

软土地区深基坑工程承压水风险与控制

周红波, 蔡来炳

(上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 上海 200032)

摘要: 以 26 个承压水风险工程案例为基础, 采用故障树分析法对深基坑工程坑底突涌和隔水帷幕渗漏、流砂等承压水风险事件和风险因素进行识别; 通过风险因素的敏感性分析探讨了承压水风险的主次因素; 结合工程案例, 提出了相应的风险预防措施和应对措施, 为类似工程提供借鉴。

关键词: 深基坑工程; 承压水; 风险; 故障树分析; 敏感性分析; 控制措施

中图分类号: TU4

文献标志码: A

Risk and Control of the Artesian Water for Deep Excavation Engineering in Soft Soil Area

ZHOU Hongbo, CAI Laibing

(Shanghai Research Institute of Building Sciences(Group) Co., Ltd, Shanghai 200032, China)

Abstract: 26 cases were collected to analyze the risk of the artesian water for the deep excavation, such as pit piping and bracing seepage and flowing sand. Then the fault tree analysis was employed to identify the factors of the risk of the artesian water. Furthermore, the sensitivity analysis was employed to array the factors of the risk of the artesian water. Finally, the precautions and the emergency measures of the risk of the artesian water for the deep excavation engineering were proposed, and the results provided a reference for the similar engineering.

Key words: deep excavation engineering; artesian water; risk; fault tree analysis; sensitivity analysis; control measures

城市轨道交通、地下市政设施、地下管线以及其他地下空间建设的发展带动了城市深基坑工程的迅速发展。伴随着地下工程向深度发展, 基坑开挖面已接近或处于承压水层。由此, 承压水逐渐成为深基坑工程关注的核心问题之一, 是关系基坑工程安全的

最直接原因之一, 尤其是在沿海软土地区。而处于城市中心区域的深基坑工程, 承压水风险对深基坑工程稳定性造成不利影响; 同时, 大量抽降承压水或基坑失稳将引发周边环境风险, 影响到公共安全, 甚至造成巨大经济损失和严重社会影响。如 1985 年上海黄浦江过江管竖井基坑工程坑底突涌事故^[1]造成防汛墙裂缝, 2003 年上海地铁 4 号线董家渡承压水事故引起房屋倒塌、黄浦江防汛墙沉陷, 造成巨大经济损失^[2]。本文搜集了 26 个深基坑工程承压水风险案例, 采用故障树法分析深基坑工程坑底突涌和围护结构隔水帷幕漏水、流砂等承压水风险和影响因素, 通过敏感性分析确定深基坑工程承压水风险的关键因素, 最后结合工程案例提出深基坑承压水风险控制措施。

1 风险分析

从水土压力平衡角度分析, 软土地区深基坑工程承压水风险主要是由于基坑内土方开挖打破了基坑内外原有的水土压力平衡, 在建立新的水土平衡过程中可能存在深层承压水作用引发开挖面土体发生破坏风险, 进而导致基坑失稳。由承压水引起的基坑失稳风险主要体现^[3]为: ①坑底突涌, 如坑底出现冒水或涌水、流砂或流土; ②围护结构的隔水帷幕渗漏, 包括坑底开挖面或基坑侧壁出现漏水或涌水、流砂或流土等。表 1 为收集的 26 个深基坑工程承压水风险工程案例。

表 1 表明, 软土地区深基坑工程承压水风险事故中, 坑底突涌有 16 例, 占 61.5%; 围护结构隔水帷幕漏水、流砂有 10 例, 占 38.5%。基坑开挖深度在 15m 以上有 21 例, 占 80.8%; 基坑最大开挖深度为 30m, 且呈现越来越深变化趋势。为控制深基坑承压水风险, 围护结构的隔水帷幕主要采用地下连续墙、

