

下水管路の水位上昇特性に着目した 排水施設制御のための水位観測地点選定手法の提案

近藤浩毅・岩崎宏和・松浦達郎

1. はじめに

近年、降雨の局地化・集中化・激甚化や都市化の進展により、内水氾濫リスクが増大している。しかし、浸水対策施設の整備には多くの費用・時間を要し、さらにあらゆる降雨への対応は困難である。計画を上回る降雨に対しては、既存ストックの能力を適切に評価し機能を最大限活用するとともに、施設操作の改善等のきめ細やかな対策により粘り強い効果を発揮するための、水位観測情報の活用が求められている。

下水道による内水氾濫対策ではこれまで水位観測に関する運用情報が乏しく、機器の選定や設置場所に関する知見が不十分であった。このため、国土交通省ではガイドライン¹⁾の公表等、水位観測情報の活用推進に向けて取り組んでいる。

一般的に雨水ポンプでは、ポンプ井の水位に基づき運転を行っているが、局所的な降雨による急な流入量増加への対応が困難な場合があるため、上流管路の水位に基づいて運転条件を変更する等の柔軟な制御が望まれている。しかし、下水管内の水位は急激に変化し、さらに満管状態と自由水面状態で挙動が異なるため、水位情報の活用は容易ではなく、定まった手順が存在していない。

本研究では、下水道管路内の水位情報を用いて雨水ポンプを制御する際の水位観測地点設定手法の明確化を目的に、水位上昇タイミングの早さ等に着眼し、水位観測地点の選定に求められる要件を整理した。また、モデル排水区を対象とした要件の検証および水位観測地点選定手順を提案した。

2. 水位観測地点に求められる要件

2.1 雨水ポンプ運転制御の考え方

浸水対策の観点からは、早期にポンプを起動するために起動水位を低く設定することが効果的と考えられる。しかし、常に起動水位を低くすると、

小降雨時における運転時間の増加や、起動停止回数の増加等の、機械設備およびエネルギー消費への負の影響が懸念される。

そこで本研究では、上流の下水管内の水位情報を用いて雨水ポンプを制御するものとした。

2.2 水位観測地点に求められる要件

ガイドライン¹⁾では、ポンプ等の運転制御のための水位観測地点は、施設内の水位との連動性があり、事前操作など施設運転に反映可能な地点が望ましいとされている。具体的に浸水対策を目的としたポンプ運転条件の切替えにおいては、運転開始条件に相当する流入がポンプ場へ到達するよりも前に、管路内の水位を用いた判断が求められる。さらに、余裕を持った制御のためには、判断のタイミングは早い方が望ましい。したがって、管路内の水位観測地点に求められる要件としては、水位上昇がポンプ井におけるポンプ起動水位よりも早期で、かつ下水管路内の他地点よりも「水位上昇タイミングが早いこと」が挙げられる。

また、管内水位は降雨の移動や流域内での偏在に影響を受け、水位上昇タイミングにばらつきが生じることが考えられる。これが大きいと、水位情報の活用にあたり複数の観測地点が必要となるなど、施設制御が複雑になる場合が想定される。したがって、観測地点を絞り込む必要がある場合は、移動降雨による影響について確認することが必要であると考えられる。

水位観測地点がポンプ場に近い場合、ポンプ起動時間の確保は困難であるが、降雨の移動・偏在に影響されにくい。逆に遠い場合は、リードタイムを確保しやすいが、降雨位置に影響を受け水位上昇の遅れが生じる可能性が予想される。なお、これらの要件以外にも、豪雨と通常運転で排水可能な降雨を判別可能なことや、急曲線や段差等の局所的な水流の乱れや施工・維持管理上の問題が少ないこと等が求められると考えられる。

2.3 水位上昇タイミングの早さの簡易判定方法

降雨時における下水管内水位の上昇タイミングを正確に算出するためには、不定流計算等を行う

Proposal of a Water Level Observation Points Setting Method for Drainage Facility Control Using the Characteristics of Water Level Rise in Sewer Pipes

必要があり、手間を要する。そこで本研究では、管内における水位上昇タイミングが早い地点を、勾配に着目することで簡易的に抽出する方法について検討した。

管路勾配は管路の流下能力に影響を与え、勾配が小さいほど流下能力も小さく、一定の流量時の水位は大きくなる。ただし、既存の幹線において、降雨時の流下能力が不足する場合は、圧力状態となり水位がさらに上昇するため、管路勾配だけでは水位の上昇し易さを表すことはできない。

そこで本研究では、管路勾配に加え、計画流量と管径により求まる動水勾配の値を比較することで、条件が異なる管路の間でより早期に一定の水深になる地点を判定することを試みた。また、これらの指標を用いて選定した地点が、降雨時に水位上昇のタイミングが早い地点かどうかを、解析により確認することで、指標の有効性を検証した。

