

地表水引起的基坑“水盆效应”导致地下结构破坏机理及预防机制分析

黄唐林, 王锐, 侯元立, 付博宇, 邹睿

(重庆市勘测院有限公司, 重庆市 401121)

摘要: 随着我国城镇化水平的逐年提高, 建设工程地下结构面临的岩土问题愈发复杂, 当洪水发生时汇流形成的地表水对地下结构的破坏影响愈发突出。运用了推理公式法对微小型流域在暴雨频率为100 a一遇($P=1\%$)、50 a一遇($P=2\%$)、20 a一遇($P=5\%$)洪水过境时的水量展开了推算, 通过实地调查以及对地下结构不同受损部位的受力分析, 对因地表水引起的“水盆效应”导致地下结构产生破坏的机理进行了详细剖析, 进而从建设场地的地形地貌、地下结构受损外部原因和破坏机理等方面对此类灾害的预防机制进行了深入分析, 理论成果将为此后规避此类灾害提供了一定的理论支撑。

关键词: 水盆效应; 基坑; 推理公式法; 破坏机理; 预防机制

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0399-04

Analysis on Failure Mechanism and Prevention Measures for Underground Structures Induced by “Water Basin Effect” in Foundation Pits Caused by Surface Water

HUANG Tanglin, WANG Rui, HOU Yuanli, FU Boyu, ZOU Rui

(Chongqing Surveying Institute Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: With the annual increase in the level of urbanization in China, the geotechnical problems faced by underground structures in construction projects are becoming increasingly complex. When floods occur, the damage caused by the confluence of surface water to underground structures becomes increasingly prominent. The rational formula method is applied to calculate the water volume of micro and small river basins when the frequency of rainstorm is once every 100 years ($P=1\%$), once every 50 years ($P=2\%$), and once every 20 years ($P=5\%$) during flood passage. Through the field investigations and the stress analysis on the different damaged sections of underground structures, the mechanism by which the “water basin effect” caused by surface water leads to the damage of underground structures is analyzed in detail. An in-depth analysis is conducted on the prevention mechanism of such disasters from the aspects such as the topography and landform of the construction site, the external causes of underground structure damage, and the failure mechanism. The theoretical achievements will provide certain theoretical support for avoiding such disasters in the future.

Keywords: water basin effect; foundation pits; rational formula method; failure mechanism; preventive measures

0 引言

随着我国城镇化的水平不断提高, 城市地下空间的科学发展减灾问题显得越发重要^[1]。工程实践中, 涉及到基坑工程, 勘察设计行业技术人员常常较为关注场地地下水是否发育, 根据地下水发育情况考虑基坑工程的抗浮措施; 若场地地下水较为贫乏

时, 则一般不考虑抗浮措施, 甚至部分建筑工程雨季时期的截排水措施考虑严重不足, 进一步威胁地下结构的安全。如重庆北碚区水土镇某厂房在建期间C2地下室在雨季来临时地表水下渗, 导致结构底板发生局部隆起破坏^[2]。浙江省义乌市某地下室因降雨地表水下渗致结构地板局部发生上浮, 根据案号(2013)浙民提字133号案件判决, 设计单位判罚主要责任, 罚款77万元。此类破坏后果轻则增加措施成本, 重则威胁建筑整体结构安全。这种由于地表水流入地下结构侧壁或结构底板成为地下水后且排

收稿日期: 2025-05-01

作者简介: 黄唐林(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事岩土工程勘察工作。

泄不畅,滞留在有限的地下空间形成较高的水压力或浮力,对地下结构造成破坏现象的原理就被称作“水盆效应”^[3]。因此,在缺乏水文监测资料的微小流域进行工程建设,除了调查走访外,如何科学地定量计算或评价洪峰过境时流域流量、水位标高对场地截排水或抗浮措施的设计提供支撑性依据就显得十分重要。

