

Review of Urban Sewer Sediment Erosion and Transport Model

Haiyan LI, Boping XU, Huirui MEI

Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment (Beijing University of Civil Engineering and Architecture),
Ministry of Education, Beijing, China
Email: lihaiyan@bucea.edu.cn

Abstract: During wet weather, the sewer sediments would be re-suspended, which would produce shock pollution loading detrimental to the receiving waters. The management of urban stormwater pollution represents a big task due to the extreme spatial-temporal variability of the storm water quantity characteristics and high uncertainty in their evaluation. The sediment erosion/transport models provide a possible approach to estimate the runoff quality, which could tell us how to control the runoff pollution from sewer sediments. Sewer sediment erosion/transport models were reviewed in this paper, which would provide an insight to understand the relationship between the sewer sediments and the receiving water bodies' pollution control.

Key words: urban sewer; sewer sediment; sediment erosion/transport; model

城市排水管道沉积物的冲刷释放模型综述

李海燕, 徐波平, 梅慧瑞

城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室(北京建筑工程学院), 北京, 中国, 100044

E-mail: lihaiyan@bucea.edu.cn

摘 要: 城市排水管道沉积物经雨水径流冲刷后, 其中赋存的污染物释放将对城市水体造成污染。由于污染物的种类较多、降雨随机性大、取样及在线监测难度大等问题, 需采用模型模拟的方法对管道内污染物的沉积与释放规律进行研究, 进而提出有效的污染控制措施。本文综述了国内外城市排水管道沉积物的冲刷释放模型, 为排水管道中沉积物的污染机制与控制措施的研究提供一定参考。

关键词: 城市排水管道; 沉积物; 冲刷释放; 模型

1 引言

当前世界各地的城市排水管道几乎都存在程度不一的泥沙沉积现象^[1]。淤积的沉积物不仅会造成管道腐蚀、水流输送能力的降低, 而且在雨水径流的冲刷作用下, 其中赋存的污染物会释放进入城市水体, 对受纳水体的水环境构成威胁^[2,3]。随着点源污染治理程度的提高, 非点源污染对水体的污染负荷贡献比例逐年增加^[4], 排水管道是雨水径流进入水体的主要途径, 排水管道沉积物中污染物的径流冲刷释放是水体非点源污染负荷的重要组成部分, 因此, 明确管道沉积物的冲刷释放规律, 控制其中污染物的释放是改善城市水体污染的重要方面。但由于城市排水管道沉积物中

资助信息: 国家自然科学基金项目(No.50808009); 北京市教委科技计划项目(No KM200810016012); 北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目(PHR201008379)

污染物种类较多、随机性大、取样及在线监测难度大等问题, 一般采用模型模拟的方法对污染物的累积、冲刷释放进行研究。目前的沉积物运动模型主要有启动速度模型、临界不淤速度模型和悬浮运动模型等^[2]; 以及利用过剪切力和水流功率概念方程对沉积物冲刷释放进行预测的模型^[3], 多数主要通过模拟提出管道沉积物发生沉积和冲刷的条件, 少数研究涉及到沉积物冲刷释放对受纳水体的水质影响预测。

2 管道沉积物冲刷释放规律模型

管道沉积物的冲刷释放模型主要分为数学模型、实验室模型和经验模型三类。

Miglio 和 Gandio 将管道中的径流作为一维函数来考虑, 提出用一维圣维南方程组和沉积物冲刷释放连续性方程来表达径流中颗粒物的沉积和管道中沉积物

的冲刷（概念模型）^[5]。由于其方程组的边际条件难以确定、解析解难以得到，从而限制了其推广应用。从而有一些研究者引进泥沙运动力学的结论来简化该方程组（如：DORA 模型等）^[6,7]。另外，也有研究直接借鉴河流泥沙运动力学中 Velikanov 模型来判断管道径流中颗粒物的沉积或通过实验室模拟不同水流情况下对模拟沉积物的冲刷，计算沉积物冲刷释放率^[8]和沉积床的变化^[9]。同时，Nalluri 结合实验提出了临界速度模型，即避免管道发生沉积的水流最小速度方程^[10]；Brian *et al*^[11]和 Coghlan *et al*^[12]则结合实地监测的水流参数和管道出水 TSS，拟合得出了管道出水 TSS 浓度方程，用于估算管道出水水质。

