DOI：10.11779/CJGE2021S2043

城市滨海软土地区深层地下空间开发现状及工程问题

金乐文[1]，王 琛*[1, 2]，梁发云[1, 2]

(1. 同济大学土木工程学院，上海 200092；2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室，上海 200092)

摘 要：随着当今城市的不断建设和发展，许多地区的中浅层地下空间开发已达到一定规模，部分城市甚至已趋于饱和，合理开发利用深层地下空间已成为缓解城市空间资源压力的有效途径。资料表明，目前的深层地下空间开发尚处于初级阶段，主要为大型交通设施和市政服务设施。由进一步分析可知，适合布置于深层地下空间的设施还可包括物流设施、仓储设施和特种工程等。此外，率先探索深层地下空间开发的地区多为世界级大城市，且多位于深部土层物理力学性质十分特殊的滨海软土地区，在开发过程中可能会遇到较多工程难题。以上海为例，结合其典型的滨海软土地层和 3 个相关工程实例，探讨了包括承压水突涌、流砂与管涌、土体变形和地面沉降以及天然气逃逸几类关键工程问题。通过梳理上述内容，总结了滨海软土地区深层地下空间开发现状和工程问题，为其未来大规模开发提供参考。

关键词：深层地下空间；滨海软土；发展现状；工程问题

中图分类号：TU43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2021)S2－0178－06

作者简介：金乐文(1999—)，女，本科生，主要从事岩土工程方面的研究。E-mail：1850840@tongji.edu.cn。

Status and engineering problems of utilization of deep underground space in urban coastal soft soil areas

JIN Le-wen[1], WANG Chen[1, 2], LIANG Fa-yun[1, 2]

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the continuous construction and development of cities nowadays, the utilization of medium and shallow underground space has reached a certain scale in many areas and even saturated in some metropolises. Rational development of deep underground space has become an effective way to alleviate the pressure of urban space. The literature review reveals that the development of deep underground space is still at a primary stage, mainly for large-scale traffic facilities and municipal service facilities. According to the further analysis, logistics and storage facilities and special projects should also be considered. Additionally, the majority exploring deep underground space development are the world-class cities, most of which locate in coastal soft soil areas where many engineering problems might be encountered during the construction because of the unique physical and mechanical properties of the soil. Taking Shanghai as an example, based on its typical soil layer and three related cases, several engineering problems are discussed, including confined water in rush, quicksand and piping, soil deformation, ground subsidence, and gas escape. By sorting out the above contents, the development status and engineering problems of deep underground space utilization in coastal soft soil areas are summarized, providing a reference for large-scale development in the future.

Key words: deep underground space; coastal soft soil; development status; engineering problem

0 引 言

随着中国经济水平的不断提高，城市建设的快速发展和人口规模的不断扩大，交通拥挤、环境恶化、资源紧张等“城市病”也日益严重。迈入新时代以来，城市地下空间的开发及探索逐渐成为其可持续发展建设的重点内容。地下空间深度划分有多种标准，上海市地方规范[1]认为地下 0～15，15～40，40 m 以下分别为浅表层、中层和深层地下空间。近年来，国内许多大城市的地下空间开发已达一定规模，并且保持较快增速，主要集中于中浅层[2-3]。截至 2019 年，北京的浅层地下空间[4]、上海中心城区的中浅层地下空间开发利用已趋近饱和[5-6]。

基金项目：深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目（SKLGDUEK2009）；上海市“科技创新行动计划”软科学重点项目-青年项目（20692192900）

收稿日期：2021－08－20

*通信作者（E-mail: cwang33@tongji.edu.cn）

滨海地区水运资源发达，地理位置优越，对外交流便捷，孕育了很多世界级的大城市。这些城市需要解决人口持续增长，地上资源不足等问题，深部地下空间开发十分必要。而这些地区的土体以软土为主，其深部土层特性和开发难度与中浅层有很大不同。尽管这些城市在中浅层地下空间开发方面已积累大量经验，但深部地下空间的开发仍值得深入研究。

