

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.02.012

卵石地层中地下水位上升对地铁车站结构的影响

梁中东¹, 李志斌¹, 关祈峰¹, 张悦¹, 单冶鹏², 蔡国庆²

(1. 北京京港地铁有限公司, 北京 100068; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为解决地下水位上升时, 卵石地层地铁车站结构安全性评估与防控问题, 依托北京地铁某车站工程, 运用有限元方法对标准段截面构建二维数值模型, 合理考虑土体湿化引发的强度衰减效应, 深入探究卵石地层中地下水位上升工况下对地铁结构内力、位移以及土体塑性区的响应规律。模拟结果表明: 底板、顶板、侧墙作为围护结构, 其迎土面压应力均增大, 底板与顶板承担来自侧墙的水平应力而抵消部分跨中弯矩, 拉应力减小; 中板与中柱作为中间支撑结构, 依旧发挥良好的支撑功能; 板-柱、板-墙等连接处为应力集中区域, 应重点关注, 防范应力过大导致结构开裂或破坏; 在卵石地层中, 地层与车站同步上浮, 结构整体性完好, 未出现局部大变形; 塑性区主要集中在侧墙底角等区域, 未贯穿至地表形成破裂带, 发生整体失稳的概率较低。

关键词: 城市轨道交通; 地下水位上升; 卵石地层; 地铁车站; 数值模拟

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0097-09

Analysis of the Influence of Groundwater Level Rise on the Structure of a Metro Station in a Cobble Stratum

LIANG Zhongdong¹, LI Zhibin¹, GUAN Qifeng¹, ZHANG Yue¹, SHAN Yepeng², CAI Guoqing²

(1. Beijing MTR Corporation Ltd., Beijing 100068;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: To evaluate and mitigate risks to the structure of a metro station in a cobble stratum under rising groundwater, this study utilized the finite element method to develop a two-dimensional numerical model of a representative cross-section based on a Beijing subway station project. The model reasonably incorporates strength degradation induced by soil wetting and comprehensively examines the structural internal forces, displacements, and evolution of plastic zones within the ground in response to scenarios of groundwater level rise in gravelly deposits. The simulation results show that the base slab, roof slab and sidewalls, as the enclosure structure, all exhibit increased compressive stress on their soil-facing surfaces. The base slab and roof slab bear the horizontal stress from the sidewalls, thereby offsetting part of the mid-span bending moment and reducing the tensile stress. The intermediate slab and the central column, as intermediate supporting members, continue to perform their supporting function effectively. Notably, the slab-column and slab-wall connections are regions of stress concentration and therefore require particular attention to prevent structural cracking or damage caused by excessive stress. In a cobble stratum, both the stratum and station experience uplift, with the station's uplift marginally surpassing the surrounding soil. Structural integrity remains unscathed without local deformation, thus indicating a relatively diminished risk of localized structural harm.

收稿日期: 2024-08-29 修回日期: 2025-11-12

第一作者: 梁中东, 男, 本科, 高级工程师, 从事轨道交通设计与施工相关工作, zd.liang@mtr.bj.cn

基金项目: 国家杰出青年科学基金(52425805); 北京京港地铁有限公司科技开发课题(OE-082-220708)

引用格式: 梁中东, 李志斌, 关祈峰, 等. 卵石地层中地下水位上升对地铁车站结构的影响[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 97-105.

Liang Zhongdong, Li Zhibin, Guan Qifeng, et al. Analysis of the influence of groundwater level rise on the structure of a metro station in a cobble stratum[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 97-105.

The plastic zone is mainly concentrated in areas such as the bottom corners of the sidewalls and does not extend to the ground surface to form a rupture zone, indicating a low probability of overall instability.

Keywords: urban rail transit; groundwater level rise; cobble stratum; metro station; numerical simulation

北京位于华北平原西北部,降雨和径流稀少,城市与人口快速增长导致地下水超采,制约城市建设与可持续发展。自“十一五”以来,通过南水北调等工程,华北平原的过度抽采造成的大范围漏斗型降水局部得到修复,但随之引发地下结构的新问题^[1-2]。以北京地铁为例,早期施工时勘测水位较深、抗浮措施有限,水位回升后结构面临抗浮失效风险;当上覆土重与现有抗浮措施不足以抵抗回升的浮力时,维持结构正常运行成为重大挑战^[3-5]。

数值仿真已成为研究结构抗浮的主要手段,Lu等^[6]构建地铁隧道三维模型,模拟地下水位上升对既有隧道衬砌受力与位移的影响,结果显示水位上升对隧道的力学响应影响显著;Shin等^[7]模拟管片衬砌与周围地面之间的水-力耦合作用,探究隧道渗漏劣化机制,但未分析浮力效应;臧万军等^[8]采用室内模型试验与有限元模拟相结合的方法进行研究,表明水位抬升过程中,地铁车站结构整体浮起,上浮速率逐渐加快,板柱节点处的应变比底板其他部位更大;同样,罗富荣等^[9]的模拟结果表明,北京地铁结构主要表现为整体失稳,但整体破坏的可能性较低。在土体应力状态分析中,地下水位将土层划分为上部的非饱和带和下部的饱和带,地下水位以上区域由于孔隙水饱和度低于100%而处于非饱和状态,该区域与饱和土层在力学方面最大的区别是存在吸力,吸力的存在使得土体强度得到一定程度的提高^[10]。随着地下水位上升,土层逐渐从非饱和状态过渡到饱和状态,其强度会一定程度降低,土体力学性能的差异将直接影响结构的受力状态,上述模拟或模型试验均未考虑土体湿化导致的强度衰减问题^[11-13]。

