

DOI: 10.11779/CJGE201703003

# 酸性土腐蚀对钢桩基础承载性能的影响

王凤池, 高寰, 冯旭宁, 刘甜甜

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:** 土质酸性是导致钢桩腐蚀的主要原因之一。服役于酸性土中的钢桩将会被侵蚀, 导致桩身材料劣化, 影响了桩基的安全性和耐久性。为了了解腐蚀桩的承载性能, 通过中性和模拟酸性土两种环境下的桩基室内模型试验, 测得腐蚀前后承台沉降量和桩端阻力值随桩顶加卸载的变化规律以及地面堆载固结过程中各土层沉降量、桩端阻力值、桩身轴力值以及桩侧摩阻力的变化情况。研究表明, 由于腐蚀钢桩表面产生大量疏松的锈蚀产物, 使桩-土界面的黏着力大大降低。桩顶承台的沉降量较未腐蚀桩大, 腐蚀桩的桩端阻力值比未腐蚀桩大。而在堆载固结条件下, 由于堆载作用不仅加速了桩间土体的固结, 桩-土界面再次挤密, 单桩以及群桩中各桩的桩端阻力值减小。腐蚀桩的中性点位置明显下移, 腐蚀率越大的桩, 桩侧负摩阻力的增加值越大, 腐蚀前后中性点位置处桩身轴力变化率越大。研究成果可以为腐蚀条件下各类桩基载荷性能研究提供参考。

**关键词:** 酸性土; 钢桩; 腐蚀; 承载性能; 固结; 中性点

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)03-0408-09

**作者简介:** 王凤池(1970-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理、固体废弃物处理等方面的教学和科研。E-mail: cefcwang@sjzu.edu.cn。

## Effects of corrosion on bearing capacity of steel pile foundation in acidic soil

WANG Feng-chi, GAO Huan, FENG Xu-ning, LIU Tian-tian

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** Soil acidity is one of the reasons for corrosion of steel piles. The material deterioration of steel pile foundation served in the acidic soil will affect the safety and durability of pile foundation. In order to understand the bearing capacity of corroded piles, the indoor model tests are carried out under two kinds of neutral and simulated acidic soil environments. The pile cap settlement and the pile tip resistance changing with the loading and unloading of pile top are tested. The changes of the soil layer settlement, pile tip resistance, pile axial stress and friction resistance in the process of ground load-consolidation are also measured. The results show that because the steel pile surface produces a lot of loose rust, the adhesion of pile-soil interface is greatly reduced. So the settlement of corroded pile cap is larger than that of non-corroded pile, and the end resistance of the corroded pile is also larger than that of the non-corroded pile. But under the load-consolidation conditions, because the loading accelerates the consolidation of soil between piles, the pile-soil interface is re-compacted, and the pile end resistances of both single pile and pile groups decrease. The neutral point location of corroded piles descends. The more the corrosion rate of piles, the more the lateral negative friction resistance of piles, and the more the changes of axial force at the neutral point position. The results may provide references for the studies on the loading performance of all kinds of pile foundations under corrosion condition.

**Key words:** acidic soil; steel pile; corrosion; bearing capacity; consolidation; neutral point

## 0 引言

钢桩具有承载力高, 施工方便等优点, 因而被广泛应用于各种工程地质条件当中<sup>[1-2]</sup>, 尤其适用于软土地基以及沿海地区的基础工程建设。常用的钢桩主要包括钢管桩、H型钢桩和其他异型钢桩, 如 screwed steel pile<sup>[3]</sup>。

土质酸性是由于酸性气体、酸性水、酸性固体物

等入渗, 并与土中离子进行离子交换等化学反应导致的。土质酸性是导致钢桩腐蚀的主要原因之一。服役于酸性土壤中的桩基特别是钢桩基础, 将会被侵蚀以

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578348); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(IR2013026); 辽宁省“百千万人才工程”项目(2015-57)

收稿日期: 2015-12-17

致桩身材料劣化, 承载性能降低, 对桩基的安全性和耐久性造成不良影响。

钢在酸性土壤下的腐蚀行为是研究钢桩腐蚀的基础。pH值代表了土壤的酸碱度, 在缺乏碱金属、碱土金属而大量吸附氢离子的pH值小于5的酸性土壤中, 金属材料的腐蚀行为十分严重<sup>[4]</sup>。在酸性较强的土壤中, 土壤腐蚀的阴极过程主要为氧离子的去极化过程, 土壤酸度增高可以促进氢离子的阴极去极化过程, 从而加速腐蚀<sup>[5]</sup>。而在非酸性土壤中易形成难溶的氧化物和碳酸盐, 在金属表面形成保护层而减缓腐蚀。一般来讲, 土壤盐含量增加, 电阻率减小, 宏观腐蚀速率升高<sup>[6]</sup>。黄涛等通过研究含水率对Q235钢在模拟酸性土壤中腐蚀行为的影响发现, 随含水率的增加, 腐蚀速率呈现先快后慢的趋势; 低含水率时, Q235钢发生全面腐蚀; 随含水率升高, 腐蚀形态由全面腐蚀转化为不均匀腐蚀<sup>[7]</sup>。

目前, 试验模拟钢在土壤中的腐蚀行为主要有两类方法: 实际土壤和根据实际土壤理化性质配制的土壤模拟溶液<sup>[8-9]</sup>。模拟桩及金属材料的腐蚀多采用模拟侵蚀液的方法, 如黄新朋等通过模拟酸性溶液的方法, 研究了酸性腐蚀后混凝土的强度变化情况以及中性化深度问题<sup>[10]</sup>。胥聪敏对管线钢在酸性土壤下的腐蚀行为的研究也采用了土壤模拟液的方法等<sup>[11]</sup>。

中国浅海以及沼泽地带大多为腐蚀性比较强的软土地基, 往往采用钢桩基础。因此, 对于钢桩防腐及腐蚀钢桩工作性能研究显得尤为重要。本文采用模拟酸性侵蚀土壤, 通过酸性土壤环境下钢桩的承载性能模型试验, 主要研究酸性土中钢桩腐蚀后的受力性能和堆载固结时效影响, 从而为腐蚀条件下各类桩基载荷性能研究提供参考。

