

DOI:

深厚富水砂土地铁深基坑变形性状及频发地连墙渗漏灾害分析

刘俊城, 谭 勇, 樊冬冬

(同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 为探究深厚富水砂土地铁深基坑变形性状以及频发地连墙渗漏灾害特征, 首先建立了深基坑变形和渗漏事例数据库以开展全面统计分析, 得到了围护结构和坑外地表变形规律并识别出关键影响因素。其次, 提出了富水砂土深基坑穿墙渗漏灾害的新型分类方法, 进而揭示了灾害主要诱因并总结了有效应对措施。统计分析表明: (1) 墙体最大侧移 (δ_{hm}) 范围为 $(0.03\% \sim 0.48\%) H$ (H 为开挖深度), δ_{hm} 大小受到角部效应、降水模式、墙趾埋置条件以及墙体暴露长度等因素的影响; (2) 地表沉降剖面为典型凹槽形, 最大沉降 (δ_{vm}) 为 $0.26\% H_e$ (H_e 为最终开挖深度) 并距墙体约 $0.5H_e$; (3) 地连墙渗漏会导致 δ_{hm} 突增, 这主要归因于动水力引起的墙背水土合力增加以及注浆压力不当两个方面; (4) 渗漏引起的大部分地表沉降增量 ($\Delta\delta_{vl}$) 均小于 $0.5\% H_l$ 并且主要影响区可扩展至坑外约 $2H_l$ 范围, 其中 H_l 为墙体渗漏深度, 坑外地层扰动区呈“倒圆锥形”分布; (5) 穿墙渗漏灾害可划分为三种类型: 轻微渗水无土体流失、严重渗漏水轻微土体流失以及大量漏水漏砂; (6) 采用“灾前预防和灾后应急处置”思路能有效控制地连墙渗漏灾害。

关键词: 富水砂土; 深基坑; 变形性状; 地连墙渗漏; 应对措施

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)11-1959-09

作者简介: 刘俊城(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土与地下工程等方面的研究。E-mail: liujuncheng@tongji.edu.cn。

Analyses of deformation behaviors of subway excavations and frequent through-wall leaking hazards in water-rich sandy strata

LIU Juncheng, TAN Yong, FAN Dongdong

(Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To explore the deformation behaviors of subway excavations in thick water-rich sandy strata and the characteristics of frequent through-wall leaking hazards, the databases of excavation deformation and through-wall leaking events were first built to carry out comprehensive statistical analyses; hence, the deformation laws of retaining walls and ground surface behind the walls were obtained, and the key influencing factors were identified. Then, a novel method for classifying through-wall leakages during deep excavation in water-rich sand was proposed; afterwards, their primary triggering factors were revealed, and the effective measures were also summarized. The statistical analyses show that: (1) The maximum lateral wall deflection, δ_{hm} , varied from $0.03\% H$ (H , excavation depth) to $0.48\% H$; the magnitudes of δ_{hm} were affected by the spatial-corner effect, dewatering mode, burial condition of wall toes, and wall exposure length. (2) The profile of ground settlements was a typical concave shape, and the maximum settlement, δ_{vm} , was $0.26\% H_e$ (H_e , final excavation depth), which occurred at about $0.5H_e$ behind the walls. (3) Through-wall leaking caused sudden increments of δ_{hm} , mainly attributed to the rapid increment of total lateral earth pressure induced by seepage force and/or the inappropriate grouting pressure. (4) Most of the leakage-induced settlement increments, $\Delta\delta_{vl}$, were less than $0.5\% H_l$, and the primary influence zone could be extended to about $2H_l$ outside the pit, in which H_l denoted the burial depth of leaky spots on the wall; besides, the shape of strata disturbed behind the walls showed a distribution of “inverted cone”. (5) Leaking hazards can be classified into three levels: minor seepage without soil loss, massive leakage with slight

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42177179)

收稿日期: 2024-12-19

*通信作者 (E-mail: tanyong21th@tongji.edu.cn)

soil loss, and massive inrush of water and soils. (6) Through-wall leakages can be effectively controlled by following the perspective of "disaster prevention before accidents and emergency response after accidents".

Key words: water-rich sand; deep excavation; deformation behaviors; through-wall leaking; countermeasures

0 引言

为解决城市问题(如人口拥挤、地面交通堵塞),我国城市地下空间伴随快速城镇化得到大力发展^[1]。因此,城市中心区域涌现了大量深基坑工程,尤其是在我国东部经济较为发达的中大城市^[2,3]。由于基坑开挖涉及到土体-结构-水三者间相互作用,这导致基坑变形性状十分复杂并且存在很高的开挖失效或坍塌风险^[4],极易对邻近敏感建(构)筑物造成不可恢复的严重损害^[5]。为确保深基坑施工期间本体及其周边环境安全,非常有必要对基坑开挖变形进行预估并将其限制在可控范围内^[6],同时对施工期间发生的典型灾害诱因、机理以及应对措施展开研究,以期大幅降低复杂地质条件下城市深基坑施工风险。

国内外已有大量学者^[1,7-11]通过建立深基坑变形数据库对基坑变形开展统计分析。徐中华等^[9]收集了上海软土地区 93 个地连墙结合内支撑支护的深基坑工程案例,对墙体最大侧移及所在深度位置的分布范围进行统计分析。通过收集 592 个上海软黏土深基坑实例并建立相应变形数据库, Tan 等^[1]对 7 种不同开挖方式和 7 种不同挡土结构体系的围护结构侧移变形开展系统对比,同时对关键设计因素的影响进行量化分析。然而,上述绝大部分研究主要针对常见的软黏土地层,鲜有关注深厚富水砂土地层。由于富水砂土地下水位高、渗透性强且含水层厚度大^[3,12-14],基坑降水诱发的渗流场和应力场分布规律与软黏土有显著区别,容易造成坑外水位显著下降以及围护结构侧移量显著增加。因此,当前软土基坑变形的统计分析结果难以对富水砂土深基坑变形进行可靠预测。

为降低深基坑抽水对周边环境的不利影响,止水帷幕被广泛用于完全切断或延长坑内外地下水绕流路径^[5]。由于砂土自稳性差,在该土层中施作的止水帷幕质量难以保证,极易诱发穿墙渗漏灾害,造成水土快速流失,进而对邻近建(构)筑物及人员安全造成威胁^[3,12,15,16]。目前,国内外学者^[3,16-19]通过案例分析等手段对深基坑穿墙渗漏灾害展开了相关调查研究。例如, Tan 和 Lu^[19]对 2013 年 7 月上海某地铁车站深基坑地连墙渗水漏砂事件展开事故后调查,指出对轻微漏水现象的忽视以及承压含水层范围内地连墙接驳器存在缺陷是此事故发生的主要原因。总体而言,当前研究通过现场调查有效揭示了灾害诱因及演化路径,但主要针对单个或多个软黏土深基坑渗漏事

例;相比之下,目前鲜有文献对富水砂土深基坑地连墙渗漏事故展开系统研究,而该特殊地层往往更容易遭受土体侵蚀破坏。此外,当前研究缺乏不同地连墙渗漏灾害等级的明确划分标准,并且对富水砂土深基坑穿墙渗漏的影响范围以及系统应对策略鲜有报道。

鉴于此,本文以我国位于长江入海口的某滨海城市为研究对象,首先建立了深厚富水砂土地铁深基坑变形和地连墙渗漏灾害数据库;其次,借助统计分析手段,重点对施工期间围护结构侧向位移和坑外地表沉降这两大变形指标的分布规律进行探究并识别关键影响因素;最后,对富水砂土深基坑地连墙渗漏灾害进行类别划分、诱因识别并总结有效应对措施。

1 工程概况

1.1 工程简介

本研究依托于我国东南沿海地区某滨海城市的地铁 1 号线项目,该地铁线路范围内共涉及 33 个主体深基坑工程,本项目的具体信息如表 1 所示。

1.2 场址地质条件

施工场址内的土体类型以砂性土为主,局部夹杂粉质黏土薄层,主要土层及其物理力学参数如表 2 所示。场址地下水包含浅层潜水和下卧承压水两类,其中潜水位埋深约为 0.4~4.5 m;承压水水位埋深约为 2~5 m,主要赋存在⑤₁、⑤₃以及⑥层。如表 2 所示,粉土和砂土的黏聚力范围为 1.9~11.5 kPa、渗透系数为 0.44~66×10⁻⁴ cm/s,这表明基坑场址是典型的深厚富水砂土地层,具有黏聚力小、渗透性强以及砂土厚度大等特点。如表 1 所示,基坑开挖深度为 16.6~28.6 m,这表明施工主要涉及上部潜水含水层。为进一步评估土体性质,图 1 展示了潜水含水层中典型粉土(②和③₁层)和粉砂(③₂层)的级配曲线,并将 Tsuchida^[20]提出的液化评估包络线也绘制其中方便对比。可见,这三类典型土层的级配曲线均位于“潜在液化区”,这表明土体可侵蚀性强,易受邻近施工扰动或渗流影响。

