

修正 R R L 法による浸水を考慮した 都市域下水の流出解析

三浦浩之¹・和田安彦²

¹正会員 関西大学助手 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

都市域において浸水が生じているような場合の雨水流出状況の解析には不定流モデルが用いられるが、流域や管きよのモデル化が複雑であり、計算時間も長い。このため、ポンプ場等の制御のための流出水量予測には修正 RRL 法が用いられているが、浸水の発生を考慮できないという問題がある。そこで、等到達時間域設定方法の改良、管きよの流下能力を考慮した流入ハイドログラフ算出方法の改良を行い、浸水発生時における流出解析を修正 RRL 法によって行えるようにした。その結果、プライスマン・スロットの手法を応用した不定流解析に比較して約1/10~1/20の計算時間で浸水発生時の流出解析が可能であり、推定した浸水発生域も不定流解析の場合と大差ないものであることを明らかにした。

Key Words : modified RRL hydrograph method, storm runoff, flooding, unsteady flow model

1. 緒言

都市域では土地価格が高水準にあることから今後も建物や社会インフラの地下空間への進出はなお一層進むことが予想される。また、近年の情報化の発達により都市内には各種情報網が張り巡らされ、多様な情報関連設備が設置されているが、それらの大半は地下にある。このため、都市域でいったん浸水が発生すると、建物などが浸水して被害が生じるだけでなく、ライフラインの被災による都市活動の停滞、情報網の寸断等による情報の混乱等が生じ、その被害は深刻なものとなる。

この様な情勢から、都市での雨水排除はこれまで以上に重要性を増してきており、雨水排除施設や雨水流出抑制施設の能力を最大限活用できる制御システムの開発が期待されている。特に、最近では雨水貯留池や大規模貯留管を利用して量的な制御だけでなく、雨天時流出負荷の削減や合流式越流水対策といった質的な制御を行うことが取り込まれ始めている^{1)~5)}。量的な制御と質的な制御を高いレベルで両立するために、これら施設をリアルタイムで制御することが考えられており、短時間で流出状況の予測が行える解析モデルが開発されつつある^{6)~24)}。

浸水解析に用いられる不定流モデルは、演算が複雑なため、汎用コンピュータやエンジニアリングワークステーションといった演算速度の速い機器でないと計算時間がかかる。そのため、不定流モデルを雨水排除施設のリアルタイムコントロールのための流出予測に

用いることは実用的ではない。特に、広域的な雨水排除施設を管理する上で必要となる大規模流域での浸水解析に適した解析法とはいえない。

一方、修正 RRL 法^{25)~28)}は、雨水流出解析に広く用いられており、流域のモデル化が不定流モデルに比較して容易で、計算時間を大幅に短縮できる特徴を持っている。

そこで、一般に広く普及しているパーソナルコンピュータにより、浸水が発生しているような場合の下水道管きよでの雨水流出状況を迅速に解析することを目的に、修正 RRL 法において浸水発生を考慮する手法を検討した。

下水管きよにより雨水排除する場合に、浸水を生じさせない最大の流量をその管きよの流下能力と考える。修正 RRL 法ではこの管きよの流下能力を S-Q カーブにより間接的に表現しているが、浸水の発生地点(位置)の特定や各地点の浸水量の算出は行えない。すなわち、修正 RRL 法は浸水が生じている場合の流出解析に対応できる解析法ではない。しかも、対象地域を等到達時間域に分割し、その等到達時間域内全体の諸係数を均一なものとし、計算を行うため、区域の一部で生じた浸水現象を考慮できない。

本研究は修正 RRL 法に次の改善を行って浸水現象のシミュレーションを試みた。

- ① 下流側の水位上昇の影響を考慮した下水管きよの流下能力と流量の比較
- ② 計算時間が短い利点を損なわない程度の等到達時間域の細分化による浸水発生位置の推定

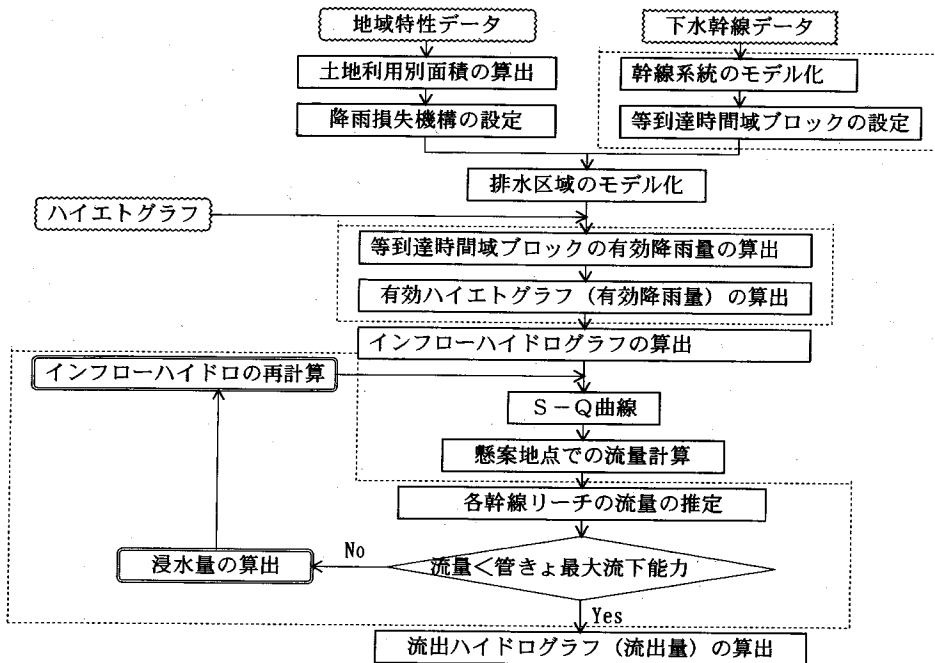


図-1 浸水を考慮した修正 RRL 法の解析手順

2. 修正 RRL 法による浸水発生時の流出解析方法

(1) 概要

下水管きよでの浸水は、管きよの流下能力以上の流入が生じた場合や下流側の水位上昇によって流下が困難になった場合に発生する。このため、浸水解析では管きよの流下能力と計算による雨水流出量の比較となる。しかし、通常の修正 RRL 法では、個別の管きよの流下能力を考慮しておらず、実際にある管きよに流下能力以上の雨水が流入し、溢れ出るはずの雨水も流出させてしまう。この問題に対して、サーチャージを考慮する解析法が提案されている²⁹⁾が、浸水解析を行えるものとはなっていない。

