

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.11.033

基于暴雨强度公式的设计雨型

卓 雄¹, 格日乐², 上官海东¹, 梁小光^{1,2}, 李树平²

(1.福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001; 2.同济大学环境科学与工程学院, 上海市 200092)

摘 要: 排水管渠系统计算机模型常需要采用设计雨型作为降雨量输入, 其中基于暴雨强度公式的设计雨型是常用方法之一。研究中分析了均匀强度雨型、三角雨型、交替块状雨型和芝加哥雨型的构造方法; 通过示例说明了这几种雨型的雨峰强度、降雨深度、雨峰位置系数的特点, 以及在汇水面积中形成的峰值流量、总径流量、到达峰值流量时间等径流特征。其中芝加哥雨型在雨峰强度、降雨深度、引起的峰值径流量数值均较大, 且到达峰值径流量时间较短, 在基于风险的雨水管渠系统设计中, 其计算结果较为保守, 因此推荐使用。

关键词: 暴雨强度公式; 设计雨型; 径流

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)11-0118-04

0 引 言

《室外排水设计标准》(GB 20014—2021) 中规定: 当汇水面积大于 2 km² 时, 应考虑区域降雨和地面渗透性能的时空不均匀性和管网汇流过程等因素, 采用数学模型法确定雨水设计流量^[1]。数学模型法应用的一个显著特点是需要采用设计雨型作为降雨量输入, 其原因包括: 城市排水工程设计中, 不可能针对实际雨水径流量记录进行频率分析, 而且排水服务区域在建设前后雨水径流量存在很大差异; 设计雨型有助于排水管渠系统计算机模型的构建和模拟; 研究雨水调蓄系统或流量控制设施时, 最好用雨型进行设计校核; 国家规范和地方性标准规定了统一的排水防涝水平, 应按照标准的数据输入和计算方法设计排水工程; 采用设计雨型有助于设计单位、建设单位和审批机构之间的沟通和交流, 减少对计算方法和设计方案的误解^[2]。

设计雨型体现了设计暴雨的时间变化过程。随着建模技术的发展, 提出了许多城市设计雨型。设计雨型通常可分为两类: 一类是直接从暴雨强度公式推导出的雨型; 另一类是结合其他统计分析方法获得的雨型 (例如 Huff 雨型、SCS 雨型、Pilgrim-Cordery 雨型等)^[3]。本研究讨论几种基于暴雨强度公式的设计雨型构建方法, 然后以算例分析了设计雨型特点及其生成的径流量特点。

收稿日期: 2022-01-12

基金项目: 福建省建设科技研究开发项目(2019-K-49)

作者简介: 卓雄(1971—), 男, 本科, 高级工程师, 从事给水排水设计管理和技术管理工作。

1 设计雨型

1.1 设计雨型特征

设计雨型常由重现期、降雨深度、降雨持续时间、降雨时间分布、雨峰位置系数等刻画。

(1) 重现期

暴雨强度重现期(P)是指等于或超过特定值的暴雨强度出现一次的平均时间间隔, 单位以年(a)表示, 其数值根据长期降雨记录统计估计。城市排水管渠系统设计重现期一般取 2~5 a, 重要地区可取 5~10 a。

(2) 降雨深度

降雨深度(H)为给定降雨持续时间内的降雨量, 以 mm 为单位。

(3) 降雨持续时间

降雨持续时间(T)为累积雨量的时间长度(min), 它可以指一场降雨的总历时或一场降雨内小于总历时的某个连续时段。一般城市排水管渠系统设计计算中取降雨持续时间为 1 h^[4]。

(4) 降雨时间分布

降雨时间分布表示一场降雨内降雨强度随时间的变化。通常以 5 min 作为设计雨型的最小时间间隔, 然后定义该时间间隔内的降雨强度和雨型的综合雨峰位置系数。

(5) 雨峰位置系数

一场降雨的雨峰位置系数(r_i)为表征雨峰位置的参数, 为从降雨持续时间开始至降雨峰值出现时间(t_{pi})与降雨持续时间(T_i)的比值^[5]。

$$r_i = \frac{t_{pi}}{T_i} \quad (1)$$

将持续时间相同的逐年最大降雨样本的雨峰位置系数进行算术平均,再将各持续时间的雨峰位置系数按照各持续时间的长度进行加权平均,可求得综合雨峰位置系数 r 。由近年文献中查得的我国一些城市综合雨峰位置系数值见表 1。

