

# 浸水软土地基承载力分析及稳定性评价

王 丽<sup>1</sup>, 陈宏杰<sup>2</sup>

(1. 河北省地矿局第二地质大队, 唐山 063000; 2. 国检测试控股集团雄安有限公司, 雄安 070001)

**摘 要:** 为研究浸水条件下软土地基的承载特性与稳定性, 依托典型软土地基工程实例, 通过静载荷试验、旁压试验、静力触探等方法, 研究软土地基在不同深度、不同位置的沉降特性、变形模量、锥阻力、侧摩阻力、摩阻比, 分析其发展变化规律。结果表明: 浸水条件下软土地基承载力和稳定性均呈显著分层特征; 软土深度小于 2 m 时, 静载试验最大沉降量达 60.0 mm, 变形模量为 5.4~6.1 MPa, 静力触探锥尖阻力多为 0.2~0.6 MPa, 反映出浅层土体承载力较低的力学特征, 存在明显稳定性风险; 深度大于 5 m 后, 沉降量降低至 32.5 mm, 变形模量上升至 7.2~8.3 MPa, 静力触探锥尖阻力稳定在 0.8 MPa 左右, 摩阻比下降至 5.3%~5.8%, 表明中深层土体密实、承载能力增强, 地基结构趋于稳定。浅层软土受水影响大、承载力低、沉降大, 是地基稳定性的主要控制层; 中深层土体密实度提高, 承载能力和稳定性明显增强, 可作为主要承载层加以利用。研究结果可为类似工程提供参考。

**关键词:** 浸水条件; 软土地基; 承载力分析; 稳定性评价; 原位测试

中图分类号: TU447 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0103-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.017

## Analysis of Load-Bearing Capacity and Stability Evaluation of Water-Soaked Soft Soil Foundations

WANG Li<sup>1</sup>, CHEN Hongjie<sup>2</sup>

(1. The Second Geological Brigade of Hebei Geology and Mining Bureau, Tangshan 063000, China;

2. National Inspection and Testing Holding Group Xiong'an Co., Ltd., Xiong'an 070001, China)

**Abstract:** To study the bearing characteristics and stability of soft soil foundations under waterlogged conditions, this paper is based on typical soft soil foundation engineering case studies. Through static load tests, lateral pressure tests, and static cone penetration tests, the settlement characteristics, deformation modulus, cone resistance, side friction resistance, and friction ratio of soft soil foundations at different depths and locations are analyzed, and their developmental patterns are examined. The results indicate that under waterlogged conditions, the bearing capacity and stability of soft soil foundations exhibit obvious stratification characteristics. When the soft soil depth is less than 2 m, the maximum settlement from the static load test reaches 60.0 mm, the deformation modulus is 5.4~6.1 MPa, and the static cone penetration tip resistance is mostly 0.2~0.6 MPa, reflecting the low bearing capacity of shallow soil layers and posing significant stability risks. When the depth exceeds 5 m, the settlement decreases to 32.5 mm, the deformation modulus rises to 7.2~8.3 MPa, the static cone penetration tip resistance stabilizes at

作者简介: 王 丽 (1984—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程物探。

通信作者: 陈宏杰 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 复合地基、基坑边坡。

收稿日期: 2026-01-07

## 岩土力学

around 0.8 MPa, and the friction ratio drops to 5.3%–5.8%, indicating that mid-to-deep soil layers are denser, the bearing capacity is enhanced, and the foundation structure tends to be stable. Shallow soft soil is heavily affected by water, has low bearing capacity, and large settlement, making it the main controlling layer for foundation stability. In contrast, the density, bearing capacity, and stability of mid-to-deep soil layers are significantly improved and can be utilized as the primary bearing layers. The findings of this study may serve as a reference for similar projects.

**Key words:** immersion conditions; soft layer; bearing capacity analysis; stability evaluation; in-situ test

## 0 引言

软土地基广泛分布于我国沿江、南方及滨海区域,其天然结构松散、含水量高、压缩性大,在长期浸水或季节性水位波动影响下,地基结构稳定性易受破坏,承载性能显著降低,成为影响工程安全与建筑结构使用寿命的重要因素<sup>[1-2]</sup>。特别是在季节性干旱与集中降雨交替的地区,雨季形成的大量地表径流和地下水位抬升,会导致地基处于饱和或过湿状态,引发软土地基沉降加剧、剪切强度降低、局部失稳等问题<sup>[3]</sup>。

