

MOUSE - スロットモデルの 水位低下補正手法

Correction method for dropping of simulated water level utilizing
MOUSE slot model

重田尚秀¹・渡辺政広²

Naohide SHIGETA, Masahiro WATANABE

¹学生会員 工修 愛媛大学大学院理工学研究科 博士後期課程 (〒790-8577 松山市文京町3番)

²正会員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

MOUSE employs a slot model for the simulation of pressurized flow; runoff simulations are executed often with the expansion of the slot width (underestimating the pressure wave celerity) in order to shorten the simulation time. However, as the slot width expands, there is a tendency toward lowering of the simulated water levels. This can cause fatal errors in the simulated water levels, especially in the cases of runoff simulations involving flooding.

In this paper, we propose a correction method for solving the aforementioned problems by focusing on the fact that runoff characteristics of pressurized flow (pressure wave celerity) is determined by the retention mechanism of slots and manholes. Furthermore, we performed numerical experiments to investigate the applicability of this method and demonstrated its usability.

Key Words : MOUSE, Slot Model, slot width, surcharged flow, urban drainage sewer system

1. はじめに

近年、都市域の下水道流域では、都市化による浸透域の減少に伴う雨水流出量の増大、ヒートアイランド現象に起因する集中豪雨の頻発等により、浸水氾濫被害の発生が増加しており、浸水氾濫を防除・軽減する対策の早期立案・実施が必要とされている。これらの対策について検討するには、浸水氾濫の状況を精度高くかつ詳細にシミュレートできる雨水流出解析手法が必要である。

本論文は、このような流出解析手法の一つで、世界的に広く用いられているMOUSEモデルについて、本モデルによる浸水氾濫解析の適合性を向上させるため、MOUSEモデルが下水道管渠網におけるサーチャージ流れ(圧力流れ、満管流れ)を解析する上で抱えている精度上の問題点を指摘するとともに、これを解決するための手法を提案するものである。

MOUSEモデルでは、圧力流れの計算にスロットモデルを用いているが、本モデルの下水道管渠網への適用については、以下のような問題点を指摘できる。

スロットモデルによる流出計算において、流出特性を決める重要なパラメータとして圧力波の伝播速度 a が

あるが、本パラメータの適値は明らかにされていないため、本来のスロット幅より広くして計算がなされている可能性がある。また、実業務において、限られた予算(時間)で多数のシミュレーションを行わなくてはならない状況の下、スロットモデルでは、計算時間短縮のため、しばしば、スロット幅を広げて(圧力波伝播速度 a を小さく見積もって)流出計算がなされる。しかしながら、スロット幅を広くするにつれ、計算水位が低下する傾向があり、特に、浸水氾濫を伴う流出解析の場合には計算水位に致命的誤差が生じることがある。したがって、スロット幅を広げて流出解析を行う際には、解析精度を確保するための何らかの補正措置を施す必要がある。

本論文では、上記の問題を解消するための補正手法を提案するとともに、本手法の適用性について数値実験的な検討を行った。

2. MOUSE - スロットモデル

(1) MOUSE - スロットモデルの基礎式¹⁾

MOUSEモデルでは、図-1に示すように、管頂部を微小幅のスロットを立ち上げ、実際の圧力流れを見かけ

上の開水路流れとして取り扱うものとし、以下に示す仮定を設定している。

- ① 水は圧縮性である。
- ② 管壁は弾性変形する。
- ③ スロット部は流水域ではなく、貯留域として作用する。
- ④ スロット幅は微小である。

上記仮定により、下水管渠の非定常流れ（圧力流れ）に対する運動方程式および連続の式は、それぞれ、次式のように表される。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(I_0 - I_f) & (1) \\ \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Q}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{gA_p}{a^2} \frac{\partial y}{\partial t} = 0 & (2) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \left\{ 1 + \frac{g(y-D)}{a_0^2} \right\}, \\ A &= A_p \left\{ 1 + \frac{g(y-D)}{a_r^2} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$a_r = \sqrt{\frac{E_r \cdot e}{\rho_0 \cdot D}}, \quad a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + a_0^2 / a_r^2}}$$