国内学者对降雨引起的地下结构破坏的机理认识主要研究如下:田瑞端等^[4]运用数值模拟方法揭示了短时特大暴雨导致的地铁深基坑变形的关键因素。曾超峰等^[5]讨论了邻近浅埋结构对开挖前降水引发基坑变形的影响。孙强等^[6]通过建立土体孔隙微结构失稳突变模型,探究了由地下水引起的基坑失稳坍塌的内在机理。周朋^[7]对强降雨后地铁深基坑围护结构和内撑体系出现失效的原因进行了分析。刘庭金等^[8]分析了花岗岩残积土深基坑土层在地下水位变幅过程中特性。基于地表水形成“水盆效应”导致的地下结构破坏的灾变机理的全面认识,能够有效地防止此类灾害的发生。

1 工程概况

重庆市沙坪坝区某轨道在建地下车站,2023年7月28日,拟建场地区域受到强降雨天气影响(日最大降雨量达到162.5 mm),地表水形成洪流淹没场地,场地区域地表水最深处约0.8 m,地表水沿车站结构周边存在的孔隙、缝隙等入渗,导致车站主体结构局部受损。

根据现场调查情况,累计发现裂缝74处,其中2-5/A轴侧墙(轨排井段)出现2道贯穿裂缝,1道根部斜裂缝,5/A、4/A轴侧墙为贯通裂缝,裂缝从基底延伸至顶板,2-3/A轴侧墙为根部斜裂缝,裂缝宽度均大于10 mm,顶层2-5/A轴侧墙段目前侧墙与围护结构已脱开,顶部产生最大位移为46.6 cm,侧墙根部混凝土已被压碎,侧墙内部混凝土产生了分层断裂现象(见图1)。车站轴西侧19-25C结构底板墙根处出现贯穿性裂缝,开裂长度约为50 m,裂缝宽度10~20 mm,如图2所示。

拟建车站原始地貌为构造剥蚀丘陵地貌,地势整体呈北西高南东低,一条水沟从场地穿过,水沟宽1~2 m,水深0.2~0.8 m,穿越段长度约100 m,水沟上游汇水面积约0.78 km²,建设期间用直径为2 000 mm管涵代替。根据勘察资料,场地地层岩性主要为:第四系素填土(Q₄^{ml})、粉质黏土(Q₄^{el+dl})和侏罗系中统沙

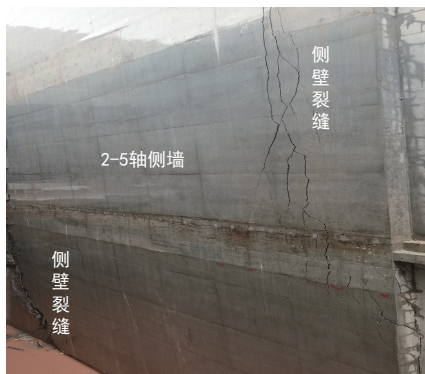


图1 轨排井部分2-5轴侧壁开裂照片



图2 车站轴西侧19-25C轴变形开裂照片

溪庙组(J_{2s})砂质泥岩夹砂岩,场地主要岩土层为相对隔水层,拟建场地在勘察期间地下水较为贫乏,后续在车站土石方开挖基坑验槽过程中也揭露基底无地下水出露。

2 推理公式法推算地表水洪峰流量

2.1 推理公式法

推理公式法是我国现有设计洪水计算规范中规定使用的小流域设计洪水一种重要计算方法,在相关研究中,其在微小型流域计算洪峰流量具有较好的适用性^[9-12]。推理公式法的优势在于可以通过查询地区编制的《水文手册》收集所在场地近年来水文参数推算无水文监测数据的微小型流域对应的洪峰相关数据^[13]。