2.1 数学模型

2.1.1 概念模型

Miglio *et al* 从数学角度，将实验水槽（管道）内发生的沉积和冲刷现象用 Graf *et al* 提出的一维圣维南方程组（1）表示^[5]。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \\ \frac{1}{g} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + A \frac{\partial h}{\partial x} + A \frac{\partial z_b}{\partial x} = -AS_f \\ \frac{\partial Q_s}{\partial x} + (1-p)W_b \frac{\partial z_b}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中：

Q ——流量， m^3/s ； x ——沿水流方向管道的长度， m ； A ——过水断面面积， m^2 ； t ——时间， s ； g ——重力加速度， m/s^2 ； Q_s ——流量， m^3/s ； h ——水深， m ； z_b ——沉积床高程， m ； S_f ——阻力坡度； p ——沉积物的孔隙率； W_b ——沉积床湿周， m 。

方程组（1）中的前两个方程分别为一维流体连续性方程和动量守恒方程，第三个方程表示水流中的颗粒物及沉积物冲刷释放率的连续性方程（假定沉积物在非稳定流中的冲刷释放率等于其在稳定流下的冲刷释放率）。当水流中的沉积物含量很高、流量减少或者水流沿水流方向抬升时，都会造成水流挟沙能力的降低，从而发生沉积物的沉积，即 $\partial z_b / \partial t > 0 \rightarrow \partial Q_s / \partial x < 0$ ；反之，当水流中沉积物浓度很低、流量很大或者水流沿水流方向下降时，水流挟沙能力超过了实际水流中所含颗粒物总量时，沉积物会被冲刷释放进入水流（在有沉积物存在的情况下），即 $\partial z_b / \partial t < 0 \rightarrow \partial Q_s / \partial x > 0$ 。

方程组（1）通常是没有解析解的，从而限制了该方程组的推广和应用，但常可对其进行简化或采用数值解^[13-19]。

2.1.2 DORA 模型

Palermo 大学的 Tucciarelli^[6]和 Noto^[7] 在方程组(1)的基础上提出了 DORA(The Double Order Approximation)模型，以解决一维流体连续性方程在非稳定流情况下水流对沉积床的冲刷释放。

将扩散假设理论应用于动量守恒方程，当沉积厚度远小于水流深度时，沉积物的厚度可忽略不计。对于菱形管道，在存在沉积床的情况下，方程组（1）可改写为：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(A \chi S_f \sqrt{\frac{R}{S_f}} \right) + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial Q_b}{\partial x} + (1-p)W_b \frac{\partial z_b}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

χ ——Chezy 系数， $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ 。

Aricoch *et al* 则发展了 DORA 模型，在推移质运动下，应用经验公式表示水流挟沙力（水流挟沙力为水流平均流速和水深的函数）^[20]；同时，采用 Ackers 公式^[21]计算管道和明渠中的总输沙率（包括悬移质和推移质），其公式如下^[22]：

$$Q_s = C_v A U \quad (3)$$

式中：

U ——水流平均流速， m/s ； A ——过水断面面积， m^2 ； C_v ——沉积物的体积浓度，可通过公式（4）计算得到：

$$C_v = \frac{G_{gr}}{\frac{R}{d_{50}} \left(\frac{A}{W_b R} \right)^{1-n_{gr}} \left(\frac{u_*}{U} \right)^{n_{gr}}} \quad (4)$$