ここに、 y ：水深あるいは圧力水頭、 Q ：流量、 A ：流水断面積、 A_p ：下水管渠の断面積、 I_0 ：管渠勾配、 I_f ：摩擦勾配、 a ：圧力波の伝播速度、 a_0 ：音波の伝播速度、 a_r ：管壁の弾性変形に基づく圧力波の伝播速度、 ρ ：水の密度、 ρ_0 ：標準大気圧の下での水の密度、 D ：下水管渠の直径、 α ：エネルギー補正係数、 E_r ：ヤング率、 e ：管厚、 g ：重力加速度、 x ：距離、 t ：時間である。

(2) 圧力波の伝播速度とスロット幅の関係

圧力波の伝播速度とスロット幅の関係は次式のように表される。

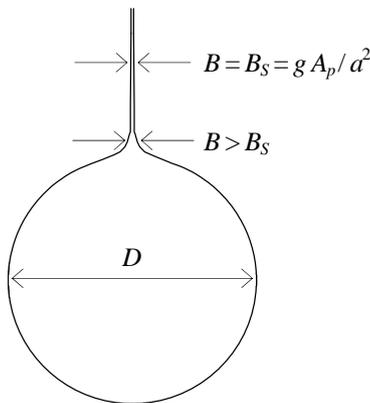


図-1 MOUSE - スロットモデルの横断面図

$$B_s = g \frac{A_p}{a^2} \quad (4)$$

ここに、 B_s ：スロット幅である。

圧力波の伝播速度 a は、一般に、 $1000 \sim 1400$ m/s とされている²⁾。MOUSEモデルでは、スロット幅のデフォルト値は $B_s / D = 0.01$ となっており、たとえば $D = 10$ m の円形管渠では $a = 88$ m/s となる。

ここで、開水路流れ（等流）における微小擾乱の伝播速度 $c = \sqrt{gA/B}$ (B ：水面幅) について見ておくと、 $D = 10$ m の円形管では、表-1 のとおりである。MOUSEモデルでは、最大等流流量が発生する $y/D = 0.94$ 以上は圧力流れとして扱うため、 c の最大値は 13 m/s である。

3. 水位低下補正手法

著者らは既に、圧力流れの流出特性（圧力波の伝播速度）はスロットとマンホールでの貯留作用によって決まることを明らかにしている^{3)~5)}。

したがって、スロット幅を広げたことによって余分にスロットに貯まる貯留量をマンホールの貯留量から差し引けば、圧力流れの流出特性は変わらないと考えられる。

これより、スロット幅を広げることによる計算水位の低下を補正する手法として、以下に示す方法を提案する。

(1) ラテラルモデル^{3), 4)}

下水道管渠網は、通常、下水管渠（マンホール間の管渠部分）とマンホールからなるとして取り扱われている。ところが、実流域の各下水管渠には、図-2 に示すように、道路・歩道、家庭などからの雨水・汚水を排除するための取付管（laterals, 直径 15~20 cm）が数多く接続されている。これらの取付管における流出雨水の貯留作用を考慮すると、下水管渠における圧力流れの運動方程式および連続の式は、それぞれ、次式のように表される。

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g \left(I_0 - \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} \right) & (5) \\ \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a'^2} \frac{\partial y}{\partial t} = 0 & (6) \end{cases}$$

表-1 開水路流れの微小擾乱伝播速度 ($D = 10$ m の円形管)

y/D	y (m)	B (m)	A (m ²)	c (m/s)
0.20	2.0	8.0	11.2	3.7
0.40	4.0	9.8	29.3	5.4
0.60	6.0	9.8	49.2	7.0
0.80	8.0	8.0	67.4	9.1
0.90	9.0	6.0	74.5	11.0
0.94	9.4	4.8	76.6	12.6

$$; a' = \sqrt{g \frac{L}{N} (\sin \theta_0) \frac{A_p}{A_l}} \quad (7)$$

ここに、 V ：断面平均流速、 R ：径深、 n ：マンニングの粗度係数、 a' ：取付管が接続する下水管渠の圧力波の伝播速度、 A_l ：取付管の断面積、 L ：下水管渠の長さ（マンホール間隔）、 N ：取付管の接続本数（ L 当たり）、 θ_0 ：取付管の傾斜角度である。

また、マンホールが数 100 本の取付管からなる集合体であり、かつこれら仮想の取付管全てを直下流の下水管渠に付け替え得ることを確認しており、下水管渠における圧力流れの基礎式は、次式のように表される（ここに、運動方程式は式 (5) と同一である）。

