

DOI: 10.11779/CJGE201401018

能量桩工程应用研究进展及 PCC 能量桩技术开发

刘汉龙¹, 孔纲强¹, 吴宏伟²

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 香港科技大学土木工程系, 香港)

摘要: 能量桩是一种由地源热泵技术与桩基埋管换热器结合组成的经济高效节能减排技术。简要介绍了基于地源热泵技术的能量桩技术原理、桩型、埋管形式以及技术经济优势, 总结了近年来国内外能量桩技术的研究现状及其工程应用, 包括基于灌注桩的传热埋管形式和基于预制桩的传热埋管形式; 指出了目前工程应用中存在的一些主要问题, 并提出一种新型 PCC 能量桩技术及其施工工艺; 最后简要分析了能量桩技术在国家节能减排工程中的应用前景, 并提出有待进一步研究的方向。

关键词: 能量桩; 地源热泵; 热力学; 承载力; 荷载传递; 工程实例

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)01-0176-06

作者简介: 刘汉龙(1964-), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事软土地基处理及桩基础方面的教学与研究工作。E-mail: hliuhhu@163.com。

Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles

LIU Han-long¹, KONG Gang-qiang¹, CHARLES W. W. Ng²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Civil Engineering Department, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: The energy pile is the combination of ground source heat pump technology and purposely designed pile for storing energy in the ground using buried pipes during hot climates and retrieving energy from it when it is needed. The technical principles, pile types, buried forms and economic advantages of the energy pile are introduced. The heat transfer pipes can be buried in drilled shaft, precast piles, steel piles and cement mixing piles. The current advances and research status of energy piles at home and abroad and their engineering applications (including drilled shafts and precast piles) in recent years are reviewed and summarized. Moreover, some major problems in engineering applications are revealed, leading to the development of a new PCC energy pile. The prospects of the PCC energy pile in the national energy saving projects of China are analyzed, and the further research orientation is proposed.

Key words: PCC energy pile; ground source heat pump; thermodynamics; bearing capacity; load transfer; case study

0 引言

地源热泵 (ground source heat pumps, GSHP) 技术, 是利用地下的土壤、地表水、地下水温相对稳定的特性, 在冬天把低位热源中的热量转移到需要供热或加温的地方, 在夏天将室内的余热转移到低位热源中, 达到降温或制冷的目的。地源热泵技术比传统锅炉技术节省 70% 以上的能源和 40%~60% 的运行费用; 在制冷时, 地热泵技术要比普通空调节能 40%~50%, 运行费用降低 40% 以上^[1]。

基于对地下空间利用的考虑, 工程技术人员将地源热泵技术与建筑桩基础结合起来, 提出一种能量桩 (energy piles) 的技术方案。通过在桩基础中埋设各种形状的换热器装置, 进行浅层低温地热能转换, 在满足常规桩基力学功能的同时还能通过桩体实现与浅

层地能的热交换, 起到桩基和地源热泵预成孔直接敷设埋管换热器的双重作用。工程桩埋管的使用, 可减少建筑物周围钻孔的数量, 缩短工期, 降低成本, 提高施工效率, 节约建筑用地, 减少埋管需要的地面面积, 避免后期扩建工程对地下换热器的损坏^[2]。

1 能量桩简介

1.1 能量桩的技术原理

桩埋管是地源热泵技术的一种新型的埋管方式, 它将原本通过钻孔地埋管换热器埋设于建筑物桩基础

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT1125); 国家自然科学基金项目 (51378178, 51278170); 高等学校学科创新引智 (111) 计划项目 (B13024)