本文以上海地区为例，梳理了城市滨海软土地区深层地下空间开发现状，同时依据深部土层客观条件对潜在的工程问题进行了分析，为处于类似土质地区的深层地下空间开发提供建议。

1　软土地区深层地下空间开发现状

1.1　深层地下空间开发的功能要求

地下空间的开发与其功能要求密切相关。《城市地下空间规划规范》将地下空间开发功能分为地下交通设施、市政公用设施、公共管理与公共服务设施等 8 类。从世界范围来看，浅层地下空间主要分布公共管理、公共服务和商业服务业设施。中层地下空间以交通、物流、仓储和市政公用设施为主，如日本东京新宿线、美国阿拉米达走廊等[7]。同时，这些功能也正在向深层空间扩展。如新加坡海床 150 m 以下的裕廊岛地下储油库、瑞士深 50 m 的地下货运系统、日本东京深 60～100 m 的深层排水系统等[7]。

中国早期地下空间的利用以人防工程为主[8]。上海市的地下空间利用目前已形成初具规模的交通网络及各类地下综合体，中浅层地下空间趋于饱和[5-6]。其中，中层地下空间主要分布交通设施和市政公用设施，如大量深 30～40 m 的地铁线路以及位于地下 30 m 的世博变电站等。建设中的深层地下空间设施包括苏州河深隧工程、已部分竣工通车的北横通道等，旨在缓解地上公共资源紧张、提高城市韧性。

综上，由于处于初步开发阶段的深层地下空间可达性和空间环境质量较差，所以不宜分布公共活动或需要较多人员管理的城市功能。大型交通设施、物流与仓储设施、市政服务设施，以及特种工程应作为其主要功能，并建设附加设施，预留未来发展空间。

1.2　土层特征与客观条件

上海市位于较典型的天然软土地区，其地基土可分为 12 个主要土层，赋存一个潜水含水层、一个微承压含水层和 5 个承压含水层，总厚度大、水量丰富[9]。中浅层地下空间的土层主要为软黏土和砂性土；深层地下空间（⑦～⑩层）的主要为粉细砂和砂质黏土[5]。其中⑦⑧⑨土层（见表 1）、微承压含水层和第一、二、三承压含水层对深层地下空间开发影响较为直接[10]。

上海地区的深层土体以中粗砂和黏土为主，中粗砂含量达 64.69%，黏土含量接近 1/3。深层中粗砂属于低承载力、中压缩性土，液化特性较低，但深层黏性土易发生大的塑性流动和固结沉降[11]。⑧层土作为厚度较大的黏性土层，适合施工，且可对第一、第二承压含水层起阻隔作用。刘丽斌等[12]通过试验得到上海的⑧层土为超固结土，故可知其发育地区适宜深层地下空间开发。此外，与中浅层土体相比，深层土的塑性指数和液限更低、粉粒更少而黏粒更多。除⑧$_1$层，其它主要为可塑—硬塑状态的黏性土及中密、密实的粉性土、粉砂，强度较高、土层较厚、均匀性较好、压缩性较低、承载能力强[13]。综合而言，从土层物理力学性质角度考虑，尽管深层地下空间开发较浅层难度大，滨海地区深部地层仍具备一定的可开发性。

表 1　上海地区⑦⑧⑨地基土土层层序表[14]

Table 1 Sequence of soil layers ⑦⑧⑨ of Shanghai[14]

