

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.02.032

基坑开挖前降水对围护变形影响分析

罗志华^{1,2,3}

- (1. 上海勘察设计院(集团)有限公司, 上海 200093;
2. 上海岩土与地下空间综合测试工程技术研究中心, 上海 200093;
3. 上海市岩土工程专业技术服务平台, 上海 200093)

摘要: 高水位地区基坑工程项目的预降水往往会引起基坑围护一定的初始变形, 有时甚至超过开挖引起的变形量, 而大多数基坑变形初值采集一般在预降水完成后, 开挖前降水引起的围护初始变形问题较难引起重视, 对相关案例分析研究就显得尤为重要。结合上海某基坑工程案例, 通过该案例中开挖前降水监测数据分析, 并进一步采用有限元模拟, 得出基坑支护前降水过大将引起基坑较大水平变形, 揭示了单独降水对围护变形的影响机理, 为后续基坑工程评估预降水的变形影响提供借鉴。

关键词: 抽水试验; 预降水; 水平变形; 有限元

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)02—0185—06

Analysis of Dewatering Before Foundation Pit Excavation Influence on Enclosure Deformation

LUO Zhihua^{1,2,3}

- (1. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Geotechnical Test for Underground Space, Shanghai 200093, China;
3. Shanghai Professional Technology Service Platform of Geotechnical Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: The pre-dewatering of foundation pit engineering project in high water level area often causes certain initial deformation of foundation pit support, sometimes even exceeds the deformation caused by excavation. However, most of the initial deformation values of foundation pit are collected after the completion of pre-dewatering, and it is difficult to pay attention to the initial deformation of retaining wall caused by dewatering before excavation, so it is particularly important to analyze relevant cases. Combined with a foundation pit engineering case in Shanghai, through the analysis of pre-excavation dewatering monitoring data, and finite element simulation was adopted to analyze the influence of dewatering before foundation pit excavation on enclosure deformation. The results show that excessive drawdown before foundation pit support will cause large horizontal deformation of foundation pit. The influence mechanism of separate precipitation on the deformation of retaining wall is also revealed, which can provide reference for the subsequent foundation pit engineering to evaluate the deformation impact of pre dewatering.

Keywords: pumping test; pre-dewatering; lateral deformation; finite element method

对高水位地区基坑工程项目, 基坑围护、截水帷幕、及降水井施工完后, 往往预先进行降水试验, 以验证基坑水位能否降至需求深度, 或者检测基坑围护及截水帷幕是否发生渗漏。然而, 大多数基坑围

护变形监测是从基坑即将开挖前采集初值, 开挖前预降水期间产生的围护变形被清零处理。实际上, 预降水期间由于坑内外土体水压力发生变化, 基坑围护可能已产生一定初始变形。由于开挖前预降水

期间围护初始变形监测案例较少^[1-5],目前大多数关于降水对围护变形的影响研究^[6-15]都是基于开挖后降水的案例,而开挖过程中降水,坑内水压力和土压力均发生减小,难以揭示单独降水对围护变形的影响规律。另外,现有规范^[16]也没有提出基坑开挖前降水对围护变形影响的计算方法和控制措施。为此,首先基于开挖前降水试验过程中进行了围护变形监测的工程案例,分析研究单独降水过程对围护变形的影响规律,然后开展三维流固耦合数值模拟分析,以揭示降水过程对基坑围护变形的影响机理。

1 工程概况

上海某项目基坑呈矩形分布,长 88 m,宽 32 m,开挖深度约 40 m,设计为地下五层结构。该项目所在区域主要由黏性土、粉性土和砂土组成,浅部 26 m 分布②~⑤₁ 层黏性土层,下部分布厚约 6 m~8 m 的⑤₃ 层粉质黏土和厚约 8 m 的⑤₄ 层粉质黏土。⑦₁ 层砂质粉土和⑦₂ 层粉砂为第一承压含水层,受古河道切割影响,层顶有一定起伏,⑦₁ 层顶埋深 39.2 m~40.0 m,⑦₂ 层层顶埋深约 41.2 m~44.8 m;⑧₂₁ 层粉质黏土与粉砂互层为弱含水层,层顶埋深 59.4 m~60.2 m,该层也具有承压性;⑨层粉砂为第二承压含水层,层顶埋深约 77.8 m~80.3 m;⑪层粉砂为第三承压含水层,层顶埋深约 100 m。实测第⑦层承压含水层水位埋深为 5.70 m~6.94 m,第⑧₂₁ 层承压含水层水位埋深约 5.7 m,第⑨层承压含水层水位埋深约 5.3 m,第⑪层承压含水层水位埋深约 6.4 m。

