

## (40) 雨水管網における幹線・枝線管路同時解析法に関する研究

### The Simulation Procedure for Sub-Pipes in Urban Storm Drainage Networks

鈴木憲明\*, 高桑哲男\*\*, 船水尚行\*\*

Noriaki SUZUKI\*, Tetsuo TAKAKUWA\*\*, Naoyuki FUNAMIZU\*\*

**ABSTRACT;** Although the numerical analysis is one of the most effective tools to evaluate the existing urban drainage networks, the scale of calculation might be a trouble for analysis of large-scale networks. Therefore main pipe analysis by modeling outflow from sub pipe is generally applied. But sub pipe analysis is necessary to evaluate urban drainage networks because the water level of main pipes doesn't represent that of sub pipe areas in some cases. In this report a new method for simulation of large-scale networks including sub pipe analysis are proposed. The procedure consists of two stages. The first is the process of main pipe analysis with modeling sub pipe areas as simple tanks. The second is the process of sub pipe analysis with the main water levels as boundary conditions.

**KEYWORDS;** Sub Pipe Modeling; Unsteady Analysis; Urban Storm Drainage.

#### 1. はじめに

コンピュータによる非定常解析は雨水管網を評価する上で非常に有力な手段であり、小径管路を含めた水理学的解析結果と実測値との一致がある程度確認されている<sup>1)</sup>が、大規模な管網の解析においてはその計算規模が障害となることが多く、一般に多大な労力を要する上に所要計算時間が非常に長くなり、場合によっては解析そのものが不可能となる。計算規模を縮小するには管路数を減じていわゆる幹線管路解析を行うのが最も簡便な方法である。しかしこの場合、簡略化された枝線管路水位に対する幹線管路水位の代表性が問題となる。既存雨水管網はその大部分が合理式法によって設計されており、また小径管路については最小口径が決まっていること等から、殆どの管路が満管状態に近くなる大降雨ピーク時においては幹線管路よりもむしろ枝線管路に能力的な余裕がある。この為多くの場合、枝線管路水位は幹線管路水位の影響を大きく受け、これに平行移動的に推移する。しかし場合によっては枝線管路水位が幹線管路水位を大きく上回る場合もあり、幹線水位が枝線エリア水位を代表するとはいえない。原因としては枝線管路内で摩擦損失による水位上昇が起ることや、幹線管路と枝線管路の垂直位置のずれ、土被りの違い等が挙げられる。従って雨水管網を評価する上で幹線管路解析結果のみを用いることは危険であり、枝線管路解析が必要となる。また、その他にも以下のような場合に枝線管路解析が必要であると考えられる。

- ・ 枝線エリア内における構造的欠陥、或いは弱点を発見し、補強の方法や規模の検討・評価を行う場合
- ・ 幹線管路の能力増強を行う際に改修後の能力増強効果の枝線エリアへの波及について確認する場合
- ・ 排水区規模が非常に大きい場合等、排水区中において幹線管路が付近に存在しない区域が多い場合

\*北海道大学大学院工学研究科博士課程 (Doctor Course Student at Graduate School of Engineering, Hokkaido University),

\*\*北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

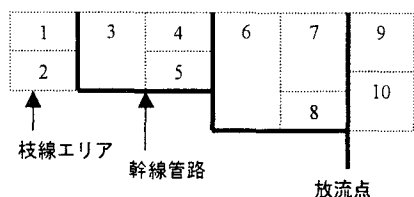


図 1 幹線と枝線エリアの模式図

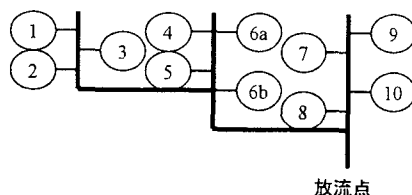


図 2 タンクによる枝線エリアの置換え

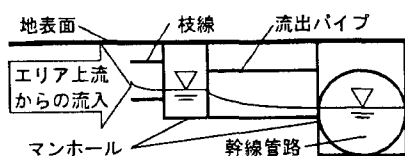


図 3 枝線流出と水位関係との模式図

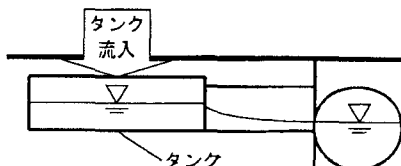


図 4 タンク表現を行う場合

枝線管路解析は全管路を対象とした解析を(1)枝線管路流出のモデル化を用いた幹線管路解析、(2)(1)を境界条件として用いた枝線管路解析、の2段階に分割することによって実現することができると考えられる。本研究では文献<sup>2)~4)</sup>の非定常解析プログラムを用い、(1)、(2)の手順を踏むことで枝線管路解析を行い、全管路を対象とした大規模な解析を行った場合とほぼ相違ない結果が管網の細部に至るまで得られることを示す。また、(1)の幹線管路解析の際に必要な枝線流出モデルとしてのタンクモデルを提案し、現在広く用いられている修正 RRL 法<sup>5)</sup>との比較についても示す。

