胡雨菡,包腾飞,朱征,等.桩基对进水塔塔基动力稳定性影响研究[J].地震工程学报,2021,43(3):728-736.doi:10.3969/j.issn. 1000-0844.2021.03.728

HU Yuhan, BAO Tengfei, ZHU Zheng, et al. Influence of Pile Foundation on Dynamic Stability of Intake Tower Foundation [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3):728-736.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.728

桩基对进水塔塔基动力稳定性影响研究

胡雨菡1, 包腾飞1.2.3, 朱 征1, 龚 健1

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:进水塔是水利工程的重要组成部分,具有塔身高、塔壁薄等特点,在地震工况下容易发生结构 失稳破坏。针对进水塔地震工况下抗滑抗倾覆能力差的问题,提出加设灌注桩的方法提高塔基的 动力稳定性,并以甘肃省某引水工程进水塔为例,采用有限单元法,从桩基对进水塔塔体应力、桩基 受到的剪力和弯矩及地基位移分布情况三个方面分析灌注桩对进水塔塔基动力稳定性的影响。分 析得到:加设灌注桩可降低塔体中下部的应力值,并改善该处的应力分布;塔基高程处的灌注桩所 受到的剪力和弯矩较小;加设灌注桩后,塔底附近的位移量值有所减小,且没有出现明显的潜在滑 移圆弧面。说明设置桩基加固进水塔地基的措施提高了进水塔地基的动力稳定性。

关键词:进水塔;桩基;抗震分析;时程分析法

中图分类号: TV671 **文献标志码:**A **文章编号:** 1000-0844(2021)03-0728-09 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.728

Influence of Pile Foundation on Dynamic Stability of Intake Tower Foundation

HU Yuhan¹, BAO Tengfei^{1,2,3}, ZHU Zheng¹, GONG Jian¹

College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;
 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;
 College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: The intake tower with characteristics of tall tower body and thin wall is an important part of water conservancy project. It easily suffers structural instability and damage under earthquake. In view of the poor anti-sliding and anti-overturning ability of intake tower, the method of setting cast-in-place piles was proposed to improve the dynamic stability of tower foundation in this paper. Taking the intake tower of a water diversion project in Gansu Province as an example, the influence of cast-in-place piles on the dynamic stability of intake tower foundation was ana-

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508603,2016YFC0401601);国家自然科学基金资助项目(51579086,51739003)

第一作者简介:胡雨菡(1995一),女,江苏盐城人,博士研究生,研究方向为大坝安全监控理论与方法研究。

E-mail:huyuhan730@126.com。

通信作者:包腾飞(1974-),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事水工结构及岩土工程安全监控理论与方法研究。 E-mail:baotf@ hhu.edu.cn。

收稿日期:2020-01-06

lyzed from three aspects: the stress of intake tower body from pile foundation, the shear force and bending moment of pile foundation, and the distribution of foundation displacement. The results showed that the cast-in-place piles can reduce the stress value at the middle and lower part of tower and improve the stress distribution; besides, after adding cast-in-place piles, the displacement value near the tower bottom decreases and there is no obvious potential slip arc surface. In conclusion, the dynamic stability of intake tower foundation is improved by setting pile foundation.

Keywords: intake tower; pile foundation; seismic analysis; time-history analysis

0 引言

进水塔具有保证水利工程正常引水、泄水的重 要作用,是水利工程引流建筑物的重要组成部分之 一^[1-2],因此研究进水塔的结构稳定和安全具有非常 重要的意义。进水塔塔身中空、塔壁薄,地震条件下 的抗滑和抗倾覆能力较差,极易出现结构失稳现 象^[3]。在实际工程应用中,常采用在塔基加设灌注 桩的方法来提高进水塔地基的稳定性。为分析桩基 对进水塔地基稳定性的影响,本文针对桩基的力学 特性开展桩-土系统的动力特性研究。

