

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211120052

国内外能量桩技术标准对比分析与探讨*

戴国豪¹, 孔纲强¹, 钟国², 赵祯², 王忠涛³, 杨庆³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 大连地铁集团有限公司, 辽宁大连 116001; 3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 随着我国碳达峰、碳中和目标的提出, 基于浅层地温能的能量桩技术受到工程技术人员的广泛关注, 能量桩技术标准是相关技术推广应用的基石。对比中英法等国内外能量桩技术标准, 从法规与合同责任、工程勘察、传热性能测试、换热管路、系统设计与计算五个方面探讨了能量桩技术标准的异同点, 分析了各国技术标准内容中的不足之处, 对于部分不足提出了完善方法, 以期为我国能量桩技术的标准化发展与提升标准编制水平提供参考。通过对比分析发现, 国内外能量桩技术标准的核心方面如传热性能测试、能量桩施工工艺参数、系统设计计算等内容均大同小异, 其中英国能量桩技术标准涵盖的内容相对更为全面。

关键词: 能量桩; 技术标准; 设计与计算方法; 施工; 检测与测试

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0945-08

Comparative Analysis on Technical Standards of Energy Piles

DAI Guohao¹, KONG Gangqiang¹, ZHONG Guo², ZHAO Zhen²,
WANG Zhongtao³, YANG Qing³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Dalian Metro Co., Ltd, Dalian 116001, China; 3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: With the proposal of carbon peak and carbon neutralization in China, the energy pile technology based on shallow geothermal energy has been widely concerned by engineers and technicians, and the technical standard of energy piles is the cornerstone of the promotion and application of related technologies. In this study, the domestic and overseas technical standards of energy piles, such as China, Britain, and France, are compared and the differences and similarities between the technical standards are discussed from five aspects, including the laws and the contract responsibility, geotechnical investigation and surveying, heat transfer performance test, heat exchange pipes, system design and calculation. The deficiency in the contents of national technical standards is analyzed and the proposed method of the insufficient parts is improved to provide a reference for the standardization development of energy pile technology in China and the improvement of the level of standard compilation. Through

* 收稿日期:2021-11-12;修回日期:2021-12-27

基金项目:大连市揭榜挂帅项目:地铁车站地温能智能建造关键技术及应用(2021JB12SN047)资助

作者简介:戴国豪(1997—),男,博士研究生。主要从事能量桩技术方面的研究。E-mail:daiguohao97@163.com

通讯作者:孔纲强(1982—),男,教授,博导。主要从事能源岩土工程方面的教学与科研工作。

E-mail: gqkong1@163.com

comparative analyses, it is found that the core aspects of domestic and overseas energy pile technical standards, such as heat transfer performance test, energy pile construction process parameters, system design and calculation, are the same in essentials while differ in minor points, among which the British energy pile technical standards cover more comprehensive contents.

Keywords: energy pile; technical standards; design and calculation; construction; detection and testing

引言

随着“十四五”规划纲要的发布推行,持续改善环境质量、加快发展方式绿色转型已成为当下我国环境治理体系的重要组成部分。能量桩(又称能源桩)是一种可再生的清洁能源技术,用于为建筑物供暖和制冷提供日益增长的能源需求^[1-2]。

近年来,国内外能量桩技术应用日臻完善。英国牛津大学基布尔学院的基坑围护桩被设计为能量桩,建筑的热负荷为85 kW,冷负荷为65 kW,测试运行表明,能量桩系统可以满足建筑供暖制冷需求;奥地利布雷根茨艺术中心能量桩及能源地下连续墙,换热管最大冷却能力达120 kW^[3];维也纳地铁2号线延伸段的四个地铁车站能源地下结构,能源车站设计总制热量449 kW、总制冷量231 kW。我国南京朗诗国际街区项目内1 200根桩基础中埋设了U型或W型换热管,2007年项目运行至今,效果良好^[4];天津市梅江综合办公楼、宁波某办公楼、浙江省温州市会所、吴江中达电子营建处办公楼、上海某六层住宅楼、塘沽凯华商业广场等均采用了桩埋管地源热泵系统。上海世博会汉堡馆的能量桩换热量达37 kW^[5]。