此外,勘察表明该地铁 1 号线范围内有多个车站深基坑地质条件存在隔水层缺失的情况,即承压含水层与潜水含水层之间相互连通。因此,本文根据隔水层的数量将该地区水文地质条件划分为三种分布模式,即模式 I - 无隔水层,模式 II - 单一隔水层,模式 III - 多隔水层,如图 2 所示。表 1 表明 33 个地铁基坑中有 25 个为模式 II,6 个为模式 III,仅有 2 个为模式

I. 可见，模式 II 是该地区最典型的水文地质条件。

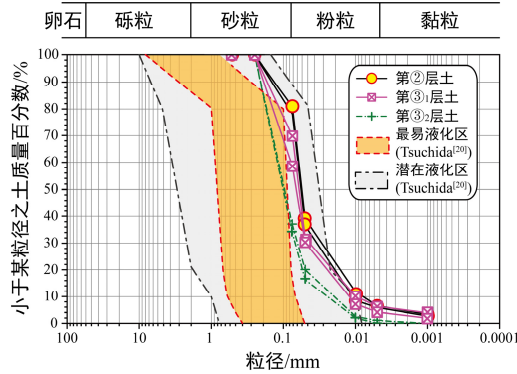


图 1 场址内典型砂层级配曲线

Fig. 1 Particle grading curves of typical sandy layers at the site

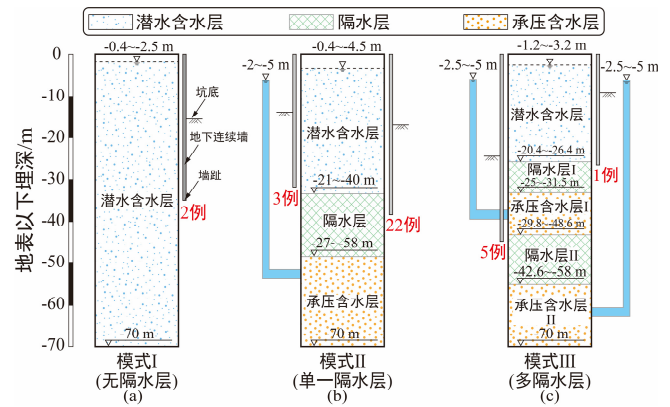


图 2 场址内 3 种典型水文地质条件

Fig. 2 Three typical hydrological conditions at the site

表 1 各地铁基坑信息汇总

Table 1 Information summary of subway excavations

基坑简称	尺寸 (长×宽×深)/m	水文模式	渗漏等级	施工工法
PZ	398×18.9~32×16.9~19.9	模式 II	I 级	顺作法
NTXR	—	模式 II	I 级	顺作法
JCC	206×18~19.7×16.9~23.8	模式 II	II 级	顺作法
HK	274×18.3×16.7~18.5	模式 II	II 级	顺作法
TZP	186×18.3~23.8×16.8~18.6	模式 II	III-1 级	顺作法
AS1	24.5×26.3×25.8~26.2	模式 II	I 级	顺作法
PXL1	465×18.3~19.3×16.4~18.6	模式 II	III-1 级	顺作法
AS2	28.2×22.2×23~23.5	模式 II	III-1 级	顺作法
SLF	202×21.3×17.4~26	模式 II	I 级	顺作法
CGL	270×18.3×16.8~18.5	模式 II	II 级	半盖挖顺作法
SG	204×18.3×16.8~18.6	模式 II	II 级	顺作法
CAD	180×19.3~26.4×17~18.5	模式 II	III-2 级	顺作法
HEX	282×19.7~27.2×16.9~18.5	模式 III	III-2 级	顺作法
HPQ	205/364×21.3~29.4×17.6~26.5	模式 III	III-2 级	半盖挖顺作法
YYQ	162×23.1×25.9~28.6	模式 III	III-2 级	半盖挖顺作法
UP	162×15.6~25.6×10.9~13.5	模式 III	III-1 级	半盖挖顺作法
WS	112×16.8~33.8×22.5~25.3	模式 III	III-2 级	半盖挖顺作法
XT	239×18.3~22.2×16.8~19.5	模式 II	III-2 级	半盖挖顺作法
WF	185/348×22.7~23.6×18~26.7	模式 II	III-2 级	半盖挖顺作法
CM	192×18.3×16.8~18.4	模式 III	III-1 级	半盖挖顺作法
GAC	284×18.3~23.6×16.8~18.6	模式 II	III-1 级	半盖挖顺作法
SJDD	260×18.3~21.5×18.6~20.2	模式 II	III-1 级	顺作法
NTL	470×19.3×17.6~19.3	模式 II	III-1 级	顺作法
NTU	224×20.7×16.7~18.6	模式 I	III-1 级	顺作法
PXL2	203×20.7×16.6~18.4	模式 I	II 级	顺作法
MC	370×21.7×17.1~26.2	模式 II	II 级	顺作法
JHDD	235×20.7~25.4×20.8~22.5	模式 II	无渗漏	顺作法
GT	206×20.7×16.9~18.9	模式 II	II 级	顺作法
ZLL	292×18.3~29.8×16.6~20.8	模式 II	II 级	顺作法
NBD	202×19.7×16.7~18.5	模式 II	I 级	顺作法
AS3	28×20.2×23.4	模式 II	II 级	顺作法
SC	288×21.3×16.6~18.9	模式 II	III-1 级	半盖挖顺作法
ZXL	470×18.3×16.7~18.4	模式 II	III-1 级	半盖挖顺作法

注：各地铁深基坑施工期间发生最严重的渗漏灾害等级定义为该基坑的渗漏等级。

表 2 土层主要物理力学参数

Table 2 Major physical and mechanical properties of soil layers

编号	厚度/m	土体类别	含水率/%	容重/ kN·m ⁻³	孔隙率	黏聚力/ kPa	摩擦角/°	$k_v/\times 10^{-4}$ cm·s ⁻¹	$k_h/\times 10^{-4}$ cm·s ⁻¹
①	1.2~6.0	杂填土	—	—	—	—	—	—	—
②	1.6~8.3	砂质粉土	27.2~31.3	18.2~19.0	0.78~0.91	7.4~11.5	20.3~31.3	0.22~1.8	0.12~1.1
③ ₁	1.4~10.0	砂质粉土夹粉砂	25.0~30.2	18.4~19.2	0.72~0.87	4.5~8.5	26.0~32.9	3.3~45	4.8~43
③ ₂	3.0~22.2	粉砂	25.3~29.7	18.2~19.2	0.72~0.84	3.9~7.0	29.2~33.0	1.4~55	4.5~44
④ ₁	0.0~13.1	粉质黏土	33.3~34.3	18.3~18.7	0.94~0.96	16.2~22.3	11.9~19.0	0.17~0.18	0.15~0.36
④ ₂	0.0~9.5	粉质黏土夹粉土	33.1~33.7	18.0~18.1	0.96~0.98	9.0~12.0	18.0~19.5	0.03~1.2	0.04~0.32
④ _{2t}	1.0~11.7	砂质粉土夹粉质黏土	30.9~32.1	18.2~18.4	0.89~0.92	6.0~8.0	21.0~25.0	0.27~12	0.07~17
⑤ ₁	1.5~16.9	粉砂夹粉土	27.4~30.0	18.4~19.0	0.75~0.95	3.0~6.2	28.5~32.5	0.98~33	1.4~23
⑤ _{1t}	0.0~14.1	粉质黏土夹粉土	30.6~31.4	18.3~18.5	0.91~0.92	7.0~12.0	22.0~23.5	0.07~0.27	0.03~0.1
⑤ ₂	0.0~14.5	砂质粉土夹粉质黏土	28.4~32.5	18.2~18.9	0.78~0.94	6.4~11.2	22.6~30.1	0.28~18	0.3~4.6
⑤ ₃	3.3~13.2	粉砂夹粉土	29.1~22.9	18.4~18.6	0.84~0.86	2.0~4.9	32.0~36.0	13~52	0.04~30
⑥	8.5~17.8	粉砂	24.1~29.2	18.6~19.0	0.72~0.84	1.9~3.0	30.0~36.5	30~66	10~57

注: k_v , 竖直向渗透系数; k_h , 水平向渗透系数。

1.3 开挖支护方案

该市地铁 1 号线深基坑工程均采用顺作法施工, 其中位于老城区的地铁基坑采用半盖挖顺作法进行施工来尽量降低施工对城市日常路面交通的干扰 (详见表 1)。挡土结构体系方面, 33 个深基坑均采用“地连墙+多道内支撑”的形式, 其中内支撑包括钢筋混凝土支撑和钢管支撑两类。此外, 由于富水砂土含水层厚度非常大, 通常情况下完全隔断坑内外水力联系难以实现或者不经济。因此, 在地连墙构造段墙趾下方增设 3~10 m 高的素混凝土墙段来延长地下水绕流路径进而降低坑内抽水 (尤其是承压含水层降水) 对周边环境的不利影响。其次, 为增强地连墙的防渗性, 采用 H 型钢的柔性接头形式。