表 1 深基坑工程承压水风险工程案例

Tab.1 Cases of the risk of the artesian water for the excavation engineering

序号	工程名称	围护结构类型	基坑开挖深度/m	事故类型	原因	应对措施
1	上海地铁 4 号线溧阳路地下车站	地下连续墙	12.0	坑底突涌	地下连续墙插入深度不够,未隔断承压水层;没有设置降压井	基坑内回填土,采用双液注浆封堵突涌点;增设基坑内降压井
2	上海地铁 4 号线董家渡修复工程	地下连续墙	30.0	围护结构漏水、流砂	围护结构未隔断承压水层,开挖面位于承压水层;地下连续墙接缝渗漏、流砂	局部回填土,接缝处焊钢板回填混凝土;基坑外进行聚氨酯、双液注浆封堵
3	上海地铁 7 号线某地下车站	地下连续墙	21.0	围护结构漏水、流砂	围护结构隔断微承压水层,开挖面处于微承压水层;新旧地下连续墙接缝处渗漏	坑内局部回填土,坑外钻孔,进行聚氨酯、双液注浆封堵;之后采用高压旋喷桩加固止水
4	上海地铁 7 号线某地下车站	地下连续墙	17.0	围护结构漏水、流砂	围护结构隔断微承压水层,开挖面位于微承压水层;地下连续墙接缝渗漏	坑内局部回填土;基坑内聚氨酯、双液注浆堵漏
5	上海 8 号线耀华路地下车站	地下连续墙	25.0	围护结构漏水、流砂	围护结构未隔断承压水层,开挖面位于微承压含水层;转角幅地下墙接缝渗漏	对渗漏部位回填混凝土;坑外进行聚氨酯、双液注浆封堵
6	上海陆家嘴某地块工程	地下连续墙	27.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层,开挖面位于承压水层;围护结构插入深度不够、接缝渗漏;降水方案不合理	基坑内回灌水,部分基坑围护结构外增设地下连续墙
7	上海陆家嘴某地块工程	地下连续墙	17.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层,坑内承压含水层顶覆土厚度 11m;先期基坑开挖遗留地下水观测井未处理,承压水沿观测井流入开挖面	启用坑内备用降压井(水位观测井),降低坑内承压水水位;对突涌点进行双液注浆封堵
8	上海地铁 10 号线某地下车站	地下连续墙	18.0	围护结构漏水、流砂	围护结构隔断承压水层,开挖面位于承压水层;地下连续墙接缝渗漏	坑内回填,基坑外聚氨酯、双液注浆封堵;之后用高压旋喷桩加固
9	上海地铁 12 号线某地下车站	地下连续墙	23.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层,承压含水层顶覆土厚度 7m;降压井滤水管损坏,承压水和砂土从降压井内涌入基坑	邻近块基坑处增设 2 口降压井;对损坏降压井进行填筑混凝土封堵
10	上海世博园地下空间工程	地下连续墙	20.0	围护结构漏水、流砂	围护结构未隔断承压水层,微承压含水层顶(与承压水层连通)覆土厚度 2m;地下连续墙接缝渗漏	基坑内回填混凝土;基坑外进行聚氨酯、双液注浆封堵
11	上海静安某街坊地下空间工程	地下连续墙	25.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层,承压含水层顶覆土厚度约 6m;承压水、砂土沿降水井管壁流入开挖面	增加邻近降压井抽水量,降低承压水位;对漏水降压井管进行封堵
12	上海黄浦江过江管道竖井工程 ^[1]	地下连续墙	24.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层,承压含水层顶覆土厚度约 6m;坑内没有采取降水措施,坑底发生突涌	从黄浦江取水回灌基坑;在基坑外周布设 5 口降压井和 5 口观测井
13	上海金茂大厦 ^[4]	地下连续墙	19.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层,基坑开挖至 17.5m 深度(距承压水层顶约 10m),清除降水试验井管时突然出现承压水喷涌、流砂	喷砂部位实施钻孔、安装大直径钢管;压灌重晶石粉、陶土粉、化学浆糊等混凝合剂堵漏;完全封闭后,在坑底标高下进行了压密注浆封底加固
14	上海铁路南站北广场	地下连续墙	12.5	坑底突涌	在开挖落深基坑时,因没有开启降压井引起管涌;围护结构未隔断承压水层	回填反压,重新开启降水井
15	苏州工业园区某工程	地下连续墙	19.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层;承压水沿降水井管外冒出,伴随粉砂土	降水井内加大抽水、增加混凝土垫层厚度,及时浇注基坑垫层
16	杭州地铁 2 号线某地下车站	地下连续墙	25.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层,承压水层顶覆土厚度约 2m;底板结构完成,泄水井深度 6m,封堵时滤水管破裂,引起承压水涌入	基坑回灌水,采用水下混凝土封堵泄水孔
17	杭州地铁 2 号线某地下车站	地下连续墙	16.0	围护结构漏水、流砂	围护结构隔断微承压水层,开挖面处于微承压含水层;地下连续墙接缝夹泥	坑内局部回填,接缝处焊接钢板回填混凝土;坑外进行聚氨酯、双液注浆
18	杭州来福士广场 ^[5]	钻孔桩+水泥土隔水帷幕	24.5	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层,开挖深度为 14m 时,挖机带出 Φ34 桩侧注浆钢管,承压水和砂从钢管处涌入	在管涌外围设 2 道围堰,内围堰回填土反压,外围堰抽水.管涌处采用高压旋喷桩加固