基坑采用明挖顺作法施工,共设置 9 道水平混凝土支撑,部分支撑、立柱结合永久梁、柱设置。基坑底位于第⑦₁ 层中,围护形式采用厚 1 200 mm、深 86 m 的地连墙,墙趾进入⑨层粉砂约 6 m。外设深度为 64 m 的 TRD 止水帷幕,进入⑧₂₁ 层粉质黏土与粉砂互层约 4 m,TRD 距地连墙约 3 m~6 m。基坑设计平面见图 1,剖面图见图 2。

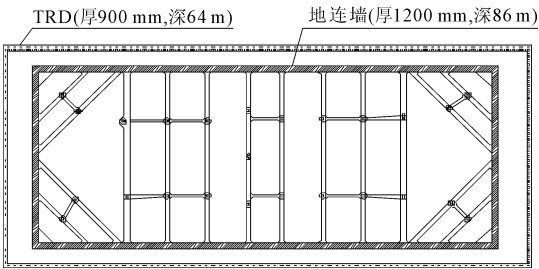


图 1 基坑设计平面图

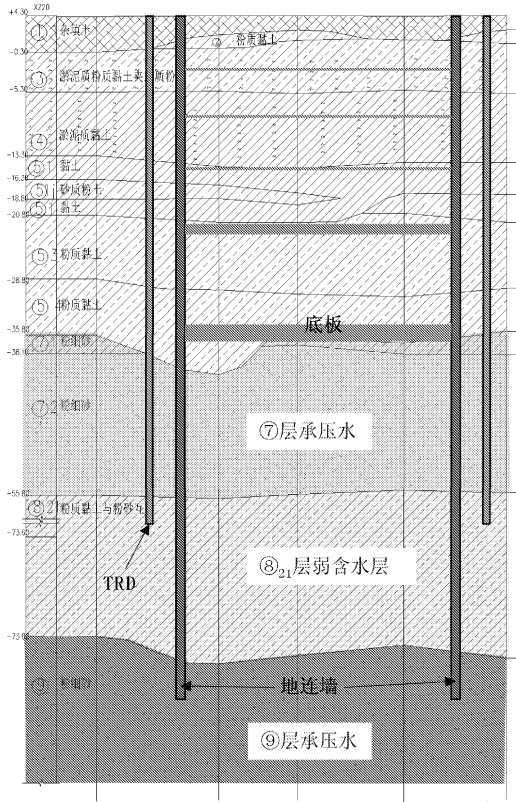


图 2 基坑设计剖面图

2 降水井及监测布置

2.1 降水井布置

根据地下水分层控制设计原则,基坑开挖面以上进行常规疏干,坑底以下各含水层进行降压,降水井布置如表 1 所示,平面布置图如图 3 所示。

表 1 降水井布置统计

位置	井类型	对应土层	井深 /m	数量 /个	抽水井编号
坑内	疏干井	①—⑤ ₁	30	12	2J-1~12
	降压井		65	2	2Y7-1~2
	观测井	⑦、⑧ ₂₁	60	1	2G7-1
	观测井		74	1	2YG8-1
	降压井		86	4	2Y9-1~4
	备用井	⑨	86	1	2YB9-1
	观测井		85	1	2G9-1
坑外 (TRD 内)	观测井	⑦	60	6	2JG7-1~6
坑外 (TRD 外)	观测井	⑦	60	2	2WG7-1~2
	观测井	⑧ ₂₁	74	2	2WG8-1~2
	观测井	⑨	85	2	2WG9-1~2