近年来,我国积极实施中国标准走出去战略,助推中国与各国之间的贸易和投资,提升沿线国家经贸发展水平。改革开放40多年来,中国的标准国际化呈现出逐步推进态势,开启了从标准引进来向标准走出去的战略转变^[6]。在能源地下结构技术蓬勃发展之际,面向工程应用,各国分别制定了能量桩相关的技术标准,对能量桩技术发展得较为完善的国家与地区设计施工的经验方法进行分析总结。为此,本文旨在重点探讨中、英、法三国技术标准体系中能量桩设计、施工及测试等方面的异同点,存在的不足之处及完善方法,以期更好地服务能量桩等能源地下结构工程应用。

1 现行技术标准概况

1.1 德国

德国工程师协会(Verein Deutscher Ingenieure, VDI)于2001年编写发布了《地下热泵系统的热利用》^[7];该标准规定了政府许可、环境、地下热泵系统和钻孔埋管设计等方面内容。此标准偏重于介绍传统地源热泵工程的设计计算,未涉及能量桩的内容。

1.2 英国

地源热泵协会(GSHPA)于2012年发布了《能量桩设计、安装和材料标准》^[8];该标准(后文简称为“英国标准”)涵盖了能量桩建造的材料信息和内部管道等内容,包括歧管和(或)冲洗阀的布置,直到集管进入机房的入口。

1.3 法国

法国土壤力学委员会(CFMS)和SYNTEC-INGENIERIE于2017年制订了《热地质构造的设计、尺寸和实施建议》^[9];该标准(后文简称为“法国标准”)规定了能源地下结构的工作原理、环境参数和岩土体热物性参数参考值以及结构中温度变化的影响、能源地下结构的建设性规定、地热资源的立法和保险等方面的内容。

1.4 中国

我国于2018年发布了行业标准《桩基地热能利用技术标准》^[10];该标准(后文简称为“中国标准”)详细规定了工程勘察、能量桩技术的设计、原位传热性能测试、计算、施工及质量验收等方面内容。

1.5 瑞士

瑞士工程师和建筑师协会(SIA)早在2005年

即发布第一部能量桩标准《地基桩和其他与地面接触的混凝土构件的地热利用》^[11],2021年SIA发布了最新的标准“SIA 384/6:2021”,新标准更详细地考虑地热钻孔换热器(BHE)之间的热相互作用效应。

2 国内外技术标准对比分析

2.1 法规、条例与合同管理

2.1.1 法规条例

为提高工程施工管理水平,保证工程质量和安全,各国的标准均有涉及建设工程法规、合同管理以及明确工程参与各方权责义务的章节。英国、法国均单独编写章节以阐述政府机构监管要求、各工程参与方的合同责任等内容,法国标准编写了保险一章(承保原则)。

英国标准涉及到的法规条例有:《工作健康与安全法》第74号^[12];《工作健康与安全管理法》第99号^[13];《建筑(设计及管理)条例(2007版)》^[14](CDM 2007);《建筑业健康与安全(设计与管理)条例(2007版)》^[15](HSE 2007);《地下水保护:政策与实践(2007版)》^[16];《地源加热和冷却方案的环境良好实践指南(2011版)》^[17];《关于在煤炭附近钻孔或打桩时管理危险气体风险的指南(2012版)》^[18];《微型发电安装标准 3005》^[19](DECC 2012)(承包商承担微型发电热泵系统的设计、供应、安装、开工调试和移交的要求);《城乡规划法 2008年版》^[20]:规划许可规定。法国标准提及了关于小型地热活动一般要求的法令:2015年颁布的《绿色发展能源过渡法》。由于立法者没有对这些正在发展的能源地下结构技术做出真正的规定,而且这些技术的执行越来越多地与新的基础设施的建设联系在一起,因此正在为能源地下结构提供保险,政府打算加强对专业做法的监督。由于这些能源地下结构的数量很少,目前还无法对事故进行评估,但专业人员必须确保在工作开始前对第三方的风险进行预防性分析。法官们可能会根据《绿色发展能源过渡法》仔细审查所造成的损害,这是目前能够提供参考的唯一法案。由此可见,英国标准是罗列工程法规条例最为全面的,而我国标准虽然对能源地下结构的设计、施工条文规定地最为详细,但并未像英法两国标准一样单列法规条例章节进行强调说明。

