

1-1-1 水理模型実験による呑川増強幹線の水理的課題の把握と 対策検討について

第二基幹施設再構築事務所 設計課 岡本 遼太

1. 事業概要

呑川増強幹線（以下、本増強幹線という。）は、「経営計画 2021¹⁾」において浸水対策を強化する地区とされている目黒区及び世田谷区の対象地区において、既設呑川幹線（以下、既設幹線という。）の雨水排除能力を増強するため整備を進めている雨水幹線である。

既設幹線流域ではたびたび浸水被害が発生しており、特に平成 25 年 7 月の集中豪雨では断続的に 60 mm/h を超える激しい雨に襲われ、床上・床下合わせて 100 棟以上の甚大な浸水被害が発生した²⁾。このため平成 25 年 12 月に策定された「豪雨対策下水道緊急プラン³⁾」において、当地区に 75mm/h 降雨に対応する新たな下水道施設を整備することとなり、本増強幹線の整備に着手した。

図 1 及び図 2 に示す通り、本増強幹線は、既設幹線の流下能力を補うため 12 箇所で分水し、集めた水を既設幹線の最下流部へ放流する構造となっている。幹線延長は約 4.5km であり、中間立坑の上流部は推進工法により管径 $\phi 2400$ mm、延長約 0.7km の管きよを整備し、下流部はシールド工法により管径 $\phi 3250$ mm、延長約 3.8km の管きよを整備している。

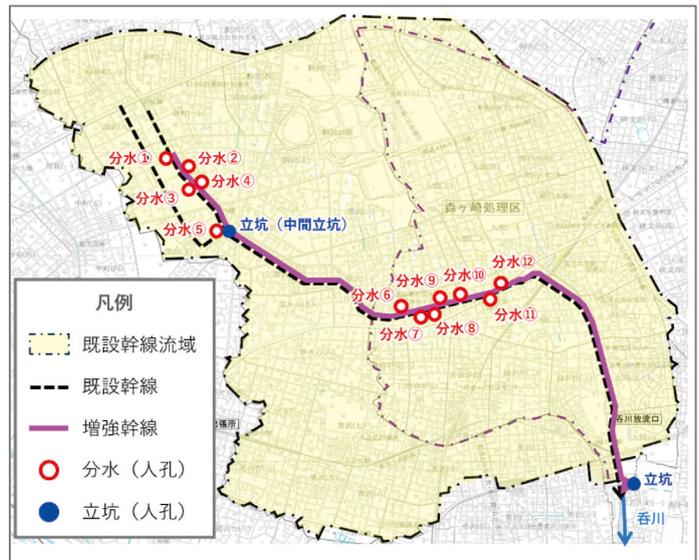


図 1 本増強幹線の位置

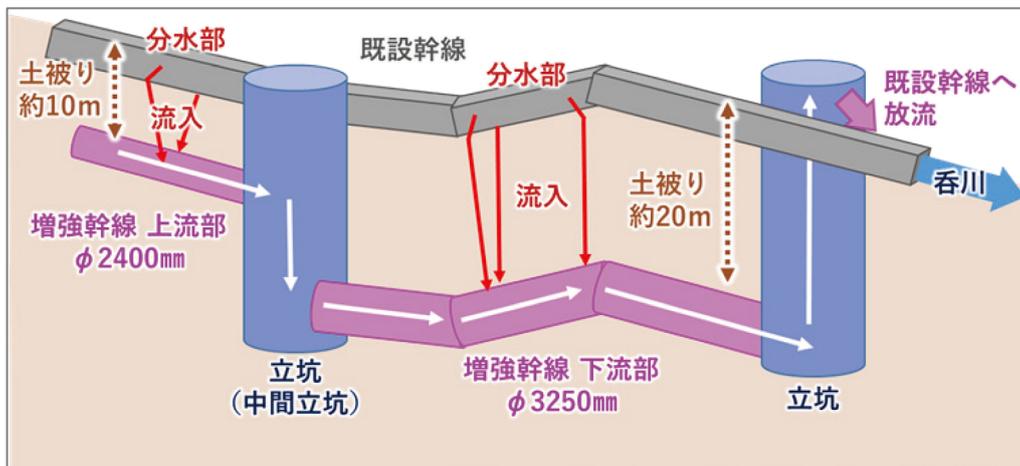


図 2 本増強幹線の断面模式図

2. 水理模型実験の目的及び形状

2.1 水理模型実験の目的

下水道管きよは、設計指針やマニュアルに基づいて設計している。しかし、管きよ構造が複雑な場合、管きよ内の水と空気が想定し難い挙動を示すことから、机上検討のみではその特性を把握することが難しいため、水理模型実験を実施している。また、分水部が高流速の場合やフルード数が1を超える射流領域の場合にも、机上計算による推定が難しいため、必要に応じて実験を行っている。

