

都市流出シミュレーションモデルとその調査流域への適用

Urban Runoff Simulation Model and its Application to the Research Basin

愛媛大学工学部 正員 豊 国 永 次
愛媛大学工学部 正員 渡 辺 政 広

1. はじめに

都市域の雨水排水システムは、一般に家屋、道路、公園など各種の流出面と、それらからの雨水を流下させる道路側溝、下水管渠などから構成されている。近年、都市化の進展と既成市街地の改変に伴って、豪雨時の流出はますます急激化する傾向にある。このため、排水管渠システムで満管流、マンホールからの吹き上げ、地表面たん水など、いわゆるサーチャージを伴った流出現象がしばしば現われ、これらのプロセスを組み入れたモデルの研究が重要となってきた。

これまで都市域の流域モデリングと雨水流出シミュレーションについて検討^{1)~3)}を進めているが、本報告では、はじめに対象とした調査流域の概要と都市流出シミュレーションモデルについて概説する。次に本シミュレーションモデルを調査流域に適用して、その流出の諸特性を実測結果と対比検討するとともに、本方法の適合性についても検討を加えた。

2. 調査流域

調査対象流域として、松山市街地の1幹線排水区域を選んだ。本流域は図1に示すように、流域面積 0.234 km^2 、幹線管渠 ($\phi = 500 \sim 1000 \text{ mm}$) 延長 1.250 m 、流域平均幅 18.7 m の細長い流域である。流出面構成は不透透域が 84.4% 、浸透域が 15.6% を占める。排水管渠システムは幹線、支線 ($\phi = 350 \sim 700$)、小支線 ($\phi = 250 \sim 300$) の各管渠からなり、こう配は $1/300 \sim 1/125$ と全体に急である。また排水系統は tree タイプ、排除方式は合流式である。

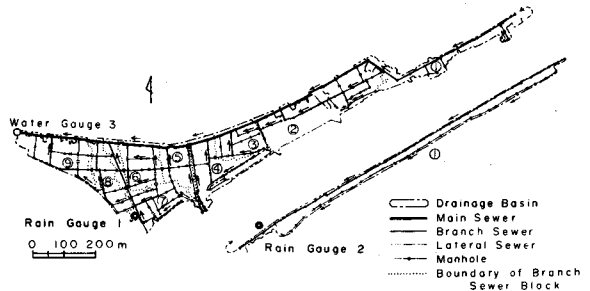


図1 調査対象流域とその管渠システム

本流域の水文観測・調査は昭和49年より推進されてきている。雨量は流域の上・下流部 (Rain Gage 2, 1)、流量は流域下流端 (Water Gage 3) で観測されている。流出面構成および排水系統の調査は昭和49, 53, 57年に行った。

3. 都市流出シミュレーションモデル³⁾

検討を進めている都市流出シミュレーションモデルは図2に示すように、流域モデリング、雨水損失モデル、表面流モデルおよび管渠流出モデルの4つのサブ・モデルからなる。これらモデルの概要と調査流域において算定された各パラメータあるいは特性値について述べる。

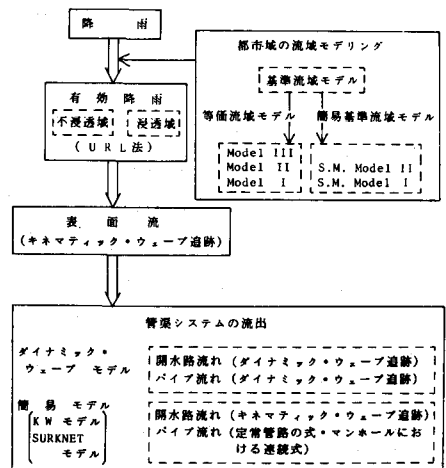


図2 都市流出シミュレーションモデル

3. 1 流域モデリング¹⁾

実流域の各種流出面ならびに管渠の諸元を現地調査した結果を基に、まず表1のように規格化した各流出面と実状に近い管渠システム（幹線、支線、小支線の各管渠）からなる基準流域モデル（Modular Model）を構成する。本モデルは実用上、実流域に最も近い流出システムをもつ。調査流域の基準流域モデルは図3に示すように、117個の単位流出区画からなる。次に基準流域モデルをランピングの方式を異にする2つのモデリング法によってそれぞれ簡化する。