## 1 试验方案

### 1.1 试验箱和模型桩的制作

试验用模型箱净空尺寸为700 mm×600 mm×1200 mm。箱壁为5 mm厚的钢板, 试验时箱壁涂一层润滑油, 以减少试验用土与箱壁的摩擦所造成的影响<sup>[12]</sup>。箱侧面底部布置孔径为20 mm, 孔中心距槽底50 mm的排水阀, 在排水阀处贴细筛网以防止砂土流出。模型试验布置图如图1所示。试验用模型桩的桩长为1000 mm, 底面边长40 mm, 壁厚2 mm。桩的静弹性模量 $E_p=1.96\times 10^5$  MPa。在模型桩内壁对称贴上10个应变片。

试验分两种工况: 其一为腐蚀前后加卸荷试验模拟工程桩腐蚀前后的承载性能; 其二为堆载加速固结中钢桩腐蚀前后的承载性能<sup>[12-13]</sup>, 用以研究自重固

结、湿陷、地面荷载作用以及高承台桩地面上堆载对腐蚀桩承载性能的影响。在承台桩侧根据不同的试验工况, 在单桩、群桩上分别布置尺寸为150 mm×150 mm×5 mm和350 mm×350 mm×5 mm的钢板作为桩承台。

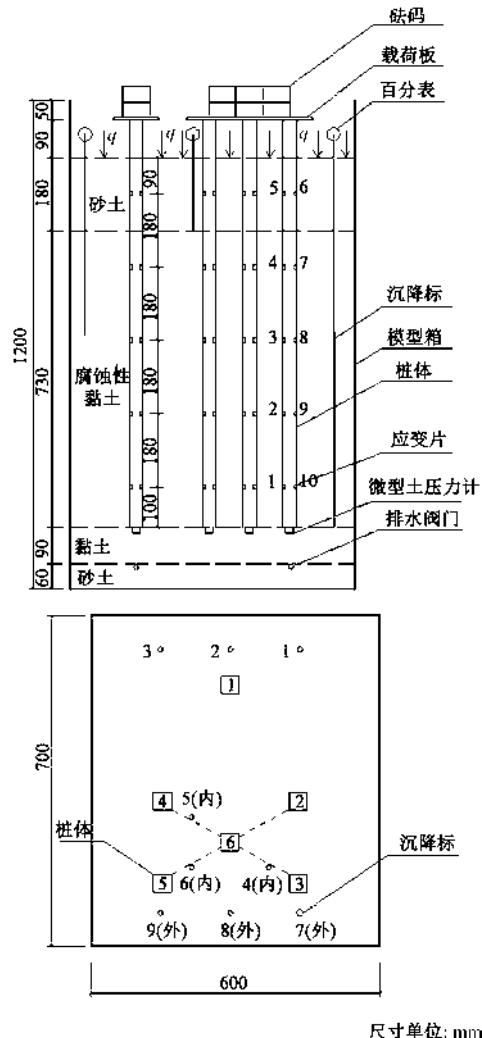


图1 模型试验布置图

Fig. 1 Layout of model tests

### 1.2 模拟酸性溶液的配置

采用快速侵蚀试验, 即扩大环境水溶液的浓度, 使试件在较短的时间内就可以达到预期的侵蚀效果, 以便进行进一步的检测<sup>[4]</sup>。试验配置的模拟酸性溶液为硫酸和硝酸的混合溶液, 硫酸和硝酸的摩尔比为9:1。将pH=0.5的酸性溶液加入到土壤中后, 由于土壤本身有一定的缓冲能力, 可测得此时土壤pH=3.0。根据地下水腐蚀性环境特点<sup>[14]</sup>, 将其划分为强腐蚀环境pH=2.0~4.0,  $\text{SO}_4^{2-}>4000$  mg/L; 中等腐蚀环境pH=4.0~5.5,  $\text{SO}_4^{2-}<4000$  mg/L。因此, 本文试验环境属于强腐蚀环境。

### 1.3 试验用土的选取

试验用土采用饱和或近似饱和的重塑黏性土, 用

pH=0.5 的酸性溶液浸泡 3 d, 使其达到饱和状态后, 将重塑土均匀填入模型试验箱中。试验箱土料填入完成后, 通过室内土工试验测定了试验用土的指标参数, 如表 1。

表 1 试验用黏性土主要指标参数

Table 1 Parameters of cohesive soil

重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	饱和度 S <sub>r</sub> /%	饱和 重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	内摩 擦角 /(°)	黏聚力 c/kPa	压缩 模量 /MPa
18.0	89.0	18.5	7.5	16.0	3.22

### 1.3 试验过程

本文设计了中性和酸性两种环境下的单桩和群桩试验。具体情况如表 2 所示。

表 2 试验分组

Table 2 Test groups

桩号	土壤	布桩位置	桩间距	承台长×宽 /(mm×mm)
N1	中性	单桩	—	150×150
N2	中性	角桩	3d	350×350
N3	中性	角桩	3d	350×350
N4	中性	角桩	3d	350×350
N5	中性	角桩	3d	350×350
N6	中性	中心桩	3d	350×350
A1	酸性	单桩	—	150×150
A2	酸性	角桩	3d	350×350
A3	酸性	角桩	3d	350×350
A4	酸性	角桩	3d	350×350
A5	酸性	角桩	3d	350×350
A6	酸壤	中心桩	3d	350×350

首先, 在模型箱内填入厚度 60 mm 的清洗砂作为排水层, 使饱和土体中的水分得以排出。然后, 在砂土上填入黏性土作为持力层, 使持力层总厚度达到 150 mm。将贴有应变片的钢桩放置在设定好的位置, 并在桩端埋置微型土压力传感器, 用来测得桩端阻力。最后安放桩承台。埋设完成后, 腐蚀 100 d。腐蚀完成之后, 静置 48 h, 然后开始在承台上进行分级加卸载, 测出桩顶承台沉降量的变化以及桩端阻力值的变化。桩顶加载完成之后, 开始进行地面堆载, 采用回填砂土和均匀布置的砝码模拟地面堆载, 使堆载强度达到 6 kPa 左右。

### 1.4 腐蚀前后模型桩质量变化

试验表明<sup>[15]</sup>, 在模拟酸性土环境中很难控制材料的全面腐蚀行为。因此, 将试验设置为等沉降下, 腐蚀对桩的侧阻与端阻分配关系的影响。在试验完成后测定柱体腐蚀率。为定量描述钢桩腐蚀的质量变化规律, 引入腐蚀率  $k$ 。

$$k = \frac{M_0 - M_c}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $k$  为腐蚀率 (%);  $M_0$  为腐蚀前模型桩的初始质量 (kg);  $M_c$  为腐蚀后模型桩的质量 (kg)。通过式