本増強幹線は12箇所で分水し、流入部や立坑部で高落差処理を行ったのち、既設幹線の最下流部へふかし上げで放流するという複雑な長大伏越し構造であり、空気連行を要因とした人孔からの水と空気の噴出といった様々な水理上の課題が懸念される。また分水部には、流速が $5\text{m}^3/\text{s}$ を超える高流速箇所や射流領域の箇所がある。このため、本増強幹線は水理模型実験により水理的課題とその挙動を把握し、適切な対策案を検討する必要がある。

2.2 水理模型の形状

本実験では、各分水の分水抽出模型と、幹線全体模型を作成し実験を実施する。

2.2.1 分水抽出模型の形状

分水抽出模型実験は、既設幹線に計画流量を流した際の分水量が、設計流量を満足するかを確認する実験である。分水抽出模型は12箇所の分水部ごとに、越流堰を含む分水部と既設幹線の前後区間を再現した模型を製作した。実験の精度を確保するため、模型上の越流水深が3cm以上となるよう、分水ごとに縮尺を検討し $1/17.8\sim 1/6.8$ の模型を製作した。

2.2.2 幹線全体模型の形状

幹線全体模型は、増強幹線、立坑、流入部及び放流部の既設幹線を再現した模型である。幹線全体模型は流量計及び電動バルブにより流入の計画ハイドロを再現するため、分水抽出模型と別個の模型としている。実験の精度を確保するため、主要区間の模型管径が20cm以上となるよう、断面方向の縮尺を $1/16.25$ と設定した。また、模型に使用するアクリル管の粗度係数がコンクリートと異なることから、動水位を合わせる必要があるため、流下方向の縮尺を $1/22.9$ と設定した。模型延長は197mあり、実験場の敷地内に収めるため、水理的な影響の小さい一部の湾曲部については曲率を保ちつつ左右の向きを反転させている(図3)。



図3 幹線全体模型の空中写真

3. 分水抽出模型実験

当初案の分水抽出模型に計画流量を与えて実験したところ、12箇所のうち1箇所の分水部は計画分水量を満足したものの、11箇所の分水部で分水量が計画分水量を下回った（図4）。その要因としては、分水施設内で既設幹線が射流になり水位が低下し、越流水深が小さくなることで分水量が減少したことが考えられる。

このため、計画分水量を下回った11施設について、越流水深を確保するため堰高を下げて実験を行った。実験の結果、4箇所の分水部は計画分水量を満足した。一方で7箇所の分水部は引き続き分水量が計画分水量を下回った。

この課題を解決するため、既設幹線の流速を抑えて既設幹線水位を上げることで更に分水量が増加すると考え、既設幹線の下流側に垂れ壁を設置する対策を実施した（図5）。適切な高さの垂れ壁を設置したことで、残る7箇所の分水部についても計画分水量を満足することができた。

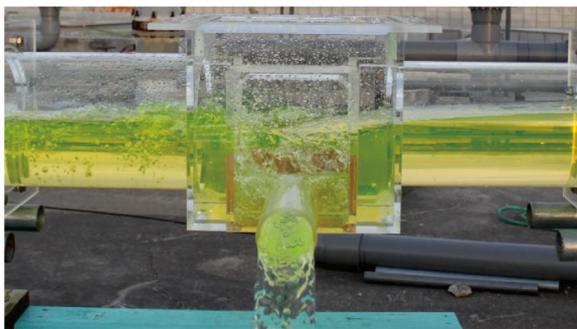


図4 原案の分水実験状況



図5 対策後の分水実験状況

4. 幹線全体模型実験

4.1 実験条件

幹線全体模型実験では、本増強幹線の運用状況に合わせて、上流部の貯留管運用、幹線全体の貯留管運用、幹線全体の将来流下運用の3状態をそれぞれ再現して実験を行った。

実験で目指す施設目標として、暫定貯留時は50 mm/h-80%の計画ハイドロにて噴出等を生じない施設とし、将来流下時は75 mm/h-80%の計画ハイドロ（図6）を流下可能かつ75 mm/h-80%のピーク一定で噴出等を生じない施設とした。なお、ピーク一定とは、計画ハイドロの最大流入量を連続的に与える条件である。本稿では3状態の運用状況のうち、主な水理的課題が発生した幹線全体の将来流下運用の結果について述べる。

