

三峡库区典型山地城市排水管道结构性安全分析

陈朝晖^{1,2}, 何强³, 王桂林¹, 卿晓霞³, 文海家¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 针对三峡库区典型山地城市重庆主城排水截流干管周边地质状况、管道结构形式、支撑情况、荷载工况等,分析了山地城市排水管道的结构性安全状况,确定了截流干管的不利管段,并对其进行了强降雨、滑坡等不利荷载工况下的承载力安全分析,针对重庆主城排水干管A线工程安全运行提出了在线监测建议。

关键词: 三峡库区; 山地城市; 排水管道; 安全性分析; 洪水荷载; 地质灾害

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2011)08-0022-05

Structural Safety Analysis of Sewage Pipeline of Typical Mountain City in Three Gorges Reservoir Region

CHEN Zhao-hui^{1,2}, HE Qiang³, WANG Gui-lin¹, QING Xiao-xia³, WEN Hai-jia¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The structural safety of the sewage pipeline in Chongqing, a typical mountain city in three gorges reservoir region, was analyzed according to the geological conditions, the pipeline structures, supporting and loading situations. The disadvantageous sections of the pipeline were determined, and the safety analysis of the bearing capacity was performed at disadvantageous loads such as heavy rainfall, landslide and so on. The online inspection suggestions for the safety of the main sewage pipeline A in Chongqing are proposed.

Key words: Three Gorges Reservoir Region; mountain city; sewage pipeline; safety analysis; flood load; geologic hazard

排水管道系统是城市泄洪排涝、污水收集输运的重要基础设施,是实现城市污染“控源减排”的重要环节,管道结构的工作性能及其在各种自然灾害和人为因素作用下的安全性是保障其安全运营的首要条件。对城市管网系统的安全性及风险性评估、监测以及动态管理和维护在欧美日等国目前已得到

大力发展。美国成立了管道安全办公室(Office of Pipeline Safety,简称OPS),并于2000年启动了管道安全维护计划,编制了管道安全维护条例(Pipeline safety improvement Act of 2002),德国和日本在管道结构性能的监测设备和技术上取得了国际领先的成就,英国、荷兰、澳大利亚等国相继建成并完善了对

城市既有排水管网系统的监测管理软件系统并付诸实践。各国的管网安全监测管理系统各有其功能侧重和特色,但均大致包含以下要素:既有管网的数字化地图;既有管道结构和运营性能的安全性及风险性评估;管道监测;降低风险的管理措施与应急措施,改进的高安全性的管道设计条例规范等。其中,建立数字化地图是对管道实施量化和可视化管理的先决条件,对既有管道的安全性分析与评估是把握其使用现状、确定薄弱环节、验证并改进今后的管道设计施工方法、预测在各种自然灾害和人为差错等作用下的损失风险、制定相应管理和应急措施的基础,这一任务的实现是以结构性能的量化分析为依据的,可使管道监测有的放矢,而监测数据的准确合理又为结构分析提供了实时具体依据,互为补充。管道安全性分析与评估以及准确合理的管道性能监测均离不开结构工程研究人员和工程技术人员的密切配合和参与。

我国城市既有管道系统的数字化分析监测管理系统尚处于研究起步阶段^[1-2],而对现有管道系统结构性能的合理、科学评估是建立有效监测和管理维护系统的基础。以重庆主城排水干管为例,建立了多因素综合作用下典型山地城市排水管道安全性分析方法。

1 工程背景

重庆是三峡库区典型的山地城市,主城区处于嘉陵江、长江的环抱之中,地形地质条件复杂,城市排水主干管沿江敷设,多数管段为架空箱涵,易因地质滑坡、洪水、建筑施工、船舶碰撞等造成断裂毁损。重庆市现有排水管道长约 3 455.72 km,近一半的管龄在 50 年以上,管网布线复杂,箱涵、高架、深埋、隧道等形式多样,不同管龄与材质的管道相互衔接,兼之地形条件复杂,管道病害突出,“暴雨淹城”、排水管道堵塞、渗漏、污水溢流和下水道爆炸等事故时有发生。

主城区排水管道有近 10 m² 的排水断面,一旦发生断裂,数十万吨污水将直排江中,饮水水源将受到极大威胁,后果不堪设想。因而,针对山地城市排水管道系统的结构性安全现状分析十分必要。而山地城市排水管网运行安全监测系统的建设亦迫在眉睫^[3-4],如何建立综合全面与科学的分析方法是解决问题的关键,为此提出了分管段、分因素、外因(荷载工况)与内因(管道腐蚀)综合考虑、定性分析

