

文章编号: 1000-7598(2009)增刊2-0457-05

高能级强夯处理湿陷性黄土设计施工检测应注意的问题

詹金林, 水伟厚

(现代建筑设计集团申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

摘要: 对3 000~15 000 kN.m 高能级强夯加固湿陷性黄土的工艺进行了详细地探讨, 讨论了设计、施工、检测各个环节可能存在及所需要注意问题, 供类似工程优化设计和现场指导施工、检测借鉴。

关键字: 高能级强夯; 湿陷性黄土; 地基处理; 优化设计; 施工; 检测

中图分类号: TU 475⁺.3

文献标识码: A

Collapsible loess foundation treatment and the quality control for dynamic compaction method

ZHAN Jin-lin, SHUI Wei-hou

(Xiandai Architectural Design Group, Shen Yuan Geotechnical Co., Ltd., Shanghai 200011, China)

Abstract: A high energy dynamic compaction for collapsible loess is discussed in detail; some problems should be paid attention to. Some advice about design, construction and detection for foundation treatment of collapsible loess is given. It can be a reference for collapsible loess, and insure the quality of foundation treatment.

Key words: high energy dynamic compaction; collapsible loess; foundation treatment; optimization design; construction; detection

1 前言

强夯法主要适用于碎石土、砂土、低饱和性的粉土与黏性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土地基, 强夯法地基处理不但经济, 而且快速高效, 自发明以来在无数工程中得到广泛的应用, 并取得巨大的经济效益^[1-2]。湿陷性黄土都在地下水位以上, 而且多数湿陷性黄土含水率基本都在最优含水率附近, 因此, 非常适合强夯法处理, 在我国湿陷性黄土地区得到广泛应用和推广。然而即使再好的方法, 如果施工中不注意质量控制, 处理效果仍然会不尽人意。目前强夯法处理湿陷性黄土的国家标准^[3]最高能级为8 500 kN.m, 笔者就自身参与3 000、8 000、12 000、15 000 kN.m 能级强夯处理湿陷性黄土的设计、施工、检测、监测中所存在的问题进行总结, 得出强夯法处理湿陷性黄土中应该注意的问题。目前12 000 kN.m和15 000 kN.m强夯能级是国内处理

湿陷性黄土的最高能级。

2 设计中应注意的问题

设计参数选取的好坏是决定地基处理效果的关键因素, 采取合理的施工工艺不仅能够保证所需要的加固深度, 而且施工经济合理、施工速度快, 下面就强夯法处理湿陷性黄土的设计参数进行论述:

(1) 强夯能级的确定: 强夯的能级与设计需要加固的深度有直接关系, 根据大量的强夯处理效果检测、监测发现夯坑的深度越大, 夯点下的加固深度和承载力就越大; 场地的总体夯沉量越大, 加固深度也越大。根据规范^[4], 强夯处理深度估算公式为

$$H = \alpha \sqrt{Mh} \quad (1)$$

式中: α 为经验系数; M 为夯锤质量 (t); h 为夯

收稿日期: 2009-07-10

基金项目: 上海现代建筑设计集团基金资助项目: 高能级强夯与预处理动力固结法研究 (2004-结-地-03)。

第一作者简介: 詹金林, 男, 1977年生, 硕士, 工程师, 从事基础工程与软基处理研究、设计、检测工作。E-mail: zhjcool@yahoo.com.cn

锤落距 (m); H 为加固深度。

作者根据黄土地区高能级强夯设计、施工、检测经验,对于 8 000~15 000 kN.m 高能级强夯法处理湿陷性黄土,经验系数 α 可取 0.35。也可在试夯中通过采用同一夯锤不同落距的方式来确定最佳强夯能级,根据夯坑的深度、四周隆起情况、夯锤落地情况 etc 综合来确定强夯能级。对于地基土干密度较大的湿陷性黄土,会存在过多消耗夯击能量的现象,因此,应适当增加能级。当冻土层小于 60 cm 时可进行冬季施工,施工前应扫除场地积雪,为消除冻土层的不利影响,可适当增加 1 000~1 500 kN.m 的强夯能级。

(2) 有效加固深度的判定:通常强夯的有效加固深度从起夯面算起,有效加固深度的判定以处理后满足设计所需的深度为标准^[5]。对于以处理黄土的湿陷性为目的的强夯地基处理,应以所消除湿陷性土层厚度为主要依据进行判定,因此,地基处理检测时需要进行室内土工试验,根据湿陷系数和干密度对有效加固深度进行综合判断。湿陷系数试验所用土样应从探井中刻取,尽量避免对取样造成过多的扰动。