因此,本文依托北京地铁某车站工程,采用ABAQUS软件建立二维车站标准断面模型,运用基于吸应力的有效应力法和摩尔-库伦模型相结合的理论,合理考虑土体湿化效应,研究地下水位上升对地铁结构内力、位移以及土体塑性区等方面的变化趋势和分布规律,为保障地铁结构安全提供理论支持。

1 工程概况

1.1 北京市水位变动概况

北京平原区地下水属第四系松散孔隙水系统,20世

纪90年代至2008年,地下水以每年约25亿 m^3 持续开采,导致平均埋深由1978年的6.4 m增大到2008年的22.92 m。浅部含水层已然成为一个巨大的地下水降落漏斗^[14]。

为解决地下水超采问题,我国实施了地下水减采、南水北调补水等一系列措施,取得了积极成效^[15-16]。2014年,南水北调中线工程向北京供水,北京市地下水止跌回升。2017年,平原区水位平均埋深已回升至24.97 m。截至2021年12月17日,全市平原区地下水平均埋深为16.52 m,与2014年同期相比,地下水位回升9.14 m,地下水位埋深变化如图1所示,经济、社会、生态等效益进一步扩大与凸显^[17-18]。

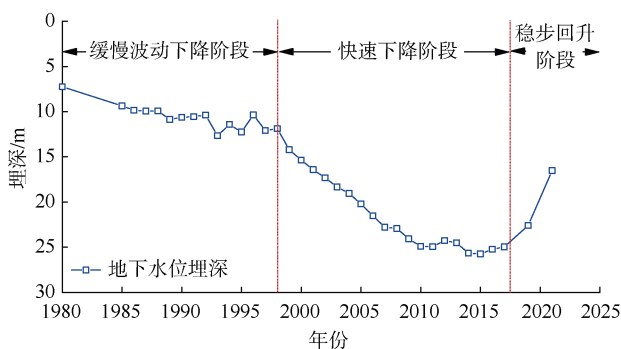


图1 北京市历年地下水位埋深

Figure 1 Historical groundwater depth in Beijing

1.2 车站工程概况

北京地铁某车站位于永定河冲洪积扇上部,位于古瀑水河故道,场区自然地形平坦。场地地面下37.0 m深度范围内的松散沉积层中主要分布1层地下水,地下水类型为潜水。潜水主要赋存于高程46.09~46.87 m以下的砂、卵石层中。1959年最高地下水位高程为54.90 m,2006—2010年最高地下水位高程为33.50 m(不含上层滞水),综合考虑,抗浮设计水位按高程56.0 m(接近地表高程57.63 m)计算。

车站采用明挖法施工,主体结构为地下两层三跨箱形框架结构,岛式站台。中心顶板埋深约2.5 m,车站主体结构总高13.0 m,结构底板埋深约15.5 m。车站标准段外包宽度为20.9 m,外包总长为252.1 m。标准横断面如图2所示。

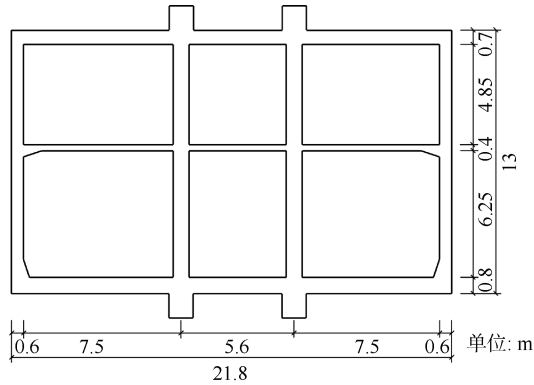


图2 标准横断面

Figure 2 Standard cross-section

2 有限元模型建立

2.1 模型构建

该站沿列车行进方向尺寸远大于横向与纵向两个方向,符合平面应变问题特征,故选取标准段建立二维模型开展分析。车站结构断面尺寸为 21.8 m×13 m,采用 ABAQUS 软件构建二维标准断面模型。为规避边界效应干扰,模型尺寸取研究主体的 3 倍以上^[19-20],设定为 100 m×50 m。依据工程勘察资料,结合地层沉积年代、成因类型、岩性及物理力学性质进行简化分层,以适配数值模拟需求,地层剖面如图 3 所示。

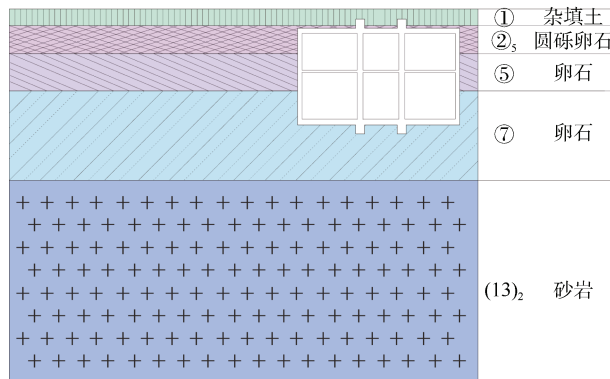


图3 简化地层剖面

Figure 3 Simplified stratigraphic profile

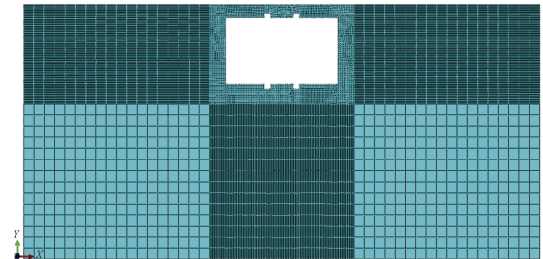
主体结构的顶板、中板、底板、端墙采用 C40 混凝土,中柱采用 C50 混凝土,具体参数见表 1。