续表						
序号	工程名称	围护结构类型	基坑开挖深度/m	事故类型	原因	应对措施
19	宁波地铁 1 号线某地下区间工程	地下连续墙	22.0	坑底突涌	除了突涌部位封堵墙未隔断,其余围护结构隔断承压水层;该部位降压井失效	垫层混凝土加厚,插管引流;加快底板混凝土浇注
20	武汉康泰广场	钻孔桩+水泥土隔水帷幕	16.0	隔水帷幕漏水、流砂	隔水帷幕未隔断承压水层,承压水与长江、汉江有水力联系;隔水帷幕止水效果失效引起涌水、流砂	基坑内增设高压旋喷桩止水帷幕,基坑外采用粉喷桩(干粉)加固、双液注浆封堵
21	广州市新华侨大厦	地下连续墙	12.0	围护结构漏水、流砂	围护结构接缝处存在离析、孔洞,坑外砂土涌入基坑	基坑外双液注浆填充封堵
22	漳州中银大厦 ^[6]	钻孔桩+水泥土隔水帷幕	10.0	坑底突涌	隔水帷幕深度 15.6m,未隔断下部承压含水层;没有降水措施	回填土反压至基坑内外平衡;在坑外设置 5 口降压井和 1 口观测井
23	天津河东路某工程 ^[7]	地下连续墙	25.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压水层;电梯井为局部落深基坑,开挖到底时地下水和砂通过钻孔涌入基坑	落深基坑进行回填土,开启临近降压井;管涌部位进行双液注浆;增设 1 口降压井和 2 口疏干井
24	杭州凯旋门商业中心大厦	灌注桩+水泥土帷幕	13.0	围护结构漏水、流砂	坑内深井管破坏,且地下障碍物部位水泥土加固体质量不好、均匀性差	灌注桩桩间挂网、喷射混凝土,加厚混凝土垫层;增加三级轻型井点降水
25	南京地铁 4 号线某车站	地下连续墙	20.0	坑底突涌	围护结构未隔断承压含水层,坑内深井管破坏,立柱桩部位冒水、流砂	垫层混凝土加厚,插管引流;加快底板混凝土浇注
26	天津地铁南楼站 ^[8]	地下连续墙	16.2	坑底突涌	围护结构未隔断微承压含水层,未设置降压井	插管引流,加快底板混凝土浇注

排桩和水泥土加固体等形式,其中采用水泥土隔水帷幕有 4 例。

同时,深基坑承压水的风险类型与隔水帷幕插入深度有关,如图 1 所示:对于隔水帷幕插入深度无法隔断承压水层的情况,深基坑承压水风险体现为坑底突涌风险和围护结构隔水帷幕漏水、流砂风险,

共有 20 例,占 76.9%;而对于隔水帷幕有效隔断承压水层的情况,深基坑承压水风险体现为围护结构渗漏风险及流砂风险,共有 6 例,占 23.1%。因此,围护结构隔水帷幕无法隔断承压含水层情况的承压水风险显著增加。