2.2 围护测斜监测布置

基坑围护共设置 10 个水平变形监测点(测斜),

沿围护均匀布置,编号为 P01—P10,如图 3 所示。

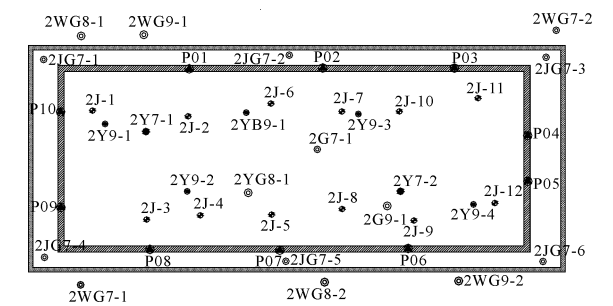


图 3 降水井及围护测斜监测布置平面图

3 抽水试验及结果分析

3.1 抽水试验概况

基坑地连墙围护和 TRD 止水帷幕完成后,于 12 月 25 日前完成第一道混凝土支撑施工,随后共进行了 5 次抽水试验,表 2 所示为各次抽水试验持续时间及抽水的试验井,同时基坑围护测斜于 1 月 4 日采集监测初值。

表 2 抽水试验持续时间及试验井

试验 编号	抽水试验 位置	起至 持续时间	抽水井 编号
(1)	TRD 与地连墙间 ⑦层单井	12/27 16:00— 1/7 10:00	2JG7-3
(2)	坑内⑨层单井	1/10 15:55— 1/11 20:00	2Y9-2
(3)	坑内⑦、⑧ ₂₁ 层单 井	1/11 6:00— 1/12 6:00	2Y7-1
(4)	坑内⑨层双井	1/13 11:00— 1/14 8:00	2Y9-2、 2YB9-1
(5)	潜水疏干	1/17 ~3/15	2J-1 ~ 12

3.2 抽水试验结果

(1) TRD 与地连墙间⑦层单井抽水。2JG7-3 出水量共计 855 m³,⑦层观测井水位变化如表 3 所示。由于 TRD 完全隔断⑦层承压水,从表中结果可以看出,坑外 (TRD 外) 观测井水位变化非常小,TRD 止水效果较好。

表 3 TRD 与地连墙间⑦层单井抽水后观测井水位

观测井井号	初始水位埋深/m	降深/m
2WG7-1	5.153	0.344
2WG7-2	5.219	0.122
2JG7-1	5.872	31.768
2JG7-2	5.821	32.019
2JG7-4	5.799	31.721
2JG7-5	6.180	31.410
2JG7-6	6.020	31.570

(2) 坑内⑨层单井抽水。坑内 2Y9-2 平均出水量约 210 m³/h,⑨层观测井水位变化如表 4 所示,由于地连墙及 TRD 未隔断⑨层承压水,因此坑外⑨层观测井水位有一定下降。

表 4 坑内⑨层单井抽水后观测井水位

观测井井号	初始水位埋深/m	降深/m
2G9-1	5.60	3.9
2WG9-1	5.50	1.5
2WG9-2	5.50	1.5

(3) 坑内⑦、⑧₂₁层单井抽水。坑内 2Y7-1 平均出水量约 5.9 m³/h,抽水结束后坑内外⑦、⑧₂₁层观测井水位变化如表 5 所示,其中坑内 2G7-1 和 2YG8-1 观测井水位变化曲线如图 4 所示。从结果可以看出,由于地连墙完全隔断⑦、⑧₂₁层,坑内水位下降较快,且恢复缓慢,坑外水位影响较小,说明地连墙隔水效果较好。

表 5 坑内⑦、⑧₂₁层单井抽水后观测井水位

观测井井号	初始水位埋深/m	降深/m
2G7-1	5.600	38.60
2YG8-1	5.500	31.70
2WG7-1	5.153	0.11
2WG7-2	5.219	0.13
2WG8-1	5.312	0.15
2WG8-2	5.591	0.17