(3) 夯点间距的确定:夯点间距的选择对加固深度、加固效果、加固的均匀性有很大关系,由于湿陷性黄土地区夯点间距要远小于其他类型的地基土,因此,夯点间距也较其他类型地基土的间距要小,具体可通过现场试夯确定。在试夯过程中调整夯点间距,观察夯坑四周是否有隆起现象,是否由于间距过小而表层土体过分震裂、隆起等情况,然后根据试夯确定一个合理的夯点间距。对于 8 000 kN.m 能级以下夯点间距可参照规范^[3]选取,对于超出规范范围外的强夯能级,根据不同能级现场夯点间距试验,作者建议夯点间距取值参照表 1 选用。

表 1 采用强夯法处理湿陷性黄土地基参数建议

Table 1 The suggestion parameters of DCM for collapsible loess

单击夯击能/(kN.m)	主夯点间距/m	处理深度/m
8 000	6	8~11
10 000	7	10~12
12 000	8	11~13
14 000	9	12~14
16 000	11	13~15

夯击点位置可根据基础底面形状、地基土情况和有效加固深度确定,可采用等腰三角形、正方形或其他布置形式。

(4) 夯击遍数的确定:应根据地基土的性质

和使用要求确定,一般情况不易小于 3 遍。对能级小于 8 000 kN.m 的强夯设计,一般情况下夯 3~5 遍;能级高于 8 000 kN.m 的强夯设计,一般情况下夯 4~6 遍。文献[6]曾实测研究过强夯压实度与夯击遍数的关系,压实度与夯击遍数曲线如图 1 所示,夯击遍数越多,加固效果越明显,压实度越大。

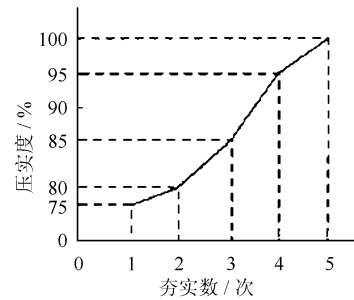


图 1 压实度与夯击数关系

Fig.1 The relation between compactness and tamping pass

(5) 夯击数的确定:目前强夯处理湿陷性黄土通常以试夯收锤所对应的击数为设计夯击数,而且常常夯击数还要以不小于一定总击数作为双控收锤标准。通常对小于 4 000 kN.m 能级的收锤标准为 50 mm,对 4 000~6 000 kN.m 能级的收锤标准为 100 mm,对 6 000~12 000 kN.m 能级的收锤标准为 150 mm,对于能级大于 12 000 kN.m 能级的收锤标准为 200~250 mm。收锤标准还跟地基土的加固程度有关,对于压缩模量和承载力要求较高的地基土,根据作者高能级强夯处理湿陷性黄土监测、检测经验,高能级强夯的收锤标准仍可控制在 100~150 mm。

(6) 前后两遍夯击间隔时间:对于湿陷性黄土,由于含水率较低,不存在因强夯施工引起的超孔隙水压力消散,因此,文献[7]建议可进行连续施工。当由于天气等其他原因引起地基土含水率较高时应适当延长两遍夯击的间隔时间,应对地基土进行充分晾晒。根据众多工程实例,作者建议两遍夯击间隔时间可取 3~5 d。

(7) 锤重和落距组合的确定:根据不同锤重和落距的组合研究,在相同夯击能量下,重锤低落距作用于土体的冲击应力比轻锤高落距大,但存在一个能使夯击应力达到最佳效果的组合^[8]。落距为地面至锤重心高度,通常可近似取夯锤底面至地面的垂直距离。

(8) 能级大小施加顺序:对于湿陷性黄土,能级应随着夯击遍数的增加而减小,能级自大而小,加固由深而浅。先采用高能级点夯,加固深层地基土,然后再采用低能级强夯加固浅层地基土。对于高能级强夯设计,由于从高能级直接过渡到满夯能

级跨越较大，因此，二者之间常常要加上一遍不低于高能级 1/2 能级的加固夯，夯点位于主夯点以及主夯点之间。

(9) 夯击范围：夯击范围应大于建筑物基础范围，每边夯锤中心超出基础外缘的宽度宜为基底有效加固深度的 1/2，且不宜小于 3 m。

3 施工和监测中应注意的问题

目前国内多采用重型起重机或起重机附带支撑门架进行强夯施工，因此，对强夯向高能级发展有一定的制约，很难突破 12 000 kN.m 的瓶颈。由我国自主研发的专用高能级强夯设备现在已经达到国际先进水平，最高施工能级可达 20 000 kN.m。下面就强夯施工和监测中可能存在各种问题进行论述。