收稿日期: 2013-06-14

中, 通过桩基与周围大地形成热传递系统。混凝土或者钢材料的桩体作为传热管的回填材料, 密实性高、与大地接触更好、接触热阻小、传传递与交换效率更高 (图 1)。

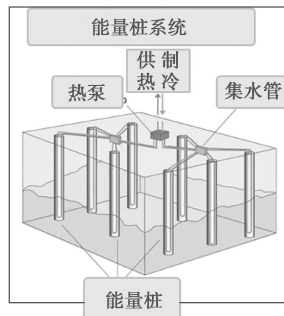


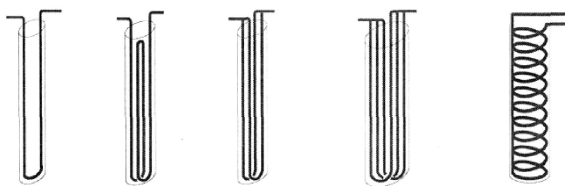
图 1 能量桩系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy pile system

1.2 能量桩的桩型及埋管形式

目前能量桩的桩型主要有现浇钢筋混凝土桩、预制桩、钢管桩以及搅拌桩等形式。研究表明, 钢筋混凝土桩具有较大的热量存储能力和较好的热传输性能, 在全世界范围内应用最广; 预制桩由于在桩运输、打入过程中可能会对传热系统造成损坏, 因此应用较少; 钢管桩可以直接通过液体的循环或采用导热管道两种方式进行热传递, 但由于钢管桩本身的造价较高, 因此在建筑工程中应用不多; 搅拌桩、浆固碎石桩中埋设传热管, 其热传导性能不如混凝土桩^[3-4]。

对于导热埋管的形式, 目前已有的桩基埋管换热器主要有单 U 型、串联双 U 型 (W 型)、并联双 U 型、并联三 U 型和单螺旋形等形式^[5], 如图 2 所示。



(a) 单 U 型 (b) W 型 (c) 并联双 U 型 (d) 并联三 U 型 (e) 螺旋型

图 2 桩埋管形式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of arrangement of heat transfer tubes

1.3 能量桩的技术经济比较

与传统的竖向钻孔埋管技术方案相比, 桩埋管式能量桩系统具有如下 3 点技术经济性特点:

(1) 传统地源热泵, 在钻孔中埋设埋管换热器, 需要经过钻孔、埋设以及回填等施工工艺; 钻孔施工费用高、施工工序多造成施工工期延长。能量桩系统, 采用桩基埋管形式而不需要单独钻孔, 比竖直埋管形式换热系统节省约 40%~70% 的费用。

(2) 能量桩系统中传热管被浇注在桩体内部, 回填材料可理解为混凝土, 密实性好; 较竖直埋管形式有较好的传热性能, 从而在等量热传递情况下可以减

少埋管的长度。

(3) 桩基埋管直接埋设在构建物的下面, 节省用地面积, 且施工进度较一般的竖直埋管形式要快。但是, 由于传热管下端弯曲要求, 桩埋式管不太适用于小直径桩。

2 国内外研究现状与进展

2.1 能量桩的热传递特性研究

能量桩的能量传输过程是一个复杂的热传递过程。1994 年日本的 Morino 首先在钢管桩基中埋设管状换热器并提出桩埋管换热器的概念, 基于有限差分法对桩基内两个垂直 U 型埋管换热器的传热特性进行了数值分析, 并进行了试验研究^[3]。基于数值分析方法, 对慕尼黑机场大楼的 500 多根桩中设计的 U 型埋管换热器进行模拟分析^[6]; 对桩埋管的施工工艺和现场热交换温度场进行了分析^[6-7]。在总结能量桩技术的基础上, 针对摩擦型桩地能转换效率, 及其建筑物的冷热负荷进行长期观测试验; 研究表明, 桩埋管换热器的效率较高^[8-9]。2009 年张文克等提出了一种适合于桩基螺旋埋管的传热模型, 并给出了一维实心圆柱面热源传递模型的解析解; 通过搭建的实验平台, 对数值模型和解析模型进行验证分析^[10]。

2.2 能量桩的力学特性研究

由于热能的传递, 使地基内部温度场发生变化, 从而改变桩周土体的性质, 桩身混凝土产生温度应力, 最终影响桩 - 土荷载传递规律。相关学者开展了温度对土体性质影响的三轴试验研究, 得到了摩擦角、孔隙比和前期固结压力等受温度的影响特性, 提出了一种各向同性的黏土热力学模型; 并对热传递过程中能量桩的应力变化进行了研究分析^[11-12]。

