

城市地下空间地面洪水侵入成因和特征分析

陈峰¹, 刘曙光², 刘微微¹

(1.上海宏波工程咨询管理有限公司, 上海 201707; 2.同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:解构地面洪水侵入地下空间的灾害因素,从内、外部环境2个维度,分析地面洪水侵入成因和特征,探寻浸水规律和防止机制。研究表明:外部防汛环境的脆弱性是导致地面洪水侵入地下空间的首要因素;地下空间自身具备的防御措施和能力与灾害损失密切相关;地面洪水侵入路径和方式多样,不确定性因素多,且水力特征复杂,没有确定的统一规律可循,对于重要、大型的地下空间应通过采用数值模拟与物理模型相结合的研究手段拟定防御浸水对策和措施;排水系统布置需建立在水流特性分析基础上,且排水设施尽可能布置在水流沿程路径上,靠近洪水易侵入部位规模宜大,数量宜多。研究成果可为科学合理地采用相应的防洪对策和措施提供理论依据。

关键词:城市地下空间;地面洪水;水流特性;浸水成因;浸水特征;防汛环境

中图分类号: TU761.4; TV873

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2018)02-0038-06

1 研究背景

随着城市化水平的提高,在城市环境演化过程中,洪涝灾害的频繁发生和呈持续加重的趋势,使其成为城市减灾的重点和主要研究内容之一。地下空间作为城市可持续发展的重要组成部分,有效地延伸了土地资源的利用,城市化水平越高的地区,相应地下空间开发利用程度也越高,但地下空间位于城市地表以下,遭遇洪涝灾害时,极易成为防灾薄弱环节,受灾风险高。并且城市地下空间所承担的城市功能逐步延伸宽泛,重要性也随之提高,从最初的民防、地下管线发展到地下车库、地下交通、地下综合管廊、地下商场以及地下城市综合体等。因此,城市地下空间一旦发生地面洪水侵入,灾害损失就十分严重。如:2001年9月“纳莉”台风,造成台北地铁全线停运数月,经济损失达100亿元新台币(约人民币20亿元)^[1];1999年6月暴雨导致河流涨水泛滥,福冈博多地铁车站和地下街遭受洪水入侵,博多车站及附近大楼地下一层被完全淹没,同年7月份东京地区暴雨导致大量地下空间浸水,近一半地下空间水淹深度超0.2 m^[2];2012年10月美国纽约受飓风“桑迪”影响,许多地铁站内积水严重,整个地铁系统遭到重创^[3];2013年10月“菲特”台风,造成上海市嘉定区城市岸泊小区因暴雨及临近河道漫溢倒灌,4个地下车库被完全淹没,车库内车辆无一幸

免^[4]，“菲特”台风期间还造成上海市多个地下立交隧道遭受水淹,其中祁连山路地下立交最大淹没水深达到7 m^[5]。以上事件仅为冰山一角,自21世纪以来,从公开发布的信息可知,全球几乎每年都有地下空间发生严重地面洪水侵入事件的报道。

我国随着城镇化战略的推进以及北京、上海、广州、深圳等大城市轨道交通建设和城市中心区地下空间系统的建立,城市地下空间开发利用进入前所未有的大规模发展阶段,相应地面洪水侵入地下空间的灾害发生频率增多、灾害损失规模增大。因此,针对地面洪水侵入城市地下空间的防灾研究也引起了诸多国内外学者的关注。20世纪90年代日本系统开展了地面洪水侵入地下空间防灾研究,研究内容主要包括:防洪减灾对策和洪水风险图的绘制^[6-7];地下空间洪水预测、管理和防灾避难导则^[2,8];运用基于非结构化网格2-D水流模型分析洪水入侵概率^[9];建造物理模型测试不同年龄组人员在浸水环境中的逃生避难可能性^[10]。根据研究成果修订了防洪法,明确规定地下空间应具备抵御洪水入侵的能力,并需制定相应的防洪措施^[11]。德国、韩国、马来西亚等根据各自在洪水期间受灾情况,针对地下空间均开展了一系列的研究,其中马来西亚水利灌溉局针对地下车库制定了防洪导则,要求地下车库开展风险评估,明确防洪标准、措施和构建洪水监控、预警系统^[12]。目前,国内地面洪水侵入城市地下空间防灾研究处于起步阶段,一些学者

