

神田川流域における河川及び下水道施設による 台風性豪雨の排水機構と連携排水に関する研究

COOPERATIVE PLANS BASED ON UNDERSTANDINGS OF STORM-WATER RUNOFF
PROCESSES IN RIVER AND SEWERAGE FACILITIES IN THE KANDA RIVER BASIN

沼田 麻未¹・福岡 捷二²・持田 智彦³・中井 隆亮⁴
Asami NUMATA, Shoji FUKUOKA, Tomohiko MOCHIDA and Takaaki NAKAI

- 1 正会員 修(工) 国土交通省関東地方整備局八ッ場ダム工事事務所
(〒377-1395 群馬県吾妻郡長野原町大字与喜屋11)
- 2 フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)
- 3 非会員 東京都下水道局計画調整部計画課 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)
- 4 正会員 修(工) 東京都建設局河川部計画課 (同上)

The Kandagawa river flows through densely urbanized areas. Large-scale sewerage systems and many facilities for flood-control have been constructed in the Kanda river basin. But, it has not been clarified how much both facilities are cooperative for reductions of flood inundations

We conducted two-dimensional analyses of flood flows using time series of observed-surface water profiles in Kandagawa river. A calculation model applied for 2004 flood provided good explanations for measured flood storage volumes in the Loop Road No.7 Underground Regulating Reservoir and Wada Yayoi Trunk Sewer. Flood storage volumes of river and sewer facilities were found to depend on flood water levels of the Kandagawa river. It became clear that cooperations of both river and sewers by understanding movement mechanisms of heavy rainfalls in drainage areas were important for a comprehensive drainage plan for urbanised areas.

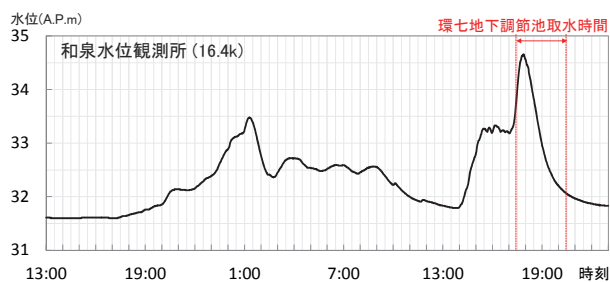
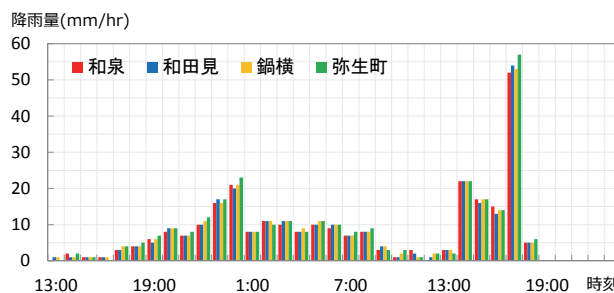
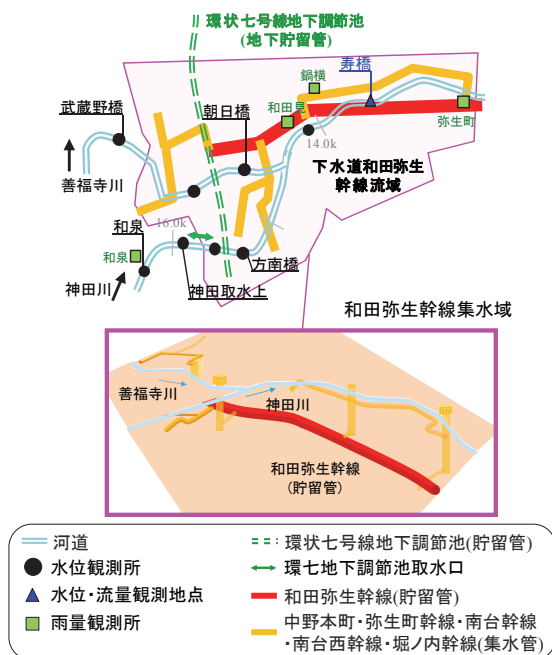
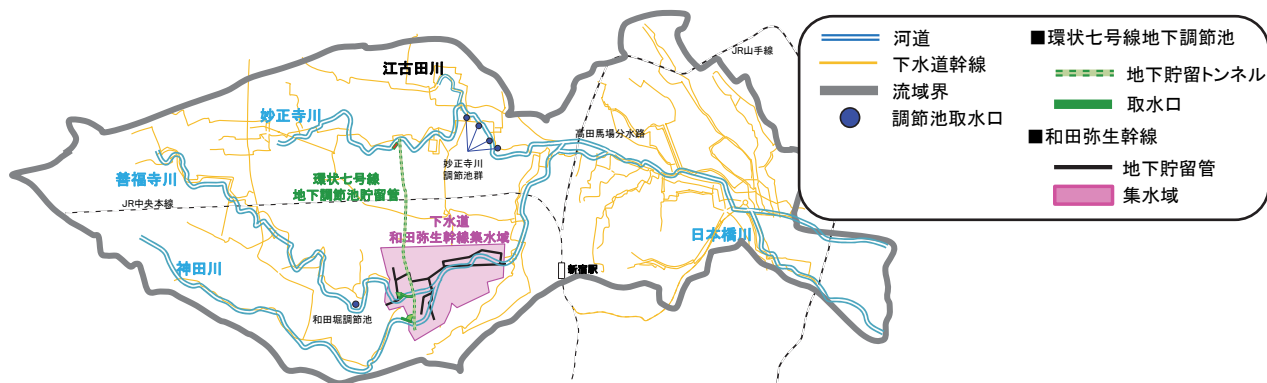
Key Words: heavy rainfall, Kandagawa river, flood flow, comprehensive drainage plan, flood-control facility, sewerage system