(1) 计算的模型桩腐蚀率如表 3 所示。

表 3 模型钢桩腐蚀前后质量变化情况

Table 3 Quality change of piles before and after corrosion

桩号	布桩位置	腐蚀前 $M_0/g$	腐蚀后 $M_c/g$	腐蚀率 $k/%$
A1	单桩	2549.4	2488.1	2.404
A2	角桩	2551.7	2481.6	2.747
A3	角桩	2548.9	2487.2	2.421
A4	角桩	2550.2	2510.1	1.572
A5	角桩	2550.7	2491.4	2.325
A6	中心桩	2549.1	2513.3	1.404

## 2 承台加卸载过程中承载性能变化

### 2.1 腐蚀前后桩顶承台加卸载与沉降关系曲线

经过模拟酸性溶液腐蚀之后, 桩顶承台的沉降量增大, 如图 2 所示。最大加载量下的单桩、群桩桩顶承台沉降量较未腐蚀桩分别增大 13.1% 和 11.7%。对于黏性土, 桩-土界面的黏着力对桩侧摩阻力影响较大, 经过模拟酸性土的腐蚀之后, 模型桩表面产生大量疏松的锈蚀产物, 随着这些锈蚀产物的疏松、脱落, 使桩-土界面的黏着力大大降低, 桩端整体下刺, 进而产生桩顶承台沉降量变大的现象。另外, 酸性土腐蚀作用对加载过程沉降的影响较大, 而对于桩顶承台卸载过程中的沉降影响比较小。

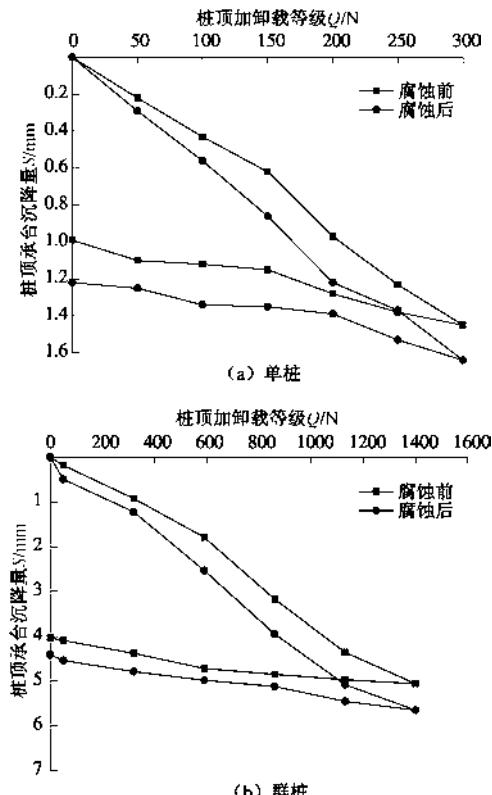


图 2 腐蚀前后桩顶承台加卸载与沉降关系曲线

Fig. 2 Relationship between loading-unloading on pile cap and settlement before and after corrosion

## 2.2 腐蚀前后桩顶承台加卸载与桩端阻力值关系曲线

对于承台加载, 腐蚀前后桩端阻力值随桩顶加卸载变化曲线的趋势基本不变(如图3), 但腐蚀桩的桩端阻力值大于未腐蚀桩。对于单桩(1号桩), 当桩顶加载量为300 N时, 腐蚀桩比未腐蚀桩的桩端阻力大8.21%。腐蚀率不同, 桩端阻力值变化率也不同, 同处于角桩位置的2号桩和4号桩, 当桩顶加载280 N时, 腐蚀率较大的2号桩桩端阻力值较未腐蚀桩增加19.85%, 而腐蚀率较小的4号桩仅增加3.7%。

酸性土腐蚀作用对于各桩的桩端阻力值的影响在加载过程中表现较为明显。卸载时的桩端阻力值变化曲线斜率与腐蚀之前的斜率基本一致。图4为腐蚀率不同的桩体在桩顶加载量达到最大值时的桩端阻力值。对于布桩位置相同的2, 3, 4, 5号桩, 由于各桩体的腐蚀率不同, 因此桩端阻力也不同。腐蚀率越大, 桩端阻力值越大。

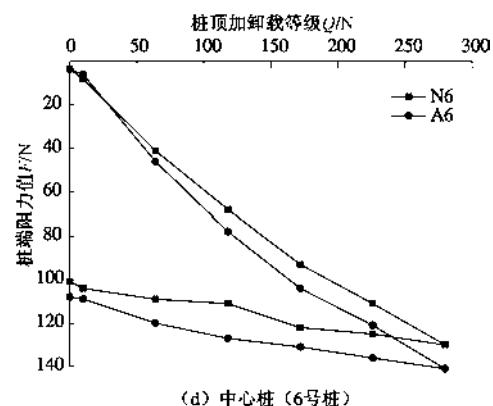
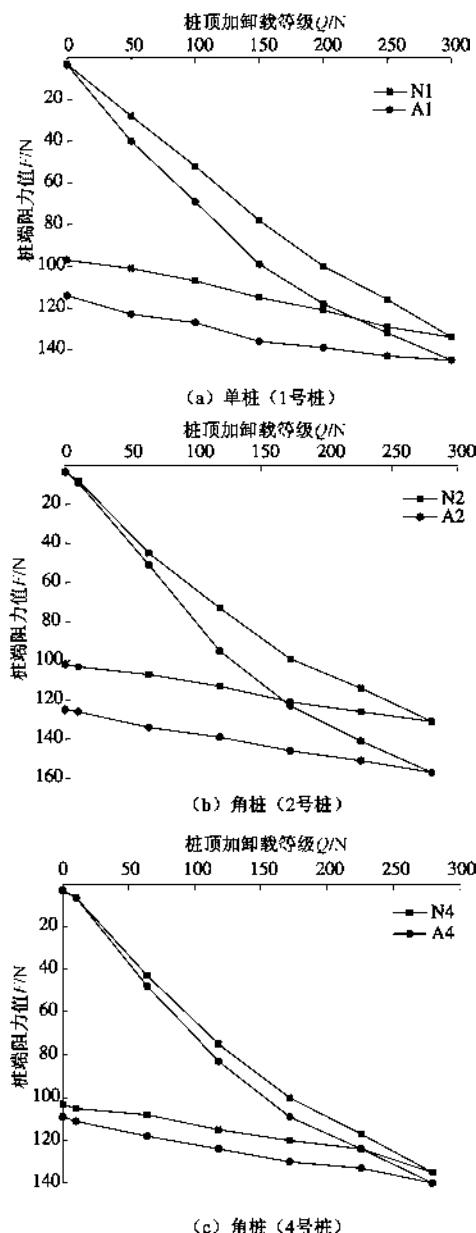


