

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.03.018

# 地铁结构抗浮失效动态预警体系研究

梁中东<sup>1</sup>, 李志斌<sup>1</sup>, 关祈峰<sup>1</sup>, 张悦<sup>1</sup>, 单冶鹏<sup>2</sup>, 蔡国庆<sup>2</sup>

(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:** 为评价地下水位波动对地铁结构安全造成的威胁, 开展地铁结构抗浮失效动态预警体系研究。以北京地铁为对象, 系统梳理其结构类型与地质环境特征, 将车站结构按埋深和地层条件划分为4类, 区间隧道在此基础上结合开挖方式进一步细分为8类, 并选取每类中具有代表性的标准横断面作为数值建模基础。基于吸应力的有效应力原理与摩尔-库伦本构模型, 建立流固耦合数值模型, 系统模拟多种水文条件下地铁结构的应力与变形响应, 构建涵盖多工况的数值仿真数据库。通过定量评估不同水文条件下地铁结构的稳定性, 选取结构内力、位移、承载力与最大裂缝宽度作为4项预警指标, 分析各指标对抗浮失效的贡献程度, 结合专家打分数据, 采用层次分析法(AHP)确定指标权重, 从而构建一套地铁结构抗浮失效动态预警体系。结果表明: 所建数据库能够有效揭示水位上升引起地基承载力弱化的机理; 基于应力与位移耦合指标构建的预警体系可实现对抗浮稳定性的准确评估与风险预警, 并以泄水减压作为主要调控手段, 显著提升预警的实时性与工程适用性。本研究可为变化水文条件下地铁等地下结构的安全运维提供理论依据与技术支持。

**关键词:** 城市轨道交通; 地下水位上升; 地铁结构; 抗浮失效; 预警体系; 数值模拟

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)03-0141-10

## Dynamic Early Warning System for Anti-Floating Failure of Subway Structures

LIANG Zhongdong<sup>1</sup>, LI Zhibin<sup>1</sup>, GUAN Qifeng<sup>1</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>, SHAN Yepeng<sup>2</sup>, CAI Guoqing<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** To evaluate the threat posed by groundwater level fluctuations to the structural safety of subway systems, a dynamic early warning system for anti-floating failure of subway structures was developed. Taking the Beijing subway as an example, its structural types and geological environment characteristics were systematically analyzed. Station structures were classified into four categories based on burial depth and geological conditions, and section tunnels were further subdivided into eight categories based on excavation methods. Representative standard cross-sections from each category were selected as the basis for numerical modeling. Utilizing the suction stress-based effective stress principle and the Mohr-Coulomb constitutive model, a hydro-mechanical coupling numerical model was established to systematically simulate the stress and deformation responses of subway structures under various hydrological conditions, and a numerical simulation database covering multiple working conditions was constructed. By quantitatively evaluating the stability of subway structures under different hydrological conditions, structural internal forces, displacement, bearing capacity, and maximum crack width were selected as four early warning

收稿日期: 2025-04-28 修回日期: 2025-11-04

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. 地铁结构抗浮失效动态预警体系研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(3): 141-150.

Liang Zhongdong, Li Zhibin, Guan Qifeng, et al. Dynamic early warning system for anti-floating failure of subway structures[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(3): 141-150.

indicators. The contribution of each indicator to anti-floating failure was analyzed. Combining expert scoring data, the analytic hierarchy process (AHP) was used to determine the indicator weights, thereby constructing a dynamic early warning system for anti-floating failure of subway structures. The results show that the established database can effectively reveal the mechanism of ground bearing capacity weakening caused by rising water levels. Moreover, the proposed early warning system achieves accurate stability assessments and risk warning, while implementing water discharge and pressure reduction as primary control measures significantly enhances its real-time performance and engineering applicability. This study provides a theoretical basis and technical support for the safe operation and maintenance of underground structures such as subways under changing hydrological conditions.

**Keywords:** urban rail transit; rising groundwater level; subway structures; anti-floating failure; dynamic early warning system; numerical simulation

南水北调中线工程的成功实施,极大缓解了华北地区缺水困境,水尽其用,地尽其利。随着地下水位逐渐抬升,早年修筑的地下结构面临抗浮储备不足的风险。同时,原水位与新水位之间的土体从天然转变为饱和状态,孔压增大、有效应力减小,致使土体强度降低<sup>[1]</sup>,极大威胁地下结构及人身安全。

针对地下水位上升这一新形势,学者围绕“水位上升-既有地下结构响应”的相互作用机制展开系列研究,但仍存在明显局限。Lu等<sup>[2]</sup>以北京地铁隧道为研究对象,通过数值模拟评估水位上升对隧道结构的影响,结果表明:水位上升会引发隧道结构内力重分布,导致结构产生向上位移;Liu等<sup>[3]</sup>通过模型试验探究砂层中圆形运输隧道与矩形综合隧道的水位上升受力特性,指出圆形隧道应力集中于拱底并向拱脚转移,矩形隧道则以底拱应力最大。朱才辉等<sup>[4]</sup>揭示地表水入渗、地下水位抬升、初始含水率及隧道埋深对周围岩压力的变化规律,提出可考虑含水率增大引发围压放大效应的半数值半经验修正围岩压力计算公式。

上述研究虽明确水位上升对结构的基本影响,但均未耦合考虑水位变动诱发的土体强度衰减效应,难以准确反映结构响应规律。王海东等<sup>[5]</sup>分析抗浮破坏机理及事故主因,提出按地质条件与施工状态确定抗浮设防水位、并结合BIM技术与实时监测建立施工期水位预警机制的方案。虽在预警机制做出一些探索,但现有模拟多针对特定结构条件展开,缺乏对同类地下结构抗浮能力的全面、系统评价,无法为不同场景下的抗浮安全管控提供技术支撑。

针对抗浮安全问题,部分学者围绕既有地下结构抗浮措施的适用性展开研究。凌诚昊等<sup>[6]</sup>设计盲沟泄水降压模型试验,探究单独泄水与共同泄水对黏土层压力水头及渗流量的调控效果;黄俊光等<sup>[7]</sup>搭建集地下水疏导、排泄与观测于一体的载水减浮系统;韩