(1) 强夯机械设备对处理效果的好坏和施工速度存在直接影响，应选择性能稳定、机动灵活的强夯机。对于带有门式支架起重机的强夯设备，在施工中，特别是高能级强夯施工中，在夯锤脱钩的瞬间门架和起重臂回弹会产生较大跳跃，门架落地后会偏离原始位置，如果继续施工夯锤落点就会产生偏差，夯锤着地后总是倾斜，并且夯坑范围扩大，影响能量向深处传播，致使加固效果减弱。

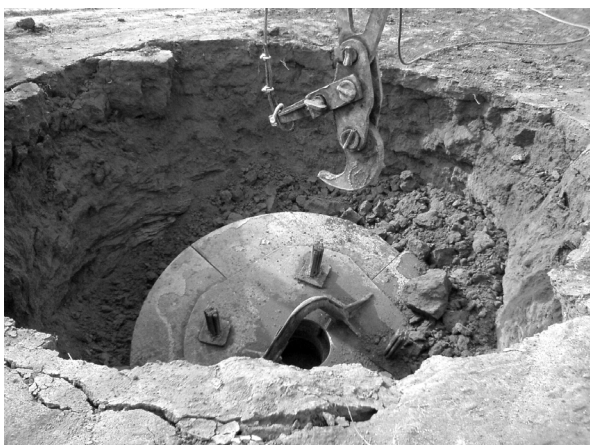


图 2 夯锤着地照片

Fig.2 Photo of hammer in situ

作者在现场测量过带门架 100 t 吊车的 12 000 kN.m 能级强夯处理湿陷性黄土施工，50 t 夯锤脱钩产生巨大的振动致使门架跳跃落地偏移原位达 1.5 m 之多，造成夯坑范围扩大，夯锤倾斜，加固效果减弱，图 1 就是现场施工 2.5 m 直径夯锤落地后的照片。

(2) 强夯夯锤应采用完整铸钢锤，要求锤底平底，边缘不得磨损，且应有 4~6 个直径不小于

25~30 cm 的通气孔，夯锤直径宜 2.4~2.6 m。磨损严重、锤底为锅底形、锤身为梨形的锤以及组合锤均会削弱强夯的加固效果，缺少通气孔会产生气垫效应，锤底锅底形和底部磨损严重会增加侧向挤压力，同样也会削弱加固效果。通常每平方米锤底面宜有 1 个孔径 25~30 cm 的通气孔。根据作者现场不同能级、不同夯锤现场实测，当采用仅有 1 个通气孔的厚钢板组合锤时，落锤的夯击能量损失可达 25%，仅有采用合格锤相同能级 75% 的加固效果，可见夯锤的选择对加固效果至关重要。

对于同一区域地基土，尽量采用相同直径的夯锤进行强行施工，避免地基土加固效果的不均匀性。作者对现场 3 000 kN.m 强夯能级分别采用直径为 2.4、2.5、2.6 m 铸钢夯锤的强夯施工记录工进行统计分析，在同一场地、相同锤击数和夯击遍数下，各夯坑平均深度分别为 1.55、1.3、1.2 m。而夯坑的深度对加固效果有着直接影响，由此可得地基土的加固效果同样也存在着不均匀性。

(3) 强夯施工机械的脱钩器也会影响加固效果，夯锤的挂钩在施工期间应经常涂抹润滑油，避免挂钩和吊环的磨损，减小二者的摩擦力，当挂钩和吊环接触面磨损严重时夯锤脱钩时振动响声大，且落锤在空中会呈倾斜状态，致使加固效果减弱。

(4) 降雨期间施工会对加固效果大打折扣，因此，降雨后应对场地进行充分晾晒，含水率过大施工易形成橡皮土。降雨会使夯坑内积水，应在雨晴后尽快排除积水，清理夯坑内烂泥，确保夯坑内不残留积水，避免夯坑过长时间浸泡，对夯坑进行适当晾晒后采用含水率低的好土进行回填。

(5) 强夯施工夯坑应采用采用含水率较低、土性较好的土进行回填，不得回填有机质高的垃圾土。

(6) 强夯施工过程必须专人负责，并对施工情况做好详细记录，要求夯击时落锤应保持平稳，夯位准确，夯击的遍数应满足设计要求。在夯击时必须对其沉降进行观测并记录，同时观测周围的沉降、隆起和挤出情况，确保能够满足设计要求。为增加有效加固深度，在提锤不存在困难的情况下尽量避免回填夯坑，避免对加固深度的影响。