表 1 城市综合雨峰位置系数

城市	综合雨峰位置系数	文献出处
上海市	0.405	[6]
杭州市	0.315	[7]
南宁市	0.335	[8]
兰州市	0.382	[9]
贵阳市	0.405	[10]
吉林市	0.389	[11]
葫芦岛市	0.320	[12]
镇江市	0.360	[13]
盐城市	0.439	[14]
桂林市	0.295	[15]
柳州市	0.370	[16]
香港特别行政区	0.500	[17]

1.2 基于暴雨强度公式的设计雨型

特定重现期下,暴雨强度公式常表示为

$$i = \frac{a}{(t+b)^n} \quad (2)$$

式中: i 为暴雨强度,mm/min; t 为降雨历时,min; a 、 b 和 n 为地方性参数。

基于暴雨强度公式的设计雨型有均匀强度雨型、三角雨型、交替块状雨型、芝加哥雨型等^[18]。

(1) 均匀强度雨型

均匀强度雨型也称单强度雨型、矩形雨型,它假设在降雨持续时间内强度均匀分布,取单一数值。于是

$$i = \frac{H}{T} \quad (3)$$

均匀强度雨型的应用合理性常受到质疑,但它具有简单、易于使用和易于理解的优点,同时它也成为其他雨型分析的基础,因为任何雨型都可认为是由一系列这样的均匀、短历时平均降雨强度构成。

(2) 三角雨型

三角雨型假设降雨持续时间内降雨深度、雨峰位置($t_p = rT$)处的降雨强度 i_{max} 为

$$i_{max} = \frac{2H}{T} \quad (4)$$

当 $0 \leq t \leq t_p$ 时,降雨强度 i 从 0 线性增加至 i_{max} ; 当 $t_p \leq t \leq T$ 时,降雨强度 i 从 i_{max} 线性减小至 0。

(3) 交替块状雨型

交替块状雨型认为降雨强度以 $T/2$ 为轴,当 $0 \leq t \leq T/2$ 时,降雨强度逐渐增加;当 $T/2 \leq t \leq T$ 时,降雨强度逐渐下降^[20]。

a. 在设定时间间隔 $\Delta t = T/N$ (N 为整数偶数)下,计算各降雨历时 $t = n\Delta t$ ($0 < n \leq N$) 的平均降雨强度 \bar{i}_n 和 $\bar{i}_n \cdot n\Delta t$ 累积降雨深度。

b. 计算第 n 个 Δt 内的增量降雨深度 $[\bar{i}_n \cdot n\Delta t - \bar{i}_{n-1} \cdot (n-1)\Delta t]$,相应暴雨强度 i_n 计算为

$$i_n = \frac{\bar{i}_n \cdot n\Delta t - \bar{i}_{n-1} \cdot (n-1)\Delta t}{\Delta t} = \bar{i}_n \cdot n - \bar{i}_{n-1} \cdot (n-1) \quad (5)$$

c. 对步骤②中获得的 N 个 i_n 由大到小排序;然后将 N 个 i_n 分配到 N 个 Δt 内。其中第一个 i_n (时间间隔 Δt 内最大降雨强度值) 赋给第 $N/2$ 个 Δt , 第 2 个 i_n (时间间隔 Δt 内最大降雨强度次大值) 赋给第 $(N/2+1)$ 个 Δt , 第 3 个 i_n 赋给 $(N/2-1)$ 个 Δt , 第 4 个 i_n 赋给 $(N/2+2)$ 个 Δt , ……; 即以 $T/2$ 为轴,交替将降雨强度值赋值到该轴两侧。

(4) 芝加哥雨型

芝加哥雨型由美国学者 Kerfer 和 Chu 于 1957 年提出,用于芝加哥的排水管道系统设计,因此也称作 Kerfer-Chu 雨型^[19]。根据峰值强度的前后时间,降雨强度计算为:

$0 \leq t \leq t_p$ 时

$$i = \frac{a[(1-n)\frac{t-t_p}{r} + b]}{(\frac{t_p-t}{r} + b)^{1+n}} \quad (6)$$

$t_p \leq t \leq T$ 时

$$i = \frac{a[(1-n)\frac{t-t_p}{1-r} + b]}{(\frac{t_p-t}{1-r} + b)^{1+n}} \quad (7)$$