图3 腐蚀前后桩端阻力值随桩顶加卸载变化曲线

Fig. 3 Relationship between loading-unloading on pile cap and tip resistance before and after corrosion

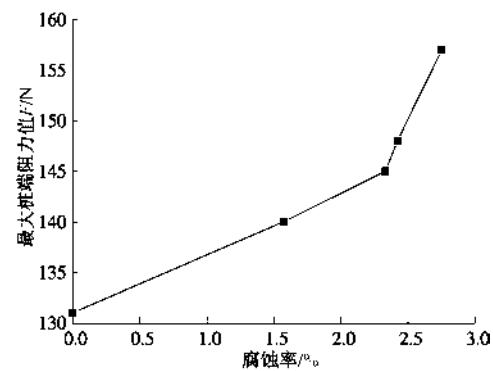


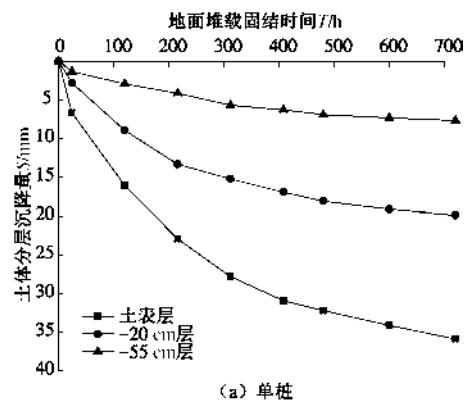
图4 最大桩端阻力值随腐蚀率的变化情况

Fig. 4 Relationship between maximum pile tip resistance and corrosion rate

## 3 堆载固结过程中承载性能变化情况

### 3.1 各土层沉降随固结时间变化曲线

如图5, 各土层沉降量随固结时间的增加而逐渐增大, 并且增加速率由快变慢, 最终趋于稳定。在堆载固结最初的120 h, 单桩土表层的沉降量已经达到16.07 mm, 是最大沉降量的44.8%, 单桩-55 cm层的沉降量为2.94 mm, 是最大沉降量的38.3%。这是由于随着堆载固结时间的增加, 土体中的含水率逐渐减



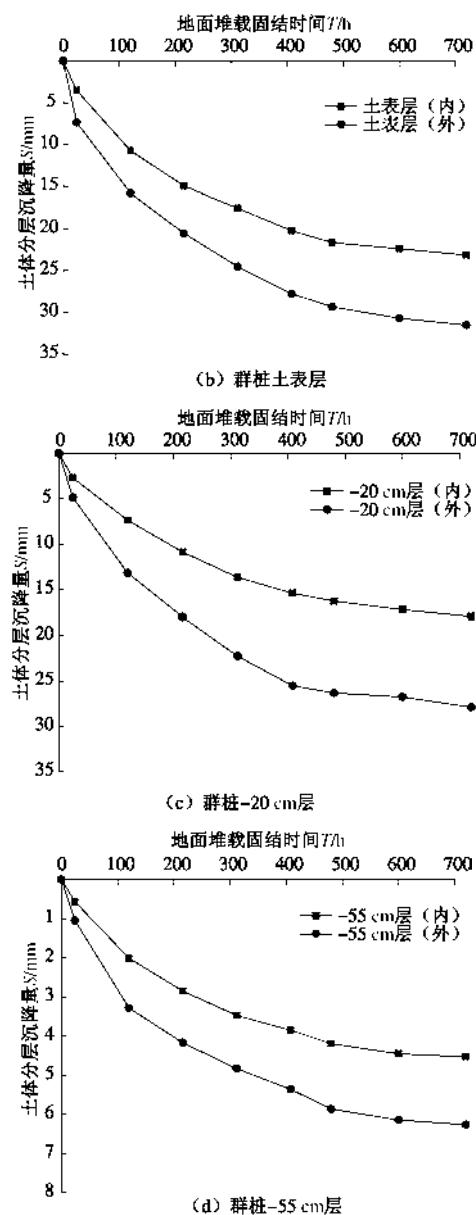


图 5 腐蚀之前各土层沉降量随固结时间变化规律

Fig. 5 Change of soil settlement with consolidation time

小。在含水率较高时, 土体沉降量较大, 而当土体含水率减小之后, 土体的沉降也逐渐减慢, 所以土体的沉降速率随着含水率的减小, 先增大后减小。对于群桩, 桩周土体的沉降量随着土层深度的增加逐渐减小。由于桩体的夹持作用, 群桩内土体沉降小于群桩外沉降。

### 3.2 腐蚀前后桩端阻力随固结时间变化曲线

在经过模拟酸性土腐蚀之后, 单桩以及群桩中各桩的桩端阻力值略有减小(图 6)。腐蚀之后的单桩(A1)、角桩(A2)、中心桩(A6)在固结 720 h 时, 桩端阻力值分别为 747.67, 749.84, 735.78 N。而在固结 120 h 时的桩端阻力值分别为 265.31, 218.41, 247.37 N, 为固结 720 h 桩端阻力值的 35.5%, 29.1%, 33.6%。

在酸性土壤中, 桩端阻力值随固结时间的增加速率逐渐降低, 当固结 720 h 时, 桩端阻力值小于中性土壤中桩体的桩端阻力值。其原因在于, 堆载作用不仅加速了桩间土体的固结, 也促使桩侧土体与桩体再次紧密接触。由于桩侧表面受到腐蚀作用后, 桩侧表面凸凹不平, 从而使桩侧摩阻力增加, 而在桩顶载荷量不变的情况下, 桩端阻力值有所减少。故当桩基侧摩阻力发挥最大作用时, 腐蚀对于桩端阻力的影响也最大。可见, 承台加载因锈蚀产生了桩侧土体与桩的黏结力退化, 而堆载情况下由于桩间土与桩之间疏松被再次挤密, 锈蚀作用反而增加了桩侧阻力。