与定量计算相结合的方法。

1998 年,重庆市利用世界银行贷款启动了主城排水工程项目,建成了唐家沱和鸡冠石两大排水系统,包括 A、B、C、D 四条截流排水主干管管线,设计排水体制为分流制。其中,重庆市主城区排水干管 A 线工程位于重庆市主城江北区嘉陵江北岸,水流自西向东,起于盘溪河下游,止于江北区唐家沱污水厂,途经江北嘴、廖家台、三洞桥和寸滩等地,全长为 22.7 km, A 线工程所经之处地质条件复杂,受滑坡、城市建设施工、船舶碰撞等影响较大,本课题以此为典型案例加以研究。

A 线截流干管收集忠恕溪、唐家桥、溉澜溪及唐家沱等沿线流域的污水,最终进入主城区下游的唐家沱污水处理厂进行二级生化处理,达标后排入长江。管道埋设方式有架空箱涵、埋地箱涵以及隧道等,埋地箱涵还包括由于地基较深而采用的支墩架空式和初期为架空箱涵而后因城市建设发展成为填地架空箱涵的管段。

2 A 线干管沿线地质现状分析

地质勘察显示, A 线沿线地表主要为第四系填土,下伏基岩由侏罗系上沙溪庙组泥岩及砂岩组成,岩层单斜平缓。A 管线上段盘溪河流域范围的边坡整体安全性良好,在盘溪沟口处存在安全隐患。该段地质情况为嘉陵江冲沟地貌,坡度约 45°,地表主要为第四系填土,下伏侏罗系上沙溪庙组泥岩及砂岩,岩层单斜平缓。补给裂隙水量有限,不利于地下水的聚集,故其富水性弱。原为人工填土边坡,施工期间采取了临时的支挡措施,水位涨落对现有边坡形成冲刷,可能存在坍岸,危及管道运行安全。在里程(K2+674.00)~(K3+822.50)范围的边坡较陡,一般设有挡墙以消除安全隐患。

A 管线下段存在顺层坡及切坡滑动等安全隐患,如茅溪范围存在顺层坡,局部由于垮塌使箱涵外移超过 1 cm,致使斜坡上少量民房变形或开裂,箱涵内外侧受力不均;寸滩段多处由于自然斜坡坡度大,排污管道开挖切坡,坡高为 2~10 m。2004 年溉澜溪段和寸滩港段曾出现雨季切坡被冲刷的情况,虽然桩基良好,但桩基上箱涵曾发生因滑坡被冲击脱离的事故。A 管线下段其余管段(包括寸滩江边、白砂沱等地段范围)地质状况良好,对管道运营安全影响不大。可见,寸滩段与茅溪段存在影响管网正常运行的地质灾害风险,应予以重点监测研究。

3 A线截流干管管道结构现状分析

3.1 A线截流干管过水量分析

截流排水主干管采用分流制,设计流速为1.05~1.28 m/s,水流坡度为0.05%,设计充满度为0.56~0.60。由于现有二级、三级管网绝大多数采用合流制,因此干管并未实现真正意义上的分流。虽然设置了溢流井,但设计过水量并不能满足要求,受下游排放水体水位标高和管道自身淤积的影响,历次强降雨下雨季合流管道水位高于二级管网截流管道管顶标高、溢流井井盖冲开致污水外泄事故时常发生。已建成的溢流井凡堰顶标高<191.04 m(191.04 m是三峡库区淤积30年后20年一遇的洪水水位)的管道均在溢流井上架设了拍门。在暴雨和强降雨条件下,与干管接口的二级管道一般均为满流状态。因此,江北截流干管A线的最大合流水量超出了设计范围,其最大内压值大于设计内压,管道存在结构性安全隐患。