1. 序論

神田川は東京の中心部を流下する都市河川である。東京都は神田川流域において、図-1¹⁾に示すように、豪雨による被害軽減のために、河川整備として河道改修、分水路の建設、河道沿いの調節池群及び環状七号線地下調節池等の洪水対策が行われ、また、下水道整備としては下水道幹線網の建設、整備、下水道から河川への雨水流出量抑制のための雨水貯留管の建設等の整備が行われてきた。豪雨時、地表に到達した雨水は河川施設と下水道施設を通じて移動する。このため、流域の雨水排水系としての河川と下水道施設を統合的に管理、運営することが望ましい。しかし、これまでは河川と下水道整備の多くがそれぞれ独立して行われており、総合的な豪雨流域対策を行っているとは言い難い。神田川流域では都市化の進行に伴い図-1のように下水道網が整備され、河川への雨水到達時間が早くなったことが知られている²⁾。

豪雨時は、河川水位が高くなると、河道に面した下水道吐口を通じて、河川水位と下水道水位がつながり、両者の高さ関係に基づき流出入がみられることが著者の調査により明らかになったが³⁾、それらの移動実態は十分に把握されていない。神田川流域の水災害軽減のためには、豪雨時の排水システムとしての河川と下水道における雨水と河川水の流動実態を調べ、両者の関係を調べ、統合的に考えた豪雨対策が重要である。

福岡⁴⁾は、観測誤差が少なく密に観測できる本川観測水位の時間変化を用いた非定常平面二次元洪水流解析を行うことにより、任意断面における流量ハイドログラフ等を精度よく推算できることが多くの河川で示されている。著者ら⁵⁾は、河道と遊水地の地形重複部分の解析メッシュについて、本川解析水面形の時間変化を用いることで越流公式を介さずに遊水地への流入流量ハイドログラフを精度よく算定している。さらに著者ら⁶⁾は、神田川流域における河川と下水道の排水システムを一体的計画の視点から、神田川の観測水面形の時間変化を用いた非



定常平面二次元洪水流解析によって、下水道幹線や支川から本川への流入流量ハイドログラフを高い精度で算出し、算定が困難であった下水道からの流入流量の評価を可能にした。この検討方法を拡張し、豪雨時の河川と下水道の広域的な水位関係の解明から、両者の統合管理に向けた検討が期待できる段階に達したといえる。

本研究では、著者らによる水面形観測データを用いる解析法と、河川と下水道網の雨水の移動を説明する水理モデルを用い、神田川の洪水流の流下、環状七号線地下調節池、下水道和田弥生幹線貯留管への流入流量等を一体的に算出し、観測結果を適切に説明できることを示し、豪雨時の神田川流域における河川施設と下水道施設の統合管理の有効性と必要性を示す。