表1 结构材料参数

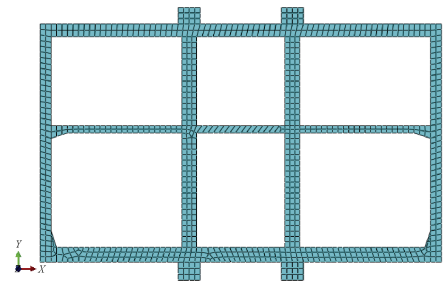
Table 1 Parameters of structural materials

混凝土标号	密度(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
C40	2 440	32.5	0.2
C50	2 500	34.5	0.2

为保证精度与运算速度,对模型进行适当的网格划分,车站结构以及土体的网格划分如图 4 所示。土层单元类型选用四边形线性减缩积分实体单元类型,加密区网格尺寸为 0.2 m×0.2 m,非加密区网格尺寸为 2 m×2 m,地铁车站结构的单元类型选用四边形线性实体单元类型,网格尺寸为 0.3 m×0.3 m。



(a) 土层



(b) 车站结构

图4 土层及车站结构网格划分示意

Figure 4 Schematic diagram of the mesh generation for soil layers and station structures

在土-结构相互作用分析中,切向行为采用各向同性罚函数模型。法向行为采用“硬”接触方式以模拟压力过盈,允许接触后分离,摩擦系数参考类似工程取 0.31。结构的外表面作为主面,具有较高刚度;围岩土体的内表面作为从属面,刚度较低。两者之间设有限滑移条件,以反映实际接触中的滑动特性。此方法有效考虑了结构与土体刚度差异及非线性滑移行为,为后续数值分析提供基础。

2.2 考虑土体湿化效应的土体强度

对于位于地下水位以上的非饱和土,Lu 等^[13]提出基于吸应力的有效应力为

$$\begin{cases} \sigma' = \sigma - u_a - \sigma_s \\ \sigma_s = -\chi(u_a - u_w) \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ' 为有效应力; σ 为总应力; u_a 为孔隙气压力; σ_s 为吸应力, u_w 为孔隙水压力, χ 为与饱和度相关的参数,饱和度为 1 时, $\chi=1$,饱和度为 0 时, $\chi=0$ 。

$\chi=1$ 时,式(1)则退化为

$$\sigma' = \sigma - u_w \tag{2}$$

Lu 等^[13]将吸应力 σ_s 与 Van Genuchten 模型结合, 并应用达西定律, 提出的吸应力 σ_s 为

$$\sigma_s = \frac{1}{\alpha} \frac{\ln \left[\left(1 + \frac{q}{k_s} \right) e^{-\gamma_w \alpha (D_w - h)} - \frac{q}{k_s} \right]}{\left(1 + \left\{ -\ln \left[\left(1 + \frac{q}{k_s} \right) e^{-\gamma_w \alpha (D_w - h)} - \frac{q}{k_s} \right] \right\}^n \right)^{(n-1)/n}} \tag{3}$$

式中, k_s 为饱和渗透系数; n 和 α 为拟合参数, α 近似等于进气压力值的倒数; n 与土的孔径分布范围有关; γ_w 为水的重度; q 为渗流量; D_w 为地下水位埋深; h 为计算点埋深。

Van Genuchten 的 SWCC 模型中, 参数 χ 表示为

$$\chi = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \tag{4}$$

将 $\sigma_s = -\chi(u_a - u_w)$ 与式(4)代入式(3), 得一维基质吸力分布的解析解为

$$u_a - u_w = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[\left(1 + \frac{q}{k_s} \right) e^{-\gamma_w \alpha (D_w - h)} - \frac{q}{k_s} \right] \tag{5}$$

水位以上区域视为稳态渗流过程, 既不蒸发也不入渗, 渗流量 $q=0$ 。代入式(5)后, 得到非饱和区域吸应力 σ_s 与 $(D_w - h)$ 的关系式

$$u_a - u_w = \gamma_w (D_w - h) \tag{6}$$

Bishop 有效应力建立的抗剪强度表达式为

$$\begin{aligned} \tau_f &= c' + \sigma \tan \varphi' \\ &= c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' \end{aligned} \tag{7}$$

式中, τ_f 为抗剪强度; c' 和 φ' 分别为饱和土的有效黏聚力及有效内摩擦角。

力及有效内摩擦角。

式(7)在传统饱和土抗剪强度理论上进行了扩展, 增加了基质吸力对抗剪强度的贡献, 基质吸力 $(u_a - u_w)$ 与饱和土的有效黏聚力 c' 共同发挥抗剪作用, 因此, 设 c_t 为总黏聚力, 则有

$$c_t = c' + \chi(u_a - u_w) \tan \varphi' \tag{8}$$

式(8)代入式(7)得

$$\tau_f = c_t + (\sigma - u_a) \tan \varphi' \tag{9}$$

式(9)与饱和土抗剪强度公式的形式一致, 因而有关饱和土强度就易于拓展至非饱和土。为实现土体强度参数随地下水位波动的动态修正, 在模型实现中, 基于地下水位空间分布特征, 将土体划分为: 饱和区(地下水位以下), 土层强度参数直接取表 2; 非饱和区(地下水位以上), 地下水位高度、拟合参数 n 和 α 均代入式(4)计算参数 χ , 最后代入式(8)计算出总黏聚力, 内摩擦角仍按表 2 对应土、岩层选取。