まず等価流域モデリング法によれば、基準流域モデルの各流出面ならびに小支線、支線の各管渠を順次、等価斜面へと統合してランピングを進め、各種等価流域モデル（Model III, II, I）を構成できる。等価流域 Model II は等価斜面と支線、幹線管渠からなる実用的な流域モデルで、調

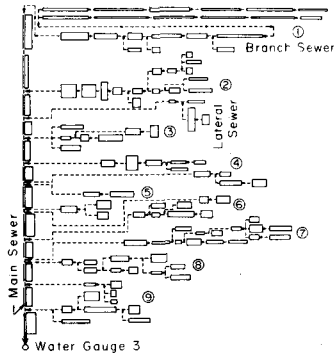


図3 調査流域の基準流域モデル

査流域のそれを図4に示す。なお各等価斜面の流出パラメータ（等価粗度）は、流出面ならびに管渠の構成諸量を基に各流出面ごとに算定される（図4）。

次にランピングの方式を変え、基準流域モデルの流出面ならびに管渠の構成を順次、支線、幹線区域内で平均化して取扱うと、各種簡易基準流域モデル（Simplified Modular Model II, I）が構成できる。

3. 2 雨水損失モデルと表面流モデル

都市域の雨水損失は、微視的にはかなり複雑なものとなる。ここでは実用上の巨視的立場から、表2に示すように、和風屋根を除く不浸透流出面では凹地貯留 D_{Ib} 、浸透流出面では浸透損失 f と凹地貯留 D_p からなるものとして取り扱う。ここに凹地が満たされてゆく過程には Linsley らの近似式を、浸透損失には補給能モデル⁴⁾を用いる。なお等価流域モデルの各等価斜面における雨水損失は、上述の各流出面における雨水損失を基に、等価斜面内での各流出面の占有面積率をウェイトとして加重平均により算定する。

本モデルを調査流域に適用し、昭和55、56年の降雨流出資料より雨水損失の各パラメータを算定した結果、 $(D_{Ib})_{max} = 5 \text{ mm}$ 、 $(D_p)_{max} = 6 \text{ mm}$ 、 $f_u = 20 \text{ mm/hr}$ 、 $f_c = 5 \text{ mm/hr}$ 、 $b = 1.5/\text{hr}$ の諸値を得た。また昭和57、58年の出水について、これら各特性値による雨水損失の算定結果を実測結果と対比して検討し、各特性値ならびに本法の有用性が確かめられた。

次に、上述した各種流域モデルにおける各流出面あるいは等価斜面のこう配は一般に十分急であり、これら斜面上の雨水流は kinematic wave 流れとして取り扱う。

表1 代表流出面とその諸元

STRIP	DESCRIPTION	LENGTH (m)	SLOPE	ROUGHNESS (m ^{1/3} ·sec)
I	Composition roofing (1) Jap. style Impervious	3.88	0.36	0.01
II	Composition roofing (2) Building Impervious	6.00	0.011	0.01
III	Street and Pavement Impervious	3.51	0.031	0.02
IV	Grassed, bare land (1) back garden Pervious	2.00	0.001	0.25
V	Grassed, bare land (2) Park, ground of school Pervious	18.00	0.001	0.25

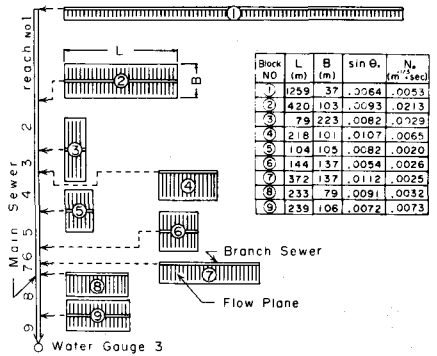


図4 調査流域の等価流域 Model II

表2 代表流出面の雨水損失特性

STRIP	DESCRIPTION	PERMEABILITY	RAINFALL LOSS		SUBAREA	
I	Composition roofing (1)	Impervious	Depression less	Depression D_I	A_{Ia}	A_I
II	Composition roofing (2)	Impervious	Depression		A_{Ib}	
III	Street Pavement	Impervious	D_{Ib}			
IV	Grassed, bare land (1)	Pervious	Depression	D_p		A_p
V	Grassed, bare land (2)	Pervious	Infiltration	f		