2.1.2 合同管理

建设工程合同法律制度与人员和培训要求方面,英国标准分解了设计、施工、监理、勘察等各方主体质量行为的责任,并把政府监督内容单独罗列。根据土木工程师协会2007年颁布的《桩基和嵌入式挡土墙规范(第2版)》(ICE SPERW)^[21],对于普通桩基础,ICE SPERW在章节C1.4和表C1.1中明确规定了工程师设计和承包商设计的责任。对于能量桩设计与施工,进一步定义了各方的责任划分,包括:基础方案设计(包括安全工作载荷和桩位)、打桩或围墙方法的选择、承受规定荷载的墙构件桩的设计、设计热回路以提供指定的热负荷。标准还分别从业主方、设计方(机电设计方、工程师、桩设计方、地源热泵设计方)、施工承包方(主承包方、桩承建方、地源热泵承建方、基础工程承包方、机电设计承包方、热回路制造商)分别阐述了彼此的合同责任与各方人员的上岗要求。法国标准将合同责任分为建造过程中与验收后两部分:建造过程中的合同责任主要体现在结构损坏(如墙体塌陷、下部设备断裂等);过程损坏;对已有工程的损坏;对第三方的损害。验收后的合同责任主要体现在:现场一切险维护保修(一年或两年)、现场维护损坏;十年民事责任担保;在法国为土木工程(非强制性担保)提供十年的担保;外部事件的财产损坏保险(不论是否有经济损失)。

关于法国标准中特有的保险原则部分的内容,保险公司提出的两项主要承保原则是:工程性能缺陷、额外能源的过度消耗或与最初的计划不成比例。

2021年1月1日开始实施的《中华人民共和国民法典》(以下简称“民法典”)第三编合同编中单独列出“建设工程合同”一章,对于保险法而言,民法典与保险法属于一般法和特别法的关系,意味着特别法立法主旨及内容应当符合并遵照一般法的规定,但是特别法对某一事项有特别规定的,特别法优于一般法,民法典合同编通则分编关于合同成立的规定也适用于保险合同。经济全球化促使国内市场和国际市场不断接轨,这就决定了作为市场经济基本法的合同法,一方面要适应国内统一市场的需要,另一方面也要与国际惯例相衔接。中国标准的影响力仅在中亚、南亚认可度较高,而在经济发达、标准成熟的国家,我国标准推进则受到一定的阻力。这在一定程度上说明我国标准对于参与工

程的各方人员管理能力要求有待完善,特别是电气、环境等方面的法规条例应当在日后编制标准时予以添加与强调说明。另外,建设工程合同和劳动合同法律制度也应在编制时简要说明以体现标准的国际化编制思路,如工程总承包、工程勘察、工程设计、施工合同等建设工程合同在能量桩建设周期中的应用。因此在能量桩的建设周期中建设工程合同与保险合同的重要性不言而喻。

2.2 工程勘察

工程勘察的主要目的是在进行地基设计时,排除其中的安全隐患,进一步提高工程质量。对于地下结构的建设而言,工程勘察是极为重要的工作。

我国标准将工程勘察分为工程场地与环境状况调查、专项岩土工程勘察和浅层地温能勘察,并详细地将勘察项目的步骤和参数做了阐述。

英国标准仅在“Desk Study”、“Site Investigation”两节涉及了工程勘察内容,分别对应着中国标

准中工程场地与环境状况调查、专项岩土工程勘察和浅层地温能勘察内容。现场勘察工作细则载于BS5930/BS EN 1997-2^[22]。

法国标准关于工程勘察的内容较为分散并且阐述得较为粗略,主要集中在“Facteurs de faisabilité technique vis-à-vis du terrain”章节。

中英法三国工程勘察内容基本包含场地与环境调查、岩土工程勘察和地温能勘察三个方面,其中岩土工程勘察方面包含水文条件、土壤热导率与化学性质等内容,可见地下水与桩周岩土体土壤类型对于能量桩换热效率是最有影响的客观因素;地温能勘察方面包含原位热响应测试(TRT)与实验室测试的地面热导率和热容。岩土综合导热系数是能量桩换热系统的重要参数,对整个换热系统的设计、运行效果以及投资成本起控制作用。目前工程上应用较多的岩土热响应试验能较为准确地估算岩土综合导热系数。热响应测试将在下一节重点介绍。三国标准中关于工程勘察的详细内容见表1。

表1 各国标准工程勘察内容异同点对比

Table 1 Comparison of the difference between the relevant national standard engineering survey