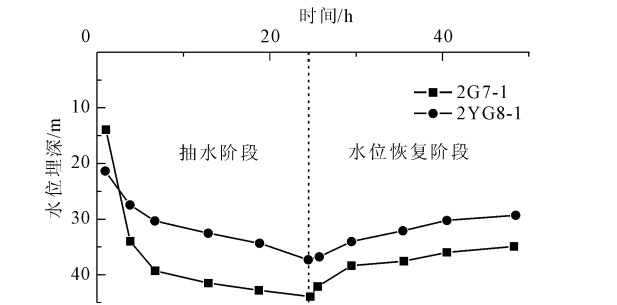


图 4 坑内 2G7-1 和 2YG8-1 水位变化曲线

(4) 坑内⑨层双井抽水。坑内 2Y9-2、2YB9-1 开启抽水后,2Y9-2 平均出水量 200 m³/h,2YB9-1 平均出水量 100 m³/h,抽水结束后各观测井水位变化如表 6 所示,其中坑内 2G9-1 观测井水位变化曲线如图 5 所示。从结果可以看出,由于地连墙及 TRD 未隔断⑨层,水位补给迅速,坑内水位下降缓慢,且恢复非常快,坑外⑦、⑧₂₁层水位影响较小。

(5) 潜水疏干降水。疏干井开启前,初始水位埋深约 2 m,开启疏干井后,水位降至埋深 20 m。

表 6 坑内⑨层双井抽水后观测井水位		
观测井井号	初始水位埋深/m	降深/m
2WG7-1	5.15	0.05
2WG7-2	5.22	0.04
2WG8-1	5.31	0.56
2WG8-2	5.59	0.91
2WG9-1	5.50	1.93
2WG9-2	5.50	1.84
2G9-1	5.60	4.90

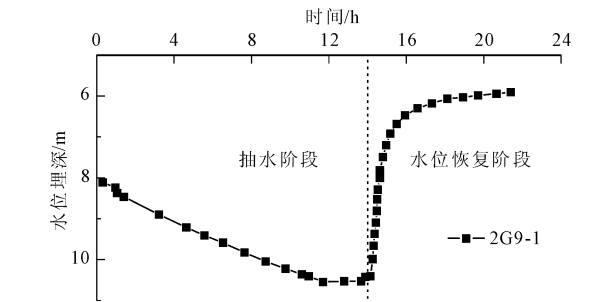


图 5 坑内 2G9-1 水位变化曲线

3.3 基坑围护测斜变形结果

抽水试验过程中及结束后进行了基坑围护测斜监测,基坑长边中心测点 P07,以及短边测点 P10、P05 测斜随时间变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出,第(1)次抽水试验结束后(1 月 9 日),基坑围护已开始向坑内发生水平变形,其主要原因是 TRD 与地连墙间⑦层被隔断,抽水后 TRD 外水土压力大于 TRD 内侧水土压力,进一步导致基坑围护向坑内变形;第(4)次抽水试验结束后(1 月 14/15 日),基坑长边 P07 在 40 m ~ 70 m 深度已发生明显水平变形,最大约 22 mm,形状呈鼓肚形,短边水平变形较长边小,但呈现同样的变形规律,其中变形较大的深度正好对应⑦、⑧₂₁层,说明主要是由于坑内⑦、⑧₂₁层被隔断,抽水后水土压力减小,导致基坑围护向坑内变形;第(5)次疏干降水结束后(3 月 16 日),基坑围护浅部发生较大水平变形,最大约 53 mm,主要是由于坑内浅部土层被疏干后,不能补给恢复,坑内水土压力减小,导致基坑围护浅部向坑内发生较大变形。

4 有限元模拟分析

4.1 模型建立

为更深入地研究基坑抽水试验对基坑围护水平变形的影响,采用 MIDAS/GTS 岩土工程数值分析软件,结合实际施工及抽水试验工况(见表 7),建立三维有限元模型,如图 7 所示。土体本构采用修正-摩尔库仑模型;基坑地连墙和 TRD 止水帷幕采用二

维板单元模拟,同时添加不透水界面单元模拟土体接触,为避免 TRD 对地连墙围护变形的影响,TRD 板单元不设置抗弯刚度,仅考虑截水效果。基坑支撑、围檩、立柱及立柱桩均按照基坑设计进行设置。由于渗流与土体应力变形为耦合关系,为充分评估抽水试验结果,计算时采用渗流应力完全耦合控制方程。降水模拟采用节点流量边界,按照承压水抽水试验时间及抽水流量、潜水疏干抽水流量设置节点流量和渗流时间(见图 8)。