对于各种建筑下的桩基础, 桩体受到上部荷载作用, 使桩、地基中产生应力场和位移场, 而热交换过程中应力场和位移场会因温度场的变化而改变, 同时, 土体在附加应力的作用下会产生固结, 使土体中的孔隙水排水, 桩 - 土系统产生沉降, 因此, 能量桩的工作过程是一个应力场 - 位移场 - 温度场 - 渗流场 - 时间场相互耦合的问题, 是一个复杂的热、力学过程。

2.3 能量桩的桩型及传热管型式研究

能量桩的桩型主要是由桩埋管中桩体本身的型式决定的, 目前国内外采用的主要型式有灌注桩、预制桩、钢管桩以及搅拌桩等。相关研究表明, 钢筋混凝土桩具有较大的热量存储能力和较好的热传输性能, 因此在全世界范围内应用最广^[5]; 预制桩由于在桩运输、打入过程中可能会对传热系统造成损坏, 因此应用相对较少^[13]; 钢管桩具有很好的热传导性能, 因此在地热能利用方面具有较大的优势, 对于钢管桩, 可以直接

通过液体的循环或采用导热管道两种方式进行热传递,但钢管桩本身的造价很高,在建筑工程中应用不多^[3]。此外,还有将传热管埋设在搅拌桩、浆固碎石桩中进行热交换的形式,水泥浆体能在一定程度上起到保护热交换管的作用,但这种桩型的热传导效率不如钢筋混凝土桩高^[14]。为了增加这种低强度水泥土桩的热传导性能,有学者考虑在桩体中掺入砂、石英等成分,使这种桩型的热传导差的缺点得到克服,对于上部承载力要求不高的情况下,利用水泥土桩作为地热能利用的方式具有更大的优势^[2]。对于导热埋管的形式,目前已有的桩基埋管换热器主要有单U型、串联双U型(W型)、并联双U型、并联三U型以及单螺旋形等形式。

钢筋混凝土灌注桩需要将传热管道与钢筋笼一起绑扎,埋设在混凝土中,传热管道与混凝土模量相差较大,桩基受力变形时,在传热管道孔洞处容易产生应力集中,影响桩基的受力,且管道埋设于混凝土中,不能检修、维护和回收利用。预应力管桩一般直径较小,每根桩的传热能力有限,且运输过程中易产生裂缝,桩身还有接头,容易造成传热液体泄漏。钢桩本身造价高,应用范围有限。搅拌桩桩身强度低,不能同时满足高效的热传递和较高的承载力要求,只能应用于低承载力要求的工程,使用上受到局限。因此,在传统能量桩形式的基础上,开发出一种具有承载力大、热传输效率高、造价低的优质桩型具有重要意义。

2.4 能量桩的导热管和导热液体研究

传统传热管的材料一般采用高密度的聚乙烯,但过去也使用PVC管作为导热管^[15]。用这种材料时,导热管埋设混凝土时需要在管道内部施加压力,以抵消为凝固混凝土的压力,防止管道产生变形,压力要维持到混凝土凝固硬化,因此这种材料的施工比较复杂,发展到后来逐渐使用金属材料作为导热管,使施工更加方便。由于水价格低,无污染,因此能量桩一般采用水作为导热流体^[16],但水在严冬季节或在寒冷的北方容易结冰,结冰后体积膨胀容易造成管道破裂,因此在低温环境下需要水中加入各种防冻液,例如可加入盐、乙醇、卤水、乙酸甲、甲醇等物质^[17-18]。

3 工程实例应用

3.1 能量桩在国外工程中的应用

(1) 灌注桩中埋管形式

位于奥地利的某康复中心建筑基础,建成于1995年,其建筑物荷载在500~900 kN之间,采用桩筏基础支撑;143根钻孔灌注桩中埋设了传热管,灌注桩的桩长为9 m、桩径为1.2 m,桩基础所处的地层条件为含砂黏质粉土^[19]。