土层名称	土层序号	顶面埋深/m	常见厚度/m	状态、密实度
草黄—灰色粉性土、粉砂	⑦$_1$	28.0~35.0	1.5~5.0	中密—密实
灰色粉细砂	⑦$_2$	35.0~40.0	4.0~8.0	密实
灰色黏性土夹粉砂	⑧$_1$	40.0~60.0	6.0~30.0	软塑—可塑
灰色粉质黏土、粉质土层	⑧$_2$	50.0~60.0	10.0~20.0	可塑或中密
青灰色粉细砂夹黏性土	⑨$_1$	65.0~77.0	5.0~8.0	中密—密实
青灰色粉、细砂夹中、粗砂	⑨$_2$	75.0~81.0	5.0~10.0	密实

探讨深部土层的 K_0 值有助于确定深部水平地压值，对开展深部空间开发有重要意义。李友洪等[15]利用带有弯曲元波速测试的三轴仪试验得到，随砂土密实度增加，K_0 变小。深部土的应力路径以卸载或卸载后再加载为主，力学性质与中浅层有明显不同[16]。在 6～10 MPa，随固结压力增加，黏土微结构各向异性逐步增加，宏观表现为 K_0 值变化幅度较大[17]。

1.3　代表性工程案例

为响应《上海市城市总体规划（2017—2035）》的指导，上海的深层地下空间开发已进入初步阶段，代表性工程有部分通车的北横通道、在建的苏州河深隧试验段工程与上海硬 X 射线工程，各工程的基本情况见表 2，其建设可为滨海软土地区的深层地下空间开发提供宝贵经验。

（1）北横通道

北横通道是上海主干路网的重要组成部分，目前西段已经通车，东段完成后将连通至浦东，能够有效缓解交通压力，释放大量地面道路空间。其新建工程Ⅱ标隧道全长约 7.8 km。直径 15.56 m，长 120 m 的

超大断面泥水气平衡盾构施工始发于中江路工作井。沿线穿越地层以⑦$_1$和⑦$_2$为主，均为砂质土层且赋存承压水，易引起开挖面失稳和盾尾渗流等问题。

在中山公园井和筛网厂井处，勘测得到中浅部赋存潜水、微承压水。深部⑦层为第一承压含水层，而⑧$_2$层与⑨层联通为第二承压含水层。工程所处地段的地表和中浅层构筑物密集，为减小沉降，开挖时上部潜水布置真空疏干深井，坑内布置⑦层减压井或与疏干井联通，坑外布置⑧、⑨层减压降水井，并适当设置备用井[18]。

（2）苏州河深隧试验段工程

深隧是深层排水调蓄管道系统的简称。苏州河深隧兼顾系统提标、污染控制、内涝防治等多重功能目标。其主线总长度约 15.3 km，隧道内径约 10 m，调蓄容积约 74 万 m^3，服务总面积达 57.92 km^2。

深隧主线隧道顶部为苏州河河道，且与北横通道空间距离较近，部分区段纵向并行，多处相交。试验段位于深隧主线工程西段，西起苗圃综合设施，东达云岭西综合设施。以云岭西综合设施竖井为例，施工主要受深部⑦、⑧$_2$、⑨层中承压水的影响，其次为⑩A 和⑪承压含水层。其中⑨、⑩A 和⑪承压含水层水量大，渗透性强，补给快。其开挖涉及土层中，⑦层和⑧$_2$层以黏质粉土或砂质粉土为主，易产生流砂；⑨$_1$层的粉细砂和⑨$_2$层的中砂，给成槽过程中保持槽壁稳定带来较大困难。

（3）上海硬 X 射线工程

上海硬X射线工程位于上海张江综合性国家科学中心核心区域，总长约 3.1 km，包含 10 条隧道及 5 个工作井。工程所处地中深层淤泥质黏土含量较少，但中层粉细砂较多，存在液化和流砂涌水的风险，深层土质较好。针对开挖阶段会遇到的承压水层，采用了隔断⑦层承压水、悬挂式抽降⑨层承压水的方法。此外，还研发了 80 m 级 TRD 止水帷幕，在约 70 m 深的#5 井超深基坑中成功隔断第一承压水含水层。

