

12. 市街地における高精度浸水解析システムの開発評価

水害研究室 室 長 中村 徹立
 主任研究官 野仲 典理
 研 究 官 山岸 陽介
 交流研究員 大森 嘉郎
 交流研究員 松浦 祐樹

1. はじめに

近年多発する都市型水害の被害対策推進のため、平成 16 年 5 月より特定都市河川浸水被害対策法が施行されており、現在各地で同法に基づいた都市浸水想定区域（内水氾濫）や都市洪水想定区域（外水氾濫）の指定が検討されている。その際には、地表面での氾濫現象、下水道等による影響を同時に解析可能なモデルを用いて、都市域特有の現象を考慮した解析を行うことが不可欠である。国総研水害研究室では、下水道の中の流れと地表面の氾濫を一体的に解析可能な都市域氾濫解析モデル(以下、NILIM モデル)の開発を行ってきた。一方、下水道を考慮した氾濫現象は、マンホール部における溢水・流入現象や地表面湛水がこれらの現象に与える影響など、複雑で未解明な水理現象が多く残されており、それらの実態解明とそれを踏まえた解析モデルへの反映が求められている。本検討は、水理模型実験によりマンホール部における複雑な水理現象を把握するとともに、溢水・流入現象の解析モデル上での表現方法について考察する。

2. 水理模型実験

2.1 実験の目的

下水道を考慮した氾濫現象は、下水道管路内から地表面へ溢水する現象、地表面で湛水または流下する現象、地表面から下水道へ流入する現象からなり、水理現象を規定する水頭(エネルギーまたはピエゾ)は、下水道管路内水頭と地表面水頭の 2 つが存在すると考えられる(図-1)。この 2 つの水頭は各々の地点の状況に伴って独立または相互に関与し合うこととなり、非常に複雑な現象となる。本検討では、マンホール部における溢水・流入量が、地表面および下水道管路内の水頭によって、どのように規定されるかを水理模型実験により確認し、解析モデルにおける適用方針を示すことを目的とした。

2.2 実験模型の概要

水理模型実験施設は、高さの異なる上下 2 つの氾濫水路と直径 200mm の水平管を設け、直径 200mm の垂直管で接続したものである(図-2)。実験装置は、基本的に既往検討¹⁾と同様であるが、水平管内の乱れを抑えるために、水平管上流接続導水管の直進部分を延伸するとともに整流壁を設置した。

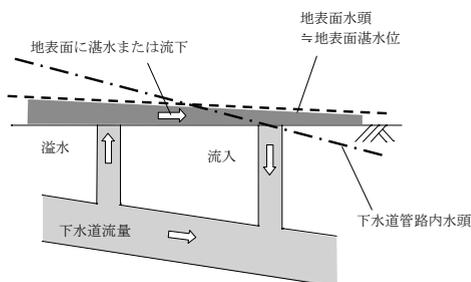


図-1 下水道を考慮した氾濫現象

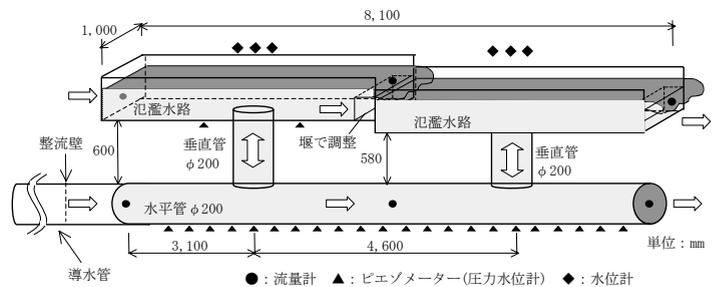


図-2 実験模型の概要

2.3 実験ケース

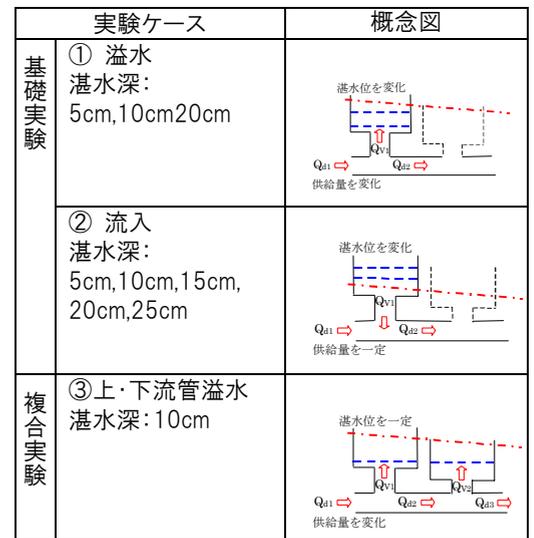
実験では、上流側垂直管だけを用いた基礎実験で溢水・流入量の特性を把握し、上下流の垂直管を用いた複合実験で基礎実験より得られた特性の検証を行うこととした。