3.3 管渠流出モデル²⁾

管渠システムの流出は通常、開水路流れであるが、強雨時には満管流やマンホールからの吹き上げなど、いわゆるサージ現象を伴う流出がしばしば現われる。このため開水路流れに加え、パイプ流れ、さらに地表面たん水をもシミュレートし得る管渠流出モデルが必要となってくる。

(1) Dynamic Wave (DW) モデル

i) 基礎式；管渠システムの流出を詳細にシミュレートするため、開水路流れとパイプ流れを共に dynamic wave として取り扱い、それぞれ開水路非定常流および管水路非定常流の基礎式を適用する。

$$\text{開水路流れ: } \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = 0 \dots (1) \quad \frac{\partial y}{\partial t} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{A}{B} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \dots (2)$$

$$\text{パイプ流れ: } \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = 0 \dots (3) \quad \frac{\partial y}{\partial t} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \dots (4)$$

ここに、 V ：断面平均流速、 A ：流水断面積、 B ：水面幅、 R ：径深、 y ：開水路流れでは水深、パイプ流れでは管底から測ったピエゾメータ水頭、 a ：パイプ流れの圧力波の速度、 n ：マンニングの粗度係数、 S_0 ：こう配、 g ：重力加速度、 x ：距離、 t ：時間。

マンホールでは、貯留効果を考慮した連続式を用い、分合流に伴うエネルギー損失は摩擦損失の中に含めて取り扱うものとする。

ii) 基礎式の統一的处理⁵⁾；パイプ流れに対し、管路頂部に図5に示すような仮想のスロットを想定する。この仮想スロットが(5)式の関係を満たす幅 B をもち、管路の断面積、径深にはなんら変化を及ぼさないものとする、パイプ流れの基礎式(3)、(4)式は開水路流れの基礎式(1)、(2)式と同一の表示となる。これより管渠システムの流出を一貫して開水路流れとして取り扱うことができる。

$$a = c = \sqrt{g A / B} \dots (5)$$

ここに、 c ：開水路流れの伝播速度、 A および B ：開水路流れでは流水断面積、水面幅、パイプ流れでは管路断面積、仮想スロット幅。

なお実流域の管渠システムにおけるパイプ流れの圧力波の速度(a 値)については、これまでの検討により、数10m/sec程度の値を用いてよい結果を得ている。また基礎式(1)、(2)式の数値計算には、計算の安定条件が明確な特性曲線法を用いる。

(2) 簡易モデル (SURKNETモデル⁶⁾)

管渠システムの流出を実用的にシミュレートするため、開水路流れとパイプ流れに分けて取り扱う。開水路流れに対して kinematic wave 近似を適用し、サージ流れに対して定常管路の式とマンホールでの連続式を組合せて用いる。

i) 開水路流れの基礎式；管渠とマンホールの部分に分け、管渠ではさらにいくつかの区間(reach)に分割して取り扱う(図6)。まず管渠の各分割区間において、連続式ならびにマンニング型の等流を区間にわたって積分して得られる貯留に関する式は、それぞれ次のように表わされる。

$$dS/dt = I - Q \dots (6)$$

$$S = 1.81 n^{3/5} S_0^{-3/10} (\Delta L) (\phi D)^{2/5} (I^{3/5} + 5Q^{3/5}) \dots (7)$$