位于瑞士洛桑的瑞士联邦技术研究所某栋建筑,

其建筑面积3000 m²,建筑基础采用了97根桩长为25 m、桩径为0.88 m的钻孔灌注桩,将单U型传热管绑扎在钢筋笼上,埋设在钻孔灌注桩内。所处的地质情况从地表向下依次为冲积土、级配良好砂砾层、以及砾石层等,地下水位位于地表面处^[20]。

位于英国伦敦的兰贝斯学院某建筑,采用桩基础形式支撑;所处位置的地层条件为1.5 m厚的回填土、2.5 m厚的砂砾层以及硬质粉质黏土层。针对1根桩长为23 m、桩径为0.61 m;1根桩长为30 m、桩径为0.55 m的两根能量桩进行现场试验研究,并取得一些有益的研究结果^[21]。

此外,建成于1999年的200 m高德国法兰克福主塔大厦30 m×50 m的基础,采用112根桩长为30 m、桩径1.5 m的钻孔灌注桩支撑,钻孔灌注桩中埋设了传热管;苏黎世机场E号候机楼基础中,采用了315根能量桩。

(2) 预制桩中埋管形式

位于日本北海道札幌某办公与住宅建筑,其建筑面积92.7 m²。建筑基础采用了预应力管桩、木桩、以及钢管桩,对26根预应力管桩桩端密封,并在管空心中心埋设传热管。预应力管桩的桩长9 m,外径302 mm、内径232 mm,桩间距在1.2~1.5 m之间。

为了研究不同传热管布置形式对传热效果的影响,相关研究人员针对单U型管、双U型管、间接双管、以及直接双管等四种形式,不同传热温度的传热效果进行现场试验。研究表明,与其他几种埋管形式相比,单U型埋管形式最经济且可操作性最好^[22]。

3.2 能量桩在国内工程中的应用

(1) 浙江省温州市双井头小区会所

浙江省温州市双井头小区会所,建筑面积2000 m²,所处的地质条件为第四代滨海相淤泥质软土,地质情况从地表向下依次为杂填土层、淤泥、淤泥质黏土、粉质黏土、圆砾层、黏土等,其中淤泥层厚度达20 m左右。建筑基础采用钻孔灌注桩;在92根工程桩中的72根桩中埋设了传热管,为了综合考虑换热需求,在建筑北侧的空地处打设了20口深度为100 m的换热井,以提高换热功率。

为了研究钻孔灌注桩在温州地区该地层的传热效果,相关研究人员针对46 m埋深的单U型管、46 m埋深的双U型管、63 m埋深的单U型管桩埋管,以及70 m埋深的单U型普通砂石回填井埋管进行对比现场试验研究。研究表明,桩埋管换热器平均导热系数是井埋管的2倍多,双U型桩埋管比单U型桩埋管约提高了15%;桩埋管换单位管长换热量比井埋管提高了约58%,双U型桩埋管的单位管长换热量比单U型桩埋管约降低了22%^[23]。

(2) 上海世博会城市最佳实践区汉堡馆

2010 年上海世博会城市最佳实践区北部区块, 建筑面积 3113 m², 建筑高度 18 m, 地上 5 层, 地下 1 层。所处的地质条件为上海黄浦江沿岸, 地下水位高, 土壤湿度大, 土质的传热、蓄热性好。建筑基础采用钻孔灌注桩; 在 43 根工程桩中埋设了 3U 型传热管, 灌注桩的桩长约为 30 m, 直径 600 mm。