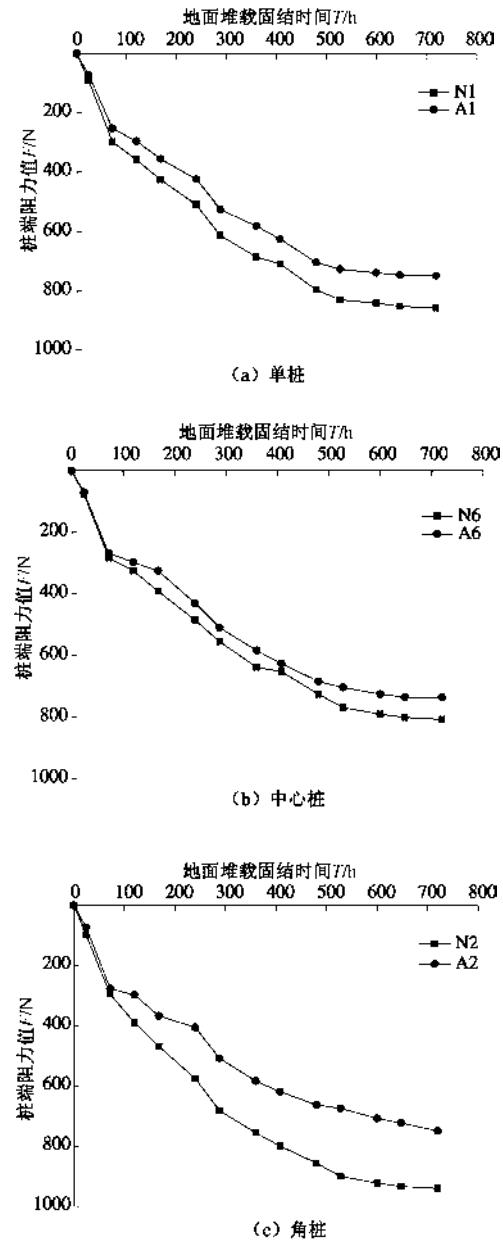


图 6 腐蚀前后桩端阻力随固结时间变化曲线

Fig. 6 Relationship between consolidation time and tip resistance of pile before and after corrosion

桩基承载力取决于桩身强度和桩土的界面特性。腐蚀使桩侧摩阻力下降, 并引起下刺, 应力向桩间土转移, 使桩间土应力增加, 进而压密桩间土引起桩侧摩阻力增大。这是一个应力转移再平衡问题。在这一过程中, 腐蚀引起桩的截面面积损失, 导致桩身强度不足引起桩的最终破坏。而这种腐蚀破坏会被桩土应力再平衡等因素所掩饰, 须引起足够重视。

图7为布桩位置相同但腐蚀率不同桩的桩端阻力变化情况。定义相同固结时间下, 未腐蚀桩与腐蚀桩桩端阻力差值与未腐蚀桩端阻力的比值为桩端阻力变化率 $F'$ 。对于布桩位置同为角桩的各桩A2、A3、A4、A5, 由于其腐蚀率不同, 在经过酸性土壤腐蚀之后, 桩端阻力值变化率也不同, 随着腐蚀率的增加, 其影响也逐渐增大。对于处于角桩位置的腐蚀率最大的A2桩, 当堆载固结720 h时, 其桩端阻力变化率为20.3%, 而对于同处于角桩位置的腐蚀率最小的A4桩, 在相同固结时间下桩端阻力值的变化率仅为3.5%。可见, 腐蚀率越高的桩, 桩端阻力值的变化率越大。随着固结时间的增加, 桩端阻力值的变化率逐渐降低。这是由于随着土体固结沉降的逐渐稳定, 桩端阻力值也逐渐稳定, 酸性土壤腐蚀作用对于桩产生的影响越来越不明显。