根据《四川省水文手册》^[14](以下简称《手册》),本次选用短历时($t=1\sim 24$ h)相关计算方法:

$$\begin{aligned} H_{tp} &= S_p t^{1-n_{2p}} \\ n_{2p} &= a_2 + b_2 \lg P \\ S_p &= H_{24p} \cdot 24^{n_{2p}-1} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: H_{tp} 为短历时 t 小时的设计暴雨量,min; S_p 为设计暴雨雨力,mm/h; n_{2p} 、 a_2 、 b_2 为短历时($t=1\sim 24$ h)设计暴雨公式指数及其参数。

推理公式法适用于全面产流条件下全面汇流和部分汇流2种情况,其公式的形式为:

$$Q = 0.278\psi iF = 0.278\psi \frac{S}{\tau^n} F$$

在全面汇流条件下 ($\tau \leq t_c$):

$$\psi = 1 - \frac{\mu}{S} \tau^n$$

在部分汇流条件下 ($\tau > t_c$):

$$\psi = n \left(\frac{t_c}{\tau} \right)^{1-n}$$

$$t_c = \left[(1-n) \frac{S}{\mu} \right]^{\frac{1}{n}}$$

$$\tau = \tau_0 \psi^{\frac{1}{4-n}}$$

$$\tau_0 = \frac{0.278^{\frac{3}{4-n}}}{\left(\frac{mJ^{\frac{1}{3}}}{L} \right)^{\frac{4}{4-n}} (SF)^{\frac{1}{4-n}}} \quad (2)$$

式中: Q 为最大流量, m^3/s ; ψ 为洪峰径流系数; i 为最大平均暴雨强度, mm/h ; S 为暴雨雨力, mm/h ; n 为暴雨公式指数; F 为汇水面积, km^2 ; L 为径流长度, km ; J 为沿 L 的河道平均坡度, $\%$; τ 为流域汇流时间, h ; τ_0 为当 $\psi=1$ 的流域汇流时间; t_c 为产流时间, h 。

2.2 计算参数选取

(1) 式中 a_2 、 b_2 通过《手册》附图 4-8、49 查询小流域所在区域的暴雨公式参数 a_2 、 b_2 等值线图得到 $a_2=0.726$ 、 $b_2=0.015$; 通过查询《手册》附图 4-1 该区域内年最大 24 h 暴雨均值 $\bar{H}_{24}=100 \text{ mm}$, 和附图 4-2 查询 C_{v24} 值为 0.5; 由皮尔逊 III 型频率表根据 C_{v24} 查出各种设计暴雨频率 P 下的 K_p 值, 通过计算便可以得到各指定频率下的年最大 24 h 暴雨设计量 $H_{24p}=K_p \times \bar{H}_{24}$ 。

(2) 式中流域特征值 F 、 L 、 J 取值分别为 0.78 km^2 、 1.85 km 、 20% ; 计算 $\theta = \frac{L}{J^{\frac{1}{3}} F^{\frac{1}{4}}}$, 运用《手册》表 5-3

综合式计算出汇流参数 $m=0.375$; 运用《手册》公式

$$5- \tau_0 = \left[\frac{0.383}{\theta} \frac{1}{S^{\frac{1}{4}}} \right]^{\frac{4}{4-n}} \quad \text{计算得出 } \tau_0。$$

2.3 设计洪水推算成果

本文通过推理公式法推算各种设计暴雨频率为 100 a 一遇 ($P=1\%$)、50 a 一遇 ($P=2\%$)、20 a 一遇 ($P=5\%$) 对应的洪水过境拟建场地时相关水文参数。通过式 (1) 得到三种不同设计暴雨频率下的设计暴雨雨力 S_p (见表 1)。

表 1 的计算结果间接表明, 研究对象本次日最大

表 1 各种设计频率下设计暴雨参数表

频率 $P/\%$	$\bar{H}_{24}/\text{mm}$	K_p	H_{24p}/mm	设计暴雨公 式指数 n_p	设计暴雨雨 力 S_p/mm
1	100	2.74	274	0.746	122.23
2	100	2.42	242	0.751	109.52
5	100	1.99	199	0.756	91.78