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a''^2} \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

$$; a'' = \sqrt{g \frac{L \cdot A_p}{F_M + N(A_l / \sin \theta_0)}} \quad (9)$$

ここに、 a'' ：マンホール地点の取付管を全て下流側の下水管渠に付け替えているときの下水管渠の圧力波の伝播速度、 F_M ：マンホール断面積である。

式 (9) より、取付管およびマンホールの貯留量の総和が変化しなければ、圧力波の伝播速度は変化しないことがわかる。

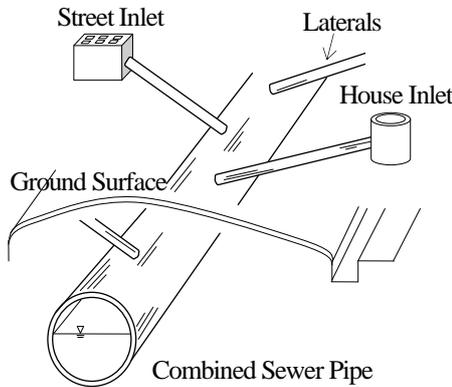


図-2 下水管渠と取付管（ラテラルモデル）

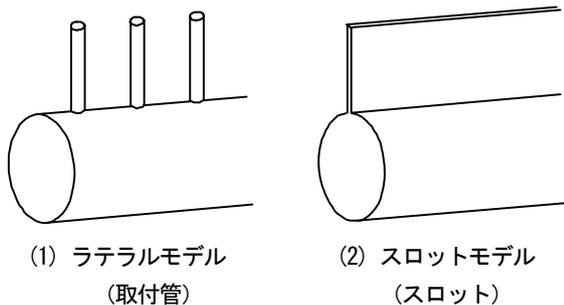


図-3 MOUSE - スロットモデルとラテラルモデルの関係

(2) MOUSE - スロットモデルとラテラルモデルの関係

ラテラルモデルの取付管における貯留量がスロットにおけるそれに等しくなるような幅を有するスロットを管渠頂部に取り付けたのが、MOUSE - スロットモデルであると考えることができる（図-3）。

このことより、また前述した圧力流れの流出特性がスロット（取付管）とマンホールとの貯留作用によって決まることより、スロットおよびマンホールの貯留量の総和が変化しなければ、圧力流れの流出特性は変化しないと考えることができる。

(3) 水位低下補正手法⁹⁾

上述したように、スロット幅を広げたことによって余分にスロットに貯められた貯留量と同量の貯留水量を上流側マンホールにおける貯留量から差し引けば（図-4）、圧力流れの流出特性は変わらないことになる。

このことは、上流側マンホールにおける貯留量から同量の貯留水量を差し引くことが、上流側マンホールの断面積を減らすことに等しくなるよう、補正係数 α を導入することにより、次式のように表されることになる。

$$\Delta V_S = \Delta V_M \quad (10)$$

$$\Delta F_M = \alpha \times \Delta B_S \times L \quad (11)$$

$$; \Delta B_S = B'_S - B_S \quad (12)$$

$$F'_M = F_M - \Delta F_M \quad (13)$$

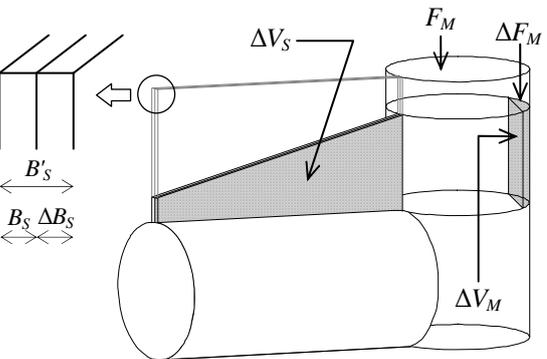
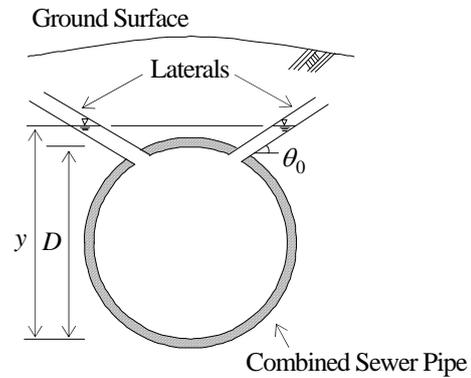