考虑到获取详尽、针对每一小层(尤其是深部卵石层)的非饱和试验参数极其困难(成本高、取样扰动大), 因此其水力参数主要参考了现有文献相似土体的水力参数。杂填土参考霍思远等^[21]的砂壤土以及 Chen 等^[22]的宽级配碎石土参数取值, 取 $n=1.5$, $\alpha=0.5 \text{ kPa}^{-1}$ 。②₅、⑤、⑦层卵石/圆砾卵石地层在颗粒级配、主要矿物成分、沉积环境相似, 工程性质接近, 简化为水力参数相同, 参考 Yeh 等^[23]以及 Lu^[13]对砂、砾石和卵石填料的参数建议, 最终确定②₅、⑤、⑦层卵石/圆砾卵石地层的土体水力参数, 取 $n=5.0$, $\alpha=0.25 \text{ kPa}^{-1}$ 。对于(13)₂层砂岩, 将其视为一种胶结的粗粒土, 引用文献[23]关于弱胶结砂水力特性的研究, 取 $n=4.7$, $\alpha=0.7 \text{ kPa}^{-1}$ 进行分析。

表 2 各土、岩层物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical properties of various soils and rock strata

编号	岩性	有效黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)	天然重度/(kN/m ³)	泊松比	渗透系数/(m/s)	n	α/kPa^{-1}
①	杂填土	8	10	17.15	0.31	8×10^{-6}	1.5	0.50
② ₅	圆砾卵石	0	30	20.58	0.22	1×10^{-1}	5.0	0.25
⑤	卵石	0	40	20.58	0.22	2×10^{-1}	5.0	0.25
⑦	卵石	0	42	20.58	0.22	2×10^{-1}	5.0	0.25
(13) ₂	砂岩	35	32	20.09	—	5×10^{-3}	4.7	0.70

参考该站的水文条件, 地下水位初始高度设置为 2009 年 9 月 20 日至 11 月 15 日水位平均值高程 34.72 m (埋深 22.91 m)处, 处于历史低位, 因此地下水位初始高度设置为此高程。考虑最不利工况, 水位升至地表

高程为结束水位。在数值模型中, 依据初始水位与最高水位设定相应表达式场, 施加孔压载荷, 其边界条件则为该表达式场, 将水位上升过程离散为若干个增量步, 从而实现水位动态上升过程。重点选取具有工

程控制意义的4个中间过程特征水位进行分析,分别为底板(高程42.06 m)、中板(高程49.51 m)、顶板(高程55.06 m)以及抗浮水位。

3 模拟结果分析

3.1 结构受力分析

在水位梯度加载过程中,选取初始水位、中板水位、顶板水位及地表水位4个关键监测点,系统研究底板力学响应特征。如图5所示拉应力为正值,压应力为负值,结构背土侧应力极值集中于板-墙与板-柱节点区域(最大拉应力2.27 MPa),迎土侧同位置则呈现应力谷值(最大压应力3.77 MPa)。随着浮力效应增强,结构整体应力分布保持稳定,到达地表水位时,背土侧边跨拉应力下降13.3%(1.99 MPa),迎土侧边跨压应力增幅达28.4%(4.84 MPa)。值得注意的是,底板-侧墙连接节点呈现显著应力集中现象,左侧节点压应力增加40.8%(7.97 MPa)。

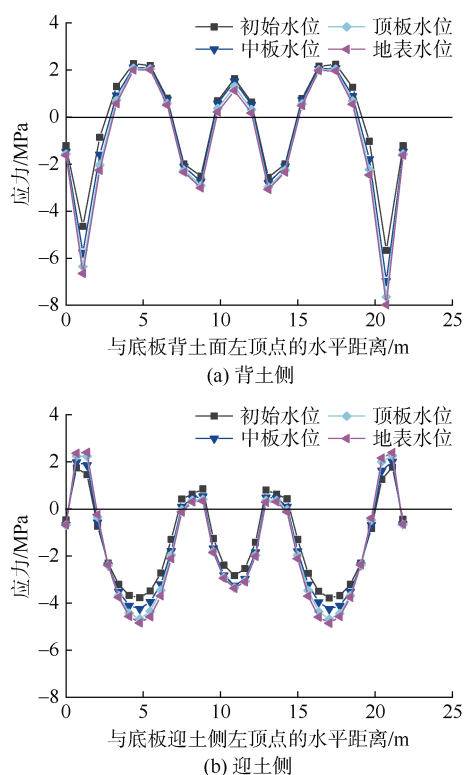


图5 结构底板应力

Figure 5 Stress of the structural base slab

侧墙水平传力机制促使底板压应力场重构,在各跨中间部位抵消了一部分因浮力引起的拉应力,抵消量略小不足以使得这些区域都进入受压状态。板-墙连接处在浮力和侧墙水平应力作用下,应力集中程度更为显著。该现象揭示了地下结构“节点弱区”的力学

本质,为类似工程抗浮设计提供理论依据。

顶板力学行为分析结果如图6所示。当水位低于顶板高程时,覆土自重维持天然状态,结构应力场未发生明显变化。水位达到顶板高程后,覆土饱和重度引发应力重分布:迎土面最大压应力增幅约0.2 MPa,背土面拉应力相应降低0.2 MPa。这表明覆土自重较小的情况下,顶板虽有弯曲趋势,但作为主要的水平传力构件,直接承担了来自侧墙的水平应力,因此抵消了部分跨中弯矩,使得拉应力减小。关键板-柱等连接处仍为力学薄弱部位,应力程度较为集中,最大拉应力为2.01 MPa,最大压应力为3.59 MPa。

