

文章编号: 1000-7598 (2010) 增刊 1-0102-06

CFG 桩施工引起孔隙水压力变化特性试验研究

赵秀绍¹, 莫林利², 孙瑞民³, 杨凤灵³

(1. 华东交通大学 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 南昌 330013;

2. 华东交通大学 软件学院, 南昌 330013; 3. 华北水利水电学院, 郑州 450011)

摘 要: 孔隙水压力变化规律是饱和粉土体宏观变形细观结构研究的基础。以阳光新城工程为例, 采用现场试验方法对长螺旋 CFG 桩施工时的孔隙水压力(简称孔压)变化进行了监测, 并根据监测结果对施工过程的孔隙水压力(简称孔压)变化进行了阶段划分。研究结果, 长螺旋 CFG 桩施工过程中孔压变化规律与常规的剪切液化观点相悖, 抽吸与窜孔对孔隙水压力变化影响显著, 并解释了产生这种现象的原因。孔压极大值和极小值在一定范围内产生累加效应, 表现为非对称性, 而变化的幅度值呈近似对称性。根据幅度值大小确定了长螺旋 CFG 桩施工时的影响范围, 其值与小孔扩张理论比较吻合。

关 键 词: 长螺旋 CFG 桩; 饱和粉土; 孔隙水压力; 孔压阶段划分; 窜孔

中图分类号: TU 413.7

文献标识码: A

Experimental study of pore water pressure variation properties during CFG pile construction

ZHAO Xiu-shao¹, MO Lin-li², SUN Rui-min³, YANG Feng-ling³

(1. Engineering Research Center of Railway Environmental Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University,

Nanchang 330013, China; 2. School of Software School, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Variation of pore water pressure is the microstructure foundation of saturated clay's macro-deformation. Taking the Yangguang Xincheng project for example, pore water pressure was monitoring during the construction of long spiral CFG pile on site; and then summarized the variation of pore water pressure. According to the law of pore water pressure changes, CFG pile construction is divided to several stages. The results show that the variation of pore water pressure conflicts with conventional point of shear liquefaction; pump and fleeing bore influence pore water pressure obviously; and then the reasons for this phenomenon are given. The maximum and minimum values of pore water pressures have has accumulation effect, which performances non-symmetry along a pile construction, but amplitude of pore pressure change assumes approximate symmetry. Based on the amplitude of pore water pressure, the sphere of CFG pile construction influence is determined; and its value is relatively consistent with the cavity expansion theory's result.

Key words: long spiral CFG pile; saturated clay; pore water pressure; pressure stage division; fleeing bore

1 引 言

饱和粉土是一种散粒体介质, 应力状态的变化会导致细观结构变化, 表现为粉土体宏观变形。在这一变形的发展过程中, 若粉土体内部或渗流边界的排水受阻, 孔隙水压力与土骨架应力之间的相互演化, 并随荷载条件、起始条件、边界条件等内外因素的不同表现出迥异的力学行为, 因此, 孔隙水压力是多孔多相松散介质的一个主要应力特征, 土

介质力学特性的研究应以孔隙水压力物理力学效应的真实揭示为基础^[1]。静压或锤击预制桩和管桩(包括开口和闭口)引起的桩周土超静孔压的积累、消散以及分布规律等已经有了大量试验成果^[2-5]。随着试验数据的不断积累, 理论研究成果也得到了不断的验证及修正, 如超静孔压消散与桩承载力的增长之间定量关系、桩周土强度增长规律等等。

长螺旋 CFG 桩在黄淮海泛滥平原上施工时, 常引起周围建筑物开裂等环境岩土工程问题, 但长

收稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家自然科学基金“非饱和土路基水分迁移规律及其对道路变形的影响”(No. 50908086); 江西省教育厅青年基金项目“长螺旋 CFG 桩成桩过程引起环境岩土问题研究”(No. GJJ09503); 华东交通大学博士科研启动金资助项目(No. 01306022)。

第一作者简介: 赵秀绍, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 从事岩土工程、道路与铁道工程方面研究。E-mail: zhaoxiushao@163.com

螺旋管内泵压 CFG 桩施工法在饱和粉土中所引起的超孔隙水压力国内研究较少^[6],长螺旋 CFG 桩施工引起的孔隙水压力如何变化,与窜孔等工程事故有何联系,孔压影响范围有多大,都值得进一步研究。