尝试开展了此方面的研究:王军辉等^[13]针对北京市特定的气象、水文以及地下水条件,研究了北京市地下空间运营期主要存在的水灾害问题,并从工程、生态、管理角度提出了相应的防治策略;莫伟丽^[14]基于气液两相流理论,采用VOF方法构建地铁车站地面洪水侵入过程数值模拟模型,动态模拟地表积水入侵地铁车站历时过程;权瑞松等^[15]基于对脆弱性的理解,建立了上海市地下轨道交通暴雨内涝脆弱性评价指标体系,对地铁车站各出入口的内涝脆弱性进行了评价;娄厦等^[16]对上海市3条已建轨道交通线路各出入口的防洪设施开展了实地调查,分析指出现状地铁车站出入口防洪能力存在不足的问题;陈峰^[17]针对城市地下空间建设和运营期间的防汛风险综合评估机理和内容进行研究,识别防汛风险影响因素,探讨防汛风险评估框架体系和评价指标,提出风险控制对策和建议。

国内对地面洪水侵入城市地下空间的防灾专项研究工作开展还不系统、深入。目前,地面洪水侵入地下空间研究多从单一因素或地下空间自身静态条件开展,研究对象也主要集中在地下空间本体(如:城市轨道交通、商场及住宅地下停车库等),对地下空间所处区域总体洪、涝环境、地形地势等因素缺乏考虑,如:对于地下空间出入口挡水设施高度的确定,不考虑所处环境地势、区域河网防洪调蓄能力、发生积水可能性、区域雨情和排水能力等因素。地下空间内部排水设施设置一般也仅考虑局部敞开口位雨水、渗漏水或污废水排放,不考虑洪水侵入后的排水能力和相应措施。从更广义层面分析,尤为严重的是,许多河道随着城市发展调蓄水能力不断降低,即使降雨强度和排水标准不变,仍会造成水位雍高,同时城市下垫面不透水面积增加,造成降雨积水汇流增快,加之不少开发商以邻为壑,片面考虑自身的安全和景观,造成整体性、区域性的地面积水成倍增加,极大增加了地下空间被淹没的浸水风险。即使诸如上海市已针对城市地下空间开展了专项防汛论证工作^[18],由于没有系统的研究成果和专业的规范标准作为技术支撑,提出的对策和措施主要参照相关防洪规范和地下建筑设计规范,但规范标准对于城市地下空间防洪及洪水入侵方面均无明确的规定,论证只能依据特定条件下的经验方法作为判断标准,造成论证结论的可信度不高。

本文针对以上问题,解构地面洪水侵入地下空间的受灾因素,考虑城市地下空间内、外部环境因素,分析地面洪水侵入成因和特征,以期探寻浸水规律和防止机制。

2 地面洪水侵入地下空间成因分析

地面洪水侵入地下空间主要受到外部防汛环境和自身防御2个维度方面因素的影响^[19]。

2.1 外部防汛环境

外部防汛环境危险性体现为区域自然因素和防汛能力所导致地面洪水侵入地下空间的可能性。

区域自然因素主要包括:①气候变化造成的极端性降雨和台风风暴潮增多;②城市“热岛效应”和“雨岛效应”增加降雨的机率和强度;③海平面上升及高潮位顶托;④地面沉降导致防汛设施和排水设施运行能力降低;⑤下垫面呈不透水变化造成径流系数增大,汇流时间缩短;⑥区域地形地势较低,处于洪泛区范围内等。

区域防汛能力主要包括:①区域防洪除涝标准与区域发展的适配性;②现状防汛设施的完整性和安全性;③区域排水能力等。

在城市发展规划中如果没有考虑以上因素,以及新城区开发和老城区改造没有考虑到防洪除涝能力的补偿,将直接导致区域内地下空间外部环境呈现危险性。城镇化的建设,导致大量河道和水面被填埋、隔断、阻塞,造成河网萎缩,区域防洪除涝及调蓄能力薄弱。而许多老城区现状排水标准低,多采用合流制排水模式,排水能力弱,改造又缺少管位,提高标准难度非常大,再加上日常管理不善造成疏堵,汛期排水不畅等。一旦遭遇暴雨,突发性的强降水超出城市排水能力和河道调蓄能力上限,直接导致城市内涝、交通瘫痪、地下空间和下立交被淹、人员伤亡等,严重影响城市的正常运营和发展。近年来如北京、上海、广州、武汉、厦门、南京、成都、济南、深圳、南昌等国内主要中心城市,无一幸免均遭受内涝淹没事件。特别是许多沿海城市,洪潮水位高于地面,一旦防洪设施损坏或河水漫溢,对邻近河道的区域及地下空间的防洪构成巨大风险。