2. 神田川流域の豪雨対策, 洪水対策

(1) 神田川流域の地形特性と過去の豪雨災害

神田川は、流路延長約24km、流域面積約105km²の東京都管理の河川であり、支川の善福寺川及び妙正寺川と

の合流を経て、下流域で日本橋川を分派し隅田川へと流入する。図-1に神田川流域の下水道幹線網と洪水対策施設を示す。

神田川流域では、昭和33年狩野川台風以降、平成17年までに、水害が多発していた地域の治水安全度向上のため、環状七号線地下調節池、分水路の設置及び河積の拡大等により洪水被害の軽減が図られてきた。また、平成3年から平成18年には神田川と善福寺川合流部に下水道和田弥生幹線が建設され、河川及び下水道の豪雨対策施設の整備後は浸水被害が減少している⁷⁾。しかし、雨の降り方、その規模によってどの施設がどのような機能を發揮しているか、必ずしも十分把握されておらず、施設相互の関係も明確ではない。河川と下水道の施設の整備が進捗してきた今日、施設をさらに有効に使った統合管理・運用による都市の水災害軽減が重要な課題である。

(2) 神田川流域の豪雨排水施設

環状七号線地下調節池は、洪水時に神田川と支川善福寺川及び妙正寺川から取水を行う河川施設である。将来的に、自子川、石神井川等の10河川と下水道幹線の洪水

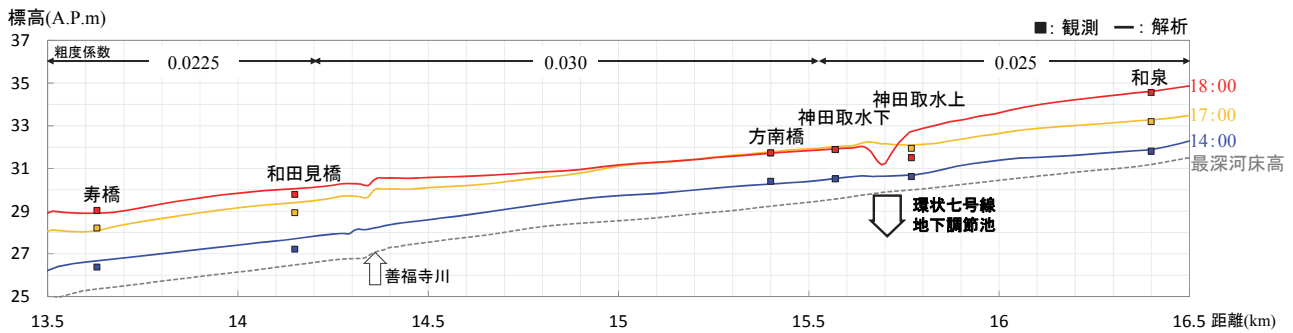


図-5 洪水上昇期の観測水面形と解析水面形の比較

を流入させ、東京湾に直接排水を行う環七地下河川の一部であり、水害が多発する神田川中流域の治水安全度向上のために先行的に調節池として整備されている。図-1に示すように、神田川・妙正寺川・善福寺川の三川を横断するように環状七号線道路の地下に管径約12.5mの巨大な貯留用トンネルが埋設されており、三川それぞれに取水口が設けられている。洪水時には三川の基準地点水位に基づき可動堰の開閉が行われ、最大で約54万 m^3 の貯留が可能である。また、対象区間には下水道雨水対策貯留管として、神田川と善福寺川の合流部付近の地下に最大貯留量約15万 m^3 の下水道和田弥生幹線⁹⁾が設置されている。神田川と善福寺川の合流部付近では、低地部を中心に浸水被害が頻繁に生じていた。豪雨時に下水道から河道へ洪水が流れ込めなくなるために和田弥生幹線が設置された。

3. 神田川観測水面形の時間変化を用いた洪水流量ハイドログラフと環七地下調節池および下水道和田弥生幹線貯留管の調節量の算定

(1) 平成16年10月台風22号による洪水と観測体制

本章では、本川観測水面形の時間変化を用い非常二次元洪水流解析を行うことで、平成16年10月9日の台風22号洪水で、図-2に示す神田川12.5kmから16.4km区間を対象に本川の洪水流量ハイドログラフと環七地下調節池の洪水調節量、下水道和田弥生幹線貯留管での調節量を推算する。図-2に、和泉観測所を始めとする合計4つの雨量観測所、水位及び流量観測地点を示す。神田川では、和泉(16.7km)から寿橋(13.7km)、善福寺川では武蔵野橋(1.7km)から朝日橋(0.2km)の区間内で時空間的に密に水位観測が行われている。また、寿橋で浮子による洪水流量観測が行われた。図-3に各雨量観測所における対象洪水の降雨量分布を示す。各観測所での降雨量は大きく変わらず、ほぼ同様な分布であった。図-4に和泉橋観測所での観測水位ハイドログラフを示す。本洪水は二山洪水であり、二波目の洪水ピーク時17時30分から環七地下調節池への取水が行われた。取水は、完成していた神田川取水口のみから行われた。また、取水口上下流では流