そこで、ここでは修正 RRL 法を用い、各幹線の管きよの流下可能流量と計算による流下水量から浸水発生の有無を判断することを試みた。

(2) 解析方法

浸水を考慮する修正 RRL 法（以後、『改良修正 RRL 法』とする）による解析方法のフローを図-1 に示す。図中 ----- 線で囲んだ部分が従来の修正 RRL 法と異なる部分である。改良修正 RRL 法の通常の修正 RRL 法と異なる点を次に示す。

a) 等到達時間の設定

通常の修正 RRL 法では、懸案地点への到達時間から等到達時間域を決定する（図-2）。これに対して、改良修正 RRL 法では、幹線での浸水発生箇所を特定するために、

- ・幹線への支線の接続状況
- ・水路の配置状況

を考慮して、幹線リーチ毎に流入域を設定し、これを懸案地点への到達時間から等到達時間域ブロックに区分した。用いた等到達時間域の概念図を図-3 に示す。

b) 浸水量算定のための有効水量の算定方法

通常の修正 RRL 法では、計算ステップ t における有効水量 P_t は以下のようにになる。

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 0 \\
 P_1 &= R_1 \cdot A_1 \\
 P_2 &= R_1 \cdot A_2 + R_2 \cdot A_1 \\
 &\vdots \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

$$P_t = R_1 \cdot A_t + R_2 \cdot A_{t-1} + \dots + R_t \cdot A_1 \quad (1)$$

ここで、 R_t は t ステップにおける有効降雨量、 A_t は等到達時間域面積である。

改良修正 RRL 法では、各幹線リーチ毎に流入域を設定し、その上で等到達時間域ブロックに区分している。このため、各幹線リーチ流入域の各等到達時間域ブロック毎に計算時間ステップ t における有効水量

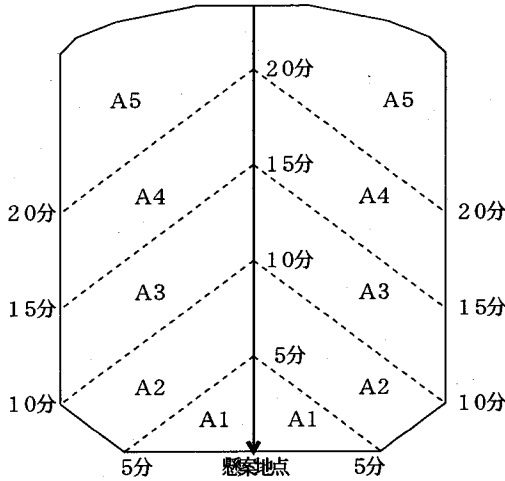


図-2 修正 RRL 法における等到達時間域の概念

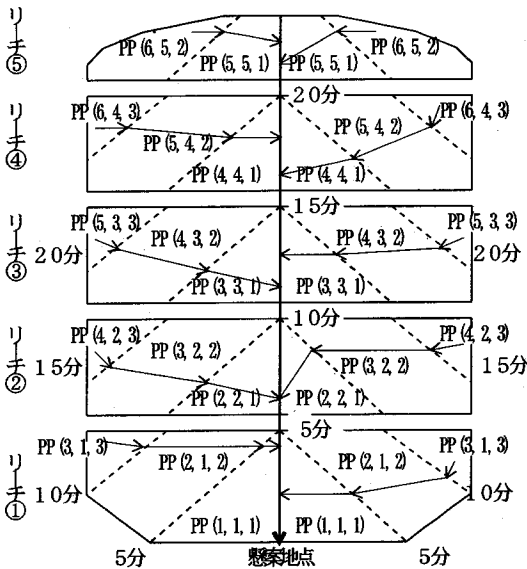


図-3 改良修正 RRL 法における等到達時間域の概念

$PP(t, m, n)$ を求めた。

$$PP(t, m, n) = RR(t) \cdot A(m, n) \times 10 \quad (2)$$

ここで、 $PP(t, m, n)$ は等到達時間域ブロック (幹線リーチ m の n 番目ブロック) の有効水量 ($m^3 / \Delta t$)、 $RR(t)$ は有効降雨量 ($mm / \Delta t$)、 $A(m, n)$ は等到達時間域ブロック面積 (ha) である。また、添え字は

$m=1, 2, \dots, DN-1, DN$

(DN は幹線リーチ総数, $m=1$ が下流端)

$n=1, 2, \dots, n, \dots, EN-1, EN$

(EN は流入管きよ区分数, $n=1$ が幹線側)

である。

したがって、幹線リーチの有効水量 $Pin(t, m)$ は以下

のようになる。

$$Pin(t, m) = \sum_{n=1}^{EN} PP(t-n+1, m, n) \quad (3)$$

これより、インフローハイドロは次式で算出できる。

$$P(t) = \sum_{m=1}^{DN} Pin(t-m+1, m) \quad (4)$$

c) 流下機構

インフローハイドログラフから下水道管きよの流出ハイドログラフを作成するためには雨水流出の遅滞現象を表現する必要がある。これには、一般に貯留関数形式の $S-Q$ 式が用いられる。

$$S = K \cdot Q^p \quad (5)$$

ここに、 S は貯留量 (m^3 もしくは mm)、 Q は流量 (m^3/s もしくは mm/s)、 K, p は貯留関数定数である。

下水道管きよでは、管内の水位が上昇するにつれて管内に雨水が貯留される形となり、流出の遅滞現象が起こる。ここでは、西野らによる方法³⁰⁾により貯留関数定数 K, p を求めた。