2.2 地下空间自身防御

地下空间自身防御能力脆弱性主要包括:①地理环境因素;②物理特性因素;③设备设施配备的人为因素;④防灾应急管理社会因素等。

地理环境因素主要体现在地下空间选址的合理性,若选址在洪泛区或地势低洼积水区,将导致地下空间抵御洪涝灾害时浸水的能力先天不足。如许多正在城镇化的地区,在区域防洪涝设施还不完备的情况下,位于其中的地下空间防洪风险极大。再如国内大城市的地铁,一些车站出入口选址时仅考虑

通行的功能,缺少对防洪风险的考虑,选址在低洼积水区域,一旦降雨积水既对地铁造成防洪安全隐患,又影响人员的正常进出或应急逃生。

物理特性因素主要体现在地下与地面之间各连通口的位置、尺寸以及相对周边地势、河道、排水设施的关系,如:连通口是否位于易积水区或洪泛区、距离相邻排水管网的远近、连通口顶部与周边地坪及相邻河道设防水位的关系等,这些因素直接决定了地下空间在外部环境存在防洪危险性时,自身遭遇地面洪水入侵的可能性。

设备设施配备的人为因素主要体现在连通口挡水及集水井配泵等排水设施配置的规模、完备性、匹配性和合理性。目前城市大部分地下空间均呈独立封闭性,各连通口挡水设施的挡水能力是保障地下空间避免洪水入侵的关键,排水设施仅能作为辅助措施,排放侵入地下空间的有限水量。特别是位于地势低洼区域,连通口浸水,排水设施将承担地面一定区域的汇水量,仅靠地下空间的排水设施无法满足远大于排水规模的来水量的要求,最终导致受灾。如:历年来北京、上海等多个下沉式通道积水短时间无法快速清排,造成受淹。因此,地下空间抵御地面洪水入侵采取措施的主次应“先挡后排”。地下空间连通口多兼具日常运行时相关功能,如:人员、车辆通行、空气交换、采光、人防紧急疏散、管线沟等,针对不同功能,连通口的物理特性不完全一样,相应挡、排水设施的布置、规模也应分别设计。如:对于人员、车辆通行口,考虑使用的便利性,可采取正常挡水和应急挡水两种措施,正常挡水可设置阶梯或驼峰,在满足日常功能的情况下,具备一定的挡水能力,也为应急抢险提供缓冲时间;应急挡水可设置挡水闸板、闸门、袋装砂、自稳式充气膨胀橡胶袋等,避免地面洪水侵入,即使抢险过程中少量余水进入地

下空间,也可通过排水设施快速排出。对于通风井、采光井等不存在通行功能的连通口,应一次性达到所需的应急挡水高程。

防灾应急管理社会因素主要体现为防灾管理体系的设置和应急管理能力等。可从 3 个层面考虑:第一层面为政府主导的建立整个城市地下空间防洪应急信息系统,制定防洪安全管理政策等;第二层面为地下空间管理者主要负责防洪应急管理的具体操作,包括编制应急预案、制定应急处置方案、组织应急抢险、准备抢险物质以及信息的传递工作;第三层面为地下空间使用者通过发布的信息识别险情,选择合理的避难和撤离方式。有效地应急管理能避免地面洪水侵入地下空间后灾害损失的发展和扩大,增加地下空间安全运行的可靠性。

2.3 外部防洪环境和自身防御体系之间的关系

地下空间自身防御系统中地理环境因素决定选址的合理性和运行安全性,其与外部环境中区域自然因素和区域防洪能力均密切相关。外部防洪环境中区域防洪、排水能力和防洪设施的状况决定了区域防洪的脆弱性,自身防御系统中各连通口的物理特性、防洪管理、设备设施的配备决定了地下空间防洪的脆弱性,两者直接体现了地下空间防御洪水入侵能力,因此相互之间密切相关。外部防汛环境和自身防御体系各因素之间的关系见图 1。