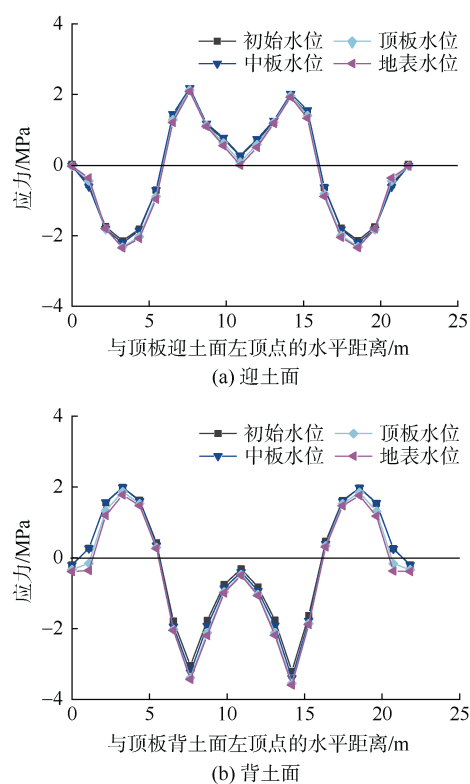


图6 结构顶板应力

Figure 6 Stress in the roof slab of the structure

中板应力演化特征如图7所示。水位在底板高程及以下时,中板应力未有明显变化。随着水位抬升,侧墙传递的水平应力引发中板应力状态转变:左跨中板底部完成拉-压应力转化(0.69 MPa $\rightarrow$ -0.66 MPa),中板底部全部受压状态,应力幅值达1 MPa。值得注意的是,板-柱节点处最大应力降低49.3%(2.05 MPa $\rightarrow$ 1.04 MPa),表明水位上升促使应力重分布,虽缓解节点拉应力集中,但加剧了压应力累积。

鉴于结构对称,取左侧墙开展水位上升工况下应力分析,如图8所示。侧墙迎土面与背土面两侧拉、压

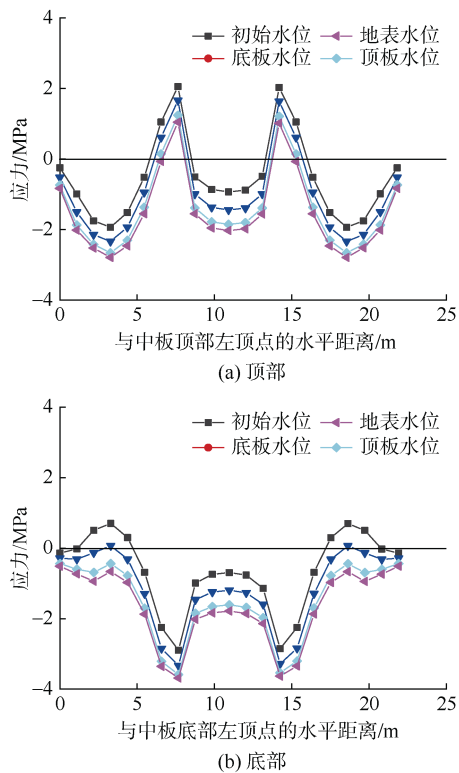


图7 结构中板应力

Figure 7 Stress in the intermediate slab of the structure

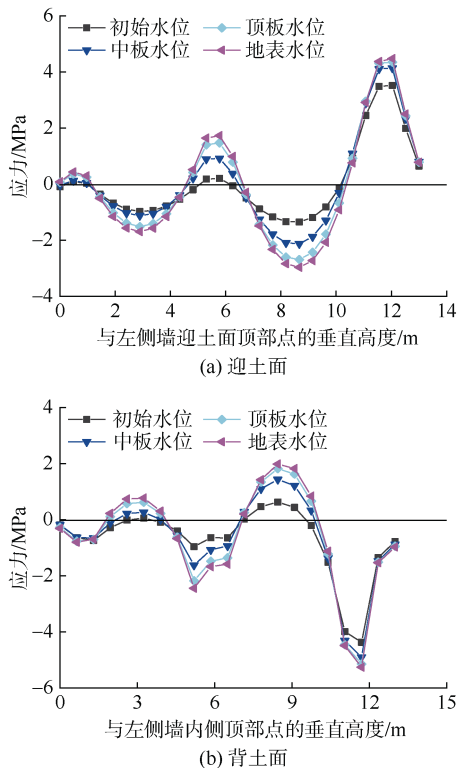


图8 结构侧墙竖向受力

Figure 8 Vertical loading on the structural side walls

应力互补,水位上升致使侧墙受水压力作用增大,站厅与站台层的侧墙有“内凸”趋势,即背土侧受拉、迎土侧受压。站台层侧墙拉应力由 0.63 MPa 增至 1.98 MPa。侧墙底角外侧形成显著应力敏感区,最大拉应力增幅 26.9%(3.52 MPa→4.47 MPa),揭示该区域为水压作用下的力学薄弱环节。对于中柱,其刚度相比侧墙弱,水位上升导致底板浮力增大,新增浮力通过侧墙剪切传递至顶板覆土,传力闭合,因此受浮力体系重构影响较小,主要承担中板重力,压应力值域为 0~3 MPa(见图 9),符合轴压构件力学行为特征。