式中：

R ——水力半径， m ； d_{50} ——中值粒径， m ； u_* ——剪切速度， m/s ； G_{gr} ——参数； n_{gr} ——指数，可由方程(5)——(11)计算得出。

$$G_{gr} = H \left(\frac{F_{gr} - A_{gr}}{A_{gr}} \right)^{m_{gr}} \quad (5)$$

$$H = 10^{2.86 \log D_{gr} - (\log D_{gr})^2 - 3.53} \quad (6)$$

$$D_{gr} = d_{50} \sqrt[3]{\frac{g \Delta}{v^2}} \quad (7)$$

$$F_{gr} = \frac{u_{*gr}^{n_{gr}}}{\sqrt{gd_{50}\Delta}} \left(\frac{U}{\sqrt{32 \log \frac{12R}{d_{50}}}} \right)^{1-n_{gr}} \quad (8)$$

$$A_{gr} = 0.14 + \frac{0.23}{\sqrt{D_{gr}}} \quad (9)$$

$$n_{gr} = 1.00 - 0.56 \log D_{gr} \quad (10)$$

$$m_{gr} = 1.34 - \frac{9.66}{D_{gr}} \quad (11)$$

式中:

D_{gr} ——无量纲颗粒粒径; Δ ——沉积物的相对粒径密度; ν ——水的粘滞系数, m^2/s ; 其中, $1 \leq D_{gr} < 60$ 。当 $D_{gr} \geq 60$ 时, 参数 $H=0.025$, $A_{gr}=0.17$, $n_{gr}=0$, $m_{gr}=1.5$ 。

Miglio^[23]在 DORA 模型的基础上, 借鉴经验公式 (12)^[24]、(13) (Meyer-Peter 公式) 和 (14) (Muller 公式)^[25]来计算推移质输沙率:

$$\omega_s = F \sqrt{gd_{50}\Delta} \quad (12)$$

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gd_{50}^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{gd_{50}^3}} \quad (13)$$

$$\gamma \left(\frac{k_s'}{k_s} \right)^{3/2} R_b S_0 = 0.047 \gamma_s' d_m + 0.25 \rho^{1/3} \left(\frac{Q_b}{W_b} \right)^{2/3} (\gamma_s')^{2/3} \quad (14)$$

式中:

ρ ——水的密度, kg/m^3 ; γ ——水的重度, N/m^3 ; γ_s' ——沉积物的重度, N/m^3 ; k_s ——Stricker 床速度参数, $\text{m}^{1/3}/\text{s}$; k_s' ——Strickler 床速度参数(能整除表面摩擦力), $\text{m}^{1/3}/\text{s}$; R_b ——水力半径, m ; Q_b ——流量, m^3/s ; S_0 ——管道底坡; d_m ——等效颗粒物粒径(等于 d_{50})。

DORA 模型及在此基础上改进的模型均为泥沙运动力学结论和流体力学结合的结果。泥沙运动力学研究的是沙粒在河流中的运动规律, 由于沙粒(也称自然沙)的性质和管道沉积物的物理性质相差很大(管道沉积物含有比较高的有机质, 而自然沙基本上不含有机质), 同时河流中水流比较稳定, 管道中的水流则相对不稳定, 将泥沙运动力学的规律和理论用于管道沉积物时, 会使模拟结果与实际管道中沉积物的沉积冲刷之间存在一定差异。

2.2 实验室模型

2.2.1 临界速度模型

Nalluri *et al* 根据矩形水槽(管道)实验结果, 提出避免发生沉积的临界速度方程^[10], 如公式 (17) 所示。

$$\frac{V_s}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 1.94 C_v^{0.165} \left(\frac{b}{y_0} \right)^{-0.4} \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^{-0.57} \lambda_{sb}^{0.10} \quad (17)$$

式中:

V_s ——自净速度, m/s ; g ——重力加速度, m/s^2 ; $s(=\rho_s/\rho)$ ——沉积物的相对密度; ρ ——水的密度, kg/m^3 ; ρ_s ——沉积物的密度, kg/m^3 ; C_v ——沉积物的体积浓度, mg/L ; b ——沉积床宽, m ; y_0 ——水深, m ; d_{50} ——中值粒径, m ; D ——管径, m ; λ_{sb} ——沉积床摩擦力。