3 地面洪水侵入地下空间特征分析

3.1 特征 1——易淹难排、侵入水量难以准确计算

地下空间位于城市低处,在区域遭遇洪涝灾害时,容易造成汇流淹没。同时,由于低于外部地面,侵入空间内部的水体无法自排至城市排水管网或河网中,必须采用强排方式抽排。当侵入水量大于配

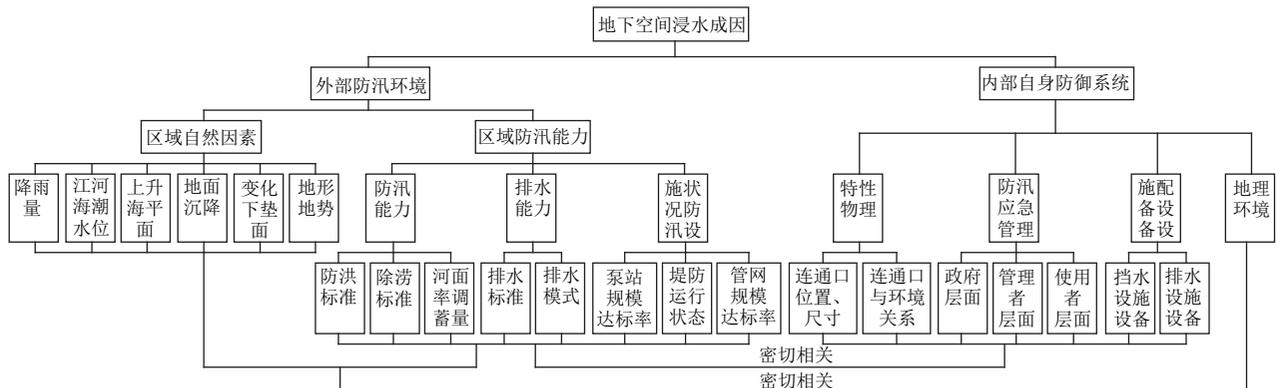


图 1 外部防洪环境和自身防御体系各因素之间的关系

Fig.1 Relationship between external flood control environment and defense system of underground space itself

泵规模或排水设备出现故障,将直接导致地下空间淹没受灾。如:台北地铁、上海中环吴中路下沉式通道,由于排水设备出现故障无法排水曾造成淹没;纽约地铁、上海祁连山路下沉式通道,由于没有考虑周边汇水因素,排水设备配置不合理,排水能力不足曾造成淹没。

针对地下空间相关洪水侵入设计,目前暂无比较合理的规范,排水设计中仅考虑连通口露天部位的降雨汇水量,不考虑地下空间外部积水可能侵入的水量,地下空间存在极大的地面洪水侵入风险。近年来国内外许多学者逐步开展相关研究,研究方法多采用数值模拟或物理试验。数值模拟主要采用雨洪运动过程模型模拟城市降雨径流或洪水漫溢的运动过程,计算出各连通口部位的地面积水深度,再运用堰流或孔流流量公式计算侵入地下空间的水量。物理试验主要模拟一定区域范围产汇流形成条件和构建一定比例的地下空间模型,实测浸入水量和流体运动形态。2 种研究方法均为地下空间防洪对策和措施的制定提供了一定的理论基础,但由于外部汇水量与地下空间所处地理环境、区域排水能力、汇水范围和地下空间自身挡水能力相关,涉及因素较多,产汇流形成的边界条件和工况复杂,现有技术手段难以对侵入水量做出精确计算。但在限定区域内,可通过历年雨量和水文数据分析选用合理的重现期标准,采用数值模拟与物理模型相结合的研究手段,估算浸水量作为配置排水泵的依据。

