

工程实例

# 地下污水厂 PHC 桩挤土消除液化效应的关键技术

王泽明<sup>1</sup>, 尹利军<sup>2</sup>, 王长祥<sup>1</sup>, 史卿<sup>1</sup>, 刘雪林<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 天津创业环保集团股份有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 以天津市某大型地下污水处理厂的桩基础方案为例, 简述挤土消除液化效应的预应力高强度混凝土 (PHC) 桩基础的设计特点, 并介绍了该方案的实施过程, 特别是试验桩大规模沉桩、验收性基桩及桩间土检测等阶段的关键技术问题与应对措施。

**关键词:** 预应力高强度混凝土桩; 地基液化; 锤击沉桩; 地下污水处理厂

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)02-0079-06

## Key Technology of PHC Pile Compaction to Eliminate Soil Liquefaction in Underground Sewage Treatment Plant

WANG Ze-ming<sup>1</sup>, YIN Li-jun<sup>2</sup>, WANG Chang-xiang<sup>1</sup>, SHI Qing<sup>1</sup>, LIU Xue-lin<sup>2</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Tianjin Capital Environment Protection Group Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** As an example of pile foundation scheme for a large underground sewage treatment plant in Tianjin, the design features of prestressed high strength concrete (PHC) pile which considers soil compaction effect to eliminate liquefaction was briefly described. The key technological issues and countermeasures during implementation of the scheme, in particular, large-scale pile driving for testing pile, the acceptance check of piles and soil between piles, were elaborated.

**Key words:** prestressed high strength concrete (PHC) pile; foundation soil liquefaction; pile driving by hammer; underground sewage treatment plant

现阶段地下污水处理厂已经在我国很多城市实施。地下污水处理厂的基底压应力一般较大, 多采用桩基础, 其中预应力高强度混凝土 (PHC) 桩<sup>[1]</sup>作为常见的基桩类型, 已在很多污水处理厂应用。PHC 桩沉桩时可以配置桩尖, 也可以不设置桩尖直接打桩。常见的桩尖类型有十字形、锥型、开口型等, 其中十字形和锥型桩尖属于闭口型桩尖。当设置闭口型桩尖沉桩时, PHC 桩属于挤土桩型; 当设置开口型桩尖或者不设桩尖沉桩时, PHC 桩属于部分挤土桩型。

利用 PHC 桩的挤土加密作用和对桩间土变形

限制的有利影响, 来消除场地土的液化会较大幅度降低桩基工程的造价。在大量沉桩时, 如何才能利用好加密作用来消除液化, 又确保基桩不被过大的挤土效应挤坏, 需要设计单位与参建各方制定系统的验证方案、沉桩方案与验收方案。结合天津市某大型地下污水处理厂的桩基础方案, 对挤土消除液化效应的 PHC 桩基础方案实施中的关键技术问题进行探讨。

### 1 工程概况

该污水处理厂处理规模为  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 再生水规模为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该工程主箱体尺寸为

473.4 m×391.5 m,占地约17 hm<sup>2</sup>,采用现浇钢筋混凝土结构,桩筏基础。筏板顶标高为-6.50 m(典型位置,大沽高程,下同),箱体顶标高为8.90 m,结构高度为15.4 m。设计顶部覆土厚度为1.5 m、顶标高为8.20~10.90 m。污水厂平面布置见图1。