忠民等<sup>[8]</sup>详细介绍“泄压法”抗浮技术,取得良好的经济效益。尽管抗浮技术研究已取得进展,但抗浮预警设计领域仍缺乏全面系统的分析方法与量化评价指标体系,无法实现“风险预判-分级预警-精准响应”的全链条管控。

地下水位变动与地下结构之间的相互作用复杂,本文采用描述统计方法对北京地区地铁结构(包括地铁车站、区间隧道)进行统计分类,选取典型结构作为研究对象,运用基于吸应力的有效应力法和莫尔-库伦模型相结合的理论,构建数值仿真数据库并建立预警指标,为地下水位变化条件下地铁车站及隧道的安全提供判断标准及安全预警,并采用泄水减压法作为预警响应的主要行动,有利于管理人员对警情严重程度立即做出量化识别,从而高效地做出响应措施。

## 1 地铁结构统计与分类

地铁结构工程庞大且系统,各车站、区间的结构形式与所处环境存在显著差异,而结构特性与环境的复杂性,进一步导致不同部位抗浮能力差异明显。因此,构建全面系统的地铁结构抗浮失效预警系统,需先从个体层面梳理结构特征与地质条件,再上升至整体层面分类提炼同类结构的共性,方能覆盖全部车站与区间,确保系统适用性及抗浮评判的准确性。

### 1.1 地质及结构概况

北京地处华北平原西北边缘,西北、北部为太行山与燕山余脉,地势总体西北高、东南低。区域内大清河、永定河等五大水系均发源于山地,总体流向东南呈似扇状,其中永定河携黄土高原泥沙进入华北平原,逐步塑造北京平原。依据冲洪积扇原理,扇顶土层以砂、砾为主(分选差),扇缘则因水流搬运能力减弱,堆积粉砂、粉土及黏土(分选好)。北京地区土层总体呈均质分布,以第四纪沉积土为主,上层杂填土多为粉土、黏土,核心土层为粉质黏土;部分区域呈

“上软下硬”特征，该类地层上下软硬不均且渗透系数相差多个数量级，水位抬升后易在低渗透地层交界区积聚孔压，降低地层稳定性。据此，将地层划分为均质与上软下硬。

我国主要城市地铁结构规划设计兼顾便捷性与经济性，埋深普遍较浅，以浅层(0~10 m)、次浅层(10~30 m)开发为主，深层(>30 m)作为储备资源预留。埋深对地铁结构抗浮起关键作用：区间隧道埋深较大、上覆填土厚，基本可满足抗浮需求；浅埋地铁车站因上覆填土自重小，抗浮失效风险更高；深埋地铁车站则受上覆填土自重与水浮力共同作用，结构应力集中处的应力更显著。

地铁结构开挖工法选择，主要关联埋深及地上既有建构筑物的重要程度。其中，明挖法施工技术简单，结构横截面方正，受力条件清晰；暗挖法包含盾构法、矿山法等，隧道横截面多具弧度，以盾构隧道横截面最具代表性。车站结构因体型庞大，横截面形状对受力影响较小，故暂不考虑其工法差异。

1.2 地铁结构分类

要准确掌握地铁结构的抗浮能力及地下水位回升下的力学响应，全面厘清车站与区间隧道的工程概况是基础前提。本文系统梳理多座北京已开通的车站及隧道的实际工程资料、地质勘察数据，去除部分结构缺失信息后，依据 1.1 节分类标准，将所统计的地铁结构归入对应类别，如表 1 所示。

表 1 结构分类  
Table 1 Structural classification

| 因素     | 分类          | 车站/座 | 隧道/条 |
|--------|-------------|------|------|
| 顶板埋深/m | <10         | 85   | 14   |
|        | 10≤x<30     | 17   | 89   |
| 开挖形式   | 明挖法         | 70   | 12   |
|        | 暗挖法(盾构、矿山等) | 31   | 91   |
| 地层     | 上软下硬        | 45   | 62   |
|        | 均质地层        | 58   | 42   |

区间隧道按埋深、地层类型及开挖形式分为 8 大类；车站结构因截面面积大，开挖工法对截面几何形状影响较小，故仅按埋深、地层类型分为 4 大类。从每类结构中选取典型标准横截面作为研究对象，共选取 4 座车站、8 条区间。选取标准聚焦不良地质、复杂结构形式及浅埋潜水/滞水层，确保研究对象处于不利工况，兼具典型性与代表性，用于构建地铁结构抗

浮仿真数据库的仿真模型。

2 地铁结构抗浮仿真数据库

水体对地铁结构的侵扰具有长期、往复及复杂性，评估其抗浮能力需结合具体情况综合系统分析，以最大程度拓展适用范围。针对此需求，本文依据地铁结构分类遴选研究对象，通过有限元仿真并合理纳入土体湿化强度降低因素，探究地下水位上升时地铁结构的抗浮响应形态，进而构建地铁结构抗浮仿真数据库，为抗浮失效预警提供数据对比支撑。

2.1 数值建模

地铁车站及区间隧道为典型纵向连续结构，沿列车行进方向尺寸远大于其他方向，故其标准段可视为平面应变问题；而区间隧道与车站主体相接处为变截面区域，不属平面应变问题范畴。从结构体量看，标准段是地铁结构的重要组成部分，也是判断其抗浮失效的关键。因此，本文重点围绕地铁车站及隧道标准段开展抗浮响应研究，采用 ABAQUS 有限元软件，通过平面应变与渗流孔隙压力单元建立二维结构-地层模型，探究地下水位上升对地铁结构内力、位移及土体塑性区发育的影响。

具体构建步骤与参数设置如下：①为确保模型准确性并消除边界效应，建模的土层尺寸至少是结构模型尺寸的 3 倍<sup>[9]</sup>，建立围岩土体与地铁结构的几何模型；②赋予各部件材料属性后完成模型组装，地铁结构与土体的接触设置具体如下：切向行为采用摩擦系数为 0.28 的罚函数模型，方向设为各向同性，法向行为中压力过盈选择“硬”接触以允许接触后分离，同时以刚度相对较大的地铁结构外表面作为主面、刚度较小的围岩土体接触内表面作为从属面，通过有限滑移设置避免两者相互穿透；③网格单元选取，土体为 CPE4P 四结点平面应变四边形单元，结构为 CPE4R 四结点双线性平面应变四边形单元；④边界条件设置需贴合实际土体变形特征：地层底部约束水平与竖向位移，水平足够远处土体仅约束水平位移、允许竖向位移，同时结合地勘资料定义各土层初始孔隙比。

