

文章编号: 1000-7598-(2004) 04-0637-04

动力排水固结法的加固机理及工艺特征

雷学文¹, 白世伟², 孟庆山²

(1. 武汉科技大学, 武汉, 430070; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉, 430071)

摘 要: 在分析动力排水固结法加固软粘土地基的机理和特点的基础上, 提出了适用于处理软粘土地基的动力排水固结法施工工艺。

关 键 词: 动力排水固结法; 加固机理; 工艺特征

中图分类号: TV 472.3⁺¹

文献标识码: A

Mechanism and technology characteristics of dynamic consolidation by drainage

LEI Xue-wen¹, BAI Shi-wei², MENG Qing-shan²

(1. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on analyzing the mechanism and characteristics of the dynamic consolidation by drainage (DCD) for soft clay foundation, a DCD construction technology suitable for soft clay foundation is proposed.

Key words: dynamic consolidation by drainage; mechanism; technology characteristics

1 概 述

目前的研究及多项成功的工程实例^[1, 2]表明, 只要方法合适, 采用强夯法和排水固结法二者结合的动力排水固结法^[3]加固饱和软粘土地基, 可以达到预期的加固效果。然而, 目前应用该项技术处理软粘土地基仍停留在经验设计阶段, 如先行小范围现场试验寻求设计计算参数和施工工艺, 然后进行正式施工, 尚无一套成熟的设计计算理论和方法。于是, 研究动力排水固结法的加固机理, 揭示该法的一些基本规律, 探寻该法加固软粘土的合理施工工艺具有重大意义。

关于软粘土的强夯加固机理, Ménard 提出的动力固结模型具有一定的意义, 但他对软粘土在强夯作用下渗透系数的变化以及强夯作用后软粘土的触变机理, 只做了宏观的解释, 而未做进一步的探讨。最近, 郑颖人院士等人^[4]作出了较大贡献, 他们以某工程地基强夯加固为例研究了其加固机理, 并探讨了其工艺特点, 所得成果具有较大的理论意义和实际意义。但他们研究的工程实例其地基

条件是填土层较薄, 若遇填土层较厚或厚薄不均且淤泥层也厚薄不均等复杂情况, 其加固机理和加固效应将会更为复杂, 这就需要我们进一步研究和探索。

通过分析文献资料, 并结合我们所做的现场试验研究^[5, 6]和数值模拟分析^[7], 我们对动力排水固结法的加固机理和工艺特征进行了新的探讨。

2 动力排水固结法的加固机理探讨

2.1 天然软粘土的工程特性

要研究动力排水固结法加固软粘土地基的机理, 首先必须对软粘土的工程特性有一正确的认识。过去对软粘土的工程特性的认识主要来源于对重塑粘土特性的研究, 几十年来, 由重塑粘土研究中形成的一系列概念广为流传。然而, 由于天然软粘土的结构特征是普遍存在、不容忽视的, 故以前所得的认识并不符合实际。沈珠江院士^[8]通过对天然软土结构性的深入研究, 指出天然软土具有下列特性:

(1) 天然软土的孔隙比往往要比同一垂直压力下重塑土的孔隙比高出 0.2~0.4。软粘土的这一特

点与其缓慢沉积过程中颗粒接触点形成一定的胶结从而阻止其进一步压密有关。

(2) 天然软土多具有架空的结构, 大孔隙之间形成透水通道, 因此在高孔隙比的同时必然具有较强的透水性。在结构破坏以前, 天然软土的固结系数可以达到同样条件下重塑土的 10~15 倍; 而天然软土的渗透系数可能达到重塑土的 2~4 倍。