3. モデル排水区を対象とした検証

3.1 検証方法

先に挙げた要件について、モデル排水区(329ha、合流式)を対象とした検証を行った。検証には、水文解析、管内水理解析、地上の氾濫解析が可能であり、下水道施設の計画、設計に一般的に用いられているInfoWorks ICM²⁾を使用した。モデルは過去にキャリブレーション済みのものを用い、解析時間間隔は1秒、結果出力は1分間隔とした。

3.2 モデル排水区の概要

モデル排水区の雨水は、雨水幹線(管径φ1.1～馬蹄形2.3×2.07m、延長3.8km)および雨水ポンプ場(雨水ポンプ5台、起動時間70秒、合計排水量11.55m³/s)により排除される。なお、幹線内には、No.0～No.9の水位計が既設済みである。図-1にモデル排水区平面図を、図-2に雨水幹線縦断図を示す。

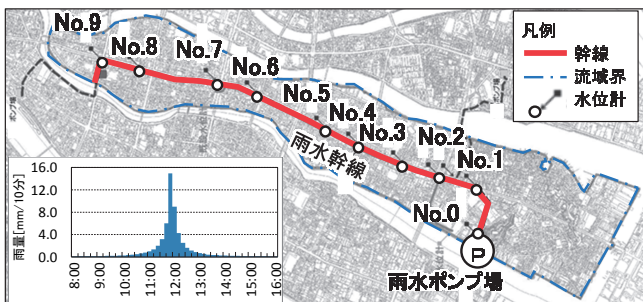


図-1 モデル排水区平面図および検討対象降雨

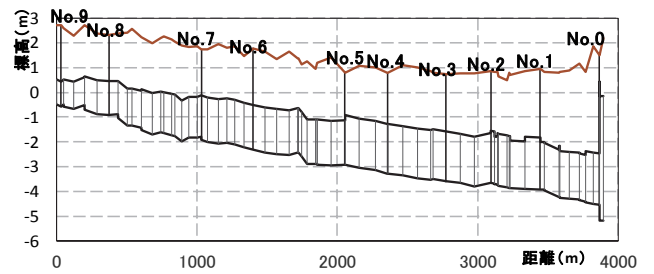


図-2 モデル雨水幹線縦断図

3.3 検討対象降雨の設定

検討対象降雨は、モデル排水区の計画降雨を参考に、既存施設の能力を上回る中央集中降雨(時間雨量39.9mm、総雨量58.6mm、図-1左下)とした。さらに、流域全体に一樣な降雨の他に、降雨移動の影響を検証するため、流域を上・中・下流に3分割し、上流から下流等の順に15分または30分ずつ時間差をもって降雨を開始させることで、降雨の移動を再現した6パターンの降雨を用いた。

3.4 水位上昇タイミングの早さの検証

3.4.1 水位観測地点の選定

表-1に、水位計設置地点における対象雨水幹線の判断材料である、計画流量に対する下流端からの平均動水勾配、および下流端からの平均管路勾配をそれぞれ示す。No.3地点は、管路勾配が小さい地点の上位、および動水勾配が大きい地点の上位の両方に該当することから、この地点が他の地点と比べ降雨時の水位が高く、早期に水位が上昇する可能性が高いことが示唆された。

3.4.2 検証結果

表-2に、ポンプ井の水位が現状運転での起動水位に到達した時刻(以下「ポンプ起動時刻」という。)と、No.1～6地点において4、5、6割の水深に到達した時刻の差を示す。水深が大きくなるにつれ、また特に下流から上流へ移動する降雨に対しては、ポンプ起動時刻よりも水位上昇が遅れる地点が増加する。その中でNo.3地点は、観測地

表-1 雨水幹線諸元

観測位置	追加面積 (ha)	最長延長 (m)	流達時間 (分)	勾配 (%)	下流端からの勾配	
					平均管路勾配 (%)	平均動水勾配 (%)
No.9	186.3	1309.5	19.1	-5.5	0.0010	0.0119
No.8	217.8	1701.0	22.1	-0.2	0.0010	0.0119
No.7	260.9	2333.9	26.2	1.7	0.0009	0.0114
No.6	273.9	2745.3	28.9	1.4	0.0009	0.0123
No.5	310.1	3417.7	33.4	1.4	0.0009	0.0137
No.4	338.9	3726.4	35.4	0.8	0.0008	0.0148
No.3	362.9	4137.4	38.1	0.7	0.0009	0.0157
No.2	370.6	4380.7	39.8	1.3	0.0011	0.0156
No.1	612.3	4736.2	42.1	0.3	0.0015	0.0143
No.0	653.5	5127.8	44.8	0.0	0.0008	0.0144

