

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2019.04.006

压缩空气下 FRPC 能源桩承载特性分析^{*}

戴国亮^{1,2}, 曹小林^{1,2}, 龚维明^{1,2}

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土教育部重点实验室, 江苏 南京 211189; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 可再生能源储存系统是利用钢筋混凝土桩基础来储存由太阳能板产生的可再生能源, 可再生能源以压缩空气的形式储存在空心截面的桩基内, 桩基础作为上部结构的承载结构, 不仅要承受上部结构荷载, 还要承受土体的反作用力和压缩空气的压力。然而, 混凝土在拉应力作用下易产生裂缝, 导致钢筋混凝土桩储存能源的使用性能和耐久性受限。为了克服传统钢筋混凝土能量桩的这些缺陷, 针对各种 FRP(Fiber Reinforced Polymer)-混凝土复合桩基础储能和承载的双功能进行研究。综合考虑结构荷载、土体的反作用和压缩空气热动力循环引起的内部空气压力的共同作用, 对多种形式的复合能量桩基础体系的适用性进行了综合有限元分析。研究表明, 内侧和外侧的 FRP 管可以有效提高使用性能和耐久性, 相对于钢筋混凝土桩, FRPC 管桩的使用可靠性和耐久性性能更高。

关键词: 可再生能源存储; FRPC 管桩; CAES 桩; 承载特性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2019)04-0579-06

Analysis of Bearing Capacity of FRPC Pipe as Energy Storage Medium under the Action of Compressed Air

DAI Guoliang^{1,2}, CAO Xiaolin^{1,2}, GONG Weiming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education,

Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Renewable energy storage system uses reinforced concrete pile foundation to store renewable energy generated by solar panels. The renewable energy is stored in the hollow section of pile foundation in the form of compressed air. The pile foundation, acting as a load-bearing structure of the upper structure, sustains not only the upper structure load, but also the soil reaction force and the compressed air pressure. However, concrete is prone to cracking under tensile stress, which leads to the limitation of energy storage performance and durability of reinforced concrete piles. In order to overcome these defects of traditional reinforced concrete energy piles, this paper studies the dual functions of various FRP (Fiber Reinforced Polymer)-concrete composite pile foundations as energy storage and load bearing structures. Considering the combined action of structural load, soil reaction and internal air pressure caused by compressed air thermodynamic circulation, the applicability of multiple forms of composite energy pile foundation system is analyzed by the finite element method. The study shows that the inner and outer FRP

* 收稿日期: 2019-01-31; 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878160, 51678145, 51808112)资助

作者简介: 戴国亮(1975-), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事桩基础方面的研究。Email: daigl@seu.edu.cn

pipes can effectively improve the service performance and durability of piles, and the service reliability and durability of FRPC pipe piles are improved compared with that of reinforced concrete piles.

Keywords: renewable energy storage; FRPC pipe pile; CAES pile; bearing characteristics

引言

随着社会经济的快速发展和人口的急剧增长,能源紧缺、环境污染、生态破坏等一系列问题日益凸显,这对能源的有效利用和环境保护提出了更高的要求。为了应对能源紧缺的问题,开发与应用可再生能源既可以减少对常规能源的消耗,也可以保护环境。地热热泵、太阳能和风能是可再生能源的典型收获方式,目前国内外对地源热泵技术的研究已经取得了一定的进展^[1-6],且孔钢强等^[7]制定了《桩基地热能利用技术标准》,为地源热泵技术在桩基中的使用提供了依据。

太阳能电池板和地热热泵是可再生能源的典型获取方式,但其能源利用效率在很大程度上取决于气候条件和供求关系等一些非固定因素。可再生能源的这种间歇性特点,需要高效的储能方式,及时将所产生的可再生能源与需求相统一,并将多余的能源存储下来,用以弥补供求之间的差距。因此,通过多学科研究项目开发了一种新的可再生能源存储系统^[8-9],该系统的主要特点是利用钢筋混凝土桩基础存储附着在建筑结构上的太阳能电池板产生的可再生能源。利用所谓的 CAES(compressed air energy storage)技术,可再生能源可以储存在钢筋混凝土桩基础内。CAES 技术的过程包括压缩、冷却、加热和扩张 4 个热力循环阶段(如图 1 所示)^[10]。压缩过程考虑等熵绝热条件,满足能量守恒原理,在此过程中产生压缩空气的最大压力^[12-13]。在冷却阶段,压缩空气的温度降至其初始温度,热量在储罐容器。在加热过程中,热量被储存在水箱中的空气吸收。冷却和加热过程^[14]涉及到等容条件,其中温度和压力是直接成正比的。在膨胀过程中,若不考虑能量的损耗,功率的产生遵循理想气体定律,可认为是压缩过程的相反机理。