## 2. 幹線・枝線管路同時解析手順

### 2.1 タンクによる枝線エリアの置換え

雨水管網は降雨を幹線管路に輸送する枝線エリアと枝線エリアから輸送された降雨を放流点まで輸送する幹線管路とに分割され、1本又は複数本の幹線系統に数個~数十個の枝線エリアが接続する形になっている(図1)。枝線エリアと幹線管路とは枝線エリア内最下流部の1本又は数本のパイプ(以下、流出パイプ)で接続されており、基本的に枝線エリア1つをタンク1つで置換え、タンクからの流出量を枝線エリアからの流出量とする(図2)。ただし、1つの枝線エリアが複数本のパイプで幹線管路に接続している場合が多く、この場合は流出パイプの本数と同じ数のタンクで置換える(図2 6a, 6b)。枝線エリアへの降雨はタンク流入量で表現し、枝線管内貯留や枝線流下による流出波形の変化は流出パイプとタンクのパラメータによって表現する。また、枝線エリア流出量と流出パイプの上下流マンホールの水位は互いに影響しあうことから、枝線流出を幹線管路解析の境界条件とせず両者を連動させる形でのモデル化を行うことが望ましいので、タンクを巨大な末端マンホールとして扱い、枝線エリア流出を幹線管路解析に組込むことで両者の相互影響を表現した(図3、図4)。即ち、タンク及び流出パイプは通常のマンホール及びパイプと同様の形で解析に組込まれる。これによって幹線管路解析の際の管路数は増加し、計算規模が多少増加するが、幹線管路水位の時間変動の影響を枝線エリア流出に反映させることができる。

### 2.2 タンクと流出パイプのパラメータの決定と幹線管路解析

枝線エリアからの流出量は即ち流出パイプからの流出量であり、これは図3のように流出パイプ直上流マンホール水位と直下流マンホール(幹線管路との接続マンホール)水位とのバランス関係から決定される。

今回は流出パイプのもつパラメータ（断面形状，管路直径，管路延長，管路勾配，管路高さ等）はそのままの値を用い，タンクのもつパラメータ（底面積，底面高さ，天井高さ）を用いて貯留容量を表現した．枝線エリアをタンクで表現すると図4のような形となり，今回は前述のようにこれを巨大な末端マンホールとして扱った．その際，図3の流出パイプ直上流マンホール水位と図4のタンク水位とを対応させるためにタンクの底面積と高さを以下のように設定した．

タンク表現には次のマンホールの連続方程式<sup>9)</sup>を使用する．

$$A_M \frac{dy_M}{dt} = \sum Q_u - Q_d + P_M \tag{1}$$

ここで， $y_M$ ：マンホール水位(m)， $A_M$ ：マンホール底面積(m<sup>2</sup>)，u,d：上下流を表現する添字， $P_M$ ：マンホールへの直接流入量(m<sup>3</sup>/s)である．

タンク表現においては， $\sum Q_u + P_M$ がタンク流入量に， $Q_d$ が枝線エリア流出量に， $y_M$ がタンク水位に， $A_M$ がタンク底面積に各々相当する．また，[タンク容量]=[貯留容量]とすればタンク容量  $V_T$ は枝線エリア内管路容積  $V_P$ とマンホール容積  $V_M$ を用いて， $V_T = \sum V_P + \sum V_M$ と表される．ここで， $V_T$ は[マンホール底面積]×[有効高さ]（マンホール底から地表面まで）である．しかし，[タンク底面積]=[タンク容量]/[タンク高さ]となるため，タンク容量を決定しただけではタンク底面積は決定されず，タンク高さが必要となる．[管内貯留]+[マンホール貯留]を底面積一定のタンク1個を用いた[タンク貯留]に置換えることは形状の相違から厳密には不可能だと考えられるが，今回は図3の流出パイプ直上流マンホール水位が直上流枝線管頂を下回る状態においては枝線エリア内貯留容量がゼロではないことを考慮し，図4のように[タンク高さ]=[流出パイプ底から直上流枝線管頂までの高さ]としてタンク底面積を求めた．これは，タンク高さを過小に設定すると比較的低水位時に貯留容量を全て消費するが，逆にタンク高さを過大に設定すると実際には枝線が全て管水路となって貯留容量が残っていないような高水位時の解析において過大な貯留容量を算出し，結果として過小な幹線水位を算出する危険性があることを考慮した上での安全側の設定である．なお，既存管網においては管頂接合が多いため，[タンク高さ]=[流出パイプ高さ]となることが多い．図5にタンクを用いた枝線エリア流出モデルによる幹線管路解析のフローと修正 RRL 法<sup>5)</sup>による解析フローとの違いを示す．

