

水泥土搅拌桩处理风积沙地层复合地基 静载荷试验数值分析

刘光秀^{1,2}, 黄文¹, 党发宁², 李玉根^{1,3}, 马小莉^{1,3}

(1. 榆林学院 建筑工程学院, 陕西 榆林 719000; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;
3. 榆林市特殊土力学与工程重点实验室, 陕西 榆林 719000)

摘要: 以榆林地区水泥土搅拌桩处理风积沙地层复合地基工程为背景, 基于 ABAQUS 有限元分析软件, 对水泥土搅拌桩处理风积沙地层的复合地基静载荷试验进行数值模拟, 并分析风积沙复合地基桩土荷载传递机制及变形特性。结果表明: 合理设置褥垫层厚度能有效减小桩顶应力集中, 降低桩土应力比。提高褥垫层模量可减小复合地基的沉降, 改善其承载性能。设置褥垫层的桩侧摩阻力在桩顶附近出现负摩阻力, 随着深度向下快速增加至零, 并转为正摩阻力。桩身的附加轴应力在桩顶附近先增加到峰值, 然后逐渐衰减。水泥土搅拌桩处理风积沙地基时存在临界桩长。在相同荷载水平下, 随着桩长的增加, 桩土应力比先增大后趋于稳定, 桩侧摩阻力分布随着桩长的增加趋于稳定。按规范设计的风积沙复合地基承载力特征值偏于安全, 有较大的富余度。

关键词: 水泥土搅拌桩; 风积沙复合地基; 静载荷试验; 桩侧摩阻力; 桩土应力比; 数值模拟

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)04-0042-10

Numerical Analysis of Static Load Test on Composite Foundation of Aeolian Sand Layer Treated with Cement-soil Mixing Pile

LIU Guangxiu^{1,2}, HUANG Wen¹, DANG Faning², LI Yugen^{1,3}, MA Xiaoli^{1,3}

(1. School of Architecture Engineering, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. Key Laboratory for Special Soil Mechanics and Engineering of Yulin, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: Using the composite foundation project involving cement-soil mixing pile treatment for the aeolian sand layer in Yulin, Shaanxi Province as the context, numerical simulations of static load tests on this composite foundation were performed using ABAQUS finite element analysis software. The study aimed to explore the load transfer mechanism and deformation characteristics of the pile-soil system in aeolian sand composite foundations. The results show that appropriately adjusting the thickness of the cushion layer can effectively reduce stress concentration at the pile top and decrease the pile-soil stress ratio. Increasing the modulus of the cushion layer can reduce the settlement of the composite foundation and enhance its bearing capacity. The side friction resistance of the pile with a cushion layer is negative near the pile top, rapidly decaying to zero with depth, and then turning into positive friction resistance. Correspondingly, the additional axial stress of the pile body first increases to its peak near the pile top, and then gradually decreases along the depth. There is a critical pile length when using cement-soil mixing piles to treat aeolian sand foundations.

收稿日期: 2024-03-20

修稿日期: 2024-04-29

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2022ZDLSF07-02); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBMS-415); 榆林市科技计划项目(2019-80-2); 榆林高新区科技计划项目(CXY-2021-21); 榆林市 BIM 技术应用及装配式建筑智慧建造重点实验室(CXY-2021-146)

作者简介: 刘光秀(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方向研究工作。E-mail: liugangxiu789@163.com

通讯作者: 黄文(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程地基处理。E-mail: 13048565545@163.com

Under the same load level, as the pile length increases, the pile-soil stress ratio initially increases and then stabilizes, while the distribution of lateral frictional resistance along the pile body also tends to stabilize with the increase in pile length. The characteristic values of the bearing capacity of the aeolian sand composite foundation, designed according to the specifications, show a safety bias with a significant margin.

Keywords: cement-soil mixing pile; aeolian sand composite foundation; static load test; lateral frictional resistance of pile; pile-soil stress ratio; numerical simulation

复合地基技术因可以较好利用增强体和天然地基的承载潜能,具有比较经济实效的优点,在我国得到了广泛的应用^[1-3]。而水泥土搅拌桩复合地基,更是具有造价低廉、工艺简便、施工进度快以及对周围环境影响小、适用土质类型广、地基加固深度大、适用工程范围广等特点^[4-6],在各类工程的地基加固处理中得到广泛应用。

为了使水泥土搅拌桩复合地基在工程实践中更好地应用,众多学者对水泥土搅拌桩复合地基的承载机理与变形特性展开研究。在现场测试方面,段继伟等^[7]通过现场足尺试验研究了水泥土搅拌桩加固淤泥质软土地基的荷载传递规律,得出桩体的变形、轴力和侧摩阻力主要集中在临界桩长范围内,桩体破坏发生在浅层,破坏形式为环向拉裂或桩体压碎。宋修广等^[8]通过水泥粉喷桩加固亚黏土地基的现场足尺试验得到了与文献^[7]相类似的结论。徐超等^[9]对比研究了两种不同桩端支承条件的水泥土搅拌桩复合地基分别在刚性荷载下和半柔性荷载下的变形与受力特性,指出水泥土搅拌桩复合地基承载力评价应考虑上部荷载特性及桩的端承条件,从而更合理的确定相关工程设计参数。张伟丽等^[10]通过现场静载荷试验研究了褥垫层厚度对水泥土搅拌桩复合地基承载性能的影响规律。向玮等^[11]研究了变径水泥土搅拌桩复合地基的承载特性及桩身荷载传递机理。闫楠等^[12]在对水泥土搅拌桩单桩及水泥土搅拌桩多桩复合地基静载荷试验基础上,采用修正双曲线模型对水泥土单桩和复合地基的极限承载力进行预测,并取得了较好的预测效果。在模型试验方面,章定文等^[13]开展了端承型和悬浮型水泥土搅拌桩复合地基加固软土地基的室内模型试验,研究了水泥土搅拌桩复合地基的固结特性。张莎莎等^[14]通过离心模型试验和现场监测,研究了水泥粉煤灰搅拌桩加固饱和黄土地基的承载特性。Ye等^[15]通过离心模型试验研究了塑料排水带与水泥土搅拌桩联合加固软土地基的承载性能。Bian等^[16]通过室内模型试验研究了环形土工格栅套筒对水泥加筋桩复合地基承载力的影响。在数值