表-2 地点ごとの水深到達時刻とポンプ起動時刻の差(分)

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	
4割水深到達	一樣降雨	9	27	49	37	27	22
	下流→上流15分間隔	1	15	33	21	10	1
	下流→上流30分間隔	-4	5	17	4	-6	-19
	上流→下流15分間隔	16	34	58	47	39	38
	上流→下流30分間隔	21	39	62	53	47	50
	中央→上下流両端15分間隔	13	31	54	41	30	21
5割水深到達	一樣降雨	16	34	56	43	32	19
	下流→上流15分間隔	-9	-2	7	1	-5	-13
	下流→上流30分間隔	-11	-9	-6	-13	-20	-29
	上流→下流15分間隔	2	16	29	25	22	22
	上流→下流30分間隔	8	22	35	33	31	34
	中央→上下流両端15分間隔	0	13	25	20	14	6
6割水深到達	一樣降雨	4	16	28	23	17	6
	下流→上流15分間隔	-11	-2	6	4	1	-3
	下流→上流30分間隔	-14	-11	-6	-10	-13	-20
	上流→下流15分間隔	-7	6	15	14	12	13
	上流→下流30分間隔	-4	12	22	22	22	26
	中央→上下流両端15分間隔	-7	3	12	9	6	-1
中央→上下流両端30分間隔	-3	7	15	13	9	0	

※注釈：青色の濃さは時間差(余裕)の大きさ、赤色は遅延の大きさを示す

点での水位上昇が、ポンプ起動時刻よりも遅れるケースが最も少なく、かつポンプ起動までの時間の余裕も最大であった。このことから、No.3地点が、他地点と比較して水位上昇のタイミングが早い地点であることが確認された。

3.5 降雨移動による影響の少なさの確認

観測地点の絞り込みの際に必要なと考えられる、降雨移動による影響を確認するため、図-3に降雨パターン毎の各地点の水位変動を示す。同じ地点でも、着目する水位によって水位上昇のタイミングのばらつきが異なる。そこで、最高水位に到達するタイミングの差と、自由水面から圧力状態に遷移し、流れの状態が変化する管頂に到達するタイミングの差の両方に着目した。その結果、最高水位に対するタイミングの差が最小となったのは、No.5地点（26分）であり、管頂に達するタイミングの差が最小となったのはNo.3（15分）であった。図-1および表-1から確認できるように、No.5地点は幹線のほぼ中央に位置し、流域面積が全体の約半分、No.3地点はそれより下流に位置している。両地点に対する降雨移動の影響の比較は、対策運転時の効果の差で確認した。

4. 水位観測地点選定手順の提案

4.1 検討方法

条件を満たす水位観測地点が異なるため、各選定地点を用いた対策効果の比較により影響の大きな条件を確認し、その結果に基づき選定手順を検討した。対策の効果は、氾濫解析による浸水面積を用いて評価した。

対策運転は、水位観測地点の水位上昇時に、ポ

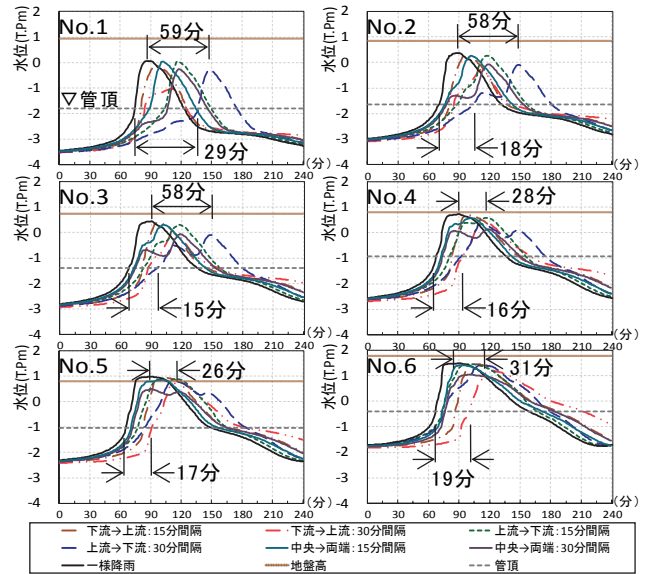


図-3 地点ごとの水位変動

ンプの起動水位を早期排水のため現況より0.2m下げるものとし、水位観測地点としてNo.3、No.5、No.1の3地点のそれぞれを用いた。No.3地点は、水位上昇タイミングが早いとともに、水位が管頂に達するタイミングの差が小さく移動降雨の影響が少ない可能性があること、No.5地点は最高水位に達するタイミングの差が小さく、No.3地点と同様に降雨移動の影響が少ない可能性があること、No.1地点は比較として、表-2に示した4割から6割水深における水位上昇の時間差のばらつきが小さいことから選定した。また評価は、当初から起動水位を下げた対策運転に切り替わっており最大の対策効果が得られる比較対象ケースの浸水面積を基準とした。