2 富水砂土地铁深基坑变形性状

围护结构侧向位移和坑外地表沉降是基坑变形性状两大关键指标^[6]。考虑到富水砂土深基坑频发的渗漏灾害^[3], 本文收集了该地区 33 个地铁深基坑在正常施工和穿墙渗漏两种工况下的变形数据, 包括墙体侧向位移 (δ_h) 及其最大值 (δ_{hm})、墙体最大侧移量出现深度 (H_m)、坑外地表沉降 (δ_v) 及其最大值 (δ_{vm})、地表最大沉降量与坑边距离 (d_m)、墙体渗漏深度 (H_l) 以及事故诱发的地表沉降增量 ($\Delta\delta_{vl}$) 等。为全面揭示富水砂土地铁深基坑变形性状, 下文将从正常施工和穿墙渗漏两种工况对两大关键变形指标展开分析。

2.1 墙体侧向位移: 正常施工工况

(1) 总体概况

图 3(a) 绘制了墙体最大侧移与开挖深度 (H) 之间的关系。可见, 标准段 δ_{hm} 变化范围介于 $0.05\%H$ 和 $0.48\%H$ 之间, 平均值为 $0.27\%H$; 端头井段 δ_{hm} 变化范围则介于 $0.03\%H$ 和 $0.35\%H$ 之间, 平均值为 $0.19\%H$ 。显然, 深基坑标准段墙体侧移变形量值比端头井段更大, 这主要归因于空间角部效应, 后续章节将进一步对该加固效应展开量化分析。

为了与软土基坑变形量进行横向对比, 将软土地区典型基坑数据库^[1,2,7,8,10,11,21]的统计结果也绘制在图 3(a)中。显然, 富水砂土基坑墙体侧移要比 Peck^[7]统计的软黏土地区和 Clough 和 O'Rourke^[8]统计的硬黏土地区小, 比廖少明等^[2]统计的苏州硬黏土地区和 Hashash 等^[21]统计的波士顿中密硬质黏土地区要大, 与 Liu 等^[11]统计的常州粉质黏土地区相近; 此外, 该富水砂土地区的 δ_{hm}/H 范围与 Tan 和 Wang^[10]统计的上海黏土地铁基坑结果相近, 比 Tan

等^[1]统计的上海黏土地下室基坑结果更小。

(2) H_m 和 H 关系

图 3(b-c) 展示了墙体最大侧移值所在深度与开挖深度之间的关系, 其中 Tan 和 Wang^[10]统计的软土深基坑 H_m 分布包络线也绘制在图中。可见, 标准段地连墙的 H_m 主要介于 $(H-6, H+6)$ 的范围内, 端头井段地连墙的 H_m 则主要介于 $(H-8, H+8)$ 的范围内。总体而言, 富水砂土深基坑的 H_m 分布范围与上海软黏土地铁深基坑相近; 当 H 小于 10 m 时, 绝大部分 H_m 落在开挖面以下; 当 H 大于 10 m 时, 标准段和端头井段的 H_m 逐渐上移至开挖面以上, 这与 Tan 等^[6]在上海软黏土深基坑中观察到的变形特征一致。上述现象主要归因于深部基底土相较浅层土在约束墙体侧向变形上能提供更大的水平抗力。

(3) 角部效应

图 3(d) 表明了深基坑开挖结束时归一化墙体最大侧移量 (δ_{hm}/H) 与沿基坑纵边归一化距离 (d_h/L) 的关系, 其中 L 为基坑纵边长度、 d_h 为沿基坑纵边与最左侧端头井角点的距离。为对比富水砂土与软土深基坑的角部效应, Tan 等^[22]统计的上海地铁和地下室深基坑空间效应包络线也绘制在图中。可见, 与上海软土不同, 富水砂土地铁深基坑从 δ_{hm}/H 数据点分布上并未观察到显著的角部效应, 即 δ_{hm}/H 数据点分布的上、下包络线与 d_h/L 之间均无明显关联。上述现象可能归结于以下两个因素: 1) 该地区地铁深基坑沿其纵向方向划分成多块进行分段施工, 一定程度上削弱了角部效应; 2) 本文统计的基坑变形数据量过多, 这导致部分角部效应不明显的基坑掩盖了剩余基坑数据点的整体特征。因此, 本文进一步选取其中两个地铁车站深基坑的 δ_{hm}/H 数据进行分析 (图 3e)。可见, 尽管这两个基坑的 δ_{hm}/H 值要明显小于 Tan 等^[22]提出的上包络线, 但仍表现出了与上海软土地铁基坑类似的角部效应。这表明深基坑的角部效应会受施工工艺的显著影响。

(4) 关键因素影响分析

Tan 等^[1]指出深基坑变形性状受地质条件、挡土结构体系、基坑几何形状和尺寸、施工工法以及施工工艺等因素影响。如前所述, 本文研究的 33 个富水砂土地铁基坑的土体特性 (富水砂土)、挡土结构体系 (地连墙结合多道内支撑)、几何形状 (狭长型) 以及施工工法 (顺作法) 基本一致, 主要差异性体现在水文地质条件、墙趾插入深度、开挖平面尺寸、开挖工期以及墙体暴露长度等方面。因此, 这些深基坑的变形性状可能受到以下六个关键因素的影响:

降水模式、墙趾埋置条件、角部效应、开挖工期、墙体暴露长度以及插入比，下面将采用统计手段对

各个因素的影响进行逐一量化分析。

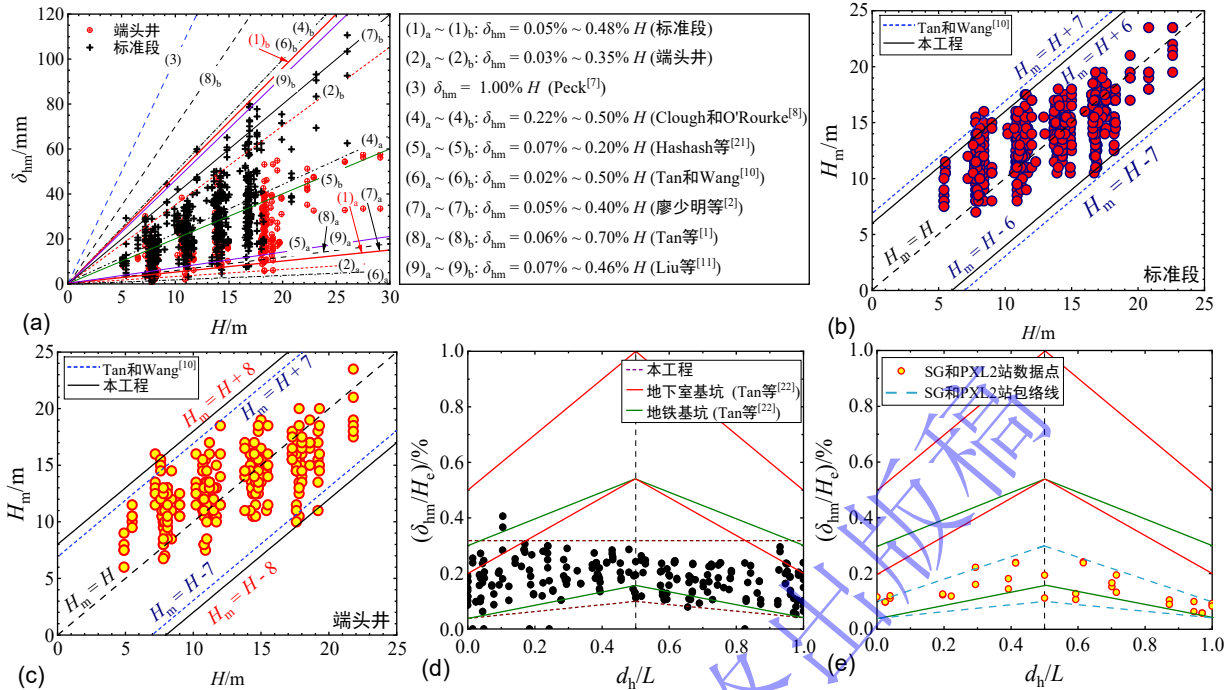


图3 墙体侧向位移分布: (a) δ_{hm} 与 H 关系; (b-c) H_m 与 H 关系; (d-e) δ_{hm}/H_e 与 d_h/L 关系

Fig. 3 Distribution of lateral wall deflections: (a) relationship between δ_{hm} and H ; (b-c) relationship between H_m and H ; (d-e) relationship between δ_{hm}/H_e and d_h/L