计算过程为：先完成地应力平衡及初始水位下的应力平衡以模拟结构初始应力状态，再通过折减围岩土体参数并施加水位上升后的静水压力。考虑同一地层中黏聚力、内摩擦角等参数的天然波动，取参数均值±1 倍标准差作为输入范围，在数值模型中开展敏感性分析，最终数据库参数以“均值+波动区间”形式

呈现,避免单一参数值的不确定性;最终分析地下水位上升对地铁结构受力与变形的影响。

为模拟地下水位上升条件对结构周围土体强度的影响,本构模型采用基于 Van Genuchten 模型的有效应力,代入至基于有效应力的 Mohr-Coulomb 强度准则,可实现模拟地下水位上升过程中土体抗剪强度随吸应力的减小而衰减。

基于吸应力的有效应力法是 Bishop 有效应力的扩展。Lu 等<sup>[10]</sup>提出基于吸应力的有效应力为

$$\sigma' = \sigma - u_a - \sigma_s \quad (1)$$

式中,  $\sigma'$  为有效应力;  $\sigma$  代表总应力;  $u_a$  是孔隙气压力;  $\sigma_s$  表示吸应力。

Lu 等<sup>[10]</sup>将 Van Genuchten 模型与吸应力  $\sigma_s$  相结合,提出吸应力  $\sigma_s$  为

$$\sigma_s = -\frac{(u_a - u_w)}{\left\{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n\right\}^{(n-1)/n}}, \quad (u_a - u_w) \geq 0 \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  近似为进气值的倒数;  $n$  与土壤孔隙大小分布直接相关;  $u_w$  为孔隙水压力。

Lu 等<sup>[10]</sup>应用达西定律,提出的基质吸力表达式为

$$(u_a - u_w) = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[ \left( 1 + \frac{q}{k_s} \right) e^{-\gamma_w \alpha (D_w - h)} - \frac{q}{k_s} \right] \quad (3)$$

式中,  $k_s$  为饱和渗透系数;  $\gamma_w$  为水重度;  $q$  为渗流量;  $D_w$  为地下水位埋深;  $h$  为计算点埋深。

地下水位动态上升过程中,水位以上的非饱和区域可视为稳态渗流过程,该区域的渗流量  $q=0$ 。将渗流量  $q=0$  代入至式(3)后,将该式代入至式(2)中,得到非饱和区域吸应力  $\sigma_s$  与  $(D_w - h)$  的关系式

$$\sigma_s = \frac{1}{\alpha} \frac{-r_w \alpha (D_w - h)}{\left\{1 + [r_w \alpha (D_w - h)]^n\right\}^{(n-1)/n}} \quad (4)$$

将式(4)代入基于有效应力的 Mohr-Coulomb 破坏准则,得

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' - \sigma_s \tan \varphi' \quad (5)$$

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

由式(5)可知,砂土本身黏聚力较小,由非饱和状态转变为饱和状态前后,抗剪强度并无显著改变。对于黏聚力不为 0 的粉土或黏土地层,黏聚力越大,抗剪强度减小愈明显,因此需愈发重视地下水位上升后土体吸水饱和导致的抗剪强度减小等不利因素。

## 2.2 MIDAS 三维有限元仿真模型

为进一步校核与验证 ABAQUS 数值仿真模型的准确性,采用 MIDAS 有限元软件建立三维有限元仿真模型,结构侧墙,顶、中、底板均采用板单元,梁、柱、桩等构件采用梁单元,各构件的物理属性均与实际构件取值相同。根据结构实际受力情况模拟结构的内力分布。经对比标准截面处的内力及其分布,判定模型的准确程度。当水位升至地表处时,模拟计算结构内力,考虑承载能力极限状态的基本组合和正常使用极限状态的标准组合,分别用于校核结构所需配筋面积与混凝土裂缝宽度验算。

## 2.3 数据库的构建

系统梳理所选 4 座车站、8 条区间的结构参数(横截面尺寸、材料特性等)及对应区域的地质环境数据(地层类型等),形成完整的基础数据集。基于研究目标预设多种地下水位波动场景,设定对应的初始状态与边界条件,通过数值模型系统模拟不同水文条件下 4 座车站、8 条区间结构的应力与变形响应,采集各类工况下的 4 项核心仿真数据:结构应力、土体与结构的位移、构件所需配筋面积、迎土面最大裂缝宽度。将所有工况下的 4 项核心仿真数据进行规范化整理、校验与分类存储,最终构建涵盖多结构类型、多地质条件、多水文场景的地铁结构抗浮失效数值仿真数据库。

## 3 抗浮失效动态预警系统

### 3.1 系统设计原则

地铁抗浮失效动态预警系统需满足安全可控、经济合理、管理有序的基本需求,具体原则如下:一是遵循国家及行业相关规范,制定“红、橙、黄、蓝”分级预警标准,颜色愈深代表险情越危急;二是能通过地下水位抬升高度与预警水位的比对,及时触发预警;三是分级预警信息需准确可靠,且能精准适配维护人员、管理人员、专家等不同层级对象;四是可依据规范及时解除抗浮失效预警。

### 3.2 预警指标归一化

由于 4 项核心指标含义与单位不同,依据国家、行业相关规范[11-13]对预警指标进行归一化处理,即各项指标分别与对应规范限值作比,新预警指标无单位且全部量化,便于后续抗浮效果评价。所依据的国家、行业相关规范及其限值如表 2 所示。考虑混凝土承压性能优良但抗拉能力薄弱,多数裂缝由受拉引发,故依据结构应力云图明确有效受拉混凝土截面面积;假

定钢筋受拉应力为屈服强度，除钢筋承担的有效拉应力外，剩余应力作为混凝土构件失效的评判标准；基于最不利截面的内力与弯矩，按《混凝土结构设计规范》GB50010—2020<sup>[11]</sup>中任意截面构件正截面承载力计算公式，计算构件所需配筋面积；结构迎土面最大裂缝宽度则依据该规范，分别考虑荷载标准组合或准永久组合，先计算有效受拉混凝土截面面积与受拉区纵向钢筋应力，再求解裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数，最终得到最大裂缝宽度。