模拟方面,赵利平等^[17]运用ABAQUS有限元软件对水泥土搅拌桩复合地基进行三维建模,探究了水泥掺入量、桩间距及褥垫层等因素对地基沉降的影响。郑刚等^[18]采用有限差分法研究了桩体弹性模量对水泥土搅拌桩复合地基加固软弱黏土支承路堤破坏模式的影响规律。

综上,通过多种方法和手段对水泥土搅拌桩复合地基承载机理与变形特性取得了较为丰富的研究成果,但是由于复合地基工程承载特性受地质条件、桩、褥垫层、基础及荷载等诸多因素的影响,现有研究成果多集中于对水泥土搅拌桩进行定性分析,缺乏定量的符合实际工程可成熟应用的理论公式,且多集中于加固软弱黏土地基。而我国地域辽阔,土质条件有极强的地域性特征,近年来,在西北沙漠地区城市建设中,水泥土搅拌桩处理风积沙地层复合地基技术的应用也日益广泛。但是目前关于揭示西北沙漠地区复合地基承载机理及变形特性的相关文献还较少见^[19-20],水泥土搅拌桩处理风积沙地层复合地基的设计和施工大多建立在经验基础上,相关理论研究落后于工程实践。

本文依托毛乌素沙漠南缘陕西榆林地区某项目的地基处理工程——水泥土搅拌桩处理风积沙地层复合地基工程,基于ABAQUS有限元分析软件,拟对水泥土搅拌桩处理风积沙地层的复合地基静载荷试验进行数值模拟,探究风积沙复合地基桩土荷载传递机制及变形特性。并分析褥垫层厚度及其模量、桩长及荷载水平等因素对水泥土搅拌桩复合地基承载性状的影响,以期同类工程地基处理设计提供参考。

1 工程概况

该工程位于陕西省榆林市崇文路北侧,根据勘探揭露,场地内地层组成如图1所示。工程主体为框架结构,地上5层,地下1层,筏板基础,水泥土搅拌桩复合地基。设计桩径为0.6 m,正方形布桩,桩间距1.2 m,桩长7.0 m,桩身强度等级3.5 MPa。复合

地基承载力特征值为 220 kPa,桩间土承载力为 130 kPa,单桩竖向增强体承载力特征值为 190 kN。该工程设计标高±0.000 m 相当于绝对高程 1 090.700 m。水泥土搅拌桩顶的设计标高为-4.600 m,绝对高程为 1 086.100 m。

根据规范^[21]和设计要求,地基处理后进行单桩

复合地基静载荷试验检测,如图 2 所示。采用慢速维持载荷法,承压板为圆形钢制压板,直径 1.36 m,面积 1.45 m²,即取单桩等效加固范围。试验时在压板下铺设 2 cm 厚中砂找平,加载采用堆载平台,加载等级分为 8 级,每级施加荷载 55 kPa,总加载至 440 kPa。

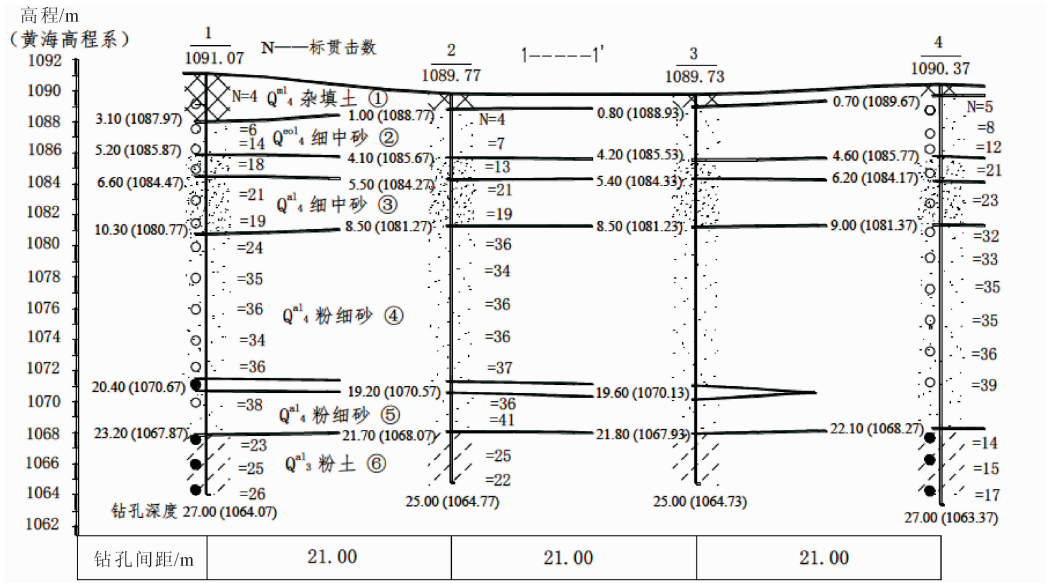


图 1 工程地质剖面图



图 2 水泥土搅拌桩复合地基静载荷试验

2 建立模型和确定参数

2.1 建立模型

本文旨在模拟分析单桩复合地基静载荷试验下的桩-土承载特性及其共同作用,考虑到桩体的对称性,取 1/4 单桩区域进行建模分析,同时为消除边界条件对模型计算结果精度的影响,模型尺寸在水平方向取 10 倍桩径长 6 m,深度方向取 2.5 倍桩长 18 m,如图 3 所示。模型底部边界为三向全约束,侧向和对称面的边界为法向固定,顶部边界为自由边

界。单元类型选用 C3D8。
2.2 土层划分和模型材料参数
根据设计文件及地质勘察报告,模型计算深度内土层划分为 2 层,上层为稍密至中密细中砂,平均厚度 5.5 m,下层为密实粉细砂,平均厚度 12.5 m,桩顶铺设 0.3 m 厚级配砂石褥垫层。计算时水泥土搅拌桩、承压板采用弹性本构模型,褥垫层、土体采用摩尔-库仑弹塑性模型,各材料基本参数信息如表 1 所示。