①降水模式: 由于富水砂土地下水位较高, 基坑开挖期间需进行坑内降水^[13,19]。如图2所示, 对于模式I而言, 深基坑仅需潜水降水; 对于模式II和III而言, 当开挖深度较小时仅需潜水降水, 而当开挖深度较大时需同时进行潜水和承压水降水。因此, 图4(a)统计了不同降水条件下归一化墙体最大侧移值的分布, 其中IQR表示箱线图数据中间50%的分布范围, 分布曲线代表对应数据点的概率分布密度函数。可见, 模式I条件下仅潜水降水时的 δ_{hm}/H_e 要大于模式II和III; 这归因于模式I条件下止水帷幕未隔断坑内外水力联系, 而模式II和III条件下止水帷幕通常插至隔水层或下卧承压层中, 基本可以隔断上部潜水层坑内外水力联系。此外, 对于模式II和III而言, 潜水和承压水降水工况的 δ_{hm}/H_e 要明显大于仅潜水降水工况; 这归因于隔水层较薄、渗透系数较大(0.003~1.037 m/day), 无法完全隔断上下层含水层之间的水力联系, 因此承压水减压降水会造成墙体侧移的显著增加。

②墙趾埋置条件: 当基坑场址内存在隔水层时, 地连墙墙趾可能插至软弱隔水层或者硬质含水层中。因此, 图4(b)绘制了不同墙趾埋置条件下的 δ_{hm}/H_e 分布箱线图。结果表明, 墙趾插入到软弱黏土时的 δ_{hm}/H_e 整体要比墙趾插入到硬质砂土时要更大, 这主要归因于砂土对挡墙的侧向抗力要明显大于粉质黏土。

③角部效应: 图4(c)统计了 $\delta_{center}/\delta_{corner}$ 与基坑平面尺寸长宽比(AR)的关系, 其中 δ_{center} 和 δ_{corner} 分别表示开挖至坑底时基坑中部和角部位置对应的 δ_{hm} 。显然, 与章节2.1节(3)中分析结果一致, 富水砂土地铁深基坑也存在较为明显的角部效应, 但部分基坑受施工工艺影响可能导致其角部效应不明显。

④开挖工期: 图4(d)展示了不同开挖工期时 δ_{hm}/H_e 的分布。可见, 富水砂土地铁深基坑的墙体侧移与开挖工期之间不存在明显相关性, 这与上海软土基坑变形特征形成鲜明对比^[6]。这种差异归因于软黏土在恒定加、卸载下存在蠕变特性, 而砂土则不明显。

⑤墙体暴露长度: 图4(e)展示了不同归一化墙体暴露长度(L_s/H_e)范围内对应的墙体最大侧移分布; 总体而言, L_s/H_e 越大, 对应的 δ_{hm}/H_e 呈增大趋势。图4(f)进一步绘制了 L_s/H_e 与 δ_{hm}/H_e 的散点分布图; 可见, δ_{hm}/H_e 数据点分布较为离散, 但 δ_{hm}/H_e 均值总体上仍呈现出随 L_s/H_e 增大而明显增加的趋势。

⑥插入比: 为探究墙体侧移与插入比(R_p)的关系, 图4(g)绘制了 R_p 与 δ_{hm}/H_e 的散点分布图。显然, 不同 R_p 下的 δ_{hm}/H_e 分布非常宽泛, 两者之间不存在明显关联, 这与上海软土基坑变形统计结果吻合^[1]。因此, 当插入比在满足抗倾覆稳定性、坑底隆起稳定性以及地下水渗透稳定性前提下, 继续增加 R_p 意义不大。

(5) 影响因素重要性分析

上述结果表明,满足稳定性条件的插入比和开挖工期对基坑变形影响非常小;相比之下,空间角部效应、降水模式、墙趾埋置条件以及墙体暴露长度是主

要影响因素。当墙趾插至软弱黏性土层时,墙体暴露长度和降水模式最为重要,其次是角部效应;当墙趾插至密实砂性土层时,降水模式的影响最为重要,随后是墙体暴露长度和角部效应。

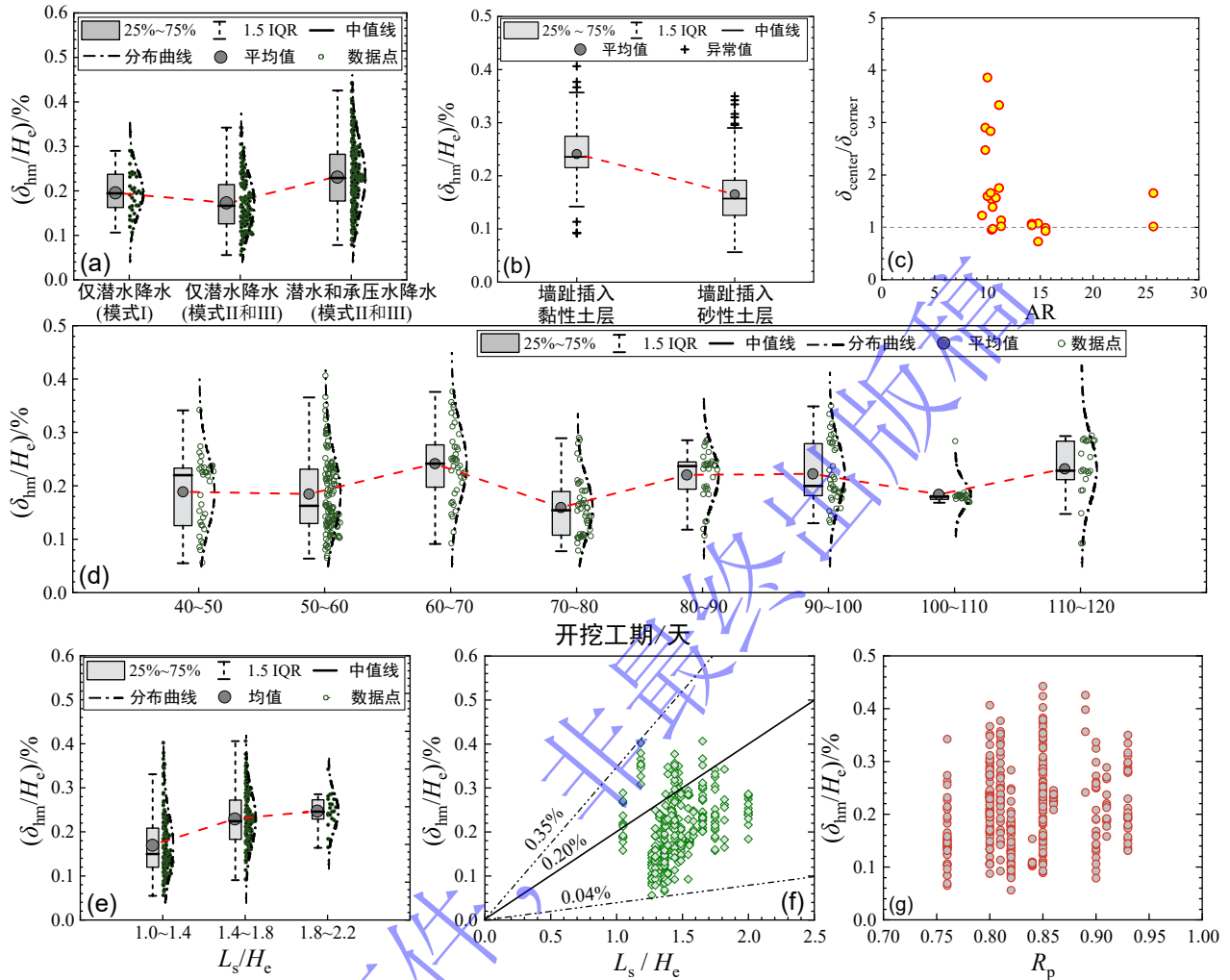


图4 各关键因素对墙体侧移影响: (a)降水模式; (b)墙趾埋置条件; (c)角部效应; (d)开挖工期; (e-f)墙体暴露长度; (g)插入比
Fig.4 Effects of various critical factors on lateral wall deflections: (a) dewatering modes; (b) burial conditions of wall toes; (c) spatial-corner effect; (d) excavation duration; (e-f) wall exposure length; (g) penetration ratio

2.2 墙体侧向位移: 穿墙渗漏工况

当富水砂土深基坑发生穿墙渗漏灾害时,地下水渗流路径会显著缩短,将导致墙背渗漏点附近的水力梯度、渗流力以及侧向水土合力迅速增加,墙体会受到明显的推挤作用进而造成侧向变形量突增^[12]。为快速控制事故发展,除了坑内进行堆码反压外,通常还会在墙后漏点附近进行注浆来封堵潜在渗漏通道并填充地层中形成的临时空腔^[16];然而,如果浆液凝结性较差或者注浆压力控制不当,反而容易起负面作用造成墙体侧移短时间内剧增,进而威胁基坑稳定性及周边环境安全^[18]。因此,本文选取了该富水砂土地区深基坑施工期间发生的两起穿墙渗漏典型事例,以揭示渗漏工况下墙体侧移的演化发展特征。图5和图6分别表示这两个案例对应的基坑平面及典型剖面示意图。