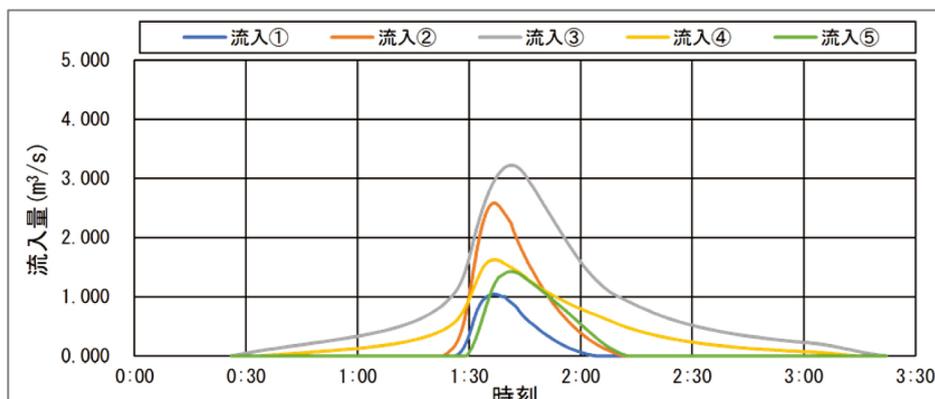


図6 75 mm/h-80%の計画ハイドロ（分水①～⑤の流入量）

4.2 実験で確認した水理的課題と対策案

当初案の模型形状で実験を行ったところ、さまざまな水理的課題が確認されたため、その対策を検討した。検討した対策案の中から、流入部の斜坑管からの水と空気の噴出と、立坑内における不安定な水面変動について課題の内容と対策案を紹介する。

4.2.1 流入部の斜坑管からの水と空気の噴出

12箇所の流入部のうち10箇所の流入部は、らせん案内路式落差工等の標準的な高落差処理構造の人孔を採用している。一方で、分水⑧、⑪の2箇所は現場条件から斜坑管による接続を採用している。実験を実施したところ、図7に示すように斜坑管を採用する2箇所で水と空気の噴出を確認した。原因として、斜坑管は水と空気の流れが分離されていないため、図8に示すように流入時に水とともに空気を吸い込んでしまい、本管で被圧された空気が行き場をなくして、水とともに噴出すると考えられる。



図7 斜坑管からの噴出状況

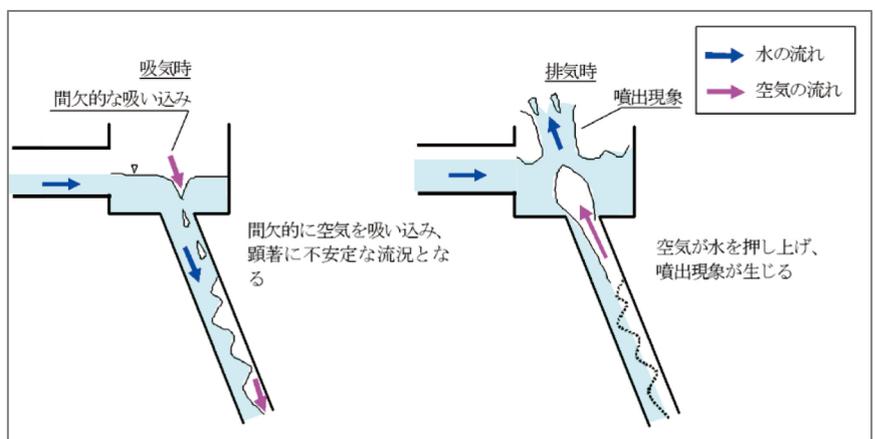


図8 噴出のメカニズム

このため対策案として、水と空気の流れを分離するための排気施設を斜坑管内に設けることとした(図9)。この対策案は広島市下水道局の斜坑管排気施設の先行事例を参考としており、流入する水の流れと排気の流れが輻輳しないよう、斜坑管の上部で分離する構造とした。また、噴出の勢いを抑えるための床板を設置した。

水理模型を対策案へ変更し再度実験したところ、75 mm/h-80%の計画ハイドロ及び75 mm/h-80%のピーク一定の両条件において、水と空気の噴出が発生しないことを確認した。これにより斜坑管排気施設の有効性を確認することができた。