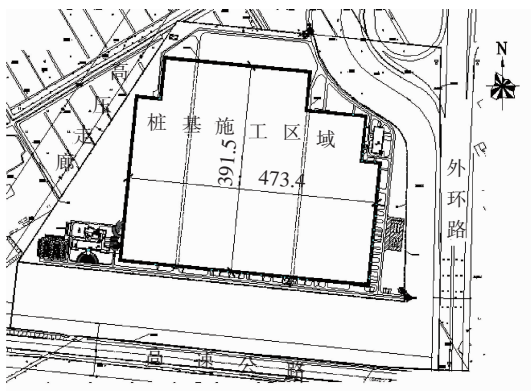


图1 污水处理厂平面布置

Fig.1 Brief plan of the underground sewage treatment plant

### 1.1 地质条件

箱体结构下最具代表性的地质剖面图见图2。

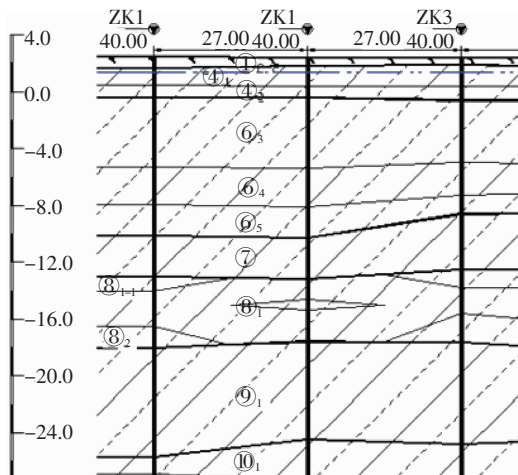


图2 代表性地质剖面

Fig.2 Typical geological section

生物池等代表性单元底板厚度为加强区1500 mm,普通区800 mm,上皮标高为-6.50 m,底板坐落於⑥₄层粉质黏土层,地基承载力特征值为100 kPa,其他各层土的力学指标见表1。厂区地下水分别为上层滞水、潜水和微承压水。上层滞水主要分布于④₁层粉质黏土中,由于该层在厂内分布不连续,导致上层滞水与下部潜水层连通;潜水层主要含於④₂层粉土、⑥₃层粉土、⑥₄层粉质黏土、⑥₅层粉土中;第一微承压水主要位於⑧₁₋₁层粉土层,其相

对隔水层为⑧₁层粉质黏土,第二微承压水主要位於⑧₂层粉土,其相对隔水层为⑨₁层粉质黏土,第三微承压水主要位於⑩₂层粉土,其相对隔水层为⑪₁层粉质黏土,厂区抗浮设计水位为3.50 m。

表1 各土层参数

Tab.1 Parameters of different soil layers

| 土层编号 | 土层名称 | 各土层指标        |                            |       |                | 是否液化 |
|------|------|--------------|----------------------------|-------|----------------|------|
|      |      | $F_{ak}/kPa$ | $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$ | $N/击$ | $E_{s1-2}/MPa$ |      |
| ①₁   | 杂填土  |              |                            |       |                | 不液化  |
| ①₂₋₁ | 素填土  |              | 18.6                       |       | 4.8            | 不液化  |
| ①₂₋₂ | 耕土   |              |                            |       |                | 不液化  |
| ②    | 淤泥   | 55           | 16.5                       |       | 1.9            | 不液化  |
| ④₁   | 粉质黏土 | 110          | 19.6                       | 5.0   | 5.1            | 不液化  |
| ④₂   | 粉土   | 125          | 19.5                       | 11.8  | 14.1           | 轻微液化 |
| ⑥₃   | 粉土   | 125          | 19.6                       | 12.6  | 13.2           | 轻微液化 |
| ⑥₄   | 粉质黏土 | 100          | 19.1                       | 6.2   | 5.2            | 不液化  |
| ⑥₅   | 粉土   | 130          | 19.7                       | 14.6  | 13.7           | 轻微液化 |
| ⑦    | 粉质黏土 | 130          | 20.1                       | 8.4   | 5.7            | 不液化  |
| ⑧₁₋₁ | 粉土   | 170          | 21.0                       | 24.9  | 12.3           | 不液化  |
| ⑧₁   | 粉质黏土 | 155          | 19.9                       | 11.5  | 6.6            | 不液化  |
| ⑧₂   | 粉土   | 180          | 20.0                       | 24.4  | 14.3           | 不液化  |
| ⑨₁   | 粉质黏土 | 160          | 19.7                       | 13.2  | 6.4            | 不液化  |

### 1.2 地震液化

该场地抗震设防烈度为8度,设计基本加速度为0.20g,建筑场地类别为Ⅲ类,设计地震分组为第二组,设计特征周期为0.55 s。该场地为建筑抗震不利地段。该场地④₂层粉土、⑥₃层粉土和⑥₅层粉土存在地震液化现象,液化等级为轻微,液化指数为0.01~5.89。

## 2 桩基础方案

拟采用14~15 m的PHC AB 500(100)桩,不设置桩尖,桩端持力层为⑨₁层粉质黏土。布桩间距为2 m×2 m,桩顶标高多为-7.25、-7.95 m,桩底标高多为-21.25、-21.95 m。因该方案考虑PHC桩挤土消除液化的作用,故均为标准桩型,箍筋未做加粗加密处理。按照该方案,考虑底板标高起伏的影响,桩长算数平均值约为14.6 m,总根数为42500根,总桩长为620500 m,含施工措施及灌芯费用的总造价约为1.86亿元。