(1) 事故案例1

如图5(a)所示,案例1发生在深基坑WS的西端头井,场址内存在两个隔水层,其中承压含水层I以④_{2t}和⑤₁层为主。2019年10月1日,该基坑开挖至坑底并浇筑了300mm厚的素混凝土垫层。由于10月1日至10月5日期间连续降雨,本应在垫层浇筑后立即施作的1.2m厚底板被推迟完成。10月6日凌晨4:05,西端头井突发坑底突涌事故并伴随管涌和流砂现象。随后,西端头井南侧地表出现大范围塌陷并且邻近桩基建筑严重开裂。因此,施工单位立即组织人员采取一系列补救措施来避免情况恶化,具体包括:1)迅速开启西端头井内的承压含水层I减压降水井来降低过高的承压水头;2)立即采用三层结构材料(上下

两层为棉絮，中间层为水泥袋）对坑底涌水口进行封堵，并在该材料上部堆积快硬水泥袋进行反压；3)由于前两个措施收效甚微，随后决定在涌水口上方浇筑锥形混凝土围堰来反压突涌泥砂，并在该范围混凝土中预留注浆管；4)待首层混凝土初凝后通过这些预留注浆管往基底土注入水泥-水玻璃双液浆，达到快速固结效果；5)最后，在西端头井地连墙南侧渗漏点附近20~30 m 深度范围内的地层中注入聚氨酯单液浆（注浆压力0.4~0.6 Mpa）来封堵可能的渗漏路径。截至10月6日下午17:00，深基坑突涌情况终于得到控制，不再涌水涌砂。灾后调查表明，本事故是由于承压含水层I范围内的地连墙墙板或接缝存在既有缺陷，而坑内降水引起的地连墙内外高水头差以及上方盖板传

递下来的交通荷载振动作用造成缺陷进一步扩展；连续降雨引起坑外承压含水层I水位上升0.8 m，导致缺陷发展成贯通通道，诱发渗漏事故；随后，坑内承压含水层水头迅速增大，最终造成坑底局部突涌破坏^[13]。

图7(a)展示了案例1渗漏期间墙体侧移的发展。显然，渗漏点附近测点P2的 δ_h 值在10月6日出现突增，其最大增量为4.8 mm，高于变形控制速率4 mm/天。相比之下，远离渗漏点的测点P1和P3在事故期间墙体侧移无明显变化。考虑到本次渗漏期间墙外封堵注浆压力合理（0.4~0.6 MPa）^[7]，因此渗漏点附近 δ_h 的突增应归因于渗流路径缩短引起的动水力突增造成了墙背侧向水土合力显著增加，而非注浆压力不当。

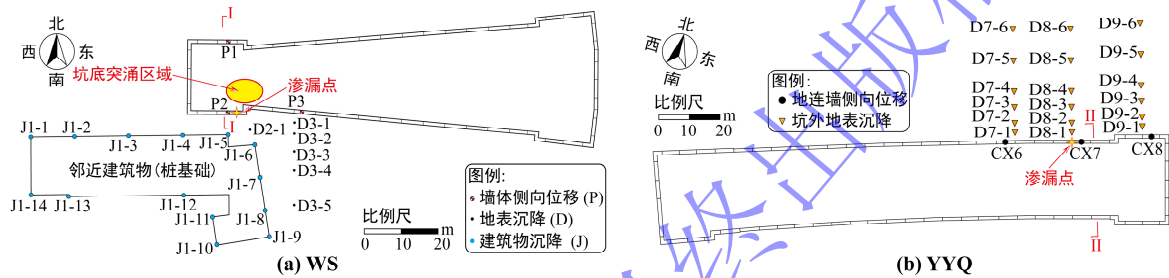


图5 两起渗漏事例深基坑平面布置图: (a) 案例1 (WS); (b) 案例2 (YYQ)

Fig.5 Plan layouts of subway excavations for two typical leaking events: (a) case 1 (WS); (b) case 2 (YYQ)

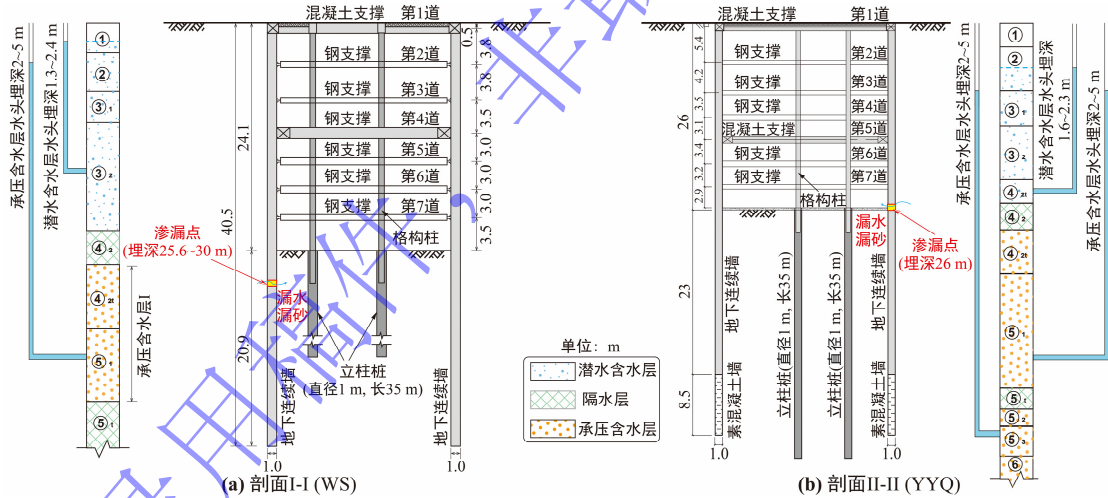


图6 两起渗漏事例深基坑典型剖面示意图: (a) 案例1 (WS); (b) 案例2 (YYQ)

Fig.6 Typical cross-sections of subway excavations for two typical leaking events: (a) case 1 (WS); (b) case 2 (YYQ)

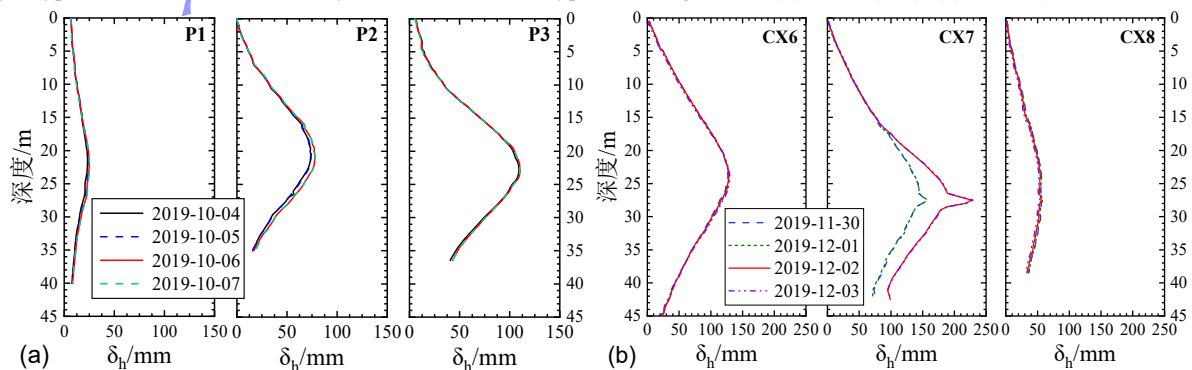


图7 渗漏事故期间墙体侧移剖面发展: (a) 案例1 (WS); (b) 案例2 (YYQ)

Fig.7 Developments of lateral wall displacement during leaking accidents: (a) case 1 (WS); (b) case 2 (YYQ)

(2) 事故案例 2

如图 5 (b) 所示, 案例 2 发生在深基坑 YYQ 的标准段。2019 年 12 月 1 日上午 10:00 左右, 基坑开挖至坑底; 随后, 当施工人员准备浇筑底板时, 发现地连墙接缝处严重漏水并夹带泥砂; 然而, 施工单位为加快速度, 仅在坑内渗漏点处采用砂袋进行初步反压。12 月 1 日下午 13:00 左右, 初始渗漏点处涌水涌砂量明显加大, 施工单位立即在坑内继续堆放反压砂袋和双快 (快凝快硬) 水泥袋, 并在坑外钻孔注入聚氨酯单液浆和水泥-水玻璃双液浆 (初始注浆压力 0.4~0.6 MPa); 然而, 涌水涌砂现象并未得到有效遏制反而呈现加剧态势, 因此增大了墙后注浆压力 (后续注浆压力为 1.5~1.8 MPa)。截至 12 月 1 日下午 18:00 左右, 本次事故最终得以控制, 不再涌水涌砂。