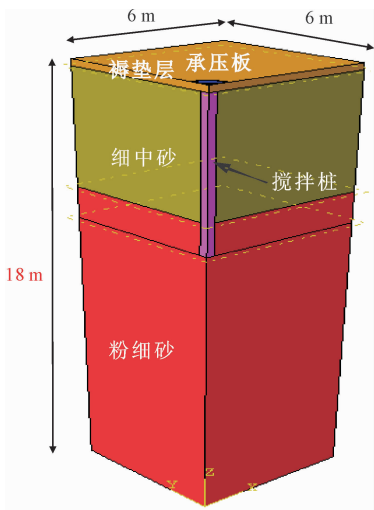


图 3 水泥土搅拌桩单桩复合地基计算模型

表 1 材料基本参数信息

材料类型	弹性模量 /MPa	泊松 比	内摩擦 角/(°)	黏聚力 /kPa	密度 /(kg·m ⁻³)
细中砂	20	0.30	32	2	1800
粉细砂	36	0.30	34	5	1850
褥垫层	45	0.30	40	1	2200
水泥土 搅拌桩	480	0.25	—	—	2000
承压板 (厚 2 cm)	2.06 × 10 ⁵	0.30	—	—	7850

2.3 桩土接触面及分析步设置

考虑到桩土材料的差异性,桩与土体间的相互作用通过设置界面的接触属性进行模拟,接触面的法向受力行为设置为“硬接触”,即桩土两物体在接触时才能传递法向压力,两物体之间有间隙时不传递法向压力。接触面的切向受力行为设置为摩擦接触,桩土摩擦角取 30°,则桩土摩擦系数 $\mu = \tan 30^\circ = 0.58$ 。

分 3 步进行模拟计算,第 1 步为初始分析步,用于定义初始状态下的边界条件和相互作用。第 2 步,重力分析步,基于 ABAQUS 中的生死单元功能,采用“分步平衡法”^[22],依次进行桩体未贯入时地基的初始地应力平衡,及桩体生成后桩结构与桩周土相互作用的地应力平衡。第 3 步,静力通用分析步,达到地应力平衡后,依据复合地基静载荷试验加载步骤,依次进行 55 kPa、110 kPa、165 kPa、220 kPa、275 kPa、330 kPa、385 kPa、440 kPa,8 级逐级加载。

3 数值计算结果分析

3.1 单桩复合地基沉降模拟结果分析

根据上述建模步骤,对未铺设褥垫层的单桩复

合地基进行静载试验数值模拟,加载至 8 级即 440 kPa 后,继续模拟加载至 660 kPa,得出荷载 p 与沉降 s 关系模拟曲线,并与现场静载荷试验沉降曲线对比。现场载荷试验加载至复合地基承载力特征值 2 倍,即 440 kPa。为便于分析比较,在图 4 中同时绘制出桩身压缩及桩端土的荷载-沉降模拟曲线。

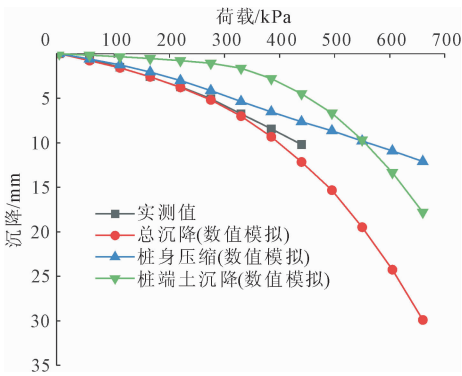


图 4 水泥土搅拌桩单桩复合地基荷载-沉降关系曲线

由图 4 可知,现场实测的荷载-沉降曲线呈缓变型,无明显拐点,在最大荷载 440 kPa 作用下的最大沉降量为 10.20 mm,与承压板直径 d_c 的比值为 0.0075;在荷载 220 kPa 作用下的沉降量为 3.70 mm,相对沉降为 $s/d_c = 0.0027$,小于 0.006。故可判定,该水泥土搅拌桩复合地基承载力特征值 $f_{spk} = 220$ kPa,满足规范和设计要求^[21]。同时数值模拟的荷载-沉降曲线与实测曲线较好吻合,验证了本文模拟方法的合理性与可行性。

由图 4 的总沉降模拟曲线可知,当加载超过 440 kPa,随着荷载的增大,沉降增加的梯度逐渐加大,但未出现急剧性的陡降变化,表明该复合地基的承载力高于设计要求。同时由图 4 中桩身压缩及桩端土的沉降模拟曲线可知,在加载初期,单桩复合地基的总沉降主要由桩身压缩产生,桩端土沉降极小,表明当荷载较小时,水泥土搅拌桩分担的荷载主要由桩侧摩阻力承担。随着荷载的增大,桩身压缩呈线性变化,桩端土的沉降变形逐渐明显,表明桩体分担的荷载逐渐克服桩侧摩阻力由桩顶向桩底传递。当加载至 330 kPa 时,桩端土的沉降由线弹性变形进入弹塑性变形阶段,且随着荷载的增大,桩端土的沉降梯度越来越大。依据总沉降模拟曲线,按规范若取 $s/d_c = 0.006$ 所对应的压力,可得单桩复合地基的模拟承载力特征值约为 330 kPa,高于理论计算确定的特征值,表明按规范设计的风积沙复合地基的承载力特征值偏于安全,有较大的富裕度,这与文献[20]所得结论相类似。

3.2 单桩复合地基桩土应力比模拟结果分析

桩土应力比 n 是反映复合地基中桩与桩周土承载工作状态的重要参数,实践表明铺设褥垫层在协调桩、土共同承担荷载、减小桩顶应力集中、调整桩土应力比等方面具有显著作用。因此,为揭示本工程中褥垫层的影响规律,优化褥垫层厚度,对无褥垫层及褥垫层厚度分别取 0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m 工况的单桩复合地基静载荷试验进行模拟。将荷载模拟加载至 660 kPa,各工况下的桩土应力比模拟结果如图 5 所示。