常用的桩基力学特性分析方法有连续介质 法[4]、地基响应法[5]和数值分析法[6]。连续介质法 力学概念清晰、公式简单,通过建立位移单元的变形 和运动函数来模拟桩-土力系统的位移场。近年来, Jin 等^[7]研究了单桩在连续的弹性半空间的动力特 性, Maeso 等^[8]对饱和土中的群桩的若干问题进行 了相关研究,研究结果表明,采用连续介质法在线性 条件下数值模拟效果较好,但在非线性模型或与时 间相关的往复荷载条件下位移场数值模拟难度更 高^[9];地基响应法中的 Winkler 模型将桩基周围的 土体离散为无数个单独作用的弹簧,用这些互不影 响的弹簧组模拟地基的非连续性质,胡育佳等[10]采 用 Winkler 模型较好地模拟地基对桩基的抗力,于 远祥等^[11]建立的 Winkler 地基梁模型应用于计算 最大塑性区深度,虽然地基响应法适用于非线性计 算,但计算模型较为复杂,直接通过理论公式得到解 析解和半解析解较为困难^[12];相较于前两种方法, 数值分析法不仅适用于分析复杂荷载,而且可以简 便又准确地建立力学模型,其中,数值分析方法中的 有限单元法还可以直观地反映桩-土系统的力学特 性^[13-14]。Hsueh 等^[15]利用 ABAQUS 分析了非线 性桩-土-结构体系的受力特征,得到了桩在侧向荷 载作用下的应力分布。祝兵等[16]采用有限单元法 行进行桩基的振动特性计算分析和时程计算分析, 并与非线性 Winkler 地基梁模型对比分析,验证了

有限元计算的合理性。有限单元法可以对应变场和 应力场实现定量计算。因此,采用有限单元法,以某 引水工程进水塔为例,研究地震条件下该工程进水 塔桩基对其抗滑和抗倾覆稳定性的影响。具体的研 究思路如下:首先建立进水塔塔体及地基的三维有 限元计算模型,然后分析有无桩基情况下进水塔塔 体应力分布情况,接着研究桩基受力情况,最后对比 有桩和无桩情况下地基的位移分布图,并分析地震 工况下有桩和无桩时塔基的抗滑及抗倾覆稳定性。

1 进水塔塔基动力稳定分析方法

1.1 基于时程分析法的动力稳定分析原理

以逐步积分法作为动力反应全过程计算的数值 方法,将振动时程离散为为一系列微小的时间间隔 Δt ,假设在 Δt 时间间隔内,加速度、速度和位移均按 照一定的规律变化。 $t + \Delta t$ 时刻结构的动力平衡方 程为:

 $\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} \end{bmatrix} \{ \boldsymbol{\check{\delta}} \}_{t+\Delta t} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} \end{bmatrix} \{ \boldsymbol{\check{\delta}} \}_{t+\Delta t} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K} \end{bmatrix} \{ \boldsymbol{\delta} \}_{t+\Delta t} = \{ f \}_{t+\Delta t}$ (1)

式中: $\{\delta\}_{t+\Delta t}$, $\{\dot{\delta}\}_{t+\Delta t}$ 和 $\{\ddot{\delta}\}_{t+\Delta t}$ 分别为结构的结点位移,结点速度,和结点加速度列阵;[M]、[C]和[K]分别为质量、阻尼和刚度矩阵; $\{f\}_{t+\Delta t}$ 表示作用力列阵。

通过对结点加速度积分得到 $t + \Delta t$ 时刻的结点 位移和结点速度为:

$$\{\delta\}_{t+\Delta t} = \{\delta\}_{t} + \Delta t \cdot \{\dot{\delta}\}_{t} + (\Delta t)^{2} \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right) \cdot \{\ddot{\delta}\}_{t} + \beta \{\ddot{\delta}\}_{t+\Delta t} \right]$$
(2)
$$\{\dot{\delta}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{\delta}\}_{t} + \Delta t \cdot \left[(1 - \gamma) \cdot \{\ddot{\delta}\}_{t} + \gamma \{\ddot{\delta}\}_{t+\Delta t} \right]$$
(2)

式中: β 和 γ 是按积分的精度和稳定性要求进行调整的参数,通常取 $\beta = 0.25, \gamma = 0.5$ 。

通过逐步计算各时段,可求解全时程的结构位 移、速度、加速度,并进一步求解每个时刻的单元应 力,从而开展进水塔抗滑和抗倾覆稳定分析。 进水塔塔基动力稳定分析中,采用附加质量法 模拟进水塔受到的动水压力,地基采用无质量地基 模型。

1.2 进水塔抗滑稳定分析原理

进水塔的滑动模式分为基底滑动模式和深层滑 动模式。在基础加设桩基条件下,进水塔地基出现 明显深层滑移面的可能性较小,而基础与塔体的交 界面为薄弱面,易发生滑动,因此主要分析沿塔基面 滑移的动力稳定性问题。