根据现行重庆市暴雨强度计算公式进行初步分析,结果表明,二级管道汇水区域的雨水量远远大于污水量。如唐家沱系统2020年的污水量为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最高日流量为 $6.39 \text{ m}^3/\text{s}$,而区域内的雨水流量可达 $249.816 \text{ m}^3/\text{s}$,约为污水流量的40倍(此数据是根据现行重庆市暴雨强度公式推算所得,考虑到近10年来受全球温室效应影响,降雨强度增加,上述差异可能还会增大)。除唐家桥流域外,A管线从溉澜溪流域开始,雨季最大合流水量已超过A管线箱涵的设计过水能力。其中,溉澜溪流域A管线的最大流量为 $10.432 \text{ m}^3/\text{s}$,而流域箱涵断面的设计过水能力为 $4.77 \text{ m}^3/\text{s}$;唐家沱流域13条二级管线在雨季终点的最大流量为 $11.72 \text{ m}^3/\text{s}$,而该流域箱涵的设计过水能力为 $6.39 \text{ m}^3/\text{s}$ 。可见,箱涵所能承受的内水压力成为雨季A管线安全运行的约束条件。

3.2 管道结构概况

根据地形地质条件的不同,A线干管分为埋地箱涵、架空箱涵和隧洞三种形式,以埋地箱涵和隧洞为主。埋地箱涵、架空箱涵以及架空埋地箱涵均为闭合矩形箱梁,按设计过水断面尺寸分为四个标段;隧洞截面为半圆形状,直径与箱梁宽度相同。架空箱梁壁厚为350 mm,埋地箱梁为400~450 mm;在接触污水面钢筋保护层厚度为60 mm,其余为40 mm;箱梁两侧墙有矩形封闭箍筋,顶板有单支箍,延

伸到侧墙一半左右;纵筋配筋率约0.3%~0.4%。

① 埋地箱涵

在岩面较低段,箱涵置于岩石基础上;在土层段,由于受涵顶覆土和江北滨江路的影响,基础承载力要求较大,其所在土层的地基承载力或承受荷载后的沉降均不满足要求,故采用端承桩支撑,桩嵌入中分化岩层3.0 m以上。因此,埋地箱涵整体的地基承载力较强,地基不均匀沉降导致管道破坏的风险较小。

② 架空箱涵

架空箱涵跨径为16 m,采用柱墩支撑,为矩形实体墩,可承受洪水期间河流横向冲击作用。柱墩下部采用矩形截面桩,嵌入岩层内。箱涵在墩上设置了变形缝,各跨箱涵可视为简支梁。建成使用至今,A线截流管道未发现严重结构性破坏,2004年发生于寸滩段的滑坡,虽导致共计11段架空箱涵发生整体移位和垮塌,但管段未发生破裂,表明架空箱涵管道的整体刚性和强度较好。

③ 隧洞

当隧洞所处地质在IV类围岩以上时,距进、出口20 m范围和IV类围岩段均为加强段,隧洞采用钢筋混凝土;III类围岩以上时为普通段,采用素混凝土,在地质不良段采用加锚杆的钢筋混凝土。投入使用后历年对隧洞的人工检测表明,隧洞的结构性使用状况良好,未发现明显开裂、渗漏现象。

3.3 管道结构性安全现状分析

A线截流管道所承受的荷载一般包括结构自身重力、上覆土压力、管内静水压力等三种。由于现阶段二、三级管道没有完全实现雨污分流,强降雨下A线截流管道的最大合流水量超出了设计范围,其最大内压值大于设计内压。由于管道水流坡度较小(0.05%),故可不考虑内部水流冲击作用而将管内最大内压按满流计算,从侧墙顶部到底部呈三角形分布。强降雨下,架空箱涵段冲沟处水位上涨迅速,水位可达到甚至淹没箱涵,箱涵受到冲沟水流的横向冲击作用。当嘉陵江水位较高时,滨江路段的箱涵除受江水横向冲刷作用外,还可能受船只撞击作用。由于沿线房地产的开发,在填挖方区可能产生土层滑坡,导致箱涵地基不均匀沉降而造成冲击影响。

综上所述,A线管道结构性安全存在的风险因素包括雨季合流造成的内压超载、强降雨时冲沟的

横向水冲击力、洪水作用造成的管道一侧静水压力、滑坡危险地段的土层或岩层的冲击力等^[5 6]。由于管道结构、支撑条件、地质状况以及地理位置的差异,各管段的结构性安全隐患各不相同。