## 3 试验桩检测

### 3.1 沉桩试验及消除液化试验设计

该方案是否可行有两个关键点:一是PHC桩能否顺利穿越较厚的密实粉土层⑧₂层;二是虽然设

计计算能消除液化效应,方案实施后能否顺利消除桩间土的地基液化还需试验验证。

为了验证上述两个关键技术问题,在试验桩检测阶段设计了沉桩试验,并进行了挤土消除液化检测。试验桩群位置选择⑧<sub>2</sub>层粉土厚度较大、液化指数较高之处进行。经比对,最终选择 145 号钻孔处进行该项试验,该孔处⑧<sub>2</sub>层顶标高为 -14.84 m,底标高为 -18.04 m,厚度达到 3.2 m,液化指数为 4.91。

沉桩试验桩群采用 3×3 布置,共 9 根桩,桩长、标高按照工程桩数据执行。施工顺序选择最不利沉桩顺序(见图 3),先施工四角的基桩(用 1 表示),再施工四面中点的桩(用 2 表示),最后施工中心位置桩(用 3 表示)。9 根基桩沉桩过程连续,中间不停歇,以防止挤土应力消散而导致沉桩难度模拟效果失真。

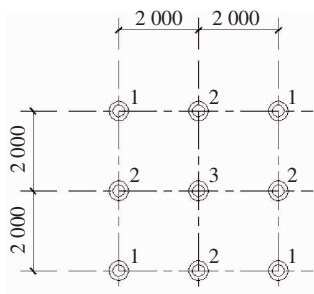


图 3 沉桩试验桩位布置

Fig. 3 Plan of piling test

待沉桩试验基桩就位,桩间土应力消散之后进行标贯检测<sup>[2]</sup>。根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)规定,按照非饱和黏性土的休止时间 15 天执行<sup>[3]</sup>。标贯点布置如图 4 所示。

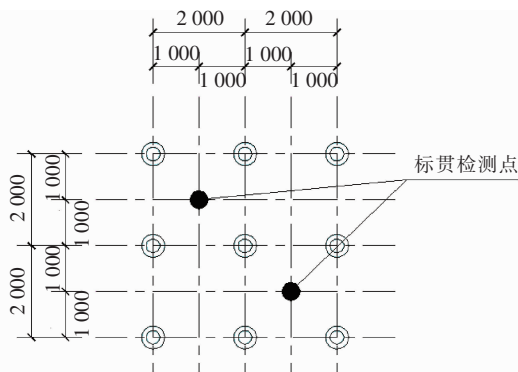


图 4 标准贯入度锤击检测点布置

Fig. 4 Plan of test points for standard hammer penetration

试验结果表明,在密实粉土层较厚处,按照最不

利施工顺序,中心桩顺利沉至设计标高,锤击数未超过 10 击,预计大面积沉桩应不存在困难。在厂区液化较为严重处,桩数大幅少于规范规定的情况下,已经消除了液化现象,桩基础方案应能达到预期效果。

### 3.2 试验桩检测

试验桩检测包括桩身完整性检测和承载力检测。先做桩身完整性检测,采用低应变法。完整性检测确定桩身无缺陷之后再行承载力检测。

箱体埋深较大,设计桩顶标高为 -7.25 m,试验桩检测时原状地坪标高位于 2.2~2.3 m。原状地面到设计桩顶标高之间约为 9.5 m,原位检测难度很大。可供选择的检测辅助方法为辅助桩法和电阻应变片法。

电阻应变片法实现难度较大,存在如下问题:

- ① 实验室采用较多,大型工程应用先例较少。
- ② 预埋应变片需在基桩生产过程中实施,高温蒸养对预埋应变片的影响未知。
- ③ 粘贴的应变片在沉桩过程中可能会脱落,故应变片粘贴精度对检测结果影响较大。
- ④ 连接应变片的导线较长,其电阻对检测结果的准确性有较大影响。

经比较,承载力检测最终采用辅助桩法。即用长桩减去辅助短桩的承载力来确定最终的基桩承载力,该方法在山西省某大型地下污水处理厂试验桩检测中已有成功的应用先例。在抗压承载力检测时,该法精度较高;在抗拔承载力检测时,该法有一定偏差,但精度尚在可接受范围之内。桩基础由抗压承载力控制,预计受检测结果影响较小。