実験ケースは図-3に示すように、基礎実験として①溢水、②流入、複合実験として③上・下流管溢水を設定した。また、基礎実験の場合は、垂直管と氾濫水路の接合部に管径5cmとなる蓋を設置した場合（垂直管管径5cm）と設置しない場合（垂直管管径20cm）の2パターン実施した。なお、垂直管流量と水平管流量の比（溢水 $q_\beta = Q_{v1}/Q_{d1}$ 、流入 $q_\beta = Q_{v1}/Q_{d2}$ ）は垂直管管径5cmの場合は $q_\beta = 0.02 \sim 0.12$ 、垂直管管径20cmの場合は $q_\beta = 0.09 \sim 0.37$ である。

2.4 実験結果

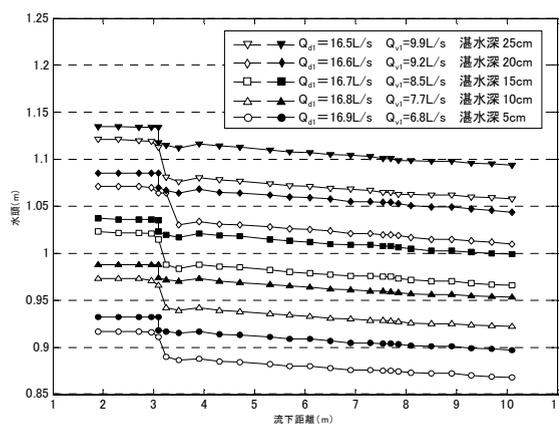
・溢水・流入現象時のエネルギー水頭及びピエゾ水頭の変化

図-4は、垂直管管径20cmの場合の水平管におけるエネルギー水頭及びピエゾ水頭の実験値である。実験①のピエゾ水頭は垂直管からの溢水により垂直管下流側の流量が減少するため、垂直管下流側は溢水前より概ね速度水頭分だけ高い値を示している。また、エネルギー水頭は溢水による流量の減少に伴い垂直管下流側で勾配が緩やかとなるものの、垂直管接合部において水平管直進方向の損失は少なく顕著な段差はついていない。実験②のピエゾ水頭は氾濫水路からの流入により、垂直管下流側の流量が増加するため、実験①とは逆に流入前よりも速度水頭分だけ低い値を示している。また、エネルギー水頭は合流による流量の増加に伴い垂直管下流側で勾配が若干急になるとともに、垂直管接合部において水平管直進方向に合流に伴う損失による段差が生じている。管径5cmの場合は溢水・流入量が小さいため、水平管直進方向においてピエゾ水頭の段差は小さいものの溢水・流入現象については垂直管管径20cmの場合と同様の傾向が示された。なお、実験③の複合実験でも、溢水・流入現象については基礎実験と同様の傾向が示された。

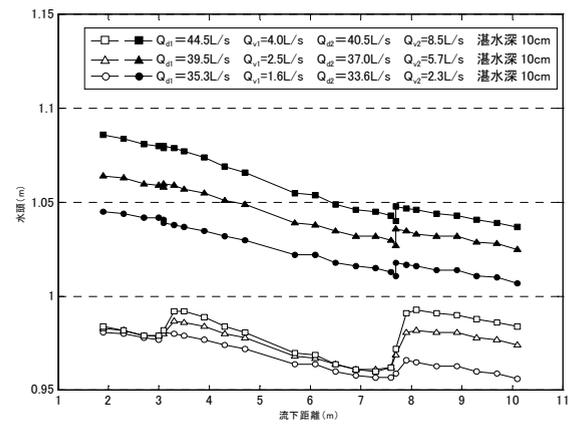


--- 地表面水頭 --- 下水道管路内水頭

図-3 実験ケース



実験②流入



実験③上・下流管溢水

図-4 エネルギー水頭・ピエゾ水頭縦断面図(白:ピエゾ水頭、黒:エネルギー水頭)