表 2 国家、行业相关规范限值

Table 2 Limits specified in national and industry standards

| 预警指标   | 限值                      |
|--------|-------------------------|
| 结构内力   | 抗拉强度标准值 <sup>[11]</sup> |
| 结构位移   | 3 mm <sup>[12]</sup>    |
| 最大裂缝宽度 | 0.2 mm <sup>[13]</sup>  |
| 结构承载力  | 实际配筋面积                  |

3.3 分级动态预警步骤

为定量评估地铁结构在水位上升过程中的安全水平，确定 4 项预警指标对结构抗浮失效的影响程度。本文结合专家打分数据进行层次分析法(AHP 法)，得到各项预警指标权重值。

本次研究共邀请 8 位专家组建评审团队，团队构成覆盖地铁结构抗浮研究的核心技术领域，具体包括：结构工程领域 3 人(均为高级工程师，从业年限≥5 年)、岩土工程领域 3 人(含 2 名教授、1 名勘察设计院总工)、地铁监测领域 2 人(工程监测部技术负责人)，专家团队兼具理论深度与工程实践经验。引入专家独立评价机制，对一致性检验合格后的评分结果进行独立复核与修正；最终整合经专家修正的独立评价结果，通过加权平均形成最终评价值，作为预警等级判定的核心依据。

采用 1~9 标度法来判断两两指标的相对重要程度。权重标度 1 表示两个因素相比，具有相同重要性，权重标度增加，表示两个因素相比，前者比后者重要程度增加，直至权重标度 9 表示两个因素相比，前者比后者极端重要。汇总得关系矩阵  $A$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{10}{13} & \frac{10}{14} \\ 2 & 1 & \frac{5}{3} & \frac{10}{7} \\ \frac{13}{10} & \frac{3}{5} & 1 & \frac{5}{6} \\ \frac{14}{10} & \frac{7}{10} & \frac{6}{5} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(6)可知，矩阵  $A$  的最大特征根的近似值  $\lambda_{\max}$  为 4.001。基于线性代数定理，采用  $\lambda_{\max} - n$  判断矩阵的可靠性。定义  $CI$  为一致性指标，如式(7)所示。 $CI=0$  为一致阵，越大则表示矩阵的不一致程度越严重。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

对于 4 阶判断矩阵，一致性指标  $CI$  与同阶随机一致性指标  $RI$  之比，称为一致性比率，如式(8)所示， $CR < 0.1$  时，即认为判断矩阵的不一致程度满足要求，否则需重新修正判断矩阵。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

关系矩阵  $A$  经式(7)~(8)计算可得一致性满足要求，记结构内力为  $y_1$ ，结构位移为  $y_2$ ，最大裂缝宽度为  $y_3$ ，结构承载力  $y_4$ ， $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$  对抗浮失效预警总目标的权重系数分别为 0.1748、0.3567、0.2169、0.2514。考虑预警方法的实用性与简便性，以结构应力的权重为单位 1， $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$  对抗浮失效预警总目标的权重系数近似为 1、2、1.3、1.5。

地铁结构抗浮失效预警阈值区间如表 3 所示，其中，普通混凝土构件在承受 30%~40%的设计荷载，就可能出现裂缝，因此结构内力的阈值与其余三项有所不同。若  $y_i(i=1, 2, 3, 4)$  处于表 4 中某单项预警阈值区间，则赋对应分值，记为  $Y_i(i=1, 2, 3, 4)$ ，四项分值与相应权重乘积之和，即为各个站点总得分为

$$Y = \sum_{i=1}^4 Y_i \quad (9)$$

若  $Y < 4.5$  则该站点无需预警；若  $4.5 \leq Y < 7.5$ ，则该站点发布蓝色预警；若  $7.5 \leq Y < 10.5$ ，则该站点发布黄色预警；若  $10.5 \leq Y < 13.5$ ，则该站点发布橙色预警；若  $13.5 \leq Y$ ，则该站点发布红色预警。

表 3 单项预警阈值区间

Table 3 Threshold ranges for individual early warning indicators

| 赋分 $Y_i$ | 结构内力 $y_1$             | 结构位移 $y_2$           | 最大裂缝宽度 $y_3$         | 结构承载力 $y_4$          |
|----------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0 分      | $y_1 < 0.30$           | $y_2 < 0.6$          | $y_3 < 0.6$          | $y_4 < 0.6$          |
| 1 分      | $0.30 \leq y_1 < 0.33$ | $0.6 \leq y_2 < 0.7$ | $0.6 \leq y_3 < 0.7$ | $0.6 \leq y_4 < 0.7$ |
| 2 分      | $0.33 \leq y_1 < 0.36$ | $0.7 \leq y_2 < 0.8$ | $0.7 \leq y_3 < 0.8$ | $0.7 \leq y_4 < 0.8$ |
| 3 分      | $0.36 \leq y_1 < 0.39$ | $0.8 \leq y_2 < 0.9$ | $0.8 \leq y_3 < 0.9$ | $0.8 \leq y_4 < 0.9$ |

3.4 预警系统响应

将预警数据库与日常水位监测数据进行融合对

接，实时比对当前水位与预警水位阈值，为预警信息的传递分发及后续响应处置提供一体化支撑平台。

依据结构安全预警体系框架，构建结构安全应急响应机制与应急解除机制。应急响应流程需结合实际工程场景制定并动态优化，同时通过定期演练与测试验证，确保响应动作的及时性与有效性。系统实时对比当前水位与预警水位，一旦触发预警阈值立即发送预警信息，推送模式包含定点精准推送、自定义范围推送及进程节点触发式推送；待水位回落至安全区间后，依据规范流程完成预警解除，具体抗浮预警工作程序如图 1 所示。

