

对高能级强夯技术发展的全面与辩证思考^{*}

王铁宏¹, 水伟厚², 王亚凌³

(1 中华人民共和国住房和城乡建设部, 北京 100835; 2 现代设计集团上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011; 3 中化岩土工程有限公司, 北京 102600)

[摘要] 高能级强夯法处理碎石、块石填土和深厚湿陷性黄土地基, 当要求有效加固深度在 10m 以上甚至达到 15~20m 时, 具有很大的优越性。目前国内多个工程的强夯能级超出规范, 带来了设计、施工、监测、检测等一系列复杂问题。结合 6 个国家重点工程, 就高能级强夯技术发展的客观性、必然性、经济性、复杂性等问题进行了阐述, 并对超出规范能级的设计参数等提出了建议, 为工程界应用和规范发展提供了依据。最后, 简述了其在节能环保方面的贡献。

[关键词] 高能级强夯; 应用; 发展; 有效加固深度

Thinking of high energy level dynamic compaction application and development

Wang Tiehong¹, Shui Weihou², Wang Yaling³

(1 Ministry of Housing and Urban-Rural Development, P. R. China, Beijing 100835, China; 2 Shanghai Xiandai Architectural Design Group, Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200011, China; 3 China Zhonghua Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: In dealing with gravel, stone filled and deep collapsible loess site for effective improvement more than 10m in depth even up to 15 to 20m, high-level dynamic compaction shows the unsurpassed superiority. Various projects in the current domestic level exceeded the codes, bringing the design, construction and testing a series of complex issues. It sets forth some developmental matters of objectivity, inevitability, economy and complexity on the high level dynamic compaction, in conjunction with several great engineering experience beyond the code. Suggestions on the design parameters beyond the code are offered for engineering applications and provide a basis for code development.

Keywords: high energy level dynamic compaction; application; development; effective depth of improvement(EDI)

0 引言

强夯法是加固碎石土、砂土、低饱和度的粉土与粘性土、湿陷性黄土、素填土、杂填土等地基的一种适用性广、经济高效、节能环保的处理方法, 已在国内数千项工程中广泛应用, 取得了良好效果^[1-6]。我国自 1975 年开始介绍与引进强夯技术, 1978 年开始在工程中试用。由于我国地震高烈度区(可液化砂土区)、湿陷性黄土区和软粘土区分布广泛, 近年来又广泛开展了围海造地, 为强夯技术在我国的发展应用提供了良好的客观条件。在这些区域的建设项目中, 由于强夯技术的合理而有效应用, 大大缩短了施工工期, 节省了工程投资, 取得了良好的经济与社会效益。工程实践表明, 只要环境和地基条件适宜, 强夯法是造价最省、工期最短的地基处理方法。

现行《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)和广东省《建筑地基处理技术规范》(DBJ15—38—2005)中的最高能级为 8 000kN·m, 《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025—2004)中为 8 500kN·m。而实际工程中, 碎石土回填地基上的最高能级已经达到 16 000kN·m, 目前

正在进行 18 000~20 000kN·m 能级的试验; 湿陷性黄土地基上的最高能级已经达到 12 000kN·m, 目前正在进行 15 000~17 000kN·m 能级的试验。工程实践的开展如火如荼, 工程界对强夯技术的发展也是见仁见智。在高填土和深厚湿陷性黄土等工程中是否有必要进行更高能级的强夯试验和研究, 其加固效果如何, 是当前工程界关心和思考的问题, 也是世界范围内亟待解决的重要课题。结合住房和城乡建设部“高能级强夯加固机理研究与专用机械研制”课题组的研究成果和工程实例, 对高能级强夯技术的发展提出见解, 以期与行业内的专家学者共同探讨。

1 国内工程与市场现状

随着我国经济的持续快速健康发展, 建设用地紧

^{*} 国家住房和城乡建设部科研攻关基金资助项目: 高能级强夯地基加固机理工法研究与专用机械研制(04-2-016); 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), 软基厚填土处理与工后沉降控制技术研究(08-1A类-0215-基), 上海市标准《地基处理技术规范》修编(J01Be-011-0707-000707-3类-0059-基)。

作者简介: 王铁宏, 博士, 研究员, Email: sh191@126.com.