なお、この段階では管きよが満管か非満管かについては考慮せず、流れが計算上満管になっていても同じ $S-Q$ 式を適用する。すなわち、満管状態に達した管きよの貯留量 S_f と $S-Q$ 式により求まる貯留量 S との差 ($S-S_f$) は表面貯留分となるが、後段において浸水量を算出するため、解析においては特にこの貯留量の区別はしない。

d) 懸案地点流出量からの各幹線リーチ流量の推定

修正 RRL 法では解析の基準となる懸案地点の流量しか得られず、浸水発生解析に必要な幹線の任意地点の流量は求められない。そこで、ある地点 (リーチ) の幹線流量はその地点より上流にある等到達時間域ブロックの有効水量に比例すると考えて、各幹線リーチの流量を求めた。すなわち、各幹線リーチ ($1, 2, \dots, DN-1, DN$) より上流のすべての等到達時間域ブロックの有効水量の総量を該当幹線リーチへの到達時間を考慮して求める。そして、図-4 に示すように、懸案地点流量を求めた各幹線リーチの総有効水量に比例させて配分することで推定した。

$$Qa(t, p) = \frac{\sum_{m=p}^{DN} Pin(t-m+1, m)}{P(t)} Qout(t) \quad (6)$$

ここに、 $Qa(t, p)$ は幹線リーチ p の流量 ($m^3 / \Delta t$)、 $Qout(t)$ は懸案地点での流量 ($m^3 / \Delta t$) である。

e) 浸水量の推定

求めた各幹線リーチ流量 $Qa(t, m)$ と幹線管きよの流下可能流量 (流下能力に該当する流量) $Qp(m)$ とを比較し、 $Qp(m) < Qa(t, m)$ の時、浸水が発生している

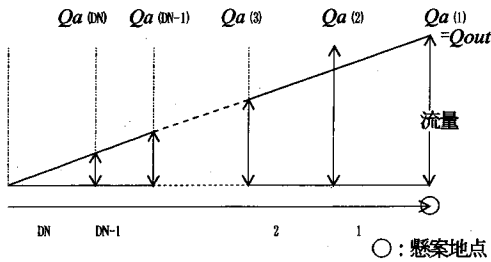


図-4 各等到達時間毎の流出量の概念

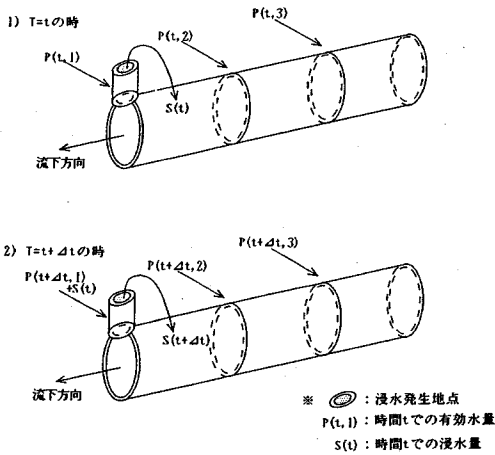


図-5 浸水の取扱いに関する概念

とした。この時の溢水量 $Qov(m)$ は次式で求まる。

$$Qov(m) = Qa(t,m) - Qp(m) \quad (7)$$

これを幹線方向で足し合わせたものが、その時刻の幹線流域全体での溢水量となる。また、既に浸水が生じている場合には、先の幹線リーチの等到達時間区域毎の有効水量 $Pin(t,m)$ にその幹線リーチの浸水量を加えた。これにより、幹線での流下能力に余裕がある場合には、浸水した雨水が再び幹線へ流入する現象を表した。図-5に浸水量の取扱いに関する概念図を示す。

また、幹線下流端にポンプ場があって、ポンプ井水位の影響を受ける場合には、ポンプ吐出力とポンプ井水位の変動からポンプ井への流入量を求め、これを幹線下流端の流下可能量とする。

3. 改良修正RRL法による浸水解析の妥当性評価

(1) 評価の考え方

改良修正 RRL 法による浸水発生予測の妥当性を、一般的に浸水解析に利用される不定流モデルによる浸水解析結果と比較することにより評価する。不定流モデルには、下水道管での開水路流れとサーチャージ流れ（圧力流れ）を同形の基礎式で表せるスロット・モ

デル³¹⁾を用いた。

(2) 不定流モデルによる浸水解析方法

a) 表面流出の解析方法

各雨水幹線の集水域からの雨水表面流出量は、次の時間的に変動する横からの流入があり流れが等流に近い場合での一般的な表面流の伝播を表す式により計算した。

$$Q = \alpha A^n \quad (8)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(t) \quad (9)$$

ここに、 Q は流量、 A は流水断面積、 $q(t)$ は斜面単位面積当りの横からの流入量、 α 、 n は定数、 x は距離、 t は時間である。本式を Kinematic Wave 理論により、特性曲線法を用いて差分して用いた³²⁾。

b) 下水管きよ流れの解析方法

下水管きよでは「流れ」の状態は、自由水面を持った開水路の流れから自由水面を持たない管路の流れまで変化する。

①自由水面を持つ場合（ダイナミック・ウェーブ・モデル）

自由水面を持つ場合の不定流計算は、開水路における不定流解析法を用いる。水路に沿ってほぼ様な横流入のある漸変流に対して、一次元解析を行う場合の不定流の基礎式は、次の運動方程式と連続方程式からなる。

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - i + I_f = 0 \quad (10)$$

$$I_f = n^2 \cdot v |v| / R^{4/3}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (11)$$

ここに、 v は断面平均流速 (m/s)、 h は水深 (m)、 A は流水断面積 (m^2)、 Q は流量 (m^3/s)、 R は径深 (m)、 q は河川単位長当りの横流入量 ($m^3/s/m$)、 i は河床勾配、 I_f は摩擦勾配、 g は重力加速度 (m/s^2)、 n は Manning の粗度係数、 t は時間 (s)、 x は距離 (m) である。

この連立1階偏微分方程式は、1つにまとめると2階の双曲型方程式となる。これを数値解析法で解くにおいては、陽解法の一つである two-step Lax-Wendroff 法による差分化を行った。

②満管（圧力管）の場合（ラテラル・モデル）

下水道網のサーチャージ流れは、ラテラル・モデルを用いてほぼ厳密に解析し得るが、流れの基礎式をダイナミック・ウェーブ・モデルと対比すると連続の式の形が異なる。実用上また、数値計算上からは、両流