作为特例,当 $r = 0.5$ 时,公式变为

$0 \leq t \leq T/2$ 时

$$i = \frac{a[(1-n)(T-2t)+b]}{(T-2t+b)^{1+n}} \quad (8)$$

$T/2 \leq t \leq T$ 时

$$i = \frac{a[(1-n)(2t-T)+b]}{(2t-T+b)^{1+n}} \quad (9)$$

例如我国香港特别行政区在排水系统模拟计算中,当降雨持续时间不超过 4 h 情况下,采用上述对称分布的芝加哥雨型,见式(8)和式(9)。

2 算例分析

2.1 设计雨型

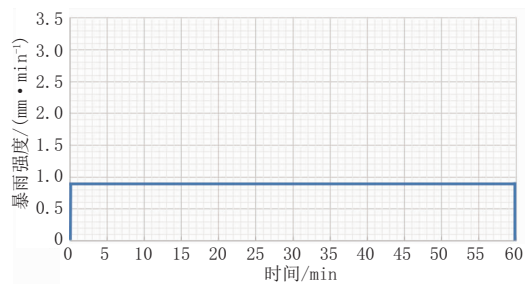
算例采用我国某市暴雨强度公式

$$i = \frac{14.715(1+0.633 \lg P)}{(t+11.951)^{0.724}} \quad (10)$$

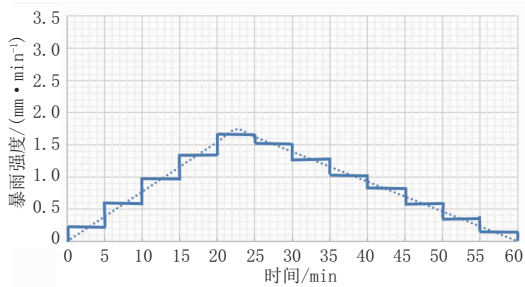
为例,试分析重现期 $P = 3 \text{ a}$, $\Delta t = 5 \text{ min}$, $T = 1 \text{ h}$ 条件下各种设计雨型。计算三角雨型和芝加哥雨型时,取综合雨峰位置系数 $r = 0.375$ 。

由式(10)知,当 $P=3 \text{ a}$ 时, $a=14.715(1+0.633 \lg P)=19.159$, $b = 11.951$, $n = 0.724$ 。当 $T = 1 \text{ h} = 60 \text{ min}$ 时,降雨深度 $H = \frac{19.159}{(60+11.951)^{0.724}} \times 60 = 52.00 \text{ mm}$ 。

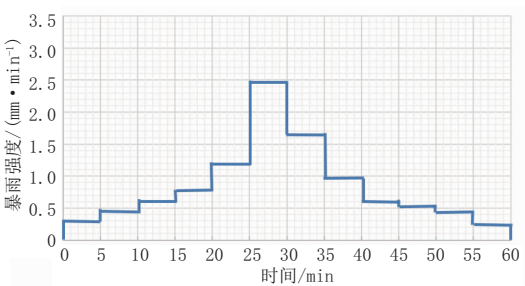
将这些数值代入各种雨型计算公式,见式(2)~式(7),在 $P = 3 \text{ a}$, $\Delta t = 5 \text{ min}$, $T = 1 \text{ h}$ 条件下的设计雨型计算结果绘图及统计特征分别见图1和表2。表2中 5 min 强度 i_5 指当降雨历时 $t = 5 \text{ min}$ 时,由式(10)求得的暴雨强度,本例中 $i_5 = 2.48 \text{ mm/min}$ 。



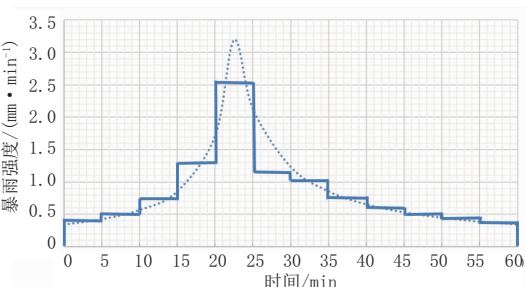
(a) 均匀强度雨型



(b) 三角雨型



(c) 交替块状雨型



(d) 芝加哥雨型

图1 设计雨型

表2 各种设计雨型特征

设计雨型	雨峰强度 $i_p/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	雨峰强度与5分钟降雨强度 比值 $i_p/i_5 / \%$	降雨深度 H/mm	雨峰位置 系数 r
均匀强度雨型	0.87	35%	52.00	
三角雨型	1.74	70%	52.00	0.375
交替块状雨型	2.48	100%	52.00	
芝加哥雨型	3.19	129%	53.00	0.375