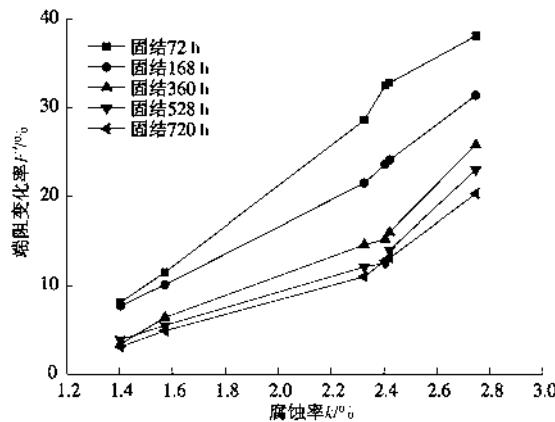


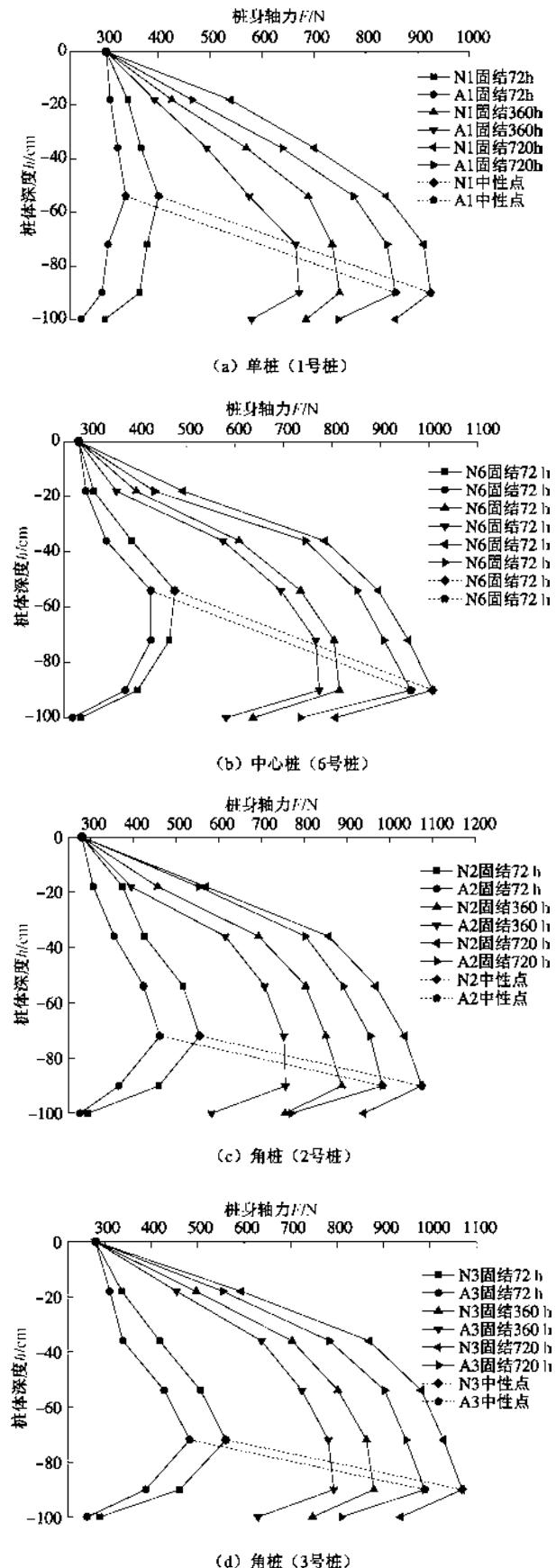
图7 不同固结时间下桩端阻力变化率随腐蚀率的变化情况

Fig. 7 Change of pile tip resistance with corrosion rate under different consolidation time

### 3.3 腐蚀前后桩身轴力随桩体深度变化曲线

在不同固结时间下, 腐蚀前后桩身轴力随桩体深度变化情况如图8所示。腐蚀桩桩身轴力略有减小, 但桩身轴力随桩体深度变化幅度与中性环境下相比有所增大。由于桩顶荷载沿桩身向下传递的过程中, 必须不断克服桩侧摩阻力, 因此桩身轴向力随桩体深度的增加而逐渐减小(传至桩底的轴向力即为端阻力), 而在桩身轴力自上而下的传递过程当中, 桩身轴力增量与桩侧摩阻力值成正比。堆载固结条件酸性土壤中

桩侧摩阻力值增大, 故腐蚀之后的桩身轴力沿桩体深度增大。另外, 经过酸性土壤腐蚀之后, 桩侧负摩阻力增大, 进而导致其中性点位置下移。



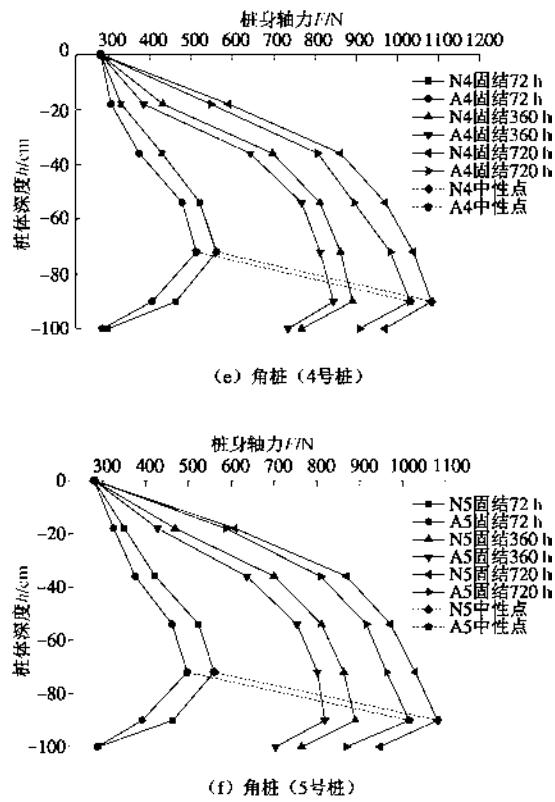


图 8 腐蚀前后桩身轴力随桩体深度变化曲线

Fig. 8 Relationship between pile depth and axial force of pile before and after corrosion

如图 9 所示为不同腐蚀率的桩中性点位置处的桩身轴力变化率。所谓桩身轴力变化率是指相同固结时间下, 对比桩与腐蚀桩桩身轴力差值与对比桩桩身轴力的比值。由于腐蚀率越大的桩, 其桩侧摩阻力的增加值越大, 所以中性点位置处桩身轴力的变化量越大, 即腐蚀前后桩身轴力变化率越大。随着固结时间的增加, 各桩桩身轴力逐渐趋于稳定, 在固结初期, 由于桩土之间的作用力主要取决于桩与土之间的黏着力, 腐蚀之后的桩体与土体之间的黏着力明显减小, 所以在固结初期腐蚀前后桩身轴力变化率较大; 而在固结后期, 桩土之间的作用力主要取决于桩体与桩周土之间的摩擦力, 而腐蚀作用对于桩侧摩阻力的影响效果与由于黏着力的变化而产生的影响相比而言较小, 所以在固结后期桩身轴力变化率有所减小。

### 3.4 腐蚀前后桩侧摩阻力随固结时间的变化情况

如图 10 为腐蚀前后的单桩、中心桩在不同的堆载固结时间下桩侧摩阻力随桩体深度的变化曲线。在固结初期, 腐蚀桩体的桩侧摩阻力略有减小, 因为锈蚀作用导致桩-土接触趋于疏松, 从而使桩土之间的黏着力降低。当桩周土体的固结达到一定程度后, 桩-土接触面被挤密, 桩侧摩阻力主要靠桩-土相对位移产生的摩擦力因桩侧凸凹不平而增加。随着桩间土体的