缺矛盾日益突出。与其他国家一样,我国也采用大规模的“围海造地”、“填谷造地”等有效方法。但围海、填谷造地堆积起来的场地不仅非常疏松,而且还常夹杂有淤泥杂质,极不均匀,若不进行处理,根本无法作为建设用地。国内大型基础设施建设的发展和沿海城市填海造陆工程以及西部大开发,都给强夯技术的广泛应用和发展提供了条件。据“九五”、“十五”期间强夯的增长速度预测,“十一五”期间每年需采用强夯法处理的地基有1 800~2 600万 m^2 。具体有以下几种情况:

一是山区高填方工程,如某些开山填谷工程,最大填土厚度超过35m,辽宁、重庆、山西、河南和湖南等地约20余个重大项目的最大填土厚度超过了40m。这些项目一般工期紧、任务重,不容许实现5~8m一层的分层强夯,而且很多项目批复下来时场地已经一次性回填完成。为了使其地基强度、变形及均匀性等满足工程建设的要求而最终选用了高能级强夯法进行处理。

二是抛石填海工程,其传统地基加固做法是吹填完成后进行2~3年的真空预压或堆载预压。由于工期太长,且承载力提高有限,传统做法无法满足要求。此类“炸山填海”、“炸岛填海”等工程中回填的抛石、海水对钢材和混凝土的腐蚀性等问题都大幅增加了桩基施工的难度、工期和造价,也促成了高能级强夯的大量应用和快速发展。部分工程抛石和淤泥层的最大厚度达到了25m,如福建、广东、山东、广西、浙江等近30个国家重大工程项目,经方案经济、技术、工期等综合比选后采用了高能级强夯地基。

基于以上分析不难看出,高能级强夯技术的发展是有其客观基础的,是一种必然趋势,在很多情况下是惟一的选择。目前,强夯法的应用在深度和广度上都在进一步迅速发展,市场前景广阔。

2 高能级强夯应用和发展的客观性

随着工程建设的发展,高能级强夯越来越显示出其应用和发展的客观性和必然性。

甘肃省某大型石油化工场地,占地面积约80万 m^2 ,湿陷性黄土的湿陷程度由上向下由II级自重湿陷性黄土一直渐变为非湿陷性黄土,湿陷性黄土的最大底界埋深在16m左右。设计要求消除全部湿陷性,根据黄土地区经验,可用于该场地的地基处理方法有垫层法、强夯法、挤密法和预浸水法。垫层法仅适用于浅层处理;预浸水法可消除湿陷性,但其仅为一种初步处理,处理后还需要二次处理以消除过大的工后沉降,需水量较大,质量不宜控制,施工前需要场地大量钻孔以加快浸水,浸水后场地恢复时间长。

以30 000 m^3 油罐为例进行经济对比分析,处理要求承载力 $\geq 250kPa$,消除16m范围内黄土的湿陷性。

若采用挤密法处理,桩径400mm,间距1m,正方形布置,历经钻孔、灰土拌和、挤密三道工序,按桩长16m计算,地基处理的费用约211万元,工期约2个月。若采用16 000 $kN \cdot m$ 高能级强夯法一次处理,处理面积放大至2 642 m^2 ,地基处理总造价约53万元,预计工期约30d。若采用分层强夯法,先开挖6m深,采用8 000 $kN \cdot m$ 能级强夯后,再回填采用6 000 $kN \cdot m$ 能级强夯,地基处理和土方开挖回填总造价约70万元,预计工期约50d。

以24m \times 96m工业厂房为例进行经济对比分析,处理要求承载力 $\geq 200kPa$,消除10m范围内黄土的湿陷性。若采用挤密法处理,桩径400mm,间距1m,按桩长10m计算,地基处理的费用约133万元,工期约2个月。若采用8 000 $kN \cdot m$ 高能级强夯法进行处理,地基处理总造价约27万元,预计工期约25d。

从以上分析可以看出,对油罐地基,16 000 $kN \cdot m$ 高能级强夯法一次处理与挤密法相比,费用约为挤密法的1/4,工期约为其1/2。与分层强夯法比较,费用节省约1/4,工期缩短40%。对工业厂房地基,8 000 $kN \cdot m$ 高能级强夯法与挤密法相比,费用节省约4/5,工期缩短60%。经过黄土地区多位专家的多次技术、经济、工期论证后,最终选用了客观可行、性价比最优的最高能级达16 000 $kN \cdot m$ 的高能级强夯法进行地基处理。