由表2看出:一、雨峰强度中,均匀强度雨型数值最小(0.87 mm),芝加哥雨型数值最大(3.19 mm);三角雨型的雨峰强度(1.74 mm)为均匀强度雨型的二倍;交替块状雨型的雨峰强度(2.48 mm/min)与 i_5 相同。二、均匀强度雨型、三角雨型、交替块状雨型在降雨强度分布中考虑了 $T = 1 \text{ h}$ 由暴雨强度公式计算的降雨深度(52.00 mm);而芝加哥雨型在降雨强度分布中未考虑该降雨深度,其累积降雨深度数值(53.95 mm)略高。三、三角雨型和芝加哥雨型均考虑了雨峰位置系数(0.375)。四、尽管芝加哥雨型在计算中采用的是 $P = 3 \text{ a}$ 重现期,但其 5 min 雨峰强度(3.19 mm/min)和 1 h 的降雨深度(53.95 mm)均高于 3 a 重现期下的相应数值(2.48 mm/min 和 52.00 mm)。

各设计雨型的累积降雨曲线见图2。由图2看出,除均匀强度雨型的累计降雨量曲线呈直线形式外,其余三种带有雨峰强度的累积降雨量曲线均呈S形。其中雨峰强度出现的越早,数值越大,其上升翼的斜率越大。

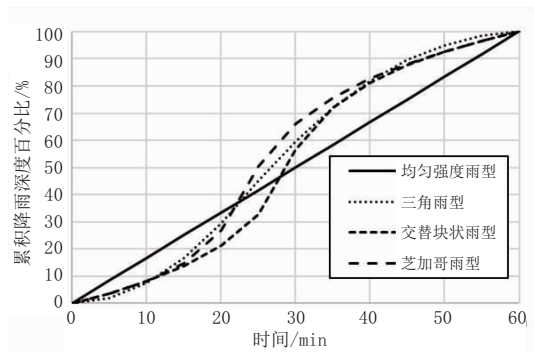


图2 各设计雨型累积降雨量曲线

2.2 径流特征

为分析各种设计雨型在汇水面积中形成的径流特征,采用EPA SWMM软件中的算例1(Example1.inp)中的汇水面积及管渠数据,该汇水面积为 29 hm^2 ,见图3,共有8个子汇水面积、13条管段,排放口位于图的下方^[21]。

各子汇水面积采用统一的设计雨型,分析计算

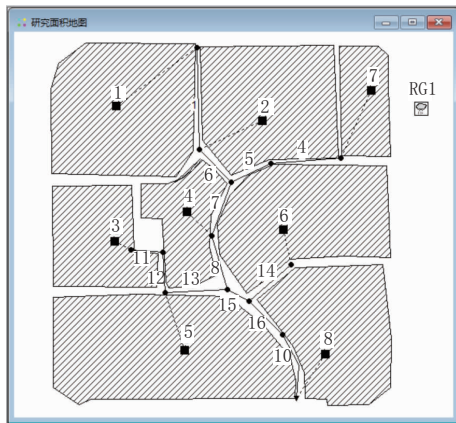


图 3 汇水面积示意图

利用中文版雨水管理模型 SWMMH5.1.012。不同雨型下排放口处流量过程线及统计数据分别见图 4 和表 3。

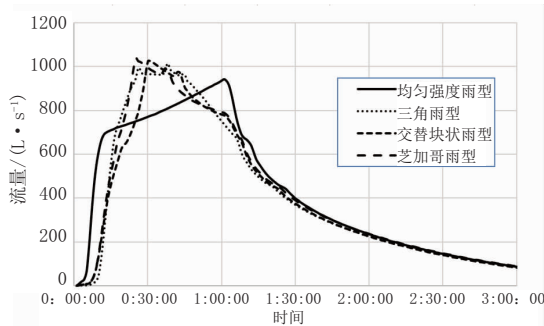


图 4 示例排放口处径流量过程线

表 3 不同设计雨型下排放口处的径流特征

设计雨型	峰值流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	总径流量 /mm	到达峰值流量时间 /min
均匀强度雨型	0.941	27.13	61
三角雨型	1.014	27.61	38
交替块状雨型	1.024	27.28	30
芝加哥雨型	1.036	28.70	25