图 7(b) 展示了案例 2 渗漏期间墙体侧移的发展。可见, 渗漏点附近测点 CX7 的 δ_h 值在 12 月 1 日出现剧增, 其中墙体最大侧移增量达 70.1 mm, 出现在渗漏点埋深附近 (约 27 m); 此外, 墙体 16~42 m 深度范围内经历了显著突增, 该范围与坑外注浆范围 (16~36 m) 接近。相比之下, 远离渗漏点的测点 CX6 和 CX8 在事故期间侧移无明显增长。通过对比案例 1 和 2 在渗漏期间 δ_h 剖面的变化, 发现案例 2 墙体侧移的突增行为不论是量值还是影响范围均要显著大于案例 1, 并且渗漏点附近的墙体侧移增量要明显大于其它位置, 呈现“渗漏点局部位置墙体侧移剧增”的特点。这主要归因于墙外封堵注浆压力 (1.5~1.8 MPa) 远超推荐值 (0.4~0.6 MPa) [3]。因此, 富水砂土深基坑渗漏事故的处置需严格控制注浆压力, 避免因压力过大造成墙体侧移剧增, 进而危及基坑和周边环境的安全。

2.3 坑外地表沉降: 正常施工工况

图 8 (a) 绘制了正常施工工况下富水砂土深基坑开挖降水引起的归一化地表沉降 (δ_v/H_e) 与归一化距离之间 (d/H_e) 的关系, 其中 d 表示坑外测点垂直于坑边的横向距离。结果表明, δ_v/H_e 数据散点落在一个典型的沉降凹槽内 (即图中包络线 ABC), 最大量值 δ_{vm}/H_e 出现在墙后约 $0.5H_e$ 。为与软土地区进行对比, Hashash 等 [21] 和 Tan 和 Lu [23] 的统计结果也绘制在图 8(a) 中。显然, 绝大部分数据点落在 Hashash 等 [21] 基于波士顿中密硬质黏土开挖项目提出的包络线内, 并呈现随 d/H_e 增加而逐渐减小的趋势; 与 Tan 和 Lu [23] 基于上海施工水平较差的地铁基坑地表沉降变形提出的包络线相比, 发现: 1) 富水砂土地区最大沉降量 ($\delta_{vm}/H_e = 0.26\%$) 要远低于上海软土地区 ($\delta_{vm}/H_e = 0.5\%$); 2) 富水砂土地区 δ_{vm}/H_e 出现在墙后 $0.5H_e$ 附近, 而上

海软土地区 δ_{vm}/H_e 出现在墙后 (0.75~1.0) H_e 范围内。

2.4 坑外地表沉降: 穿墙渗漏工况

富水砂土深基坑穿墙渗漏容易造成坑外大量水土流失, 进而引发地表大范围沉降以及邻近建筑物的严重损害 [13]。因此, 本文收集了该地区穿墙渗漏灾害当天诱发的地表沉降增量 ($\Delta\delta_{v1}$)、突沉测点与渗漏点的平面距离 (d_1) 以及墙体渗漏深度 (H_1) 等指标来评估渗漏灾害的潜在影响范围。图 8 (b) 绘制了与 H_1 归一化后 $\Delta\delta_{v1}$ 与 d_1 的关系。可见, 绝大部分 $\Delta\delta_{v1}/H_1$ 数值小于 0.5%; 若灾后不及时堵漏, 将在短时间内造成地表严重突沉 (如图中数据点 $1.78\%H_1$)。其次, 所有 $\Delta\delta_{v1}/H_1$ 数据点位于 $2H_1$ 范围内并落在一个三角形区域, 这表明富水砂土深基坑穿墙渗漏诱发的坑外地层扰动区呈“倒圆锥形”分布, 这与 Tan 和 Lu [19] 基于上海某深基坑穿墙渗漏案例实测分析得到的扰动区分布特征一致。

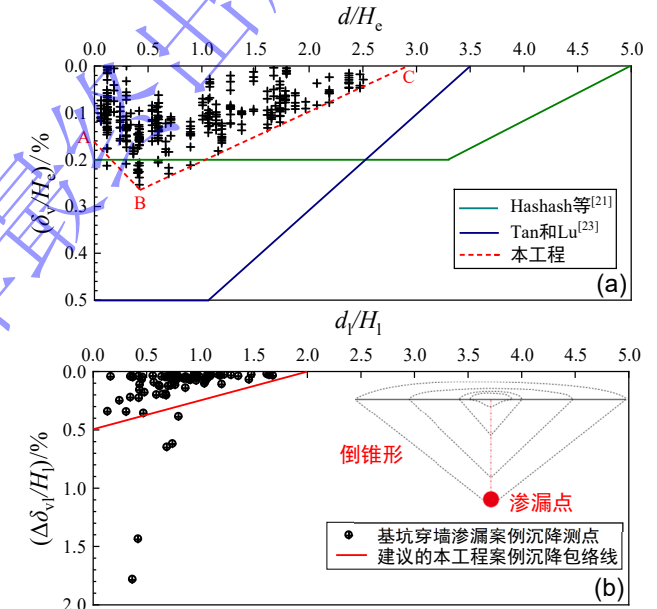


图 8 富水砂土地铁基坑墙后地表沉降分布: (a) 无渗漏工况; (b) 渗漏工况

Fig. 8 Distribution of ground settlements behind walls during deep excavation in water-rich sand: (a) no leaking; (b) leaking

3 富水砂土地铁深基坑穿墙渗漏灾害分析及应对策略

为增进对富水砂土地铁深基坑渗漏灾害的认识并降低工程风险, 非常有必要对灾害特征及应对策略进行研究。因此, 本文收集了该滨海城市基坑施工期间数百例严重程度不一的渗漏事件, 对穿墙渗漏灾害进行分类及关键影响因素识别, 并系统总结相应对策。

3.1 灾害主要类型

图 9 展示了该富水砂土地区地铁深基坑施工期间地连墙的渗漏情况。可见, 穿墙渗漏包括如下典型情

形：墙面或接头处轻微渗水（图 9a~9c）、墙板大规模渗水或漏水（图 9d~9f）以及墙板缺陷处严重漏水漏砂（图 9g~9i）。为避免渗漏灾害快速恶化，一旦观察到地连墙出现渗水漏砂的情况，现场需立即在漏点附近堆码反压实现快速封堵（图 9j~9l）。借助描述统计方法，本文根据渗水漏砂程度将数百例穿墙渗漏灾害事件划分为三种主要类型，接下来将逐一进行描述。

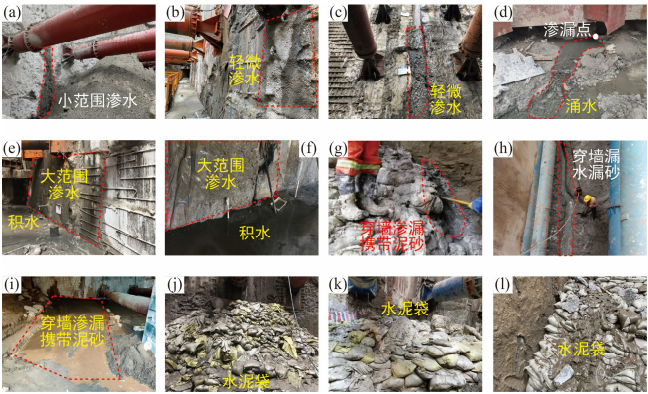


图 9 深基坑穿墙渗漏灾害现场照片：(a-c) 轻微渗水；(d-f) 大量渗水、漏水；(g-i) 严重漏水漏砂；(j-l) 封堵渗漏点
Fig. 9 In situ photos of through-wall leaking during excavation: (a-c) minor seepage; (d-f) massive water leakage; (g-i) severe through-wall ingress of water-soils; (j-l) sealing off the leaky spots

(1) I 级灾害：轻微渗水或漏水且无土体流失
I 级灾害是富水砂土深基坑施工期间最为普遍的渗漏现象。墙板接缝或墙面处既有的裂缝为渗水提供了细微通道，进而在内侧墙面形成湿渍（图 9a~9c）。由于渗流通道尺寸很小，土颗粒难以通过。因此，在 I 级渗漏中观察不到土体流失，坑外水位轻微下降。

(2) II 级灾害：严重渗水或漏水但土体流失较轻微

随着开挖深度增加，坑内外水压差显著增大，这会导致墙体内部渗流通道逐渐扩大，增加坑外地下水流失量。与 I 级灾害类似，II 级灾害漏损口附近通常观察不到明显的土体流失（图 9d~9f）。尽管 II 级渗漏灾害不会造成墙后明显的地层损失，但一定程度上会引起坑外潜水或承压水水位的下降，进而导致地层压缩沉降。因此，灾后也应对渗漏通道及时进行封堵。

(3) III 级灾害：严重漏水漏砂并造成坑外地层显著损失

一旦墙体内部存在较大缺陷或者墙背在高水压的持续作用下，初始轻微渗漏很容易迅速恶化成严重渗漏，会造成坑外地层严重水土流失（图 9g~9i）。考虑到及时封堵可有效控制事故对周边环境的不利影响，因此本文将 III 级灾害进一步划分为 III-1 和 III-2 级灾害。若 III 级灾害对基坑本体及周边环境均无显著影响，视为 III-1 级；反之，则视为 III-2 级。本文将各关