(3) 南京朗诗国际街区

南京朗诗国际街区, 总建筑面积 91557.18 m², 地上建筑面积为 68115.62 m², 位于南京市庐山路与河西大街路口的东南角, 其中一期工程由 6 幢住宅组成, 地下一层。#1、#3、#4 楼地面以上 18 层, 局部 7 层, 总高 54.60 m。#2、#5、#6 楼地面以上 7 层, 总高度为 21.6 m, 总建筑面积约 10 万 m², 基坑占地面积约 2.5 万 m²。地源热泵系统是朗诗国际街区采用的最主要的节能技术; 由于该项技术的应用, 使项目整体能耗节省达到 40% 以上。项目内 1200 根桩基础中埋设了 U 型或 W 型传热管, 桩长约为 30 m; 为了综合考虑换热需求, 在建筑物的外围空地打设了 302 口深度为 60 m、间距为 5 m 的换热井, 以提高换热功率。

另外, 能量桩(即桩埋管地源热泵)技术, 在中国天津市梅江综合办公楼、同济大学旭日楼(钻孔灌注桩, 桩长 28 m)、天津市塘沽凯华商业广场以及吴江中达电子营建处办公楼等项目中也得到应用。

4 目前存在的主要问题

尽管近年来国内外学者针对能量桩的相关问题进行了系列研究并取得了一定的成果^[24], 但是这些研究尚未能完全达到满足工程实际的需求, 且目前存在的主要问题有:

(1) 由于初始投资较大、安装费用较高, 经济回收期在 5~8 a 左右; 而且地源热泵系统的维护较为困难, 这在一定程度上影响了能量桩形式地源热泵技术的应用。

(2) 目前已有的能量桩技术方案, 施工工艺相对较繁杂, 工程质量不易控制; 暖通空调技术与桩基施工技术, 两者缺一不可, 要求工程组织者和工程技术人员能合理协调、做好充分的技术经济分析。因此, 开发技术方案更合理、经济效益更高的新型能量桩技术的设计方法、施工工艺及质量检测方法显得尤为必要。

(3) 桩埋管地源热泵换热器的传热模型和设计计算问题, 仍然是困扰工程设计人员的重要问题; 土壤的特性随地点的变化而有所差别, 在一地区的研究结果可能完全不适用于另一地区, 必须进行相应的修正甚至重新研究。因此, 建立新型能量桩-土的能量热传递分析模型, 为工程设计人员提供设计依据。

(4) 目前针对埋管后基桩的承载力等力学特性的研究相对较少; 对能量桩的力学机理了解的匮乏, 严

重影响了该新型技术的推广应用; 因此, 建立考虑冷、热能量传递及土体温度场影响的新型能量桩承载力计算方法, 对于新型能量桩的推广应用具有重要的作用。

5 PCC 能量桩技术开发

为了克服传统能量桩的缺陷, 充分利用 PCC 桩的内部空间, 开发一种施工便捷、经济性好、使用方便的新型 PCC 能量桩及制作方法^[25]。由 PCC 桩(现浇大直径混凝土管桩)、导热液体、盖板、底板、导热管、集热器、检查通道等部分组成。PCC 桩桩底采用钢筋混凝土完全封闭; PCC 桩顶部设置钢筋混凝土盖板; 在盖板上设置多个孔洞; PCC 桩上部一侧设置预留孔, 用于导热管穿越; PCC 桩内部空腔内注满导热液体; 导热管穿过盖板上的孔洞深入到 PCC 桩空腔内的导热液体中; 深入到 PCC 桩空腔内的导热管可采用开口式和封闭式两种形式; PCC 桩侧壁设置一检查通道, 检查通道伸出地表, 检查通道出口设置密封盖; 导热管可通过盖板上的孔洞或检查通道引出 PCC 桩空腔后与集热器连接, 形成导热液体的循环通道, 其结构布置示意图如图 3 所示。