表-1 降雨特性

総降雨量	151mm
降雨継続時間	2.7hr
時間最大降雨量	97mm/hr

表-2 表面流解析の計算条件

計算時間間隔	1分
計算距離間隔	斜面長を10等分した距離を基本
斜面単位幅	40m
斜面の粗度係数	0.005
流出率	・1次流出率 0.07 ・2次流出率 0.95 ・飽和雨量 20mm
流下水深と流量の関係式($q = \alpha \cdot h^m$)の定数	$\alpha = \sqrt{SI/NFN}$ (SI: 管きよ勾配, NFN: 斜面の粗度係数)
	$m = 1.67$
計算開始時の特性曲線の数	10

表-3 不定流解析の計算条件

計算時間間隔	1秒
計算距離間隔	40m ^{*1}
管きよのマニング粗度係数	0.02
圧力波速度	30m/s ^{*2}

*1 各雨水幹線は40m毎の断面、勾配を代表として用いる。また、斜面からの表面流出量を横流入量として入力する。
*2 従来、経験的に20~50m/sが用いられている。

れに対し同形の基礎式を適用できれば好都合となる。

これは、いわゆるプライスマン・スロットの手法を応用することにより可能となる。すなわち、排水管きよ頂部に微小幅のスロットが連続して取り付けられていると考え、排水管きよのサーチャージ流れをスロット断面内に自由水面をもつ（見掛け上の）開水路流れとみなす。これにより、下水道網のサーチャージ流れに対し、開水路流れと同形の基礎式を適用できる。

このスロット・モデルはCungeら³³⁾によって実用化され、今日では下水道網の流出解析にも利用されている。ここでは、このモデルを下水管網へ適用するにあたり、渡辺らによる計算法³¹⁾を用いる。

(3) 不定流モデルによる浸水解析

a) 対象排水区域と対象降雨

対象排水区域は分流式下水道の整備されている排水区（排水面積 174ha）であり、対象降雨には対象排水区域において浸水が発生した時の降雨を用いた。降雨特性は次のものであり、非常に降雨強度の強い豪雨である（表-1）。

b) 不定流モデルの計算条件

表面流解析の計算条件を表-2に、不定流解析の計算条件を表-3に示す。

c) 解析結果

浸水発生時の流出解析の結果の一例を図-6に示

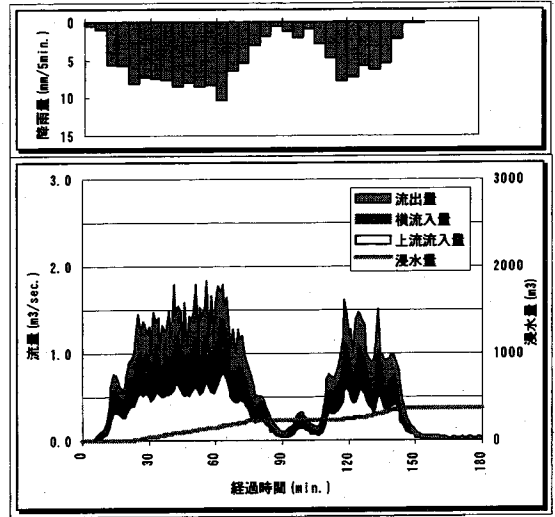


図-6 不定流モデルによる流出解析結果

す。なお、この解析では、一度浸水した雨水は降雨終了後までは地表面に留まり、管きよに再流入しないとしている。

このような解析を対象排水区域すべての下水幹線について行い、修正RRL法による解析結果と比較していく。

(4) 修正RRL法における浸水解析

a) サーチャージ流れの場合の管きよ流量

下水管きよからの浸水は、表面流出水が管きよに流入できない場合、及び管きよ断面積、勾配等の変化により上流から流下してきた雨水が管きよより溢れ出た場合に生じる。不定流解析では、これは下水管きよが圧力管となり、その圧力水頭が地表面を超えることで表せる。

この現象を修正RRL法において表現するため、各管きよに流下可能流量を設定した。ここで、サーチャージ流れが生じる管きよの流量は、その管きよの形状、管径、勾配、粗度から決まる設計上の最大流量とは異なると考えた。この流下可能流量は、不定流解析における浸水発生の判定の考え方から判断すると、次の因子の影響を受ける。

- ① 管きよの土被り
- ② 下流側管きよとの勾配差

そこで、モデル幹線域において浸水が生じるような降雨時の流出現象を不定流解析し、浸水が生じた際の流量を幹線全体について求め、それら値とそれぞれの管きよの土被り、下流側管きよとの勾配差の影響を検討した。

b) サーチャージ流れの場合の管きよ流下可能流量

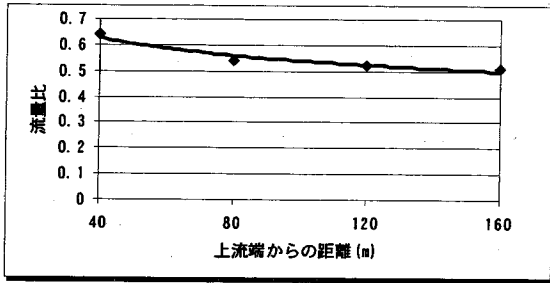


図-7 サージ流れの場合の流下可能流量

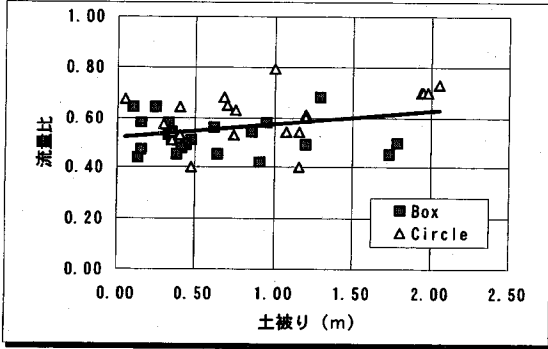


図-8 土被りと流量比との相関関係

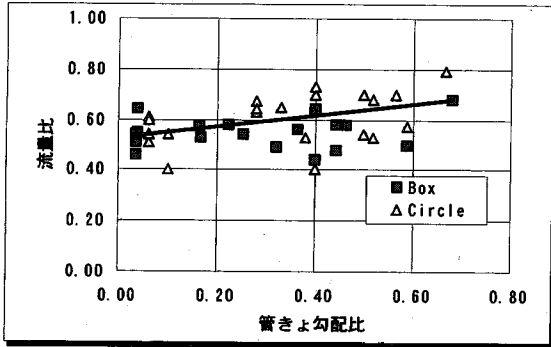


図-9 勾配比と流量比との相関関係

先の不定流解析結果において浸水発生時の管きよ流量値、すなわち流下可能流量を求めた。求めた流下可能流量の一例を設計上の満管流量と比較した流量比として図-7に示す。サーチャージ流れの場合の管きよ流下可能流量は、管きよ設計満管流量のおよそ50~70%である。