固结沉降, 造成桩-土相对位移增大, 负摩阻力增大。模型桩基的中性点位置下移, 腐蚀率越大桩负摩阻力的增加值越大。

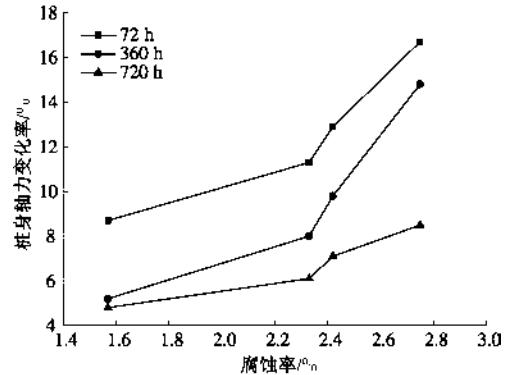


图 9 不同固结时间下桩身轴力变化率

Fig. 9 Change rate of axial force under different consolidation time

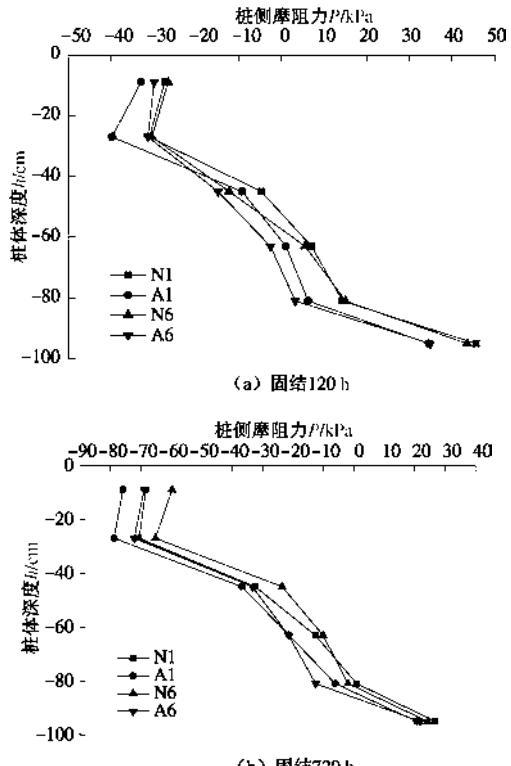


图 10 腐蚀前后的单桩、中心桩侧摩阻力随桩体深度变化曲线

Fig. 10 Change of friction force of piles with pile depth

如图 11 为腐蚀率不同的桩在不同固结时间下的侧摩阻力随桩体深度变化曲线。随着固结时间的增加, 桩侧负摩阻力值逐渐增大, 中性点位置也逐渐下移, 并且腐蚀率越大, 其表面的粗糙度越大, 桩侧负摩阻力值越大; 在固结初期桩侧负摩阻力的增加值较大, 随着固结时间的增加, 桩侧负摩阻力的增加值逐渐减小。随着堆载固结过程的逐渐深入, 桩侧摩阻力值逐渐稳定。

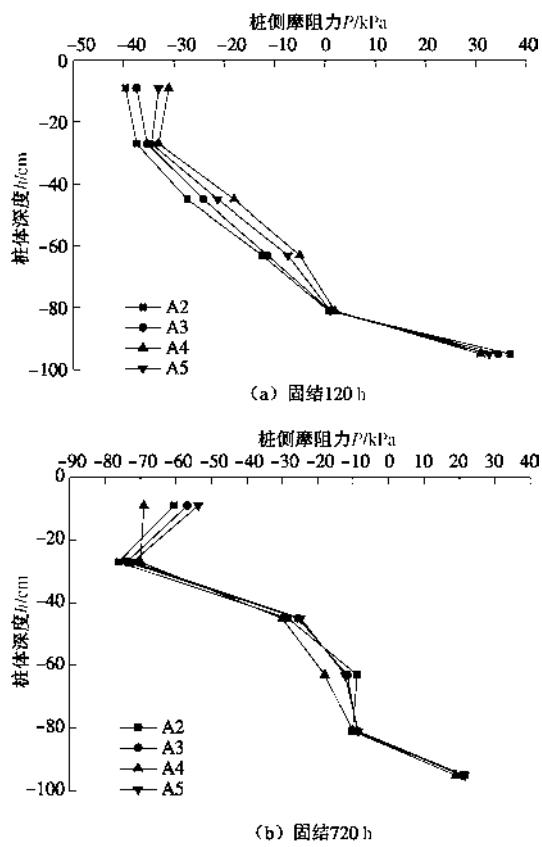


图 11 不同腐蚀率桩侧摩阻力随桩体深度变化曲线

Fig. 11 Change of friction force of piles with different corrosion rates with the pile depth

## 4 结论与建议

(1) 在酸性土中, 服役钢桩表面产生大量疏松的锈蚀产物, 使桩-土界面的黏着力大大降低。在承台加载时, 桩顶承台的沉降量较未腐蚀桩大。腐蚀作用对于加载过程中的影响要大于卸载过程。

(2) 对于承台加载, 腐蚀前后桩端阻力值随桩顶加卸载变化曲线的趋势基本不变, 由于桩体的刺入程度增加, 腐蚀桩的桩端阻力值大于未腐蚀桩。

(3) 堆载固结条件下时, 土层沉降量随固结时间的增加而逐渐增大, 但增加速率由大变小, 最终趋于稳定。由于桩体的夹持作用, 群桩内土体沉降小于群桩外沉降。

(4) 堆载固结条件下, 由于堆载作用不仅加速了桩间土体的固结, 也促使桩侧土体与桩体再次紧密接触, 单桩以及群桩中各桩的桩端阻力值略有减小。承台加载因锈蚀产生了桩侧土体与桩的黏结力退化, 而堆载情况下由于桩间土与桩之间疏松被再次挤密, 锈蚀作用反而增加了桩侧阻力。

(5) 堆载固结条件下, 腐蚀桩的中性点位置明显下移, 桩身腐蚀率越大, 桩侧负摩阻力的增加值越

大, 腐蚀前后中性点位置处桩身轴力变化率越大。

(6) 腐蚀可以使桩侧摩阻力下降, 并引起下刺, 应力向桩间土转移, 由于承台作用使桩土变形协调, 使桩间土应力增加, 进而压密桩间土引起桩侧摩阻力增大。这是一个应力转移再平衡问题, 掩饰了桩身强度的锈蚀损失。腐蚀会因为导致桩身强度不足引起桩的最终破坏, 必须引起足够重视。

