

基于分布式光纤温度传感器的排水管网 外来水监测试验研究

陈静如¹, 郭 帅¹, 申屠华斌², 周文明², 黄荣敏³, 张 浩³

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 3. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062)

摘要: 外来水的大量入侵对排水管网的健康运行造成了极大的负面影响, 精准识别和定位外来水是实现管网低水位健康运行的首要任务。基于搭建的室内全尺寸排水管道试验平台, 进行了不同温差、管道充满度、外来水占比三个变量下的分布式光纤温度传感系统(DTS)测量试验, 探讨了 DTS 在不同运行工况下识别排水管道外来水的可行性及其测量结果的准确性。结果表明, DTS 识别外来水的可行性主要取决于外来水的占比, 温差主要影响混合后水流的温度, 充满度则主要影响响应时间; DTS 定位外来水的精度达到设定的 0.5 m, 时间响应精度可达十几秒, 12 组试验工况在典型测量点处的相对误差平均值均小于 5%, 标准差平均值小于 0.2 °C, 整体而言, DTS 测量的准确性较高。

关键词: DTS; 外来水; 排水管网; 误差分析

中图分类号: TU992; TV672+.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2024)06-0134-05

1 引言

排水管道的外来水入侵对污水处理厂和水环境造成了严重的负面影响, 如何判断管网系统中外来水是否发生及确定其入侵点是研究的热点与难点问题。目前, 外来水检测的方法主要有物探法^[1]、水量调查法^[2]、水质因子法^[3-4]、数值模型方法^[5]等。但这些方法有着不同的局限性, 如测量成本高昂、施工难度大、难以在线实时监测或监测距离短等。分布式光纤测温技术(DTS)具有成本低、精度高且可连续监测的优点, 已被广泛应用于石油钻井、高压电缆在线监测、管道维护、交通隧道监测、大坝监测、水文地质等领域^[6-9]。近年来, 也开始应用于排水管网监测中, 如 HOES O A 等^[10]利用 DTS, 在荷兰某工业区内的两段雨水管道中进行非法混接调查, 成功找出了温度变化异常的 6 处可疑混接点; BEHESHTI M 等^[11]将 DTS 技术应用于污水管道中外来水的定量评估, 在挪威特隆赫姆市一段实际排水管道中进行热水

入流试验, 以探究 DTS 定量评估的准确性。然而, 受限于现场试验条件、试验经费等, 已有研究未能对多种工况条件下 DTS 技术识别排水管网外来水的可靠性及定位的精准性进行评估, 且对于一些影响识别结果的关键因素(如温差、充满度、外来水占比)未加以量化分析。本文首先搭建了全尺寸室内排水管道试验平台, 通过精准控制试验变量, 包括外来水占比、管道充满度、原生污水与外来水温度差, 进行了 12 组入流试验^[12], 充分模拟了 DTS 技术在实际运行过程中可能遇到的工况, 探究了 DTS 技术识别排水管道外来水的可行性及其关键影响因素, 并对大量试验监测数据进行了可视化分析, 结合能量方程与质量守恒方程, 推导得出理论混合温度值, 实现了对 DTS 测量结果的精确性和稳定性的量化评估, 结果可为实际工程中利用 DTS 技术进行外来水识别提供参考。

2 试验内容及方法

收稿日期: 2023-08-11, **修回日期:** 2023-08-31

基金项目: 长江生态环保集团有限公司科技创新团队经费资助项目(YEEC-KCTD-202207)

作者简介: 陈静如(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为排水管网外来水诊断, E-mail: chenjingru94@163.com

通讯作者: 郭帅(1984-), 男, 博士、副研究员, 研究方向为排水管网外来水评估, E-mail: guoshuai@hfut.edu.cn

2.1 试验装置

室内全尺寸排水管道运行试验平台示意图及光纤安装现场图见图 1。试验平台占地总长 20 m、宽 4 m,分进水部分和试验管道部分。进水部分配备有水箱、进水管、电磁阀、水泵和电磁流量计,用于存储试验用水、提升试验用水及控制流量。水箱 1 和通道 1 用来模拟原生污水及排水管道,通过电磁阀与电磁流量计实现排水管道中流量与水质的控制;而水箱 2 和通道 2 用于模拟与控制外来水入侵水量与水质,并在检查井 2 处接入原生污水管道。因此,试验的外来水入流点为距离管道起始点 3.6 m 处。试验管道根据实际重力流排水管道形式设计,采用 DN300 HDPE 波纹管材质,全长 37 m,坡度范围为 1.25‰~5.00‰。其中试验热水利用热水循环系统制备,其加热源为 3 台容积为 60 L、功率为 2 000 W 的热水器。

