线示意 $w/w_0=1$)。图5(b)中不同的符号表示搅拌桩四周不同的测点。搅拌桩施工后1 d,大多数测点 $w>w_0$,搅拌桩施工引起含水量富集;施工28 d后,由于超静孔隙水压力消散和水泥水化作用,桩周土中含水量减小,远离搅拌桩处 w 接近 w_0 。搅拌桩施工引起桩周土体内含水量增加,是土体产生类似“液化”的触变破坏的又一个佐证。

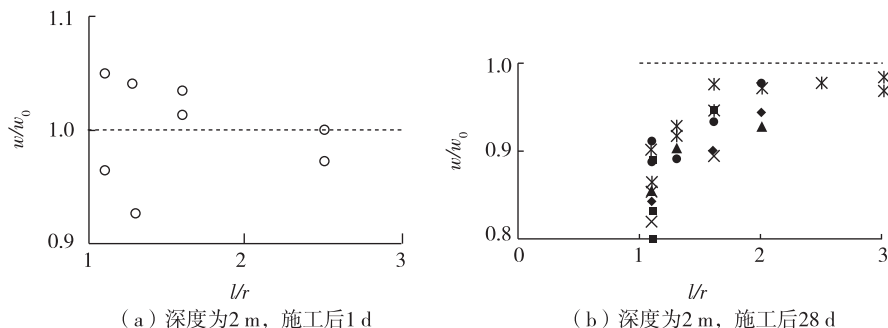


图5 含水量的分布特性

Fig. 5 Distribution characteristics of water content

搅拌桩施工后,采用十字板测量桩周土体的剪切强度,结果如图6所示(虚线示意 $c_u/c_{u0}=1$)。搅拌桩施工后1 d,桩周土体的不排水强度 c_u 只有初始强度 c_{u0} 的70%左右,搅拌桩施工引起桩周土体的不排水强度大幅度减小,导致搅拌桩下沉。因此,搅拌桩施工在桩周土体产生超静孔隙水压力,引起桩周土体剪切强度降低,是搅拌桩下沉的机理。

3.2 搅拌桩下沉判别方法

在搅拌桩下沉区域内,土体的超静孔隙水压力大于土压力。因此,搅拌桩下沉的判据表示为

$$\sigma_h - \Delta u_w \leq 0 \quad (1)$$

由于土体处于类似“液化”的破坏状态,土体中3个

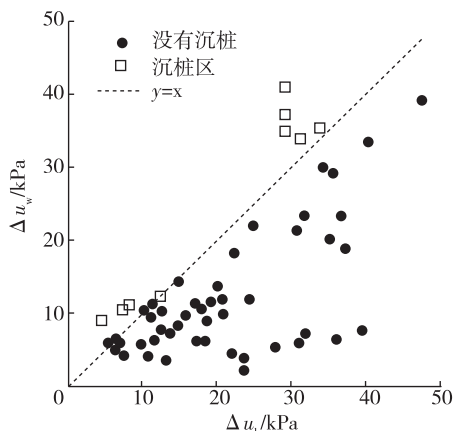


图4 超静孔隙水压力与土压力的关系

Fig. 4 Relationship between excess pore water pressure and earth pressure

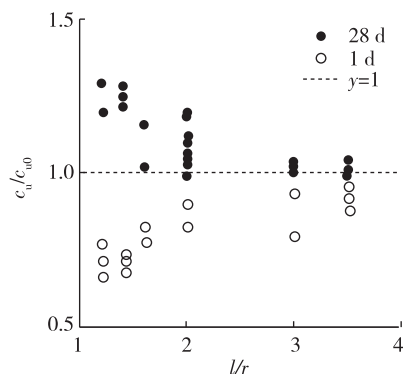


图6 深度2~6 m处桩周土体的不排水强度

Fig. 6 Undrained strength of soil around piles at depth ranging from 2 to 6 m

方向的土压力相等。搅拌桩下沉的判据(式(1))与砂土液化的判据类似。

根据搅拌桩下沉的判据(式(1)),分析某干线公路软路基搅拌桩施工过程中的超静孔隙水压力和土压力,土压力与超静孔隙水压力之差随着离搅拌桩距离的变化如图7所示(x 为离搅拌桩边的距离)。从图7可以看出,土压力与超静孔隙水压力之差基本都是正数,即搅拌桩施工过程中土体的超静孔隙水压力小于土压力,土体没有出现触变破坏现象,搅拌桩不会出现下沉现象。事实上,搅拌桩在现场施工过程中没有出现下沉现象。