2 孔隙水压力现场试验

为了解长螺旋 CFG 桩施工对钻孔周围的影响进行了现场孔压试验,试验场地选在郑州市东北部中州大道与鑫苑路交叉口西北角阳光新城建筑基坑中,地基处理采用 CFG 复合地基,设计有效桩长 11.7 m,桩径为 400 mm,桩距为 1.3 m,矩形布置,其中基坑深度为 3.5 m。根据距埋设孔隙水压力计最近的 39 号钻孔资料,埋设孔压计的工程地质资料:第①层:杂填土(Q_4^{ml}),杂色,松散,层底埋深 0~2.9 m,层厚 2.9 m。第②层:粉土夹粉质黏土(Q_4^{al}),灰褐色,稍密,饱和,无光泽,摇振反应迅速,干强度低,韧性低。局部夹薄层粉质黏土,局部缺失。层底埋深 2.9~4.4 m,层厚 1.5 m。第③层:粉土(Q_4^{al}),黄褐色,稍密,湿-饱和,土质均匀,摇振反应中等—迅速,无光泽,干强度低,韧性低,该层普遍分布。层底埋深 4.4~7.80 m,层厚 3.4 m。第④层:粉土夹粉质黏土(Q_4^{al}),黄褐色,稍密,饱和,无光泽,摇振反应迅速,干强度低,韧性低,该层普遍分布。局部夹薄层粉质黏土。层底埋深 7.80~11.10 m,层厚 3.3 m。第⑤层粉质黏土(Q_4^{al}),灰褐色,湿,可塑,切面稍有光滑,干强度中等,韧性中等。层底埋深 11.00~15.50 m,层厚 4.5 m。

试验选用了丹东市北方传感器厂生产的 GSY—58 型孔隙水压力计及与其配套使用的 PZX—1 型振弦频率检测仪。考虑除去基坑深 3.5 m,孔压计实际埋置土层分别为:81[#]、82[#]在第⑤层,83[#]、85[#]在第④层、84[#]、86[#]埋置在第③层(以后深度 0 m 即指基坑底面)。其平面布置如图 1 所示,桩的施工顺序为每一列先中间后两边,从左到右施工,其顺序为 2, 1, 3, 5, 4, 6, ..., 25, 26, 27, 图中 83[#]距 17 桩 450 mm, 84[#]距 17 桩 550 mm, 85[#]距 26 桩 550 mm, 86[#]距 26 桩 550 mm。

埋置完成后,开始测定孔压计读数至稳定,通过厂家给的式(1)把频率值换算成实际孔压值:

$$u = k(f_0^2 - f_i^2) \quad (1)$$

式中: u 为某时刻的孔隙水压力 (kPa); f_0 为孔隙水压力为 0 时(大气压力)的钢弦自振频率 (Hz); f_i 为在孔隙水压力 u 作用下的钢弦自振频率 (Hz);

k 为传感器系数,由室内标定给出,采用厂家标定值 2×10^{-4} kPa/Hz²。稳定后各孔压计测得的静止孔隙水压力: 81[#] 为 75.6 kPa、82[#] 为 83.0 kPa、83[#] 为 21.5 kPa、84[#] 为 20.3 kPa、85[#] 为 18.2 kPa、86[#] 为 18.3 kPa。

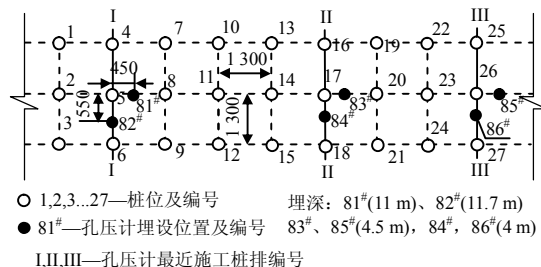


图 1 孔隙水压力计平面投影布置图

Fig.1 Plane projection arrangement of pore water pressure gauges

3 施工时纵向上孔压变化规律

3.1 正常施工时桩身中部周围孔压变化规律

长螺旋 CFG 桩施工主要包括钻进成孔及提钻泵送混合料成桩两个过程。本次试验 83[#]、84[#]、85[#]和 86[#]孔隙水压力计埋深均在 4~4.5 m,各孔隙水压力计在整桩施工过程中孔隙水压力变化曲线如图 2 所示,图中,向下箭头表示钻进过程,细线;向上箭头表示提钻成桩过程,粗线;文中所有孔压值均为实测值。