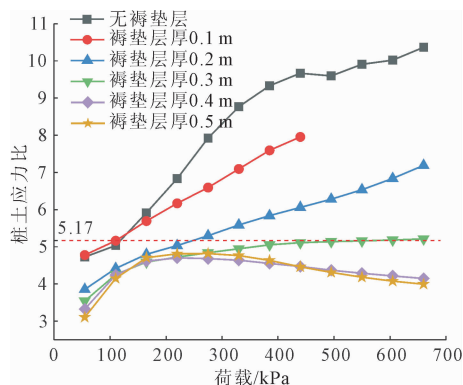


图5 水泥土搅拌桩单桩复合地基荷载-桩土应力比关系模拟曲线

由图 5 可知,褥垫层的设置对复合地基桩土应力比有显著影响,且影响规律与褥垫层厚度密切相关。相比较,未铺设褥垫层的复合地基的桩土应力比最大,且随着荷载的增大而增加,在加载初期桩土应力比增加较快,在加载后期桩土应力比增幅逐渐趋于平缓。整体上,随着褥垫层厚度的增加,桩土应力比呈下降趋势,褥垫层厚度较薄时,其厚度变化对桩土应力比影响较大,厚度较大时,其厚度变化对桩土应力比的影响减弱,并趋于稳定。本工程中,褥垫层铺设厚度为 0.4 m、0.5 m 时,二者的桩土应力比随荷载的变化规律已近于一致。需要说明的是,褥垫层厚度为 0.1 m 的工况,当模拟加载至 495 kPa 时,程序计算中止,原由是桩与褥垫层接触处的单元结点塑性变形过大不收敛。这是由于分担荷载较大的桩体应力集中向上刺入垫层,褥垫层厚度过薄不足以调节桩土之间的沉降差异,致使垫层破坏。

显然,从工程设计角度而言,复合地基的桩土应力比最合理的设计是桩体和桩间土都最大限度地发挥各自的承载力^[23],即桩体和桩间土都达到其各自的承载力时的应力比。由前所述,该复合地基工程,单桩竖向承载力特征值为 190 kN,桩间土承载力为 130 kPa,得出桩土应力比设计值为 5.17。综合分析

图 5 中各褥垫层厚度下单桩复合地基的荷载-桩土应力比关系曲线,可知褥垫层厚度设置为 0.3 m 时效果最优。

3.3 单桩复合地基桩身附加轴应力、桩侧摩阻力模拟结果分析

根据各工况的数值模拟结果,绘制无褥垫层、褥垫层厚度为 0.3 m 工况下桩身附加轴应力、桩侧摩阻力在不同荷载作用下沿深度变化的分布曲线,如图 6—图 9 所示。同时采用 Bjerrum 公式^[24] 计算桩周土自重应力对桩作用的侧摩阻力 τ ,并与之进行比较分析,其计算公式为:

$$\tau = k_0 \gamma z \tan \varphi \quad (1)$$

式中: k_0 为土体的侧压力系数,取 $k_0 = \nu / (1 - \nu)$, ν 为土体的泊松比; φ 为桩土之间的摩擦角; γ 为土体重度; z 为土层深度。

由图 6 可知,各级荷载作用下,无褥垫层的桩身附加轴应力沿深度衰减,同时由图 7 可知,无褥垫层的侧摩阻力在桩顶处达到峰值,沿桩身向下依次呈现衰减、增加、再衰减的分布规律,侧摩阻力分布曲线上的拐点位于 Bjerrum 曲线附近,随着荷载的增加拐点依次向下延伸。原因是,一方面,复合地基由桩与桩周土共同承载,桩周土分担的附加应力在桩顶处最大,对桩身的侧向约束亦最强,随深度的增加,桩周土附加应力快速衰减,对桩身的侧向约束影响也随之减弱。由图 7 可知,在桩顶附近,桩侧摩阻力沿深度呈由大到小的变化规律,上部荷载越大,桩周土分担的附加应力越大,桩顶的侧摩阻力就越大,对桩顶侧向约束影响的范围就越深。桩周土的自重应力随深度而增加,自重应力对桩身的侧向约束影响亦随深度增强,故沿着桩身向下,桩侧摩阻力又呈增加趋势。另外一方面,荷载较小时,桩身压缩主要发生在桩身上段,故在桩身上段桩侧摩阻力得到充分发挥,桩身下段的桩侧摩阻力未充分发挥,于是在