Nalluri *et al* 同时发现在管道内存在沉积物和不沉积在沉积物两种条件下, 水流摩擦力有如下关系:

$$\lambda_{sb} = 6.6 \lambda_s^{1.45} \quad (18)$$

$$\lambda_s = 0.88 C_v^{0.01} (b/y_0)^{0.03} \lambda^{0.94} \quad (19)$$

λ_s ——含有颗粒物的水流中的 Darcy-Weisbach 摩擦系数; λ ——清水流中的 Darcy-Weisbach 摩擦系数。

因此, 他们提出在没有沉积物存在的管道(渠)中, 临界速度方程和摩擦系数计算时需要进行修正。对于圆形管径, 以 $0.5D$ 管径代替沉积床宽 b ; 对于矩形渠, 以 $1.35b$ (b 为沉积床宽或渠宽) 代替管径 D 。Chan 通过分析沉积物的粒径大小和管道粗糙度对摩擦力的影响, 在 Mayerle 的实验数据基础上, 提出采用 $1.53b$ 代替 D ^[26]。

Arora *et al* 将因次分析用于其之前得出的悬浮沉积物传输限制浓度, 得到限制沉积物沉积的临界浓度, 如式 (20) 所示^[27]。

$$C_v = f \left[\left(\frac{q S_c^{2.5}}{\nu \lambda_{sb}^2} \right) \left(\frac{wd}{\nu} \right)^{-0.6} \left(\frac{D_h}{y_0} \right)^2 \right] \quad (20)$$

式中:

$q(=Q/B)$ ——单位流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; Q ——总流量, m^3/s ; B ——水面宽度, m ; $S_c(=S_0/(s-1))$ ——坡度参数; S_0 ——管道底坡; ν ——水的粘滞系数; w ——沉积物的沉降速度, m/s ; $D_h(=A/B)$ ——水力深度, m ; A ——水流断面面积, m^2 。

Macke 则通过实验来考虑沉积物的传输(包括推移质和悬移质), 提出沉积物释放的表达式, 见式 (21)^[28]。

$$Q_s^* = Q_s(\rho_s - \rho) g w^{1.5} = 1.64 \times 10^{-4} \tau_0^3 \quad (21)$$

式中:

Q_s^* ——沉积物传输率; Q_s ——沉积物传输流量, m^3/s ; $\tau_0=(\rho g R S_0)$ ——平均剪切力; R ——水力半径。

2.3 经验模型

2.3.1 Velikanov 模型

Velikanov 模型是 Velikanov 1954 年提出的, 用于计算河流中的悬移质传输^[29]。后来被应用于模拟降雨时排水管道中的悬浮物传输^[30,31,32]。该模型以径流中沉积物体积浓度 C_v (g/L) 和最小浓度 C_{min} 、最大浓度 C_{max} 之间的大小关系来判断管道径流中颗粒物的沉积和冲刷。

$$C_{min} = \eta_{min} \rho_s \rho_m (\rho_s - \rho)^{-1} UJ/w \quad (15)$$

$$C_{max} = \eta_{max} \rho_s \rho_m (\rho_s - \rho)^{-1} UJ/w \quad (16)$$

η_{min} 和 η_{max} 是经过校准的效率系数; ρ_s ——沉积物的密度, kg/m^3 ; ρ_m ——混合液的浓度, kg/m^3 ; U ——平均流速, m/s ; J ——坡度; w ——沉积物启动速度, m/s 。