2.5 垂直管からの溢水・流入量の推定

図-4 より、垂直管接合部における水平管直進方向の段差に伴い溢水・流入量も増減していることから、溢水・流入量は垂直管接合部における水平管と湛水位との水頭差 (Δh) により規定されると考え、両者の関係を整理した。ここで、溢水のピエゾ水頭の場合と流入のエネルギー水頭及びピエゾ水頭の場合は垂直管接合部において水平管直進方向に段差が現れるため、垂直管接合部の水頭を上下流のデータから推定することとし、「 Δh_1 : 下流から推定」「 Δh_2 : Δh_1 と Δh_3 の平均 (段差の平均)」「 Δh_3 : 上流から推定」の3パターン設定した (図-5)。

1) 基礎実験 (実験①、②)

図-6 及び図-7 は、溢水・流入量と水頭差 (Δh 、エネルギー水頭及びピエゾ水頭) の平方根の関係をそれぞれ垂直管管径 20cm の場合と 5cm の場合で表したものである。その結果、溢水・流入量は、水頭差 (Δh) の平方根に比例する傾向が見られ、オリフィス式 ($Q=CA\sqrt{2g\Delta h}$) で近似できる可能性が示唆された。ここで、オリフィス式の流量 と水頭差 は、切片を持たない線形関係 ($Y=AX$) であることを考慮すると、切片が 0 に近く、相関関

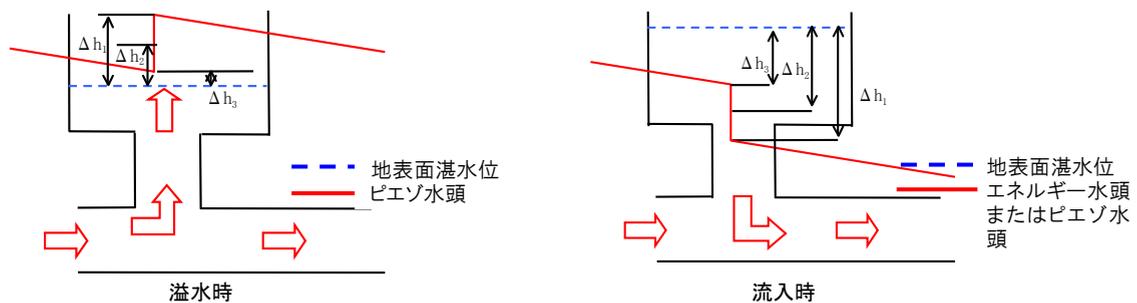


図 2-5 Δh の考え方

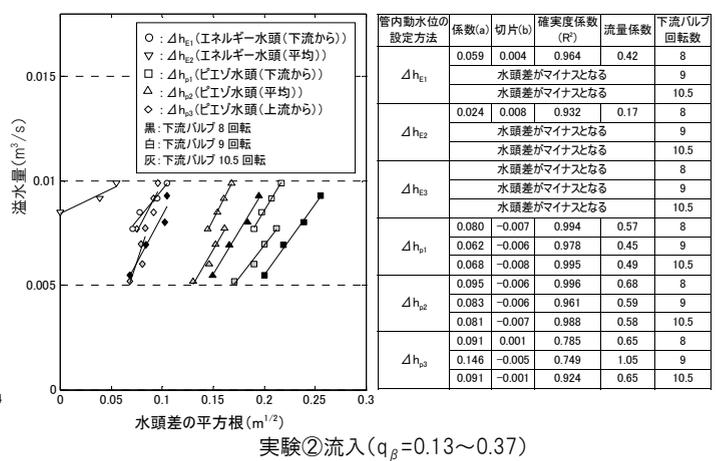
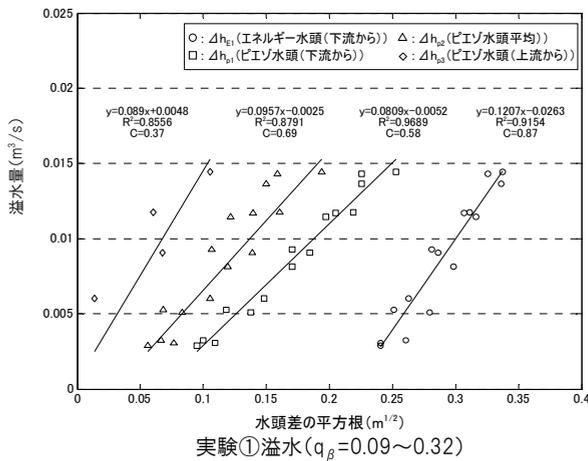