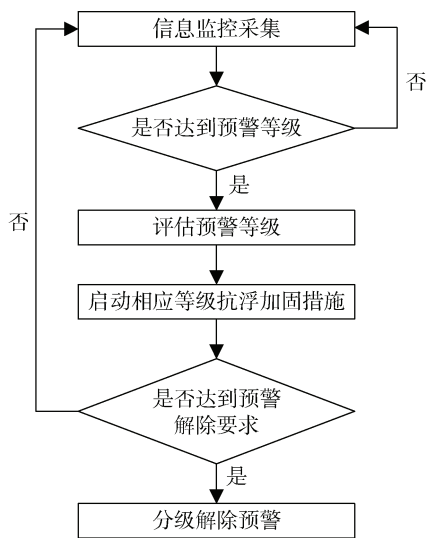


图 1 预警流程

Figure 1 Early Warning Process

不同预警等级对应的应急响应措施如下：

- 1) 蓝色预警。强化预警区段巡检频次，发现异常情况及时反馈；将预警车站、区间的结构监测频次提升至每季度 1 次，重点跟踪区间隧道与车站的变形状态。
- 2) 黄色预警。加密预警区段巡查力度，每日汇总并上报相关监测与巡查信息，同时将预警车站、区间的结构监测频次调整为每月 1 次，重点监测结构变形情况；启动风险监测与险情排查工作，协调相关单位编制风险处置方案并推进实施。
- 3) 橙色预警。向相关部室发送预警信息，联合开展预警车站强化巡查，每 24 h 汇总反馈一次相关信息。对预警车站或区间实施专项结构监测，重点追踪区间隧道与车站变形情况，定期向相关部室同步长期监测与专项监测成果。组织公司部室及建设、设计等单位召开专项会议，结合现场实际提前制定泄水减压预案，明确具体操作部署，完成泄水减压各项准备工作(方案

需经设计单位认可)。同步开展风险监测与险情排查，协调相关单位编制处理方案，并安排应急救援队伍待命、备齐应急物资，为应急处置做好准备。

- 4) 红色预警。向相关部室发送预警信息，联合各专业强化预警车站巡查；每 12 h 汇总反馈一次预警信息。对预警车站或区间开展专项监测，重点监测区间隧道与车站变形。部室经理级人员实施 24 h 轮班值守，主导风险处置工作，依据前期专项会议制定的泄水减压预案启动相应操作，开启结构内部抽排水工作。

3.5 预警系统解除

当满足预警解除要求时，相应的解除程序为。

- 1) 蓝色预警。根据预警车站或区间的变形监测情况，结构变形较为稳定，则预警解除。
- 2) 黄色预警。针对预警区段巡查情况，区间隧道及车站变形情况较为稳定，且沿线方向差异沉降低于安全值，则预警解除。
- 3) 橙色预警。每天保持一定频率的监测地下水位变化及结构变形，若区间隧道及车站变形情况稳定，且结构基本回落到原位后较长一段时间不再发生大幅变化，沿线方向差异沉降低于安全值，则预警解除。
- 4) 红色预警。持续监测结构复位情况，待结构基本复位后，结合地质条件与水位高度研判抗浮失效风险；确认风险解除后，对底板下地基土实施灌浆处理以填充孔隙，完成红色预警解除。

4 案例分析

为展示预警体系的广泛适用性，分别遴选了典型的地铁车站与隧道两类核心结构，结合其差异化结构形式与受力特征，运用 ABAQUS 有限元分析软件构建数值模型，为体系跨场景适配验证提供量化支撑。

4.1 隧道结构

4.1.1 工程概况

北京地铁某隧道线路采用矿山法施工，结构顶覆土厚度范围为 13.41 m。地下水主要为层间潜水，水位标高为 16.07~19.53 m，位于仰拱以下 3~5 m 位置，由于层间潜水受大气降水影响较大，水位有一定变化，变化幅度一般在 2~3 m，抗浮设计水位标高 30 m。

区间隧道结构的主要工程材料为：① 初期支护：C20 喷射混凝土；② 二次衬砌：C35，S10 防水钢筋混凝土，结构材料的参数如表 4 所示。

地勘资料显示，土层划分为人工填土层(Q<sub>ml</sub>)、第四纪全新统新沉积层(Q<sub>4al+pl</sub>)、一般第四纪沉积层

( $Q_{4al+pl}$ )3 大类。根据各土层分布特征，为提高建模效率，本文对土层分布进行一定的简化，经简化后的土层分布见图 2，参数见表 5。依据节 1.4 的分类办法，该区间隧道可归类为深层埋深，暗挖工法，所处地层为均质地层。

表 5 土体参数

Table 5 Soil parameters

| 地层序号           | 埋深/m  | 土层类型 | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 泊松比  | 弹模/MPa | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/° | 渗透系数/(m/h)           |
|----------------|-------|------|------------------------|------|--------|---------|--------|----------------------|
| ①              | 0     | 填土   | 1 650                  | 0.4  | 26.7   | 10      | 8      | $2.88\times10^{-2}$  |
| ②              | 1.28  | 粉土   | 1 990                  | 0.3  | 33.6   | 25      | 28     | $2.314\times10^{-6}$ |
| ③              | 9.28  | 粉质黏土 | 2 060                  | 0.29 | 27.3   | 28      | 20     | $5.787\times10^{-7}$ |
| ③ <sub>1</sub> | 19.28 | 粉土   | 2 110                  | 0.3  | 33.6   | 26      | 26     | $2.314\times10^{-6}$ |
| ④ <sub>1</sub> | 22.28 | 粉细砂  | 2 000                  | 0.3  | 46.0   | 0       | 30     | $1.157\times10^{-4}$ |
| ④ <sub>3</sub> | 27.65 | 粉质黏土 | 1 970                  | 0.29 | 27.3   | 28      | 30     | $5.787\times10^{-7}$ |

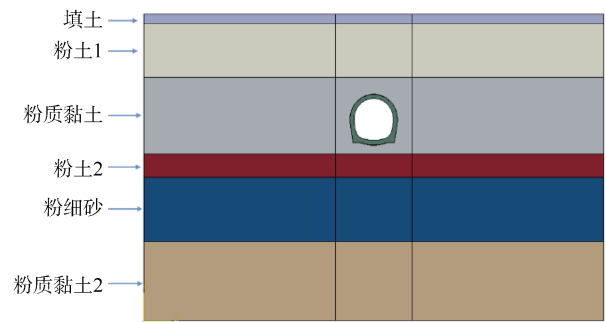


图 2 隧道结构及地层模型

Figure 2 Tunnel structure and stratigraphic model

4.1.2 结果分析

隧道结构水平应力如图 3 所示，隧道仰拱受浮托力作用，迎土面侧受压，背土面侧受拉，顶拱受上覆土自重，受力规律与底板相反。受上覆土饱和重度与浮力共同作用下，侧墙内侧受压，迎土面侧受拉，最大拉应力和压应力分别位于仰拱背土面和迎土面的中间部位，数值为 3.25 MPa 和 5.36 MPa，应重点关注仰拱，防范受力过大导致结构破坏。