	中国标准 ^[10]	英国标准 ^[8]	法国标准 ^[9]
工程场地与环境状况调查	1、交通设施、高压架空线、地下管线和地下构筑物的分布的工程场地 2、相邻建筑物安全等级、基础形式及埋置深度 3、附近类似工程地质条件场地的桩基工程试桩资料和单桩承载力设计参数	1、障碍物、现有的基础设施;地下和架空服务的标识和位置 2、界墙问题 3、文物古迹 4、以往的场地使用 5、地面和/或地下水的潜在污染 6、潜在的未爆炸弹药 7、钻井设备接入的地面条件 8、地下隧道、采矿(石) 9、地质学与水文地质学	1、利用BRGM制图空间获取地面地热潜力地图和最小地热能法规分区 2、与地形、推覆体和周围环境的相互作用 3、拟建工程的坝效应
专项岩土工程勘察	1、工程水文地质条件 2、地基土受温度影响的工程性质 3、土的矿物成分和化学成分分析	1、地下水位 2、现场地层学 3、强度和刚度土壤特性 4、土壤的化学性质	1、水动力特性(地下水流速) 2、土壤热导率,体积热容量
浅层地温能勘察	1、岩土体的热物性参数实验室测试 2、现场岩土热响应试验(钻孔热响应测试)	1、基于实验室测试的地面热导率和热容 2、基于热响应测试的热导率 3、在桩的深度上存在现场温度分布 4、地面渗透率	1、参考文献方法(例如参考类似性质的场地) 2、确定某些参数的经验法 3、热响应试验(TRT),用于现场验证土壤的导热性

2.3 传热性能测试

S.P. Kavanaugh 的研究表明,导热系数存在

10%的误差将导致4.5%~5.0%的埋管设计长度误差^[23,24],因此准确地测量土壤的热物性参数非常关键。测量土壤热物性参数通常采用热响应测试

法,热响应测试包括恒热流法(TRT)和恒定进口温度法(TPT)。两种测试方法都是导热的反问题,即利用测试得到的温度场或换热参数来反推岩土热物性参数。恒定热流法是在恒定加热功率下,通过温度分布来计算岩土的热物性参数。

中英法三国均将桩径 $D=300\text{ mm}$ 作为热响应测试的临界点:当 $D\leq 300\text{ mm}$ 时,能量桩热响应测试可采用钻孔埋管热响应测试或试验桩热响应测试;当桩径 $>300\text{ mm}$ 且为大型项目(应用建筑面积 $>5\ 000\text{ m}^2$ 或供热/制冷量 $>500\text{ kW}$)时,宜采用单桩埋管热响应测试。对于达到传热准稳态时间三国的规定也是一致的,均按式(1)计算:

$$t = \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (1)$$

式中, r_0 为桩的半径(m); α 为桩周围土壤的热扩散系数的参考值(m^2/s)。

法国标准热响应测试细则载于PR NF EN ISO 17628^[25]。

表2 TRT与TPT法优缺点对比

Table 2 Comparison of TRT and TPT methods

	恒定热流法(TRT)	恒定进口温度法(TPT)
优点	高效便捷	可反映热泵系统实际的运行状态,直接得出单位深度换热量
缺陷	测试工况不能反映热泵系统实际的运行状态,试验结果不能直观给出参考单位井深换热量	对于测试的要求高,计算岩土热物性参数的模型较为复杂

另外,中国标准还规定,能量桩的出口温度稳定后,其温度宜高于岩土初始平均温度 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 以上且维持时间不应少于 24 h ;能量桩单管流速不应低于 0.2 m/s 。增加了地下连续墙埋管换热器热响应测试,在基底以下部分以地下连续墙轴线为中心,沿径向在连续墙中心、墙土界面和周边岩土地基中安装温度传感器;位于基础底面以上部分,在墙体和土体内布置温度传感器。在热响应测试中,应读取各测点的温度随时间的变化值,并结合数值计算方法分析地下连续墙埋管换热器的换热能力。

2.4 换热管施工与检测

三国标准均较为详细编写了换热管路的要求、施工参数要求等。换热管与换热液以对流换热形式进行热交换,换热液在换热管内的流速会影响管壁与换热液的对流换热系数,从而影响换热效率,地面热交换器部件的质量和耐用性要求都非常