3 高能级强夯应用和发展的惟一性

高能级强夯的应用和发展在某些大型项目中具有惟一性。在填海造地陆域形成时,如果回填碎石土深度较大,形成的地基比较疏松、空隙较大,而且随造地规模增大,回填土厚度深达15m甚至20m以上,采用常规地基处理方法难以处理,即使采用桩基,由于块石影响,不仅施工难度较大,而且无法解决深厚填土的自重沉降问题。在这种情况下,高能级强夯法是地基处理惟一可供选择的方法,从这种意义上讲,高能级强夯具有排他性和惟一性。

辽宁省某大型船舶建造设施工程船体联合工场地基处理工程,占地面积25万 m^2 ,原陆域形成设计方案为先建坝拦水,抽水清淤,清理已回填区域的大量抛石,再炸山填海,且必须将块石的粒径均粉碎至5cm以内,最后对地基进行注浆处理,再做 $\phi 800$ 灌注桩。由于考虑该场区回填层尚未固结,海积相的压缩性比较高,承载力低。若采用桩基,有施工难度大、造价高、工期长等诸多困难,即使增加大量额外费用提高上部结构的刚度,也难以保证差异沉降满足要求和变形协调。

在充分考虑该工程的地质资料、上部结构和荷载特点、变形要求、工期等的基础上提出了目前来讲是惟一的、也是最优的用高能级强夯法进行处理的方案。

在陆域形成过程中就省去了拦坝清淤、清理回填区域大量抛石和破碎块石,而代以直接一次回填整体推进,不仅加快了陆域形成进度,而且大幅节省了费用。施工中采用了异型锤联合平锤高能级复合强夯的五遍成夯新工艺,不仅满足了结构承载力要求,而且大幅减小了回填碎石土的差异沉降。该方案为建设单位节省了近2500万元的造价,缩短工期14个月。项目已投产三年,柱基和地坪最大沉降量仅1.5cm,效果良好。

舟山某造船厂综合仓库及管子加工车间,由人工填土塘渣层和海相沉积的淤泥质软土层组成,其中层①₁塘渣回填料,主要由凝灰岩块石组成,炸山后直接回填,块石径10~100cm,呈棱角状;层①₂塘渣回填料,主要由粘土和块石组成,粘土占60%,块石径10~150cm;层②淤泥,流塑,全场地分布;层③含砂砾粘性土,松散,砂砾占10%,局部相变为中粗砂;其下为全风化凝灰岩。该项目采用表层2000kN·m低能级强夯后进行预钻孔然后施打PHC管桩,钻孔难度很大,桩基施工过程中30%桩被打坏,40%的桩达不到标高要求。厂房建成后3个月地坪和部分柱基沉降已经达到30cm,吊车卡轨,不得不投入大量资金多次进行维修。其他多个工程实例也证明了高能级强夯法对开山石回填厚度较大地基的惟一性和有效性。

4 高能级强夯应用和发展的必然性

高能级强夯法是随工程需要应运而生的,随国内大型基础设施建设和沿海城市填海造陆工程扩大而发展的。近年来随着技术的发展,我国自主研发的CGE系列高能级强夯专用机具在很多大型石油、化工、船舶项目中得到应用,目前国产高能级强夯机施工能级最高可达25000kN·m。

在填海造地、开山回填料碎石土地基处理中,由于碎石土颗粒较大、土质疏松,且厚度大多在10m以上,这种地基的处理以降低地基土的压缩性、达到减少工后沉降为主要目的。采用其他方法或很难处理、效果太差,很难达到目的,或成本太高、工期太长,如堆载预压方法少则半年,多则数年。而采用高能级强夯法可以一次性处理到位,工期可以大大缩短至3~5个月,根据目前已经完成的工程看,地基处理效果显著。

目前,广东、福建、广西、浙江、山东、辽宁等沿海地区和西南部山区碎石填土地基大量采用高能级强夯法进行处理。如广西某石化工程,占地面积近300万m²,海岸丘陵地貌,场区内原有15座山包,人工平整后填土最大厚度约16m,该工程经多种地基处理方案的比选后采用了高能级强夯法,其中采用10000kN·m以上能级施工的面积达到了108万m²。