図-6 水頭差 (エネルギー水頭及びピエゾ水頭) の平方根と溢水・流入量の関係 (垂直管口径 5cm)

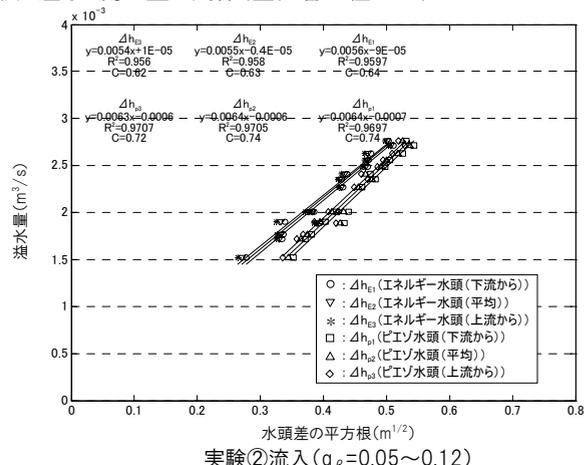
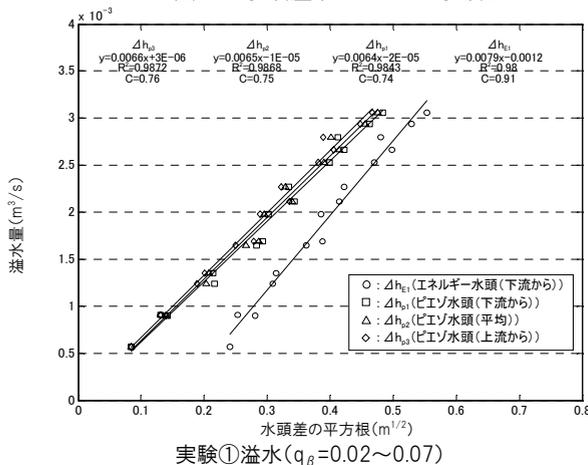


図-7 水頭差 (エネルギー水頭及びピエゾ水頭) の平方根と溢水・流入量の関係 (垂直管口径 20cm)

係が高いものがより同式で近似できる推定方法であると考えた。図-6の実験①(溢水)より、垂直管管径 20cm の場合はエネルギー水頭差、ピエゾ水頭差のいずれの場合も相関関係が認められ(確実度係数 0.85 以上)、切片が 0 に最も近いのはピエゾ水頭の段差の平均「 Δh_{p2} 」となった。一方、実験②(流入)の場合も切片が 0 に近く、また相関関係が認められるのは実験①(溢水)と同様にピエゾ水頭差とした場合の「 Δh_{p2} 」となった。(確実度係数 0.96 以上)なお、実験②(流入)のエネルギー水頭差の場合、下流バルブの回転数によって水頭差がマイナスとなっており、流れが逆になるという不都合な結果が生じた。

図-7より、垂直管管径 5cm の場合は、溢水・流入量が小さいため水頭差がほとんどつかず、エネルギー水頭差、ピエゾ水頭差のいずれも「 Δh_1 」「 Δh_2 」「 Δh_3 」に差がほとんど認められなかった。また、エネルギー水頭差、ピエゾ水頭差のいずれの場合も相関関係が認められ(確実度係数 0.95 以上)、切片も概ね 0 となった。

2) 複合実験(実験③)

実験③についても、実験①と同様に溢水量と水頭差(エネルギー水頭及びピエゾ水頭)の平方根の関係を整理したところ上流側垂直管におけるエネルギー水頭差の場合を除き、溢水量は実験①で得られた関係式で規定されることが示唆された。ここで、実験③における上流側垂直管のエネルギー水頭差の場合のみが実験①で得られた関係式から外れることを精査するため、実験①と③において水平管への流入流量 Q_{d1} が概ね同じケースのエネルギー水頭及びピエゾ水頭の縦断面図を整理した(図-8)。図7より、実験①と③の上流側垂直管の溢水量が異なっているにも係らず、水平管内のエネルギー水頭差は概ね同じとなっている。一方、ピエゾ水頭差は、実験①と実験③で異なっている。このことは、溢水量がエネルギー水頭差ではなく、ピエゾ水頭差により規定されることを示唆している。