当 $C_v < C_{min}$ 时, 如果管道中有沉积物存在, 管道中的沉积物会被侵蚀, 水流中颗粒物浓度会随水流逐渐提高, 直到 $C_v = C_{min}$; 当 $C_v > C_{max}$ 时, 水流中颗粒物会沿水流方向逐渐沉积, 径流中颗粒物的浓度也会逐渐降低, 直到 $C_v = C_{max}$ 。当 $C_{min} \leq C_v \leq C_{max}$ 时, 管道中的沉积物不发生侵蚀, 径流中的颗粒物也不发生沉积^[33]。

Zug *et al* 认为实际沉积颗粒物的大小、种类和密度变化范围较大, 直接应用 Velikanov 模型存在一定的局限性^[32]。他将沉积物颗粒分为大粒径颗粒 ($d > 52\mu\text{m}$, $w_s = 5.4\text{m/h}$, $s = 2.00$) 和小粒径颗粒 ($d < 52\mu\text{m}$, $w_s = 45\text{m/h}$, $s = 2.65$), 同时, 为使 Velikanov 模型能够用于圆形管道中沉积物的沉积行为模拟, 对原始模型进行了几处修正, 应用于沉积物在圆形管道中的传输, 来判断实际管道发生沉积和冲刷的情况: 通过附加系数使原用于模拟河流和渠道中沉积物传输的模型可用于圆形管道; 考虑了由于沉积物沉积造成的过流断面面积减少的因素; 允许浓度对数形式的多样化垂直定义。

2.3.2 Site-Specific 模型

Brian *et al* 通过在 Murray-gate 合流制管道处, 实地测定其管道的水深、流量、流速、降雨前累积晴天数、从降雨开始计时的累积时间和水流的 TSS 等, 应

用回归方程拟合, 得出降雨时和晴天时, 水流水质的变化公式 (Site-Specific Model), 即出水水质 TSS 方程, 见式 (22) 和 (23)^[11]。

$$\text{旱季出水水质: TSS} = 955 \times Q^{0.8} \quad (22)$$

雨季出水水质:

$$\text{TSS} = 104.4 + 416.41 \times V - 0.79674 \times \text{TSSS} - 3.1238 \times \text{ADWP} \quad (23)$$

式中:

TSS——总悬浮固体, mg/L ; Q ——流量, m^3/s ; V ——流速, m/s ; TSSS——从降雨开始时计的累积降雨时间, hours; ADWP——降雨前累积晴天时间, hours。

2.3.3 Non-Site-Specific 模型

Goodison *et al* 基于不同管道的直径、对应汇水面积和坡度, 提出了 DAS 参数, 并据此对管道进行分类 (连接管 ($\text{DAS} < 6$), 干管 ($6 < \text{DAS} < 8000$), 截流管 ($\text{DAS} > 8000$))^[34]。

Coghlan 利用 DAS 参数、流量和流速来预测降雨和晴天时管道的出水水质, 称为 Non-site-Specific 模型, 如式 (24) 和 (25)^[12]。

$$\text{旱季出水水质: TSS} = 2.47 \times 10^4 Q^{0.55} \times \text{DAS}^{-0.45} \quad (24)$$

$$\text{雨季出水水质: TSS} = 42 + 272.3V \quad (25)$$

式中:

TSS——总悬浮固体, mg/L ; Q ——流量, m^3/s ; V ——流速, m/s ; DAS——管道参数。

Site-Specific 模型和 Non-Site-Specific 模型是结合实地监测数据拟合的经验模型。在推广应用时, 需要考虑其得出条件与推广应用的地区间的差异, 差异越小, 结果越相近; 差异越大, 结果差异越大, 甚至造成错误, 这些都在一定程度上影响了该模型的推广应用。

3 结论

实验室模型或数学模型在管道沉积物沉积和冲刷模拟过程中, 很少将相关模型与实际沉积物的结构特征紧密的结合起来, 模拟结果可能会与真实情况存在较大偏差。经验模型则是对特定地点研究提出的经验公式, 由于其管道监测比较麻烦和推广时需考虑不同管道沉积物间的差异等因素, 也限制了其实际推广应用。因此, 在模型应用时, 应结合不同模型的特点, 同时兼顾现场监测结果并考虑沉积物的结构特征和性质, 从而更加准确地反映城市排水管道沉积物的冲刷释放规律, 为控制管道沉积物对城市水环境的污染提供一定的依据。