降雨量达到 162.5 mm, 低于 20 a 一遇 ($P=5\%$) 时日设计暴雨量 199 mm。根据式 (1) 计算成果和式 (2), 进而推算出 3 种不同设计暴雨频率下洪水过境时的洪峰径流系数 ψ 、汇流时间 τ 、最大流量 Q (见表 2)。

表 2 各种设计暴雨频率下洪水过境时最大流量

频率 $P/\%$	洪峰径流系数 ψ	汇流时间 τ/h	最大流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1	0.988	0.20	88
2	0.986	0.20	77
5	0.983	0.22	62

表 2 计算成果表明, 拟建场地在设计暴雨频率 100 a 一遇 ($P=1\%$)、50 a 一遇 ($P=2\%$)、20 a 一遇 ($P=5\%$) 洪水过境时洪峰径流系数大致呈递增趋势, 汇流时间呈递减趋势, 因此对应的最大流量分别为 88、77、62 m^3/s , 本计算结果可以为拟建场地截排水措施的设计提供理论支撑, 进而可以根据断面宽度和经验洪水流速推算理论洪水位, 在截排水措施无法满足最大流量时, 可根据理想洪水位进行抗浮设计。

3 破坏机理分析

根据现场调查情况, 结合内窥镜、地质雷达等物探手段查探车站的破坏情况, 此次由地表水引起的“水盆效应”对地下结构主要破坏现象主要表现为两种: 侧壁开裂和结构底板墙根处隆起开裂。

3.1 侧壁开裂受力分析

3.1.1 水压力计算

已知在建车站主体结构长 349 m, 宽 21.9 m, 高 15.9 m, 本次洪峰过境时地表水地面最大深度为 0.8 m, 根据静水压力公式:

$$P = \rho_w \cdot g \cdot h \quad (3)$$

式中: ρ_w 为水的密度, 值为 1 000 kg/m^3 ; g 为重力加速度, 值为 9.81 m/s^2 ; h 为水深。

侧壁底部受到最大水压力:

$$P_{\max} = 1\,000 \cdot 9.81 \cdot (0.8 + 15.9) = 163.8 \text{ kPa};$$

侧壁顶部为地表水产生的水压力:

$$P_{\text{top}} = 1\,000 \cdot 9.81 \cdot 0.8 = 7.85 \text{ kPa}。$$

3.1.2 侧壁内力分析

侧壁底部受到来自岩壁和底板约束, 假设侧壁为悬臂梁结构, 水压力呈三角形分布荷载作用作用

于侧壁。最大弯矩出现在底部,根据弯矩计算公式:

$$M_{\max} = \frac{1}{6} \cdot P_{\max} \cdot H^2 \quad (4)$$

计算得出侧壁底部弯矩 $M_{\max}=6\,935$ 。

根据剪力计算公式:

$$Q_{\max} = \frac{1}{2} \cdot P_{\max} \cdot H \quad (5)$$

根据式(5)得到侧壁受到最大剪力 $Q_{\max}=1\,303\text{ kN/m}$ 。

根据以上计算结果分析,本次洪水经过拟建场地时,由于地表水淹没本场地,地表水渗入侧壁形成较大的水压力,车站侧壁受到的剪力或弯矩超过能够承受极限,侧壁的受力模式表现为受拉破坏。

3.2 底板隆起开裂受力分析

车站结构底板破坏处位于车站西侧 19-25C 轴墙根处,此段车站侧壁未发生变形开裂,表明此处底板主要受到来自底部水压力的影响。

3.2.1 荷载分析

此段车站底部渗入地下水与地表水应该处于联通状态,假设本段结构底板以下均有地下水,底部水压为全水头静水压力,相当于水压以均布荷载形式作用于结构底板,根据式(3)的计算结果,均布荷载强度 $p = 163.8\text{ kPa}$ 。