表 2 3 项代表性工程开发难点对比

Table 2 Comparison of three projects

工程名称	开发深度/m	开发难点
北横通道	48	承压水丰富，开挖面易失稳；地表建筑密集，允许沉降很小
苏州河深隧试验段工程	58	易产生流砂、护壁失稳；与周边地下构筑物间距过近
上海硬 X 射线工程	70	承压水丰富，土体液化和流砂涌水风险较大

2 软土地区深层空间开发潜在工程问题

深部地下空间的开发涉及更多、更复杂的土层，可能会遇到诸多工程问题。如蠕变、砂土液化，又如基坑开挖过程中，被动区土卸荷而回弹变形，导致围护结构和立柱隆起，随开挖深度增大而增大[19]。结合上海土层特性，可能遇到的主要问题为承压水突涌、流砂与管涌、土体变形与地面沉降和天然气逃逸。

2.1 承压水突涌

深部地下空间开发涉及第一、二承压含水层，下卧层为第三承压含水层。3 个承压含水层水头压力高，单井涌水量大、富水性强。基坑开挖至一定深度时，若坑底地基土不足以抵抗承压水水头压力，或承压水与基坑底部有联系通道等，可能引起基坑底土体隆起破坏并发生喷水、涌砂的现象。陈大平[10]对 3 个承压含水层的突涌可能性进行了估算（见表 3）。

表 3 上海承压水突涌估算[10]

Table 3 Estimates of confined water piping in Shanghai[10]

含水层	顶面标高/m	水位标高/m	坑底水头压力/kPa	可能突涌的坑底标高/m
一	−25	0	115	−11.5
二	−62	−2	250	−27
三	−100	−3	400	−43

在承压水发生垂直方向上的渗透时，各土层的渗透力和流速并不相同，这会带走接触面上的一些细小的颗粒，造成接触面的冲刷，使含水层上方所覆盖的不透水层厚度降低，导致基坑底板被承压水冲破[20]。

2.2 流砂与管涌

基坑于地下水位以下开挖时，易引发渗透变形乃至破坏，由施工过程引起的多为细砂土或粉砂中的流砂与管涌。上海深层主要为粉细砂和砂质黏土[9]，且含有高水头压力的承压水层，施工过程中若处理不当，会导致水头梯度过高，引发流砂和管涌的可能性增加（图 1）。流砂与管涌引发的大量土体流动将破坏深层结构，导致大量泥砂涌入井筒，造成支护结构的失稳以及坑外严重地陷。隧道掘进过程中若有大规模渗漏、喷水和冒砂现象，也会导致更大的不均匀沉降与结构变形，甚至造成隧道的废弃和地下资源的浪费。

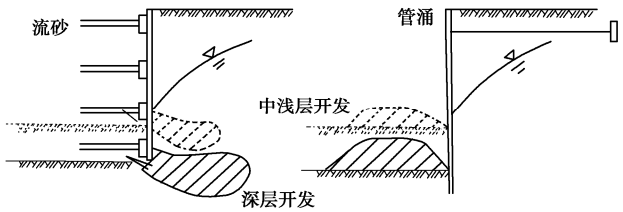

图 1 流砂与管涌示意图

Fig. 1 Schematic diagram of quicksand and piping

2.3 土体变形和地面沉降

深部开发对土层的扰动较大（图 2）。如超深基坑开挖期间，减压降水会引发显著的不均匀沉降，影响工程本身的建设维护及中浅层和地面已有构筑物的正

常使用，甚至导致深层工程的报废和地下资源的浪费。由于在工作状态下处于小应变范围，且涉及土层复杂，HSS 模型更适合用于基坑的精细分析[21]。梁发云等[22]通过一系列室内土工试验，获得了上海地区典型软土的 HSS 模型参数数值及其之间比例关系，并验证了其对于上海地区深基坑开挖数值计算的适用性。