提取各时刻塔基面上的正应力和切应力,并代 入式(4)和式(5)中,计算得到每一时刻对应的抗剪 和抗剪断安全系数,将抗剪和抗剪断安全系数最小 值作为抗滑动力稳定安全的评判标准。

$$K = \frac{\int f\sigma \, dA}{\int_{A} \tau \, dA}$$
(4)
$$K = \frac{\int f\sigma \, dA + cA}{\int \tau \, dA}$$
(5)

式中: σ 为塔基面法向应力; τ 为塔基面切应力; f 摩 擦系数; A 为滑动面面积; c 为砂砾岩与塔体间的黏 聚力。

1.3 进水塔抗倾覆稳定分析原理

影响进水塔倾覆的因素较多,包括自身塔体的 刚度、几何形式,土体基础的物理力学性质和外荷载 等。本文的进水塔结构对称,且在基础设置成台阶 状增强抗倾覆能力,由于自身结构使得塔体倾覆的 可能性较小。进水塔四面塔壁均受到等值、对称的 静、动水压力作用,所形成的力矩可以互相抵消,因 此地震惯性力是进水塔倾覆力的主要组成部分。而 抗倾覆力的主要来自进水塔自重和基础上水体自 重。分别将塔基面上全时程各时刻的倾覆力与抗倾 覆力对塔基边缘求力矩,并代入式(6)中得到每一时 刻对应的抗倾覆安全系数,并以全时程抗倾覆安全 系数的最小值作为抗倾覆动力稳定安全的评判 标准。

$$K_{0} = \frac{\sum M_{\rm s}}{\sum M_{0}} \tag{6}$$

式中: $\sum M_s$ 为塔基面上抗倾覆力矩之和; $\sum M_o$ 为塔基面上倾覆力矩之和。

2 工程简介

某引水工程地处甘南高原中低山丘陵沟壑区, 主要由挡水建筑物大坝、泄水冲砂闸、进水闸及进水 塔等工程组成。

该进水塔为大体积混凝土结构,塔基高程2993 m,塔身高17.6m,下设大孔口取水道和排砂道,并 分别设置闸门,闸门启闭机安装在塔顶厂房内。为 承重和抗滑需要,在塔基下部设有灌注桩桩基。每 个灌注桩的直径为0.8m、间距2m。桩身均长 12m,上部嵌入进水塔底板,下部深入基岩弱风化 层1m左右。具体的桩基布置见图1和图2所示。



图1 进水塔桩基平面布置图

Fig.1 Layout plan of pile foundation of intake tower



进水塔所在区域由于冲洪积、洪积、坡积、崩坡 积和少量塌滑堆积、人工堆积等,第四系松散堆积物 在工程区广泛分布,进水塔出露的基岩地层为较软 弱的砂砾岩层,厚12m。根据《中国地震动参数区 划图》(GB18306-2015)及甘肃省地震工程院场地地 震安全性评价报告,该引水工程所处地区地震动峰 值加速度为0.10g,相应的地震基本烈度为WI度,地 震动反应谱特征周期为 0.45 s。

3 进水塔动力模型的建立

3.1 模型的范围和网格的划分

根据工程设计和地质资料,建立了进水塔及桩 基的三维有限元模型,如图 3 所示。模型中坐标轴 X 轴平行于顺河向方向,指向下游为正;Y 为横河 向方向,指向左岸为正;Z 轴以竖直向上方向为正。 进水塔模型向左、右岸方向延伸1倍塔高,向上、下 游方向分别延伸1倍塔高和 2.5 倍塔高,基础深度 范围从建基面以下取1倍塔高。



图 3 进水塔及桩基三维有限元模型 Fig.3 3-D FEM model of intake tower and pile foundation

进水塔-地基三维有限元模型总共剖分40 073 个单元,45 409个结点,其中进水塔18 591个单元, 地基20 642个单元,引水道 840 个单元。有限元模 型主要采用六面体八节点等参单元,部分采用五面 体六节点等参单元。进水塔单元的网格尺寸控制在 0.5 m 左右,塔基单元沿高程方向尺寸大小从 0.5 m 过渡到深层基岩的 2.5 m。

3.2 计算参数

(1) 材料参数

进水塔塔体为素混凝土结构,选用 C25 混凝 土,灌注桩钢筋选用 HRB335 钢筋,砂砾岩和基础 弱风化层材料参数均根据现场原型实验测得。具体 的材料参数如表1 所列。