由于埋地箱涵顶部和侧面有覆土,该土压力与管内水压力会相互抵消一部分,对管道承载有利。因此,正常工作状态下埋地箱涵主要承受结构自身重力。架空埋地管道有柱墩支撑,端承桩嵌入岩层 3 m 以上,沉降很小,在强降雨情况下该管涵也不会受到来自冲沟的雨水横向冲击作用。为避免地质灾害造成的危害,多数地段的埋地箱涵设置在已确定的滑坡面下或滑坡土体(岩体)内侧,若发生滑坡等地质灾害不会危及管道。因此,可不考虑深层滑坡对管道的冲击作用。分析验算表明,箱涵断面尺寸较大、壁厚,架空箱涵和埋地架空箱涵在下底面配抗拉钢筋、上底面配抗压钢筋,两侧面配有抗剪钢筋,近支座处配箍筋,结构整体刚度和强度较大;整个 A 线坡度很小(0.05%),内部水流冲击可忽略而只考虑静水压力。多数地段的埋地管道满足承载力要求,较安全。

架空箱涵因外部无土压与内水压力平衡,在内水压力超载时最为不利。采用闭合框架模型,设箱涵底板和顶板为纯弯构件,经验算,三洞桥段(103[#]~120[#])及唐家沱段(196[#]~223[#])均只能承受最大为 30 kPa 的压力;若箱涵顶板和底板按实际的拉弯构件计算,则所能承受的最大水头仅为 23 kPa 左右,箱涵横截面配筋率偏低。

在三洞桥段和溉澜溪段,冲沟河道断面小,强降雨时水位快速上升,水流流速很大(3~4 m/s),对架空箱涵产生很大的横向冲击;箱涵跨高比 < 5,属于深受弯梁。采用有限单元法分析的结果显示,在洪水荷载作用下架空箱涵剪切变形在梁体变形中占较大比重,支座附近开裂严重;箱涵体在弯剪的同时伴有明显的扭转变形;整个梁体位移较小,整体刚性较好,位移最大点在架空箱涵跨中迎水面侧墙顶部处,此为管道监测的重点所在。而寸滩段架空箱涵还可能受到浅层滑坡的影响。

寸滩段和茅溪段由于房地产开发,在填挖方区可能产生土层滑坡,导致箱涵地基不均匀沉降并受到滑坡土体的侧向冲击。对寸滩段埋地箱涵进行分析,验算结果表明在表面正常受力状态下,埋地管道两端支座一般能提供足够的竖向反力,但在横向荷

载作用下会发生较大的侧移,管道可能从承台上滑落引起整体失效,同时两端的基础由轴心受压变为偏心受压从而引起破坏。

除受荷载作用外,管道因生活污水腐蚀、淤积等造成混凝土材料性能退化、钢筋锈蚀而导致管道结构性能降低、混凝土开裂,污水泄漏^[7 8]。目前采用人工以及机械定时清淤的方法以减少淤积,A、C、D 线尚未发现混凝土因严重腐蚀而开裂破坏的现象,而 B 线南滨路段由于住宅小区开发温泉,地下水中富含的硫磺排入截流管使钢筋混凝土管道受到严重腐蚀,混凝土保护层剥落、箍筋甚至纵筋锈蚀现象明显,出现污水泄漏,已经过多次修补。虽然 A、C、D 线目前暂无此问题,但随着使用时间的延长,污水腐蚀所造成的结构耐久性问题可能逐渐显现。

综上所述,A 线截流干管存在结构性安全隐患的主要为架空箱涵,包括三洞桥段、溉澜溪段和寸滩段。除考虑管道内压超载的不利工况外,三洞桥段应重点考虑该段冲沟对箱涵造成的外部水流冲击作用;溉澜溪段除冲沟影响外,还具有船舶撞击的风险;寸滩段目前存在地质灾害隐患,地质灾害造成的管道地基不均匀沉降、对管道的侧向冲击等是管道破坏的风险性因素。实践证明,运用先进技术开展管道运行状况在线监测,可有针对地对存在严重缺陷的管道进行及时维修,避免事故发生,大大延长管道寿命。

针对上述安全隐患,建议对以下管段进行重点在线监测:三洞桥段和溉澜溪段针对内压超载和雨季冲沟的冲击荷载进行管道应力和变形监测;寸滩段和茅溪段目前存在地质灾害隐患,应对所在区域进行地质灾害监测,并对雨季强降雨条件下的水力进行模拟和监测,为内压超载下管道的安全分析提供在线动态数据。