由于桩基作为储能介质,其受力状态十分复杂,如图 2 所示^[15],CAES 桩不仅要承受上部结构的作用力,还要抵抗复杂的土边界力,包括桩身摩擦力、端轴力、桩体内压缩空气产生的压力和土压力。而内部空气压力则产生纵向和周向的拉伸应力和径向

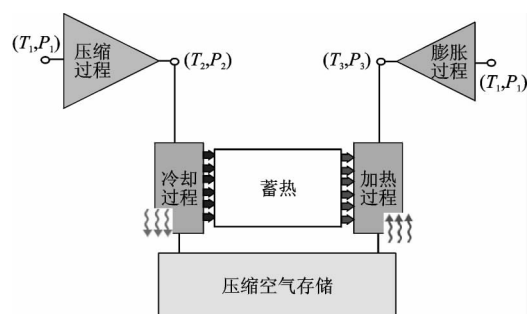


图 1 压缩空气储能的热力学循环^[10]

Fig. 1 Thermodynamic cycles of CAES^[10]

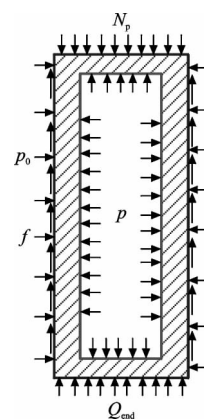


图 2 桩基础的受力状态^[15]

Fig. 2 Stress state of pile foundation^[15]

的压缩应力,混凝土在拉应力作用下易产生裂缝,导致钢筋混凝土桩储存能源的使用性能和耐久性受限^[16]。由于热力循环过程中温度发生变化,钢筋混凝土能量桩空心处的压缩空气可以凝结成水和湿气,并在高压下渗透到径向裂缝中,最终导致钢筋锈蚀破坏,混凝土在使用寿命内剥落。由于地下构筑物的修复和加固十分困难,同时也会带来较高的造价和建筑物占用的中断,其应用至今仍十分有限,只在有大型地下洞室的电厂中采用。为了从根本上避免这些问题,内部管道或油罐船是必不可少的。FRP 具有比强度和比模量高、耐腐蚀性能好等优点,将 FRP 应用到 CAES 的能源存储桩基础,可改善钢筋混凝土桩储存能源的使用性能和耐久性。大量文献报道了组合桩在修复工程中的应用,也应用于一些军事和民用工程中^[17-19]。国外一些学者进行了 FRPC 桩的室内模型试验研究和数值分析^[20-22],

分析在不同荷载作用下的承载特性,为 FRPC 桩的使用提供了理论依据。

本文考虑压缩空气储能过程的热力循环、压缩空气产生的内部压力以及桩基础与土体的相互作用,基于 FRP 管作为储能管桩的内壳、外壳及内外壳情况下,对结构的承载性能进行了 ABAQUS 有限元数值分析。

1 CAES 桩的热力学循环

CAES 技术的过程包括压缩、冷却、加热和扩张四个热力循环阶段(如图 1 所示),压缩过程考虑等熵绝热条件,满足能量守恒原理,在此过程中产生压缩空气的最大压力。在冷却过程中,压缩过程(T_2)产生的压缩空气稳定降低到原始温度(T_1);从空气中产生的热量将在蓄热介质中积累,用于膨胀阶段之前的后续加热过程,在此过程中考虑了热量的损失率 η_2 。在加热过程中,储存的空气从蓄热介质中吸收热量,热量存在耗散,取耗散系数为 η_3 。膨胀过程可以认为与压缩过程相反,膨胀过程中的耗散率为 η_4 。整个循环中,压缩产生压缩空气的最大压力。利用能量守恒原理可以确定压缩过程,假设等熵绝热压缩条件,根据能量守恒可得:

$$\omega = 3.5nR(T_2 - T_1) \quad (1)$$

其中, ω 为压缩过程所做的功; n 为通过压缩气量; R 为通用气体常数; T_1 为环境空气温度; T_2 为压缩后空气温度。

由式(1)可得太阳能电池板做功的功率 $\dot{\omega}$ 为:

$$\dot{\omega} = 3.5\dot{n}R(T_2 - T_1)/\eta_1 \quad (2)$$

其中, \dot{n} 为空气流过压缩机的速度; η_1 为压缩效率。

由式(2)可得:

$$\dot{n} = \dot{\omega}_{in}\eta_1/3.5R(T_2 - T_1) \quad (3)$$

其中, $\dot{\omega}_{in}$ 为太阳能电热板的输入功率。

考虑空气绝热可得温度—压力关系为:

$$T_2 = CP_2^{2/7} \quad (4)$$

其中, C 为常数。

将式(4)代入式(3),可得介质中储存的空气量为:

$$n_s = \frac{\dot{\omega}_{in}\eta_1 t_{in}}{3.5R(CP_2^{2/7} - T_1)} + n_{s,i} \quad (5)$$

其中, n_s 和 $n_{s,i}$ 为介质中的储存空气量和初始空气量。

由理想气体方程可得:

$$n_s = \frac{P_2 V}{RT_2} \quad (6)$$

通过式(5)、(6)可得压缩后压力(P_2):

$$\frac{VP_2^{5/7}}{RC} = \frac{\dot{\omega}_{in}\eta_1 t_{in}}{3.5R(CP_2^{2/7} - T_1)} + n_{s,i} \quad (7)$$

通过式(1)~(7)可确定压缩空气的最大压力(P_2),然后利用有限元分析在 P_2 作用下混凝土及其 FRP 管的应力分布状态。

2 确定受力状态和分析参数

2.1 能源供求分析

存储能量($\dot{\omega}_{in}$)以 24 小时的供应量 \dot{W}_s 减去需求量 \dot{W}_d 作为过剩的可再生能源将被储存在 CAES 中,由于能源的供应取决于建筑面积(A)、楼层数(N),房顶太阳能电热板的面积(A_{rf}),储存能量可以通过总供应量和消耗量相减求得:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{in} = \dot{W}_s - \dot{W}_d = \dot{\omega}_s A_{rf} - \dot{\omega}_d AN, \\ \dot{\omega}_s A_{rf} > \dot{\omega}_d AN \end{cases} \quad (8a)$$

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{in} = 0, \\ \dot{\omega}_s A_{rf} < \dot{\omega}_d AN \end{cases} \quad (8b)$$

其中, $\dot{\omega}_d$ 和 $\dot{\omega}_s$ 为 24 h 单位面积的总供应量与需求量,若 24 h 总供能满足 24 h 总供能需求,即,对于式(8a)中表示的情况,可以得到能量平衡方程:

$$\sum \eta_r \dot{\omega}_{in} + \sum \dot{\omega}_s A_s - \sum \dot{\omega}_{in} = \sum \dot{\omega}_d AN \quad (9)$$

其中, η_r 为储能系统的总能量效率,基于热动力^[17]取 0.508。

通过式(9)和储能系统的总能量效率 η_r ,可以通过安装在建筑物屋顶上的太阳能电池板的可用面积与建筑物总建筑面积之比(A_{rf}/A)确定所能满足的层数(N)。

2.2 确定分析的尺寸和材料参数

如图 3 所示,考虑四种不同形式的桩,分别为常规钢筋混凝土桩、内 FRP 管复合桩、外 FRP 管复合桩、内外 FRP 管复合桩。FRP 管的弹性模量为 200 GPa,弹性模量为 0.3。混凝土的抗压和抗拉强度分别为 25 MPa 和 2.5 MPa,桩和土体的参数如表 1 所示。所有 CAES 桩的几何形状和加载条件相同:外径 $r_0 = 500$ mm,桩长 $L_p = 16.5$ m,取楼层为 10 层,桩的间距 7.0 m,最大压力 3.9 MPa。热力学分析估算的最大压力(P_{max})与 D. Zhang 等^[15]的相同。结构荷载 $N_p = 1593$ kN,FRP 管厚度取 15 mm,采用距桩顶端 0.5 m 和桩底端 1.0 m 内的三维实体单元模拟 CAES 桩的实体截面。