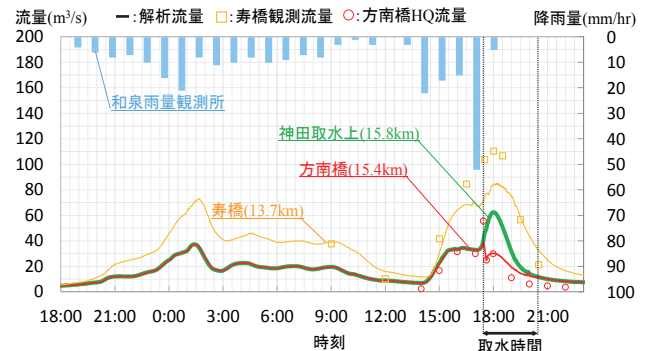


図-6 本川の解析及び観測流量ハイドログラフと降雨分布の比較

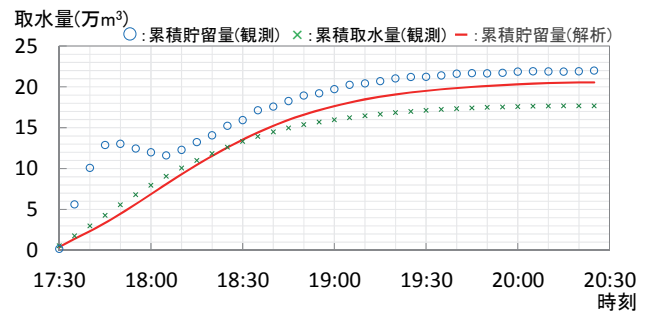


図-7 環状七号線地下調節池の観測累積貯留量と解析累積貯留量

速計を用いた流量観測が行われた。

(2) 環七地下調節池への流入量

a) 解析条件と解析方法

対象区間では水位観測が10地点、流量観測が1地点で行われている。上下流の境界条件は、神田川上流で和泉、下流で寿橋、善福寺川の上流端境界条件は武蔵野橋の水位時系列観測値を用いる。解析には越流堰を含む環七地下調節池取水口付近の地形を詳細に取り込み、本川河道と一体的に解析を行うことで取水口付近の流れを再現し、調節池の取水量を算定した。また、基準地点の水位に基づいて行われる可動堰の開閉を解析上も考慮している。

b) 解析結果と考察

図-5に平成16年10月洪水上昇期の水位観測値と解析で求めた水面形を示す。解析値は各時間の観測水面形を概ね再現している。取水口直上流の水面形は、観測値からずれがみられるが、取水口より下流の水面形は観測水面



図-8 和田弥生幹線の集水域と分水人孔の設置位置⁹⁾

形をよく説明しているので取水量は適切に算定されていると考えられる。図-6に神田川の各水位観測点での解析流量ハイドログラフ、本川流量観測値及び和泉雨量観測所で観測された降雨分布を示す。寿橋(13.7km)での解析流量はピーク付近で観測値よりも低い値を示している。これは善福寺川水位の観測精度に問題があり、善福寺川から神田川への流入流量算定精度が低かったためと思われる。一方、環七地下調節池取水口下流の方南橋(15.4km)では解析値は観測値を概ね再現している。方南橋での神田川解析流量は取水時間内で大きく減少しており、環七地下調節池の取水効果が顕著であることを示している。図-7に環七地下調節池の解析と観測の累積貯留量を示す。解析値は観測貯留量よりやや低めであるが、神田川本川の取水口上下流での流量観測から算出された累積取水量との間にプロットされており、概ね再現できたと考えられる。対象洪水での総貯留量は実測約22万 m^3 に対し、解析約21万 m^3 となった。環七地下調節池の観測貯留量は貯留トンネル内の数カ所の水位観測値から算定されており、貯留管内の水位が低い取水初期の観測値には誤差が含まれている。取水初期の貯留量をより正確に知り、精度の高い調節量ハイドログラフを得るために貯留管内の水位観測点数を増やす必要がある。

(3) 下水道和田弥生幹線貯留管による調節量

a) 解析条件, 解析方法

図-8に下水道和田弥生幹線の集水域と分水人孔の設置位置を示す。和田弥生幹線は貯留管である管径約8.5m、延長約2.2kmの和田弥生幹線と、流域から貯留管に集水を行う全長4.7kmの集水管で構成されている。図-9に、神田川河道と分水人孔、さらにそれらを繋ぐ下水道管を模式的に示す。図に示すように河道と人孔(マンホール)は、河道沿い吐口からの下水道管によって接続しており、