c) 管きよ土被りの影響

浸水が生じた地点の管きよの土被りと流下可能流量との関係を図-8に示す。土被りが少ない管きよほど流量比は小さな値となっている。

d) 下流側管きよとの勾配差の影響

浸水が生じた地点の管きよ勾配と下流側管きよ勾配との比(管きよ勾配比)と流下可能流量との関係を図

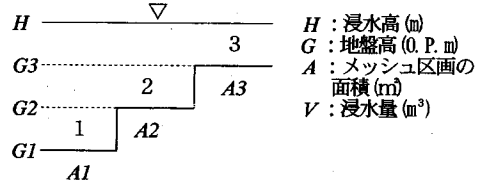


図-10 浸水域拡大の考え方

-9に示す。管きよ勾配比が小さいほど、すなわち、下流側で急激に管きよ勾配が緩やかになる管きよほど流量比は小さな値となっている。

e) 浸水解析

以上の検討より、下水管きよがサーチャージ流れとなった場合には、その設計時満管流量のおよそ50~70%の流量しか流れず、その流下可能流量は管きよの土被り、下流側管きよとの勾配差に影響されていることが明らかになった。そこで、管きよ流量がこの流下可能流量を超えた場合に、浸水するとして修正RRL法における浸水解析を行う。この際、管きよの流下可能流量は、管きよ土被りおよび勾配比との関係を考慮して設定する。

(5) 氾濫解析方法

各幹線より溢水した雨水、及び幹線に流入できなかった雨水は地表面に湛水して浸水を発生させる。

この浸水発生域の解析は対象域の地盤高を考慮して、以下の手順で行う。

- ①対象域を50×50mメッシュに分割する。
- ②対象域の地盤高が記載されている地図をもとに、各メッシュの代表地盤高を設定する。
- ③各幹線の設置位置をメッシュ上に定める。
- ④幹線からの溢水と流入できない雨水表面流出水が、溢水した幹線の位置するメッシュでの浸水となる。
- ⑤浸水の生じたメッシュでの湛水面の高さが周辺メッシュの地盤高よりも高い場合には、低い方へ浸水は流下する。以下、地盤高を加えた浸水面の高さが同一となるまで浸水域が拡大する。

この浸水域拡大を考え方の概念図を図-10に示す。

また、浸水高は次の手順で計算する。

$$\textcircled{1} V \leq A_1 (G_2 - G_1) \text{ の時}$$

浸水区画 メッシュ1

$$\text{面積 } A = A_1$$

$$\text{浸水高 } H_1 = \frac{V}{A_1}$$

$$\textcircled{2} A_1 (G_2 - G_1) < V \leq A_1 (G_2 - G_1)$$

$$+ (A_1 + A_2) (G_3 - G_2) \text{ の時}$$

浸水区画 メッシュ1, 2

面積 $A = A_1 + A_2$

$$\text{浸水高 } H_2 = \frac{V - A_1(G_2 - G_1)}{A_1 + A_2}$$

$$H_1 = (G_2 - G_1) + H_2$$

③ $A_1(G_2 - G_1) + (A_1 + A_2)(G_3 - G_2) < V$
の時

浸水区画 メッシュ 1, 2, 3

面積 $A = A_1 + A_2 + A_3$

浸水高

$$H_3 = \frac{V - A_1(G_2 - G_1) - (A_1 + A_2)(G_3 - G_2)}{A_1 + A_2 + A_3}$$

$$H_2 = (G_3 - G_2) + H_3$$

$$H_1 = (G_3 - G_1) + H_3$$

4. 浸水・氾濫解析結果による改良修正RRL法の 妥当性評価

(1) 修正RRL法による浸水解析の評価

a) 改良修正RRL法における計算条件

① 土地利用別データの算出、及び有効水量の設定

修正 RRL 法では、対象地域を

- ・ 不浸透域での直接流出域率
- ・ 不浸透域での凹地貯留域率
- ・ 浸透域での直接流出域率
- ・ 浸透域での凹地貯留域率

の4つに区分し、有効水量を算定する。しかし、今回は先に不定流モデルによる解析を行った際、すでに *Kinematic Wave* 法により各幹線の上流流入斜面、横流入斜面からの流入水量が求まっているため、これと同一の有効水量となるように地域を区分した。

② 等到達時間域の設定

計算時間間隔を10秒として、等到達時間域を設定した。等到達時間域を設定する際の雨水流出の流速は以下のようにして求めた。

- ・ 上流流入斜面、及び横流入斜面での流速

Kinematic Wave 法を用いて、各勾配 (1/3 ~ 1/1000) での平均流速を求め、これより各斜面での等到達時間距離を求めた。

- ・ 幹線での流速

Manning 式により満管流速を求め、これより等到達時間距離を求めた。

b) 解析結果

浸水発生時の流出解析の結果の一例を図-11に示す。対象幹線は図-6と同じである。ここで、不定流解析同様、本研究では浸水した雨水の地表面における移動現象まではモデル化していないため、一度浸水した雨水は、降雨終了後までは地表面に留まり、管きよに再