### 2.3 幹線管路水位変動を境界条件とした枝線管路解析

雨水管網解析における入力データは(1)管路個々の諸元，接続，地表面の状態等雨水管網自体のデータ，(2)降雨の経時データ，(3)放流水面の経時データ，である．(3)の境界条件は幹線管路解析においては放流水面となる河川，終末処理場，ポンプ場等であり，実績或いは予測データが必要となる．一方，枝線管路解析における放流水面とは幹線管路水位をさす．枝線管路水位は幹線管路水位の影響をけるためにこの境界条件を無視することはできず，個々の枝線エリアに対して流出パイプの本数分の境界条件が必要となる（図6）．この境界条件は前述の幹線管路解析によって得られ，これを含めることで枝線管路解析が可能となる．

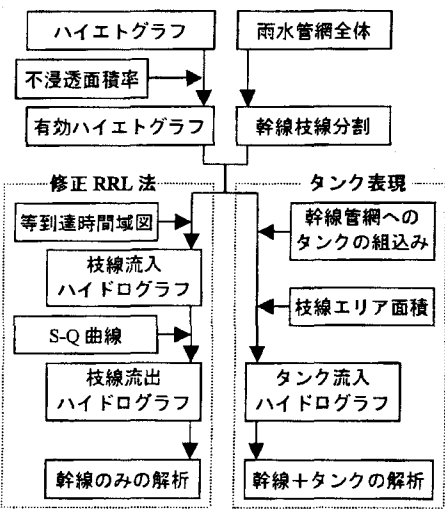


図5 修正 RRL 法とタンク表現の解析手順の違い

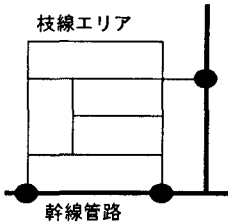


図6 枝線エリアと幹線管路との接続状況の模式図  
(黒丸：境界条件が必要な箇所)

### 3. 実在管網への適用例と計算法の妥当性の検討

以上の計算法を用いた実在管網への適用例を示す。対象としたのは北海道 A 市 B 排水区であり、解析フローは図 7 のとおりである。なお、雨水管網全体のデータ作成の際には雨水管マッピングデータシステムを使用した。

また、計算法の妥当性について、幹線管路と枝線管路を全て対象とした解析（以下、全体モデル）との比較、さらに修正 RRL 法を用いた流出モデルとの比較を行うことで検討する。今回はタンク流出モデル、修正 RRL 法を用いた流出モデルの枝線エリア流出量表現を、全体モデルの解析結果に対する追従の程度で比較する。また、幹線管路水位とそれを境界条件とした枝線管路解析の水位変動についても全体モデルと比較する。比較項目は以下のとおりである。

- ・ 流出パイプ流量の経時変化：全体モデル、タンク流出モデル、修正 RRL 法を用いた流出モデル
- ・ 幹線・枝線水位の経時変化：全体モデル、タンク流出モデル