ここに、 S ：分割区間の貯留量、 I ：流入量、 Q ：流出量、

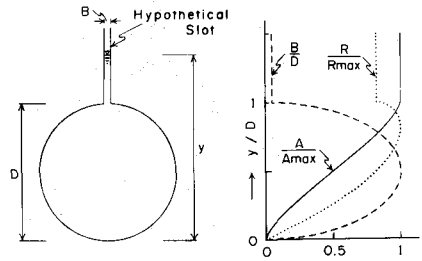


図5 仮想のスロット

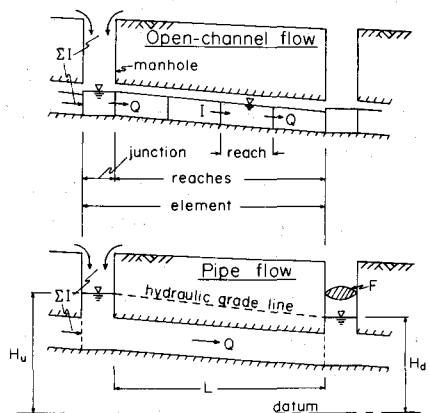


図6 開水路流れとパイプ流れ

ϕ : 流水断面の中心角, ΔL : 分割区間の長さ, D , S_o , n : 管渠の直径, こう配, 粗度係数, t : 時間, 単位は $m-sec$ 。

次にマンホールにおいては, 貯留効果を考慮した連続式, ならびにマニング型の等流を仮定したマンホールよりの流出量 Q の式を適用する。

ii) サーチージ流れの基礎式; 管渠とその上流マンホールからなるエレメント (element) を一体として取り扱う (図6)。まず上・下流のマンホール水位差 ($H_u - H_d$) がエネルギー水頭差を表わすと仮定し, パイプ流量 Q を定常管路の式を用いて表わす。次にエレメントの連続式は, 上流マンホールにおける貯留効果を考慮した連続式により表わされる。なお計算に際し, 下流マンホールの水位 H_d は1つ前の時間ステップの値で近似しうるものとする。

iii) 遷移流 (開水路流れとパイプ流れ) の取扱い; まず開水路流れからパイプ流れへの遷移が下流へ伝播する過程を, 図7のように取り扱う。すなわちマンホールあるいは分割区間下流端の水深 h が $h > 0.91D$ となると, サーチージ流れが現われ, それらの流出量を Q_F (等流満管流量) に設定する。次にパイプ流れから開水路流れへの遷移は, 上流マンホール水位が管渠入口の標高を下回るとき, あるいは下流マンホール水位が管渠出口の標高を下回るとき, エレメント全体にわたり, 1つの時間ステップの間に起こるものとする。

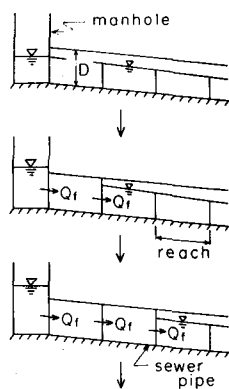


図7 サーチージ
の下流への伝播

(3) 地表面たん水の取扱い

マンホールより地表面上へ溢水した流出水の挙動は, 地面こう配に従って流下したり, 低地にたん水するなど, 微視的には複雑なものとなる。ここでは実用上の立場から, 流出水が図8に示すようにマンホール地点を含む特定面積 A_G のたん水域に水平貯留されるものとして取り扱う。

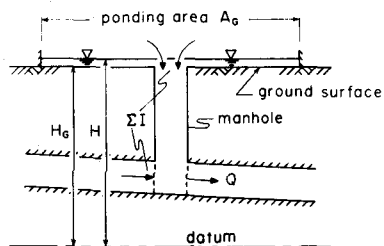


図8 地表面たん水

4. 適用結果とその検討

上述した都市流出シミュレーションモデルを調査流域に適用し, 流出シミュレーション結果を実測結果と対比して検討した。

4.1 サーチージの発生しない中小出水に対する検討

管渠システムを開水路流れで流出する中小出水を対象に流出シミュレーションを行った。これらの結果の1例 (等価流域 Model II を用いた場合) を実測結果と対比して図9に示す。これらからも明かなように, 本法によるシミュレーション結果は出水の全般にわたって, 実用上十分な精度で実測結果を再現していることが分る。なお管渠流出に対する DW モデルと SURKNET モデルによる流出シミュレーション結果は, 出水の全体を通じて殆んど一致している。これは対象流域の管渠こう配が前述のように全体に急で, 管渠システムの流出がもともと kinematic wave 流れに近い流れであったことによるものと考えられる。