References (参考文献)

- [1] Liu Cheng, He yun, Wei Heping, Superficial Analysis on Sediment Transport in City Sewer [J], *WATER & WASTEWATER ENGINEERING*, 1999, 25 (12), P7-13(Ch).
刘成, 何耘, 韦鹤平, 城市排水管道泥沙问题浅析 [J], *给水排水*, 1999, 25 (12), P7-13
- [2] Li Maoyin, Li Haiyan, Research into Sewer Sediments and Associated Pollutants and Processes [J], *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(S1), 88-92(Ch).
李茂英, 李海燕, 城市排水管道中沉积物及其污染研究进展 [J], *给水排水*, 2008, 34(S1), P 88-92.
- [3] GAO Yuan, WANG Hongwu, ZHANG Shanfa, MA Luming, Current Research Progress in Combined Sewer Sediments and Their Models[J], *China Water & Wastewater*, 2010, 26(2), P15-18(Ch).
高原, 王红武, 张善发等, 排水管道沉积物及其沉积冲刷模型研究进展 [J], *中国给水排水*, 2010, 26(2), P15-18
- [4] YIN Chengqing. Urban Diffuse Pollution Control Principles& Technologies [M]. Beijing: China Architecture& Building Press, 2009(Ch).
尹澄清 等. 城市面源污染控制原理与技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [5] A. Miglio, R.Gaudio, F.Calomino, Mobile-bed aggradation and degradation in a narrow flume: Laboratory experiments and numerical simulations [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 3 (2009), P9-19
- [6] Tucciarelli,T.,Termini,D., Finite element modeling of flood plain flow [J]. *J.Hydr.Eng.* (ASCE), 2000, 126(6), P416-424.
- [7] Noto, V.,Tucciarelli,T., DORA a lgorithm for network flow models with improved stability and convergence properties [J]. *J.Hydr.Eng*(ASCE), 2001,127(5), 380-391.
- [8] Peter J. Skip,Simon J, Tai, Adrian J. Saul., Laboratory investigations into cohesive sediment transport in pipes [J], *Wat.Sci.Tech.* 1996, 33(9), P187-193.
- [9] Alberto Campisano, Enrico Creaco, Carlo Modica, Experimental and numerical analysis of the scouring effects of flushing waves on sediment deposits [J], *Journal of Hydrology*, 2004, 299, P324-334.
- [10] Nalluri,C., Ab-Ghani,A. El-Zaemey,A.K.S., Sediment transport over deposited beds in sewers [J], *Wat.Sci.Tech.*, 1994, 29(1-2), P124-133.
- [11] Brian P. Coghlan, Richard M.A. Ashley ,George M.Smith. Empirical equations for solids transport in combined sewers [J]. *Wat.Sci.Tech.*, 1996, 3(9), P84.
- [12] Coghlan,B.P. The deposition and re-entrainment of sewer sediments in combined sewerage systems. [Ph.D]. Dundee, UK: University of Abertay Dundee, 1996
- [13] Chen, Y.H., Simons, D.B., Mathematical Modelling of Alluvial Channels, Symposium on Modelling Techniques "Modelling 75" [J], 1975,vol.1.ASCE, San Francisco, pp.466-483.
- [14] Cunge, J.A., Holly, F., Verwey, A., Practice Aspects of Computational River Hydraulics [M]. London: Pitman Publication Ltd, UK.1980
- [15] Yucel, O., Graf, W.H., 1971. Bed load deposit in reservoirs [A]. In: Proceedings of the 15th Congress [C]. Istanbul, Turkey: IAHR, 1971. vol.1, No.A 35 pp. 271-278.
- [16] Krishnappan,B.G., Program Manual for MOBED- An Unsteady, Nonuniform, Mobile Boundary Flow Model [M]. Canada: National Water Research Institute, Burlington, 1981
- [17] Holly,F.M.,Rauhel,J.L., New numerical/physical framework for mobile-bed modeling [J], *Part I.J.Hydr.Res.* 1990a, 28(4).