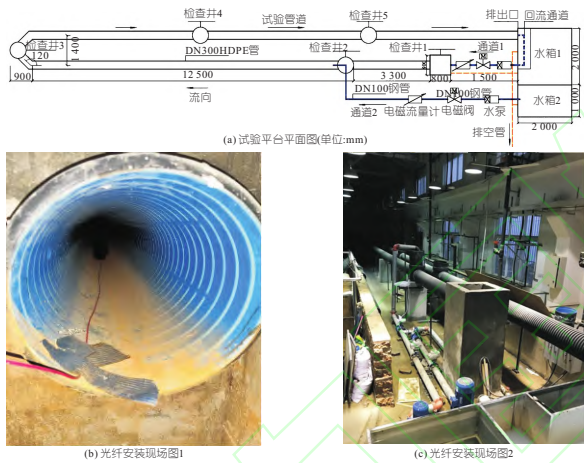


图 1 试验装置图
Fig.1 Experimental setup

试验采用广州平通光缆有限公司生产的基于拉曼散射原理^[13]的分布式光纤测温系统(PTCK-1040),该系统主要由多模感温光缆、光纤解调仪、上位机及软件等组成,其空间分辨率可达 0.5 m,温度分辨率为 0.1 ℃。为了更高效地监测到水温变化,将光纤敷设至管道底部中心位置。此外,考虑到试验平台暴露于大气中,未对管道进行覆土填埋,为尽量减少环境温度造成的影响,管道内的光纤铺设长度取为 22 m。光纤从检查井 1 进,从检查井 4 出,外水入侵点位于检查井 1 最左侧起算点 $x=3.6$ m 处。

2.2 试验设计

试验研究外来水占比、管道充满度、外来水体与原生污水之间的温度差对 DTS 监测结果的影响。在 2 个水箱中对原水和外来水温度分别进行调整以控制设计温度差。在检查井 3 处放置沙袋

以控制管道充满度(沙袋距离起算点 $x=16.5$ m),通过电磁阀门及电磁流量计控制流量。在预试验过程中,多次同时读取 2 个电磁流量计读数,确保流量值满足外来水占比设定工况。试验共设计了 3 种外来水占比、2 种设计充满度及不同温差条件下的共 12 种外来水入侵工况^[14],具体试验工况见表 1。

表 1 试验工况

Tab.1 Test conditions

工况	原生污水流量 Q_1	外来热水流量 Q_2	外来水占比/%	管道充满度/%	原生污水温度 $T_1/℃$	外来热水温度 $T_2/℃$	温差/ $℃$
1	4.82	0.53	10	20	21.70	26.40	4.70
2	4.82	0.53	10	20	20.80	30.90	10.10
3	4.82	0.53	10	50	22.10	28.60	6.50
4	4.82	0.53	10	50	22.10	33.90	11.80
5	3.77	1.62	30	20	27.30	33.80	6.50
6	3.77	1.62	30	20	23.60	39.90	16.30
7	3.77	1.62	30	50	22.08	33.30	11.22
8	3.77	1.62	30	50	21.40	37.60	16.20
9	3.34	3.34	50	20	24.50	31.50	7.00
10	3.34	3.34	50	20	23.58	40.40	16.82
11	3.34	3.34	50	50	26.60	31.80	5.20
12	3.34	3.34	50	50	24.70	35.50	10.80

注:原生污水流量 Q_1 、外来热水流量 Q_2 单位均为 m^3/h 。

正式试验开始前,对光纤设备进行了校准试验。首先,将试验用光纤段放入已知温度的介质中进行原位温度测量数据校准。其次,进行一次预试验,放热水至管道入口点光纤处,观察实时温度曲线变化,来确定管道中光纤的定位精度及其起算点。试验所用光纤设备的温度数据定位采集精度为 0.5 m,数据采集时间精度为 1 s,数据采集时间为 20 min,并利用 origin 将采集到的数据进行可视化处理。