结构按作用在弹性地基上的平面结构进行内力分析，采用荷载-结构二维模型进行计算。水位至地表标高时，采用水土分算方式施加静力荷载。基本组合永久荷载的组合系数为  $1.1\times1.4$ ，可变荷载组合系数为  $1.1\times1.65$ 。图 4 为弯矩的标准值及设计值，仰拱两端与仰拱中部的弯矩较大，方向相反。仰拱中部的弯矩主要由浮托力引起，仰拱的内凹趋势导致仰拱两端向中间收缩趋势，故弯矩较大，最不利截面为仰拱两端。

地下水位上升过程中对隧道结构竖向变形的影响

表 4 结构材料的参数

Table 4 Parameters of structural materials

| 砼标号 | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹模/GPa | 泊松比 |
|-----|-------------------------|--------|-----|
| C20 | 2400                    | 25.5   | 0.2 |
| C35 | 2450                    | 31.5   | 0.2 |

如图 5 所示。水位由初始地下水位升至地表水位时，隧道结构相对土体变形由沉降逐渐变为浮起，其中，浮起的变形量为 1.3 mm。根据《城市轨道交通工程监测技术规范 GB50911—2013》<sup>[12]</sup>限定城市轨道交通既有线隧道结构变形控制值 3.0 mm，隧道主体结构的变形量在此限制内，隧道结构变形符合安全要求。

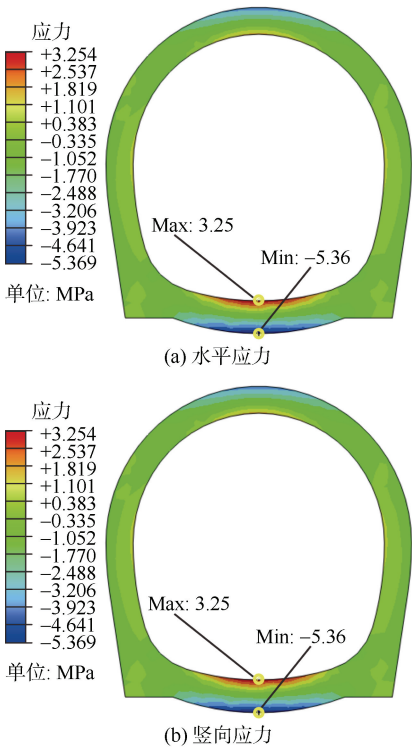


图 3 水位上升至地表时隧道结构应力

Figure 3 Stress of the tunnel structure when the water level rises to the surface

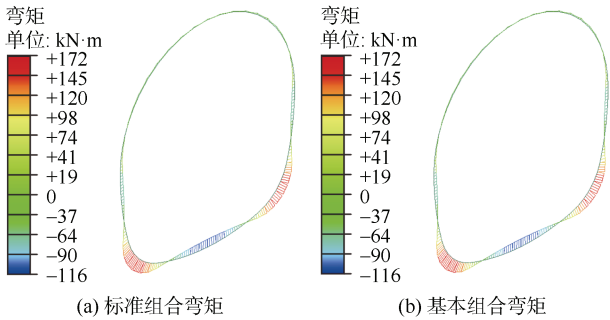


图 4 弯矩的标准值及设计值

Figure 4 Standard and design value of bending moment

根据地铁抗浮预警机制,根据表 3 查找四项预警指标分值,与相应权重乘积的累加之和,即可得到浅埋均质地层的区间隧道预警等级,如表 6 所示。

表 6 深埋均质地层的区间隧道预警等级划分

Table 6 Classification of early warning levels for section tunnels in deeply buried homogeneous strata

| 水位标高/m | 结构内力/MPa |      |      | 结构位移/mm |    |      | 最大裂缝宽度/mm |     |      | 结构承载力/mm <sup>2</sup> |      |      | 预警信息 |
|--------|----------|------|------|---------|----|------|-----------|-----|------|-----------------------|------|------|------|
|        | 数值       | 限值   | 比值   | 数值      | 限值 | 比值   | 数值        | 限值  | 临界比  | 数值                    | 限值   | 比值   |      |
| 39     | 1.08     | 2.20 | 0.49 | 1.3     | 3  | 0.43 | 0.09      | 0.2 | 0.45 | 3544                  | 5362 | 0.66 | 蓝    |
| 30     | 0.89     | 2.20 | 0.40 | 0.4     | 3  | 0.13 |           |     |      |                       |      |      | 无    |

由预警结果可知,水位升至标高 39 m 左右应发布蓝色预警,对应的预警响应为加强对预警区段巡查,对预警区间加密至每季度开展一次结构监测,重点监测区间隧道变形情况,如有问题及时反馈。水位回落后,根据预警区间的变形监测情况,结构变形较为稳定,则解除蓝色预警。

4.2 地铁车站结构

4.2.1 工程概况

北京地铁某车站净宽 21.6 m,拱顶覆土厚约 5.34 m。本文截取标准横截面段构建数值模型。根据地勘资料,抗浮设防水位为 44 m,位于车站结构顶板附近。车站主体结构楼板及梁采用 C30 混凝土,结构柱采用 C40 混凝土,其参数选取见表 7。其中,②与③层已做合并处理,地层编号仍沿用地勘报告序列。基于地勘资料简化后的土层分布见图 6,参数见表 8。依据节 1 的分类办

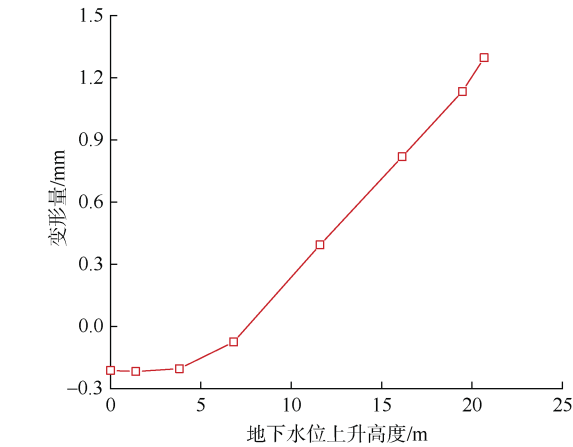


图 5 隧道结构竖向位移

Figure 5 Vertical displacement of tunnel structure

法,该车站结构可归类为浅层埋深,所处地层为上软下硬地层。

表 7 结构材料的参数

Table 7 Parameters of structural materials

| 砼标号 | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹模/GPa | 泊松比 |
|-----|-------------------------|--------|-----|
| C30 | 2 410                   | 30     | 0.2 |
| C40 | 2 440                   | 32.5   | 0.2 |