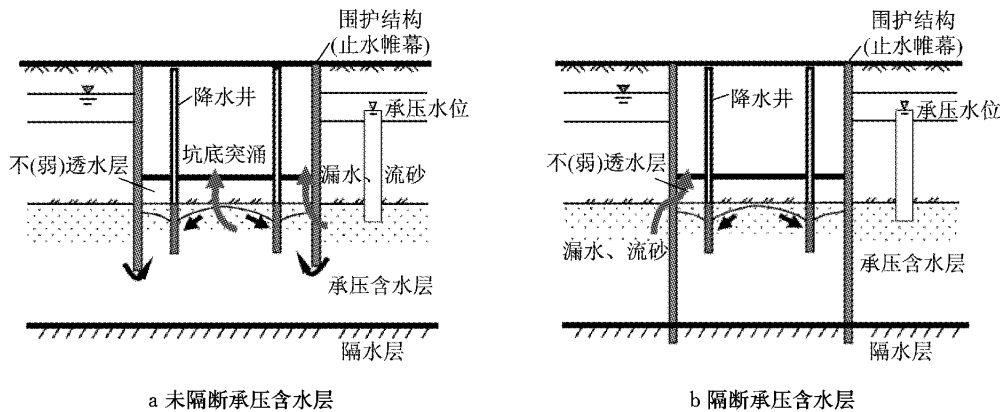


图 1 围护结构插入深度不同工况下承压水风险
Fig.1 Risk of the artesian water for the different depth of retaining wall

1.1 故障树分析

从收集的 26 个工程案例分析可知,深基坑工程承压水风险包括基坑底突涌和围护结构隔水帷幕渗漏、流砂等 2 个方面:对于坑底突涌风险发生于围护结构隔水帷幕未隔断承压含水层情况,风险因素主要有隔水帷幕插入深度不够、无降压井或降水方案

不合理、隔水帷幕质量缺陷、地层遗留物(注浆管、观测井、钻孔孔等)、降水井失效以及封井不合理等;围护结构或隔水帷幕漏水、流砂风险主要由隔水帷幕的质量缺陷引起,包括地下连续墙接缝缺陷、新老地下连续墙接缝缺陷、相邻幅段地下连续墙错开叉和不同围护结构接缝处加固不到位等,或者水泥土

式中: F_A 为顶事件A的概率; F_i 为基本事件 X_i 的概率, $F_i=P(X_i)$ 。

由式(2)计算得到深基坑工程承压水风险因素的敏感性指数见表2。

从表2结果可知,将敏感性指数 $I_g(i) \geq 0.05$ 基本事件作为深基坑工程承压水风险关键因素,其重要性排序依次为:①未设置降压井或降水方案不合理X5;②地下连续墙接缝缺陷如夹泥、离析或空洞X16;③地层遗留物导致承压水通道出现X6;④地下连续墙相邻幅段错开叉X19;⑤隔水帷幕插入深度不够X2;⑥降压井管壁外封堵失效X12;⑦隔水帷幕水泥土加固体均匀性差存在薄弱部位X21等。

需要说明的是,本文收集的工程案例中采用地下连续墙作为隔水帷幕有23例,发生隔水帷幕渗漏的案例为8例,所占比例34.8%;采用水泥土加固体作为隔水帷幕有3例,其中2例发生渗漏,比例为66.7%,且引起的后果严重。

2 风险控制

深基坑工程承压水风险控制主要包括2个方面:预防控制和应对措施。预防控制主要是在深基坑开挖前采取控制措施;应对措施主要是在基坑开挖过程中出现风险预兆或险情发生时制定的控制措施。结合工程案例,深基坑承压水风险控制措施主要有以下方面。

2.1 预防控制

由于承压水风险引起的后果严重,故障树分析获得的风险因素应纳入深基坑承压水风险预控范围;对于承压水水位标高可以通过地质勘察、开挖前降水试验和开挖过程观测井等方式确定。从敏感性分析,深基坑承压水风险关键因素有X5,X16,X6,X19,X2,X12,X21等。从这7个关键风险因素分析,深基坑承压水风险预防控制的重点在于隔水、降压和封底,包括基坑降水、基坑隔水帷幕、地下遗留物或坑内土体加固等方面。