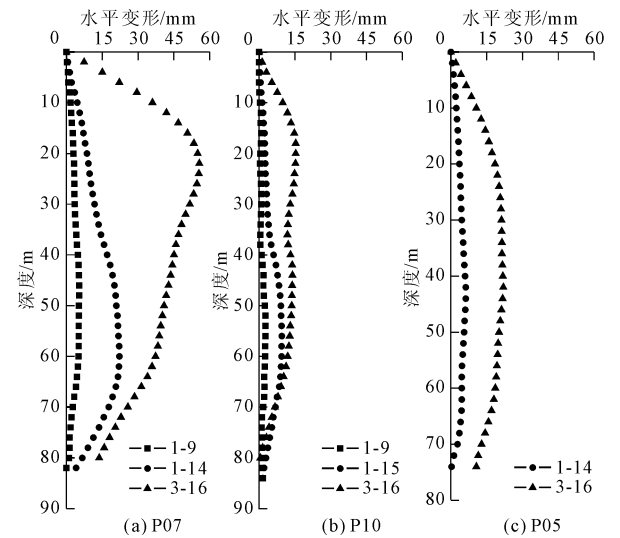


图 6 基坑围护 P07、P10、P05 测斜变化曲线

表 7 分析工况	
工况序号	分析工况
1	基坑地连墙围护、TRD 止水帷幕及立柱/立柱桩施工
2	基坑第一道支撑、围檩施工(位移清零)
3	TRD 与地墙间⑦层单井抽水(10 d)
4	抽水停止(3 d)
5	坑内⑨层单井抽水(1 d)
6	坑内⑦、⑧ ₂₁ 层单井抽水(1 d)
7	抽水停止(1 d)
8	坑内⑨层双井抽水(1 d)
9	抽水停止(3 d)
10	坑内潜水疏干降水(60 d)

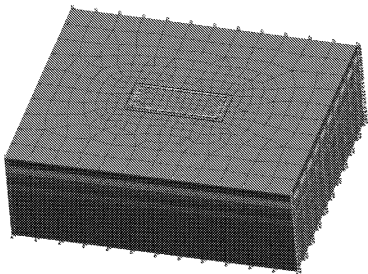


图 7 三维有限元模型

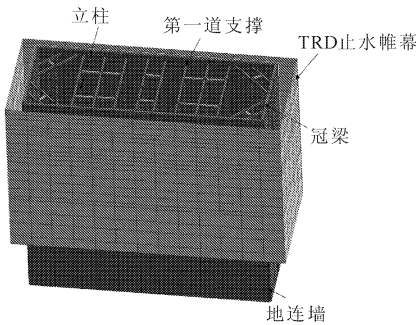


图8 基坑围护及止水帷幕

4.2 计算结果分析

基坑围护水平变形云图如图9—图11所示,围护水平变形随抽水工况变化曲线如图12所示,坑内外水压力变化如图13所示。从分析结果可以看出,抽水试验导致围护水平变形规律与实测结果基本吻合,由于⑨层承压水未被隔断,地下水补给较快,坑内⑨层抽水对围护变形影响较小。坑内抽水引起坑内水压力减小,而坑外(TRD 外) 水压力几乎不变,导致坑外土体向坑内发生位移,同时也可以看出,由于潜水疏干水位降深较大,对围护的变形影响最大。