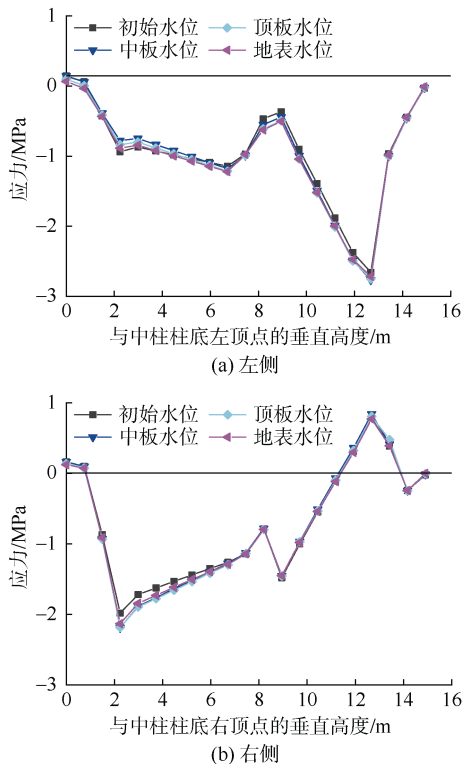


图9 结构中柱竖向受力

Figure 9 Vertical loading on the central column

由于结构对称,取左侧一半结构对板-墙、板-柱连接部位进行剪应力分析,如图 10 所示,约定剪力顺时针为正,反之为负。①底板-侧墙节点背土面转角处形成最大剪应力 2.68 MPa;②底板-中柱节点背土面出现-0.96 MPa 负剪力区;③顶板-中柱节点背土面正剪力 0.71 MPa,顶板-侧墙节点负剪力-0.41 MPa。这些剪应力分布特征印证了底板相对上部结构的抬升趋势及顶板的下压趋势。当水位升至地表时,底板-侧墙节点剪应力增至 3.39 MPa(增幅 26.5%);顶板与侧墙连接处最大剪力为-0.66 MPa,相比底板的剪力增长量已小很多,表明底板连接部位是抗浮设计的重点区域。

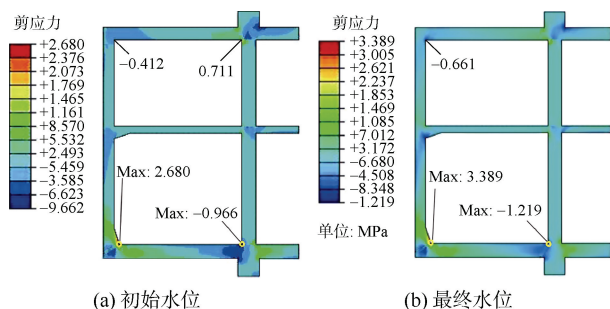


图 10 剪应力云图

Figure 10 Shear stress contour

3.2 结构与地表位移分析

图 11 为地下水位从初始状态抬升至地表高程时结构的竖向位移场分布特征(方向向上定义为正)。结果表明:当达到最终水位时,地下结构与周边土体产生协同抬升效应,其中关键构件(中柱与侧墙)的竖向位移差始终控制在 1 mm 范围内,验证了结构整体协同工作性能良好,未出现局部塑性变形。由位移云图可知,底板较顶板的上浮位移量稍大,说明水位上升后,结构处于竖向压缩状态,从结构整体变形看,中部变形大于侧墙变形。

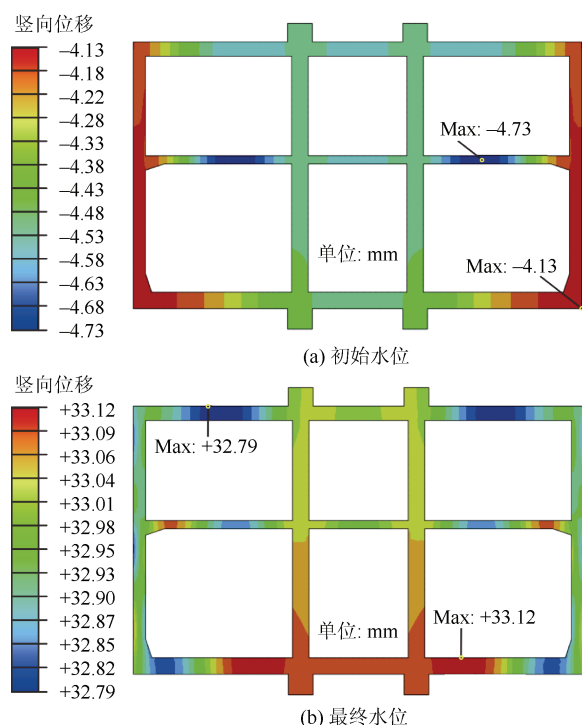


图 11 结构竖向位移云图

Figure 11 Vertical displacement of the structure

图 12 为水位上升过程中车站结构的竖向位移变化特征。随着地下水位抬升,结构与周边土体产生竖向相对位移,且位移速率与水位高度呈正相关(水位越

高,位移速率越快)。根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB50911—2013)^[24]限定城市轨道交通既有隧道结构变形控制值 3.0 mm,车站结构可借鉴该标准,结构竖向位移在此范围内,车站主体结构位移符合规范要求。

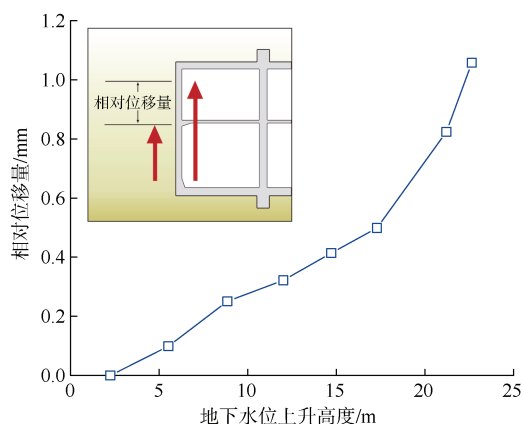


图 12 结构相对地层位移量

Figure 12 Displacement of structure relative to the stratum

图 13 为地表竖向位移变化特征,在地下水位由初始水位升至地表的过程中,车站结构与周围土体受水浮力影响,同步竖直向上移动,在此过程中土体连同结构整体抬升约 38 mm,水位每上升 1 m,土体连同结构整体平均抬升 1.65 mm。当地下水位处于地表时,车站上覆土体较周围土体抬升 0.52 mm。车站上覆土对应的地表区域较周围土体略高,主要因为车站结构竖直位移量稍大于周围土体,于是上覆土连同车站结构的总变形量大于周围土体。