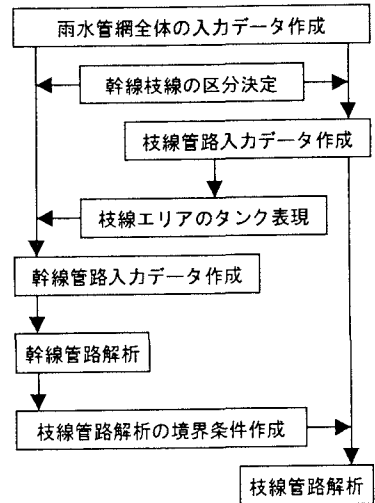


図 7 実在管網における解析フロー

#### 3.1 対象排水区

北海道 A 市の B 排水区について入力データを作成した、排水区の概形は図 8 のようであり、データの内訳は表 1 のとおりである。

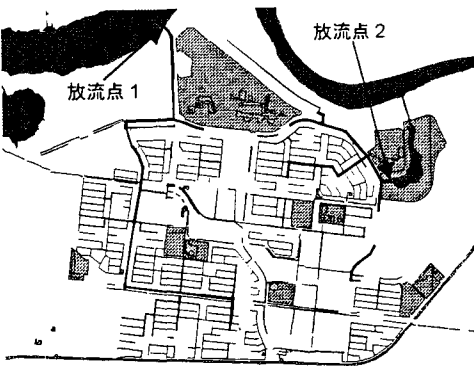


図 8 A 市 B 排水区の概形

表 1 A 市 B 排水区のデータの内訳

|           |           |
|-----------|-----------|
| 雨水管路数     | 1274      |
| 分岐点数      | 129       |
| 最下流（放流）点数 | 2         |
| 最上流点数     | 295       |
| 最小雨水管路サイズ | 0.25(m)   |
| 最大雨水管路サイズ | 1.80(m)   |
| 最低海拔地盤高   | 2.45(m)   |
| 最高海拔地盤高   | 7.12(m)   |
| 下水排除方式    | 分流式       |
| 排水区面積     | 約 160(ha) |

#### 3.2 解析条件

A 市 B 排水区における昭和 5 6 年 8 月の実降雨 a, b を対象とした（図 9, 10）。降雨 a は幅広い時間帯において強い降雨強度を持つもの、降雨 b は急な降雨ピークを持つものの代表として用いた。今回の解析例においては枝線管路内貯留表現に視点を絞って議論を進めるために窪地貯留等は考えず、有効ハイトグラフはハイトグラフと流出係数の積で算出できるものとし、流出係数は一律 0.65 と仮定した。また、水位の境界条件となる放流水位は本来ならば経時データとして与えるべきであるが、今回はデータを持ち合わせていないため段落ちと仮定した。

#### 3.3 幹線枝線の区分と枝線エリアの作成

一般に幹線と枝線は計画上区別されている<sup>8)</sup>が、枝線を簡略化して幹線のみ解析を行う場合には下記の

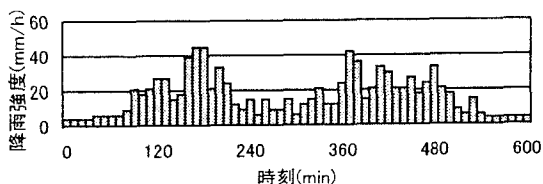


図 9 降雨 a (昭和 56 年 8 月 22 日～23 日)

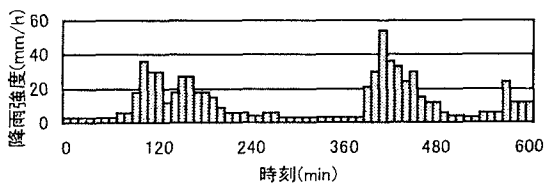


図 10 降雨 b (昭和 56 年 8 月 4 日～5 日)

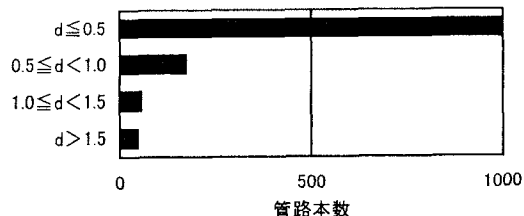


図 11 A 市 B 排水区の管路サイズ分布 (単位: m)

表 2 簡略化サイズと形成される枝線エリアの諸元

| 簡略化サイズ | 幹線管路数 | エリア数 | エリア内<br>最大枝線数 |
|--------|-------|------|---------------|
| 0.3m   | 611   | 168  | 38            |
| 0.5m   | 276   | 96   | 60            |
| 1.0m   | 104   | 31   | 165           |

理由により、この区別とは別に管径で区分する（以下、簡略化サイズによる区分）のが適当であると考えられる。

- ・ 小径管路が圧倒的に多く（図 11）、これを簡略化することで計算規模が大きく縮小される
- ・ 簡略化作業の自動化が比較的容易である
- ・ 雨水管網においては基本的に[下流側管路直径]≥[上流側管路直径]となっているため、簡略化の際に幹線管路接続が途中で途切れることがない
- ・ 幹線枝線境界値によって簡略化後の管路数を柔軟に変化させることができる

簡略化された枝線は幹線管路によって区切られ、枝線エリアを形成する。表 2 に、簡略化サイズと幹線管路数、更に形成される枝線エリア数と枝線エリア内の最大枝線数を示す。簡略化サイズを大きくすると幹線管路数と枝線エリア数は減少するが、個々のエリアが大きくなる。今回は簡略化サイズを 1.0m とした。図 12 に、この場合の主な枝線エリア（管路数 30 以上）の形成状況を示す。