4 结语

重庆是三峡库区重镇,具有库区山地城市的典型地质地貌特征,即地形高差大,地势起伏,地质条件复杂多变,排水管网的荷载使用工况复杂。对重庆主城排水截流干管 A 线工程的设计使用现状分析表明,绝大多数管段的结构性能和使用功能较好,沿线主要地质状况良好,但亦存在如下安全隐患:

① 由于地形的起伏变化,管道敷设方式多种多样,其中管道架空敷设是一大特点,埋地敷设排水管道中部分管道埋深很大,地下水位变化以及滑坡

等潜在地质灾害对管道结构功能威胁较大。

② 地质条件变化较大特别是在土地整治平场工程中,“大挖大填”现象十分普遍,所形成场地地质条件的差异对排水管道的纵向稳定不利,易发生不均匀沉降。

③ 城市道路纵向坡度较大,排水管道系统上、下游有很大落差,其中水流的垂直跌落是一大特色,强降雨下易发生合流管道水位高于二级管网截流管道管顶标高、溢流井井盖冲开致污水外泄的事故。

④ 新建截流干管虽采用分流制设计,但由于原有二、三级管网完全或部分实行合流制导致截流管道在雨季未能真正实现分流制,强降雨下运行压力较大,尤其是架空箱涵内水压力超载。

⑤ 生活污水中的多种腐蚀成分以及部分地段的温泉开发将对管道造成腐蚀,诱发管道结构的耐久性损伤,管道材料的耐久性损伤与前述超载及地质灾害等共同作用可能加剧管道的结构性破坏从而危及管网系统运行安全。

致谢:感谢重庆市排水公司提供重庆主城区 A 管线地勘及设计相关资料!

参考文献:

- [1] 王彪,李田. 排水管道风险分析初探[J]. 中国给水排水 2007, 23(13): 1-4.

- [2] 盛平,喻一萍. 城市排水在线监测系统的应用[J]. 排灌机械 2009, 27(3): 190-195.
- [3] Manfred S, Alberto C, Hubert C *et al.* Real time control of urban wastewater systems - where do we stand today? [J]. J Hydrol 2004, 299(3/4): 335-348.
- [4] 金晓媚,刘金韬. 重庆市崩塌和滑坡的危险性评价[J]. 灾害学, 1999, 14(1): 76-79.
- [5] Thomas P, Thomas G, Alain D. Stability analysis of a human-influenced landslide in eastern Belgium [J]. Geomorphology 2009, 120(1/2): 38-47.
- [6] 张珍,李世海,马力. 重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析[J]. 岩石力学与工程学报 2005, 24(17): 3185-3191.
- [7] 陈朝晖,黄河,颜文涛,等. 腐蚀混凝土单轴受压力学性能研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版 2008, 36(3): 38-41.
- [8] Chen Zhao-hui, He Qiang, Yan Wen-tao. Research on the corrosion of sewer system pipelines from domestic wastewater [A]. Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction: New Pipeline Technologies, Security, and Safety [C]. USA: ASCE 2003.

E-mail: zhaohuic@cqu.edu.cn

收稿日期: 2010-03-02

(上接第 21 页)

附录中收录了相关国家和其他行业标准共计 166 项。

5 结语

对国内外给排水产品标准现状及发展趋势做了介绍,对我国给排水产品标准现状及存在的问题进行了分析,阐述了体系编制的指导思想、原则和适用范围,并对体系结构进行了说明。

标准体系是使标准结构优化、数量合理、减少矛盾和重复,以最小的资源投入获得最大标准化效果的指导性文件。体系的编制有利于促进城镇给排水行业的发展,有利于标准的管理,有利于促进新技术、新产品、新材料、新方法的推广应用。纳入标准体系的标准,将成为今后一定时期内有关给排水标准制订、修订、立项以及科学管理的基本依据。

参考文献:

- [1] 李铮. 我国城镇给水排水标准综述[J]. 工程建设标准化 2007, 6(6): 24-27.
- [2] 黄金屏. 浅谈建设产品标准化[J]. 给水排水 2003, 29(8): 93-96.
- [3] 张大群. 我国城镇给水排水产品标准现状分析[J]. 资源节约与环保 2010, 1(1): 27-29.
- [4] 宋序彤,吕士健,吴彬彬. 我国城市水污染控制和环境综合整治标准体系框架结构的研究[J]. 给水排水, 2010, 36(3): 32-35.

电话: (022) 27836375

E-mail: twice@public.tpt.tj.cn

收稿日期: 2011-02-11