3 试验结果与分析

3.1 DTS 识别外来水结果

现有研究通常用温度分布图来描述管道温度时空分布特征,以有效识别排水管道中的非法混接和外来水入流^[10,15]。因此,获得 12 种工况的排水管道温度分布监测结果见图 2。

由图 2(a)~(d)可知,对于外来水占比为 10%的工况 1~4,当外来水入侵发生后,仅有工况 4 即设计温差最大工况(11.8 ℃),在入侵事件发生后约 6 min 光纤探测到明显的沿程温度变化;在其他温差条件下,沿程管道温度呈整体微弱上升趋势,未直接识别外来水入流。在充满度影响方面,对比工况 1、3,当充满度由 20% 升为 50%,且工况 3 设定温差为 6.5 ℃,比工况 1 的设

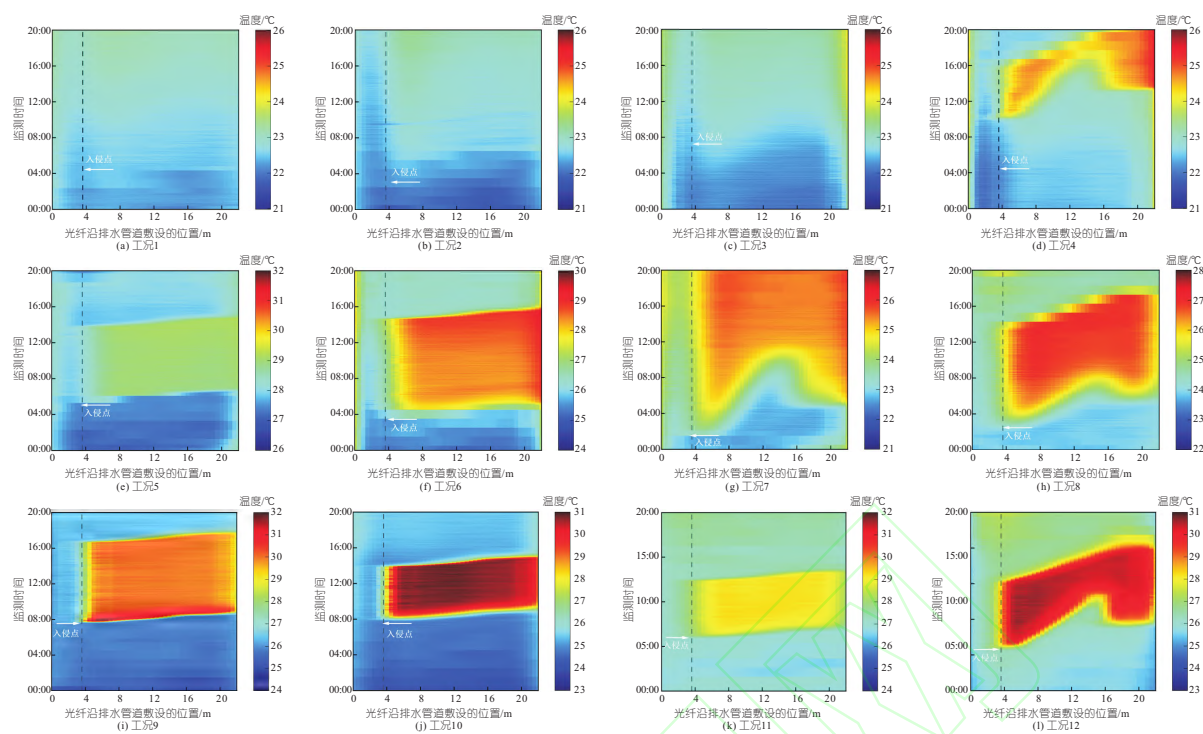


图 2 管道温度时空变化

Fig.2 Variation of pipe temperature

定温差 4.7 °C 高 1.8 °C, 两种工况均未能有效识别入侵的发生; 而工况 3 与工况 4 在相同充满度下, 温差由 6.5 °C 升至 11.8 °C 后, 便可明显识别入侵事件。因此可知外来水占比为 10% 时, 温差是影响识别可靠性的主要因素。