図-4 スロットと上流側マンホールの貯留量の調整

ここに、 ΔV_S ：スロット拡幅による余分な貯留量、 ΔV_M ：上流側マンホールから削減する貯留量、 ΔF_M ：上流側マンホール断面積の削減量、 α ：補正係数、 ΔB_S ：スロット拡幅量、 B_S ：基準スロット幅、 B'_S ：拡幅したスロット幅、 F'_M ：補正したマンホール断面積である。

スロットと上流側マンホールの貯留量の調整、すなわち上流側マンホールの断面積を減らす調整（操作）は、本来は、計算時間間隔 Δt 毎に、各下水管渠・マンホール毎に行われなければならない。

しかしながら、MOUSEモデルのソースプログラムにこれを組み入れることはできないので、実際問題として、上述したような補正（調整）は遂行できないこととなる。

ここでは、以下に述べるような、実用的な補正手法を考えた。

(4) 補正係数 α

今、流れは定常であるとする。流れ（流出）が図-5 (1) のようであるとき、式 (10)~(12) より、 $\alpha = 0.5$ となる。同様に、図-5 (2) のような流れでは、 $\alpha = 1.0$ 、図-5 (3) のような背水の効いた流れでは、 $\alpha > 1$ （上限値は 1.2 程度までと考えられる）となる。

実際の下水管渠における非常流れでは、各マンホール毎の α （値）は、上述した値の範囲で時々刻々に変化している。

ここでは、補正係数 α は、実用上の立場から、流出期間を通じて定数であると仮定する。すなわち、流出期間を通じて、図-5 に示した流れのいずれが主体を占めるかによって、 α を定数として定めるのである。

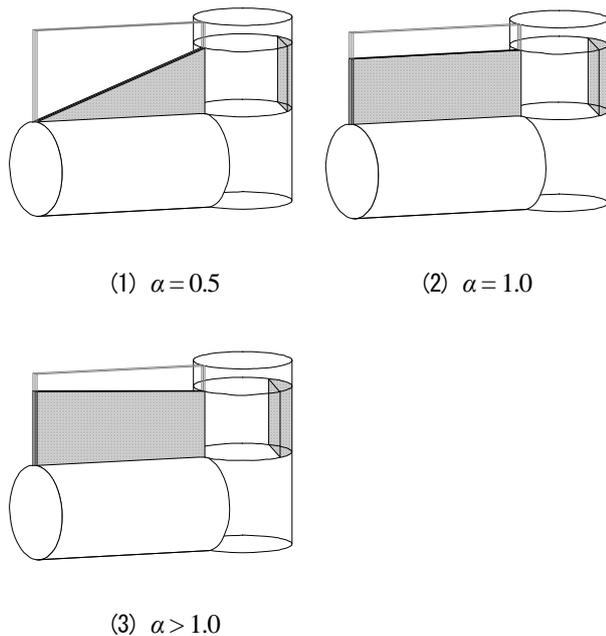


図-5 下水管渠流れと補正係数 α

(5) 水位低下補正手法の適用手順

上述した水位低下補正手法を用いた流出シミュレーションの計算手順を以下に示す。

STEP①：下水道管渠網内の各管渠の流れの状況を把握、もしくは、境界条件から流れの状況を推定し、各管渠の流れが流出期間を通じて、図-5 に示した流れのいずれが主体を占めるかによって、管渠毎に α を定める。

STEP②：補正したマンホール断面積 F'_M を式 (10)~(13) によって算出し、 F'_M から逆算したマンホールの直径をMOUSEへ入力し直す。

STEP③：水位低下補正手法を適用したシミュレーションを実施する。

4. 水位低下補正手法の有用性に関する数値実験

的検討

上述したMOUSE - スロットモデルの水位低下補正手法の有用性について、地下河川網（地下河川システム）を対象として数値実験による検討を行った。

(1) 地下河川システム

一般に、地下河川は土被りが大きく、1 区間（立坑間隔）当りの延長が長いため、立坑の貯留量に対してスロットの貯留量が相対的に大きくなる。そのため、スロット拡幅による計算水位低下が顕著に現れる。