此外,承载力检测采用极限承载力试验,即加载至桩顶分级位移量或总位移量超过规定数值。检测结果表明,桩的承载力满足设计要求,与计算承载力吻合程度较高。

### 3.3 灌芯粘接强度试验

在试验桩检测阶段,结合桩抗拔承载力检测进行了灌芯粘接强度试验。严格要求现场的静载试验仅允许采用慢速维持加荷法。在抗拔承载力检测中,只允许拔灌芯的钢筋,不允许拔 PHC 桩本体,抗拔承载力检测值至少需要拔到两倍的抗拔承载力特征值,且须加载到桩顶位移超标方可终止。这主要出于两方面考虑:一是所有抗拔试验桩桩数固定,都需要进行抗拔承载力试验,可以统一放大灌芯钢筋来满足检测值要求;二是可以测试灌芯与桩之间的



粘接强度能否满足设计要求。

在该阶段,由于在现状地坪附近进行承载力检测,其桩长比工程桩长7 m左右,其抗拔承载力远高于工程桩。灌芯粘接强度试验结果表明,在整个试验桩检测阶段未发生灌芯粘接破坏的情况,故认为灌芯的粘接强度远超实际工程桩需要。

#### 4 PHC 桩沉桩

##### 4.1 沉桩方式比选

PHC 桩常用的沉桩方式有两种,即锤击法和静压法。对于一般工程,相对于静压法,锤击法的缺点是噪声大,有油烟污染,施工精度差;优点是穿透能力强,打桩自动化等。此外,静压法施工 PHC 桩对砂土、粉土仅有挤密作用,锤击法除了挤密作用外,锤击的应力波对砂土、粉土还存在振密作用。

该工程周边无对噪声、振动、油烟污染要求高的单位;在箱体范围内,很多区域的基桩需穿过3~4 m 密实粉土层;打桩还需实现加密粉土、消除液化的效果。经综合考虑,沉桩方法采用锤击法,为确保穿越较厚的密实粉土层,柴油锤型号选择与基桩型号相对应的最大的60<sup>#</sup>~62<sup>#</sup>。

##### 4.2 沉桩标高选择

沉桩位置有三种选择,即原状地坪标高沉桩、基坑底标高处沉桩和先降一部分土再沉桩。工程所在地地下水位很高,挖土1.5 m 即可见地下水。为规避打桩时的降水工作,经综合考量,建议沉桩位置选择自然地坪附近,优点是不受基坑支护构件施工影响、不用进行降水工作、上覆土层对桩顶上涌有明显压制作用;缺点是送桩距离长(达到9.5 m 左右),桩标高及平面位置控制困难。考虑到施工单位在天津市以往的建设工中有过送桩超过10 m 的成功经验,且桩筏基础对桩平面位置偏差的敏感程度较低,最终参建各方均同意该方案。

##### 4.3 桩位放线精度控制

桩位放线阶段,建议采用全站仪结合直尺的放线方法,以避免放线误差的过大累积。每10行×10列桩群采用全站仪放出角点定位坐标,坐标之间采用直尺放出中间桩位。现场采用该法进行桩位确定,桩位精度较高。

##### 4.4 沉桩顺序、沉桩速率控制

为了避免大面积沉桩导致过大的挤土效应,挤坏基桩或使基桩严重偏位,在采取其他辅助措施的基础上,现场从沉桩顺序、沉桩速率两方面进行严格

控制。

沉桩按照由中间向四周的顺序施打,对于多个分包队伍,由总包统一制定沉桩顺序并交底,协调好不同分包队伍,避免理解偏差。

沉桩过程中现场严格控制沉桩速率,整个箱体范围内每天沉桩总根数不超过500根,并做好沉桩计划,每24 h 内休止时间不能小于8 h。

##### 4.5 排水

该工程属于大面积沉入密集桩群,⑥<sub>4</sub>层粉质黏土层为饱和黏土层,控制沉桩顺序、沉桩速率仅能在一定程度上降低挤土效应,不能确保基桩不被挤坏或严重偏位。方案中严禁采用预钻孔措施,可供选择的辅助措施仅有排水措施。