(3) 天然软土压缩曲线的初始段是很平缓的, 当压力超过某一 σ_{pc} 值时出现陡降段, 并向重塑土的压缩曲线靠近。

(4) 天然软土的剪切曲线在围压等于 σ_{pc} 前后也有明显的转折, 其原因显然与围压小时结构强度保持完好, 而围压大时结构被破坏有关。

由此可见, 我们在用动力排水固结法处理软土地基时, 必须充分注意天然软土的结构性, 关于这一点, 刘祖德教授于 1995 年在“关于动力排水固结法及其在深圳宝安新城道路淤泥地基处理中应用的咨询意见”就已指出: “对渗透系数很低 ($<1 \times 10^{-7}$ cm/s) 而灵敏度极高的软弱淤泥层表面设有较厚砂石填方, 强夯对浅层淤泥不加以彻底的扰动揉搓, 以保持淤泥土体内某些可靠的微结构 (Reliable Micro-structure), 而代之以施夯动力固结, 使经典意义上的动力固结作用得到充分发挥 (即动力八面体压缩应力 $(\sigma_{oct})_d$ 下, 孔压的附加增长 Δu_d 明显, 消散过程中土固结得更彻底, 相当于较大的超载预压; 相反的动力八面体偏应力 $(\tau_{oct})_d$ 和偏应变尽量减少其增幅), 其结果必然导致土固结增多增快, 而剪切扰动触变增强作用受到削弱的积极效果。”

郑颖人院士等^[9]通过某工程地基强夯现场试验研究也证实: 软粘土具有结构性和结构强度, 在土结构破坏后, 其渗透性大幅度降低。我们在某港口仓库地基处理工程的现场试验中也得出了同样的结果^[10]。

2.2 软粘土强夯加固机理探讨

首先从微观方面看, Hansbo^[11]提出: 在他所做的粘土试验研究中发现孔隙水中存在着可活动粒子。由此可见, 如果对软粘土施以适当动能将会激活这些可活动粒子, 从而使土体结合水变成自由水。而动力排水固结法可以大面积地、大深度地“激活”淤泥土层, 使孔压 Δu 全面地动力增长, 进而加速排水固结。

Osipov^[12]等通过一系列试验分析研究了饱和软粘土在强夯作用下的触变现象以及触变恢复的微观机理, Osipov 发现: 土体在动荷载作用时 (即触变) 其抗剪强度急剧下降, 土体结构破坏、强度降至最

低点; 动荷载停止后, 抗剪强度从最低点不断增加 (触变恢复), 触变恢复过程中伴随着微观结构的重新再组合, 触变恢复后土体结构的抗剪强度增加到较大值。

需要说明的是, 强夯时的孔隙水压力与地震时砂土液化产生的孔隙水压力不尽相同, 实践中测定强夯时饱和土的超静孔隙水压力多达不到上覆土的自重压力, 而且此孔隙水压力产生的机理与地震时土液化产生的孔隙水压力的机理不同。地震中松砂受剪切应力波, 颗粒落入新的平衡位置, 在瞬间脱离接触, 粒间应力减小, 粒间应力转化为孔隙水压力称之为液化, 此时土体体积并未减少, 需孔隙水排除, 体积方减少。而强夯时, 锤底下一定范围的土受到挤压, 土体积减少, 土被挤密重新排列, 此过程土粒并不脱离接触, 仍可具有粒间应力。强夯时产生的孔隙水压力为土体体积缩小时, 通过液体传递的挤压力, 此时粒间应力并不一定消失, 只有松砂受强夯振动产生振密时, 可产生类似地震的液化现象, 并产生孔压。而在一般情况下强夯时产生的孔隙水压力与地震液化时产生的孔隙水压力不同, 它并不反映液化度。

总结如前所述, 可将软粘土强夯机理概述为 4 个阶段: ①能量转换与夯坑受冲剪阶段。在此阶段动能转换成动应力; 坑壁冲剪破坏, 下部土体压密; 夯坑周围水平位移, 土体侧向挤出; 坑周剪坏, 表面隆起; 坑周垂直状裂缝发展。②孔隙水激活阶段。土体结构破坏, 此时, 孔隙水压力迅速上升至峰值, 土体结合水变成自由水, 影响范围内土体结构可能破坏, 强度显著降低。③排水固结阶段。水由坑周裂隙及毛细管排出, 土体固结沉降。④触变恢复阶段。水继续排出, 土体强度较大幅度增长。