工程运营期间，同样存在较多问题。深部土层主要为粉细砂和砂质黏土[5]，因黏土的低渗透性，土体变形与沉降在恒定荷载作用下将持续发展，地质条件和影响因素的差异性又会引发地层不均匀沉降。若不均匀沉降过大，可能导致深部隧道纵向变形或曲率半径过大，造成管片损坏，影响隧道工程的运营安全，造成已有建筑的受损和地下资源的浪费。

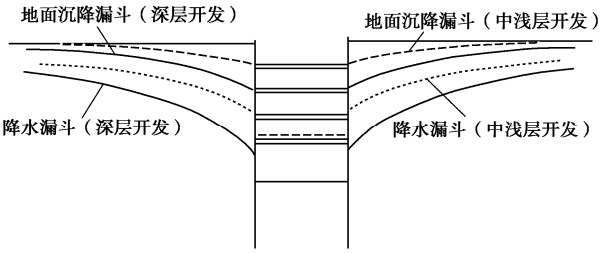

图 2 减压降水引起地面沉降分布形态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of distribution of land subsidence caused by reduced pressure precipitation

2.4 天然气逃逸

上海地区第四纪地层中普遍发育有浅层天然气，可分为三个储气层系[23]。深层地下空间开发受到的影响主要来自于一般埋深 30～50 m 的第二层和 50～70 m 的第三层，分布范围小，但压力较高、流量较大[24]。如若揭遇，其突然释放可能会危害人员安全，引起周围土体失稳，甚至有爆炸危险。

在全国范围内，中浅层地下空间开发遇到过较多上述问题。如杭州钱江新城区域在中浅层地下空间开发施工过程中，发生多起深基坑承压水突涌事故[25]；上海地铁 4 号线由于施工不当导致流砂，引起地面大幅沉降，造成重大经济损失[26]。限于篇幅，不再赘述。由于深层地下空间一旦出现问题将造成更为严重且不可逆的后果，所以在开发过程中尤为谨慎，尚未有重大事故发生。四类代表性工程问题的对比列于表 4。

表 4 四类代表性工程问题对比

Table 4 Comparison of the four typical engineering problems

工程问题	主要涉及土层/深度	相互作用对象	潜在危险
承压水突涌	⑦层～⑪层	水-土	喷水涌砂；坑底土体隆起破坏
流砂与管涌	⑦层、⑨层	水-土	土体结构破坏；坑外严重地陷
土体变形与地面沉降	⑧层、⑨层	土-结构	地表、深部构筑物受损甚至报废
天然气逃逸	30～70 m	气-土 气-人	土体失稳；爆炸，危害安全

3 结　　论

深层地下空间的开发对于空间资源紧张、中浅层开发利用趋近饱和的滨海地区主要城市而言，是进一步可持续发展的契机和挑战。本文归纳总结了城市滨海软土地层深层地下空间开发现状，并以上海为例，结合土层特性，梳理分析了滨海软土地层深层地下空间开发可能会遇到的工程问题。

（1）目前深层地下空间开发处于初级阶段，以大型交通设施和市政服务设施为主，进一步开发时可考虑用于大型交通设施、物流与仓储设施、市政服务设施和特种工程等。

（2）滨海软土地层深层地下空间开发可能遇到的工程问题主要有承压水突涌、流砂与管涌、土体变形和地面沉降以及天然气逃逸。

（3）深部土体，尤其是中粗砂的 K_0 值的精确确定也有待进一步研究，对深部地下空间的开发有着重要的指导作用。

参考文献：

[1] 上海市城乡建设和管理委员会. 上海市地下空间规划编制规范[S]. 2014-12-24. (Shanghai Municipal Urban and Rural Construction and Management Commission. Shanghai municipal standard for compilation of underground space planning[S]. 2014-12-24. (in Chinese))

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市地下空间开发利用“十三五”规划[S]. 2016. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. Urban Underground Space Development and Utilization "13th Five-Year Plan"[S]. 2016. (in Chinese))