由图 4 看出：除均匀强度雨型的径流量曲线差异较大外，其余三种雨型的径流量曲线较为相似；降雨持续时间(1 h)之后，各设计雨型下的径流量过程线逐渐趋于相同。

由表 3 看出：峰值流量中，均匀强度雨型数值最小(0.941 m^3/s)，芝加哥雨型数值最大(1.036 m^3/s)；尽管均匀强度雨型、三角雨型、交替块状雨型的降雨深度相同，它们在排放口处产生的总径流量略有差异；芝加哥雨型的总径流量数值较大(28.70 mm)；三角雨型、交替块状雨型和芝加哥雨型均在降雨持续时间内到达峰值流量，其中芝加哥雨型到达峰值流量时间最短(25 min)，均匀强度雨型在降雨结束时到达峰值流量(61 min)。

3 结 语

本研究分析了基于暴雨强度公式的四种设计雨型 - 均匀强度雨型、三角雨型、交替块状雨型和芝加哥雨型。其中均匀强度雨型在降雨持续时间内采用单一暴雨强度，其余三种均具有不同的峰值强度。在相同暴雨强度公式、相同降雨持续时间、相同重现期和相同时间间隔下，三角雨型的峰值强度为均匀强度雨型的二倍。交替块状雨型的峰值强度为时间间隔作为历时计算的降雨强度。均匀强度雨型、三角雨型和交替块状雨型在降雨强度分布中均考虑了降雨持续时间内的降雨深度值。三角雨型和芝加哥雨型在降雨强度分布中考虑了综合雨峰位置系数。

其次采用暴雨强度公式算例和汇水面积算例，说明了各种设计雨型的特点。其中芝加哥雨型在雨峰强度、降雨深度、引起的峰值径流量数值均较大，且到达峰值径流量时间较短，在基于风险的雨水管理渠系统设计中，其计算结果较为保守，因此应推荐使用。但是该结论是否具有普遍性，仍需更多的实例分析来验证。

参考文献：

- [1] GB 50014—2021, 室外排水设计标准[S].
- [2] Marsalek, J., Watt, W.E..Design storms for urban drainage design[J]. Canadian journal of civil engineering, 1984(11):574-584.
- [3] Adams, B.J.,Howard, C.D.D.Design storm pathology [J].Canadian water resources journal, 1986, 11(3):49-55.
- [4] Watt, W.E.,Chow, K.C.A.,Hogg, W.D.,et al.A 1-h urban design storm for Canada [J].Canadian journal of civil engineering, 1986(13): 293-300.
- [5] 住房和城乡建设部, 中国气象局. 城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则[Z].2014.
- [6] DB31/T 1043—2017, 暴雨强度公式与设计雨型标准[S].
- [7] 刘樱, 杨明, 徐集云. 杭州市城市暴雨雨型分析研究[J]. 科技通报, 2021, 37(4):15-22.
- [8] 周绍毅, 罗红磊, 苏志, 等. 南宁市新一代暴雨强度公式与暴雨雨型研究[J]. 气象研究与应用, 2017, 38(2):1-5.
- [9] 张进丽, 任建民. 兰州市暴雨强度公式及雨型的推求研究[J]. 环境生态, 2020, 49(3):10-13.
- [10] 段莹, 张东海, 胡欣欣, 等. 贵阳市暴雨变化趋势及短历时暴雨雨型研究[J]. 贵州气象, 2016, 40(1):19-24.
- [11] 邱译萱, 任晓峰, 杨雪艳, 等. 吉林市暴雨强度公式推求和设计雨型[J]. 干旱气象, 2021, 39(1):151-158.
- [12] 朱玲, 龚强, 李扬, 等. 辽宁葫芦岛市新旧暴雨强度公式对比及暴雨雨型分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(3):251-258.
- [13] 庄智福, 王珂清, 杨杰, 等. 镇江市新一代暴雨强度公式研制及雨型设计[J]. 气象科学, 2015, 35(4):506-513.