由图 2(e)~(h) 可知, 对于工况 5~8, 当外来水占比为 30%, 所有试验工况下均能可靠地识别外来水入流, 且温差越高, 红色高温区色块越明显。通过该 4 组试验结果可有效观察到充满度对识别结果的影响, 即当充满度为 20% 时, 入侵点后定点处的混合水流达到稳定高温区所需时间较少, 约为 1 min, 而当充满度为 50% 时, 混合水流温度开始升高至稳定高温区所需时间约为 3 min。因光纤安装在管道底部, 管道充满度通过影响上下层水流混合速度从而影响入侵点后定点处达到温度稳定区的响应时间。此外, 充满度由 20% 升为 50% 时, 沿程高温区形状由规则的矩形变为波浪形, 这是由于下游沙袋造成了一定程度的回流的影响。

由图 2(i)~(l) 可知, 对于工况 9~12, 当外来水占比为 50%, 所有试验工况均能显著识别外来水入流。此时, 入侵点后定点处温度由低温区上升至高温区的响应时间最短, 可达十几秒。工况 12 的高温区形状与其他 3 种工况略有不同, 因该工况外水占比最高且温差较大 (10.8 °C), 下游沙袋造成的回水的影响最显著。

3.2 误差分析

对试验结果开展误差分析以定量化评估 DTS 识别外来水的稳定性与可靠性。SCHILPEROORT R P S^[16] 用能量守恒方程与质量守恒定律给出了基于温度法评估管道外来水的计算公式, 分别为:

$$V_1 T_1 + V_2 T_2 = V_3 T_3 \quad (1)$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad (2)$$

式中, T_1 、 T_2 、 T_3 分别为原生污水温度、外来水温度、外水入流后的混合水温; V_1 、 V_2 、 V_3 分别为相应体积; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为相应流量。

因此, 由式 (1)、(2) 结合方程 $V=Q/t$ 推得混合后水流水温 T_3 的计算公式为:

$$T_3 = (Q_1 T_1 + Q_2 T_2) / (Q_1 + Q_2) \quad (3)$$

因此, DTS 测温的相对误差值 R_{RE} 的计算公式为:

$$R_{RE} = [(T_m - T_3) / T_3] \times 100\% \quad (4)$$

式中, T_m 为实际测温值; T_3 为混合温度计算值。

因时空数据采集量大, 选取 2 处代表性监测点数据用于测量误差分析, 分别为距离入侵点较近的 0.4 m ($x=4$ m) 监测点和充分混合均匀的 4.4 m ($x=8$ m) 监测点。 T_{m1} 取 $x=4$ m、 T_{m2} 取 $x=8$ m 处的 4 min 高温区温度监测数据平均值, 选取数据时间范围见表 2。采用标准差 δ 量化评估其稳定性和水流混合均匀程度, δ 计算公式为:

表 2 测量准确性计算结果

Tab.2 Accuracy of measurement results

工况	所取温度 时间范围	理论混合 温度 T_3 /℃	理论管道 水温变化 (T_3-T_1)/℃	$x=4\text{ m}$ 处			$x=8\text{ m}$ 处		
				实际测量 温度 T_{m1} /℃	相对误差 $R_{RE}/\%$	标准差 $\delta/^\circ\text{C}$	实际测量 温度 T_{m1} /℃	相对误差 $R_{RE}/\%$	标准差 $\delta/^\circ\text{C}$
1	14:00~18:00	22.17	0.47	22.79	2.80	0.065	22.94	3.48	0.074
2	16:00~20:00	21.81	1.01	22.97	5.32	0.080	23.42	7.41	0.071
3	16:00~20:00	22.75	0.65	22.93	0.80	0.077	23.13	1.68	0.069
4	10:30~14:30	23.27	1.17	23.62	1.48	0.095	23.95	2.90	0.478
5	08:00~12:00	29.25	1.95	27.57	5.74	0.062	28.98	0.94	0.058
6	08:00~12:00	28.50	4.90	26.99	5.29	0.109	28.36	0.49	0.074
7	08:00~12:00	25.45	3.37	24.06	5.45	0.145	25.48	0.11	0.083
8	08:00~12:00	26.27	4.87	25.82	1.72	0.090	26.95	2.59	0.068
9	10:30~14:30	28.00	3.50	28.12	0.42	0.115	30.04	7.29	0.082
10	09:00~13:00	31.99	8.41	28.17	11.94	0.341	30.75	3.88	0.067
11	08:00~12:00	29.20	2.60	26.97	7.65	0.062	29.21	0.03	0.059
12	08:00~12:00	30.10	5.40	29.24	2.87	0.148	30.44	1.13	0.181