[3] 雷升祥, 申艳军, 肖清华, 等. 城市地下空间开发利用现状及未来发展理念[J]. 地下空间与工程学报, 2019, **15**(4): 965－979. (LEI Sheng-xiang, SHEN Yan-jun, XIAO Qing-hua, et al. Present situations of development and utilization for underground space in cities and new viewpoints for future development[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, **15**(4): 965－979. (in Chinese))

[4] 吴克捷, 赵怡婷. 京沪两大城市地下空间开发利用比较[J]. 中外建筑, 2021(5): 24－29. (WU Ke-jie, ZHAO Yi-ting. Comparison of development and utilization of underground space between Beijing and Shanghai[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2021(5): 24－29. (in Chinese))

[5] 陈吉祥, 白　云, 刘　志, 等. 上海市深层地下空间资源评估研究[J]. 现代隧道技术, 2018, **55**(S2): 1243－1254.

(CHEN Ji-xiang, BAI Yun, LIU Zhi, et al. Assessment of resources of deep underground space in Shanghai[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, **55**(S2): 1243－1254. (in Chinese))

[6] 江 帆, 张仰斐. 上海市地下空间开发利用的实践与展望[J]. 上海城市规划, 2011(2): 62－67. (JIANG Fan, ZHANG Yang-fei. Practice and outlook on the development of underground space in Shanghai[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2011(2): 62－67. (in Chinese))

[7] 钱七虎. 利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市[J]. 隧道建设(中英文), 2019, **39**(11): 1737－1747. (QIAN Qi-hu. Underground space utilization helps develop green buildings and green cities[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(11): 1737－1747. (in Chinese))

[8] 童林旭. 城市地下空间利用的回顾与展望[J].城市发展研究, 1999, **6**(2): 10－13, 64. (TONG Lin-xu. Retrospect and prospect of urban underground space utilization[J]. Urban Studies, 1999, **6**(2):10－13,64. (in Chinese))

[9] 李晴阳, 刘万兰, 黄 毅. 上海软土地区深基坑施工承压水风险及其控制[J]. 建筑施工, 2008, **30**(6): 445－448. (LI Qing-yang, LIU Wan-lan, HUANG Yi. Preliminary discussion on construction risk of stratum pressure water in deep foundation pit of Shanghai soft ground area[J]. Building Construction, 2008, **30**(6): 445－448. (in Chinese))

[10] 陈大平.上海深部地下空间开发关键地质问题分析[J].上海国土资源, 2014, **35**(3): 73－77. (CHEN Da-ping. Analysis of the key geological problems in the development of deep underground space in Shanghai[J]. Shanghai Land & Recourses, 2014, **35**(3): 73－77. (in Chinese))

[11] 王建秀, 刘月圆, 刘笑天, 等. 上海市地下空间地质结构及其开发适应性[J]. 上海国土资源, 2017, **38**(2): 39－42, 53. (WANG Jian-xiu, LIU Yue-yuan, LIU Xiao-tian, et al. Geological structure and development adaptability of underground space in Shanghai[J]. Shanghai Land & Recourses, 2017, **38**(2): 39－42, 53. (in Chinese))

[12] 刘丽斌. 上海深层黏土的物理性质、超固结特性及本构模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2019. (LIU Li-bin. Physical Properties, Over-Consolidation and Constitutive Modeling of Shanghai Deep Clays[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019. (in Chinese))

[13] 胡瑜韬, 田 敬, 彭芳乐. 上海工程地质特征与大深度地下空间开发模式探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(S1): 1333－1338. (HU Yu-tao, TIAN Jing, PENG Fang-le. Engineering geological characteristics and development model of deep-underground space in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(S1): 1333－1338. (in Chinese))

[14] 上海市城乡建设和交通委员会. 地基基础设计规范[S] 2010. (Shanghai Construction and traffic Committee. Shanghai Standard Foundation Design Code[S]. 2010. (in Chinese))