Table 1	Mechanical parameters of material					
	弹性模量	容重	하 카니 나			
	/GPa /(kN•m ⁻		伯松氏			
进水塔	28	23.8	0.2			
灌注桩	21	78.5	0.3			
砂砾岩层岩体	26.1	1.49	0.37			
基础弱风化层岩体	\$ 26.9	1.57	0.31			

表1 材料参数表

(2) 地震加速度曲线

采用人工合成法合成 50 年超越概率 10%的设 计地震加速度时程曲线,以阻尼比为 7% (β_{max} = 2.25)的设计反应谱为目标谱,设计地震基岩水平向 峰值加速度为 0.1g,其中地震的持续时间取 24 s, 峰值加速度为 1.207 4 m/s²。

本文以 x、y、z 标记计算三维方向。x 方向沿 原河流方向水平加速度输入;y 方向为沿轴方向横 向加速度输入;z 方向沿高程方向竖直加速度输入, 依据水工建筑物抗震设计规范,将其峰值折减 2/3。 图 4 所示为人工合成的设计地震三向加速度曲线。



Fig.4 Acceleration time-history curves

3.3 计算工况

蓄水期,进水塔正常运行,四面塔壁均受到静、 动水压力作用,水库上游正常蓄水位为3009m,由 于进水塔塔身中空的结构特点,需要分别考虑进水 塔排水口闸门打开与关闭的情况,即进水塔有无内 水压力时的情况。因此拟定如下计算工况:

工况1(无桩):正常蓄水位3009m+自重+淤 沙+地震荷载;

工况 2(无桩):正常蓄水位 3 009 m+自重+内 水压力+淤沙+地震荷载;

工况 3(有桩):正常蓄水位 3 009 m+自重+淤 沙+地震荷载;

工况 4(有桩):正常蓄水位 3 009 m+自重+内 水压力+淤沙+地震荷载。

4 计算结果分析

4.1 塔体地震响应分析

根据有限元计算结果分析进水塔和桩基的应力 分布规律,以及结构在地震作用下的动力响应规律, 并将动力响应与相应静力响应叠加,分析进水塔-桩 基系统在静、动荷载共同作用下的应力特性。计算 得到四个工况下进水塔上游面第一主应力最大值包 络图如图 5 所示。其中图中应力值为正时表示受 拉,应力值为负时表示受压。



图 5 进水塔上游面第一主应力包络图(单位:MPa)

Fig.5 Envelope diagram of the first principal stress on the upstream surface of the intake tower (Unit:MPa)

从图中可以看出:四个工况下的应力包络图分 布规律基本一致,塔体中下部的第一主应力均较小, 且有向塔顶和塔基增大的趋势,同一高程中部位置 的第一主应力略小于两岸位置,尤其是塔基第一主 应力有明显向两岸的增大的趋势。

对比工况 1、3 和工况 2、4 可以发现:工况 1 和 工况 3 塔基第一主应力应力最大值为 2.46 MPa 和 1.91 MPa,工况 2 和工况 4 塔基第一主应力应力最 大值为 2.09 MPa 和 1.74 MPa。在内水压力的作用 下,塔基的应力数值略有减小,但整体的分布规律与 无内水压力工况相同,即内水压力对增强塔基稳定 是有利的。因此,重点分析没有内水压力的工况 1 和工况 3 下进水塔的受力情况。对比这两个工况下 塔基的应力状态可以发现:工况 3 进水塔塔体的应 力呈轴对称分布,而工况 1 右岸塔基应力大于左岸, 工况 1 靠近左、右岸塔基的第一主应力分别为 1.58 MPa 和 2.09 MPa。相较于工况 1 计算结果,工况 3 塔基应力分布更加均匀,左岸塔基应力值略有增大, 而靠近右岸和中部的塔基应力均小于工况 1,即在 灌注桩对进水塔塔基是有利的。

4.2 桩基地震响应分析

由上一节可知桩基改善了进水塔塔基的应力状态,下面将具体分析桩基在地震工况下的受力状态。 通过计算人工模拟地震波作用下的有桩时进水塔灌 注桩基础的受力情况,得到工况3和工况4下桩基 不同高程截面的剪力和弯矩值。由于地震荷载是往 复荷载,不同时间的弯矩和应力的方向、大小均不相 同,受限于篇幅,本文给出了极大值情况下的桩身发 生弯曲变形时的受力云图,如图6所示。由图6可 知,大部分灌注桩的桩身呈现一侧受拉,一侧受压的 受力状态,近似于梁弯曲变形状态,且桩两端的拉应 力较桩身中段略大,靠近弱风化层的底端桩基截面 所受剪力和弯矩由于受到岩层约束的影响方向与其 他截面弯矩方向不同,桩身其余截面的剪力、弯矩方 向基本一致。