2.3 动力排水固结法的加固特点

由于软粘土的结构性和孔隙水存在可活动粒子, 故在强夯荷载作用下, 软粘土孔隙水压上升高、消散慢, 尤其是上部土体结构严重破坏时, 扰乱了排水途径, 渗透性大幅度下降, 孔隙水压消散极慢而接近橡皮土状态 (即水不能排出, 土体强度很低, 夯击产生的变形为剪切变形, 土体不能压密, 此时强夯效率丧失)。另外, 软粘土地基要求在动力作用下完成主固结, 以免工程完成后出现过大的剩余沉降。可用地基的有效加固深度作为判断是否完成固结沉降的标准, 当有效深度大于软土层厚度时或大于工程影响深度时可认为完成主固结沉降。于是在软粘土的强夯机理中, 必须同时考虑如何消散孔压和增加加固深度两点, 然而两者有所矛盾, 如增加

加固深度, 要求增加能量, 而增加能量就会增大孔压, 且土体结构易于破坏, 渗透性大幅度下降而至孔压消散慢。解决这对矛盾正是动力排水固结法的加固特点。动力排水固结法以其如下节所述的独特施工工艺能有效地消散孔压和使一定深度的软粘土完成主固结, 进而获得满意的加固效果。

3 动力排水固结法的工艺特征

针对以上所述的加固机理和特点, 可以认为动力排水固结法的施工工艺如下:

(1) 采取适当排水措施以加速孔压消散。如采取在原有场地上铺设 40 cm 厚中粗砂垫层, 并用纵横交错盲沟与集水井相连而成良好的水平排水体, 打设塑料排水板穿过软粘土层作为竖直排水体, 如此构成空间网状排水系统, 使深厚的软粘土层内排水通道得到大幅度的增加。试验结果表明, 该措施有助于孔压尽快消散和加速排水固结。并且要求及时将集水井中的水抽排掉^[10]。

(2) 强夯前铺设足够厚度垫层以减少浅层淤泥反复揉搓导致“橡皮土”弊端的出现。

(3) 采取合适的强夯工艺以保证土体结构不产生严重破坏, 同时又能增加加固深度。

对于软粘土层不太厚(如 4~4.5 m)且其上垫层较薄(<2 m)时, 应采用由轻到重、少击多遍、逐渐加载的施工工艺, 这样既能提高强夯功效, 防止橡皮土出现, 又能增加加固深度。如第一遍夯击以较小的夯能将浅层土率先排水固结, 在表层形成“硬壳层”; 有了该“硬壳层”就可以分级加大夯击能, 使动能向深层传递, 促进软粘土排水固结。单点击数亦应严格控制, 因击数多会使土体破坏, 孔压消散慢。尤其是头几遍, 单点击数一定不能多。一般为 1~3 击。

对于软粘土层较厚(>5 m), 且其上垫层亦较厚(>3 m)时, 则应适当加大单击夯击能和增加单点击数, 以使埋置较深且厚度较大的软粘土层得以有效加固, 对此比较合适的强夯参数是: 单击夯击能为 2 000 kN·m, 单点击数为 6~7 击, 3 遍点夯, 1 遍满夯, 每遍点夯夯点间距为 5~6 m。

对于填土层及软粘土层厚薄不均的情况, 应根据土体强夯效应(如坑周土体隆起情况、夯坑沉降量变化情况)及时调整单点夯击能大小和夯击击数, 如第 1 击时坑周就已明显隆起就要降低夯击能; 如后一击夯沉量大于前一击夯沉量, 表明土体结构破坏就应停止夯击。