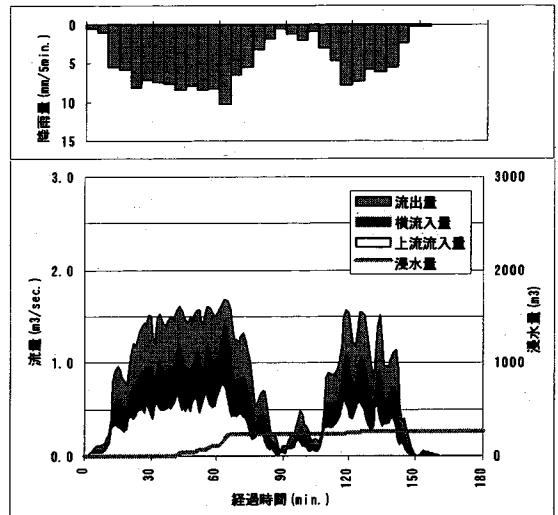


図-11 修正RRL法による流出解析結果

流入しないとした。

不定流解析と改良修正 RRL 法による幹線の浸水位置と浸水量の比較例を図-12に示す。

不定流解析と改良修正 RRL 法とを比べると、浸水発生の有無を検討する位置が異なるため多少のズレがあるが、不定流解析の結果を改良修正 RRL 法でも概ね再現している。

また、不定流モデルによる解析結果よりも改良修正 RRL 法による解析結果の方が、若干有効降雨量を少なく評価したため、わずかではあるが流出量、浸水量共に少なくなっている。

解析結果から改良修正 RRL 法による浸水解析結果を評価すると次のようになる。

- ① 改良修正 RRL 法による浸水発生時の流出ハイドログラフは、不定流モデルによるものとほぼ同様であり、下水管きよにおける浸水発生時の流出解析を行えている。
- ② 改良修正 RRL 法による浸水量は、不定流モデルによる浸水量に比べ、若干少なめとなっている。これは、有効降雨量に差があったことも影響しているが、不定流モデルでは実際の管きよ勾配がモデル中に取り込まれているため、勾配の急変による浸水発生を表現できるのに対して、改良修正 RRL 法では管きよの流下能力からしか評価できないためである。より精度の高い解析を行うには、改良修正 RRL 法において、流下能力の急変を考慮できるような配慮が必要である。
- ③ 幹線で浸水の発生位置に両解析法で多少のズレが生じているが、これは不定流解析では計算での距離間隔が80mと一定であるのに対して、改良修正

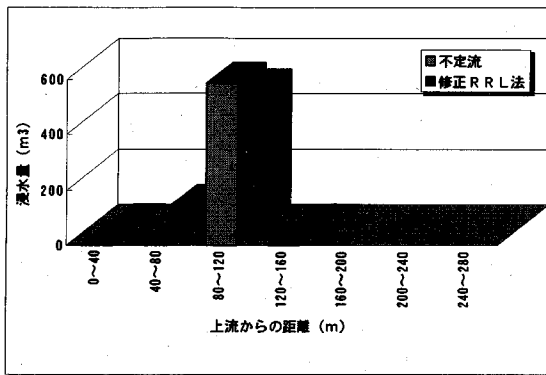


図-12(1) 浸水量と浸水位置の比較 (A 幹線)

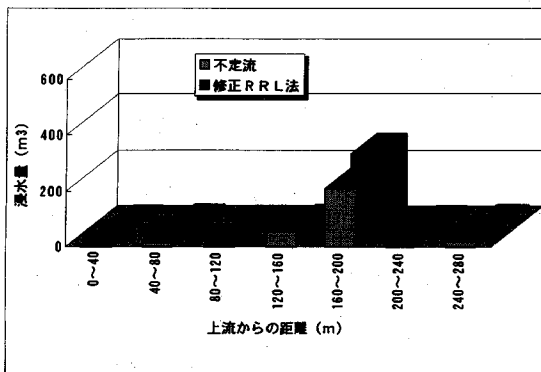


図-12(2) 浸水量と浸水位置の比較 (B 幹線)

RRL法では等到達時間域の設定により、距離間隔が変化するためである。

(2) 氾濫解析における妥当性評価

改良修正RRL法と不定流モデル、それぞれにより予測された浸水量、及び氾濫域の比較により、改良修正RRL法の解析結果の妥当性を検討した。

浸水解析結果より氾濫解析を行った結果を図-13に示す。上が不定流モデルによるもので、下が改良修正RRL法によるものである。

上述した要因により、改良修正RRL法の方が浸水量が少なかったため、浸水域も狭く、浸水も浅いものとなっている。しかし、浸水の発生位置や相対的な浸水高の相違は再現できている。