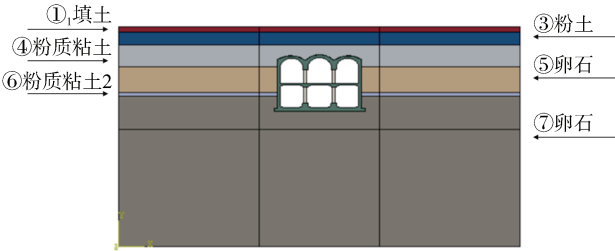


图 6 车站结构及地层模型

Figure 6 Station structure and stratum model

表 8 土体参数

Table 8 Soil parameters

| 地层序号 | 埋深/m | 土层类型 | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 泊松比  | 弹模/MPa | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/° | 渗透系数/(m/h)            |
|------|------|------|-------------------------|------|--------|---------|--------|-----------------------|
| ①1   | 1.5  | 填土类  | 1650                    | 0.4  | 26.7   | 10      | 12     | $2.88 \times 10^{-2}$ |
| ③    | 5    | 粉土   | 1940                    | 0.3  | 33.6   | 33      | 28     | $1.08 \times 10^{-6}$ |
| ④    | 11   | 粉质黏土 | 2000                    | 0.31 | 18.63  | 42      | 17     | $7.20 \times 10^{-4}$ |
| ⑤    | 18   | 卵石   | 2180                    | 0.28 | 240    | 0       | 50     | 7.20                  |
| ⑥    | 19   | 粉质黏土 | 1980                    | 0.29 | 27.3   | 42      | 17     | $1.80 \times 10^{-4}$ |
| ⑦    | 60   | 卵石   | 2180                    | 0.28 | 240    | 0       | 50     | 7.20                  |

4.2.2 结果分析

图 7 为结构应力云图，水位上升至地表时，水平应力拉应力最大值为 2.14 MPa，出现在底板中部及顶部拱结构局部区域；压应力最大值 7.13 MPa，集中于中层楼板与中柱的交接处。中柱与楼板节点、底板关键区域存在明显的应力集中现象。车站结构竖向拉应力最大值为 5.977 MPa，出现在底板与侧墙的角部区域。应力集中区域主要分布于底板与侧墙交接处、上层拱结构的支座部位；结构中间墙体及大部分区域应力水平相对较低，表明此类区域受力状态较平缓。

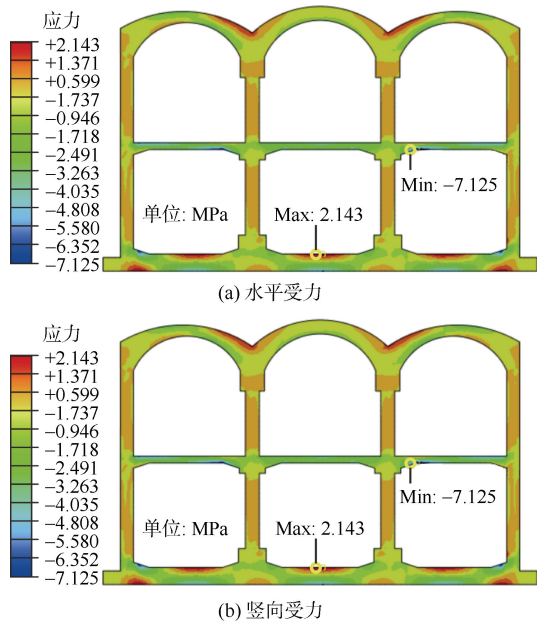


图 7 水位上升至地表时车站结构应力  
Figure 7 Stress of station structure when water level rises to the surface

综上，水位上升至地表工况下，车站结构的底板与侧墙节点、中柱与楼板节点及顶部拱结构支座为应力敏感区域，此类区域是预警体系中结构应力监测的重点对象，以实现对接受力风险的精准预警。

结构竖向与水平变形(相对周围土体)随地下水位上升高度的变化曲线，见图 8。随着地下水位上升，地铁车站结构的竖向变形与水平变形均呈持续增长趋势，且水平变形的增长速率显著高于竖向变形。当水位上升高度 $\leq 15$  m 时，两者变形量增长较为平缓； $>15$  m 后，变形增长速率明显加快，至 30 m 时，竖向变形达到约 0.8 mm，水平变形则快速增长至约 1.5 mm。

图 9(a-b)为顶板与底板的标准组合弯矩，为增加标准组合与基本组合弯矩的区别，增加图 9(c)。底板标准组合弯矩极值为 $-1\,457.2\sim 1\,426.2$  kN·m，顶板标准