常用的袋装砂井及塑料排水带方法工程量非常大,经过调研,并与勘察单位协商,最终采用了D400无砂管井,井深16 m,管井布置间距为40 m×40 m左右,现场设置抽水泵,及时将桩基施工区域及其临近区域的排水井内水抽走。由于采用强制排水的措施,及时抽走地下水及饱和黏土排出的孔隙水,挤土效应尤其是饱和黏土层的挤土效应降低比较明显。

随着桩基施工的大面积展开,部分排水井被基桩挤坏,部分排水井得以保留。虽然排水效果受到部分影响,但减小挤土效应,保护桩身质量及桩位精度的目的基本实现。基桩检测结果表明,基桩全部为I类桩,桩偏位较大的一般在100 mm。

##### 4.6 桩顶标高控制

考虑到标准的PHC 桩箍筋加密区都集中在端部2 m 内,截桩对桩身质量会产生一定的影响,故应尽量避免。本工程桩基础施工时间为2017年5月—7月,在沉桩施工的时间段内,具备效力的规范及其对桩顶标高的精度要求见表2。

表2 桩顶标高精度要求

Tab.2 Tolerance of pile top elevation mm

| 规范名称及标准号   | 桩顶标高精度要求            |
|--|---------------------|
| 《城市污水处理厂工程质量验收规范》(GB 50334—2002),2017年7月1日废止     | ±100 <sup>[4]</sup> |
| 《城镇污水处理厂工程质量验收规范》(GB 50334—2017),2017年7月1日实施     | ±50 <sup>[5]</sup>  |
| 《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB 50202—2002),有效期至2018年10月1日 | ±50 <sup>[6]</sup>  |

根据前期监测桩的监测结果,桩顶上涌一般在20~30 mm 范围。综合考虑规范要求及监测结果,

将施工桩顶标高较设计桩顶标高下沉 50 mm,按照 -100~0 mm 控制桩顶标高精度,以规避桩顶上涌带来的截桩风险。

#### 4.7 桩顶上涌及水平位移监测

该工程桩顶标高与施工地坪标高相差 9.5 m 左右,对工程桩的桩顶上涌及水平位移的直接监测存在难度。在沉桩之前,先在桩基施工区域均匀施打辅助监测桩,桩顶标高高出施工地坪标高。沉桩过程中加强对辅助监测桩的监测,发现特殊情况及时处理。在整个沉桩过程中,监测桩桩顶上涌量在 20~30 mm 范围之内,水平位移在 100 mm 左右,未发生特殊情况。

### 5 基桩检测及桩间土检测

为了保证基桩检测结果的可靠性,基桩检测需在基坑开挖之后,原位进行检测,禁止采用其他辅助方法推算检测结果。

#### 5.1 桩身完整性检测

桩身完整性检测依旧采用低应变法,检测数量为基桩总数的 20%。检测结果显示,厂区所有 PHC 桩均为 I 类桩。

#### 5.2 抗压承载力检测

抗压承载力检测仅允许采用静载试验的方式,抗压承载力检测的数量为桩总数的 1%。

抗压承载力静载试验可供选择的常用方法有三种,即压重法、锚桩法、锚桩压重联合法等。根据以往工程经验,压重法最可靠。考虑到该工程基坑较深,荷载块运输存在较大难度,同一结构区块(结构变形缝将结构划分为若干区块,区块桩标高及承载力基本相同)内,保留 1/3 的工程桩采用压重法进行承载力检测作为基准数值,其余 2/3 采用锚桩法进行承载力检测,且仅允许采用慢速维持加荷法。

当采用锚桩法进行抗压承载力检测时,提出如下要求:

- ① 锚桩法检测结果随锚桩变形存在一定偏差,需由检测单位进行修正方可使用。
- ② 采用工程桩作为锚桩时,数量不得少于 4 根,反力装置不得触碰灌芯及其钢筋。
- ③ 采用工程桩作为锚桩时,锚桩的上拔力不得大于 PHC 桩抗拔承载力特征值的 80%。
- ④ 采用工程桩作为锚桩时,锚桩的上拔量不得超过 3 mm。
- ⑤ 采用工程桩作为锚桩时,使用前后都需使

用低应变法来检测锚桩的桩身完整性。

基桩检测结果显示,在抗压承载力检测中,当达到设计要求承载力检测值时,绝大多数基桩沉降量为 5~8 mm,未见沉降量超过 12 mm 的基桩。根据天津市的工程实践及试验桩检测的数据,保守估计仍有不小于 20% 的承载力余量。