目前,大量的研究主要集中于软土地基的特性与加固方法。高盟等<sup>[4]</sup>通过现场振动实测与对比分析青岛岩质地基与上海软土地基地铁运营引起的环境振动特性,结果表明软土地基对低频振动的放大效应显著强于岩质地基,地面振动衰减速率更慢;邓尚强<sup>[5]</sup>采用现场监测与理论计算相结合的方法,分析了滨海软土地基采用塑料排水板联合堆载预压的处理效果;张涛<sup>[6]</sup>通过现场监测、室内土工试验及理论分析,对太湖地区典型软土地基的沉降发展规律与机理进行了系统研究;朱霖等<sup>[7]</sup>通过室内外试验与工程应用,研究软土地基就地固化施工工艺与效果,结果表明该工艺能快速形成高强硬壳层,有效提高浅层地基承载力并控制工后沉降;何赛<sup>[8]</sup>运用理论计算与数值模拟,对水泥搅拌桩复合地基的承载力进行了分析研究,研究桩长、置换率等参数对承载力的影响规律,为优化设计提供了理论参考;葛尚奇等<sup>[9]</sup>基于一维大变形固结理论模型,研究外荷载随时间变化条件下软土地基的固结行为;杨奕<sup>[10]</sup>通过现场监测分析堆载预压法处理软土地基的实际效果,并提出堆载预压可使软土含水量有效降低,压缩模量有效提高;符洪涛等<sup>[11]</sup>结合现场试验与数值模拟,研究含粉砂层软土地基中真空预压的密封性能,提出采用“淤泥搅拌墙+密封膜”双重

密封技术;谭芳等<sup>[12]</sup>通过理论推导、试验、数值模拟等手段对软土地基特性深入研究,并提出了排水固结、旋喷桩加固、砂桩、静压桩等方法进行软基处理。借助原位测试技术分析软土地基的承载力和稳定性评价方面;于廷新<sup>[13]</sup>利用扁铲侧胀试验得到了商合杭高速铁路软土地基的侧胀模量,并得到了地基承载力经验公式;胡健等<sup>[14]</sup>利用静力触探试验获得了软土地基的强度参数,并与平板载荷试验结果进行对比,得到了地基承载力特征值的回归公式;李方全等<sup>[15]</sup>利用螺旋板载荷试验和静力触探试验对处理前后的软土地基进行承载力试验,获取的软土地基的承载力特征值。

现有文献对于浸水条件下软土地基承载力及稳定性研究采用的原位测试方法较为单一,对于综合原位试验获取土体基本力学参数,并分析其变化规律的研究较少,基于此,依托工程实例,通过静载荷试验、旁压试验、静力触探等方法,研究软土地基在浸水条件下的沉降特性、变形模量、锥尖阻力、侧摩阻力、摩阻比发展规律,以期类似工程提供参考。

## 1 工程概况

项目位于典型的软土地基发育区,区域属季节性干旱气候,年降水集中于汛期,雨季易形成地表径流汇集,导致地基长期处于浸润状态,场地地势平坦开阔,表层为近原状或扰动软土,厚度一般为5~10 m,局部夹有风积砂或粉土层,地基结构整体连续但物理力学性质差异显著。地基土体具有天然含水量高、孔隙比大、结构松散、压缩性高等典型软土特征,受浸水影响后承载能力显著降低,抗剪强度和刚度均表现出明显劣化趋势。地下水位埋深较深,一般为6.5~8.0 m,在雨季条件下可能抬升至2~5 m,长期浸润状态下进一步加剧其承载性能与稳定性的降低。

## 2 现场原位测试试验方案

为评估软土地基浸水条件下的地基承载力与稳定性,在现场试验前对试验区域进行人工浸水处理。采用分阶段持续注水方式,使地基土体处于近似饱和状态,并分别控制浸水龄期为 7、14、28 d。在浸水结束后立即开展静载试验、旁压试验、静力触探等现场原位试验。

### 2.1 静载试验

静载板试验用于直接测定土体承载力和沉降特性,在地基选取区域的中心及四周布设 6 个试验点 P1~P6,其中 P1~P3 的测试深度为 2 m, P4~P6 的测试深度为 5 m。试验逐级加载,每级荷载为 25 kPa,加载等级取 8 级,每级荷载施加后,间隔 5、5、10、10、15、15 min 测读一次沉降,以后间隔 30 min 测读一次沉降,当连续 2 h 每小时沉降量都小于 0.1 mm 时,可认为沉降已达相对稳定标准,可施加下一级荷载。在施加荷载过程中,利用百分表测量板下沉降量,其量测精度不应低于  $\pm 0.01$  mm,同时在周边布置水平位移测量标尺监测土体表面水平位移的变化。