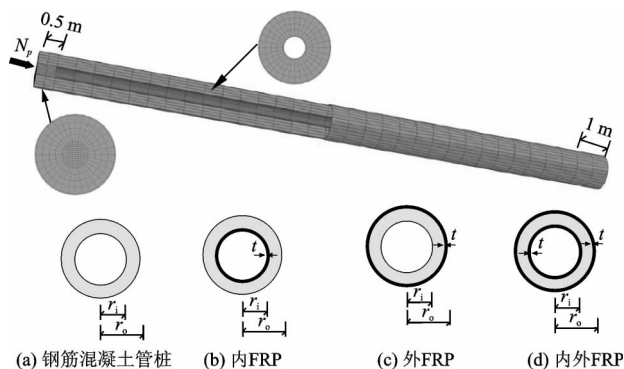


图3 有限单元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model

表1 桩和土体的参数

Table 1 The parameters of pile and soil

| 参数 | 桩 | 土 |
|---|-------------------|-------|
| 弹性模量 E/MPa | 3.1×10^4 | 31.55 |
| 泊松比 ν | 0.2 | 0.3 |
| 重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 24 | 18 |
| 黏聚力 c/kPa | — | 10 |
| 内摩擦角 $\varphi/(\circ)$ | — | 30 |
| 剪胀角 $\psi/(\circ)$ | — | 0.1 |

2.3 有限元分析

为考虑桩与周围土体的相互作用,在桩与土体接触面单元的界面设置为摩擦接触条件。混凝土与土体、FRP与土体接触面的摩擦系数分别取0.466和0.3。土体与桩的正向接触刚度 k_N 取0.226 MPa,摩擦角取 25° ,土体与混凝土的摩擦系数取0.466,土与FRP管的摩擦系数取0.3,假定混凝土与FRP管之间无滑移。采用C3D8对桩身和土体进行划分,FRP管复合桩采用弹性模型Mohr-Coulomb对土体进行模拟。

3 数值结果分析

为了研究FRP管对混凝土应力分布的影响,钢筋混凝土桩和FRPC桩的内径和外径分别为150 mm和500 mm,FRP管厚度为15 mm,如图3所示。取距CAES桩顶8 m的位置,可得CAES桩横断面的径向应力、环向应力,如图4、5所示。沿CAES桩埋深方向的径向应力、环向应力如图6、7所示。

由图4可知,混凝土横断面的径向应力为压应力且从内表面向外逐渐减小,内FRP管加固复合桩与内外双层FRP管加固复合桩的应力分布一致;而钢筋混凝土桩与外FRP管加固复合桩的应力分布

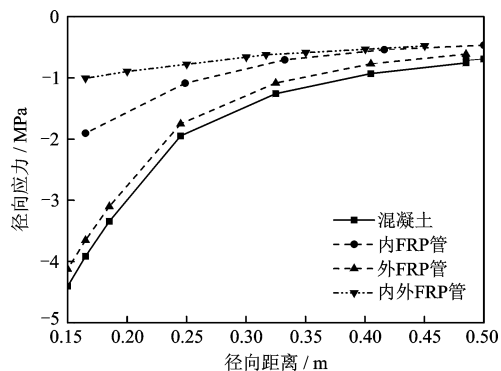


图4 CAES桩混凝土横断面的径向应力分布

Fig. 4 Radial stress distribution of the CAES pile concrete cross section

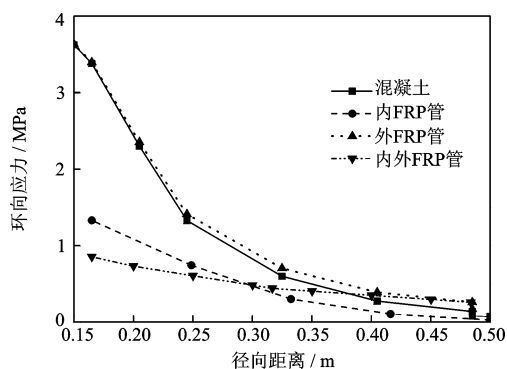


图5 CAES桩混凝土横断面的环向应力分布

Fig. 5 Circumferential stress distribution in the cross section of CAES pile concrete