[15] 李友洪, 顾晓强, 梁发云. K0 应力条件下砂土小应变剪切模量研究[J]. 长江科学院院报, 2018, **35**(11): 154－158. (LI You-hong, GU Xiao-qiang, LIANG Fa-yun. Shear modulus of sand at small strain under K0 stress state[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, **35**(11): 154－158. (in Chinese))

[16] 王衍森, 崔广心, 杨维好. 深部土的高压 K0 固结试验研究展望[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊 2): 687－690. (WANG Yan-sen, CUI Guang-xin, YANG Wei-hao. Prospect of experimental studies of high-pressure consolidation tests of soils in thick alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S2): 687－690. (in Chinese))

[17] 李文平, 张志勇, 孙如华, 等. 深部粘土高压 K0 蠕变试验及其微观结构各向异性特点[J].岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1185－1190. (LI Wen-ping, ZHANG Zhi-yong, SUN Ru-hua, et al. High pressure K0 creep experiment and the anisotropy of microstructure of deep buried clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1185－1190. (in Chinese))

[18] 王新新, 郑刘卫, 吴初兴. 上海北横通道中山公园工作井超深基坑的减压降水设计与验证[J]. 建筑施工, 2020, **42**(12): 2226-2230. (WANG Xin-xin, ZHENG Liu-wei, WU Chu-xing. Design and verification of decompression and dewatering for super deep foundation pit of Zhongshan park working shaft in Shanghai north cross passage[J]. Building Construction, 2020, **42**(12): 2226－2230. (in Chinese))

[19] 邓 航, 梁发云, 叶 华, 等. 上海滨江软土地区深基坑工程变形特性实测分析[J]. 结构工程师, 2016, **32**(5): 178－185. (DENG Hang, LIANG Fa-yun, YE Hua, et al. Monitoring analysis of deep excavation in Shanghai soft soil near a river[J]. Structural Engineers, 2016, **32**(5): 178－185. (in Chinese))

[20] 靳 虎, 聂集祥, 肖克云, 等. 深基坑内管涌、流砂的事故原因及补救措施[J]. 智能城市, 2018, **4**(6):156-157. (JIN Hu, NIE Ji-xiang, XIAO Ke-yun, et al. Accident causes and remedial measures of pipe gushing and fluid sand in deep foundation pit[J]. Intelligent City, 2018, **4**(6): 156－157. (in Chinese))

[21] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模

型的选择[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 258－264, 326. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 258－264, 326. (in Chinese))

[22] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 269－278. (LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 269－278. (in Chinese))

[23] 吕少伟,唐益群.上海地区浅层沼气地质灾害分区探讨[J]. 上海地质, 2000, **21**(3): 25－28. (LYU Shao-wei, TANG Yi-qun. Discussion on zoning of shallow methane geological hazards in Shanghai area[J]. Shanghai Geology, 2000, **21**(3): 25－28. (in Chinese))

[24] 严学新, 方　正, 曾正强, 等. 上海地下空间开发环境地质问题分析[J]. 上海地质, 2004, **25**(1): 1－5. (YAN Xue-xin, FANG Zheng, ZENG Zheng-qiang, et al. Analysis on environmental geological problems in developing underground space[J]. Shanghai Geology, 2004, **25**(1): 1－5. (in Chinese))

[25] 李　瑛, 胡德军, 叶向前, 等. 基于事故分析的深基坑承压水突涌机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, **15**(3): 943－948. (LI Ying, HU De-jun, YE Xiang-qian, et al. Analysis and treatment of inrushing accidents in deep excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, **15**(3): 943－948. (in Chinese))

[26] 上海轨道交通 4 号线工程事故原因查明[J].岩石力学与工程学报, 2004(1): 30. (The cause of the accident of Shanghai rail transit line 4[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(1): 30. (in Chinese))

（编校：孙振远）