本検討では、5 区間からなるプリズマティックな地下河川システム（表-2 および図-6）を対象とした。各区間の河川（円形断面）の長さは 1 000 m、直径は 10 m、勾配は 2 ‰、立坑の直径は 30 m ($F_M = 707 \text{ m}^2$) である。

表-2 地下河川システムの諸元

D (m)	L (m)	I_0 (‰)	T_G (m)	F'_M (m^2)	L_T (m)
10.0	1 000	2.0	60.00	707	5 000

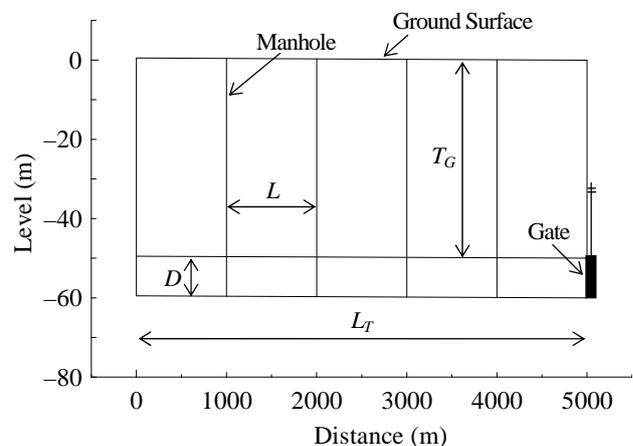


図-6 地下河川システムの概要

(2) 対象出水

流出シミュレーションには、各立坑へ洪水流入があり、下流端水位が一定に保たれる場合のサーチャージ流出（ケース1）と定常圧力流れの状態から下流端流入ゲートが遮断されることを想定したサーチャージ流出（ケース2）の2ケースを用いた。

ケース1（図-7）では、初期条件として定常圧力流れ（水深 $\approx 1.5 \times$ 管渠径、満管等流流量）を想定し、各立坑に sine 型洪水（周期 $T = 60$ 分、ピーク流量 = $4.2 \times$ 満管等流流量）を流入させた。また、下流端境界条件として一定水位を与えた。

ケース2（図-8）では、初期条件として定常圧力流れ（水深 $\approx 2.5 \times$ 管渠径、満管等流流量）を想定し、上流端境界条件として洪水ハイドロ、下流端境界条件としてゲート遮断 ($Q = 0$) を与えた。

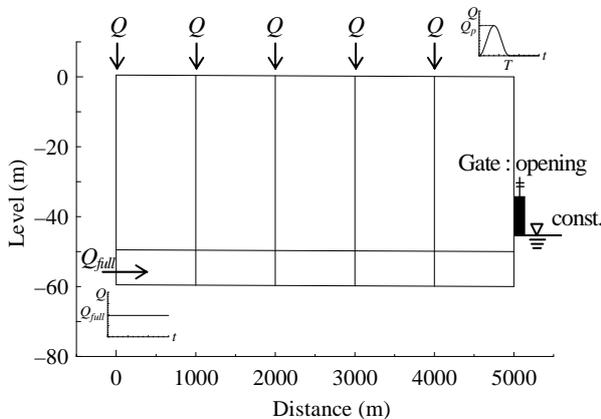


図-7 シミュレーション条件（ケース1：下流端ゲート開）

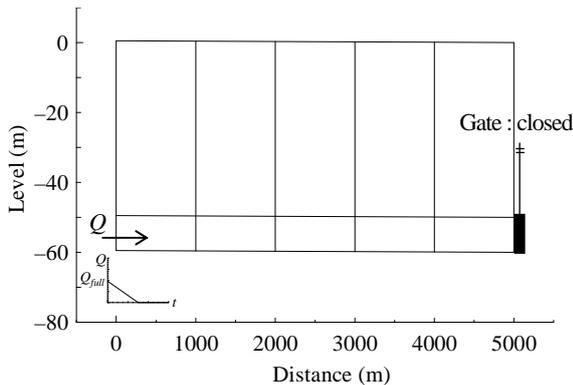


図-8 シミュレーション条件（ケース2：下流端ゲート閉）

表-3 圧力波の伝播速度とスロット幅

a (m/s)	1000	500	200	100	88	50
B_S (mm)	0.7	3	19	70	100	300
B_S/D	7×10^{-5}	3×10^{-4}	1.9×10^{-3}	7×10^{-3}	1×10^{-2}	3×10^{-2}
Δt (s)	0.2	0.4	1.0	1.5	2.0	3.0