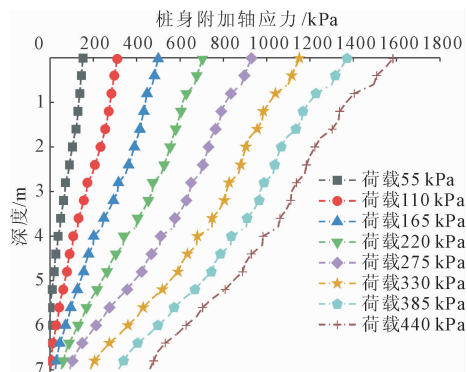


图6 无褥垫层的桩身附加轴应力沿深度分布曲线

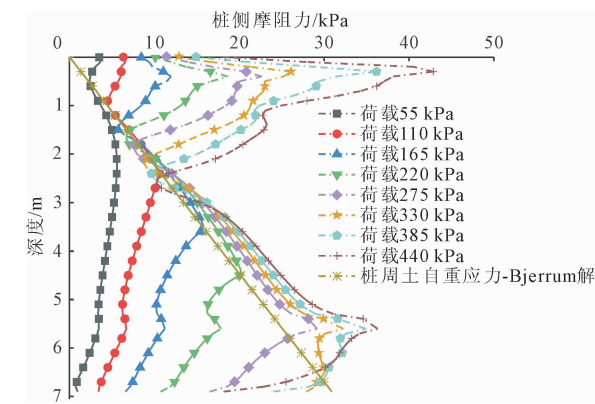


图 7 无褥垫层的桩侧摩阻力沿深度分布曲线

桩身下段,桩侧摩阻力又呈减小趋势。随着荷载逐级增加,桩身压缩和位移随之增大,使桩侧摩阻力从桩身上段向下逐次发挥。

由图 8 可知,各级荷载作用下,褥垫层厚度 0.3 m 的桩身附加轴应力,在桩顶附近向下先增加至峰值然后沿深度逐渐衰减,且在相同荷载等级下,褥垫层厚度 0.3 m 的桩身附加轴应力要显著小于无褥垫层的桩身附加轴应力。原因是,设置褥垫层的复合地基受荷后在桩土变形协调过程中,分担荷载较大的桩体应力集中向上刺入垫层,桩间土受荷压缩,使得桩身上部一定深度范围内桩间土的沉降大于桩的沉降,土体对桩产生下拉作用,称为负摩阻力。上部荷载越大,桩周土分担的附加应力越大,桩顶的负摩阻力就越大。受负摩阻力的影响,桩身附加轴应力在桩顶附近向下呈增加趋势。在负摩阻力影响深度以下,桩体沉降大于土体沉降,桩周土对桩产生向上的正摩阻力。于是,在正摩阻力作用下桩身附加轴应力沿深度逐渐衰减。如图 9 可知,褥垫层厚度 0.3 m 的桩侧摩阻力在桩顶处出现最大负摩阻力,随深度向下快速衰减为零继而转为正摩阻力并达到峰值,之后沿桩身向下依次呈现衰减、增加、再衰减的分布规律。其原由受桩周土附加应力与其自重应力共同影响,具体分析类同于无褥垫层。

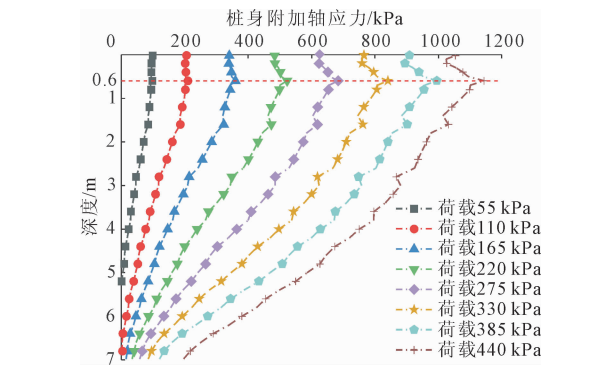


图 8 褥垫层厚 0.3 m 的桩身附加轴应力沿深度分布曲线

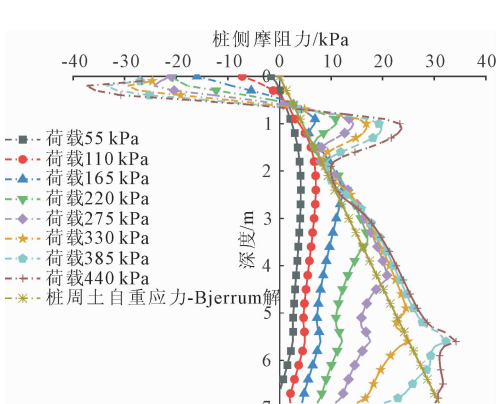


图 9 褥垫层厚 0.3 m 的桩侧摩阻力沿深度分布曲线

在实际工程中,通常更关注承载力特征值附近的桩身附加轴应力及桩身侧摩阻力。该复合地基工程荷载为 220 kPa 时的模拟结果,桩顶附加轴应力为 483.83 kPa,距离桩顶 0.6 m 处桩身附加轴应力达到最大值 522.98 kPa,桩底端附加轴应力为 33.86 kPa,小于桩身设计强度 3.5 MPa。其桩侧摩阻力,在桩顶处最大负摩阻力为 -20.68 kPa,在桩深 1 m 处峰值正摩阻力为 11.08 kPa,在桩深 3.4 m 处最大正摩阻力为 17.07 kPa。结合 Bjerrum 曲线,可知在桩身上半段桩侧摩阻力得到了充分发挥,桩身下半段桩侧摩阻力未充分发挥,有富裕度,如图 9 所示。

3.4 桩侧摩阻力、桩端阻力荷载分担比模拟结果分析

绘制无褥垫层、褥垫层厚度为 0.3 m 工况下桩侧摩阻力和桩端阻力对桩顶荷载的分担情况,如图 10 所示。

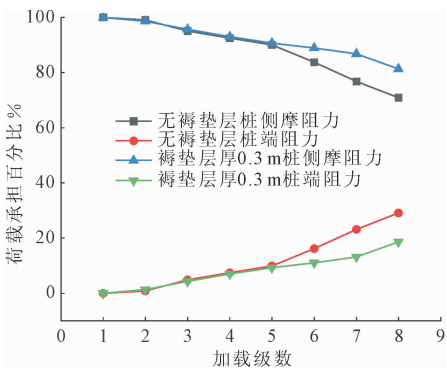


图 10 桩侧摩阻力、桩端阻力荷载分担比

由图 10 可以看出,加载初期,桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担,桩端阻力分担较小。随着荷载的持续增加,桩侧摩阻力承担百分比逐渐减小,桩端阻力荷载分担百分比逐步增加。同时可以看出,当荷载加载至 6 级即 330 kPa 时,无褥垫层的桩侧摩阻

力分担比较褥垫层厚 0.3 m 减小更快,桩端阻力分担比反之增加更快。原因是,结合图 5 及图 7 可知,无褥垫层的桩体分担荷载较大,桩侧摩阻力较早发挥,继而转由桩端土承担。

3.5 褥垫层厚度对沉降的影响

基于各工况的数值模拟结果,绘制了各褥垫层厚度下单桩复合地基的荷载-沉降模拟曲线,如图 11 所示。

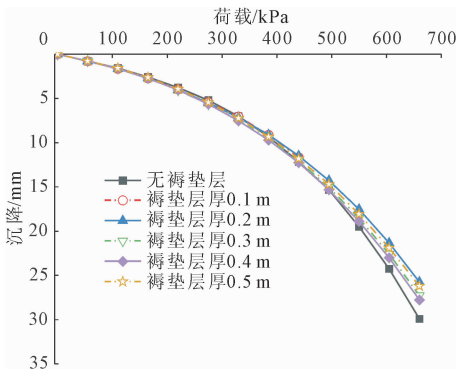


图 11 不同褥垫层厚度下复合地基荷载-沉降曲线

由图 11 可知,各褥垫层厚度下的单桩复合地基荷载-沉降曲线较为接近,当模拟加载至承载力特征值的 2.5 倍即 550 kPa 时,无褥垫层的沉降略大些,但差异不是明显。可见在正常荷载水平下,褥垫层合理厚度范围的取值对复合地基的沉降影响较小。