3.2 特征 2——洪水侵入路径和方式多样、复杂、不确定性因素多

地下空间受地理环境和自身结构的物理特征影响,与地面连接型式繁多各异,一般除了车行和人行出入连通口,还包括各类通风井、采光井、下沉式广场、室外电梯井、人防紧急逃生井、各类管线沟以及管线穿越外墙部位等。地下空间与地面各连通口位置的确定,目前主要根据连通口的功能性和空间导向,以及与周边环境整合衔接的要求确定,没有从防洪挡水、浸水外排角度兼顾考虑所有连通口分布的合理性和防御能力。即使考虑也主要关注机动车、非机动车和人行出入口,通过设置驼峰或台阶挡水,而忽略其他连通口的挡、排水能力和穿墙管、集水井、连通道等结构薄弱部位的防渗水能力,造成浸水路径和流态复杂、浸水方式多样、浸入点分布不均,不确定因素多,随机性强。如:2012 年“海葵”台风期间,上海市嘉定区万达广场地下停车库冒水、冒砂,浸水沿地下室底板和集水井之间裂缝进入;2013 年 9 月 13 日上海地铁 2 号线浦东世纪大道站受暴

雨浸水造成区间停运,地面积水沿电缆沟进入地下;2014 年 9 月 25 日日本名古屋市地铁东山线的名古屋站受暴雨影响,地面积水沿地下一层站长室浸入地下空间,造成部分线路浸泡在雨水中,区间停运^[20]。常见洪水侵入位置和路径形态示意见表 1。

表 1 地下空间常见洪水侵入位置和路径形态

浸水位置	浸水型式	浸水路径示意图	备注
出入口	直线型		车行或人行通道 人防紧急疏散口
出入口	折线或折返型		车行或人行通道 人防紧急疏散口
出入口	圆弧型		车行或人行通道 人防紧急疏散口
连通口	直落型		采光井、通风井、 室外电梯口
管线沟	管道型		
地下连通口	坡道型		下沉式广场、露 天天井
结构连接薄弱部位	渗水型		各类管线穿过外 墙、集水井与底 板连接、地下空 间之间连通道、 施工缝、伸缩缝 等

3.3 特征 3——涉及范围广,地势低洼区域,承担一定范围的汇流

地下空间选址主要从抗震、地质灾害、防火、防爆等方面考虑,较少从防洪涝灾害方面考虑,特别是城市范围地下空间、下立交、轨道交通地面与地下衔接转换部位,受用地的限制,以及地面竖向高程规划设计不合理因素的影响,大量地下空间选址在洪泛区、河岸带、地势低洼区域、新近圈围土地、海岸带等。地面高程低于河、湖、海高水(潮)位,一旦遭遇洪涝灾害,区域范围内的地下空间除了需应对露天范围内的汇水影响,还需要遭受低洼区域相当范围内的汇流影响。汇流范围广、汇流量大、汇流速度快,造成应急抢险时间短、受灾影响范围广、灾损严重、救灾难度大。如:2014 年 10 月上海祁连山路下立交淹没和 2012 年 7 月北京多处下立交淹没,主要受到区域大范围内涝汇流影响,造成仅供下立交积

水抽排的水泵远无法满足清排要求。

另外,大量地下车库为了满足车辆行驶坡度要求,地面出入口部位高程低于小区平均室外地坪,成为区域低洼带,即使设置驼峰仍难以避免小区地面积水汇集侵入。许多住宅小区为了提高品质,选址在临河、临江、临海建造,在防洪措施不完备的前提下,受灾风险极大。如:上海嘉定城市岸泊住宅小区,内部景观河流与外部城市河流连通,没有设置口门控制工程,并且小区地坪和景观河流岸顶高程低于区域设防水位,造成防汛体系不封闭,台风期间,河水通过景观河道漫溢至小区,临河地下车库半小时内全部淹没。

3.4 特征4——洪水从地面往地下侵入,势能转化为动能,水力特性复杂

地下空间外部洪涝水侵入水流表现特征为位势高处向低处扩散,由于侵入路径多样,特别是大型地下空间(大规模、多层级),如地下交通、地下综合体、地下城等,内部空间分布和连通多样、复杂,一旦外水侵入,能迅速向地下空间深处漫延,甚至扩大波及至整个地下空间,水力特性极为复杂。日本京都大学“宇治川水理实验室”和同济大学刘曙光等^[19]均采用物理模型针对地下空间洪水侵入水力特性开展了分析研究,认为一旦洪水侵入地下空间,淹没面积将迅速扩展、水位上升极快、水体短时间内无法排出,人员疏散困难,因此,地下空间遭遇洪水侵入,水势无法控制的情况下,采取预警性撤离和分区域设置防淹门控制水流漫延是减少灾害损失的有力措施。从国内外多个受灾案例包括美国纽约地铁、日本名古屋地铁、台北地铁、北京和上海下立交等可知,洪涝水侵入地下空间,水力特征并无明确的统一规律可循,一旦侵入水势失控,将造成淹没的后果。