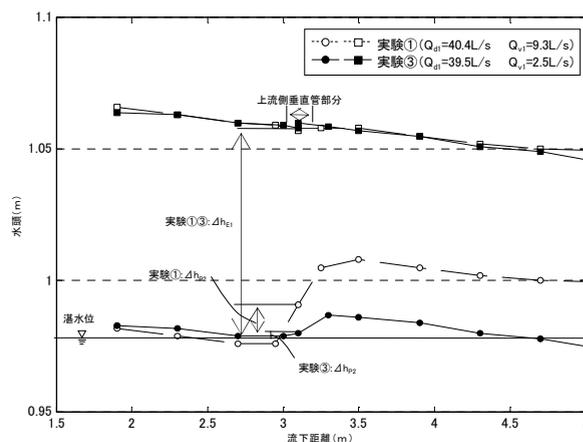


図 2-8 エネルギー水頭・ピエゾ水頭縦断面図
(実験①溢水と実験③上・下流溢水)

3. NILIM モデルによる実験の再現計算

3.1 NILIM モデルにおけるマンホール等からの溢水・流入の計算モデル

NILIM モデルのマンホール等からの溢水・流入の計算においては、下水道管路内水頭または地表面水頭から下流側の下水道可能最大流量 (Q_{max}) を仮定し、上流側下水道からの流入量、地表面からの流入量の収支を計算することにより、マンホール等からの溢水・流入量の計算を行っている(図-9)。 Q_{max} は(1)式で、マンホール部での連続式は(2)式で与えている。

$$\text{運動方程式: } Q_{max} = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{連続式: } Q_{in} + Q_v = Q_{out} \leq Q_{max} \quad (2)$$

Q_{max} : 下水道可能最大流量	A : 下水道の通水断面積
Q_{out} : 下水道流量	I : 下水道可能最大流量算出勾配
Q_{in} : 上流側下水道及び地表面からの流入量	n : 下水道の粗度係数
Q_v : マンホール等からの溢水・流入量(流入を正とする)	R : 下水道の径深

また、 Q_{max} は、地表面に湛水が存在する場合には、湛水の影響を受けることが考えられる。そのため、図-10に示すように、 Q_{max} の算定で用いる動水勾配 (I) は、上流側は管路内水位と湛水位の高い方を、下流側は管路内水位を採用することによって、動水勾配を算定することとしている。

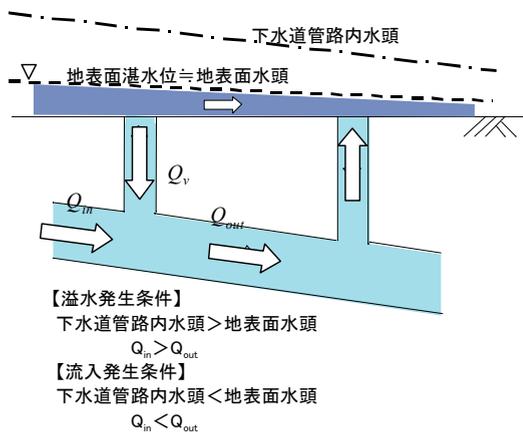


図9 マンホール等からの溢水・流入の計算モデル

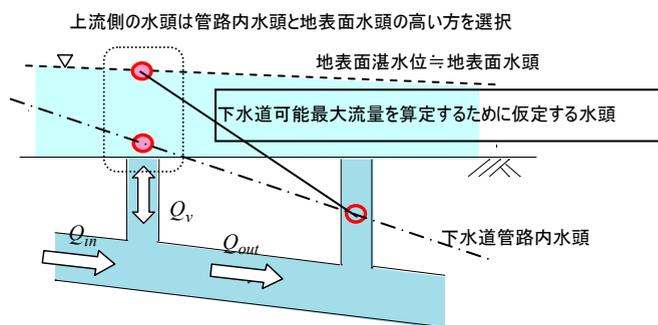


図10 下水道可能最大流量算定に用いる水頭差

3.2 計算結果

表-1 及び表-2 に、上流垂直管からの溢水量・流入量を NILIM モデルにより再現計算を行った結果を示す。また、管路内動水位の再現結果を図 3-3 及び図 3-4 に示す。溢水状態の再現計算で Q_{max} の算定に採用した動水位は、上流側では実験から得られた管路内動水位が湛水位を上回っているため管路内動水位を採用し、上下流側とも管路内動水位から勾配を算出した。一方、流入状態の再現計算では、実験から得られた上流側の管路内動水位は常に湛水位より下回っていたため、上流側は湛水位、下流側は管路内動水位により勾配を算定した。