灌注桩一端与塔基固定,另一端嵌入基岩,可近 似为两端固定的超静定结构。绘制极值时刻灌注桩





桩身的弯矩和剪力分布图如图 7 和 8 所示。灌注桩 嵌入基岩弱风化层中的一端的剪力和弯矩较小,桩 的中上部,即 2 989 m 高程与 2 992 m 高程之间桩 身段受到的剪力和弯矩作用较大。考虑到进水塔塔 底(2 993 m)处为混凝土与砂砾岩两种材料交界面, 且是截面面积改变、应力集中部位,容易发生灌注桩 拉弯破坏或剪切破坏,进而引起基础滑动和结构倾 覆等问题,而根据图 8、9 分析可得;灌注桩易发生拉 弯或剪切破坏的位置在 2 990 m 高程附近,不在塔 底(2 993 m)处。



Fig.7 Bending moment response of piles

4.3 塔基稳定分析

土体的变形可以反映其稳定性,通常情况下,土

体的破坏形式为剪切破坏,当土体的剪应力达到了 它的极限抗剪条件时,会形成一个潜在滑动面,土体 破坏时会沿着这一滑动面发生错位、滑动等等,因 此,可以根据地基的变形值来判断滑动面可能出现 的位置。



通过限单元法得到塔体及基岩位移云图如图 9 和图 10 所示。基础的位移云图表明:工况 1 下随着 深度的增加,地基位移量随之减小,且塔底附近出现 了明显的圆弧面,说明该工况下,进水塔塔体极有可 能在该圆弧面发生滑移;而工况 3 地基的位移出现 成层分布的现象,塔底附近的位移值较工况 1 略有 降低,且进水塔塔底附近未出现明显潜在滑动面,说明桩基在较大程度上分担了土体荷载,提高了塔底

基础的抗剪能力,增强了基础的抗滑稳定性。由工况2和工况4可以得出类似结论,在此不做赘述。



图 9 工況 1 塔体及基础位移云图 Fig. 9 The displacement under condition 1





为了研究地震工况下桩基对进水塔稳定性的具体影响,计算了塔基的抗滑为稳定和抗倾覆稳定的安全系数。常用的计算安全系数的方法有应力代数和比值法^[17]、强度折减法^[18]和超载系数法^[19]。本文采用应力代数和比值法,计算出地震过程中,各时刻的塔基抗滑稳定和抗倾覆稳定安全系数。

根据《水利水电工程进水口设计规范》(SL285-2003)规定,进水塔的动力抗剪安全系数需大于1,动力抗剪断安全系数需大于2.5,动力抗倾覆安全系数需大于1.15。计算结果表明:有、无桩基情况下的抗剪安全系数均大于1,抗剪断安全系数均大于2.5,

满足抗滑稳定要求。有、无桩基情况下的顺河向抗 倾覆安全系数均大于 1.15,在无桩工况下横河向抗 倾覆系数为 1.06 和 1.12,不满足抗倾覆稳定规范要 求。有桩工况下为 1.13 和 1.19,工况 3 略小于抗倾 覆稳定规范要求,工况 4 满足抗倾覆稳定规范要求。 具体数值见表 2、表 3 所列。

表 2 抗滑稳定计算结果

Table 2	Result of anti-sliding safety factor					
工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4		
抗剪安全系数	2.35	2.50	2.43	2.63		
抗剪断安全系数	5.19	5.51	5.46	5.79		

Table 3 Result of anti-overturning safety factor

		0	e	
工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
顺河向抗倾覆安全系数	1.20	1.31	1.27	1.34
横河向抗倾覆安全系数	1.06	1.12	1.13	1.19

有桩情况下,抗滑稳定和抗倾覆稳定系数均比 无桩情况下有一定提高,工况1的抗剪安全系数由 2.35 增加到2.43,提高了3.4%;抗剪断安全系数由 5.19 提高到5.46,提高了5.2%,横河向和顺河向抗 倾覆安全系数分别由1.2和1.06 提高到1.27和 1.13,提高了5.8%和6.6%,计算数据表明设置桩基 加固进水塔地基的措施提高了进水塔地基的抗滑稳 定性和抗倾覆稳定性。