图 2 中,当孔隙水压力计在地表与孔底中间埋置时,1 根 CFG 桩完整的施工过程中孔隙水压力变化分为 4 个阶段,阶段划分以施工 18 号桩时 84[#]孔压计、施工 19 号桩时 83[#]孔压计及施工 26 号桩时 85[#]孔压计记录孔压为例,见图 2(d)、2(e)、2(f)。

阶段 1: 钻进孔压不变阶段(AB)。钻头位置高于孔压计标高(83[#]孔压计为 0~-4.5 m),孔压基本维持不变,这是因为钻头扰动还未引起孔隙水压力计埋置处孔压变化。

阶段 2: 钻进孔压显著降低阶段(BC)。钻头标高低于孔压计标高(83[#]孔压计为 -4.5~-11.7 m),孔隙水压力开始明显下降,变化速率也在增长,当钻头达到桩底时,孔隙水压力达到最小值,这与文献[6]所做的结果不符,其原因在后面讨论。

阶段 3: 提钻孔压不变阶段(CD)。螺旋钻停止转动,边泵送混合料边提升成桩,但钻头位置低于孔压计标高(83[#]孔压计为 -11.7~-4.5 m)。孔隙水压力停止下降,基本维持不变,此时泵送混合料强大的压力对孔隙水压力计所在位置的孔压影响较小。

阶段 4: 提钻孔压明显上升阶段(DE)。钻头位

置大于等于孔隙水压力计标高(83#孔压计为-4.5~0 m), 此时泵送混合料强大的压力(可达 4 MPa)对孔压计处的孔压产生了显著的影响, 孔隙水压力急聚升高。本阶段完成后, 孔压值会达到甚至超过阶段 1 时的孔压值。

3.2 孔底孔压变化规律

81#、82#孔压计埋设在设计桩长的深度处, 位于钻孔底周围土中。由于施工 8 号桩时堵管, 因此没有统计 8 号桩的数据, 对 5 号、9 号桩施工作了全程记录, 其孔压变化如图 3 所示。