溢水状態・流入状態の共通点として、水理模型実験では、溢水・流入に伴い、垂直管の前後で流量が変化することにより管路内動水位に段差が生じているが、NILIM モデルによる再現計算ではこの段差が表現されていない。この要因としては、NILIM モデルでは、管路内の速度水頭などのエネルギーを考慮せず、計算の境界条件となるマンホール等で上下流の管路内動水位を連続条件として計算している点が挙げられる。

溢水状態の再現計算では、図 3-3 に示すとおり、NILIM モデルによって計算される管路内動水位・溢水量・管路流出流量は実測値を概ね再現していると言える。しかし、溢水が発生している上流側垂直管での管路内動水位の計算値は実測値よりも若干低い値となった。そのため、 Q_{max} の算定勾配が実験結果から得られた算定勾配よりも小さくなったことに伴い、 Q_{max} も過小に評価され、計算で得られた溢水量は、実験から得られた溢水量よりも全体的に過大に評価されている。

流入状態の再現計算においては、図-12 に示すように、NILIM モデルによって計算される管路内動水位・流入

表-1 基礎実験(溢水)の流量再現結果

実験ケース	湛水深	管路流入流量	実験による測定値(m ³ /s)		NILIMによる解析値(m ³ /s)	
			溢水量(上流側)流量	管路流出流量	溢水量(上流側)流量	管路流出流量
溢水①	5cm	0.03299	0.00305	0.02994	0.00822	0.02477
溢水②	10cm	0.03369	0.00287	0.03082	0.00546	0.02823
溢水③	20cm	0.03684	0.00323	0.03361	0.00973	0.02711

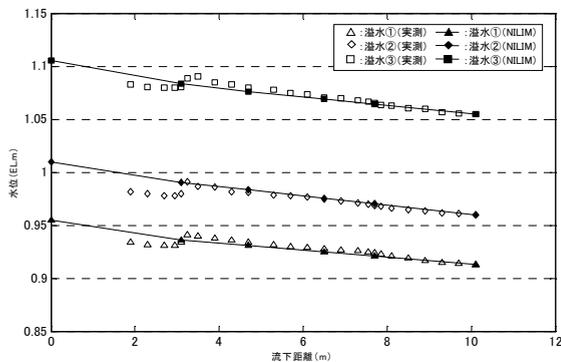


図-11 基礎実験(溢水)の管路内動水位再現結果

表-2 基礎実験(流入)の流量再現結果

実験ケース	湛水深	管路流入流量	実験による測定値(m ³ /s)		NILIMによる解析値(m ³ /s)	
			流入量(上流側)流量	管路流出流量	流入量(上流側)流量	管路流出流量
流入①	5cm	0.01689	0.00722	0.02367	0.02411	0.04100
流入②	10cm	0.01681	0.00769	0.02450	0.02291	0.03972
流入③	15cm	0.01667	0.00848	0.02515	0.02465	0.04132
流入④	20cm	0.01664	0.00915	0.02579	0.02836	0.04500
流入⑤	25cm	0.01654	0.00989	0.02643	0.02949	0.04603

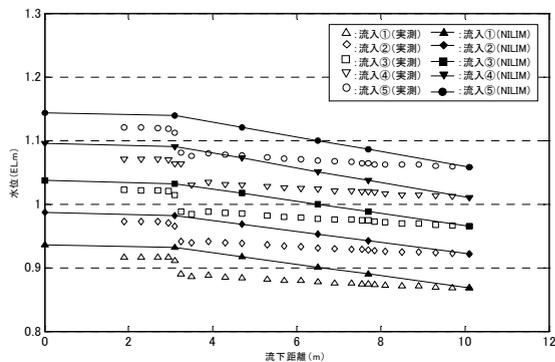


図-12 基礎実験(流入)の管路内動水位再現結果

量・管路流出流量は、実験結果を再現しているとは言えない。特に、管路内動水位は、流入が発生している上流側垂直管で大きく乖離している。これは、 Q_{max} を算定するための勾配を仮定する際に、上流側は湛水位と管路内動水位の高い方、下流側については管路内動水位により勾配を算定するため、実際には上流側の管路内動水位は湛水位よりも低いにもかかわらず、常に高い方である湛水位を採用していることから、下水道可能最大流量 Q_{max} が過大に評価され、計算で得られる管路内動水位についても過大に評価される結果となった。 Q_{max} が前述のように過大に評価されることにより、流入量・管路流出流量も実験から得られた流量に対して、大きく乖離することが確認された。