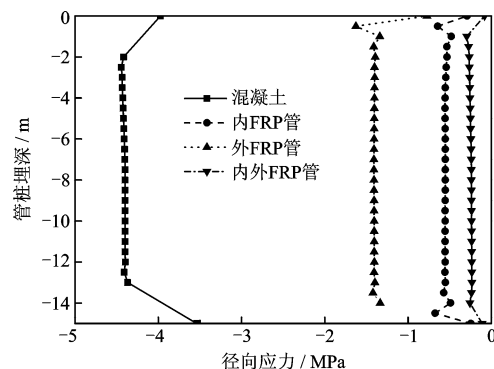


图6 混凝土沿埋深方向的径向应力分布

Fig. 6 Radial stress distribution of pile concrete along the direction of buried depth

相似,且应力分布与内FRP管和双层FRP管的复合桩有较大差异,原因是内衬FRP管的存在阻止了混凝土应力的发展。

混凝土横断面环向应力如图5所示,同样环向应力沿径向由内而外逐渐减小,且表现为拉应力,可以发现外FRP管复合桩和钢筋混凝土桩内表面的最大拉应力均高于混凝土的抗拉强度2.5 MPa。

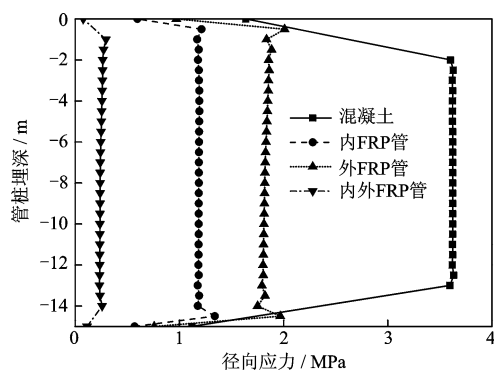


图 7 混凝土沿埋深方向的环向应力分布

Fig. 7 Circumferential stress distribution of concrete along the direction of buried depth

图 6 为 CAES 桩内表面沿纵向的混凝土径向应力分布。可以看出,考虑垂直荷载和压缩空气及周围土体反力的组合荷载所引起的径向应力在纵向上的差异较小,说明桩的摩阻力对径向应力的分布影响很小;FRP 管的存在分担了混凝土的径向应力,其中内外 FRP 管的分担效果最好、内 FRP 管次之、外 FRP 存在相对较小的作用。钢筋混凝土管桩的径向应力大小几乎是外 FRP 管复合桩的 3 倍,内 FRP 管和内外 FRP 管的 9 倍,这也说明 FRP 管对混凝土分担径向应力有较好的效果。

从图 7 可以看出,环向应力表现为拉应力,CAES 桩混凝土沿埋深方向的环向应力分布与图 6 的应力分布类似,钢筋混凝土管桩的环向应力大小几乎是外 FRP 管复合桩的 2 倍、内 FRP 管复合桩的 3 倍、内外 FRP 管的 8 倍,这也说明 FRP 管对混凝土分担环向应力有较好的效果。