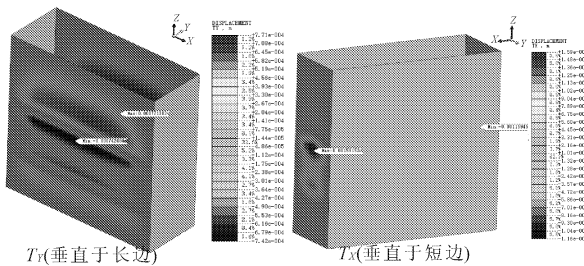


图9 TRD 与地墙间⑦层单井抽水后地墙水平变形云图

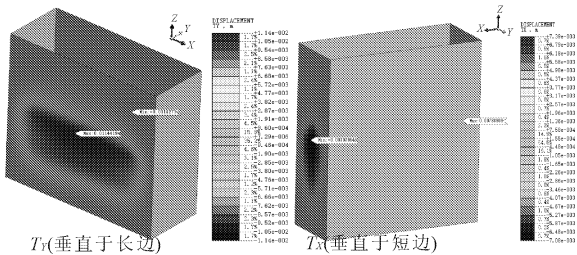


图10 坑内⑨层双井抽水后地墙水平变形云图

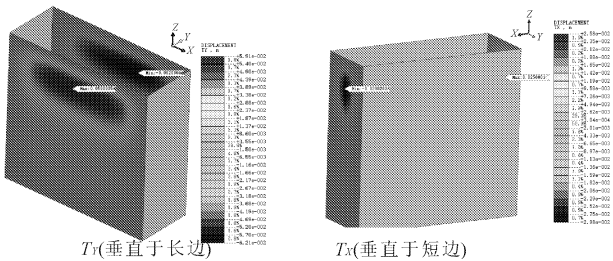


图11 坑内潜水疏干降水后地墙水平变形云图

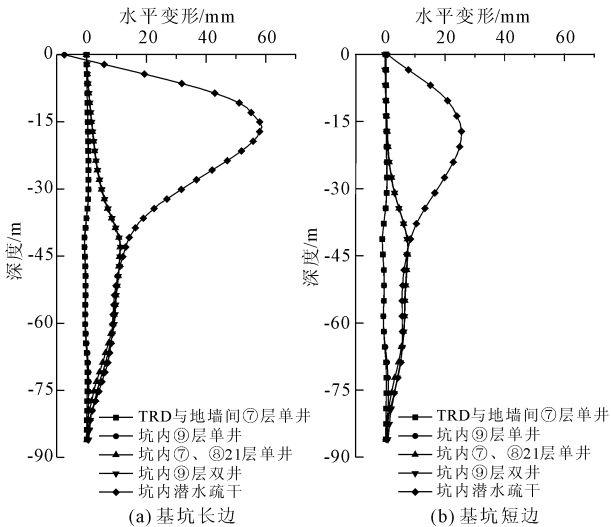


图12 基坑围护水平变形计算模拟曲线

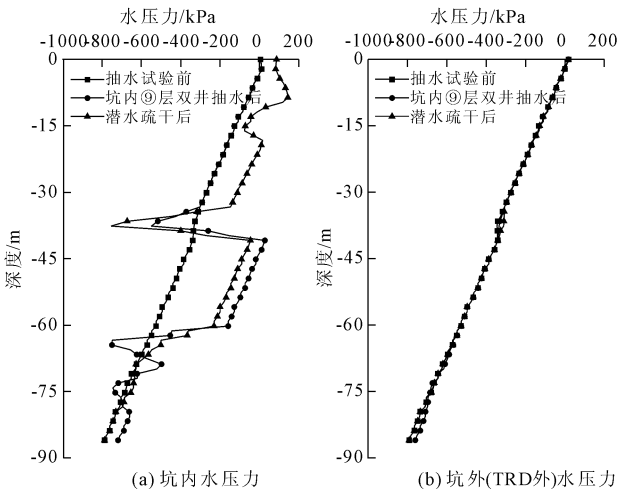


图13 坑内外水压力计算模拟变化曲线

5 结 论

以某项目基坑开挖前抽水试验为工程背景,对抽水试验引起的基坑围护变形结果进行了分析和数值模拟,得到抽水试验对基坑围护水平变形影响规律。主要结论包括:

- (1) 含水层隔断后降水迅速,水位恢复缓慢,同时坑内水压力下降,进一步导致坑外土体向坑内位移,引起围护水平变形。
- (2) 敞开式含水层降水时,水位下降缓慢,补给迅速,对围护变形影响较小。
- (3) 基坑支护前降水过大会引起基坑较大水平变形,因此对于周边环境变形敏感的基坑工程,降水前应评估抽水对变形的影响。

参考文献:

[1] 薛秀丽,李森坤,曾超峰. 开挖前降水作用下基坑围挡

- 结构-地层相互作用机制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 440-446.
- [2] 曾超峰, 王 硕, 宋伟伟, 等. 内隔墙对开挖前抽水引发软土区地铁深基坑变形的控制效果[J]. 岩石力学与工程学报, 1-10. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0900>.
- [3] 曾超峰, 郑 刚, 薛秀丽. 大面积基坑开挖前预降水对支护墙变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1012-1021.
- [4] 曾超峰, 袁志成, 薛秀丽. 降水井错位布置对基坑预降水引发围护结构侧移的影响[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 33-36.
- [5] 曾超峰, 薛秀丽, 宋伟伟, 等. 开挖前降水引发基坑变形机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2963-2972, 2983.
- [6] 胡博健. 合肥市某改造项目深基坑开挖变形分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [7] 周 鹏. 兰州某地铁站深基坑开挖监测及 FLAC3D 模拟分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [8] 陈 华, 刘飞飞. 基坑降水开挖对邻近隧道附加变形和内力分析[J]. 安徽建筑, 2020, 27(10): 77-79.
- [9] 朱彦鹏, 任永忠, 周 勇. 张掖某深基坑在降水条件下支护结构的性能分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 259-265.
- [10] 沈玉涛. 软土地区深大基坑分区开挖力学效应数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 23-27.
- [11] 雷 振. 深海淤泥地层深基坑施工数值模拟与监测分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 20-24, 29.
- [12] 江 杰, 杨杉楠, 胡盛斌, 等. 预降水过程中止水帷幕缺陷对基坑变形的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(5): 996-1005.
- [13] 罗正东, 吴 鹏, 黄 河, 等. 富水砂卵石地层深基坑开挖变形监测与数值分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(23): 128-133.
- [14] 张有桔, 丁文其, 刘学增, 等. 不对称水压下基坑围护内力及变形规律分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 107-112.
- [15] 王翠英, 张鸿昌, 张文巾. 深井降水对支护结构土压力的影响[J]. 岩土力学, 2004(11): 1845-1848.
- [16] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(上接第 177 页)

(3) 现场破损部位与硫酸盐侵蚀特征相当吻合, 经对破损混凝土剥离骨料、硬化水泥石、受损混凝土析出物检测, 发现混凝土受侵蚀后的典型产物 Thaumasite 和 CaCO_3 , 可以确定混凝土遭受了溶出性侵蚀、硫酸盐侵蚀, 硫酸盐侵蚀导致水泥石中 CSH 的分解和强度极大损失, 一捏即碎, 变为一种灰白色的、无强度的、果肉状泥砂混合物^[15]

参考文献:

- [1] 翟祥军, 武 玲, 等. 某电站大坝及厂房混凝土工程质量检测综合分析报告[R]. 昆明: 中国电建昆明院, 2019.
- [2] 丁清杰, 王亚飞, 等. 水工混凝土缺陷和破坏的成因分析与修复方法[J]. 水利技术与监督, 2019, 1(57): 116-119.
- [3] 中国工程建设标准化协会. 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程: CECS 02: 2005[S]. 北京: 计划出版社, 2005: 3-35.
- [4] 水利水电工程物探规程: SL326—2005[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 150-171.
- [5] 混凝土中钢筋检测技术规程: JGJ/T 152—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 3-7.
- [6] 超声法检测混凝土缺陷技术规程: CECS 21—2000[S]. 北京: 中国计划出版社, 2000: 13-17.
- [7] 水力发电工程地质勘察规范规范: GB/T 50287—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016: 110-111.
- [8] 水工混凝土耐久性技术规范: DL/T 5241—2010[S]. 北京: 中国电力企业联合会, 2010: 9-11.
- [9] 水泥化学分析方法: GB/T 176—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 25.
- [10] 孙刚峰, 缙彦强. 冻融循环及硫酸盐侵蚀对混凝土耐久性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 6(26): 140-144.
- [11] 申春妮, 杨德斌, 方祥位, 等. 混凝土硫酸盐侵蚀影响因素的探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2004, 2(6): 16-19.
- [12] 黄国兴, 陈该新, 纪国晋. 水工混凝土技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 332-379.
- [13] 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 150-171.
- [14] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 166-177.
- [15] 吴建东, 雒天峰. 盘道岭隧洞中地下水对混凝土侵蚀机理分析[J]. 水利规划与设计, 2020, 1(6): 16-19.