### 2.2 旁压试验

旁压试验用于测定土体静侧向模量及横向稳定性,在载荷试验点附近布设 3 个试验孔 B1~B3。试验采用液压旁压装置,逐级施加水平方向侧向压力,每级保持 20 min,确保土体应力和应变达到稳定。通过位移传感器连续测量土体侧向变形,并利用应变计记录孔壁应力变化。在试验完成后,根据侧向应力-应变曲线计算土体侧向变形模量。

### 2.3 静力触探

静力触探用于获取土层锥尖阻力和侧摩阻力,从而分析土体密实度及承载力。在软土地基区域布设 6 个静力触探孔 CPT1~CPT6,每个静力触探孔间距约 15~20 m,覆盖不同土层及水位条件。试验采用恒定速度贯入方式。贯入过程中,通过数据采集系统实时输出阻力曲线,分析土层分层情况。

## 3 现场试验结果分析

### 3.1 浸水条件下软土地基各测点沉降发展

由图 1 可知,总体上各测点沉降量随荷载增加均

呈非线性增长趋势,且不同测点位置荷载-沉降曲线大致相同,在试验初期沉降随着荷载增加呈现近线性增长, P1~P3 点荷载大于 100 kPa 后期沉降呈现突增, P4~P6 点荷载大于 150 kPa 后期沉降呈现突增,表明浸水条件下软土地基由弹性阶段过渡到塑性阶段,这是由于土体在初期荷载作用下孔隙水压迅速调整,土颗粒逐渐重新排列,使土体快速压缩,随着荷载继续增加,颗粒重新排列空间减小,土体侧向挤出,导致地基逐步失去承载力,沉降量加大。

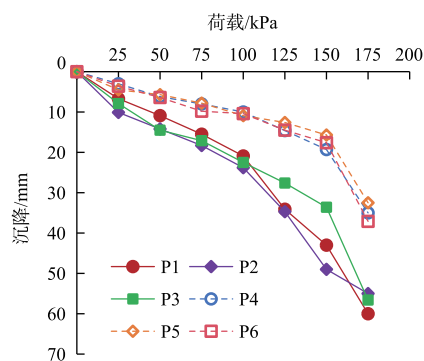


图 1 各测点沉降发展规律

Fig. 1 Evolution of settlement at each monitoring point

荷载为 180 kPa 时,地基区域 2 m 深度处最大沉降量分别为 60.0、55.0、56.6 mm,而 5m 深度范围处最大沉降量相对较小,分别为 35.0、32.5、37.2 mm,说明 P1~P3 点土层较软,且 P1 点极限承载力最低,这可能是由于所在位置土层较松散或含水量较高,土体刚度较低,导致承载力较小而沉降较大;而 P4~P6 点所在位置土层较密实或存在较厚的中深层密实软土层,土体抗压能力较强,极限承载力较高,沉降量相对较小,反映了软土地基局部土性差异对地基变形的影响。

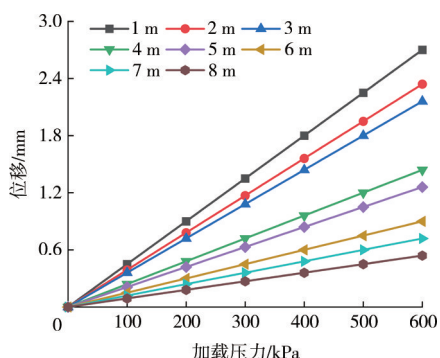
### 3.2 旁压试验结果分析

#### 3.2.1 不同深度位移发展

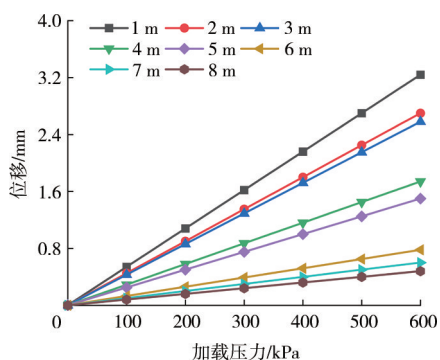
由图 2 可知,各测点不同位置位移均随着加载压力的增加呈现线性增长趋势。由于荷载未达到土体极限承载力,软土颗粒间以弹性接触为主,土体发生可恢复的微小压缩变形;另一方面,浸水条件下土体孔隙中水分在短期加载过程中对颗粒间相对位移产生阻滞,减缓了土体非线性压缩的发展。