4.2 対策運転効果の確認結果

現況と対策後の氾濫解析結果を表-3に示す。現況に対する比較対象ケースの浸水面積削減率は、最大1%程度と小さく、現況で効率的な条件設定がされていると言える。水位観測位置毎の結果を比較すると、No.3地点は、どの降雨に対しても比較対象ケースに近い効果が得られており、対策運転への切替えが適切に実施されたと考えられる。No.5地点は、上流から下流へ移動する降雨に対しては最大に近い効果が得られるが、下流から上流に移動する降雨に対しては、対策運転への切替えが間に合わなかったものと考えられる。このことから、降雨移動による影響はNo.3よりNo.5地点の方が相対的に大きかったと言える。またNo.1地点は、上流から移動する降雨に対してポンプ起動時間が確保できなかったと考えられる。

表-3 浸水および浸水削減面積 (単位: ha)

		現況	比較対象 ケース	No.1 地点	No.3 地点	No.5 地点
一様降雨	浸水 面積	62.01	61.76	62.00	61.79	61.80
	削減 面積	—	0.25	0.01	0.22 効果最大	0.21
下流→上流 15分間隔	浸水 面積	60.04	59.89	60.01	59.95	60.04
	削減 面積	—	0.15	0.03	0.09	0
上流→下流 15分間隔	浸水 面積	59.63	59.00	59.63	59.01	59.02
	削減 面積	—	0.63	0	0.62 効果最大	0.61

さらに、平成29年6月30日(時間雨量48.0mm、総雨量96.9mm)および平成29年10月7日(時間雨量24.2mm、総雨量24.2mm)の実績降雨に対する効果を比較した。その結果、No.3地点での水位観測を用いた対策は、検討降雨の場合と同様に、他点よりも大きな対策効果が得られた。

以上の検証の結果から、研究対象としたモデル排水区および対象降雨においては、水位観測地点選定には水位上昇タイミングの早さが重要であること、さらに判定結果に基づき選定した水位観測地点の情報をを用いた対策運転により、浸水被害が軽減可能なことが確認された。

4.3 選定手順案の提案

水位上昇タイミングの早さに着目した水位観測地選定手順案を図-4に示す。なお、手順案には、本稿で示した要件以外にも検討が必要となる、局所的な水位変化要因や施工・維持管理上に関する確認を、その他の課題に関する確認として示した。

5. まとめ

雨水ポンプ場の運転制御のための、水位観測地点の選定について検討した結果、対象とするモデ

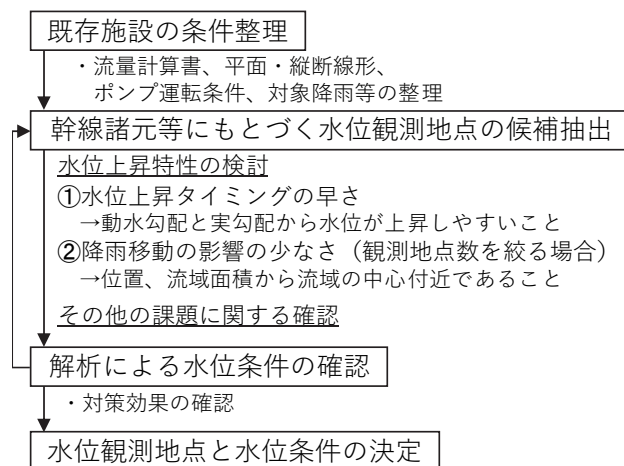


図-4 水位観測位置選定手順案

ル排水区においては、水位上昇タイミングの早さが重要であることを確認した。さらに、管路勾配と動水勾配から水位上昇タイミングの早い地点を抽出できる可能性が示唆され、その方法を用いた水位観測位置選定手順案を提案した。

なお、水位上昇タイミングの判定手法については、一般的に適用可能かどうかを課題として挙げられる。したがって、今後は提案した位置選定手順案について、妥当性や精度、適用範囲に関する検証を行うとともに、他排水区への試行等により、選定手順案のさらなる改良を行う予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部、下水道管きよ等における水位観測を推進するための手引き(案)、2017
- 2) (公財)日本下水道新技術機構、流出解析モデル活用マニュアル、2017

近藤浩毅



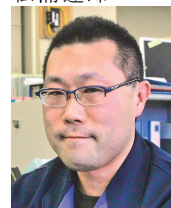
国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道研究室
交流研究員
Hiroki KONDO

岩崎宏和



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道研究室
長
Hirokazu IWASAKI

松浦達郎



国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道研究室
主任研究員
Tatsuro MATSUURA