图 8 为 FRP 管沿埋深方向的径向应力分布。可以看出,FRP 管的径向应力分布趋势与在图 6 基本一致;内 FRP 管和内外 FRP 管(内)的径向应力

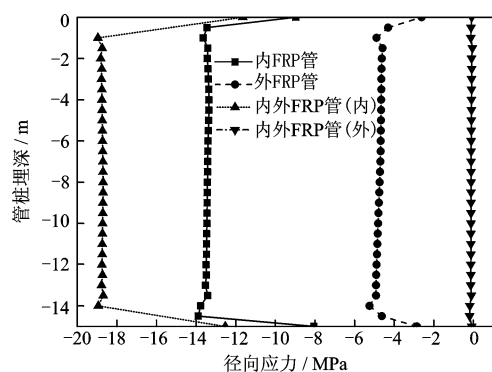


图 8 FRP 管沿埋深方向的径向应力分布

Fig. 8 Radial stress distribution along the buried depth of FRP tube

远远大于混凝土沿桩身埋深方向的应力,外 FRP 管的径向应力与混凝土沿桩身埋深方向的应力相同,内外 FRP 管(外)的径向应力小于混凝土沿桩身埋深方向的应力,与混凝土横断面外侧的径向应力相等;因此内 FRP 管很好的限制了 FRPC 复合桩径向应力的发展,也证实了内 FRP 管作为储能介质,能够更有效地提高 CAES 桩的使用性能。

图 9 为 FRP 管沿埋深方向的环向应力分布。可以看出,环向应力表现为拉应力,外 FRP 管的环向应力与混凝土沿桩身埋深方向的应力相同,共同承担了应力的发展但并未起到限制作用;而内 FRP 管、内外 FRP 管(内)、内外 FRP 管(外)的环向应力较大,起到了限制应力发展和共同承载的作用。

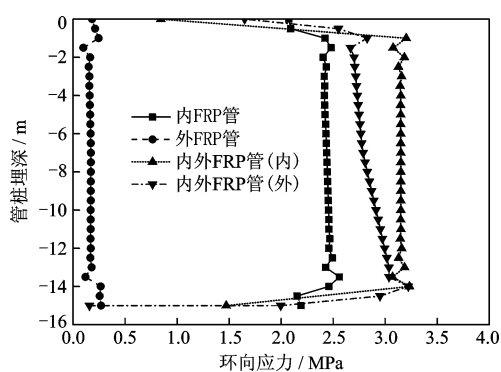


图 9 FRP 管沿埋深方向的环向应力分布

Fig. 9 Circumferential stress distribution of the FRP tubes in the buried depth direction

4 结 论

本文将内 FRP 管、外 FRP 管和内外 FRP 管的 FRPC 复合桩基础作为储能介质和承载桩基础进行了研究,考虑了竖向荷载、内压、土体等的作用,将复合桩与钢筋混凝土管桩进行了 ABAQUS 有限元对比分析。得出以下结论:

(1)FRP 自身不仅比强度和比模量高,而且耐腐蚀性能好;用 FRPC 复合桩作为 CAES 桩不仅能提高其适用性,还能改善 CAES 桩的耐久性。

(2)CAES 桩在竖向荷载、内压、土体的作用下,从混凝土横断面的径向应力和环向应力分布情况可以发现,内 FRP 管的存在有效阻止了混凝土应力的发展。

(3)从混凝土纵向的径向应力和环向应力分布情况可以发现,FRP 管的存在分担了混凝土的径向应力和环向应力,其中内外 FRP 管的分担效果最好、内 FRP 管次之、外 FRP 存在相对较小的作用。

钢筋混凝土管桩的径向应力大小几乎是外 FRP 管复合桩的 3 倍,内 FRP 管和内外 FRP 管的 9 倍,说明 FRP 管对混凝土分担径向应力有较好的效果。

(4)从 FRP 管沿埋深方向的径向应力和环向应力分布可以发现,内 FRP 管和内外 FRP 管(内)的径向应力远远大于混凝土沿桩身埋深方向的应力,外 FRP 管的径向应力与混凝土沿桩身埋深方向的应力相同,内外 FRP 管(外)的径向应力小于混凝土沿桩身埋深方向的应力,与混凝土横断面外侧的径向应力相等;证明内 FRP 管作为储能介质,能够更有效地提高 CAES 桩的使用性能。

参考文献:

- [1] 刘汉龙,孔纲强,吴宏伟. 能量桩工程应用研究进展及 PCC 能量桩技术开发[J]. 岩土工程学报, 2013, 36(1): 176-181.
- Liu H L, Kong G Q, Ng C W W. Application research progress of energy pile engineering and development of PCC technology [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 36(1):176-181. (in Chinese)
- [2] 杨 涛,花永盛,刘律智. 悬浮能量桩热-力学基本特性的数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4): 518-524, 597.
- Yang T, Hua Y Sh, Liu L Zh. Numerical simulation of thermal and mechanical properties of suspended energy pile [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4): 518-524, 597. (in Chinese)
- [3] 郝耀虎,孔纲强,彭怀风,等. 桩端约束对桩身热力学特性影响的模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4): 532-539.
- Hao Y H, Kong G Q, Peng H F, et al. Simulation analysis of the impact of pile end constraints on pile thermodynamic characteristics [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4): 532-539. (in Chinese)
- [4] 孔纲强,王成龙,刘汉龙,等. 多次温度循环对能量桩桩顶位移影响分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 958-964.
- Kong G Q, Wang Ch L, Liu H L, et al. Analysis of the influence of multiple temperature cycles on pile top displacement of energy pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 958-964. (in Chinese)
- [5] 陈 龙,陈永辉,李 行,等. 冷水循环作用对半埋管能源桩承载特性影响试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4): 551-556.
- Chen L, Chen Y H, Li X, et al. Experimental study

- on the influence of cold water circulation on bearing characteristics of semi-buried pipe energy pile [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4): 551-556. (in Chinese)
- [6] 陈 乐,王尔觉,郭易木,等. 竖直埋管及桩基内埋管换热器传热模型研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4): 557-564.
- Chen L, Wang E J, Guo Y M, et al. Research progress on heat transfer model of vertical buried pipe and pile embedded pipe heat exchanger [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4): 557-564. (in Chinese)
- [7] 桩基地热能利用技术标准: JGJ/T438—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Technical standard for the utilization of pile foundation geothermal energy: JGJ/T438—2018 [S]. Beijing: China Standard Press, 2018. (in Chinese)
- [8] Sabirova A, Zhang D, Kim J, et al. Development of a reinforced concrete foundation system for renewable energy storage [C] // Challenges and Innovations in Geotechnics—Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference, Astana, Kazakhstan: [s. n.], 2016: 5-7.
- [9] Tulebekova S, Saliyev D, Zhang D, et al. Preliminary analytical study on the feasibility of using reinforced concrete pile foundations for renewable energy storage by compressed air energy storage technology [C] // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, [s. l.]: IOP Publishing, 2017: 1-9.
- [10] Yang H, Memon, S A, Bao X, et al. Design and preparation of carbon based composite phase change material for energy piles[J]. Materials, 2017, 10(4): 1-15.
- [11] Lund H, Salgi G. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1 172-1 179.
- [12] Swider D J. Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2007, 22(1): 95-102.
- [13] Succar S, Williams R H. Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power[R]. Princeton: Princeton Environmental Institute, 2008, 8.
- [14] Budt M, Wolf D, Span R, et al. Compressed air energy storage—an option for medium to large scale electrical-energy storage [J]. Energy Procedia, 2016, 88: 698-702.

(本文责编:赵 霞)

(下转第 591 页)

Chinese)

- (本文责编:周小潭)

- [15] Zhang D, Kim J, Tulebekova S, et al. Structural responses of reinforced concrete pile foundations subjected to pressures from compressed air for renewable energy storage [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018, 12(1):1-16.
- [16] Isaac S, Dan W, Shimshon B. Compressed air energy storage method and system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 1997, 17(3):282-282.
- [17] Sen R, Mullins G. Application of FRP composites for underwater piles repair[J]. *Composites Part B (Engineering)*, 2007, 38(5/6):751-758.
- [18] Mullins G, Sen R, Suh K, et al. Underwater fiber reinforced polymers repair of prestressed piles in the allen creek bridge[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(2): 136-146.
- [19] Mullins G, Sen R, Suh K S, et al. A demonstration of

- underwater FRP repair [J]. Concrete International, 2006, 28(1): 70-73.
- [20] Ashford S A, Jakrapiyanun W. Drivability of glass FRP composite piling[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(1): 58-60.
- [21] Fam A, Schnerch D, Rizkalla S. Rectangular filament-wound glass fiber reinforced polymer tubes filled with concrete under flexural and axial loading: experimental investigation[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(1): 25-33.
- [22] 周 康,戴国亮,杨 阳,等. CBF 管桩低周反复荷载试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(3): 491-495.
- Zhou K, Dai G L, Yang Y, et al. Low cyclic and repeated load test of CBF pipe pile [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 48(3): 491-495. (in Chinese)