また、氾濫域が多少のズレが生じているが、これは浸水解析における妥当性評価でも述べたように、不定流解析と改良修正RRLとの計算距離間隔の違いによる。

(3) 改良修正RRL法と不定流モデルとの比較

解析過程及び解析結果から、不定流モデルと比較し

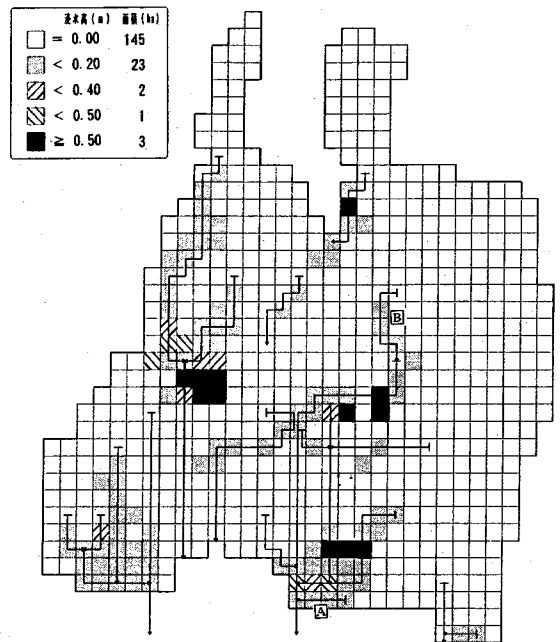


図-13(1) 不定流モデルによる氾濫解析結果

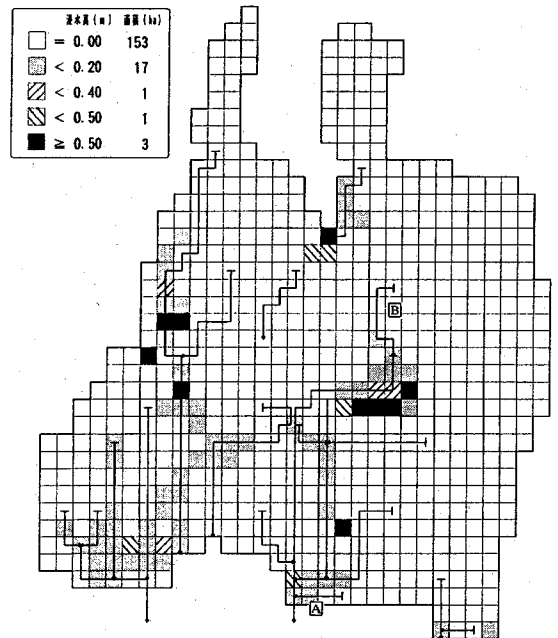


図-13(2) 改良修正RRL法による氾濫解析結果

た場合の改良修正RRL法による解析の長所は表-6に示すものである。また、不定流モデルと改良修正RRL法とを比較したものを表-7に示す。このように、改良修正RRL法は、浸水量や浸水発生域の再現精度は不定流解析に比較して若干劣る面があり、さらに検討を進めるべき点があるものの、計算時間を大幅に短縮でき、流域や幹線のモデル化も簡単である等の

表一六 改良修正RRL法の長所

長 所	内 容
1. 計算時間の短さ	①不定流解析に比べて非常に計算時間が短い。 ②計算時間は不定流解析の約1/10~1/20 不定流解析 : 約1時間 改良修正RRL法 : 約 2~3分 (CPU: 486DX, クック数: 40MHz)
2. 計算時間短縮化	①等到達時間域の設定により、さらに計算時間を短縮化できる可能性がある。 ②不定流解析では流出状況と計算距離間隔から計算時間間隔が決まるため、計算時間短縮化の可能性は低い。
3. 取扱いの容易さ	モデルが単純なため取扱いが容易である。

表一七 不定流モデルと改良修正RRL法との比較

比較項目	不定流モデル		改良修正RRL法	
計算時間	かなりの計算時間を要する。	×	非常に計算時間が短い。	○
対象地域のモデル化	計算時間によりモデル化するため、複雑である。	×	等到達時間域によりモデル化するため、容易である。	△
管きよの諸元	詳細な幹線のデータが必要である。	×	等到達時間域毎の管きよ諸元があれば計算可能である。	○
斜面データ	等高線図より勾配を求める。	○	土地利用別地図より読み取る。	○
管きよ勾配の急変	計算を行う際、考慮している。	○	等到達時間域の設定の際必要であるが、計算では考慮していない。	×
下流水位の上昇の考慮	下流水位の上昇によるサーチャージ流れや浸水発生を再現可能	○	下流水位の上昇による流れの変化は再現できない	×

長所を有している。したがって、浸水が生じているような下水道流域における、適切な雨水流出制御手法の検討等、何度も流出解析を繰り返すような場合に本モデルは有効である。

(4) まとめ

ここでは、改良修正 RRL 法の浸水発生予測の妥当性を一般的に浸水解析に利用される不定流モデルによる浸水解析結果と比較することにより評価した。改良修正 RRL 法と不定流モデルの解析結果との比較より、以下のことが明らかとなった。

- ① 改良修正 RRL 法による浸水発生時の流出ハイドログラフは、不定流モデルによるものとほぼ同様であり、改良修正 RRL 法においても下水管きよでの浸水発生を再現できる。
- ② 浸水発生位置は、計算間隔が異なるため多少のズレがあるが、不定流解析の結果を改良修正 RRL 法でも概ね再現できる。

また、改良修正 RRL 法の長所を以下に示す。

- ① 計算時間が不定流モデルに比して、約1/10以下と非常に短い。

- ② 等到達時間域の設定により、さらに計算時間の短縮が可能である。
- ③ 対象排水域のモデル化が単純であるため、取り扱いが容易である。
- ④ 流下能力の急変を考慮できるような配慮や土被りの考慮することで、不定流モデルと同じの浸水量を再現可能

本モデルは従来の不定流解析に比較して計算時間を大幅に短縮でき、流域や幹線のモデル化も簡単である等の長所を有するため、浸水が生じているような下水道流域における流出解析を繰り返すような場合に有効であると考えられる。

5. 結言

本論文で示した修正 RRL 法による流出解析は、浸水の発生状況を表現するために、従来の等到達時間域の考え方をさらに進めた排水区域の分割化を行った。すなわち、下水道幹線への流入状況を踏まえて排水区域を細分化し、幹線への流入域毎に時間遅れを考慮した有効水量を求めることで、幹線の流下区間毎に浸水発生が検討可能となった。従来の不定流解析と比較して、計算に要する時間を大幅に短縮でき、十分な精度で浸水量と浸水発生時間を求めることができた。したがって、短時間で浸水発生予測を行うのに適し、流域規模での浸水発生予測を含む流出解析に用いることが可能である。今後さらに、この改良型の修正 RRL 法と不定流計算による解析を、実際、同じ流域で行い、その浸水量を比較することにより、より本モデルの実証ができる。また、本モデルを用い流出負荷の削減効果と流出抑制施設の効果的運用の提言も行える。

最後に、本研究の遂行に当たり、種々の面からお世話になった方々に心からの謝辞を申し上げます。また貴重な資料を提供いただいた関係各位に厚くお礼申し上げます。なお、データ解析、プログラムの作成に当たっては当時関西大学大学院学生赤坂和俊君（現日水コン）、藤田伸君（現京都水道設計）の協力を得た。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 児玉一大：雨水貯留施設による合流改善 - 東京 -, 月刊下水道, Vol.16, No.4, pp.45-48, 1993.
- 2) 土木研究所資料第 3060 号, 管内貯留に関する調査, 建設省土木研究所下水道研究室, 1992.
- 3) 高柳, 玉野, 福井, 寺川：雨天時専用大幹線を利用した越流負荷の削減手法, 下水道協会誌論文集, Vol.30, No.352, 1993.
- 4) 榊原 隆：雨水貯留の機能と役割について - 土木研究所の調査から -, 月刊下水道, Vol.16, No.4, 1993.
- 5) 前田正博：総合的な雨水対策 - 東京都 -, 下水道協会誌,