3.2.2 结构底板内力分析

底板横向(宽度方向)两端受车站结构和岩壁约束,可简化为固定的梁,承受均布水压力,计算跨度取车站宽 $L=21.9\text{ m}$ 分析单位宽度(1 m)的受力。

两端固定梁的支座弯矩公式:

$$M_{\text{支座}} = -\frac{qL^2}{12} \quad (6)$$

根据式(6)计算得出 $M_{\text{支座}}=-6\,554$ 。

支座处最大剪力公式:

$$Q_{\max} = \frac{qL}{2} \quad (7)$$

根据式(7)得到支座处受到剪力 $Q_{\max}=1\,794\text{ kN/m}$ 。

计算结果表明:洪水过境时,地表水渗入结构底板下部并与地表水联通,对结构底板形成一个向上的均布荷载,结构底板墙根处受到的弯矩或剪力超过承受极限,结构底板墙根处的破坏模式表现为压弯破坏。

4 预防机制分析

(1)从地形地貌来分析,拟建场地截断了地表水原始排泄通道,建设期间虽然采用了 2 000 mm 管涵进行替代,但忽略了“未来之水”会超出场地排水能

力,因此遇到此类地形,应该着重分析“未来之水”的水量、水位,从而提前做好相应的截排水措施。

(2)肥槽回填不密实常常是工程出现事故的重要因素^[15]。从地下结构产生破坏的原因分析,是因为车站结构四周肥槽回填不密实,车站侧壁、底板存在地表水下渗空隙、缝隙等通道,与地表水联通形成较高的静水压力对车站结构形成破坏。因此地下结构肥槽填料应优先选用相对不透水材料,如回填过程要密实,封堵好地表水的下渗通道。

(3)从地下结构产生破坏机理分析,一方面静水压力过大,因此在发生此类洪水灾情时需及时泄压,如打泄水孔等,避免形成过高的水压力,对地下结构形成持续性破坏;另一方面从破坏模式分析,在容易形成高拉力、压力地带可适当增设抗拉或抗拔措施。

(4)场地地下水贫乏,相关文件未明确抗浮水位,设计应充分考虑地下结构截断过水断面后截排水措施排水能力,若设计施工过程中无法保障极端暴雨天气下的排水能力,则应考虑抗浮设计来避免地表水引起的“水盆效应”对地下结构的破坏。

5 结 语

(1)本文运用了推理公式法推测了无水文监测资料的微小型流域在频率为 100 a 一遇($P=1\%$)、50 a 一遇($P=2\%$)、20 a 一遇($P=5\%$)的设计暴雨量、流量,为此种类型建设场地的截排水措施或抗浮措施提供了一定的理论支撑。

(2)“水盆效应”在该工程中对地下结构的破坏模式主要表现为侧壁受拉破坏和底板两侧受弯压破坏。

(3)从地形地貌、地下结构产生破坏的原因、机理对此类灾害的预防机制展开了分析,为规避此类灾害的发生提供了一定的理论支持。

参考文献:

- [1] 高永红,任辉启,王明洋,等.城市地下空间重大灾害防御探讨[J].地下空间与工程学报,2023,19(4):1051-1057.
- [2] 徐志武,孔凡林,郭灿,等.地下室结构底板抗浮不足局部失稳破坏实例分析[J].建筑技术,2023,54(19):2420-2426.
- [3] 何平,张红军,邹常生.“水盆效应”的抗浮设防及治理措施[J].重庆大学学报,2022(增刊1):25-29.
- [4] 田瑞端,肖见航,王晓睿.特大暴雨引起的深基坑变形分析及降水处理[J].水利与建筑工程学报,2024,22(5):38-45.
- [5] 曾超峰,王硕,袁志成,等.考虑邻近结构阻隔影响的基坑开挖前降水引发地层变形的特性[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(2):338-347.

(下转第 413 页)