(1) 隔水帷幕主要是隔断基坑内外承压水通道或增加基坑内外承压水渗流路径。对于隔水帷幕的风险预防控制包括2个方面:①设计和施工过程中应确保隔水帷幕的插入深度,以满足承压水渗流对土方开挖的作用要求;②设计和施工过程中应确保隔水帷幕强度和均匀性满足承压水渗流作用力的要求,包括水泥土帷幕的强度和均匀性、地下连续墙混凝土质量和接缝质量等。

(2) 基坑降水通过基坑内或基坑外抽水以降低承压水水位以满足水土压力平衡。风险预防控制体现为:①在设计和施工方面,应通过现场降水试验设置足够的降压井及其深度,确保土方开挖过程承压水头降满足抗突涌稳定性和抗渗流稳定性要求;设置一定数量的备用降压井以备土方开挖后部分降压井失效或应急之用;②降水施工过程控制,应注意降压井成井过程回填砂砾滤水层、黏土球隔水回填、洗井等关键过程控制,应重视高压旋喷桩、临近注浆等引起降压井失效的风险控制;③抽降水运营过程,重点控制内容包括降压井保护防止土方开挖引起的破坏、抽水泵性能选择、备用电源配置、管井内流砂预防和基坑内外承压水位变化等方面,以及按需降水的动态控制与管理,确保承压井降水的正常。

(3) 坑内土体强度与地下遗留物控制主要内容:坑内软弱土层加固强度、均匀性和范围应满足围护结构变形控制和抗隆起稳定性要求;做好基坑排水,防止基坑积水等引起开挖面土体强度降低;对于城市区域深基坑工程,场地内遗留物如垂直向管、桩基、钻探孔等存在的可能性大,引起承压水突涌的风险较高,应加强勘察阶段现场物探、勘察设计交底、原有场地调查、初始阶段开挖探明等方面控制管理,对于发现的遗留物部位应及时进行加固处理,有效隔断承压水作用通道。

(4) 降水井或泄水孔封堵风险控制也是承压水风险控制的关键环节。在设计与施工过程中,应保持管井或泄水孔内外水土压力平衡,确保封堵施工质量;重点控制封井顺序、井孔封堵效果检查、割除管井后底板混凝土封堵等。

2.2 应对措施

根据收集的26个案例事故处理分析可知,在深基坑承压水险情出现预兆时,主要采取回填、封堵等应对措施以快速促进深基坑水土压力平衡,其主要应对措施有以下方面。

(1) 对于隔水帷幕已隔断承压含水层的情况,所采取的应对措施为及时对隔水帷幕进行堵漏。根据案例分析,首先在渗漏点进行局部回填反压,防止渗漏风险进一步扩大;之后采用坑外钻孔注浆进行堵漏,堵漏方式有聚氨酯堵漏、双液注浆堵漏和旋喷桩堵漏,更多情况是其中的2种或3种堵漏方式相结合;最后,通过地下水位观测分析确定堵漏措施满足要求后,再进行开挖。

(2) 对于隔水帷幕未能隔断承压含水层的情况,风险应对分2种状况:①基坑开挖面与承压含水

层顶之间的覆土层为工程性质量好的黏性土且厚度大于 5m 时,可以采用启动预先设置的备用井加大抽水量,以降低坑内承压水位,同时对承压水露点部位进行回填,采用双液注浆、旋喷桩等封堵措施,如表 1 的案例 7、案例 13、案例 18 等;②基坑开挖面处于承压含水层或开挖面与承压含水层顶覆土厚度小于 2 m 时,应立即采取回填土或回灌水等应急措施,在平衡承压水作用力后,可采取增加降水井、增加隔水帷幕或加深隔水帷幕深度等措施,如案例 1、案例 6、案例 12 等。

(3) 对于降水井损坏引起的承压水风险的情况,可以启动临近备用降压井,之后对损坏的降压井进行封堵,如案例 9、案例 11 等。当未设置备用降压井或启用降压井仍无法控制承压水风险时应采用应对措施(2)。