- Vol.31, No.371, pp.10-16, 1994/6.
- 6) A.G.Barnett, S.Lindberg, W.J.Syme and U.Shankar : A Rigorous Hydraulic Approach to Urban Drainage Modelling, *International Symposium on Urban Storm Water Management*, Sydney, 4-7 February 1992, pp.290-293.
 - 7) Forsyth, R. : " BEAGLE:A Darwinian Approach to Pattern Recognition ". *Kybernetes* 10, 1981.
 - 8) Frey, P.W. : " A Bit-Mapped Classifier ".*BYTE*, pp.161-172, 1986-11
 - 9) Abbott, M.B., Rodenhuis, G.S. and Verwey, A. : System 11, " Siva ", a design system for rivers and estuaries, *International Symposium on River Mechanics*, IAHR, Bangkok, 1973.
 - 10) CARR, R.S. and McCOWAN, A.D. : An Integrated Approach to Two-Dimensional Flood Plain Modelling. *ACDS User Forum on 2D Modelling of Flood Plains*, Monash University, 1988-8.17.
 - 11) Danish Hydraulic Institute : *SYSTEM-11 Model Documentation and System-11 Users Guide*, 1983.
 - 12) HYDRA Software Ltd. : *MIKE 11 UD Urban Drainage Modelling Software Guide to Getting Started*, October 1991.
 - 13) HYDRA Software Ltd. : *MIKE 11 UD Urban Drainage Modelling Software Demo Version and Short Description*, January 1992.
 - 14) Verwey, A. and Van Harperen, M.J.M. : HD-System RUBICON-a user-friendly package for the simulation of unsteady flow in open channel networks. *Hydrossoft V1* No.1, pp.1-12, Computational Mechanics, 1988-1.
 - 15) Chung, J.A. : General Report on Sub-Theme B(b)-Flood Flows In Channels and Flood Plains. *Proc. 21st IAHR Congress, Melbourne*, pp.19-23, 1985-8.
 - 17) Jonch-C.T. and Refsgaard, J.C. : *Tropical Experience with the NAM Model. Mathematical Modelling for Flood Forecasting and Flood Control* Danish Hydraulic Institute, 1987.
 - 18) Laursen, E.M. and Mein, R.G. : *RORB-Version 3 Runoff Routing Program. User Manual*, 1973.
 - 19) Neilsen, S.A. and Hansen, E. : Numerical simulation on the basis of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology*, 4, pp.171-190, 1973.
 - 20) Weiss, H.W. and Midgley, D.C. : *Mathematical Flood Plain Modelling, Vol 1, Hydrological Research Unit Report 7/75*, University of Witwatersrand, South Africa, 1975.
 - 21) K.Bennerstedt, V.Arnell and G.Svensson : Real Time Control of a Combined Sewer System, *5th International Conference on Urban Storm Drainage*, Osaka, pp.1255-1260, 1990.
 - 22) S.O.Petersen, O.B.Hansen and P.Harremoes : SAMBA-Control. A Model for Simulation of Real Time Control to Reduce Combined Sewer Overflows, *5th International Conference on Urban Storm Drainage*, Osaka, 1990, pp.1317-1322, 1990.
 - 23) M.Weyand and M.Dohmann : Experience and Results of Real Time Control within a Combined Sewer System, *5th International Conference on Urban Storm Drainage*, OSAKA, 1990.
 - 24) W.C.Huber : Prediction of urban non-point source water quality : Methods and models, *International Symposium on Urban Storm Water Management*, Sydney, 4-7 February 1992, pp.1-16, 1992.
 - 25) Road Research Laboratory : A Guide for Engineers to the Design of Storm Sewer Systems, *Road Note* No.35, 1963.
 - 26) Transport and Road research Laboratory : A Guide for Engineers to the Design of Storm Sewer Systems, *Road Note* No.35, 2nd Ed.
 - 27) 山口高志, 松原重昭, 山守隆 : 都市における降雨流出調査, 第2報, 土木技術資料, 14-11, 1972.
 - 28) 山口高志, 松原重昭, 山守隆 : 都市における降雨流出調査, 第3報, 土木技術資料, 15-17, 1973.
 - 29) 森野彰夫, 藤重俊夫, 大森啓敬 : サーチャージを考慮した修正RRL法による流量, 水位解析手法 (MATRO) の提案, 土木学会第42回年次学術講演会概要集, pp.178-179, 1987.
 - 30) 西野 喬 : 雨水浸透基盤の実流域への適用 (抑制効果の試算) について, 下水道協会誌, Vol.26, No.302, 1989.
 - 31) 渡辺政広, 江藤剛治, 室田 明 : 取付管の調圧効果を考慮した下水管網内の遷移流計算法, 土木学会論文集, pp.81-90, No.411/ II -2, 1989.
 - 32) 建設省都市局下水道部監修, 合流式下水道越流水対策と暫定指針-1982年版-, 日本下水道協会.
 - 33) Chung, J.A. and Wegener, M. : Numerical integration of Barre de Saint-Venant's flow equations by means of an implicit scheme of finite differences, *La Houille Blanche*, No.1, pp.33-39, 1964.

(1994. 10. 26受付)

RUNOFF ANALYSIS USING THE MODIFIED RRL HYDROGRAPH METHOD OF FLOODING IN URBAN SEWER PIPE SYSTEMS

Hiroyuki MIURA and Yasuhiko WADA

Generally, the Unsteady Flow model is used in analysing of flow in urban sewer pipe systems, this model however has the following problems; modeling of areas and pipes is complex, calculation requires too much time to perform. On the other hand the Modified RRL Hydrograph method offers an easier method of modeling the areas and a shorter calculation time. Therefore we propose an improvement of the Modified RRL Hydrograph method to express the occurrence of the phenomenon of flooding in urban sewer pipe systems. We incorporated "Maximum Flow" to simulate surcharged flow in the sewer pipes. This new Modified RRL Hydrograph method can reduced calculation time on approximately 1/10 ~ 1/20, in comparison to the Unsteady Flow analysis model transformed into SLOT MODEL. Then, we made clear that the flooding area estimated by the new Modified RRL Hydrograph method has little difference in comparison to the area estimated by the Unsteady Flow model.