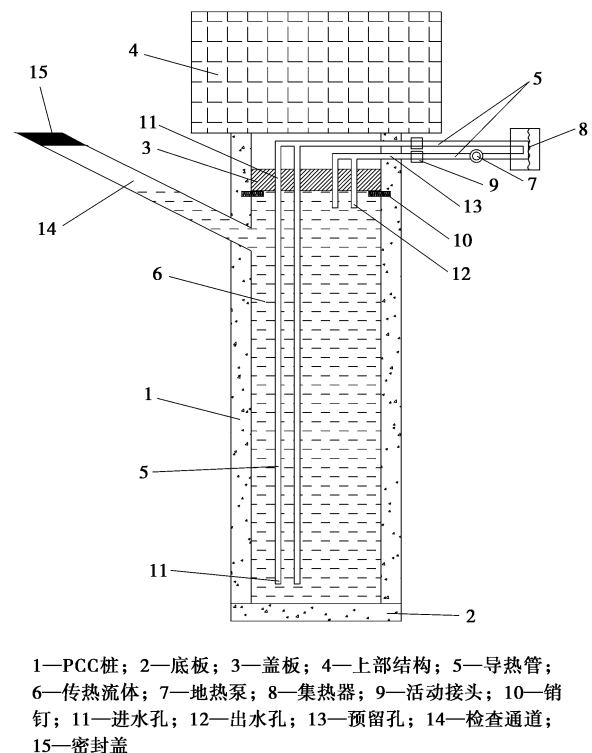


图 3 PCC 能量桩传热系统布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of arrangement of heat transfer system for PCC energy pile

PCC 能量桩的制作方法, 包括以下技术步骤:

(1) 在桩位施工钢筋混凝土 PCC 桩, 并进行混凝土养护。必须使桩体混凝土养护达到一定强度才能进入下一步骤以保证施工安全。

(2) 预制钢筋混凝土盖板, 并按要求预留孔洞。

(3) 施工场地降水。当施工场地地下水位高程高于 PCC 桩桩底高程时, 在储藏井施工场地周围设置一圈井点降水, 否则, 直接进入步骤 (4)。

(4) 开挖桩芯土。可采用人工方式开挖, 也可采用高压水冲洗桩芯土形成泥浆后, 用泥浆泵抽除桩芯土。桩芯土开挖深度应在桩底标高以下 30~50 cm。

(5) 在 PCC 桩上部预留孔的位置钻孔形成预留孔, 预留孔数量与需要穿越的进水导热管和出水导热管数量之和相等。

(6) 凿除部分桩底混凝土, 使桩端露出 20~30 cm 的钢筋头, 作为连接钢筋, 然后下放底板钢筋, 并与桩端连接钢筋连接。

(7) 浇筑混凝土底板进行封底, 进行底板混凝土养护, 待达到一定强度方可停止降水。

(8) 安装 PCC 桩空腔内部导热管。将开口式导热管的进水管或封闭式导热管安放在 PCC 桩空腔内部。

(9) 安装盖板。在管桩顶部内壁对称打入 4 根销钉, 用于卡住盖板底部的位置; 将预制好的盖板放置在 PCC 桩内部空腔顶部, 并将导热管穿过盖板上的孔洞, 盖板位置被销钉卡住; 在盖板周边与桩内壁接触处涂上密封胶。

(10) 连接导热管。将穿过盖板上的孔洞的导热管与集热器连接。若为开口式导热管, 则将导热管出水管的一端穿过盖板的孔洞进入到 PCC 桩空腔内部, 另一端也与集热器连接。从 PCC 桩内部引出的导热管连接集热器时, 都穿过 PCC 桩上部的预留孔。

(11) 分别拆开一根进水导热管和一根出水导热管上的活动接头, 从进水导热管注入导热液体, 直到导热液体充满整个空腔, 有液体从出水导热管流出后停止注入。

(12) 接上两根导热管的活动接头, 开启地热泵, 导热液体在导热管和管桩腔体内形成循环回路。

(13) 地热通过 PCC 桩桩身混凝土传递到导热液体后, 通过导热液体传递给导热管, 在导热管回路中的液体循环将热量不断输送到集热器, 集热器收集热量后不断输送给用户, 从而实现了能量的传输。