高。因此,换热器材料性能与施工质量对于能源地下结构的换热性能具有至关重要的影响。中国标准特别罗列了桩内单U型、双U型并联、W型、三U型或螺旋型换热器等布管形式;地下连续墙中采用W型、改进型W或单U型埋管形式且规定了支管间距;连续墙内的布管形式源于上海自然博物馆的工程经验。法国标准介绍了桩内埋管的圈数与桩径的对应关系,嵌入混凝土中的构件(换热管或纵筋)之间的最小距离为 $4\times d_{\text{max}}$ (d_{max} 是最大骨料的直径),如果符合钢筋的最终结构功能,则仍有可能将管道固定在纵向钢筋上,简略介绍了模制墙板内换热管的布置,但并未详细介绍管道的施工布置方式。中法换热管详细施工参数见表3。英国标准未见绑扎间距与换热管距桩顶和底部等具体数值的规定。

关于管道最小弯曲半径,中英标准都考虑了两个因素:管材与安装温度。其中管材分为PE100/

表3 中法标准换热管施工参数要求对比

	中国标准 ^[10]	法国标准 ^[9]
绑扎间距/m	≤0.3(塑料绑带)	≥1(金属材料)、≥0.5(塑料材料); 0.25(距离回路底部和回路顶部 1 m 内)
换热管距钢筋笼底部距离/m	≥3(摩擦型桩)	≥0.25
保护套管长度/m	≥0.5 m(桩顶标高以下)、≥1.5 m(桩顶标高以上); 套管外径≥2 d(换热管外径)	—
回路距离桩顶距离/m	—	≥0.20

PE100RV 与 PE-Xa 管,安装温度分为 0、10、20 °C,共分为 6 种工况并在每种工况下作详细规定(与管材外径有关);而法国标准规定在没有参考信息的情况下,弯曲半径 $r_c=20d$ (d 为管材外径),对应了中英标准安装温度 20 °C 下 PE100/PE100RV 管的最小弯曲半径。

关于管材外径、壁厚及各自的公差分别参见中国颁布的《地源热泵系统工程技术规范》^[26]附录 A、英国颁布的《BS EN 12201-2-2011》^[27]第 6 章表 1,二者规定的管外径及壁厚对应一致,英国标准规定了 16~2 500 mm 的管径,中国标准虽然仅规定了 20~400 mm 管径对应的壁厚及公称压力,但对于埋管的设计而言已足够使用。法国标准未见埋管管材外径壁厚等的具体数值规定。

中英标准均提及了桩施工及截桩过程中进行的观察测试、双向流量测试、A、B、C 型水压测试、深度测试等内容,而法国标准却基本未详细介绍,仅强调了管路保压而并未介绍具体措施与测试方法。

2.5 系统、结构与计算

中国标准和英国标准设计与计算的内容均分为了两部分:系统层面(宏观)与桩基结构(微观),英国标准使用了若干流程图、组织结构图和决策树等描述了各参与方的工作与职责;地源热泵系统设计部分包括热泵制造商的规格和热泵的运行参数、回路设计(即桩截面内换热管的数目和间距)、任何额外的混凝土要求、集水管工程设计、沟槽要求和回填、集水管阀室或阀顶直至建筑物界面。中国标准对于能量桩系统的大型能量桩系统采用动态设计计算;能量桩进行长期换热性能分析,以地下水流速 0.6×10^{-5} m/s 为界限,若高于此值可不进行动态设计计算,低于此值采用考虑地下水流动影响的综合导热系数作为岩土体导热系数,并根据流速对

传热影响程度选择纯导热或渗流与传热耦合的计算方法进行动态分析;系统的总体设计包括桩基和周边土体允许的温度变化范围、满足负荷需求的能量桩的规模与总长度、设计换热管环路中流体温度的范围;埋管的布置形式、水平环路集管的布置、循环水泵及热泵机组的选型。动态设计计算宜根据建筑冷(热)负荷、岩土体热物性、桩体热物性、桩内埋管布置方式等参数。

由表 4 可知,与传统桩基设计方法不同,除了单桩竖向承载力计算和确定桩的埋深与尺寸外,能量桩结构设计还需要考虑正常使用极限状态和承载能力极限状态下的结构-温度耦合作用。

英国标准桩基设计内容包括为初步研究、现场勘察、桩荷载、热负荷数据获取、桩基设计(承载能力极限状态、正常使用极限状态)。

中国标准桩体附加温度应力计算分为端承型桩与摩擦型桩两种情况考虑,对端承桩和桩顶受约束桩,附加温度应力 $\Delta\sigma = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E_c$;对于摩擦桩,忽略桩端部的约束作用温度变化引起的桩侧摩阻力和桩身轴向力最大值 $\Delta\sigma = -\alpha_T \cdot \Delta T \cdot E_c$ 。考虑温度作用效应的单桩极限承载力,应通过桩基热负荷-结构荷载耦合原位试验确定。