键变形指标的最大日变化率和最大累计量作为这两个子等级的判断依据，渗漏灾害等级的具体划分流程及评估指标如图 10 所示。两个子等级详细定义如下：① III-1 级：各关键变形指标的最大日变化率和累计量至少有一个低于警戒值^[24]；② III-2 级：至少有一个关键变形指标的最大日变化率和累计量均不低于警戒值。

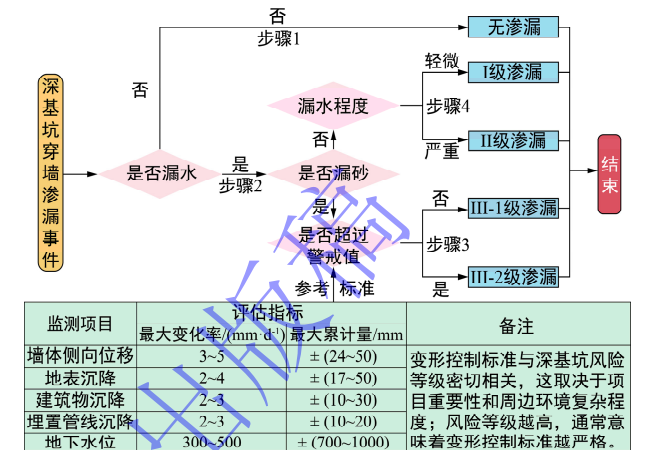


图 10 富水砂土深基坑渗漏灾害等级划分流程图
Fig.10 Flowchart for classifying a leaking event during deep excavation in water-rich sand

3.2 灾害主要原因

准确对渗漏灾害进行诊断对于制定有效对策至关重要。本文将从技术缺陷和土体特性两方面探讨富水砂土深基坑施工期间诱发地连墙渗漏的主要原因。

(1) 地连墙墙板露筋

由于地连墙施工技术缺陷，部分墙板钢筋局部或全部外露，这导致墙板上形成了明显裂缝、裂隙或孔洞。在墙背高水压作用下，露筋墙板极易形成渗漏通道。如图 11(a-c)所示，墙板露筋可划分为三种程度：少量钢筋局部外露(轻微)、部分钢筋完全外露(中等)、部分钢筋完全外露且墙内存在空洞(严重)。墙板露筋主要归结于槽内泥浆渣清理不干净、钢筋笼定位不准或垂直度不够以及接驳器钢筋密度过大等原因。



图 11 地连墙墙板缺陷现场照片：(a-c) 墙板露筋；(d-f) 墙面鼓包；(g-i) 接缝破损

Fig.11 In situ photos of diaphragm wall panels in poor qualities:
(a-c) exposure of steel bars; (d-f) local bulging of diaphragm wall face; (g-i) flawed joints of diaphragm wall panels
(2) 地连墙墙面鼓包

由于砂土在水流作用下的失稳特性，这导致地连墙施作期间泥浆槽壁局部位置容易发生坍塌，进而在槽外地层中形成空腔。因此，在墙体浇筑期间，空腔将被夹带着泥渣的混凝土所填满，导致墙体边界横向扩展，即地连墙面板出现局部鼓包（图 11d~11f）。类似地，地连墙墙面鼓包也可划分为三个等级：轻微、中等和严重。此外，泥浆参数（如密度、粘度、含砂量以及 PH 值）不当也会加剧槽壁坍塌的现象^[17,19]。在地连墙墙板内部形成的膨润土夹杂物会随时间不断被地下水冲蚀带走，最终形成了贯通的渗流路径。

(3) 地连墙接缝缺陷

由于技术限制，地连墙无法一次性浇筑完成，需分段施作^[19]。因此，地连墙接缝处是最容易发生渗漏的薄弱位置，造成了大量的深基坑穿墙渗漏事故^[3,17]。虽然本文研究的富水砂土地铁深基坑在地连墙施作期间均采用 H 型钢接头来增强墙板间的水密性，但施工期间仍然频繁发生接缝处渗漏灾害（图 11g~11i）。总体而言，地连墙接缝缺陷可以归结于接头表面泥浆沉渣清理不干净、H 型钢或地连墙面板垂直度不够以及基坑墙体侧向变形过大导致的接缝处开裂。

(4) 复杂水文地质条件

由于砂土在水流作用下极易失稳，这导致地连墙施作期间泥浆槽壁坍塌现象非常普遍。一旦墙体发生渗漏，坑内外的地下水渗流路径将被显著缩短。此时，渗漏缺口处的地下水流速以及渗流力将大幅提高，会对附近的可液化土颗粒造成严重扰动。在流动地下水的剧烈扰动下，这些土体将丧失强度，随后大量水土涌入坑内并伴随着对周边环境的不可恢复性损害^[5]。

3.3 灾害主要处置措施

为降低富水砂土深基坑穿墙渗漏灾害发生频次及其不利影响，及时采取合理的墙体渗漏检测和灾后应急堵漏措施。本文从“灾前预防和灾后处置”的角度系统总结了相关应对措施和事项，如图 12 所示。

(1) 灾前预防措施

由于富水砂土自稳性差，地连墙施工引起的墙体缺陷问题通常难以避免。因此，基坑开挖前对缺陷位置进行精准定位并采取有效措施提前封堵，可大幅降低灾害发生率。当前，地球物理法和水文地质法是对地连墙漏损点位置进行探测的主要手段^[3,16]。地球物理探测法包括超声波透射法、同位素和温度示踪法、光纤光栅传感技术和高密度电法等^[16]，而水文地质探测法则以现场抽水试验为主^[25,26]。利用上述方法确定

好渗漏点位置及尺寸后，可采取袖阀管注浆^[17]或高压旋喷注浆^[19]等措施进行提前堵漏。若需重点保护的基坑邻近建筑物周边地连墙幅段存在较多缺陷，可考虑在基坑与建筑物间设置隔离墙进行预防保护^[12]。



图 12 富水砂土深基坑地连墙渗漏灾害处置措施总结

Fig.12 Summary of countermeasures for through-wall leakages during deep excavation in water-rich sandy strata

(2) 灾后应急堵漏措施

如图 13 (a) 所示，灾后应急堵漏措施包括：①灾害发生后，坑内立即采用砂袋和双快水泥等材料在渗漏处进行堆码反压形成半锥形围堰；②立即对基坑本体及周边地表、建（构）筑物和管线等加密监测；③在渗漏点后方钻取四个竖孔，中间两钻孔迅速注入聚氨酯浆液来尽快封堵渗流路径；④堵漏成功后，在剩余钻孔中注入水泥-水玻璃双液浆对地层临时空洞进行填充，其中推荐注浆压力为 0.4~0.6 MPa；⑤若灾害仍无法控制，可采取地层冻结方法进行处理^[17]；⑥若冻结法仍失效，则往坑内灌水来平衡坑内外的水压^[18]。

(3) 灾后后续加固措施

对于 III 级严重渗漏而言，大量水土涌入坑内会淹没开挖面，造成基底土强度降低并可能诱发隔水层水力压裂破坏。尽管实施了前述灾后应急堵漏措施，仍可能在原墙体破损点再次发生渗漏。因此，有必要进一步采取措施来提高原漏损点附近的地连墙水密性，并对灾害潜在影响区内的基底土进行加固处理。灾后后续加固措施具体如下：①如图 13 (b) 所示，对墙体渗漏点后方的一个方体区域进行注浆；其中，外围区域注入水泥-水玻璃双液浆形成止水帷幕，内部区域则注入水泥单液浆形成加固体；②注浆完成后拆除围堰，然后用钢板结合膨胀螺栓对地连墙渗漏点进行固定封堵，钢板与墙面之间的缝隙用 C30 细石混凝土进行填充（图 13c）；③对坑底主要浸泡区域掺入 10% 的水泥

进行拌合加固处理(图 13d);④备用措施方面,在坑外注浆加固区周围布置三个应急降水井(图 13d);此外,可在坑内外增设注浆孔同时提高渗漏点附近墙体薄弱处的支撑刚度^[18],进一步提升安全冗余度;⑤若事故对邻近建筑造成了严重损害,可制定精细化注浆方案对建筑基础下方地层进行加固,恢复其基底承载力;若处置效果不佳,可进一步考虑桩基托换方案^[5]。