(3) 流出シミュレーション結果

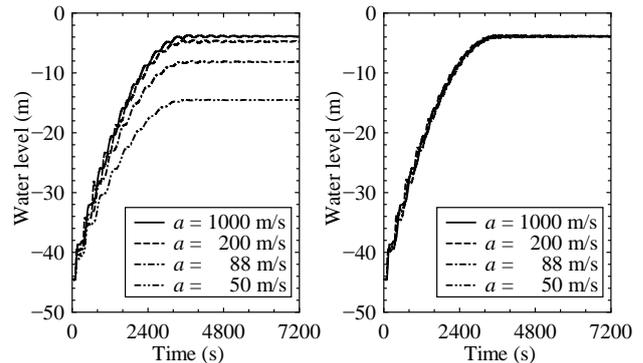
圧力波の伝播速度 $a = 1000$ m/s のときのスロット幅を基準スロット幅 B_S とし、 $a = 500, 200, 100, 88, 50$ m/s について、水位低下補正なしの場合と水位低下補正ありの場合の流出シミュレーションを行った。

ここで、圧力波の伝播速度とスロット幅の関係を表-3に、補正ありの場合の ΔF_M および補正後のマンホール断面積 F'_M を表-4 に、ケース2のシミュレーション結果（補正なし、補正あり ($\alpha = 1.0$)）の内、地下河川システム上流端立坑及び下流端立坑の水位ハイドログラフを図-9 及び図-10 に示す。

また、伝播速度 $a = 1000$ m/s のときのシミュレーション結果を基準とし、上流端立坑のピーク水位誤差（式 (14)）を算出した結果を図-11 および図-12 に示す。

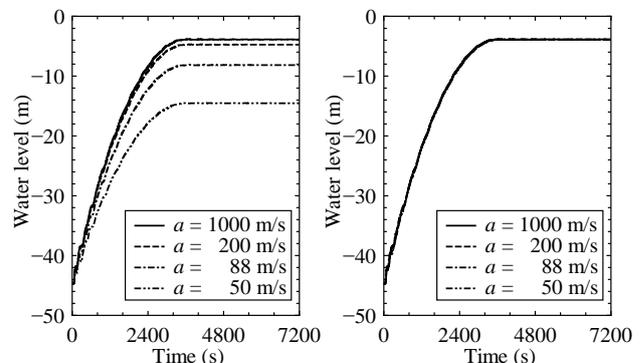
表-4 上流側マンホール断面積削減量

a	$\alpha = 0.5$		$\alpha = 0.75$		$\alpha = 1.0$	
	ΔF_M	F'_M	ΔF_M	F'_M	ΔF_M	F'_M
500	1.2	705.7	1.7	705.1	2.3	704.6
200	9.2	697.7	13.7	693.1	18.3	688.6
100	34.7	672.2	52.0	654.9	69.3	637.6
88	49.7	657.2	74.5	632.4	99.3	607.6
50	149.7	557.2	224.5	482.4	299.3	407.6



(a) 補正なし (b) 補正あり ($\alpha = 1.00$)

図-9 地下河川システム上流端立坑の水位ハイドログラフ（ケース2）



(a) 補正なし (b) 補正あり ($\alpha = 1.00$)

図-10 地下河川システム下流端立坑の水位ハイドログラフ（ケース2）

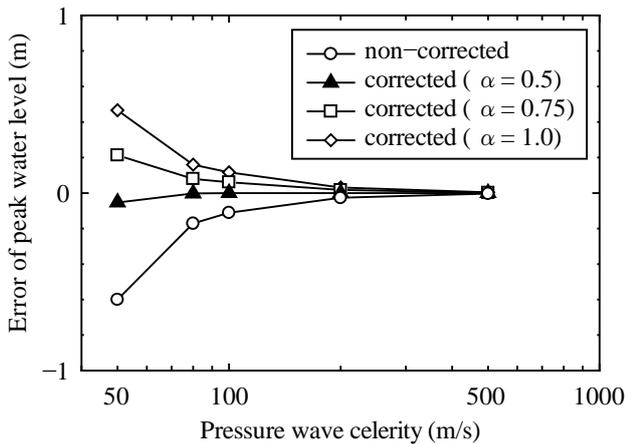


図-11 上流端立坑のピーク水位誤差 (ケース1)