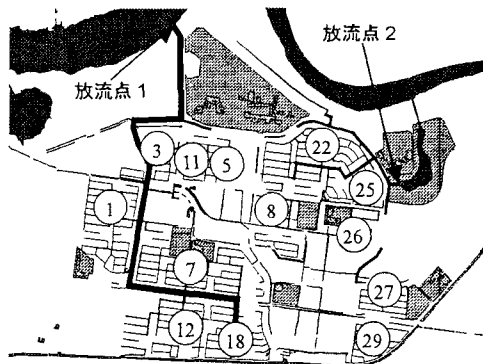


図 12 簡略化サイズ 1.0(m) の場合の主なエリアの形成状況  
(太線は解析結果の例示において対象とする幹線経路)

### 3.4 幹線管路解析と枝線エリア解析

2.2 で示したように各流出パイプにタンクを与え、パラメータを決定した。複数の流出パイプをもつ枝線エリアが多数存在したためタンク数は枝線エリアよりも多い 64、管線管路数は 168 となったが、対象管路数 1274 本の全体モデルで数時間を要していた非定常解析が 1 分以内で完了した。また、幹線管路解析結果を境界条件として枝線エリア解析を行った。図 12 のエリア 3 を例として境界条件を図 13 に示す。この場合は流出パイプ数が 2 であるため、境界条件は 2 系列必要となる。

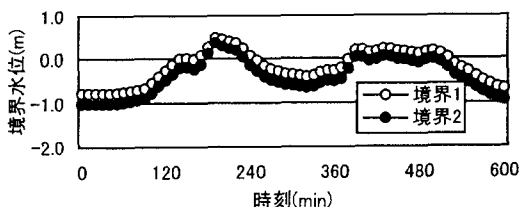


図 13 枝線エリア解析の際の境界条件 (降雨 a、エリア 3)

3.5 解析結果の比較

(1) 流出パイプ流量の比較

降雨 a を対象とした場合について、下流側に位置する比較的大きなエリア 1 と比較的小さなエリア 11、また上流側に位置するエリア 12 における流出流量の経時変化を図 14 に示す。集水面積は各々25, 6, 15haであった。エリア 1 及びエリア 12 の場合、どの方法もほぼ一致しており 3 者の差は小さい。一方でエリア 11 では幹線管路水位の影響を受け、ピーク流量発生時刻について修正 RRL 法を用いた計算と全体モデルとの間に多少ずれが生じた。同様に降雨 b を使用した場合を図 15 に示す。全体的にタンク表現の方が修正 RRL 法と比して全体モデルへの追随は良好であったが、降雨 a の場合と同様大きな差は見られなかった。

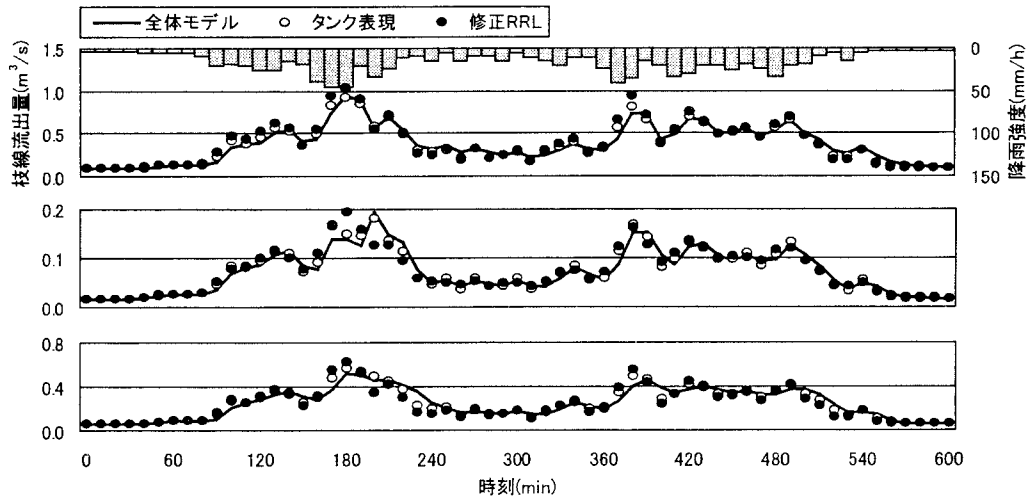


図 14 枝線エリア流出量の比較 (降雨 b, 上: エリア 1, 中: エリア 11, 下: エリア 12)