3.6 褥垫层模量对沉降、桩土应力比的影响

为探究褥垫模量对该复合地基承载性能的影响规律,褥垫模量分别取 15 MPa、30 MPa、45 MPa、60 MPa、80 MPa 及 100 MPa 进行单桩复合地基静载试验模拟,褥垫层厚度 0.3 m。将荷载模拟加载至 660 kPa,各褥垫层模量下单桩复合地基的荷载-沉降曲线及荷载-桩土应力比曲线的模拟结果,分别如图 12、图 13 所示。

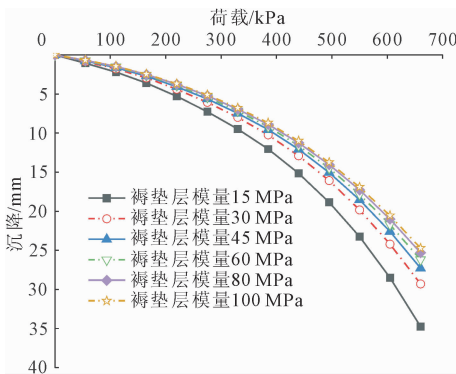


图 12 不同褥垫层模量下复合地基的荷载-沉降曲线

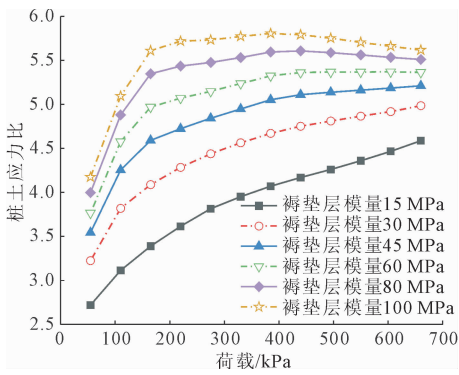


图 13 不同褥垫层模量下复合地基的荷载-桩土应力比曲线

由图 12 可以看出,当褥垫层模量低于 45 MPa 时,随着褥垫层模量的增大,复合地基的沉降减小,荷载-沉降曲线整体变缓,承载性能提升较为明显;但当褥垫层模量大于 45 MPa 时,同级荷载下复合地基的沉降差异变小,荷载-沉降曲线趋于稳定,褥垫层模量的变化对复合地基承载性能的影响不再明显。

由图 13 可知,褥垫层模量的变化对复合地基的桩土应力比有显著影响,在相同等级荷载下褥垫层模量越大,桩土应力比越大。如 3.2 节所述,为充分发挥复合地基的桩土各自承载性能,可知褥垫层模量不宜过小也不宜过大。综合考虑沉降影响,该复合地基工程,褥垫层模量控制在 45 MPa~60 MPa 范围时较为合理。

3.7 桩长对沉降、桩土应力比的影响

桩长设计是复合地基的一项关键设计指标,为定量分析桩长变化对该复合地基工程的影响规律,将桩长分别取为 3 m、5 m、7 m、9 m、11 m 进行单桩复合地基静载试验模拟,褥垫层厚度 0.3 m。将荷载模拟加载至 660 kPa,各桩长下的荷载-沉降曲线及荷载-桩土应力比曲线的模拟结果,分别如图 14、图 15 所示。为便于分析比较,同时绘制了桩长与桩土应力比的关系曲线,如图 16 所示。

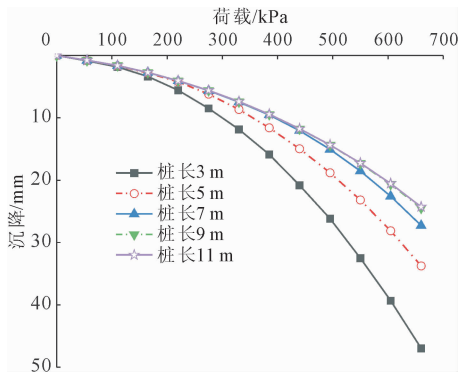


图 14 不同桩长下复合地基的荷载-沉降曲线

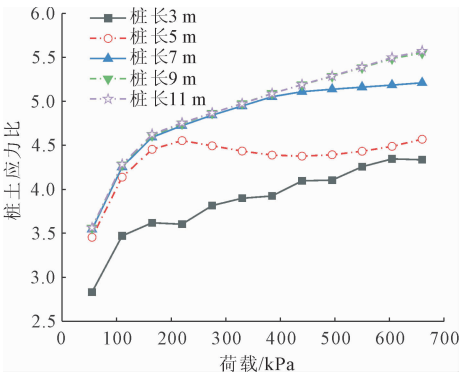


图 15 不同桩长下复合地基的荷载-桩土应力比曲线

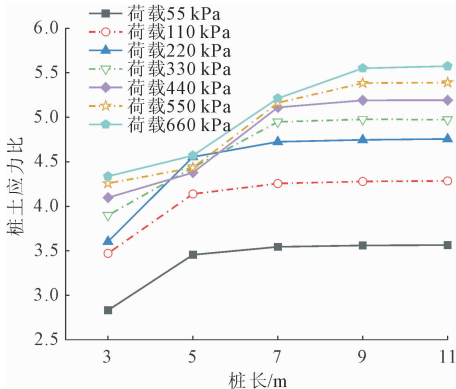
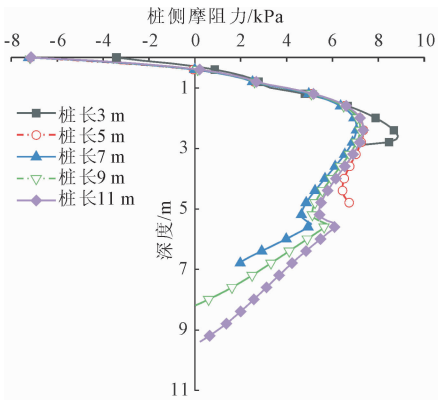
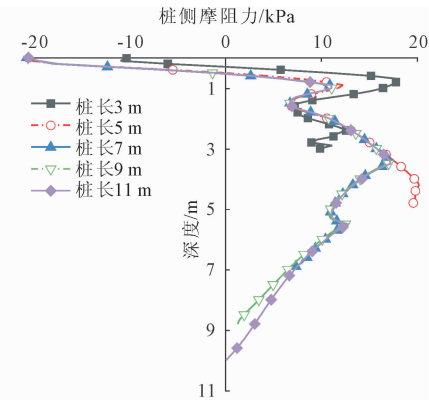