(14) 在 PCC 桩上继续建筑上部结构, 上部结构荷载传递到 PCC 桩, 使 PCC 桩起到桩基承载作用。

(15) 在不需要采用地热功能时, 还可将盖板上的导热管拆除, 将需要储存的其他液体能源保存到 PCC 桩空腔中。

(16) 当 PCC 桩腔体内的导热管需要更换或检查时, 打开检查通道上的密封盖, 从检查通道进入到管桩管腔内进行检查, 或直接将通过检查通道引出的导热管检查或更换。

6 结 论

(1) 新型能量桩的设计方法、制作工艺及质量检测方法等成套技术研究。近年来, PCC 桩 (现浇大直径混凝土管桩, 桩外径为 1~1.5 m, 壁厚为 120~140 mm) 等新型桩在工程中得到广泛应用。这为基于新型桩基础, 开发新型能量桩技术提供了基础, 为开辟节能减排新技术措施提供了途径。因此, 开展新型能量桩 (如 PCC 能量桩等) 的结构形式、导热材料、制作工艺以及质量检测方法等成套技术方案研究。基于新型能量桩的结构特点, 开发与新型桩基础结合的结构合理、传热效率高的经济高效新型能量桩结构形式; 研究不影响新型桩承载性能和地热能传递的导热管设计工艺, 以及能在运营期利用新型桩内部空间大的特点进行导热管检修更换的新型能量桩制作工艺。

(2) 新型能量桩的热、力学基本工程特性及桩/土位移场与温度场分布规律研究。结合新开发的新型能量桩 (如 PCC 能量桩), 开展 PCC 能量桩的热、力学工程特性及桩/土位移场与温度场分布规律的离心机模型试验和数值模拟计算研究。开展 PCC 能量桩的热传递和力传递模型试验研究, 通过针对不同布置形式、不同温度等情况下 PCC 能量桩桩-土的位移场与温度场分布规律的分析, 研究 PCC 能量桩的热、力学工程特性; 开展 PCC 能量桩周土体温度场变化引起的桩-土荷载传递规律研究, 分析温度差引起的应力分布对基桩整体承载力的影响规律; 揭示地热能从土体-桩体-传热液体-导管到集热器之间的传递机理。

(3) 热、力学耦合作用下 PCC 能量桩桩-土荷载传递机理研究。开展热、力学耦合作用下 PCC 能量桩桩-土荷载传递机理的大比尺模型试验和理论分析研究。开展其荷载传递机理研究, 通过与传统闭口 PCC 桩的承载性能对比, 揭示研究闭口 PCC 桩的承载机理; 开展热交换条件下桩周土、桩身混凝土、桩-土接触面力学特性研究, 建立桩体和桩周土力-热耦合分析模型以及考虑力-热耦合的桩-土接触面力学模型。基于有限长线圈模型等理论和数值分析方法, 建立 PCC 能量桩-土的能量热传递理论模型, 并基于所建立的力学模型和能量传递模型, 建立能模拟实际热、力学工作状态下的 PCC 能量桩数值计算方法。

(4) 热、力学耦合作用下 PCC 能量桩的承载力与沉降计算理论研究。开展热、力学耦合作用下 PCC 能量桩承载力与沉降计算的理论分析研究。基于热力学平衡原理, 建立考虑桩-土-导热液体-导热管之间能量的传递的 PCC 能量桩能量传输计算方法; 基于荷载传递法和剪切位移法等桩-土相互作用理论, 建立考虑桩周土体特性、冷、热能量传递及土体温度场

影响的新型 PCC 能量桩的承载力和沉降计算方法; 分析不同桩周土类型 (饱和黏性土或饱和砂性土) 以及不同饱和度等情况下 PCC 能量桩的设计方法, 承载力与沉降计算方法。

参考文献:

- [1] PREENE M, POWRIE W. Ground energy systems: from analysis to geotechnical design[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(3): 261 - 71.
- [2] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**(2): 81 - 122.
- [3] MORINO K, OKA T. Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile[J]. *Energy and Buildings*, 1994, **21**(1): 65 - 78.
- [4] TAMAWSKI V R, MOMOSE T, LEONG W H. Assessing the impact of quartz content on the prediction of soil thermal conductivity[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(4): 331 - 338.
- [5] GAO J. Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: an application[J]. *Applied Energy*, 2008, **85**(10): 901 - 10.
- [6] PAHUD D, FROMENTIN A, HADOM J C. The duct ground heat storage model (DST) for TRNSYS used for the simulation of heat exchanger piles[C]// DGC-LASEN, Lausanne, 1996.
- [7] LALOU L, NUTH M, VULLIET L. Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, **30**(8): 763 - 781.
- [8] YASUHIRO H, HISASHI S, MAKOTO N, et al. Field performance of an energy pile system for space heating[J]. *Energy and Buildings*, 2007, **39**: 517 - 524.
- [9] SEKINE K M, OKA R, YOKOI M, et al. Development of a ground-source heat pump system with ground heat exchanger utilizing the cast-in-place concrete pile foundations of buildings[J]. *ASHRAE Transactions*, 2007, **113**(1): 558 - 566.
- [10] 张文克. 桩埋管地热换热器的传热模型研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2009. (ZHANG Wen-ke. The heat transfer models for the ground heat exchanger inside foundation piles[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2009. (in Chinese))
- [11] LALOU L, CEKEREVAC C. Thermo-plasticity of clays: an isotropic yield mechanism[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, **30**(8): 649 - 660.
- [12] CEKEREVAC C, LALOU L. Experimental study of the thermal effects on the mechanical behaviour of a clay[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, **28**: 209 - 228.
- [13] NAGANO K. Energy pile system in new building of Sapporo City University in thermal energy storage for sustainable energy consumption[M]. Netherlands: Springer, 2007.
- [14] ESEN H, INALLI M. In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazığ, Turkey[J]. *Energy and Buildings*, 2009, **41**(4): 395 - 401.
- [15] TAMAWSKI V R, LEONG W H, MOMOSE T, et al. Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan[J]. *Renewable Energy*, 2009, **34**(1): 127 - 34.
- [16] KAVANAUGH S. Ground source heat pumps[J]. *ASHRAE Journal*, 1998, **40**(10): 5 - 15.
- [17] CANE D, MORRISON A, IRELAND C J. Operating experiences with commercial ground-source heat pumps - Part 2[J]. *ASHRAE Transactions*, 1998, **104**(2): 677 - 686.
- [18] OZGENER O, HEPBASLI A. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system[J]. *Energy and Buildings*, 2005, **37**(1): 101 - 109.
- [19] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**(2): 81 - 122.
- [20] BOURNE-WEBB P J, AMATYA B, SOGA K, et al. Energy pile test at lambeth college, London: Geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(3): 237 - 248.
- [21] LALOU L, MORENI M, VULLIET L. Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, **40**(2): 388 - 402.
- [22] HAMADA Y, SAITOH H, NAKAMURA M, et al. Field performance of an energy pile system for space heating[J]. *Energy and Building*, 2007, **39**: 517 - 524.
- [23] 仲智. 桩埋管地源热泵传热研究及施工工艺探讨[D]. 北京: 北京工业大学, 2007. (ZHONG Zhi. Study on construction technology and heat transfer of energy pile[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [24] 陈小龙, 曹诗定. 能源地下工程在上海地区的适用性研究[J]. *土木工程学报*, 2009, **42**(10): 122 - 126. (CHEN Xiao-long, CAO Shi-ding. Applicability of energy saving geo-technology in Shanghai[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, **42**(10): 122 - 126. (in Chinese))
- [25] 刘汉龙, 丁选明, 吴宏伟, 等. 一种 PCC 能量桩及制作方法: 中国, 201210298385.5[P]. 2012. (LIU Han-long, DING Xuan-min, WU Hong-wei, et al. One PCC energy pile and its production method: China Patent, 201210298385.5[P]. 2012. (in Chinese))