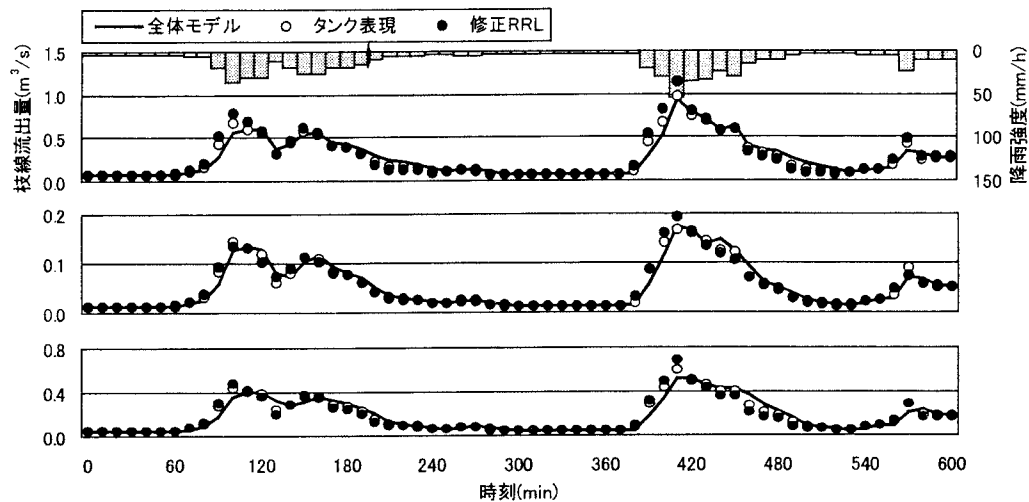


図 15 枝線エリア流出量の比較 (降雨 a, 上: エリア 1, 中: エリア 11, 下: エリア 12)

(2) 水位変動の比較

幹線管路水位の経時変化については(1)全体モデル、(2)タンク表現を用いた幹線管路解析、(3)枝線エリア流出表現を無視した解析の結果を比較する。(3)についてはハイトグラフに枝線エリア面積と流出係数(今回は一律 0.65)を乗じて単位換算したものを幹線管路に直接流入させた。図 12 の幹線経路(太線)におけるピーク時水面の概形を図 16 に、この経路中の最上流点における水位の経時変化を図 17 に示す。これよりタンクによる枝線流出表現を用いた幹線管路解析結果は全体モデルの解析結果と十分に一致しており、枝線エリア解析を行う際の境界条件として使用することが可能であることがわかる。

上記の解析結果を境界条件として用いて枝線エリア解析を行った場合の水位変動を、全体モデルを用いた場合、境界条件を無視し段落ちとした場合と比較する(図 18)。これより境界条件を考慮した枝線エリア解析は全体モデルと非常に良く一致しており、タンクによる枝線流出表現を用いた幹線管路解析結果を境界条件とした枝線管路解析を用いれば、管網の細部に至るまで全体モデルを用いた場合と同様の解析結果が得られることがわかる。逆に境界条件を無視した解析は水位を過小に算出する可能性がある。

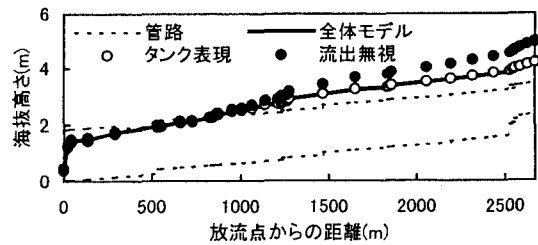


図 16 ピーク時幹線管路水面の概形(降雨 a)

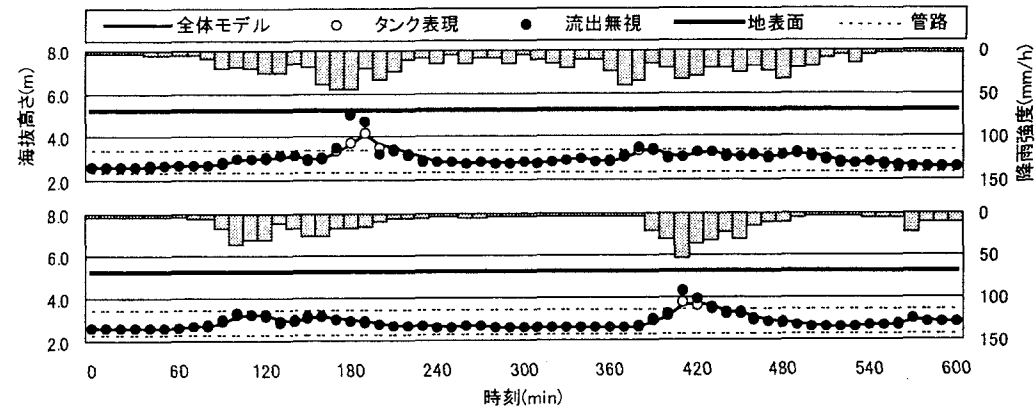


図 17 幹線経路1最上流点水位の比較(上:降雨 a, 下:降雨 b)