そこで、 Q_{max} を算定する勾配の上流側水頭を「湛水位－水平管路内速度水頭」として考え、再度、基礎実験（流入）の再現計算を行った。再現計算結果を表-3 及び図-13 に示す。 Q_{max} 算定の勾配を見直した結果、従来の Q_{max} 算定方法の場合の再現計算結果よりも実験で得られた流入量・管路流出流量に近い値を算定することが可能となった。また、管路内動水位についても従来の Q_{max} 算定方法による再現計算で見られた上流垂直管での管路内動水位の乖離が大幅に改善されたことから、計算される管路内動水位、管路流出流量は、実測値を概ね再現することができた。

4. おわりに

本検討の結果より、以下の結論を得た。

- (1) 管路流はエネルギー水頭で解析することが基本であるが、垂直管からの溢水・流入量は水平管内のピエゾ水頭と地表面湛水位との水頭差 Δh の平方根に比例する傾向が得られ、オリフィス式 ($Q=CA\sqrt{2g\Delta h}$) で溢水・流入量を近似できる可能性が示唆された。
- (2) 溢水・流入量をオリフィス式で近似する場合、垂直管からの溢水・流入による水平管内の流量（流速）の増減によりピエゾ水頭に段差が生じるため、ピエゾ水頭の段差の平均値と地表面湛水位との水頭差 (Δh) の平方根を用いると溢水・流入量と水頭差の平方根 $\sqrt{\Delta h}$ の近似式が原点に近く、高い相関関係が得られた。
- (3) 溢水量算定については NILIM モデルによって概ね実験の再現は可能であることが示唆された。一方で、流入量算定については当初の仮定では再現性は低かったが、 Q_{max} を算定する勾配の上流側水頭を「湛水位－水平管路内速度水頭」に見直すことによって、水理模型実験で得られた流入量の再現が可能になることが示唆された。
- (4) 都市域氾濫解析モデルにおいて下水道からの溢水・流入現象を再現する際には、マンホール部の下水道内圧力水頭（ピエゾ水頭）の段差を考慮するために、ピエゾ水頭に速度水頭を加えたエネルギー水頭を連続させることが望ましいと考えられる。ただし、実際の下水道内の複雑な流れを再現する上で、ピエゾ水位の段差が溢水・流入量に及ぼす影響等を十分に把握した上でモデルを構築していく必要がある。

【参考文献】

- 1) 野仲典理 他：下水道を考慮した都市域氾濫解析モデルの実験的検討、土木学会第 61 回年次学術講演概要集、2006 年 9 月

表-3 Q_{max} 算定方法を見直した基礎実験(流入)の流量再現結果

実験ケース	湛水深	管路流入流量	実験による測定値(m ³ /s)		NILIMによる解析値(m ³ /s)	
			流入量(上流側)	管路流出流量	流入量(上流側)	管路流出流量
流入①	5cm	0.01689	0.00722	0.02367	0.01196	0.02885
流入②	10cm	0.01681	0.00769	0.02450	0.00916	0.02597
流入③	15cm	0.01667	0.00848	0.02515	0.01138	0.02805
流入④	20cm	0.01664	0.00915	0.02579	0.01334	0.02998
流入⑤	25cm	0.01654	0.00989	0.02643	0.01356	0.03010

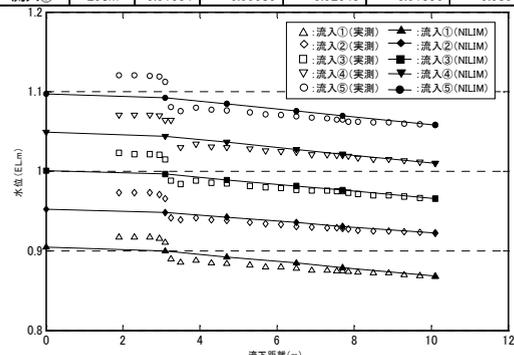


図-13 Q_{max} 算定方法を見直した基礎実験(流入)の管路内動水位