5 结论

以甘肃省某进水工程进水塔为例,采用有限单 元法从塔体地震响应、桩基地震响应和地基稳定三 个方面研究了地震工况下桩基对进水塔动力稳定性 的影响,得到的结论如下:

(1) 由有无内水压力和有无桩基作用这四种工况下进水塔塔体的应力分布,内水压力一定程度上减小了进水塔塔体的应力,而桩基使进水塔塔基的应力分布更加对称,使无桩工况下应力较大的右岸塔基处应力值有所减小,即桩基改善了进水塔塔基的应力状态;

(2)通过计算桩基受剪和受弯情况可知,桩基
受到的弯矩和剪力均呈现两端小、中间大的现象,
2 990 m 高程附近为桩基受弯和受剪极值位置,而
塔基(2 993 m)高程处的剪力和弯矩较小。

(3)通过分析塔体及基础位移云图发现桩基改 变了地基位移、尤其是塔底附近的位移分布情况。 在有桩条件下,塔底附近没有出现明显的位移值较 大的圆弧面,且位移的量值有所减小。此外,有桩工 况下的塔基抗滑、抗倾覆安全系数均大于无桩工况, 进一步说明设置桩基加固进水塔地基的措施提高了 进水塔地基的抗滑稳定性和抗倾覆稳定性。

参考文献(References)

[1] 张岳,李守义,夏可,等.高耸进水塔结构塔背回填高度抗震研究[J].水利水电技术,2018,49(11):62-67.
 ZHANG Yue,LI Shouvi,XIA Ke, et al.Seismic study on back-

fill height of tower-back for high-rise intake tower structure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (11):62-67.

[2] 赵晓红,张军,乔海娟,等.高耸独立进水塔动力稳定性分析 [J].小水电,2016(6):13-15,33. ZHAO Xiaohong, Zhang Jun, QIAO Haijuan, et al. Dynamic stability analysis of high independent intake tower[J]. Small Hydro Power, 2016(6):13-15,33.

- [3] 李艺,杨庚鑫.水电站进水塔三维有限元静力分析[J].水电站 设计,2019,35(2):1-6,34.
 LI Yi, YANGGengxin. Three-dimensional finite element static analysis for intake tower at hydropower station[J]. Design of Hydroelectric Power Station,2019,35(2):1-6,34.
- [4] NOVAK M.Pile under dynamic loads.proceedings of the second international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and sore dynamics, Japan, 1991, 2433-2456.
- [5] 王成.桩基计算理论及实例[M].成都:西南交通大学出版社, 2011.

WANG Chen.Pile foundation calculation theory and examples [M].Chengdu:Southwest Jiaotong University Press,2011.

- [6] 李宁,赫建勇,许建聪,等.降雨条件下抗滑桩边坡稳定性影响的数值分析[J/OL].水利水电技术:1-13[2020-02-23].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1757.TV.20190505.0854.008.html.
 LI Ning,HE Jianyong,XU Jiancong,et al. Numerical analysis on stability of anti-slide pile slope under rainfall condition[J/OL]. Water Resources and Hydropower Engineering. 1-13
 [2020-02-23].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1757.TV. 20190505.0854.008.html.
- [7] JIN B. ZHOU D. ZHONG Z. Lateral dynamic compliance of pile embedded in poroelastic half space[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21(6):519-525.
- [8] MAESO O, AZNÁREZ J J, GARCÍA F. Dynamic impedances of piles and groups of piles in saturated soils[J].Computers &. Structures, 2005, 83(10-11):769-782.
- [9] 胡育佳,朱媛媛,程昌钧.求解几何非线性桩-土耦合系统的微 分求积单元法[J].固体力学学报,2008,29(2):141-148.
 HU Yujia,ZHU Yuanyuan,CHENG Changjun.Dqem for solving pile-soil coupling systems with geometrical nonlinearity
 [J].Chinese Journal of Solid Mechanics,2008,29(2):141-148.
- [10] 胡育佳,朱媛媛,程昌钧,弹性或弹塑性土体中桩基的大变形分析[J].应用力学学报,2008,25(3):398-404,539.
 HU Yujia, ZHU Yuanyuan, CHENG Changjun. Large deformation analysis for piles on elastic or plastic foundation
 [J].Chinese Journal of Applied Mechanics,2008,25(3):398-404,539.
- [11] 于远祥,王兵强.基于 Winkler 地基模型的岩质隧道软弱底板 塑性区研究[J].中国公路学报,2015,28(9):82-90.
 YU Yuanxiang, WANG Bingqiang. Study on the plastic zone of weak floor in rock tunnel by winkler foundation model[J]. China Journal of Highway and Transport,2015,28(9):82-90.
 [12] 刘红 桩土相互作用接触单示研究[D] 季中 季中交蛋土 W
- [12] 刘红.桩土相互作用接触单元研究[D].重庆:重庆交通大学, 2013.