(7) 强夯满夯施工完成后，会造成浅层地基土振松散和开裂，建议满夯完成后对整个场地进行一遍碾压或振动碾压，提高浅层土的密实度和均匀性。有文献研究曾表明，浅层地基土的压实度每提高 1% 其承载提高可达 10%。

(8) 施工期间的夯坑深度监测可通过水准仪

进行观测。由于高能级强夯施工坑壁震塌黄土落入夯坑,致使总夯坑深度难以准确测量,可在起夯面洒上一层白灰,夯完后在夯坑底部进行人工挖除震落松散虚土,直至白灰层后进行测量实际夯坑深度。

4 检测中应注意的问题

强夯加固效果的检测包括加固深度和承载力参数的检测,对于以处理湿陷性为目的黄土还应进行室内土工试验测试。常用检测加固深度的方法有静力触探、标准贯入、瑞雷波、动力触探、旁压试验等,浅层地基土承载力可采用平板载荷试验,还可进行钻孔、探井取样进行室内土工试验,根据以上试验及相关经验公式可得不同深度地基土的加固效果及其他物理力学参数。下面就检测中应该注意的问题进行描述。

(1) 规范^[3]规定,强夯检测间歇时间为强夯完隔7~10 d取样进行室内试验,测定土的干密度、压缩系数和湿陷系数;强夯土的承载力,宜在地基强夯结束30 d左右,采用静载荷试验测定。间歇期主要是满足强夯施工所引起应力的消散问题,作者在强夯后3 d、7~10 d在同一区域分别取土样进行室内土工试验,试验表明,后取土的湿陷性系数要小于先取土。

(2) 平板载荷试验,可分为浸水与不浸水载荷试验,荷载的分级也较其他规范标准严格,不得少于10级。强夯处理后由于浅层地基土渗透系数达 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ cm/s量级,因此须在载荷板四周打上一定深度的钻孔,内填碎石或卵石作为渗水孔。浸水试验通常有两种做法,一是先浸水后加载,二是先加载至设计值然后浸水,最后加载至极限,两种做法浸水时间均不宜小于10 d。关于先加载至设计值然后浸水10 d,并且保持荷载不变,附加沉降稳定后方可进行下一阶段加载,附加沉降稳定判定标准黄土规范^[3]是参照常规静载试验的收敛标准,笔者建议采用连续4 h,每2 h沉降小于0.1 mm作为判定标准。对没有渗水孔的平板载荷试验浸水时间不小于10 d,对于有渗水孔的平板载荷试验浸水时间可根据实际情况进行适当调整。对于存在橡皮土区域不宜在橡皮土上进行载荷试验,应挖除橡皮土后进行平板载荷试验。

平板载荷试验过程中,附近不得存在振动等扰动因素,如进行高能级强夯施工等,笔者根据实际监测情况发现,对于黄土区8 000 kN.m高能级强夯施工,对静载试验影响距离可达250 m,在250 m远处每一锤夯击下,载荷板上的百分表均会有所晃动,并且沉降呈增大趋势,对于浸水载荷试验则更

加敏感。

(3) 标准贯入试验时钻机钻至试验位置以上15 cm处、钻具拔出后应清除孔底残土,标贯器入土之前应测出探头靴口到锤垫底面之间的长度及探杆长度,自动脱钩应能够保证落距小于 ± 2 cm的偏差。在标贯试验时应保证贯入器、探杆、导向杆连接后的垂直度,尽量减少导向杆与穿心锤的摩阻力、锤击偏心及侧向晃动,锤击速率应小于30击/min。

(4) 静力触探设备分为车载式和分离式,常用探头有单桥、双桥两种,试验前均应保证探头率定在规定期限内,建议每贯入2 000 m至少标定一次,确保检测效果。试验前应将触探头贯入土中0.5~1.0 m(在冬季应超过冻结线),然后提升5 cm,待量测仪器无明显飘零时,记录零读数或调整零位方能开始正式贯入试验。黄土地区加固深度测试建议采用双桥探头进行测试,要保证探杆的垂直度和设备的水平度,每6 m探杆连接后垂直偏差宜小于10 mm,静探速度不宜大于1.2 m/s,在试验过程中尽量连续贯入,避免提升探头。可根据静探的 f_s 、 q_c 夯前、夯后综合对比进行加固效果、加固深度的判别。