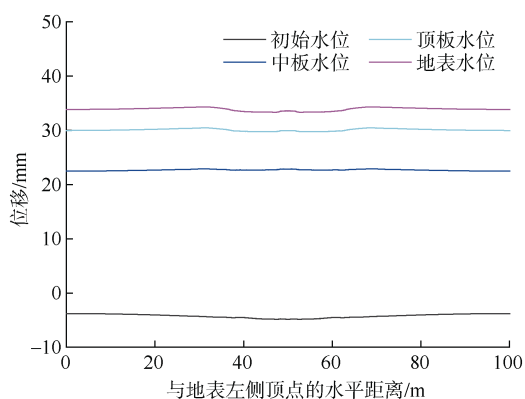


图 13 地表位移变化

Figure 13 Surface displacement variation

3.3 土体塑性区分析

图 14 为不同水位下的土体塑性区云图,塑性区主要集中在侧墙底角等区域。侧墙底角的塑性区有朝向地面发展趋势。从侧墙底角至中板位置土体处于塑性

状态, 应变在 0.05~0.21 范围内, 最大土体应变处于侧墙底角处, 最大土体应变与初始水位的最大土体应变相比增长了 0.198。造成侧墙底角至中板位置土体进入塑性区的主要原因是结构因上浮力作用与土体发生

相对变形, 墙侧与土体的摩阻力带动周围土体一起位移。水位升至地表处, 土体塑性区仅在局部区域发育, 未贯穿至地表形成破裂带, 土层较为稳定, 导致车站结构发生整体失稳的可能性较低。

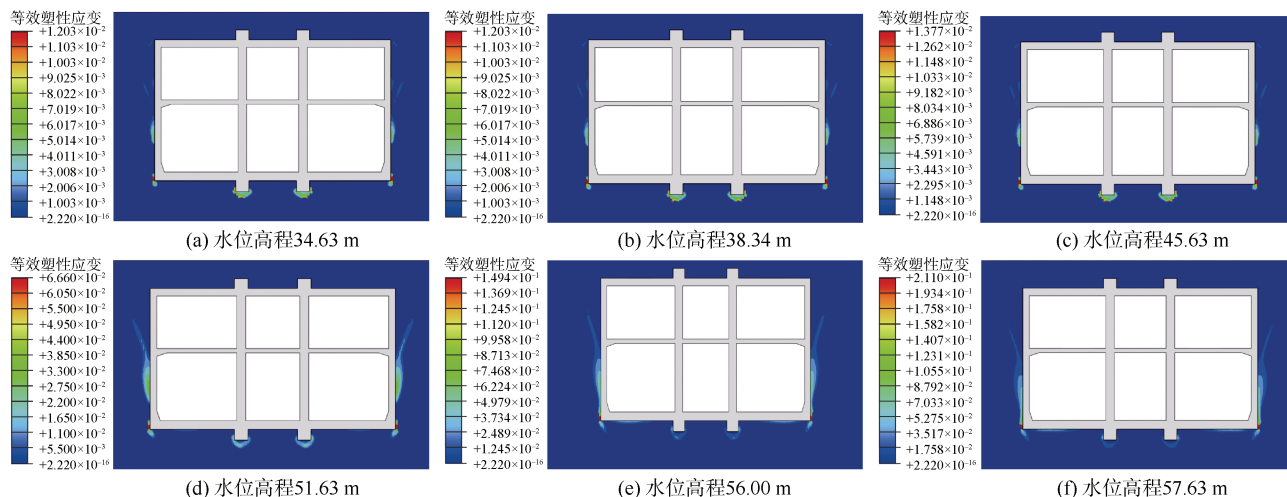


图 14 地层塑性区

Figure 14 Plastic zone of the stratum

4 结论

本研究通过数值模拟揭示了车站标准段结构在地下水变动下的力学响应规律, 主要结论如下。

1) 水位抬升引发水平传力体系应力重分布, 侧向压力的增大使得底板、中板及顶板等核心水平构件的跨中压应力区增大, 进而削弱了拉应力的作用范围。揭示了地下结构的节点弱区, 板-柱与板-墙连接节点成为典型应力敏感区, 应对底板-侧墙转角及顶板-中柱节点实施重点监测。

2) 在卵石地层中, 地层与车站结构同步上浮, 车站结构上浮量高于周围土体, 结构相对土体的竖向位移速率随地下水位高度增大而变快, 结构位移符合规范要求。中柱与侧墙的相对差值控制在 1 mm 内, 结构整体性完好, 未出现局部大变形, 结构发生局部破坏风险较低。

3) 塑性区主要集中在侧墙底角等区域, 有朝向地面发展趋势。从侧墙底角至中板位置土体处于塑性状态, 未贯穿至地表形成破裂带, 土层较为稳定, 车站结构发生整体失稳的概率较低。

参考文献

- [1] 雷坤超. 南水北调前后北京平原区地下水和地面沉降演变特征[J]. 地质学报, 2024, 98(2): 591-610.
- Lei Kunchao. Characteristics of groundwater and land

subsidence evolution before and after the South-to-North Water Diversion Project in Beijing, China[J]. Acta geologica sinica, 2024, 98(2): 591-610.