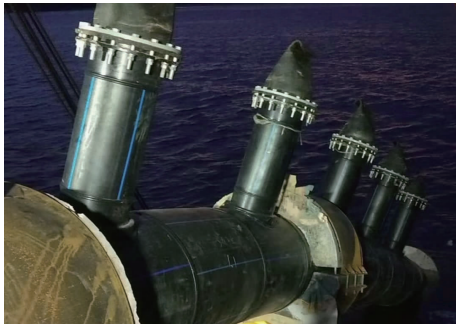


图7 扩散段管道下沉之实景

扩散器待主管安装就位后,由潜水员水下进行螺栓连接。安装结束后,按设计要求抛填块石,抛石护面与原始海床持平。

4.6 重点注意事项

(1)防台风。为防止台风或热带风暴对施工船舶的袭击影响,一旦接到风暴警报(大于7级),可进行弃管作业,将管头滑移离开托架,吊放入海底,并设置浮标。风暴过后,施工船舶重新进场,并根据GPS定位系统定位,安排潜水员沿浮标导索下潜对管道进行打捞。潜水员在水下固定好吊索后,由起重设备将管托架尾端吊出水面并安装到工程船上,清理管道接口位置的泥沙和污渍后,再进行接管及下道安装工序。

(2)船舶防碰撞。施工船舶应严格按照施工组织设计和安排的施工作业区进行施工,每天定时向项目部报告工程进展情况和施工安全情况,通报作业区的施工船舶分布情况。严禁施工船舶随意穿越其他作业区;禁止施工船舶将锚位抛出作业区;禁止施工船舶未按计划施工。

(3)防雾。大雾期间应用高频电话系统,在基地和所有船舶之间进行密切的联系,停止所有船舶在海上航行,已在航行途中也应临时锚泊,按规定使用雾钟向其他船只发出警告。

5 结语

汕头市潮阳区纺织印染环保综合处理中心污水处理厂尾水排海管道工程已于2020年完工投产,目前运行良好。该工程的顺利实施,可以得到以下结论:

(1)利用海洋水体的稀释扩散作用,将处理达标后的污水通过压力管道向深海排放是合理、可行的。

(2)排海管道设计应选择合适的管材及接口,对破波区及深水区分别采用符合实际情况的敷设方式。

(3)施工阶段应重点对沟槽开挖、海上运输、配重块设置、下沉敷设等内容进行控制,并制定防台风、防船舶碰撞、防雾等应急方案。

参考文献:

- [1] 刘铮,黄文献.废水排海工程设计探讨[J].大众科技,2016,18(2):36-38.
- [2] 邢文文,岳凤伟.沿海旅游城市敷设排海管道的设计[J].中国给水排水,2013,29(14):59-61.
- [3] 王谭,安关峰,杨斌.关于给水排水管道工程的几点思考[J].市政技术,2021,39(9):112-116.
- [4] 徐清明,刘承洁.海底放流管铺设安装工程施工技术探讨[J].水运工程,2002,342(7):94-96.
- [5] 王穆芝,栾成浩,武金锋.烟台市套子湾污水处理厂排海管道施工技术概论[J].科技信息,2008,27:90-91.

~~~~~  
(上接第121页)

- [14] 吉建家,翟卫东,王昌平,等.江苏盐城市设计暴雨雨型研究[J].治淮,2019(7):17-19.
- [15] 周绍毅,苏志,廖雪萍,等.基于芝加哥法的桂林市短时暴雨特征分析[J].气象研究与应用,2019,40(2):25-29.
- [16] 谢东,苏小玲,刘蕾,等.基于芝加哥法的柳州市设计暴雨雨型研究[J].气象研究与应用,2018,39(3):72-75.
- [17] SDM, 2018: Stormwater drainage manual: planning, design and management [M]. Drainage Services Department, Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Fifth edition, 2018.

- [18] Balbastre-Soldevila, R., Garcia-Bartual, R., Andres-Domenech, I. A comparison of design storms for urban drainage system applications[J]. Water, 2019, 11(4):757-771.
- [19] Keifer, C.J., Chu, H.H. Synthetic storm pattern for drainage design[J]. ASCE Journal of hydraulics division, 1957, 83(HY4):1-25.
- [20] Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. Applied hydrology [M]. McGraw-Hill, NY, USA, 1988.
- [21] Rossman, L. Stormwater management model user's manual version 5.1 [R]. EPA/600/R-14/413b, USEPA, 2015.