## 参考文献:

- [1] 王艳华. H型钢桩静载与动载承载力试验分析[J]. 公路, 2014(11): 110 - 113. (WANG Yan-hua. Static and dynamic load bearing capacity test and analysis of H-shape steel pile[J]. Highway, 2014(11): 110 - 113. (in Chinese))
- [2] 汤立军, 秦立成, 于文太. 海洋平台钢桩可打入性研究[J]. 船海工程, 2014, 43(4): 110 - 113. (TANG Li-jun, QIN Li-cheng, YU Wen-tai. Pile drivability analysis for offshore platform[J]. Ship & Ocean Engineering, 2014, 43(4): 110 - 113. (in Chinese))
- [3] WADA Shozo, HIRAI SHI Masakazu. An experimental study on the pulling resistance of the screwed steel pile to the static axial reciprocal load - On the effect of the initial load[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2015, 80(710): 619 - 626.
- [4] 廖景娱, 刘钧泉, 孙嘉瑞. 碳钢在华南酸性土壤中的腐蚀行为研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 70 - 74. (LIAO Jing-yu, LIU Jun-quan, SUN Jia-rui, et al. A study on corrosion behavior of carbon steel in South China acidic soil[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2001, 29(4): 70 - 74. (in Chinese))
- [5] COLE I S, MARNEY D. The science of pipe corrosion: A review of the literature on the corrosion of ferrous metals in soils[J]. Corrosion Science, 2012, 56: 5 - 16.
- [6] CARLOS A M, FERREIRA J, PONCIANO C. Evaluation of the corrosivity of the soil through its composition[J]. Science of the Total Environment, 2007, 388(1/2/3): 250 - 255.
- [7] 黄涛, 闫爱军, 陈小平. 含水率对 Q235 钢在模拟酸性土壤中腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(6): 511 - 516. (HUANG Tao, YAN Ai-jun, CHEN Xiao-ping. Influence of water content on corrosion behavior of Q235 steel in an artificial soil[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(6): 511 - 516. (in Chinese))
- [8] MASLEHUDDIN M, I-ZAHRANI M M, IBRAHIM M. Effect of chloride concentration in soil on reinforcement

- corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(8): 1825 – 1832.
- [9] LEVLIN E. Aeration cell corrosion of carbon steel in soil: in situ monitoring cell current and potential[J]. Corrosion Science, 1996, 38(12): 2083 – 2090.
- [10] 黄新朋, 王桂林, 张永兴. 酸性侵蚀作用下抗滑桩混凝土中性化试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(1): 42 – 46. (HUANG Xin-peng, WANG Gui-lin, ZHANG Yong-xing, et al. Anti-sliding pile concrete neutralization test research under acid rain erosion[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(1): 42 – 46. (in Chinese))
- [11] 胥聪敏, 霍春勇, 熊庆人. X80 管线钢在酸性土壤模拟溶液中的腐蚀行为[J]. 机械工程材料, 2009, 33(5): 29 – 32. (XU Cong-min, HUO Chun-yong, XIONG Qing-ren, et al. Corrosion behavior of X80 pipeline steel in simulated acid soil solution[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33(5): 29 – 32. (in Chinese))
- [12] 孔纲强, 杨 庆, 郑鹏一. 考虑时间效应的群桩负摩阻力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1913 – 1919. (KONG Gang-qiang, YANG Qing, ZHENG Peng-yi, et al. Model tests on negative skin friction for pile groups considering time effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1913 – 1919. (in Chinese))
- [13] SHIBATA T, SEKIGUCHI H, YUKITOMO H. Model test and analysis of negative skin friction acting on piles[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(2): 29 – 39.
- [14] 黄 涛, 陈小平, 王向东, 等. 实验室模拟酸性土壤中钢材的加速腐蚀[J]. 材料保护, 2014, 47(10): 58 – 60. (HUANG Tao, CHEN Xiao-ping, WANG Xiang-dong, et al. Indoor accelerated corrosion test method for steel in simulated acidic soil environment[J]. Material Protect, 2014, 47(10): 58 – 60. (in Chinese))
- [15] 贺明侠, 王连俊. 地下水及地质作用对建筑工程的影响[J]. 土工基础, 2005, 19(3): 19 – 22. (HE Ming-xia, WANG Lian-jun. The effect of groundwater and geological function on construction works[J]. Soil Eng and Foundation, 2005, 19(3): 19 – 22. (in Chinese))

## 第一届全国能源地下结构与工程学术研讨会 (一号通知·征文)

随着传统能源开采条件的复杂化以及新能源的广泛开发与应用, 与能源相关的岩土工程问题不断涌现出来; 如何解决能源地下结构与工程问题让广大工程研究人员和工程技术人员面临前所未有的机遇与挑战。为攻克能源岩土相关技术难题, 中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会筹建能源地下结构与工程专业委员会, 北京中岩大地工程技术有限公司和清华大学联合主编中华人民共和国行业标准《桩基地热能利用技术规程》(暂定名)。拟于2017年8月底召开第一届全国能源地下结构与工程学术研讨会, 对我国近年来能源地下结构与工程领域的应用经验和最新研究成果进行广泛的学术交流。同时, 召开中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会能源地下结构与工程专业委员会成立大会、中华人民共和国行业标准《桩基地热能利用技术规程》(暂定名)编制审查会。

**主办单位:** 中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会; 能源地下结构与工程专业委员会。

**承办单位:** 清华大学土木工程系。

**协办单位:** 河海大学土木与交通学院; 重庆大学土木工程学院。

**会议议题:** 能源地下结构与工程(包括桩基础、地下连续墙、隧道、筏板、基坑支挡、锚杆以及路基路面结构等); 钻

孔埋管技术与能源地下结构相互影响; 深层地热井与井筒结构技术; 机场跑道、公路桥面和隧道等防冻除冰技术; 能源地下工程中的THM多场耦合问题; 其他与新能源利用相关的岩土工程问题。

**论文格式要求:** 摘要论文一般不超过2页A4纸版面(含图表与公式)。本次会议录用摘要论文将出版摘要论文集, 来稿请严格按照《岩土工程学报》的论文模板进行排版。邮寄一份电子文本, 论文中请务必注明详细通讯地址、邮编、联系电话及Email地址。

**重要日期:** 2017年4月30日前提交摘要论文; 2017年5月31日前通知作者是否录用; 2017年6月30日前提交修改后的论文; 2017年8月底会议召开。

**论文投稿及会务组联系方式:** 河海大学土木与交通学院孔纲强(注明“第一届全国能源地下结构与工程学术会议”); 地址: 江苏省南京市西康路1号河海大学土木与交通学院; 邮编210098; 联系电话025-83786834/15205168312; 传真: 025-83786834; 电子邮箱: Energy\_Geotechnics@163.com。清华大学土木工程系郭红仙(注明“第一届全国能源地下结构与工程学术会议”); 地址: 北京清华大学土木工程系; 邮编100084; 联系电话010-62782184; 电子邮箱: guohx@tsinghua.edu.cn。

〔中国岩石力学与工程学会环境工程分会  
能源地下结构与工程专业委员会 供稿〕