相同加载压力下,浸水条件下随着软土地基深度的增加,位移呈现非线性减小趋势。以 B1 测点位

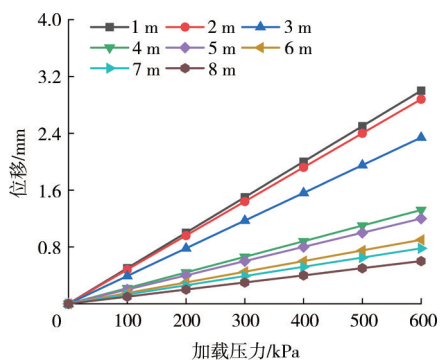
## 岩土力学



(a) B1 点不同深度位移随加载压力发展



(b) B2 点不同深度位移随加载压力发展



(c) B3 点不同深度位移随加载压力发展

图 2 不同测点位置不同深度位移随加载压力发展

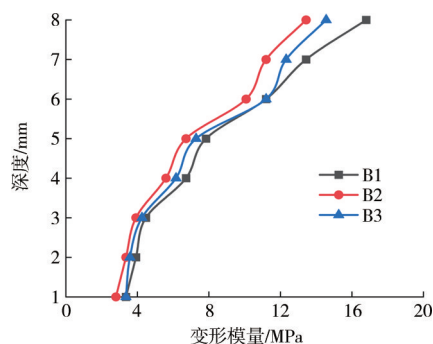
Fig. 2 Displacement at different depths and measurement points as loading pressure increases

移为例, 由图 2 (a) 可知, 加载压力为 300 kPa 时, 软土地基深度为 1、2、3、4、5、6、7、8 m, 其位移分别为 1.35、1.17、1.08、0.72、0.63、0.45、0.36、0.27 mm, 表明深度增加, 软土地基的密实度和固结程度逐渐提高, 土体刚度增强, 对荷载的变形抵抗能力增强。由于浅层土体含水量较高且结构松散, 受荷载作用容易发生压缩和孔隙排水, 从而位移较大。随着深度增加, 土体在长期自重作用下

被逐渐压实, 孔隙水排出, 颗粒紧密接触, 土体固结程度提高, 弹性模量增大, 对外部荷载的变形抵抗能力增强, 因此位移呈非线性减小趋势。

### 3.2.2 不同深度地基变形模量

由图 3 可知, 各测点变形模量均随地基深度增加呈现增大趋势。随着地基深度增加, 土体受自重压实作用增强, 颗粒排列更加紧密, 孔隙率降低, 固结程度提高, 从而土体刚度增大, 弹性模量随之提高;

图 3 各测点不同深度变形模量分布  
Fig. 3 Deformation modulus profiles at different depths for all measuring points

地基深度为 5 m 时, B1、B2、B3 测点变形模量分别为 7.84、6.72、7.28 MPa, 说明在相同深度下, 各测点土体的刚度存在一定差异, 这与土体的含水量不同与土体的不均匀性相关。各测点水分分布不完全均匀, 含水量高的地基土变形模量较小, 而含水量低的土体密实且抗剪能力增强, 模量增大; 另一方面在于软土中可能存在细砂、粉质黏土等夹层, 这些局部夹层会提高局部刚度。

### 3.3 静力触探结果分析

#### 3.3.1 锥尖阻力

由图 4 可知, 随着地基深度增加, 不同测点锥阻力均呈现先快速增大, 随后逐渐趋于稳定的发展规律, 这是由于软土地基表层土通常较松散、含水量高, 自重压实作用小, 锥阻力较低; 随着深度增加, 自重压力增大、土体密实度提高, 土粒间接触增多, 抗压刚度增强, 使锥阻力快速增大; 进入中深层后, 土体密实度接近最大值, 孔隙水压力逐渐平衡, 土体结构稳定, 锥阻力增幅减缓, 趋于稳定。