- [18] Holly,F.M.,Rauhel,J.L., New numerical/physical frame work for mobile-bed modeling [J], *Part II.J.Hydr.Res.*, 1990b, 28(5) .
- [19] Correia,L.R.P.,Krishnappan,B.G.,Graf,W.H.,1992. Fully coupled unsteady mobile boundary flow model [J]. *Hydr.Eng.(ASCE)*, 118 (No.3) 1992,P476-494.
- [20] Arico,C.,Tucciarelli,T., A., partially coupled flow and transport model for sewer network [A]. In: Proceedings of the International Conference Sewer Operation and Maintenance [C]. Bradford, UK, 2002
- [21] Ackers,P., Sediment transport in sewers and the design implications [A].In: Proceedings of the International Conference on Planning, Construction, Maintenance and Operation of Sewer age Systems [C]. England :BHRA (Cranfield), 1984, P215-230.
- [22] Arico,C.,Tucciarelli,T., DORA model for flow and sediment transport simulation in sewer networks.Comparison with analytical solutions and experimental data [A].In: Proceedings of TCN-CAE2003 International Conference on CAE and Computational Technologies for Industry [C]. Italy: 2003
- [23] Miglio,A. Fenomeni di deposito ed erosione in alveia fondo mobile.Indagini sperimentali in laboratorio e simulazioni in umiche [Ph.D]. Calabria: University of Calabria, Italy ,2004
- [24] Rubey,W., Settling velocities of gravel, sand and silt particles [J]. *Am.J.Sci.*1933, 225, P(148).
- [25] Meyer-Peter, E, Muller,R. Formulas for bed-load transport [A]. Report on the Second IAHR Meeting [C].Stockholm, Sweden: 1948, P39-64
- [26] Chan,H.H.L. An appraisal study of sediment transport over fixed bed deposits in sewers [Ph.D]. Newcastle : University of Newcastle upon Tyne, UK, 1994
- [27] Arora,A.K.,Ranga Raju,K.G ,Grade,R.J. Criterion for deposition of sediment transported in rigid boundary channels [A]. Proc.First Int.Conf.on Channels and Channel Control Structure [C], Southampton, England, 1984, 345-350
- [28] Macke,E. About sedimentation at low concentration in partly filled pipes [Ph.D]. Braunschweig: Technical University of Braunschweig, Germany, 1982.
- [29] Velikanov,M.A., Principle of the gravitational theory of the movement of sediments [J]. *USSR Academy of Sciences Bulletin, Geophysical Series*, 1954,4, P349-359.
- [30] Combes,V. Etude de modeles mathematiques de transport de mate 'riaux solides en re seau d'assainissement [J], *Memoire de DEA,INP,Toulouse*, 1982, P153.
- [31] Bujon,G., Prevision des debits et des flux pollutant stransites dans les re seaux d'egouts par temps de pluie-Le modele Flupol [J], *La Houille Blanche*, 1988, 1, P11-23.
- [32] M.Zug,D. Bellefleur,L.Phan, O.Scrivener. Sediment transport model in sewer networks-a new utilization of the Velikanov model [J], *Wat.Sci.Tech.*, 1998, 37(1), P187-196.
- [33] J.-L. Bertrend-Krajewski, J.-P.Bardin, C.Gilbello., Long term monitoring of sewer sediment accumulation and flushing experiments in a man-entry sewer [J], *Water Science& Technology*, 2006, 54, P109-117.
- [34] Goodison,M.J, Ashley,R.M., Sediment movement in combined sewers in Dundee [J]. *Wat.Sci.Tech.*, 1990, 22(10/11), P283-286.