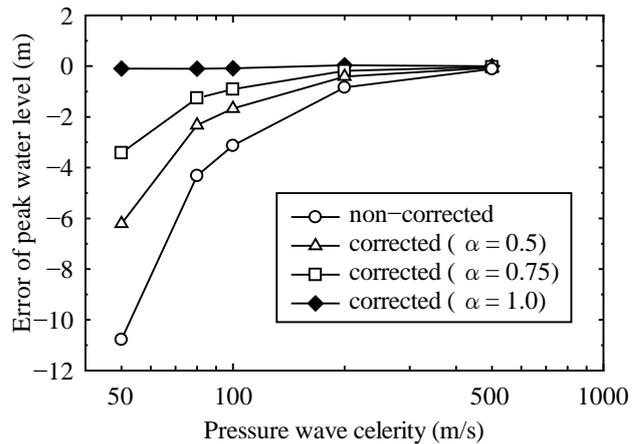


図-12 上流端立坑のピーク水位誤差 (ケース2)

$$Error = H_C - H_O \quad (14)$$

ここに、 $Error$: ピーク水位誤差, H_O : 圧力波の伝播速度 $a = 1000$ m/s の場合のピーク水位, H_C : 圧力波の伝播速度 $a = 500, 200, 100, 88, 50$ m/s の場合のピーク水位である。

(4) 考察

① 図-9 ~ 図-12 より, 本論文で提案する手法による補正を行うことで, 全シミュレーションを通じて, 水位ハイドログラフの低下の改善が見られた。

② 図-11 より, ケース 1 では, すなわち下流端水位 (放流先水位) が一定に保たれているような出水 (流出) では, $\alpha = 0.5$ のとき, 計算水位ハイドログラフの水位低下はほぼ解消されてくることが分かる。

すなわち, 下流端水位 (放流先水位) が一定に保たれているような地下河川システムにおける出水では, $\alpha = 0.5$ が適値であることが分かった。

③ また, ケース 1 において, $\alpha = 0.75, 1.0$ の場合にピーク水位の誤差が正の値となっている。これは, 上流側マンホールの削減貯留量が, スロット幅を広げたことによって余分にスロットに貯められた貯留量よりも多いことを示している。

④ 図-12 より, ケース 2 では, すなわち下流端ゲートが急閉塞されるような流出 (出水) では, $\alpha = 1.0$ の場合, 計算水位ハイドログラフの低下がほぼ解消されてくることが分かる。

したがって, 下流端ゲートが急閉塞されるような地下河川システムにおける出水 (流出) では, α の適値は 1.0 であると考えられる。

5. 結論

本論文では, MOUSEモデルによる流出計算において, スロット幅を広げることによって計算水位が低下する問題について, 水位低下補正手法を提案し, 本手法の有用性に関する検討を行った。

その結果, 地下河川システムの雨水流出解析 (圧力流れの解析) において, 本論文で提案した水位低下補正手法を適用すれば, 圧力波伝播速度 a が 50 m/s に対応する広さまでスロット幅を広げて (計算時間間隔 Δt に従来より大きい値を採用して) 流出シミュレーションを行っても, 水位ハイドログラフを低下させることなく, 精度高い流出シミュレーションを遂行できることが分かった。

参考文献

- 1) Danish Hydraulic Institute : MOUSE PIPE FLOW Reference Manual, pp.3.1-3.7, 2003.
- 2) Chaudhry, M. H. : Applied Hydraulic Transients, pp. 34~39, VNR Company, 1979.
- 3) 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, No411/II-12, pp. 81~90, 1989.
- 4) 渡辺政広, 栗原 崇, 時尾嘉弘, 藤田和博 : 下水道管渠網・地下河川網におけるマンホール・立坑の水理学的役割, 水工学論文集, 第38巻, pp. 525~530, 1994.
- 5) Pandit Saroj KUMAR, 重田尚秀, 岡 佳宏, 渡辺政広, 川崎達 : スロット・モデルの適用性の向上に関する検討, 水工学論文集, 第52巻, pp. 877~882, 2008.
- 6) Ukon, T., et al : Correction methods for dropping of simulated water level utilising Preissmann and MOUSE slot models, Proc. 11th Int. Conf. on Urban Drainage, CD-ROM, 2008.

(2008. 9. 30受付)