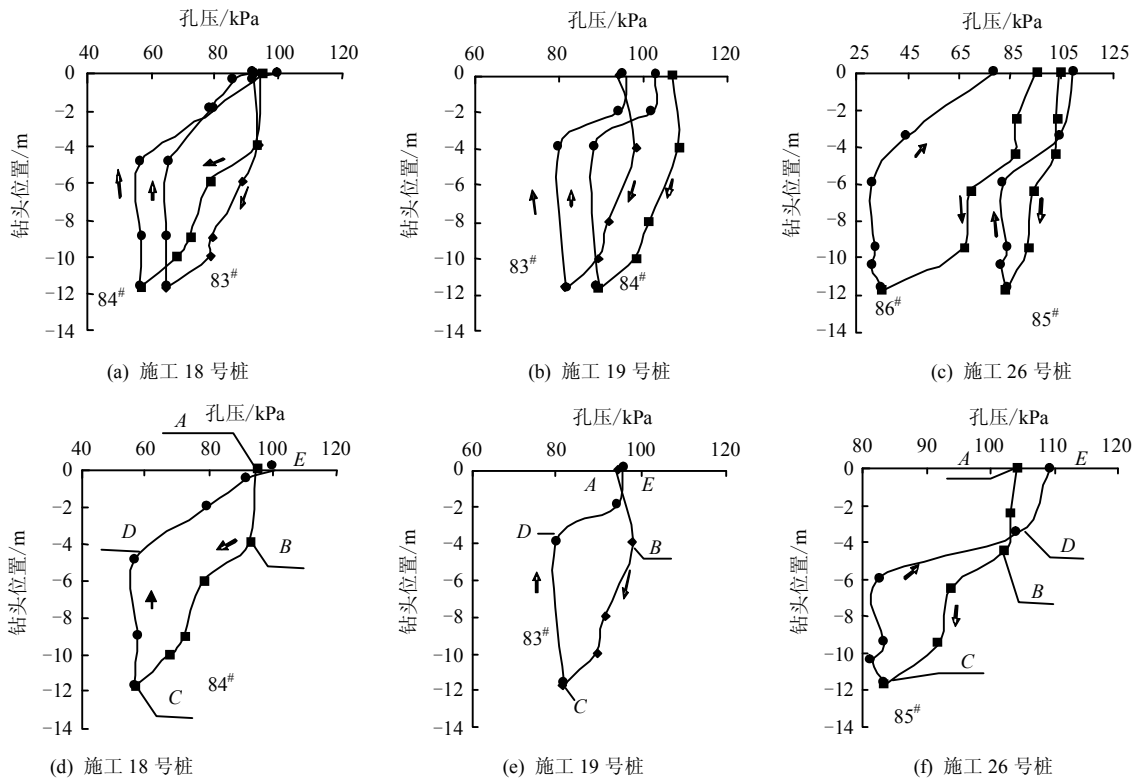


图 2 孔压计在中部时完整施工回次孔隙水压力变化曲线

Fig.2 The curves of pore water pressures in a pile's integrity construction when pressure gauge in the middle of a pile

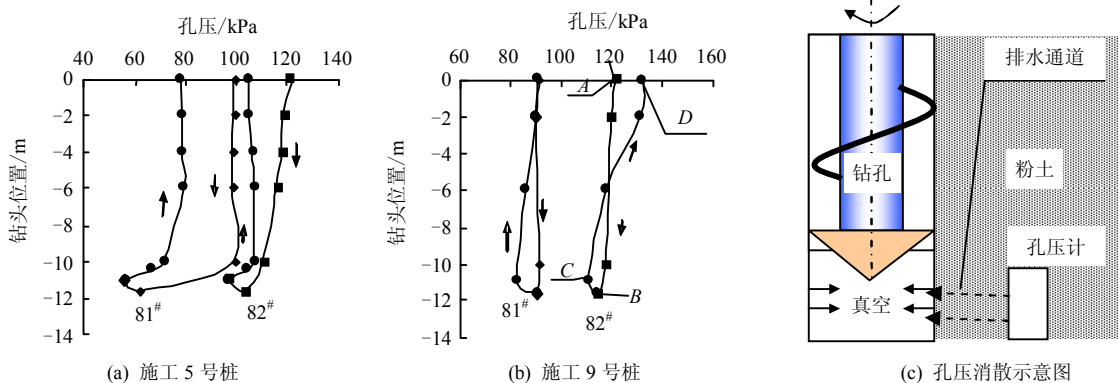


图 3 孔压计在底部时完整施工回次孔隙水压力变化曲线

Fig.3 The curves of pore water pressures in a pile's integrity construction when pressure gauge in the bottom of a pile

分析图 3 可以得出, 孔压计埋置在孔底周围时, 1 根 CFG 桩完整施工时孔隙水压力变化可以划分为 3 个阶段, 以施工 9 号桩时 82#孔压计记录的孔压为例, 见图 3(b)。

阶段 1: 钻进孔压不变阶段(AB 段, 钻头位置 0~-11.7 m)。本阶段孔压基本维持不变或略有降

低。

阶段 2: 抽吸孔压突降阶段(BC 段, 钻头位置 -11.7~-11.6 m)。此阶段孔压出现陡降。在饱和粉土地区施工时, 根据郑东新区的施工经验, 往往造成钻头阀门打不开甚至堵管。为了防止堵管, 经常预提 5~10 cm 再泵送混合料, 虽然这与规范背道而

驰,但却有效的防止堵管的发生。当提钻未泵送混合料的那一刻,相当于活塞在孔底形成一段近似真空,如图 3(c)所示,从而使周围土体向钻孔内位移形成排水通道,有利于孔底周围孔压的消散,因此孔压值陡降。

阶段 3: 泵送混合料孔压回升阶段(CD 段, 钻头位置-11.6~0 m)。此后随着泵送混合料的进行,在混合料的高压下,孔底周围孔隙水压力逐渐回升,一般情况下可以恢复并超过阶段 1 时的最大孔压值,如 9 号桩施工,但 5 号桩施工时抽吸引起的孔压空降值过大,分别达到了 37.5 kPa 和 14 kPa,最终未恢复到钻进前的水平。