LIU Hong.Study on pile-soil interaction with contact element [D].Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2013.

[13] 胡敏萍.极限平衡法和有限单元法分析复杂边坡的稳定性 [D].杭州:浙江大学,2004.

HU Minping. Analyse Complex slope's stability with the lim-

ited equilibrium method and the finite element method[D]. Hangzhou;Zhejiang University,2004.

[14] 吴俊杰,潘旭东,郭宇,等.阿尔塔什水电站联合进水口塔群三 维有限元静动力分析及配筋设计[J].水利水电技术,2018,49 (增刊1):64-72.

> WU Junjie, PAN Xudong, GUO Yu, et al. 3-D finite element static and dynamic analysis and reinforcement design of intake tower group for altash hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(Suppl):64-72.

- [15] HSUEH C K, LIN S S, CHERN SG, Lateral performance of drilled shaft condidering nonlinear soil and structure material behavior[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2004, 12(1):62-70.
- [16] 祝兵,王冲冲,王晶.不同桩基模拟方法对液化场地桥梁地震 响应的影响[J].建筑科学与工程学报,2016,33(4):69-75.
 ZHU Bing, WANG Chongchong, WANG Jing. Influence of different pile foundation simulation methods on seismic response of bridge in liquefiable ground[J].Journal of Architec-

ture and Civil Engineering, 2016, 33(4):69-75.

[17] 李强贵.重力坝深层抗滑稳定可靠度分析[D].大连:大连理工 大学,2017.

> LI Qianggui.Reliability analysis of gravity dam deep stability against sliding[D].Dalian,China:Dalian University of Technology,2017.

[18] 岳云鹏,黄亚宁,刘晓玉,等.基于强度折减法的深厚淤泥区基 坑抗隆起稳定性研究[J].建筑结构,2019,49(增刊2):933-937.

> YUE Yunpeng, HUANG Yaning, LIU Xiaoyu, et al. Uplift stability analysis of foundation pit in deep silt area based on strength reduction method[J]. Building Structure, 2019, 49 (Supp2):933-937.

[19] 黄玉凯,张利忠,陈世欢.边坡稳定计算的强度折减法与超载
 系数法[J].中国煤炭,2014,40(増刊1):50-53.
 HUANG Yukai,ZHANG Lizhong,CHEN Shihuan.Strength
 reduction method and overload coefficient method for slope
 stability calculation[J].China coal,2014,40(Supp1):50-53.

(上接第 719 页)

- [18] 罗靓.柱端部带拉筋钢-混凝土组合高层框架结构体系抗震耗 能及损伤定量评估[D].长沙:中南大学,2019. LUO Liang.Seismic energy dissipation and damage quantitative evaluation of terminal stirrup-confined CFT high-storey composite frame structure[D].Changsha:Central South University,2019.
- [19] DING Faxing, YING Xiaoyong, ZHOU Linchao, et al. Unified calculation method and its application in determining the uniaxial mechanical properties of concrete[J]. Front Archit Civ Eng China, 2011;5(3):381-393.
- [20] DING Faxing, YIN Guoan, WANG Liping, et al. Seismic performance of a non-through-core concrete between concretefilled steel tubular columns and reinforced concrete beams[J].

Thin-Walled Structure, 2011, 110(1):14-26.

- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑抗震设计规范:GB 50011-2010
 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings:GB 50011-2010[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2010.
- [22] 丁发兴,朱江,罗靓,等.钢-混凝土组合空间框架拟动力有限 元分析[J].建筑结构学报,2018,39(5):18-26.
 DING Faxing, ZHU Jiang, LUO Liang, et al. Finite element analysis for pseudo-dynamic behavior of steel-concrete composite space frame [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5):18-26.