借助上述全面的处置措施,有效控制了该地铁 1 号线基坑渗漏灾害对工程及周边环境造成的不利影响,同时也大幅降低了后续地铁 2 号线基坑渗漏灾害频次。

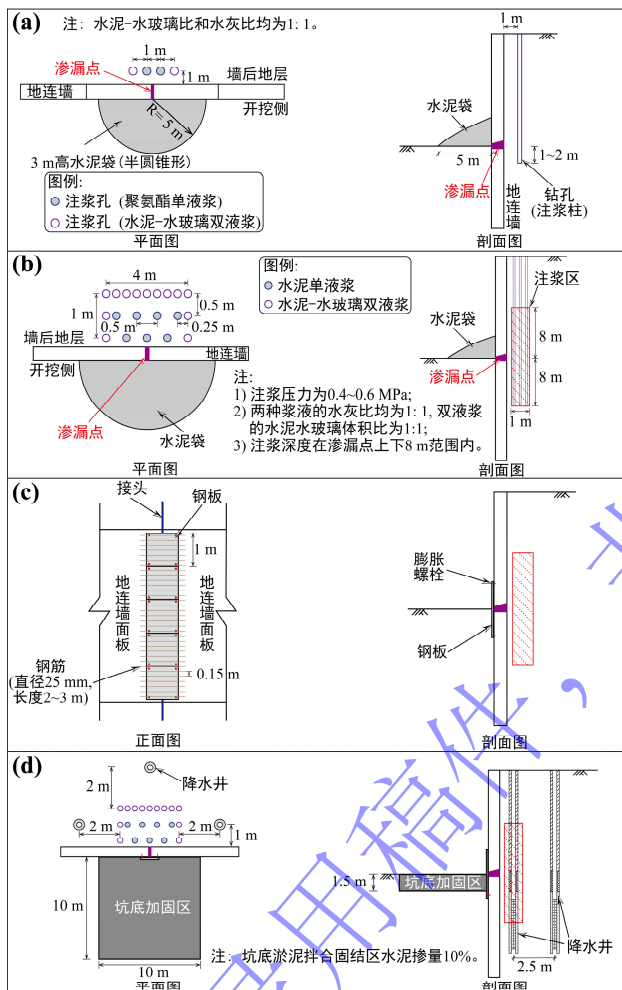


图 13 渗漏事件灾后处置示意图: (a) 应急堵漏措施; (b-d) 后续加固措施

Fig.13 Schematic diagrams of post-failure measures for through-wall leaking events: (a) emergency remedial measures; (b-d) subsequent strengthening measures

4 结 论

本文首先收集并整理了深厚富水砂土地铁深基坑变形和穿墙渗漏灾害数据库。其次,开展了正常施工和渗漏两种工况下深基坑墙体侧移和坑外地表沉降变形规律统计分析。最后,对上百例富水砂土穿墙渗漏事件进行分类、原因识别及措施总结,主要结论如下:

(1) 正常施工时,标准段和端头井段的 δ_{hm} 统计范围分别为 $(0.05\% \sim 0.48\%)H$ 和 $(0.03\% \sim 0.35\%)H$,均值分别为 $0.27\%H$ 和 $0.19\%H$;标准段和端头井段的 H_m 范围分别为 $(H-6, H+6)$ 和 $(H-8, H+8)$,当 H 小于 10 m 时绝大部分 H_m 位于开挖面以下; δ_v/H_e 的数据点落在一个典型凹槽内,其中 δ_{vm}/H_e 出现在墙后约 $0.5H_e$ 。

(2) 富水砂土地铁深基坑的墙体侧向位移主要受降水模式、墙趾埋置条件、角部效应以及墙体暴露长度的影响,而与开挖工期和插入比的关联较小。

(3) 穿墙渗漏时,渗漏点附近墙体侧移量突增,这主要归结于渗流力导致的墙背侧向水土合力迅速增加以及注浆压力过大两方面原因;其中,注浆压力过大造成的墙体侧移突增不论是量值还是影响深度均明显更大。因此,灾后应急注浆时需严格控制压力大小。沉降方面,渗漏灾害引起的绝大部分 $\Delta\delta_{v1}/H_1$ 均小于 0.5% ,主要影响区域可延伸至坑外 $2H_1$,富水砂土深基坑穿墙渗漏诱发的坑外扰动区呈“倒圆锥形”分布。

(4) 富水砂土深基坑渗漏灾害可划分为轻微渗水无土体流失(I级)、严重渗漏水轻微土体流失(II级)以及大量漏水漏砂(III级),其中III级可根据灾害对基坑及周边环境的影响程度进一步划分为III-1和III-2级。此外,地连墙墙板露筋、墙面鼓包、接缝缺陷以及富水砂土复杂的水文地质特性是渗漏灾害的主要诱因。

(5) 从“灾前预防和灾后应急处置”的角度出发系统总结了灾前渗漏点提前探测和封堵、灾后应急堵漏以及后续地层加固等应对措施,能够有效降低富水砂土深基坑穿墙渗漏灾害发生率并控制其不利影响。

参考文献:

- [1] TAN Y, FAN D, LU Y. Statistical analyses on a database of deep excavations in Shanghai soft clays in China from 1995-2018[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2022, 27(1): 04021067.
- [2] 廖少明, 魏仕锋, 谭 勇, 等. 苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 458-469. (LIAO Shaoming, WEI Shifeng, TAN Yong, et al. Field performance of large-scale deep excavations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 458-469. (in Chinese))
- [3] LIU J C, TAN Y. Review of through-wall leaking incidents during excavation of the subway stations of Nantong metro line 1 in thick water-rich sandy strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 135: 105056.
- [4] TAN Y, JIANG W, LUO W, et al. Longitudinal sliding event during excavation of Feng-Qi station of Hangzhou metro line 1: postfailure investigation[J]. Journal of Performance of

- Constructed Facilities, 2018, **32**(2): 04018039.
- [5] LIU J C, TAN Y, LIAO S M. Protection of a 193.5-m high concrete tube-shape TV tower close to subway excavations[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2023, **37**(5): 04023043.
- [6] TAN Y, LI M. Measured performance of a 26 m deep top-down excavation in downtown Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**: 704-719.
- [7] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[J]. proc.int.conf.on smfe, 1969.
- [8] CLOUGH G W. Construction induced movements of in situ walls[J]. Design & Performance of Earth Retaining Structures, 1990.
- [9] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(8): 81-86. (XU Zhonghua, WANG Jianhua, WANG Weidong. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(8): 81-86. (in Chinese))
- [10] TAN Y, WANG D. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. I: bottom-up construction of the central cylindrical shaft[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(11): 1875-1893.
- [11] LIU B, XU W, ZHANG D, et al. Deformation behaviors and control indexes of metro-station deep excavations based on case histories[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, **122**: 104400.
- [12] 刘俊城, 谭 勇, 宋享桦, 等. 富水砂土基坑渗水对侧墙变形和周边环境的影响[J]. 浙江大学学报(工学版) 2023, **57**(3): 530-541. (LIU Juncheng, TAN Yong, SONG Xianghua, et al. Effects of through-wall leaking during excavation in water-rich sand on lateral wall deflections and surrounding environment[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, **57**(3): 530-541. (in Chinese))
- [13] LIU J C, TAN Y. Hydraulic fracture failure during excavation of a working shaft for subway station: forensic diagnosis and postfailure rehabilitation[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, **155**: 107750.
- [14] LIU J C, TAN Y, CHAO H, et al. Investigation on failure of deep excavations in erodible sandy strata triggered by heavy rainfall[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, **164**: 108733.
- [15] 郑 刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(6): 1-24. (ZHENG Gang, ZHU Hehua, LIU Xinrong, et al. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(6): 1-24. (in Chinese))
- [16] 刘俊城, 谭 勇. 富水砂层深基坑墙体渗漏灾害与对策分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, **52**(21): 63-69. (LIU Juncheng, TAN Yong. Analysis and countermeasures of through-wall leaking hazard during deep excavation in water-rich sandy strata[J]. Construction Technology, 2023, **52**(21): 63-69. (in Chinese))
- [17] KORFF M, MAIR R J, VAN TOL A F, et al. Building damage and repair due to leakage in a deep excavation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2011, **164**(4): 165-177.
- [18] Ni J C, CHENG W C. Characterising the failure pattern of a station box of Taipei Rapid Transit System (TRTS) and its rehabilitation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, **32**: 260-272.
- [19] TAN Y, LU Y. Forensic diagnosis of a leaking accident during excavation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, **31**(5): 04017061.
- [20] TSUCHIDA H. Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits[J]. 1970: 1-3.
- [21] HASHASH Y M A, OSOULI A, MARULANDA C. Central artery/tunnel project excavation induced ground deformations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**: 1399-1406.
- [22] TAN Y, WEI B, DIAO Y, et al. Spatial corner effects of long and narrow multipropped deep excavations in Shanghai soft clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, **28**(4): 04014015.
- [23] TAN Y, LU Y. Why excavation of a small air shaft caused excessively large displacements: forensic investigation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, **31**(2): 04016083.
- [24] 江苏省住房和城乡建设厅. DGJ32/TJ195-2015 江苏省城市轨道交通工程监测规程[S]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2016.
- [25] WU Y X, SHEN S L, LYU H M, et al. Analyses of leakage effect of waterproof curtain during excavation dewatering[J]. Journal of Hydrology, 2020, **583**: 124582
- [26] 曾超峰, 陈宏波, 王 硕, 等. 基坑地下水回灌模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(12): 1-8. (ZENG Chaofeng, CHEN Hongbo, WANG Shuo, et al. Laboratory-scale model test on artificial groundwater recharge in deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(12): 1-8. (in Chinese)).