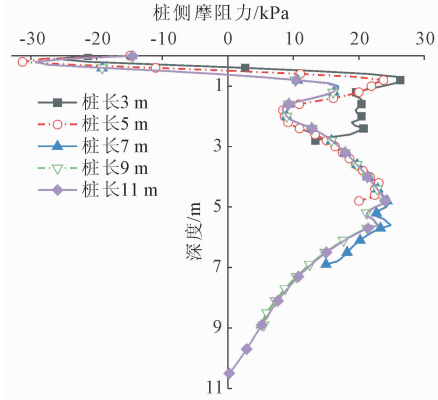
图 16 桩长对桩土应力比的影响曲线



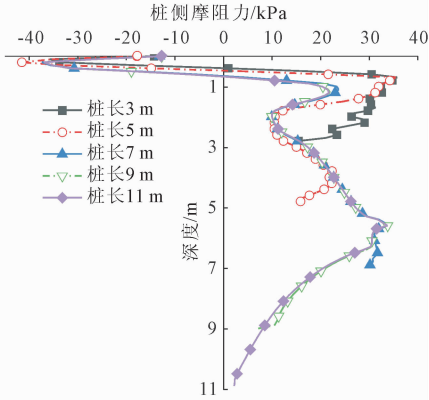
(a) 荷载110 kPa



(b) 荷载220 kPa



(c) 荷载330 kPa



(d) 荷载440 kPa

图 17 不同桩长下桩侧摩阻力沿深度分布曲线

由图 14 可知,当桩长较小时,随着桩长的增加,复合地基的沉降减小,荷载-沉降曲线变缓,复合地基的承载性能提升较为显著;但是当桩长达到一定值后,同级荷载下复合地基的沉降差异变小,荷载-沉降曲线趋于稳定,桩长的变化对复合地基承载性能的影响不再明显。可见,水泥土搅拌桩处理风积沙地基时亦存在临界桩长,当超过临界桩长后,桩长的改变对提升复合地基承载性能的意义不大。该复合地基的临界桩长约为 9 m 左右。

由图 15 可知,当桩长小于 9 m 即临界桩长时,不同桩长下复合地基的荷载-桩土应力比呈现出不同的变化规律;但是当桩长达到临界桩长时,荷载-桩土应力比曲线趋于稳定,不再受桩长变化的影响。同时由图 16 可以看出,在相同荷载等级下,桩土应力比随桩长的增加先增加而后趋于稳定,荷载越小,达到稳定桩土应力比时的桩长越小。

3.8 桩长对桩侧摩阻力的影响

根据各桩长的单桩复合地基静载荷试验数值模拟结果,绘制了荷载等级分别为 110 kPa、220 kPa、330 kPa、440 kPa 时,各桩长的桩侧摩阻力沿深度分布的对比曲线,如图 17 所示。

由图 17 可以看出,桩侧摩阻力的分布形式受桩长和上部荷载共同影响。总体上,在相同荷载等级作用下,桩身侧摩阻力分布随着桩长的增加趋于稳定。如该复合地基,当桩长为 7 m、9 m、11 m 时,各级荷载作用下三者的桩侧摩阻力分布在相应桩长范围内非常接近。原因是在相同荷载等级下,桩土应力比将随着桩长的增加趋于稳定。由图 16 可知,当荷载等级分别为 110 kPa、220 kPa、330 kPa、440 kPa 时,桩长为 7 m、9 m、11 m 的桩土应力比较为接近,表明在相同荷载等级下三者的桩体与桩周土分担的荷载比例相接近,即三者桩体各自分担的荷载相接近,桩周土分担的荷载也相近。根据 3.3 节桩身附加轴应力传递及桩侧摩阻力沿桩身的分布规律,可知三者在相应桩长范围内沿桩身分布的桩侧摩阻力较为接近。同时由图 16 可知,在相同荷载等级下,当桩长减小时桩土应力比也减小,即桩体分担荷载比例降低,桩周土分担荷载比例增加,桩周土附加应力增加,对桩顶附近的桩身侧向约束增强,故在相同荷载等级下,桩长越小在桩顶附近的侧摩阻力越大,如图 17 所示。

4 结 论

本文基于 ABAQUS 有限元分析软件,对水泥土搅拌桩处理风积沙地层的复合地基静载荷试验进行数值模拟,探究了风积沙复合地基桩土荷载传递机制及变形特性,并分析了褥垫层厚度及其模量、桩长及荷载水平等因素对水泥土搅拌桩复合地基承载性状的影响,得出主要结论如下。

(1) 数值模拟荷载-沉降曲线与实测曲线较好吻合,验证了模拟方法的合理性与可行性。按规范设计的风积沙复合地基承载力特征值偏于安全,有较大的富余度。

(2) 设置合理厚度的褥垫层,在减小桩顶应力集中,降低桩土应力比方面有显著作用,但对复合地基的沉降影响较小。当褥垫层模量较小时,提高褥垫层模量,可减小复合地基的沉降,改善地基的承载性能。但当褥垫层模量达到一定值后,其模量的变化对复合地基承载性能的影响不再明显。

(3) 设置褥垫层的桩侧摩阻力沿桩身的分布规律为:在桩顶处出现最大负摩阻力,随着深度向下快速衰减为零继而转为正摩阻力并达到峰值,之后沿桩身向下依次呈现衰减、增加、再衰减的分布现象。受负摩阻力的影响,其桩身附加轴应力在桩顶附近先向下增加到峰值,然后沿深度逐渐衰减。随着荷