4.2 サーチージを伴う出水に対する検討

松山市街地域で近年における既往最大規模の浸水

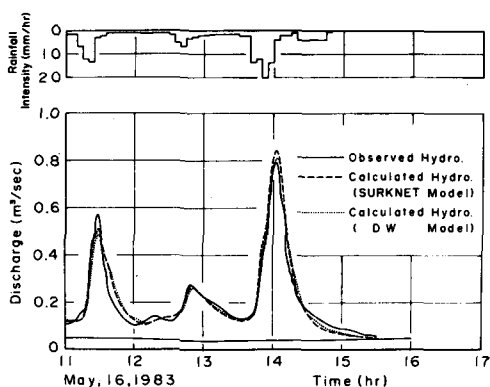


図9 流出シミュレーション結果 (中小出水)

をもたらした昭和 54 年 6 月梅雨前線豪雨時のサーチャージを伴う出水を対象に流出シミュレーションを行った。図 10 に降雨記録と流域下流端で観測された水位・流量ハイドログラフを、図 10～13 に流出シミュレーション結果（等価流域 Model II を用いた場合）を示す。これらより本シミュレーション法による流出の諸特性、ならびに本法の適合性について、次の諸点が指摘される。

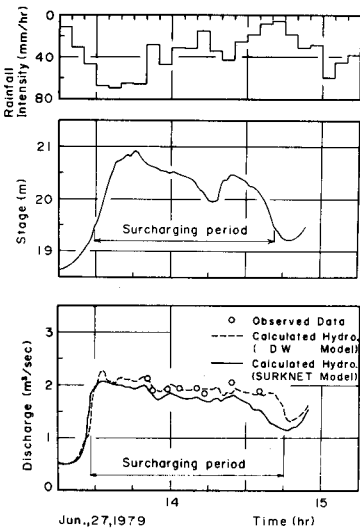


図 10 昭和 54 年梅雨前線豪雨の降雨流出記録と流出シミュレーション結果（DWモデルおよびSURKNETモデル）

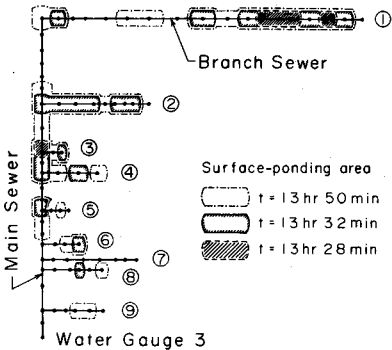


図 12 地表面たん水域の時間的・場所的变化（DWモデル）

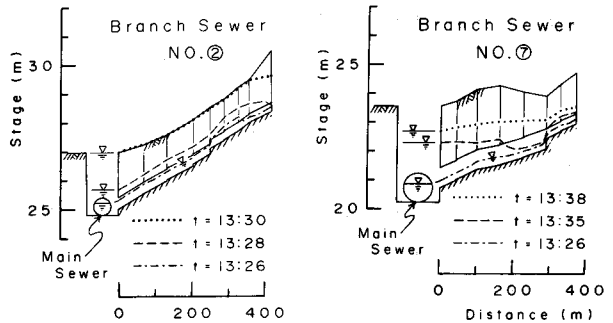
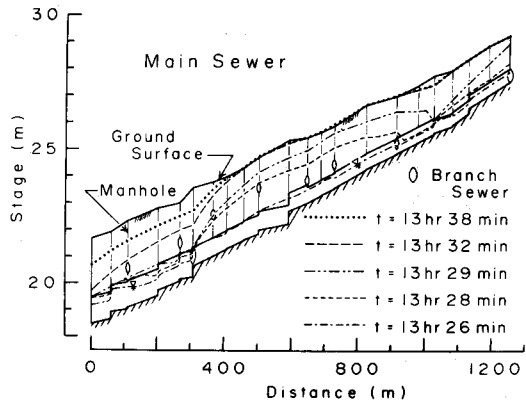