5 高能级强夯应用和发展的经济性

强夯技术不仅是一种节能环保的地基处理技术,

而且在很多地基处理项目中具有较高的性价比。如广东某项国家重点工程(60万m²开山石回填料地基),在进行地基处理方案的可行性分析时,为确定一种较为经济合理的地基加固方案,根据地质情况在该场地共进行了三种地基加固方案的现场对比试验。

(1) 挤密碎石桩复合地基加固方案

回填料土地基经挤密碎石桩加固后,复合地基承载力可从100kPa提高到133~167kPa,平均仅提高50%,而费用高达200~300元/m²,平均每提高10kPa需要费用50元/m²。如果该工程60万m²回填料土地基全部采用这种方法加固处理,总费用约为一亿元,且工期很长,所以该方案不宜作为大面积地基加固方案。

(2) 钢筋混凝土桩基础方案

根据该工程的试桩结果,填方区回填料土地基的钻孔灌注桩承载力比挖方区同类钻孔灌注桩承载力约低40%,这充分反映了4~8m厚的回填料土对桩承载力的影响。再加上回填料土湿陷性造成的负摩阻力影响,每根桩约有近一半的桩长不能发挥作用,按全部工程2万根桩计算,将近一万根桩被白白打入地下,浪费十分惊人,而且工期大大延长,所以采用桩基础也不合理。

(3) 强夯法加固处理方案

回填料土地基经强夯加固后,地基承载力可从100kPa提高到200kPa左右,按50元/m²加固费用计算,平均每提高10kPa仅需费用5元/m²,成本是挤密碎石桩复合地基加固方案的10%,该工程60万m²回填料土地基如果采用强夯法加固处理,仅此一项就比挤密碎石桩复合地基加固方案节省投资数千万元。与上述两种方案相比,强夯法还可大大缩短工期,因此,只要地基条件和环境适宜,强夯法是造价最省、工期最短的地基处理方法。

6 高能级强夯设计施工的复杂性

强夯法特别是高能级强夯法地基处理在很多项目中具有明显的优势,但必须因地制宜地进行设计和施工才能扬长避短,使其更好地为国民经济建设服务。

人工回填料或原始工程地质条件的复杂性、上部结构变形的敏感性和承载力的差异性等均导致了强夯法设计的复杂性,而且能级较高时超出规范,对工程经验的依赖性很强。设计和施工单位对高能级强夯施工安全的复杂性都应有清醒的认识。

目前对于强夯法地基处理设计包括强夯法设计和强夯置换法设计,在进行具体方法设计前,应综合考虑场地地层条件和软弱层情况、上部荷载大小、对承载力和变形的要求、是一次处理到位还是预处理后还需做打桩等因素,选择适宜的施工工艺。选定了施工工艺后,依据需加固土层厚度确定强夯能级,根据规范及经

验确定强夯主夯点间距,按照规范要求的强夯收锤标准进行试验性设计,通过试夯判断单点夯击能是否合理,确定最佳单点夯击数、主夯点间距等参数。

强夯法设计是一个系统工程,是一个变形与承载力双控且以变形控制为主的设计方法,对于高能级强夯工程尤其如此。具体来讲,强夯地基处理的设计要结合工程经验和现场情况,主要从夯锤、施工机具选用、主夯能级确定、加固夯能级确定、满夯能级确定、夯点间距及布置、夯击遍数与击数、有效加固深度、收锤标准、间歇时间、处理范围、监测、检测、变形验算、稳定性验算、填料控制、夯坑深度与土方量计算、减震隔振措施、降排水措施、垫层设计、基础方案、结构措施这 22 个方面进行优化设计。

强夯的有效加固深度既是反映地基处理效果的重要参数,又是选择地基处理方案的重要依据。根据课题组在国内辽宁大连、广西钦州、山东青岛、辽宁葫芦岛、甘肃庆阳等地参与 12 000kN·m 能级以上的工程经验和洛阳大化纤、铜川新区、山西焦化、万家寨引黄工程等黄土地区工程经验,对于超规范强夯能级处理填土和原状土地基的夯点间距及有效加固深度统计建议见表 1(黄土参数将另文表述),对于 8 000~16 000kN·m 能级强夯的收锤标准宜适当从严,必须确保单点总夯击数才能确保加固效果。20 000kN·m 比 10 000kN·m 能级增加了 100%,有效加固深度仅增加 50%左右,成本却增加了近 100%。虽能级越高,有效加固深度越大,但仅靠能级增加得到的有效加固深度的增幅衰减明显,故对要求有效加固深度更大的工程,不必一味地增加能级,可考虑分层处理或结合其他方法,经技术、经济、工期综合比较后选择采用。