载的持续增加,桩侧摩阻力从桩身上段向下逐次发挥,且桩侧摩阻力承担百分比逐渐减小,桩端阻力荷载分担百分比逐步增加。

(4) 水泥土搅拌桩处理风积沙地基时亦存在临界桩长。在相同荷载等级下,桩土应力比随桩长的增加先增加而后趋于稳定,各桩长沿桩身侧摩阻力分布亦随着桩长的增加趋于稳定。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 郑 刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
- [3] 党昱敬. 刚性桩复合地基应用热点问题探讨[J]. 建筑结构, 2022, 52(24): 106-113.
- [4] 吕国仁, 葛建东, 肖海涛. 水泥土搅拌桩沿海软基处理[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(3): 73-81.
- [5] 韦全余, 石 军, 冯哲源, 等. 搅拌桩复合地基沉降因素及计算方法研究进展[J]. 土工基础, 2023, 37(1): 118-123.
- [6] 刘陈凤, 相福颖, 季圣博, 等. 搅拌桩复合地基桩土相互作用及变形特性数值仿真[J]. 四川建材, 2023, 49(9): 68-71.
- [7] 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩的荷载传递规律[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 1-8.
- [8] 宋修广, 王松根, 杨永顺, 等. 水泥粉喷桩荷载传递规律的试验研究[J]. 岩土力学, 1999(4): 81-85.
- [9] 徐 超, 叶观宝. 水泥土搅拌桩复合地基的变形特性与承载力[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 600-603.
- [10] 张伟丽, 蔡 健, 林奕禧, 等. 水泥土搅拌桩复合地基荷载传递机理的试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 116-121.
- [11] 向 玮, 刘松玉, 经 绯, 等. 变径水泥土搅拌桩复合地基承载特性的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(2): 328-333.
- [12] 闫 楠, 郑 晨, 白晓宇, 等. 水泥土搅拌桩复合地基承载特性现场试验[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 247-253.
- [13] 章定文, 范礼彬, 刘松玉, 等. 水泥土搅拌桩复合地基固结机理室内模型试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(12): 1-9.
- [14] 张莎莎, 杨晓华, 鞠兴华. 水泥粉煤灰搅拌桩复合地基的离心模型试验及现场实测效果研究[J]. 工程勘察, 2012, 40(4): 11-15.
- [15] Ye Guanbao, Zhang Qingwen, Zhang Zhen, et al. Centrifugal modeling of a composite foundation combined with soil-cement columns and prefabricated vertical drains[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(5): 1259-

1269.

[16]

Bian Xia, Peng Weiheng, Qiu Chengchun, et al. Model test on bearing capacity of cemented slurry reinforced pile composite foundation[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023,19:e02482.

[17]

赵利平,龙晓鹏,黄筱云. 水泥土搅拌桩复合地基沉降分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(3):30-36,70.

[18]

郑刚,夏博洋,周海祚,等. 桩体模量对水泥土搅拌桩复合地基破坏影响研究[J]. 中国公路学报,2020,33(9):146-154.

[19]

李喜安,王继华,宋焱勋,等. 水泥土搅拌桩复合地基载荷试验有限元数值模拟[C]//第九届全国工程地质大会论文集,2012:838-841.

[20]

李玉根,郅彬,赵高文,等. CFG 桩处理风积砂土地基承载性状研究[J]. 中国科技论文,2016,11(1):43-48.

[21]

建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[J]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[22]

肖国丰,马思琪,刘洋,等. 基于 ABAQUS 生死单元技术的平衡地应力方法研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(4):47-52.

[23]

肖耀廷,党发宁. 复合地基褥垫层厚度的设计方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(5):1331-1335.

[24]

陈明,李镜培,梁发云,等. 刚性桩复合地基负摩阻区深度的一种计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(7):955-959.



(上接第 21 页)

(2) 通过可拓云模型,计算各评价指标隶属度及等级特征值,可以更直观、准确的得出指标对应的安全等级,清晰的判断指标的等级特征值对应的严重程度等级。通过对某水库的工程应用,进一步验证了该方法针对中小型水库溃坝后果评价的有效性和适用性。

参考文献:

[1]

中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[2]

中华人民共和国水利部. 2019 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

[3]

Wang X L, Zhou Z Y, Sun R R, et al. Fuzzy hierarchy comprehensive evaluation on dam break risk analysis[J]. Advanced Materials Research, 2011, 383-390: 2151-2155.

[4]

魏海霞,赵明,祝杰. 基于模糊层次分析法的建筑结构安全评价体系研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):181-186,198.

[5]

Zheng H Y, Sheng J B, Peng X H, et al. Earth-rock dam risk consequence's comprehensive evaluation under drought condition [J]. Advanced Materials Research, 2012,518-523:4022- 4025.

[6]

李宗坤,莫向明,葛巍,等. 基于变权集对-可拓耦合

模型的溃坝后果综合评价[J]. 工程科学与技术,2022,54(5):64-71.

[7]

王志军,顾冲时,张治军. GIS 支持下基于遗传优化神经网络的溃坝生命损失评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2010,35(1):64-68.

[8]

王志军,宋文婷,马小童. 溃坝经济损失评估方法研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(2):30-34.

[9]

何冠洁,柴军瑞,覃源,等. 基于灰色系统-可变模糊集耦合模型的溃坝后果评价[J]. 自然灾害学报,2021,30(4):164-171.

[10]

孙玮玮,彭雪辉,龙智飞,等. 溃坝后果综合评价模型特性分析及适用性研究[J]. 水力发电,2022,48(1):70-76.

[11]

梁文娟,朱记伟,张永进,等. 基于 AHP-物元可拓法的小型水库运行管理标准化评价[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):208-214.

[12]

王亮,尹志刚,丛培江,等. 基于组合赋权-云模型的中小型土石坝安全评价[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(4):91-97,119.

[13]

齐向坤. 基于物元可拓学的建筑业企业负担评价研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[14]

水电工程溃坝洪水与非恒定流计算规范:NB/T 10805—2021[S]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[15]

李巍. 基于云模型及改进可变模糊集中的中国溃坝风险后果评价[D]. 郑州:郑州大学,2019.