法国标准关于桩的设计计算部分分为力学性能、数值分析方法(传递曲线法、数值方法)、结构建模范围,整体偏向数值模型分析。温度力学性能分析模型分为完全自由桩与端部约束桩,与中国标准类似。其中端部约束桩应力变化 $\Delta\sigma = -E_c \cdot \alpha_T \cdot \Delta T$ 。

瑞士的新标准提出,地热钻孔换热器的设计是一个复杂的迭代过程,它必须至少考虑以下因素:建筑能源需求概况和由此产生的动态负荷分布;现场土体热物性;场地水文地质性质;可供钻孔利用的可用空间等,所以标准建议 BHE 设计应采用适当的数值建模程序,这类程序充分考虑 BHE 管道内发

表4 结构设计目标与内容

Table 4 Structural design targets and contents

	正常使用极限状态(SLS)	承载能力极限状态(ULS)
普通桩基	1、桩头沉降 2、不均匀沉降 3、混凝土应力 4、负摩阻力	1、地层分布及土体性质 2、剪切/径向应力 3、端承作用
能量桩	1、桩身轴向和径向热胀冷缩/桩头固定 2、轴向温度附加应力 3、循环温度效应 4、桩土界面的日常和季节性温度变化	加热降温循环荷载下的土体力学性质

生的流体动力学的环境下,详细分析其能源性能和效率。通过这种方式,设计人员可以设计出高效、灵活的BHE系统。

3 结论

各国的桩基地热能标准均详细编写了系统和能量桩设计方法、土体热物性测试方法、施工材料以及工艺参数等核心内容,英国的能量桩技术标准相对最为全面,各国标准的内容各有可取与不足之处:

(1)与英法标准相比,中国标准基本未编写各工程主体责任的详细规定,英法两国的标准特别增设了“监管和政府机构要求”、“合同、保险和责任”等关于政府监管和工程合同层面的要求,明确了各方的上岗要求与事故责任,这可以在一定程度上提高工程质量,健全项目管理体系,因此我国标准编制人员可以在编制标准时对于各工程主体的责任做出规定或阐述建设工程合同和劳动合同法法律制度的要求。

(2)中英标准对于工程勘察部分编写得较为详细,其中英国标准在场地勘察部分细化了某些方面,如界墙问题、文物古迹问题等。法国标准在场地勘察阶段还提到了地热潜力地图和最小地热能法规分区的确定方法。关于能量桩工程勘察中的一个重要内容:热响应测试。中英法标准均将能量桩径 $D=300\text{ mm}$ 作为钻孔埋管热响应测试和单桩埋管热响应测试的分界值;达到传热准稳态的时间的计算方式一致,此时间与桩径和土壤热扩散系数有关。较为特别的是,中国标准除了恒定热流法(TRT)外,还单独编写了恒定进口温度法(TPT)一节,恒定热流法适用于土壤物性参数测试,而恒定

进口温度法则适用于埋管换热能力的测试,两种测试都编写入标准,对于设计、施工方来说增加了热物性测试方法的选择余地。

(3)在布置管路的详细内容编写时,中国标准无疑是最为详细的,包括了桩内和地连墙内布管的形式、管材的选择、绑扎间距、最小弯曲半径、保护管路的措施等,法国标准也对桩内埋管的圈数、嵌入混凝土中的构件之间的最小距离等做出规定,而英国标准基本未编写布管形式的内容。虽然我国标准全面具体,但可能在一定程度上限制了其它布管形式的创新。

(4)系统结构与计算部分,以概率理论为基础的承载能力极限状态、正常使用极限状态均被中英法三国标准作为能量桩基可靠度分析与设计的方法,但与普通桩基的设计内容有些许区别,如温度附加应力和循环温度效应等,其中,法国标准的设计方法偏向于结构建模与数值方法分析;三国标准附加应力的计算均提出了完全自由桩与端部约束桩两种极端情况下的温度应力计算模型,在实际设计计算时,桩的受力状态介于两者之间。另外,刚颁布不久的瑞士新版能量桩技术标准强调了换热器之间热相互作用效应的影响,在系统的使用寿命内可能导致换热性能和效率大幅降低,所以在设计阶段使用数值建模程序可以达到降低热相互作用效应影响的目的,这是未来能量桩系统设计走向程序化、规范化的一项行之有效的举措。