为了确定每一击夯点最佳击数, 还需建立合理

的收锤标准, 其原则是既要使土体充分压密, 又要破坏土体结构。结合工程经验, 建议采用如下的收锤标准:

①坑周不出现明显的隆起, 坑周隆起量 $h_{\max} \leq 5\text{cm}$, 如第 1 击时就已明显隆起, 则要降低夯击能。

②后一击夯沉量应小于前一击夯沉量。

③夯坑深度 Δh 不能太大, 以 $\Delta h \leq 1.2\text{m}$ 为宜。

还可利用侧向位移量、孔隙水压力变化情况以及坑周地面振动情况作为收锤标准, 这些标准理论上正确合理, 但在工程实际中难于操作。

总之, 为了保证动力排水固结法加固软粘土地基取得满意加固效果, 应该采用轻重适度的单击夯击能和“少击多遍”的强夯方式、合适的夯点间距以及合理的收锤标准。

(4) 严格控制前后两遍夯击的间隔时间。

对软粘土地基, 两遍夯击的间隔时间, 一般取决于孔压消散情况, 于是可根据夯后孔隙水压力消散曲线确定相邻两遍夯击的间隔时间。现场试验研究表明, 5~6 d 后, 全部孔隙水压力消散都超过 80%, 所以可将相邻两遍夯击间隔时间定为 5~6 d。

4 结 语

本文对动力排水固结法的加固机理进行了探讨。动力排水固结法既可保证表层土体结构不受严重破坏, 亦可使得一定深度的软粘土层中激起的高孔隙水压力能够迅速消散, 进而达到排水固结的目的。

动力排水固结法有其独特的工艺特征, 即采取空间网状排水系统, 铺设一定厚度的垫层, 采取合适的强夯工艺, 严格控制相邻两遍夯击的间隔时间。只要采用上述施工工艺, 不难使动力排水固结法处理软粘土地基取得满意的加固效果。

参 考 文 献

- [1] 丘建金, 张旷成. 动力排水固结法在软基加固工程中的应用[J]. 工程勘察, 1995, (6): 7-10.
- [2] 李彰明, 冯遗兴. 动力排水固结法处理软弱地基[J]. 施工技术, 1998, (4): 30-31.
- [3] 雷学文, 白世伟. 动力排水固结法的研究及应用概况[J]. 土工基础, 1999, 13(4): 9-11.
- [4] 郑颖人, 李学志, 冯遗兴等. 软粘土地基的强夯机理及其工艺研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 571-580.
- [5] 孟庆山, 汪 稔, 王吉利. 动力排水固结法对软土力学特性影响的试验研究[J]. 工程勘察, 2002, (3): 5-7.

- [6] Lei X W, Bai S W, etc. Study on the improvement influence of dynamic consolidation by drainage[A]. In: Guobin Liu, Shaoming Liao ed. **Proceedings of the regional conference on geotechnical aspects of underground construction in soft ground**[C]. Shanghai: Tongji University Press, 2001, 441—444.
- [7] 雷学文, 白世伟, 孟庆山. 动力排水固结法加固机理的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1 088—1 091.
- [8] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100—111.
- [9] 郑颖人. 强夯加固软粘土地基的工艺研究[A]. 第八届全国土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 南京, 1999. 475—478.
- [10] 雷学文. 动力排水固结法的理论及工程应用研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.
- [11] Hansbo S. Dynamic consolidation of mixed fill-a cost-effective alternative to piling a case record[J]. **Geotechnique**, 1996, 46(2): 351—355.
- [12] Osipov V I, Nikolaeva S K, Sokolov V N. Microstructural change associated with thixotropic phenomena in clay soils[J]. **Geotechnique**, 1984, 34(3): 293—303.
- [13] 谢定义, 张建民. 饱和砂土瞬态动力学特性与机理分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.
- [14] 雷学文, 王吉利, 白世伟等. 动力固结中孔隙水压力增长和消散规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 79—82.