从以上分析可知,对于深基坑承压水风险控制,设置一定数量的备用降压井是非常必要的,如上海市规范要求备用降压井数量不少于 20%^[12]。

3 结论

基于 26 个工程案例可知,软土深基坑承压水施工风险主要体现为坑底突涌和隔水帷幕渗漏 2 个方面;采用故障树分析法及敏感性分析法建立软土地区深基坑工程承压水风险故障树和关键风险因素,其中降水井和隔水帷幕设计与施工是控制深基坑承压水风险的关键;提出了承压水坑底突涌和隔水帷幕渗漏风险应对措施,强调了降压备用井与承压水位观测井在应急措施中的重要性、及时性和有效性,有助于解决由于环境、施工等复杂因素导致的深基坑工程承压水风险分析不全面的问题。结果对软土地区深基坑工程承压水处理具有一定意义,同时也为诸多深基坑工程中其他风险分析提供方法借鉴。

参考文献:

- [1] 姚天强,石振华,曹惠宾,等. 基坑降水手册[M]. 北京:中国建筑出版社,2006.
YAO Tianqiang, SHI Zhenhua, CAO Huibin, *et al.* Handbook of dewater for excavation engineering [M]. Beijing: China Architectural Press, 2006.
- [2] 白廷辉,余喧平,曹文宏. 上海轨道交通 4 号线(董家渡)修复工程[M]. 上海:同济大学出版社,2008.
BAI Tinghui, YU Xuanping, CAO Wenhong. Restoration project of Shanghai Metro Line 4 (Dongjiadu) [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2008.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of foundation excavations [S]. Beijing: China Architectural Press, 2012.
- [4] 戴斌,王卫东. 受承压水影响深基坑工程的若干技术措施探讨[J]. 岩土工程学报,2006,28(z1): 1659.
DAI Bin, WANG Weidong. Discussions on technologies of deep foundation pit projects affected by confined water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(z1): 1659.
- [5] 张培龙,吴水根,陈伟. 深基坑突水管涌事故的抢险施工技术[J]. 建筑施工,2013,35(6): 467.
ZHANG Peilong, WU Shuigen, CHEN Wei. Construction technology for risk rescue of sudden piping accident in deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Building Construction, 2013, 35(6): 467.
- [6] 李海如,吴寿明. 漳州中银大厦基坑突涌处理方法[J]. 探矿工程,2004,31(9): 23.
LI Hairu, WU Shouming. Treatment of piping of excavation for Zhangzhou Zhongyin Building [J]. Chinese Journal of Exploration Engineering, 2004, 31(9): 23.
- [7] 王宝德,高海彦,陈学光. 高承压水地区超深基坑突涌分析与处置[J]. 施工技术,2012,41(11): 98.
WANG Baode, GAO Haiyan, CHEN Xueguang. Analysis and treatment to gushing of a super-deep foundation excavation in high pressure water area[J]. Chinese Journal of Construction Technology, 2012, 41(11): 98.
- [8] 刘润,闫焱旺,张启斌,等. 天津地区地铁深基坑施工安全控制标准研究[J]. 岩土力学,2007,28(7): 1511.
LIU Run, YAN Shuwang, ZHANG Qibin, *et al.* A study of control criterion for safe construction of deep foundation pit of underground in Tianjin area[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1511.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. GB/T4888—2009 故障树名词术语和符号[S]. 北京:人民出版社,2009.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T4888—2009 Fault tree terminology and symbols [S]. Beijing: People Publishing House, 2009.
- [10] 周红波,高文杰,蔡来炳. 基于 WBS-RBS 的地铁基坑故障树风险识别与分析[J]. 岩土力学,2009,30(9): 2703.
ZHOU Hongbo, GAO Wenjie, CAI Laibing. Risk identification and analysis of subway foundation pit by using fault tree analysis method based on WBS-RBS[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2703.
- [11] 边亦海,黄宏伟. SMW 工法支护结构失效概率的模糊事故树分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(5): 664.
BIAN Yihai, HUANG Hongwei. Fuzzy fault tree analysis of failure probability of SMW retaining structures in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 664.
- [12] 上海市城乡建设和交通委员会. DG/TJ08-61—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2010.
Commission of Urban Construction and Transportation of Shanghai City in China. DG/TJ08-61—2010 Technical code for excavation engineering [S]. Shanghai: Station of Building Materials Industry Market Management of Shanghai City, 2010.