#### 5.3 抗拔承载力检测

抗拔承载力检测仅允许采用静载试验的方式,抗拔承载力检测的反力装置需检测单位自行设计,可采用工程桩作为反力桩。

在试验桩检测阶段,已经进行了灌芯粘接强度试验,结果表明灌芯粘接强度远超工程桩需要,上述结果为基桩抗拔承载力验收检测方案打下基础。

灌芯纵筋的设置以单桩抗拔承载力特征值为计算依据,这些钢筋不能承受 1.5~2 倍的抗拔承载力特征值的拉力作用。在承载力验收检测阶段,检测桩是随机抽取具有代表性的基桩,为了检测统一放大灌芯钢筋是不合理、不经济的。因此,在该阶段抗拔承载力检测仅允许拔桩的本体,不允许拔灌芯钢筋。由于桩基方案受抗压承载力控制,在规范允许的前提下,要求现场加到基桩抗拔承载力特征值的 1.5 倍即可。

基桩检测结果显示,在抗拔承载力检测中,当达到设计要求承载力检测值时,基桩桩顶位移很小,均满足设计要求。

#### 5.4 桩间土标贯检测

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)的相关规定,需采用标准贯入试验检测桩间土消除液化的效果,检测数量为桩数的 2%。经检测,除极个别的点位尚存在液化现象之外,厂区绝大多数检测点已经消除了液化现象,检测结论是无需考虑液化对基础、结构设计的影响。

### 6 结论

- ① 由于桩间距较小,大面积施工群桩之后,单桩承载力有所提高。根据基桩承载力检测结果,保守估计抗压承载力有不小于 20% 的提高。
- ② 在试验桩承载力检测阶段,当桩顶标高距现状标高差很多时,可以考虑用辅助桩法来进行静载试验。
- ③ 在沉桩方式的选择上,当设计考虑打入式预制桩对土的加密作用及桩身对液化土变形限制的有利影响时,沉桩施工宜采用锤击法而不宜采用静

压法。

④ 在考虑 PHC 桩基础挤土消除液化作用的桩基础沉桩时,不应采用预钻孔措施,以防达不到预期的消除液化效果。

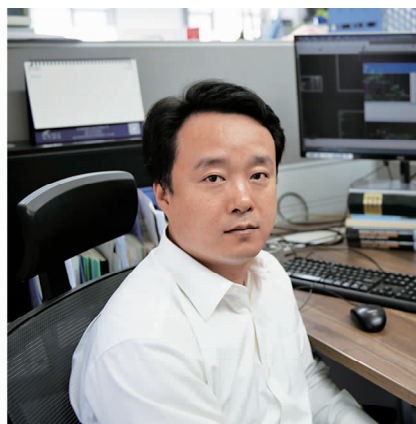
⑤ 在大面积沉桩并且预计桩顶标高会产生一定上涌时,结合前期桩顶上涌监测数值,适当降低施工桩顶标高可达到较好的效果。

#### 参考文献:

- [1] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.  
JGJ 94 - 2008, Technical Code for Building Pile Foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2008(in Chinese).
- [2] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
JGJ 79 - 2012, Technical Code for Ground Treatment of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2012(in Chinese).
- [3] JGJ 106—2014, 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.  
JGJ 106 - 2014, Technical Code for Testing of Building Foundation Piles[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2014(in Chinese).
- [4] GB 50334—2002, 城市污水处理厂工程质量验收规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.  
GB 50334 - 2002, Quality Acceptance Code for Municipal Sewage Treatment Plant Engineering[S]. Beijing: China

Architecture & Building Press,2003(in Chinese).

- [5] GB 50334—2017, 城镇污水处理厂工程质量验收规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.  
GB 50334 - 2017, Code for Quality Acceptance of Municipal Wastewater Treatment Plant Engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017 (in Chinese).
- [6] GB 50202—2002, 建筑地基基础工程施工质量验收规范[S]. 北京:中国计划出版社,2002.  
GB 50202 - 2002, Code for Acceptance of Construction Quality of Building Foundation[S]. Beijing: China Planning Press,2002(in Chinese).



作者简介:王泽明(1978 - ),男,河北献县人,硕士,高级工程师,从事给排水构筑物结构设计工作。

E-mail:13920178351@163.com

收稿日期:2019-08-06

节约每一滴水,

回收每一滴水,

让每一滴水多循环一次