参考文献:

- [1] Ng C W W, Farivar A, Gomaa S, et al. Performance of elevated energy pile groups with different pile spacing in clay subjected to cyclic non-symmetrical thermal load-

- ing[J]. *Renewable Energy*, 2021, 172:998-1012.
- [2] Laloui L, Sutman M. Experimental investigation of energy piles: From laboratory to field testing[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2020, 27: 100214.
- [3] 张谦. 2010年上海世博会“汉堡案例”暖通空调系统工程[C]//国际绿色建筑与建筑节能大会. 北京: 中国土木工程学会, 2015.
- [4] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. *Geotechnique*, 2006, 56 (2) : 81-122.
- [5] 夏才初, 曹诗定, 王伟. 能源地下工程的概念、应用与前景展望[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(3): 419-424.
Xia C C, Cao S D, Wang W. An Introduction to energy geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5 (3) : 419-424. (in Chinese)
- [6] 侯俊军, 蒋晴. 中国标准的输出与国际经济合作[J]. *国际经济合作*, 2015(5):12-16.
- [7] Thermische Nutzung des untergrundes erdgekoppelte wärmepumpenanlagen: ICS 27.080 [S]. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure , 2001.
- [8] Thermal Pile Design, Installation & Materials Standards [S]. Milton Keynes: Ground Source Heat Pump Association National Energy Centre, 2012.
- [9] Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des geostructures thermiques[S]. Rue de Berri: Comité Français de Mécanique des Sols & Syntec Ingénierie & Syntec, 2017.
- [10] 桩基地热能利用技术标准: JGJ/T 438-2018[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018.
- [11] Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen: SIA D 0190 [S]. Zürich: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2005.
- [12] Health and Safety at Work etc. Act 74[EB/OL]. (1974-12-01) [2021-08-30]. <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/1974/37/contents>.
- [13] The Management of Health and Safety at Work Regulations. Act99 [EB/OL]. (1999-12-01) [2021-08-29] <http://www.legislation.gov.uk/uksi/1999/3242/contents/made>.
- [14] Construction (design and management) regulations: CDM 2007 No. 320[S]. UK: HSE, 2007.
- [15] Managing health and safety in construction - Construction (Design and Management) Regulations: HSE 2007 [S]. Sudbury: Health and Safety Commission.
- [16] Environmental Agency (UK): Groundwater protection: policy and practice [M]. Bristol: Environmental Agency, 2006.
- [17] Environmental Agency (UK): Environmental good practice guide for ground source heating and cooling schemes [M]. Bristol: Environmental Agency, 2011.
- [18] Coal Authority (UK): Guidance on managing the risk of hazardous gases when drilling or piling near coal [M]. Nottinghamshire: Coal Authority, 2012.
- [19] Requirements for contractors undertaking the design, supply, installation, set to work commissioning and handover of microgeneration heat pump systems: DECC 2012 [S]. London: Department of Energy and Climate Change, 2012.
- [20] General permitted development order in the town & country planning act 2008 [S]. London: City Council, 2008.
- [21] Institution of Civil Engineers. ICE Specification for Piling and Embedded Retaining Walls 2nd Edition [M]. London: Thomas Telford Ltd, 2007.
- [22] Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing: BS EN 1997-2 [S]. London: The authority of the Standards Policy and Strategy Committee, 2007.
- [23] 邓娜, 王继林, 王建栓, 等. 基于恒温法与恒热流法的土壤热响应测试分析与比较[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(2): 320-325.
Deng N, Wang J L, Wang J Q, et al. Quantitative analysis and comparison of ground thermal response test based on constant temperature method and constant heat-flux method [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2014, 35(2): 320-325. (in Chinese)
- [24] Kavanaugh S. P. Field tests for ground thermal properties-methods and impact on ground-south heat pumps [J]. *Ashrae Transactions*, 1998, 104(2): 347-355.
- [25] Reconnaissance et essais géotechniques -Essais géothermiques- Détermination de la conductivité thermique des sols et des roches dans les sondes géothermiques: ISO 17628: 2015 [S]. Berlin, Comité technique CEN/TC 341 "Exploration et études géotechniques", 2015.
- [26] 地源热泵系统工程技术规范: GB 50366—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [27] Plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure. Polyethylene (PE) : BS EN 12201-2-2011 [S]. London: The British Standards Institution, 2011.

(本文责编: 苏泽云)