図 11 幹線管渠および支線管渠における水面変動（DWモデル，サーチャージ期間）

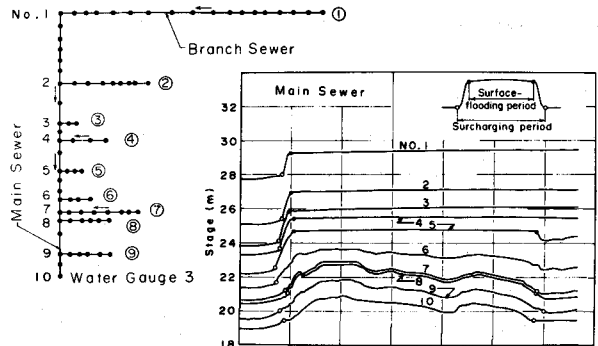
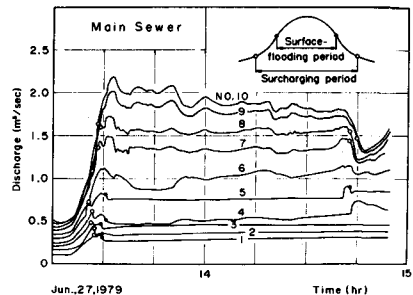


図 13 幹線各マンホール地点における水位・流量ハイドログラフ（DWモデル）



i) サーチャージ流れの発生、拡大の過程について(図11); 管渠システム全体についてみると、まず通水能の小さい幹線および支線の各管渠でパイプ流れが現われ、次いでこれらが急速に上流へと伝播する。支線についてみると、通水能が全体に大きく、かつ幹線よりの背水の及ぶ支線では特有の現象が現われ(たとえばNo.7支線)、まず幹線よりの背水により、下流端でパイプ流への遷移が現われ、これが幹線水位の上昇につれ、上流へと伝播する。ii) 地表面たん水の発生状況について(図12); 全体にわたって通水能の小さい支線(No.1, 2, 9支線)、およびマンホール水位の上昇が大きい幹線の上・中流部で、たん水が早くかつ広い範囲にわたり現われる特性がみられる。iii) 幹線各マンホール地点の水位・流量ハイドログラフについて(図13); 地表面たん水を伴う地点(No.1~5)におけるこの期間の流量ハイドログラフをみると、それらの変動は小さく緩やかなものとなっており、地表面たん水を伴う貯留と流出抑制の効果はかなり大きいものとなる。IV) 流域下流端の流量ハイドログラフについて(図10); まず管渠流出モデルに詳細なモデルのDWモデルを用いてシミュレートされた流量ハイドログラフを実測結果(サーチャージ期間)と対比すると、実測流量ならびに貯留効果の大きい抑制された流出特性をよく再現している。次に実用性を主体とするSURKNETモデルについてみると、流量ハイドログラフが若干小さく現われる傾向があるが、実測ならびにDWモデルによる結果にみられる流量変動の特性をよく再現している。

5. おわりに

本報告では、図2に示す都市流出シミュレーションモデルを調査流域に適用し、得られた流出の諸特性を実測結果と対比検討すると共に、本方法の適合性についても検討を加えた。その結果、管渠システムでサーチャージを伴う出水、その発生しない中小出水のいずれについても、本流出シミュレーションの有用性を示すことができた。今後、サーチャージを伴う出水の資料を数多く収集し、本法の適用性について一層詳細な検討を進めると共に、管渠流出モデルの簡易化についてもさらに検討を進めてゆきたい。本研究は文部省科学研究費による成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) Toyokuni, E. and Watanabe, M. : Adaptabilities of Urban Catchment Models to Stormwater Runoff Simulation, Proceedings of the 19th Congress of IAHR, Cagliari, Italy, pp.263-270, 1979.
- 2) 豊国永次・渡辺政広: 都市雨水排水システムにおける流出モデリング, 愛媛大学工学部紀要 10 巻 2 号, pp.161-174, 1983.
- 3) Toyokuni, E. and Watanabe, M. : Application of Stormwater Runoff Simulation Model to Matsuyama City Drainage Basin, Proceedings of the Third International Conference on Urban Storm Drainage, Göteborg, Sweden, pp.555-564, 1984.
- 4) 角屋 睦・豊国永次・丈達俊夫: 山地小流域河川の低水解析(2), 京都大学防災研究所年報 10 号 B, pp.147-154, 1967.
- 5) Chaudhry, M. H. : Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold, pp.426-431, 1979.
- 6) Yen, B.C. and Pansic, N. : Surge of Sewer Systems, WRC Report No.149, University of Illinois, USA, 1980.