3.5 特征5——排水设施规模及布置缺少对洪水侵入影响的考虑

地下空间集水井及排水设施布局是根据建筑地下室地面排水需求布置,目前相关规范和设计均没有考虑洪水侵入水量复核地下空间总体排水能力。从排水方式考虑,集水井和配泵宜多,排水流量宜小,但从地下结构整体性、受力和施工因素考虑,集水井则宜少不宜多。因此,地下空间遭遇洪涝水侵入,一方面总体排水规模往往不足;另一方面,由于排水设施布局不合理,即使总体排水规模满足,但排水速度与洪水侵入速度不匹配,浸水初期造成局部空间受淹,排水设施无法快速清排洪水甚至故障,导致后期地下空间全部被淹。如:靠近浸水口区域短时积水上涨快,离浸水口较远区域,受地下空间内部

结构限制和各类物体的阻碍,短时积水上涨慢。采光井、风井、室外电梯井等连通口洪涝水侵入速度快于通过坡面侵入水体。因此,应根据不同地下空间可能侵入路径设计排水规模,布置排水设备,靠近各连通口部位设计排水设施规模应大、数量应多,集水井和排水泵尽量布置在可能的水流路径上。

4 结论和建议

通过解构洪水侵入城市地下空间的内、外部各类因素,分析洪水侵入特征,目的是为了指导地下空间预防和减轻洪涝灾害影响,科学合理地提出相应的防洪对策和措施。

(1) 外部防汛环境的脆弱性是导致地下空间防汛风险程度的首要条件。区域防汛能力、水面率、河道调蓄能力、堤防防汛体系的完善性和设防能力、城市排水系统的完善性和排放能力等因素决定了区域内地下空间所处环境的防汛风险。

(2) 区域遭遇洪涝灾害,地面汇流形成积水情况下,地下空间自身具备的工程措施和非工程措施决定其应对洪水侵入的防御能力和灾害损失。

(3) 外部防洪环境和自身防御体系共同决定了地下空间防洪安全性。地下空间所处地理环境受到区域自然因素和防洪能力的制约,地势低洼区、洪泛区、河岸带、海岸带的风险大,抵御洪涝灾害的代价大,反之。

(4) 地下空间防御洪水侵入清排设施规模应充分考虑区域汇流的可能性,在限定区域内,可通过雨量和水文分析选用合理的设防标准,估算侵入水量规模,并作为配置排水泵的依据。

(5) 地下空间洪水侵入路径和方式多样,不确定性因素多,并且水力特征复杂,没有明确的统一规律可循。对于重要、大型的地下空间,应通过采用数值模拟与物理模型相结合的研究手段,确定防御浸水对策和措施。对于多个相连通的地下空间,各单体宜采取分区管理和风险控制,风险应急时,相连单体之间可设置防淹门分隔。

(6) 通过地下空间水流流态分析,确定合理的集水井布局和排水设施规模。集水井应布置在水流路径上,靠近浸水口部位配泵规模应大,数量应多。

(7) 地下空间可作为海绵城市构建的一种方式,将防洪变为蓄洪,实现雨洪控制。地面防洪与地下空间防洪统一考虑,充分发挥地下空间的综合能力,地面洪涝水可通过建设一定的地下空间辅助地面河网,如利用城市 CBD、城市绿地空间兴建大型

地下调蓄水库等,增加区域调蓄容量,实现蓄排结合的功能。一方面可对收集的初期雨水水质集中处理,另一方面蓄留的水量可发挥补充地表河水、绿化灌溉、冲洗地面和排污设施等综合功能。

参考文献:

- [1] 章 希.台北地铁淹水的教训[J].城市公用事业, 2002,16(3):9-10.
- [2] 東京都地下空間浸水対策ガイドライン検討会.東京都地下空間浸水対策ガイドライン——地下空間を水害から守るために[R].東京都:東京都地下空間浸水対策ガイドライン検討会,平成20年(2008年)9月.
- [3] 新浪财经.纽约曼哈顿多处地铁口进水[EB/OL].(2012-10-30)[2016-06-01].http://finance.sina.com.cn/world/20121030/101113521910.shtml.
- [4] 杨育才,林劲榆.嘉定“城市岸泊”小区4车库被淹,85辆私家车遭灭“顶”之灾[EB/OL].(2013-10-11)[2016-06-01].http://newspaper.jfdaily.com/xwcb/html/2013-10/11/content_1100118.htm.
- [5] 沈文林,陈昊玮.水深达7米 沪祁连山路一地道被水吞没[EB/OL].(2013-10-08)[2016-06-01].http://shanghai.xinmin.cn/xmsq/2013/10/08/22176707.html.
- [6] 国土交通省河川局治水課.中小河川浸水想定区域図作成の手引き[R].東京都:国土交通省河川局治水課,平成17年(2005年)6月.
- [7] 王义成.日本综合防洪减灾对策及洪水风险图制作[J].中国水利,2005,9(17):32-35.
- [8] 京都市消防局防災危機管理室.京都市地下施設の浸水時避難確保計画作成の手引き[R].東京都:京都市消防局防災危機管理室,平成16年(2004年).
- [9] THANG N T, INOUE K, TODA K, *et al.* A Model for Flood Inundation Analysis in Urban Area: Verification and Application[J]. *Annals of Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University*, 2004, (47): 303-315.
- [10] 防災小委員会.地下空間浸水時の避難・救助システムに関する研究[R].東京都:土木学会地下空間研究委員会,2006年.
- [11] 法律第九十三号:水防法,昭和二十四年六月四日[Z].
- [12] Jabatan Pengairan dan Saliran Malaysia. Guideline on Flood Prevention for Basement Car Parks[R]. Malaysia: JPS, 2006.
- [13] 王军辉,周宏磊,韩 焯,等.北京市地下空间运营期主要水灾水害问题分析[J].地下空间与工程学报,2010,6(2):224-229.
- [14] 莫伟丽.地铁车站水侵过程数值模拟及避灾对策研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [15] 权瑞松,刘 敏,张丽佳,等.上海市地下轨道交通暴雨内涝脆弱性评价[J].人民长江,2011,42(15):13-17.
- [16] 娄 厦,刘曙光,钟桂辉,等.上海地下交通设施防洪调查[J].地下空间与工程学报,2010,6(3):611-618.
- [17] 陈 峰.城市地下空间防汛风险综合评估研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(3):621-629.
- [18] 上海市水务局.上海市地下公共工程建设防汛影响专项论证管理办法[K].上海:上海市水务局,2015.
- [19] 刘曙光,陈 峰,钟桂辉.城市地下空间防洪与安全[M].上海:同济大学出版社,2014.
- [20] 环球网.日本名古屋暴雨来袭 地铁站进水致部分路段停运[EB/OL].(2014-09-25)[2016-06-01].http://world.huanqiu.com/photo/2014-09/2747964.html.

(编辑:赵卫兵)

Causes and Characteristics of Flooding in Urban Underground Space

CHEN Feng¹, LIU Shu-guang², LIU Wei-wei¹

(1.Shanghai Hongbo Project Consulting Management Co., Ltd., Shanghai 201707, China;

2.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The causes and characteristics of ground flood invading into underground space are analyzed in terms of internal and external factors to obtain the flooding rule and prevention mechanism. Research result suggests that vulnerable external environment is the primary factor of flood invading into underground space. Defensive measures and capabilities of underground space itself are closely related to disaster loss. Since ground flood intrudes in a variety of paths and means with many uncertain factors and complex hydraulic characteristics yet no clear unified rules to follow, countermeasures for important and large underground space must be determined through combination of numerical simulation and physical modeling. In addition, the arrangement of drainage system should be based on flow characteristics analysis, and drainage facilities should be located along the water flow path near the flood invasion site in large scale and quantity. The results could be referenced for the choice of rational countermeasures of flood prevention.

Key words: urban underground space; ground flood; flow characteristics; flooding cause; flooding characteristics; flood control environment