注:因不同工况混合均匀的响应时间不同,因而所取温度时间范围不同。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$
 (5)

式中, n 为所取的 4 min 中温度数据个数; \bar{x} 为温度数据平均值,计算结果见表 2。

表 2、图 3 为 12 种工况的误差分析结果。由表 2、图 3 可知:①由混合后水温 T_3 与原生污水温度 T_1 之差得出的理论管道水温变化值可看出,12 种外来水入侵工况在 3 种影响因素综合作用下,当水温变化达到 1.17℃及以上时(工况 4~12)便能稳定识别外来水的发生。②两个典型位置处的测量误差表现出一定的差异性,在 $x=4\text{ m}$ 处 12 种工况的相对误差最大值为 11.94%(工况 10),相对误差平均值为 4.29%,标准差最大值为 0.341℃,标准差平均值为 0.117℃;在 $x=8\text{ m}$ 处,12 种工况的相对误差最大值为 7.41%(工况 2),相对误差平均值为 2.66%,标准差最大值为 0.478℃,标准差平均值为 0.114℃。可见,4 min 监测数据保持高度稳定,变异性极小,测量误差整体较小;此外, $x=8.0\text{ m}$ 处的实测温度值 T_{m2} 均大于 $x=4.0\text{ m}$ 处 T_{m1} (图 3(a))。由此可知,混

性更高。

4 结论

a.通过原尺寸管道试验平台探讨了 3 个参数对光纤设备探测外来水入侵点的影响。在 3 个参数综合作用下,理论管道水温变化值达到 1.17℃及以上时,光纤设备均能稳定识别外来水入侵事件的发生。

b.DTS 监测数据稳定性极好,外来水入侵点下游 0.4、4.4 m 处 12 组试验相对误差平均值均小于 5%,标准差平均值分别为 0.117、0.114℃。且混合水流在下游 $x=8.0\text{ m}$ 处的混合更均匀,测量准确性更高。

c.在 3 个试验变量中,入流比为识别外来水的最主要影响因素,其可同时影响识别外来水响应时间和效果。

d.本文试验中外水入侵时间和位置已知,而在实际工程中,外来水入侵具有不确定性和间歇性的特点。因此,需长时间、长距离地监测排水管道温度变化,同步监测可能的外来水水源温度,如河流、降雨、地下水等。综合考虑,该方法在实际工程应用中可能存在费用过高的问题,有待进一步研究。

参考文献:

[1] BEHESHTI M, SAEGROV S. Detection of extra-neous water ingress into the sewer system using tandem methods-a case study in Trondheim city[J]. Water science technology,2019,79(2):231-239.