组合弯矩极值为 $-539.8\sim 377.4$  kN·m，弯矩主要在梁-柱、墙-板等部位较大。由预警结果表 9 可知，水位升至地表无预警，车站安全。

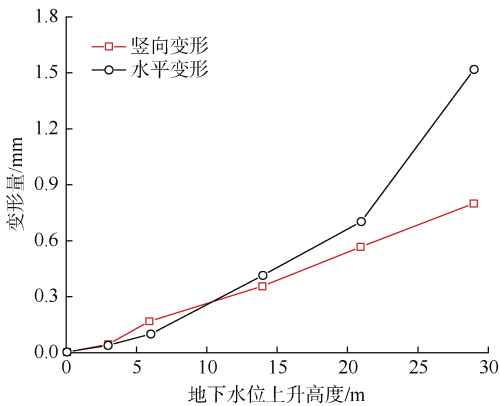


图 8 车站结构位移  
Figure 8 Station structural displacement

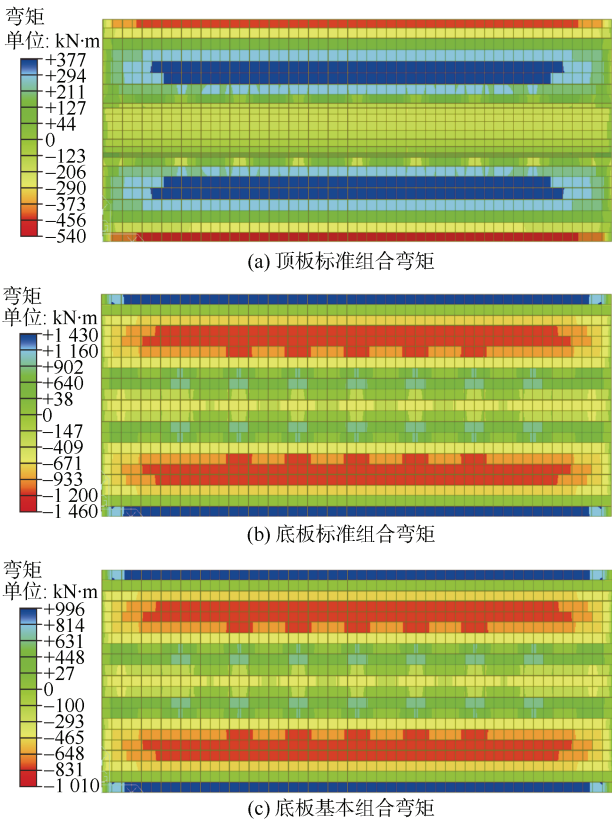


图 9 弯矩的标准值及设计值  
Figure 9 Standard and design values of bending moment

5 结论

本文以北京地区地铁车站及区间隧道为研究对象，通过结构统计分类、抗浮仿真数据库构建及预警指标体系建立，为地下水位变化条件下地铁结构安全判断与预警提供技术支撑，具体结论如下：

表 9 浅埋上软下硬地层的车站预警等级划分

Table 9 Classification of early warning levels for station in shallowly buried upper-soft and lower-hard strata

| 水位标高/m | 结构内力/MPa |      |      | 结构位移/mm |    |      | 最大裂缝宽度/mm |     |      | 结构承载力/mm <sup>2</sup> |       |      | 预警信息 |
|--------|----------|------|------|---------|----|------|-----------|-----|------|-----------------------|-------|------|------|
|        | 数值       | 限值   | 比值   | 数值      | 限值 | 比值   | 数值        | 限值  | 比值   | 数值                    | 限值    | 比值   |      |
| 51.49  | 1.13     | 2.38 | 0.47 | 1.6     | 3  | 0.53 | 0.073     | 0.2 | 0.37 | 2 400                 | 4 105 | 0.58 | 无    |
| 44     | 0.89     | 2.38 | 0.37 | 0.58    | 3  | 0.19 |           |     |      |                       |       |      | 无    |

1) 采用描述统计法分类地铁车站(4 类, 按埋深、地层类型)与区间隧道(8 类, 增列开挖形式), 基于吸应力的有效应力法构建数值模型并获取结构多维度参数, 整合形成抗浮仿真数据库, 为预警指标标定提供支撑。

2) 运用 AHP 确定 4 项指标对预警目标的权重贡献, 构建四级预警体系具备指标量化、信息精准的特征, 可实现变形过程的综合判据阈值定量化, 显著提升抗浮失效预警的实用性与准确性。

3) 隧道案例明确, 水位升至 39 m 左右需发布蓝色预警(加强区段巡查、重点监测结构变形, 水位回落稳定后解除), 车站案例未达预警条件, 该案例验证抗浮预警体系的可行性与操作流程, 为预警后分级响应措施制定提供实践参考。

参考文献

[1] Su Yanlin, Cai Guoqing, Yin Fengjie, et al. Investigation of the creep behavior and time-dependent constitutive model of red-stratum mudstone fill material in high-fill subgrade[J]. Construction and building materials, 2025, 458: 139560.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 朱才辉, 贺豪楠, 兰开江, 等. 黄土地层含水率增大对大跨度隧道围岩压力影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 93-98. Zhu Caihui, He Haonan, Lan Kaijiang, et al. Influences of increase of moisture content on surrounding soil pressure of large-span tunnels in loess[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S1): 93-98.

[5] 王海东, 罗雨佳. 超大地下室施工期抗浮破坏机理分析与应对思考[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10): 2538-2546. Wang Haidong, Luo Yujia. Analysis of the mechanism of anti-floating damage and its countermeasures during construction period of oversized underground garage[J]. Journal of railway science and engineering, 2019, 16(10): 2538-2546.

[6] 凌诚昊, 董杰, 谢俊, 等. 武汉长江三级阶地地铁地下

车站泄水抗浮模型试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(9): 1088-1095.

Ling Chenghao, Dong Jie, Xie Jun, et al. Experimental study on anti-floating model by drainage in underground metro station of the tertiary terrace of Yangtze River in Wuhan[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(9): 1088-1095.

[7] 黄俊光, 李健斌, 李伟科, 等. 临江滨海强透水环境建筑工程载水减浮关键技术研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(4): 41-49. Huang Junguang, Li Jianbin, Li Weike, et al. Study on key technologies of water-bearing anti floating in construction engineering with strong permeable environment along riverside or coastal area[J]. Building structure, 2024, 54(4): 41-49.

[8] 韩忠民, 严寒. 地下建筑结构“泄压法”抗浮设计[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 2177-2182. Han Zhongmin, Yan Han. Anti-floating design of “pressure relief method” for underground structure[J]. Building structure, 2021, 51(S1): 2177-2182.

[9] 满世浩, 石广田, 满开泉. 铁路隧道二次衬砌施工冷缝成因及对策[J]. 铁道建筑, 2022, 62(7): 92-96. Man Shihao, Shi Guangtian, Man Kaiquan. Causes and countermeasures of cold joints in secondary lining construction of railway tunnel[J]. Railway engineering, 2022, 62(7): 92-96.

[10] Lu Ning, Likos W J. Unsaturated soil mechanics[M]. Hoboken, N.J.: J. Wiley, 2004.

[11] GB50010—2020 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020. GB50010—2020 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

[12] GB50911—2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. GB50911—2013 Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[13] GB 50367—2013 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. GB 50367—2013 Code for design of strengthening concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

(编辑: 傅依萱)