(5) 圆锥动力触探是岩土工程勘察常用的原位测试方法之一,分为轻型、重型和超重型,它是利用一定质量的落锤,以一定高度的自由落距将标准规格的圆锥形探头打入土层中,根据探头贯入的难易程度判定土层的性质。通过夯前、夯后触探击数进行对比,判定强夯加固的深度。影响圆锥动力触探因素主要有有人为因素和设备因素,文献[9]对影响的各种因素有详细描述。

(6) 瑞雷波可用来检测加固深度和场地的均匀性。地基土含水率对瑞雷波(多道瞬态面波)测试结果较为敏感,当地基土含水率变化较大时,测试结果的离散程度较大,因此,对于湿陷性黄土区域,在施工期间遇到连续较大降雨时,后期检测不宜选用瑞雷波测试加固深度。

(7) 湿陷性黄土地区取土样至关重要,应采用探井刻样或薄壁静压取土,严禁采用锤击取土,最好采用探井刻取原状土样,尽量减少对土样的扰动,根据室内土工试验结果得出湿陷性的消除程度、压缩模量等其他物理力学参数。

5 结语

通过对强夯处理湿陷性黄土设计、施工及检测进行了详细的介绍,指出强夯法在各个阶段应该注意的问题。以供类似工程优化设计与借鉴。

大坝的施工安全;若工程建成大坝运行后失稳,滑坡滑动方向与大坝平行,滑体可能封堵厂房进水口,另外其造成的涌浪将危及大坝的安全运营。因此,对滑坡进行综合整治是必要的。

针对该滑坡的处理措施曾研究过较多方案,主要有:①前护后削方案,即前缘块石护坡,后缘削坡减载,加地表排水措施;②抗滑桩方案,即在滑坡中偏前部设置一排抗滑桩,以满足滑坡整体稳定的需要;③清除方案,本方案结合大坝围堰填筑用料在施工期对滑坡予以全部清除或大部分清除。

滑坡稳定性计算表明滑坡的安全储备不足,第一种方案治标不治本,存在一定的工程风险;第二种方案工程投资较大;第三种方案对滑坡治理较彻底,基本不留隐患,况且滑坡靠近上游围堰,挖除后可以直接上堰填筑,运距较近,避免了围堰到外地找料。可见第三种方案是最佳方案,即经济又合理。

6 结 语

罗行滩滑坡系发育在崩坡积土层上的堆积层中型滑坡,现状整体基本稳定。滑坡经过稳定性计算,在现状条件下基本稳定;在暴雨条件下以及水库蓄水后整体稳定性较差。滑坡距孤山水电站坝址较近,对工程危害较大,建议结合大坝围堰填筑用

料对滑坡采取全部清除或大部分清除措施。

参 考 文 献

- [1] 冯建元,冯明权. 亭子口水利枢纽大园包崩滑体特征及形成机制[J]. 人民长江, 2007, 38(9): 117—119.
- [2] 李明,唐红梅,叶四桥. 三峡库区唐家嘴滑坡破坏过程及演绎研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(2): 173—177.
- [3] 胡卸文,黄润秋,施裕兵,等. 唐江山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181—189.
- [4] 王兰生,李文纲,孙云志. 岩体卸荷与水电工程[J]. 工程地质学报, 2008, 16(2): 145—154.
- [5] 崔杰,王兰生,徐进,等. 金沙江中游滑坡堵江事件及古滑坡体稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 6—10.
- [6] 王启国,刘高峰,宋斌,等. 海排滑坡基本特征及对上江坝址枢纽工程的影响[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(1): 28—31.
- [7] 胡世起. 高边坡复合堆积体稳定性评价及基础处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 345—349.
- [8] 罗红明,唐辉明,章广成,等. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学, 2008, 33(5): 687—692.
- [9] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等. 强夯法有效加固深度的确定方法与判定标准[J]. 工程建设标准化, 27—38.
- [6] 周树毅. 湿陷性黄土地基处理及质量控制[J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15(2): 187—188.
- [7] 钱鸿瑾,王继唐. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [8] 郑颖人,李志学. 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—579.
- [9] 常士骠,张苏民. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

上接第 460 页

参 考 文 献

- [1] 王铁宏. 新编全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 水伟厚. 冲击应力与 10 000 kN.m 高能级强夯系列试验研究[博士论文 D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [4] 中国建筑科学研究院. JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [5] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等. 强夯法有效加固深度的