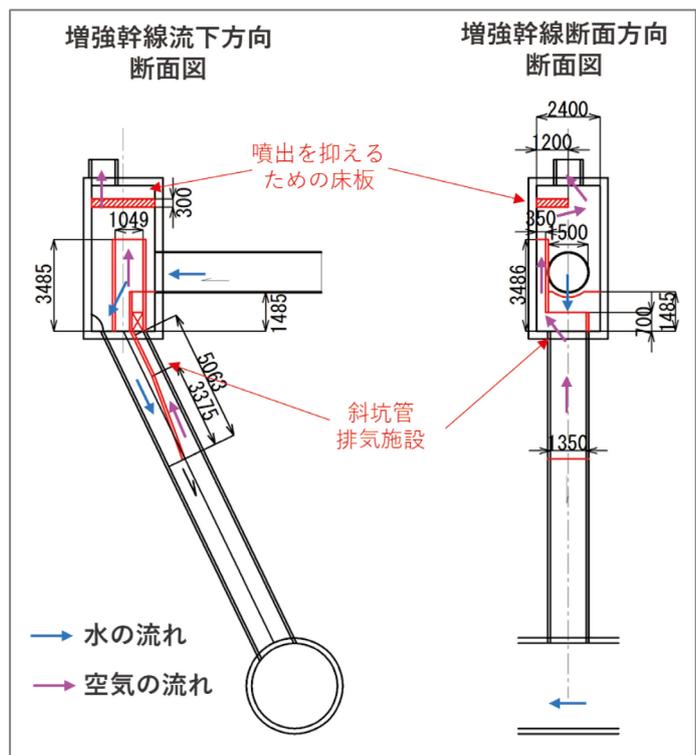


図9 斜坑管排気施設

4.2.2 立坑内における不安定な水面変動

当初案の模型形状で実験を実施したところ、空気の排気に伴って中間立坑内部の流況が大きく乱れる事象が発生した（図 10）。本増強幹線下流部が満管に近づくと、本増強幹線内部で被圧された空気が立坑内で開放されることで水の噴出が発生し、激しい水面変動が起きる。この水面変動が中床版で区切られた区画ごとに繰り返し発生するため、不安定な流況となっている。こうした事象は中床版を傷める可能性があるだけでなく、振動や騒音の原因ともなり得る。

このため対策案として集気管の設置を検討した。具体的には、本増強幹線下流部の天井部に集気管を設置し、各中床版を貫通して集気管を立ち上げる構造とすることで、本増強幹線下流部の空気をスムーズに排気する形状とした（図 11）。

水理模型を対策案へ変更し再度実験したところ、流況の乱れが発生しないことを確認した。これにより水面変動を抑制することができ、集気管の有効性を確認することができた。

5. まとめ

水理模型実験により、複雑な長大伏せ越し構造である本増強幹線の挙動を確認し、適切な対策案を立案することができた。このよう

に、水理模型実験は、机上では再現することが難しい水と空気の流れを確認することができる点が非常に有効であり、設計された施設の安全性を検証する重要な手段である。

本成果をもとに、実施設計において各対策案の実現性や施工性を確認し、早期かつ安全な浸水対策の実現を図りたい。

・参考文献

- 1) 東京都下水道局：東京都下水道事業 経営計画 2021、令和 3 年 3 月
- 2) 東京都建設局河川部：平成 25 年における水害記録、平成 27 年 3 月
- 3) 東京都下水道局：豪雨対策下水道緊急プラン、平成 25 年 12 月



図 10 中間立坑の流況

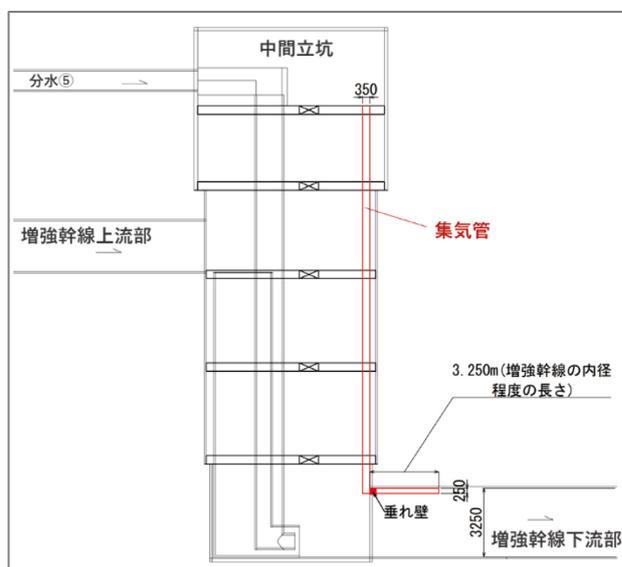


図 11 中間立坑集気管