高能级强夯与有效加固深度关系及建议夯点间距 表 1

单夯夯击能 /kN·m	填土地基加固深度 /m		原状土地基加固深度 /m		建议主夯点间距 /m
	块石填土	素填土	碎石土、砂土等粗颗粒土	粉土、粘性土等细颗粒土	
10 000	12.0~14.0	15.0~17.0	11.0~13.0	9.0~10.0	9.0~11.0
12 000	13.0~15.0	16.0~18.0	12.0~14.0	10.0~11.0	9.0~12.0
14 000	14.0~16.0	17.0~19.0	13.0~15.0	11.0~12.0	10.0~12.0
15 000	15.0~17.0	17.5~19.5	13.5~15.5	12.0~13.0	11.0~13.0
16 000	16.0~18.0	18.0~20.0	14.0~16.0	13.0~14.0	12.0~15.0
18 000	17.0~19.0	18.5~20.5	15.5~17.0	14.0~15.0	13.0~16.0
20 000	18.0~20.0	19.0~21.0	16.0~18.0	15.0~16.0	15.0~18.0

7 强夯法的节能环保性

强夯法是一种节能、节地、节水、节材的地基处理方法,符合我国工程建设“资源节约性、节能环保性”发展方向。如在上述辽宁某船厂项目中,由于合理而有效应用高能级强夯法,直接节省钢材 1 200t,节省混凝土超过 6 万 m³。大连某石油仓储项目,因采用了高能

级强夯法地基加固+环墙浅基础的方案,直接节省钢材 2 200t,节省约 48 000m³混凝土。按此比例推而广之,如果全国每年有 500 万 m² 高能级强夯面积,总量可直接节省约 40 万 t 钢材、450 万 m³ 混凝土、180 万 t 水泥,间接可节省 60 万 t 标准煤、480 万 t 水、13 860 万 kW·h 电,因煤炭和电力消耗量的减少而减少烟粉尘排放 350t、SO₂ 排放 9 000t,其节能环保的优势和效果是显而易见的。

8 结语

高能级强夯的应用和发展有其客观性、必然性、排他性、经济性、复杂性,强夯技术的应用对于节约水泥、钢材,降低工程造价,减少污染、保护环境、净化人类生存环境等许多方面都有很大贡献。多年工程实践证明,强夯技术的广泛应用有利于节约能源和保护环境,是一种绿色地基处理技术,是满足市场需求的市场选择,其进一步的理论研究和工程应用必然使强夯这一经济高效的地基处理技术更好地服务于我国的工程建设事业。

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 000kN·m 高能级强夯系列试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [3] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 等. 10 000kN·m 高能级强夯地面变形与孔压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 759-762.
- [4] 王铁宏, 水伟厚, 等. 高填方碎石土地基 16 000kN·m 能级强夯试验研究[C] // 第十届土力学及岩土工程学术会议论文集(下册), 2007.
- [5] 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.
- [6] GB50025—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.
- [7] 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, 2005(3): 27-38.
- [8] 王铁宏, 水伟厚. 强夯技术与节能环保[J]. 节能与环保, 2005(11): 6-9.

北京市建筑设计研究院举行六十周年院庆活动

2009 年 10 月 28~29 日,北京市建筑设计研究院举行了六十周年院庆活动,展示了 60 年建筑设计的丰硕成果,同期举办了相关的论坛和展览活动。活动包括三个展览——“第二届全球华人青年建筑师奖”作品展、“北京妫河建筑创意区”概念规划设计国际竞赛作品展、“超越奥运的城市”国际作品展。院庆之前北京院推出了六卷本纪念丛书,分别是《纪念集》、《作品集》、《论文集》(建筑、结构、设备、电气各一卷)。北京院院庆突出了企业品牌的塑造,首次推出了《北京市建筑设计研究院(BIAD)品牌报告》,党委书记、院长朱小地在宣读该报告时说:“《报告》不单是经验的总结,更是使命的昭示。品牌竞争的时代已经到来,作为国有大型民用建筑设计机构,BIAD 别无选择。”