3.3 窜孔时孔压变化规律

在施工 20 号桩时,工人发现已经完成的 17 号桩混合料下降达到 1.5 m,即 17 号与 20 号桩发生了窜孔,17 号桩未初凝的混合料进入了正在施工的 20 号桩,施工 20 号桩的孔隙水压力变化图如图 4 所示。

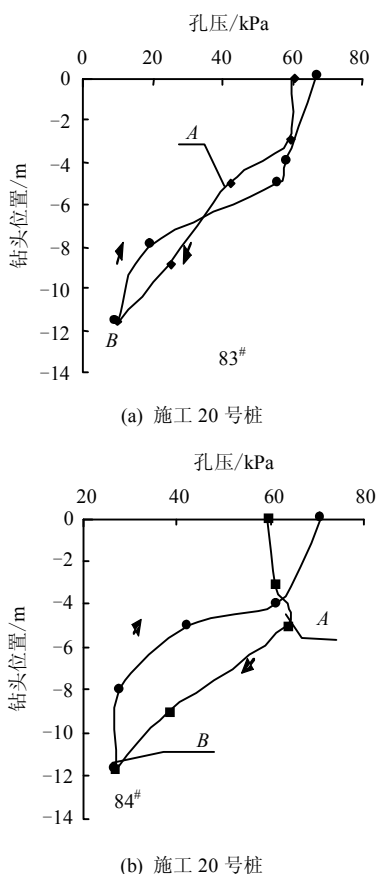


图 4 窜孔时孔隙水压力变化曲线

Fig.4 The curves pore water pressures when fleeing bore occurring

当钻头钻进超过 83[#]孔压计所处的标高时(图 4 中 AB 段),17 号桩的混合料及孔压计所处的土体向

钻孔 20 号移动,孔隙水压力急聚降低,说明此时在 83[#]、84[#]孔压计所处位置已经形成连续的窜孔通道,孔隙水压力沿窜孔裂隙迅速向钻孔内消散,83[#]孔压计记录降低最大幅度达 50.2 kPa,84[#]不在 17 号桩与 20 号桩的窜孔通道上,但降幅达到了 36.8 kPa,这远大于图 2 正常施工时的孔压降幅。4~5 m 处的孔隙水压力急聚降低,在此范围内形成了连续的排水通道,说明窜孔位置在 4~5 m 附近。

4 施工时水平向孔压变化规律

为了了解 CFG 桩施工在水平方向对孔压的影响,分别统计各桩施工时极大值、极小值及极大值减去极小值所得变化幅值,以施工桩位距孔隙水压力计的水平距离为横坐标,孔隙水压力为纵坐标,考虑 83[#]与 84[#]相似,85[#]与 86[#]相似,故以 83[#]与 85[#]孔压计为例,绘制的孔压水平方向变化规律如图 5、6 所示。图中,83[#]max 为施工某桩时极大值,83[#]min—施工某桩时极小值,83[#]幅值为施工某桩时最大值与最小值之差(其他同),II-II 与 III-III 轴位置见图 1。

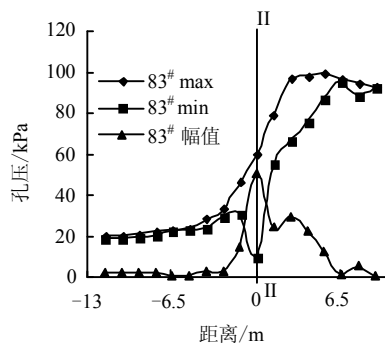


图 5 83[#]孔压统计图

Fig.5 Pressure statistical chart for pressure gauge #83

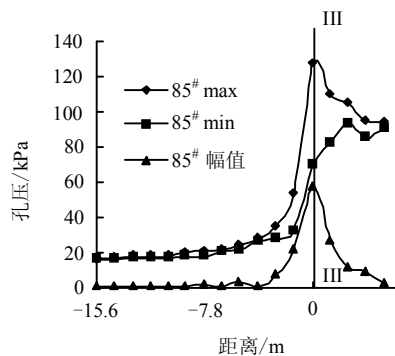


图 6 85[#]统计图

Fig.6 Pressure statistical chart for pressure gauge #85

从图 5、6 不难发现,长螺旋 CFG 桩施工时孔压变化有以下规律:

(1) 孔压极大值与极小值变化的非对称性

图 5、6 中 II 轴线是 83[#]、84[#]孔压计所在位置, III 轴线为 85[#]、86[#]孔压计所在位置见图 1。CFG 桩从左向右施工, 孔压值呈现明显的非对称性, 右边的孔压值一般比左边相同距离处的孔压值要大的多。这是因为前桩施工引起的超孔隙水压力还来不及消散, 而后继桩施工时又产生了新的超孔隙水压力, 造成超孔隙水压力的积累, 所以轴线右边孔隙水压力要大于左边孔隙水压力, 由此可见孔压的积累与施工方向密切相关。

(2) 孔压变动幅值关于轴线表现出近似对称性

此处把某桩施工引起的极大与极小孔压值之差称为孔压变动幅度。图 5、图 6 表明孔压变动幅度与孔压计的距离呈近似对称性, 说明孔压变动幅值与距离关系密切, 而与施工方向关系不密切。

(3) CFG 桩施工影响半径

参照图 5 和图 6, 根据一般经验以孔压变动幅值小于 2 kPa 作为影响范围的控制标准, 可知对 83[#]有影响的桩的最远距离 II-II 轴左边为 $6 \times 1.3 = 7.8$ m (1.3 m 为桩间距), 右边为 $7 \times 1.3 = 9.1$ m, 左右平均为 8.45 m。对 85[#] 左边影响距离为 7.8 m, 右边数据不完整未统计, 但根据经验应大于 7.8 m。根据小孔扩张理论的计算结果^[7], 泵压引起的影响范围为 $(40 \sim 50)R = 8 \sim 10$ m, 可见受扰动后的实测影响范围与理论较为接近。

5 CFG 桩施工过程中几个问题的讨论

5.1 CFG 桩施工时钻进过程孔压降低的原因分析

图 2 表明, 在钻进过程中孔隙水压力下降, 这与传统认为的长螺旋叶片剪切引起土体液化, 即钻进孔压上升不符。根据河南建筑设计院的资料, 83[#]处粉土为新近沉积的粉土, 饱和重度为 18.1 kN/m^3 , 其三轴不固结不排水强度指标: $c_{uu} = 18 \text{ kPa}$, $\varphi_{uu} = 14^\circ$ 。由于长螺旋 CFG 桩施工很快, 孔压来不及消散, 因此计算采用三轴不固结不排水强度。

以 84[#]孔压计为例, 施工 21 号桩时图 2(a)中记录的最大孔压达到了 104 kPa, 84[#]孔压计处的抗剪强度为

$$\tau = \sigma' \tan \varphi + c = (\sigma - u) \tan \varphi + c = (18.3 \times 4.5 - 104) \tan 14 + 18 \quad (2)$$

采用式(2)计算可得 84[#]孔压计有效压力 $(\sigma - \mu)$ 为负值, 令其为 0, 则 $\tau = 18 \text{ kPa}$ 。而 84[#]孔压计处在施工时产生的超孔隙水压力为总孔隙水压力与静水压力之差, 计算得 83.7 kPa。很显然, 土体的黏聚力远小于超孔隙水压力。当钻头在 84[#]孔压计以

上时, 由于孔隙水压力是各个方向均等的, 所以不会产生土体破坏, 孔隙水压力不变。当钻头低于 84[#]孔压计时(图 7), 由于螺旋叶片上的土体呈流塑状, 一般情况下未充满叶片之间的空间, 给钻孔周围土体提供了位移空间, 而 84[#]孔压计与钻孔间土体不足以抵抗孔隙水压力, 土体产生破坏裂隙, 孔隙水压力得以消散, 这充分解释了当钻头低于孔压计时, 孔隙水压力下降的原因。