- [2] Zhang Yanjie, Huang H W, Zhang D M, et al. Vulnerability analysis of Shanghai metro network under water level rise[M]//Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Geoenvironment and Geohazard. Singapore: Springer Singapore 2018: 200-207.
- [3] Fang Yong, Guo Jianning, Grasmick J, et al. The effect of external water pressure on the liner behavior of large cross-section tunnels[J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 60: 80-95.
- [4] Liu Hanlong, Sun Weixin, Zhang Yanmei, et al. Experimental analysis on the interaction between underground structures and sand layer under groundwater level change[J]. Underground space, 2023, 10: 15-36.
- [5] 杨广武, 彭华, 李宇杰, 等. 北京地铁既有结构渗漏风险防控体系研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 75-81.
- Yang Guangwu, Peng Hua, Li Yujie, et al. Risk prevention and control system of existing structure leakage in Beijing subway[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 75-81.
- [6] Lu Dechun, Li Xiaoqiang, Du Xiuli, et al. Numerical simulation and analysis on the mechanical responses of the urban existing subway tunnel during the rising groundwater[J]. Tunnelling and underground space technology, 2020, 98: 103297.
- [7] Shin J H, Kim S H, Shin Y S. Long-term mechanical and hydraulic interaction and leakage evaluation of segmented tunnels[J]. Soils and foundations, 2012, 52(1): 38-48.

- [8] 臧万军, 赵曦雯, 王启云, 等. 富水地层地铁明挖结构抗浮破坏模式研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 302-308.
- Zang Wanjun, Zhao Xiwen, Wang Qiyun, et al. Study on anti-floating failure mode of subway open-cut structure in water-rich stratum[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(1): 302-308.
- [9] 罗富荣, 刘颖炜, 韩煜. 地下水水位上升对地铁隧道结构的影响分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 81-85.
- Luo Furong, Liu Chengwei, Han Xuan. Numerical analysis on the influence of the rising groundwater level on the metro tunnel structure[J]. China railway science, 2011, 32(1): 81-85.
- [10] 李学刚, 陈晓飞, 温小东, 等. 非饱和黏土中双线平行盾构施工引起的地表位移[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(4): 98-104.
- Li Xuegang, Chen Xiaofei, Wen Xiaodong, et al. Surface displacement induced by double-line parallel shield tunneling in unsaturated clay[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(4): 98-104.
- [11] Rahardjo H, Kim Y, Satyanaga A. Role of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering[J]. International journal of geo-engineering, 2019, 10: 8.
- [12] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.
- Chen Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(2): 201-272.
- [13] Lu Ning, Likos W J. Unsaturated soil mechanics[M]. Hoboken, N.J.: J. Wiley, 2004.
- [14] 王树芳, 李捷, 刘元章, 等. 南水北调对北京地下水涵养的影响[J]. 中国水利, 2019(7): 26-30.
- Wang Shufang, Li Jie, Liu Yuanzhang, et al. Impact of south-to-north water diversion on groundwater recovery in Beijing[J]. China water resources, 2019(7): 26-30.
- [15] Zhu Lin, Gong Huili, Chen Yun, et al. Effects of Water Diversion Project on groundwater system and land subsidence in Beijing, China[J]. Engineering geology, 2020, 276: 105763.
- [16] 王鑫, 李炳华, 潘兴瑶, 等. 南水北调水回补对北京密怀顺河道回补区地下水水质影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(8): 1935-1944.
- Wang Xin, Li Binghua, Pan Xingyao, et al. Influence of south-to-north transfer water recharge by river infiltration on groundwater quality in mi-Huai-Shun area, Beijing[J]. Research of environmental sciences, 2022, 35(8): 1935-1944.
- [17] 中国南水北调工程效益报告[R]. 北京: 水利部南水北调规划设计管理局, 2019.
- Report on the Benefits of China's South-to-North Water Diversion Project[R]. Beijing: South-to-North Water Diversion Planning and Design Administration, Ministry of Water Resources, 2019.
- [18] 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 等. 近40年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1142-1155.
- Yang Huifeng, Cao Wengeng, Zhi Chuanshun, et al. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1142-1155.
- [19] 赵意晋, 刘恒, 蔡晓慧, 等. 深厚软土地层中异形地铁车站深基坑开挖三维数值模拟分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 563-572.
- Zhao Yijin, Liu Heng, Cai Xiaohui, et al. Three dimensional numerical simulation analysis of special shaped deep foundation pit excavation of subway station in deep soft soil stratum[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2023, 45(5): 563-572.
- [20] 谢乐, 钱德玲, 杨昱, 等. 合肥地区地铁车站深基坑稳定性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(11): 1530-1535.
- Xie Le, Qian Deling, Yang Gang, et al. Stability analysis of deep foundation pit of subway station in Hefei City[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(11): 1530-1535.
- [21] 霍思远, 靳孟贵. Van Genuchten 模型参数对降水入渗数值模拟的敏感性[J]. 地球科学, 2017(3): 447-452.
- Huo Siyuan, Jin Menggui. Effect of parameter sensitivity of Van Genuchten model on numerical simulation of rainfall recharge[J]. Earth science, 2017(3): 447-452.
- [22] Chen Xiaoqing, Hu Kai, Chen Jiangang, et al. Laboratory investigation of the effect of initial dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of wide-grading gravelly soil[J]. Geotechnical and geological engineering, 2018, 36(2): 885-896.
- [23] Baker Kristine E. Investigation of direct and indirect hydraulic property laboratory characterization methods for heterogeneous alluvial deposits: Application to the Sandia-Tech Vadose Zone Infiltration Test Site[D]. New Mexico Institute of Mining and Technology, 2001.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for monitoring of urban rail transit engineering projects: GB 50911—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

(编辑: 傅依萱)