地基深度为 4 m 时, CPT1、CPT2、CPT3、CPT4、CPT5、CPT6 测点锥阻力分别为 0.59、0.55、0.61、

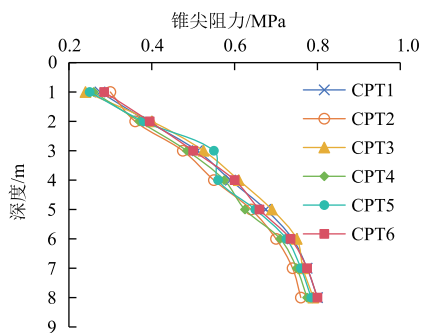


图4 各测点锥阻力随深度发展  
Fig. 4 Development of cone resistance with depth at each measuring point

0.57、0.56、0.60 MPa, 表明在相同深度下, 局部含水量差异会影响土体刚度, 导致各测点软土地基土体抗压刚度略有差异, 含水量较高的区域土体较软, 颗粒间摩擦力减小, 导致锥阻力下降, 而含水量较低的区域土体刚度增强, 锥尖阻力相对较高; 此外, 软土中可能存在少量砂粒、砾石或粉土夹层, 颗粒组成和粒径分布的差异会影响土体抗压性, 颗粒较粗或密集的区域锥尖阻力增加, 从而使同一深度的不同测点出现锥阻力波动。但锥阻力数值相近, 说明该深度土体结构较为均匀, 承载能力相对稳定。

### 3.3.2 侧摩阻力

由图5可知, 侧摩阻力变化规律与锥尖阻力基本一致, 随着地基深度增加, 不同测点侧摩阻力呈现一定波动但总体变化不大, 深度大于5m后侧摩阻力值趋于稳定。由于软土地基表层土松散且含水量高, 侧摩阻力较小; 随着深度增加, 土体密实度逐渐提高, 颗粒间摩擦增强, 侧摩阻力随之增大。

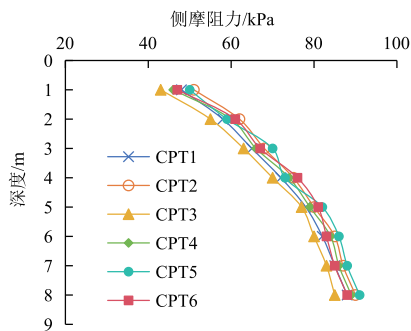


图5 各测点侧摩阻力随深度发展  
Fig. 5 Development of shaft resistance with depth at each measuring point

### 3.3.3 摩阻比

由图6可知, 摩阻比随深度增加呈逐渐下降趋

势, 即表层土摩阻比较高, 而随深度加深, 摩阻比逐渐减小并趋于稳定。这是由于软土地基表层土松散、含水量高, 锥阻力较低而侧摩阻力相对较大, 导致摩阻比偏高; 随着深度增加, 土体密实度和抗压刚度增强, 锥阻力增幅大于侧摩阻力增幅, 从而使摩阻比下降; 进入中深层及深层后, 土体结构趋于均匀、密实, 锥阻力和侧摩阻力的增幅逐渐平衡, 摩阻比变化减缓, 趋于稳定。

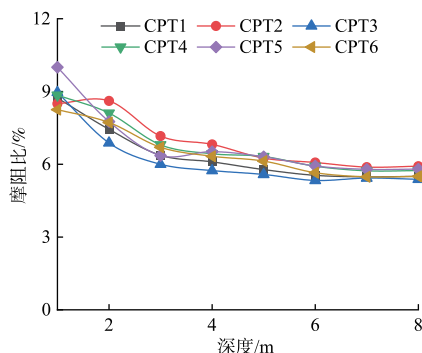


图6 各测点摩阻比随深度发展  
Fig. 6 Development of friction ratio with depth at each measuring point

地基深度为4 m时, CPT1、CPT2、CPT3、CPT4、CPT5、CPT6 测点摩阻比分别为 6.1%、6.82%、5.74%、6.43%、6.52%、6.33%, 说明在相同深度下, 各测点摩阻比存在一定差异。这可能与局部土层密实度、含水量及颗粒组成差异有关, 含水量较高或松散区域摩阻比相对偏高, 而密实或颗粒较粗的区域摩阻比偏低; 但整体数值相近, 表明该深度土体结构较均匀, 抗剪和抗压特性较稳定。

## 4 浸水条件下软土地基稳定性评价

浸水条件下软土地基的稳定性主要受土体密实度、含水量、颗粒组成及深度分布的影响。

从静力载荷试验沉降特征来看, 各测点沉降量随荷载增加呈非线性增长, 初期沉降较快而后期趋缓, 表明软土地基在浸水条件下由弹性阶段过渡至塑性阶段。浅层土体由于含水量高、结构松散, 承载力低, 极限承载力较小, 沉降量较大, 而中深层密实软土层抗压能力较强, 沉降量明显减小。软土地基存在一定的分层差异, 浅层为潜在软弱层, 深层则较为稳固。