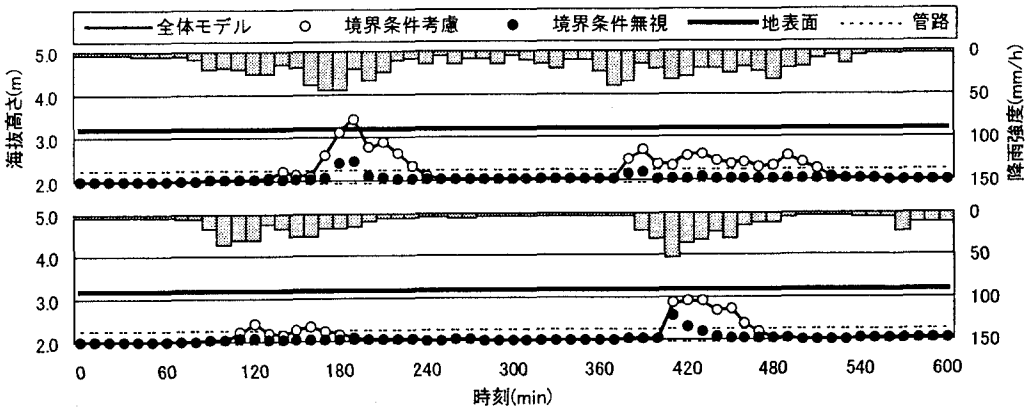


図 18 枝線水位の比較(エリア1, 上:降雨 a, 下:降雨 b)

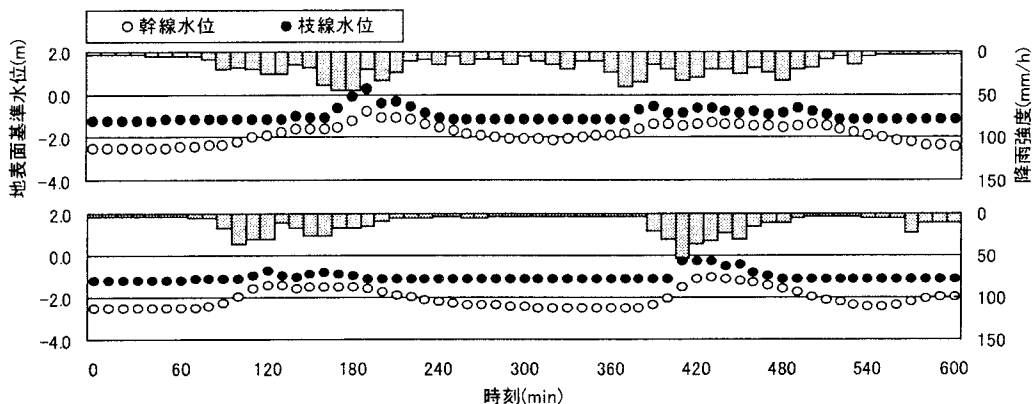


図 19 幹線と枝線の地表面基準水位比較（エリア1，上：降雨 a，下：降雨 b）

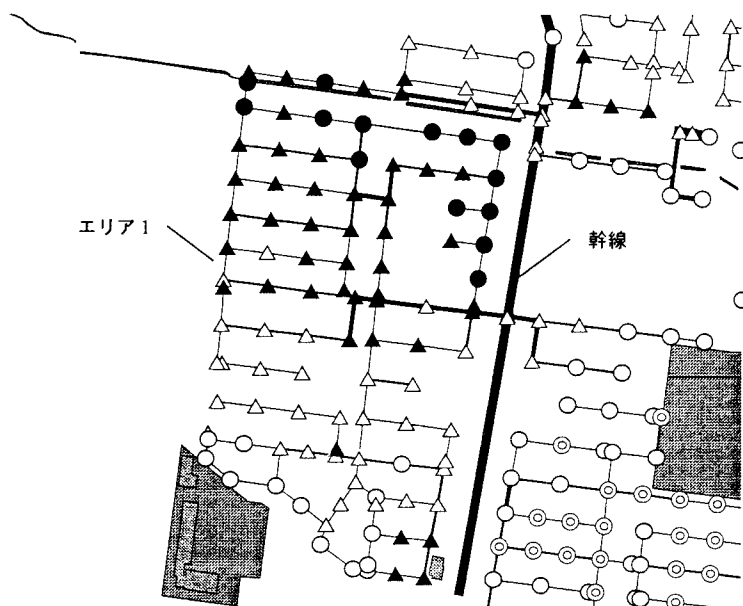


図 20 降雨 a に対するエリア1付近のピーク水位(m) (◎:~1.5, ○:-1.5~-1.0, △:-1.0~-0.5, ▲:-0.5~-0.0, ●:0.0~)