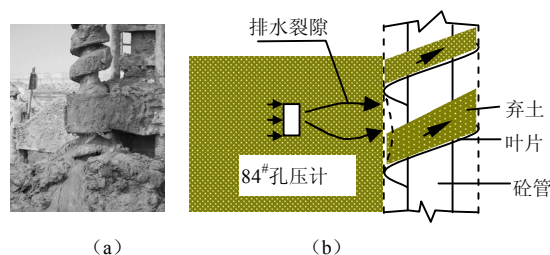


图 7 孔隙水压力消散示意图

Fig.7 Sketch of pore water pressure dissipation

以上分析表明, 孔压不可能持续积累, 因为过高的孔压也能导致土体中产生裂缝, 产生水裂作用^[4], 导致向钻孔发生渗流消散, 加速超孔隙水压力的消散, 本次试验孔压全程记录最大值仅能达到 130 kPa。

5.2 产生超孔隙水压力原因分析

图 2、3 都能说明, 钻进过程中孔隙水压力是持续降低的, 即传统认为的螺旋叶片剪切液化作用不是引起桩周土体孔隙水压力上升的直接原因。而试验中桩周土内累积的孔隙水压力极大值远超过了静水压力, 是什么动力使桩周产生超孔隙水压力呢? 另一方面表明, 提钻泵送混合料时, 在强大的泵压作用下孔压回升, 多数超过了施工此桩前的孔压, 由于粉土的渗透系数小, 孔压来不及消散, 就造成了孔压的积累, 最终产生较大的超孔隙水压力, 因此泵送混合料强大的泵送压力是产生超孔隙水压力的主要原因。

6 结 论

(1) 在 1 根 CFG 桩完整施工过程中, 桩中部孔压变化划分为钻进孔压不变段, 钻进孔压明显下降段, 泵送混合料孔压回升段, 泵送孔压显著上升段 4 个阶段。桩底孔压变化划分为钻进孔压不变段, 抽吸孔压突降段, 泵送混合料孔压回升段 3 个阶段。

(2) 钻进过程中孔压变化并不像传统剪切液化理论一样持续增加。在钻进过程中过高的超孔隙水压力会产生水裂作用, 孔隙水沿裂隙向钻孔渗流造

成孔压下降。在泵送混合料的过程中, 强大的泵压造成孔隙水压力的回升并超过钻进前的值。

(3) 窜孔时孔压陡降, 说明窜孔产生的裂隙是孔隙水消散的主要通道。

(4) 通过水平方向的孔压统计得出, 孔压极大值、极小值与施工方向密切相关, 呈非对称性; 而孔压变化幅度仅与施工点和孔压计之间的距离密切相关, 呈近似对称性。

(5) 根据孔压变化幅度确定的 CFG 桩施工影响范围: 未受扰动为 4 倍桩距(5.2 m), 受扰动后达 7 倍桩距(9.1 m)。

参 考 文 献

- [1] 万良勇. 不同类型孔隙水压力的动力效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2002: 1—3.
- [2] JUAN M PESTANA, CHRISTOPHER E HUNT, JONATHAN DBRAY. Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, (1): 1—12.
- [3] IN-HUNG HWANG, NENG LIANG, CHENG-HSING CHEN. Ground response during pile driving[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(11): 939—949.
- [4] 唐世栋, 王永兴, 叶真华. 饱和软土地基中群桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 同济大学学报, 2003, 31(11): 1290—1294.
- TANG Shi-dong, WANG Yong-xing, YE Zhen-hua. Excess pore water pressure caused by installing pile group in saturated soft soil[J]. **Journal of Tongji University**, 2003, 31(11): 1290—1294.
- [5] 吉同元, 胡银宝, 刘松玉, 等. 软土地基中 CFG 桩单桩施工引起的超静孔隙水压力[J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 53—56.
- JI Tong-yuan, HU Yin-bao, LIU Song-yu, et al. Excess pore pressure induced by single CFG pile driven into soft ground[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2006, 23(8): 53—56.
- [6] 孙瑞民, 杨凤灵, 邓小涛. CFG 桩施工过程中孔隙水压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1792—1798.
- SUN Rui-min, YANG Feng-ling, DENG Xiao-tao. Experimental study on pore water pressure in construction of CFG piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(11): 1792—1798.
- [7] 肖昭然, 张昭, 杜明芳. 饱和土体小孔扩张问题的弹塑性解析解[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1373—1379.
- XIAO Zhao-ran, ZHANG Zhao, DU Ming-fang. An elastoplastic closed-form approach of cavity expansion in saturated soil based on modified Cam clay model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 1373—1379.