从旁压试验位移及变形模量分析来看, 随着深

## 岩土力学

度增加,位移呈非线性减小趋势,变形模量逐渐增大,表明深层土体密实度和固结程度提高,刚度增强,对荷载的抵抗能力明显增强。局部变形模量的差异反映了土体微观结构及含水量分布的不均匀性,但整体上,深层土体表现出较高的刚度和稳定性。

从静力触探结果来看,锥尖阻力随深度快速增加后趋于稳定,侧摩阻力虽有局部波动但总体变化不大,摩阻比随深度下降并趋于稳定。表明浅层土体松散、抗压刚度低、摩阻比较高,而中深层及深层土体密实、结构均匀,抗压抗剪性能良好,承载能力和稳定性较高。

## 5 结论

通过静载荷试验、旁压试验、静力触探等方法,研究软土地基在浸水条件下的沉降特性、变形模量、锥尖阻力、侧摩阻力、摩阻比发展规律,得到如下结论:

(1) 浸水条件下,软土地基沉降量随荷载增加呈非线性增长特征,相同深度处荷载—沉降曲线基本一致;2 m 深度测点在荷载超过 100 kPa 后沉降明显加快,5 m 深度测点在荷载超过 150 kPa 后沉降显著增加,浅层地基沉降量明显大于深层地基,且各测点承载性能存在一定差异。

(2) 各测点位移随加载压力增加呈近线性变化,且在相同压力条件下位移随地基深度增加而减小;地基变形模量总体随深度增加而增大,不同测点在相同深度处的变形模量存在一定差异,软土地基空间分布存在差异性。

(3) 锥尖阻力与侧摩阻力具有相似的变化规律,深度大于 5 m 后趋于稳定,摩阻比总体呈下降趋势。局部存在的夹层或含水差异,会引起一定程度的波动。总体而言浸水条件下软土地基呈现浅层承载弱、

深层承载强的分层特性。

## 参 考 文 献

- [1] 吴强. 高钙粉煤灰加固软土地基性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 80-83, 122.
- [2] 许盛, 杨明山, 唐志勇, 等. 察尔汗盐湖地区饱和盐渍软土地基处理 [J]. 人民长江, 2024, 55 (增刊 2): 178-184.
- [3] 段志远, 李德晟, 薛泽, 等. 水泥搅拌桩联合排水预压法地基处理分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 43-49.
- [4] 高盟, 高运昌, 徐晓, 等. 青岛岩质地基地铁 3 号线与上海软土地基地铁 10 号线振动实测对比分析 [J]. 地震工程学报, 2020, 42 (2): 468-474.
- [5] 邓尚强. 滨海软土地基塑料排水板堆载预压处理效果分析 [J]. 铁道建筑, 2025, 65 (3): 126-133.
- [6] 张涛, 刘松玉, 蔡国军. 太湖软土地基沉降特性分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (增刊 1): 253-259.
- [7] 朱霖, 何磊, 王章明, 等. 软土地基就地固化工艺的试验研究与工程应用 [J]. 公路, 2023, 68 (3): 75-80.
- [8] 何赛. 水泥搅拌桩复合地基承载力分析研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (4): 30-34, 82.
- [9] 葛尚奇, 江文豪, 郑凌透, 等. 外荷载随时间变化下软土地基一维大变形固结通解 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (增刊 2): 3464-3475.
- [10] 杨奕. 堆载预压法处理软土地基的应用研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊 2): 2155-2157.
- [11] 符洪涛, 王晓峰, 温作佳, 等. 含粉砂层软土地基真空预压密封性及现场试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (10): 2581-2589.
- [12] 谭芳, 白力源, 魏焕卫, 等. 大面积堆载作用下软土地基变形实测与理论分析 [J]. 建筑结构, 2025, 55 (3): 116-124.
- [13] 于廷新. 基于扁板侧胀试验的软土地基承载力研究 [J]. 铁道工程学报, 2011 (10): 53-58.
- [14] 胡健, 王芳, 朱磊, 等. 浙北地区软土多种勘察成果相关性分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (9): 133-136.
- [15] 李方全, 刘强, 陈世朋, 等. 不同原位测试方法对真空预压处理地基效果的检测 [J]. 公路工程, 2022, 47 (1): 85-89, 114.