4 结 论

a. 水泥浆体搅拌桩连续施工引起超静孔隙水压力和土压力累积增加,搅拌桩由远及近施工引起的超静孔隙水压力、土压力及其影响范围比由近及远施工引起的超静孔隙水压力、土压力及其影响范围大,且累积效应更加明显;超静孔隙水压力和土压力地影响范围随深度增加而增加。

b. 搅拌桩施工在桩周土体产生超静孔隙水压力,引起桩周土体剪切强度降低,是搅拌桩下沉的机理。搅拌桩施工引起的超静孔隙水压力大于土压力,土体出现触变破坏现象,导致搅拌桩下沉。

c. 根据搅拌桩施工引起的超静孔隙水压力与土压力的大小关系判别搅拌桩是否下沉,搅拌桩施工引起的超静孔隙水压力大于土压力是搅拌桩下沉的判别依据。

参考文献:

- [1] 龚晓南.高等级公路地基处理设计指南[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 刘松玉,钱国超,章定文.粉喷桩复合地基理论与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [3] 徐永福.粉体搅拌桩下沉原因分析及其对策[J].建筑技术,2000,31(3):171-172.(XU Yongfu. Settlement cause analysis of cement mixing pile and the solution thereof[J]. Architecture Technology, 2000,31(3):171-172. (in Chinese))
- [4] 骆石平.水泥粉体喷射搅拌桩施工中桩头空洞的处理[J].中外公路,2001,21(5):24-27.(LUO Shiping. The treatment of pile-head empty during cement dusting deep mixed-pile construction[J]. Chinese and Foreign Highway,2001,21(5):24-27. (in Chinese))
- [5] 徐永福,王驰,黄铭,等.湿喷桩施工中饱和粉土的触变性研究[J].岩土工程学报,2013,35(10):1784-1789.(XU Yongfu, WANG Chi, HUANG Ming, et al. Thixotropy of saturated silty soils due to construction of DCM columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(10):1784-1789. (in Chinese))
- [6] 黄杨华.水泥喷粉搅拌桩桩头下沉问题分析与处理[J].桥梁机械与施工技术,2005(1):42-44.(HUANG Yanghua. Analysis and treatment of sinking pile-head of cement dusting deep mixed-pile [J]. Bridge Machinery & Construction Technology, 2005(1):42-44. (in Chinese))
- [7] 吴伟忠.粉体搅拌桩即时沉桩原因分析及其处理[J].山西建筑,2006,32(13):84-85.(WU Weizhong. The discussion of the reason and management of instantaneous pile sinking of powder mix pile[J]. Shangxi Architecture, 2006, 32(13):84-85. (in Chinese))
- [8] 鲍立敏.浅析水泥深层搅拌桩沉桩问题及其处理[J].今日科苑,2009(6):137-138.(BAO Limin. Analysis of cement deep mixing piles sinking problem and treatment[J]. Modern Science,2009(6):137-138. (in Chinese))
- [9] 丁力.粉喷桩的沉桩分析与处理[J].内江科技,2006(4):142-143.(DING Li. Analysis and treatment of cement mixing pile sinking[J]. Neijiang Technology, 2006(4):142-143. (in Chinese))
- [10] 邓永锋,刘松玉,洪振舜.水泥土搅拌桩施工扰动评价的一种方法[J].岩土力学,2009,30(3):717-720.(DENG Yongfeng, LIU Songyu, HONG Zhenshun. Disturbance degree of surrounding soil induced by deep mixing column installation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3):717-720.(in Chinese))
- [11] 王道华.软土地基水泥土搅拌桩施工扰动情况现场测试及分析[J].河南科学,2014,32(8):1520-1523.(WANG Daohua. Field testing and analysis of disturbance during the construction of cement-soil mixing piles in soft foundation[J]. Henan Science,2014,32(8):1520-1523. (in Chinese))
- [12] 蒋波,黄铭.泰州地区软路基搅拌桩施工监测研究[J].低温建筑技术,2014,36(10):122-124.(JIANG Bo, HUANG Ming. Study on monitoring construction cement mixing piles in Taizhou soft soil foundation[J]. Low Temperature Construction Technology, 2014, 36(10):122-124. (in Chinese))

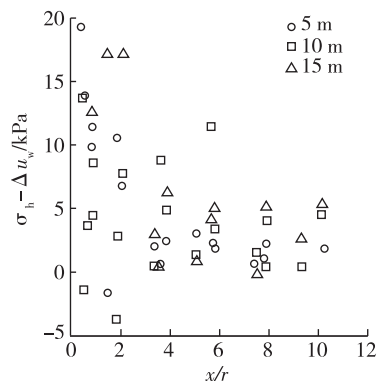


图7 桩周土体应力差的分布

Fig. 7 Distribution of stress difference of soil around piles