[2] WEISS G, BROMBACH H, HALLER B. Infiltra-

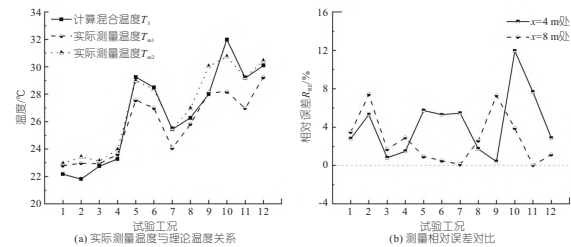


图 3 测量准确性分析图

Fig.3 Analysis of measurement accuracy

合水流在 $x=8.0\text{ m}$ 处的混合更均匀,测量准确

- tion and inflow in combined sewer systems long-term analysis [J]. *Water science and technology*, 2002, 45(7): 11-19.
- [3] 杨婷婷, 李志一, 李萌, 等. 污水管网入流入渗的不同指标的定量化分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(6): 127-129, 57.
- [4] KRACHT O, GUJER W. Quantification of infiltration into sewers based on time series of pollutant loads [J]. *Water science and technology*, 2005, 52(3): 209-218.
- [5] GUO S, ZHANG T, ZHANG Y, et al. An approximate solution for two-dimensional groundwater infiltration in sewer systems [J]. *Water science technology*, 2013, 67(2): 347-352.
- [6] 何巍巍, 刘艳玲, 李军, 等. 基于拉曼散射的分布式光纤传感测温系统研究及应用 [J]. *钻采工艺*, 2019, 42(3): 72-75, 10.
- [7] 陈光富, 蔡德所, 李玮岚, 等. 光纤传感技术在大坝安全监测中的应用探讨 [J]. *水电能源科学*, 2011, 29(7): 64-66, 162.
- [8] 王友乐, 周宜红, 赵春菊, 等. 基于分布式光纤测温系统的坝前水温反馈分析 [J]. *水电能源科学*, 2017, 35(4): 94-97, 207.
- [9] SCHILPEROORT R, HOPPE H, DE HAAN C, et al. Searching for storm water inflows in foul sewers using fibre-optic distributed temperature sensing [J]. *Water science and technology*, 2013, 68(8): 1723-1730.
- [10] HOES O A, SCHILPEROORT R P, LUXEMBURG W M, et al. Locating illicit connections in storm water sewers using fiber-optic distributed temperature sensing [J]. *Water research*, 2009, 43(20): 5187-5197.
- [11] BEHESHTI M, SæGROV S. Quantification assessment of extraneous water infiltration and inflow by analysis of the thermal behavior of the sewer network [J]. *Water*, 2018, 10(8): 1070.
- [12] 刘永莉, 付勤友, 陈智, 等. 基于分布式光纤测温系统的管廊管道渗漏监测模型试验 [J]. *中国科技论文*, 2022, 17(8): 893-899.
- [13] 王剑锋, 刘红林, 张淑琴, 等. 基于拉曼光谱散射的新型分布式光纤温度传感器及应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(4): 865-871.
- [14] 杨婷婷, 李志一, 朱婉宁, 等. 基于在线监测的污水管道旱天入流入渗分析 [J]. *给水排水*, 2021, 57(9): 132-138.
- [15] PANASIUK O, HEDSTRÖM A, LANGEVELD J, et al. Using Distributed Temperature Sensing (DTS) for locating and characterising infiltration and inflow into foul sewers before, during and after snowmelt period [J]. *Water*, 2019, 11(8): 1529.
- [16] SCHILPEROORT R P S. Monitoring as a tool for the assessment of wastewater quality dynamics [D]. Delft; Delft University of Technology, 2011.

Tests on Extraneous Water Monitoring in Drainage Networks Based on Distributed Optical Fiber Temperature Sensor

CHEN Jing-ru¹, GUO Shuai¹, SHENTU Hua-bin², ZHOU Wen-ming²,
HUANG Rong-min³, ZHANG Hao³

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China;

3. Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan 430062, China)

Abstract: The extraneous water invasion has significant negative impacts on the drainage sewer system. The precise identification and location of extraneous water is essential for a better management of the pipeline network. Based on the full scale experiment platform, three parameters including the temperature difference, water level and extraneous water inflow ratio were tested to investigate the use of distributed fiber optic temperature sensing (DTS) for detecting extraneous water under different operating conditions and to assess the accuracy of the measurement results. The results show that the feasibility of DTS identification of extraneous water mainly relates to the water inflow ratio. The temperature difference primarily affects the temperature of the mixed water flow, while the water level mainly affects the response time. Overall, the positioning accuracy of DTS is 0.5 m and the fastest responsive time is less than ten seconds. For 12 group of test conditions, the relative error is less than 5%, and the standard error is less than 0.2 °C. Therefore, the DTS performs good on detecting the extraneous water invasion.

Key words: DTS; extraneous water; drainage pipe network; error analysis