次に、枝線エリアにおける幹線管路水位の代表性についての検討を行う。図 19 は図 18 で対象とした枝線管路と、それに最も近い幹線管路の地表面基準水位の経時変化である。今回示した例のように枝線管路水位が幹線管路水位を 1m 以上も上回る場合があり、幹線管路水位が枝線エリア水位を代表するとはいえない。従って雨水管網を評価する上で幹線管路解析結果のみを用いることは危険であり、枝線管路解析が必要であるといえることができる。

以上、解析結果の比較として枝線エリア流出水量と幹線・枝線の管路水位について、解析結果全てを示すことができないため、例を挙げて述べてきたが、ここで述べたことは全ての枝線エリア・複数の降雨において確認できた。また、排水区規模が非常に大きな場合には形成される枝線エリア規模が大きくなり枝線管路解析を行うためにさらに計算規模縮小が必要な場合があるが、このような場合には枝線エリア内をさらに幹

線・枝線に分割し、本方法を数段階繰り返すことで十分な計算規模縮小を行うことができるであろう。

図 20 に降雨 a を対象とした場合のエリア 1 付近の幹線・枝線ピーク水位（地表面基準）を例示する。幹線管路ピーク水位が△（-0.5m 以下）となっているのに対して、エリア 1 内においては●（地表以上）と判断される個所があり（差は最大で約 1.0m）、エリア 1 内の枝線水位が幹線水位に比して高くなっていることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究の結果および成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 幹線管路解析による水位が枝線エリア内水位を代表しない場合があり、また枝線エリア内の構造的欠陥、弱点探索を行う場合や、管網の能力増強策を講じた場合の枝線エリアへの波及効果の確認を行う場合等のためにも枝線管路解析が必要である。
- (2) 所要計算時間、労力等の問題から大規模管網においては不可能とされる枝線管路解析は、①幹線管路解析、②①の解析結果を境界条件とした枝線管路解析、に分割することで実現できる。
- (3) 上記手順によって得られた枝線管路水位は全体モデルを用いた場合とほぼ等しく、逆に幹線管路水位による境界条件を無視した枝線管路解析を行った場合には水位を過小に算出する恐れがある。
- (4) タンクによる枝線エリア流出表現は修正 RRL 法と同様に全体モデルの結果をある程度追従することができる、結果として全体モデルを用いた場合とほぼ等しい幹線管路水位を算出することができる。
- (5) 雨水管網枝線管内貯留表現法としてタンクモデルを使用する際、タンクや流出パイプのパラメータは枝線管路の諸元から簡単に決定される。
- (6) 排水区規模が非常に大きな場合等、幹線・枝線の 2 段階に分割するだけでは計算規模縮小が十分でない場合には、枝線エリア内をさらに幹線・枝線に分割し、本方法を数段階繰り返すことで計算規模縮小を行うことができると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Hirai, M., S.P.Zhang and K.Asada: Re-Construction Planning of Drainage System Considering Flow Detention Effect of Pipe Network. The 6<sup>th</sup> International Conference on Urban Storm Drainage, 1993
- 2) 高桑哲男, 船水尚行: 網目状雨水管網の解析法(1), 下水道協会誌論文集, No.407, pp.29-40(1996)
- 3) 高桑哲男, 船水尚行: 網目状雨水管網の解析法(2), 下水道協会誌論文集, No.407, pp.41-53(1996)
- 4) 高桑哲男, 船水尚行: 網目状雨水管網の解析法(3), 下水道協会誌論文集, No.407, pp.54-69(1996)
- 5) 山口高志, 松原重昭, 山守隆: 都市域における降雨流出調査第 2 報—修正 RRL 法による流出推定—, 土木技術資料, Vol.13, No.10, pp.34-39 (1973)
- 6) 高桑哲男, 船水尚行: 雨水管網の定常解析法, 下水道協会誌論文集, No.364, pp.36-49(1996)
- 7) 鈴木憲明, 高桑哲男, 船水尚行: 雨水管マッピングデータを用いた管網解析データ作成法, 第 36 回下水道研究発表会
- 8) 忽滑谷良一: 下水道講座 2 管渠の設計と考え方, 鹿島出版会(1977)