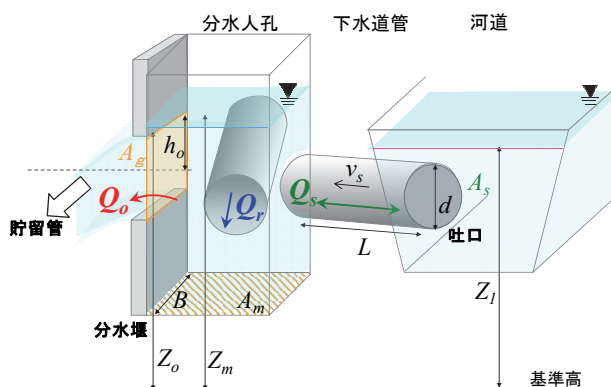


図-9 河道と分水人孔の模式図

分水人孔内に地下貯留管へ分水する堰が設置されている。豪雨時には人孔内の水位が上昇し、水位高が分水堰高を超えると貯留管へ流入する構造となつておる。吐口、分水人孔、分水堰の高さは東京都下水道局下水道台帳⁸⁾及び特殊人孔構造図より調査した。各吐口の標高はそれぞれ異なり、下水道吐口からの排水量の有無は把握できていないのが現状である。また、分水堰の標高は人孔ごとに異なるため、豪雨時の雨水の移動実態を明らかにするためには、相互の高さ関係を知ることが重要である。

分水人孔及び管路の敷設工事が平成3年から18年に区間に分割して行われており、それぞれの区間の使用開始時期と分水人孔の配置を図-8に示す。平成16年洪水時は和田弥生幹線の一部が工事中であったため、平成16年に集水管及び分水人孔が完成していた区域内の人孔を対象に和田弥生幹線への雨水と河川水の流入量の検討を行う。

分水人孔内の水位を算出するため、和田弥生幹線貯留管への流入量を水理モデルを用いて求める。河川と人孔間を流れる流量を Q_1 (正:河道から人孔への流入, 負:人孔から河道への流出), 各分水人孔の集水域の降雨量より求めた集水流量を Q_2 , 貯留管への分水堰の流入流量を Q_3 とし、それぞれ式(1)連続式, 式(2)合成合理式²⁾, 式(3)堰の越流量公式⁹⁾で表す。

$$Q_{s(t)} = v_{s(t)} A_s \quad (1)$$

$$Q_{r(t)} = \frac{1}{3.6} A_r f_r r'_{(t)} \quad (2)$$

$$Q_{\rho(t)} = C_{(t)} B h'^{\frac{3}{2}} (Z_m < Z_0) \quad (3)$$

貯留管への流入量は、人孔内水位が流出孔上端を超えた場合に式(4)のオリフィス公式を用いる.

$$Q_{o(i)} = \int_{A_g} C \sqrt{2gh_o} dA_g \quad (Z_m \geq Z_o) \quad (4)$$

式(1)中の管内流速 v_c は式(5)より算出している.

$$Z_{l(t)} - Z_{m(t)} = h_l = \frac{v_s^2}{2g} (f_l \frac{1}{4R} + K_e + K_0) \quad (5)$$

河川水位 Z_1 は, 3. での解析で求めた値を用いる. 式(2)

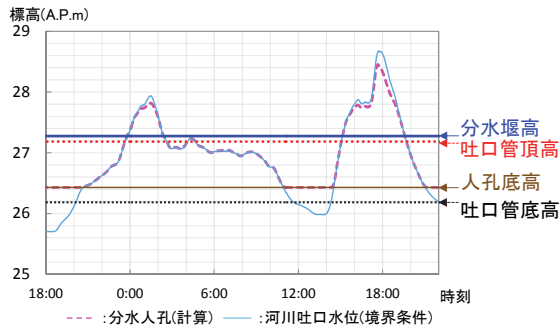


図-10 神田川の観測水位と No. 6 分水人孔の水位ハイドログラフ

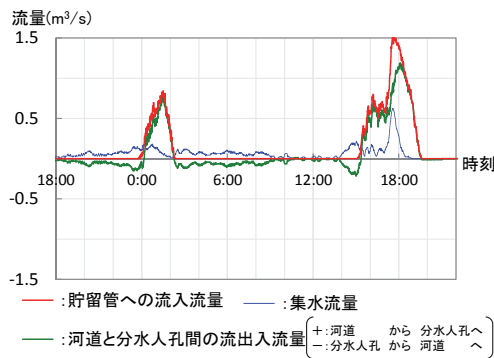


図-11 分水人孔内の計算流出入流量

中の流出係数は、商業地域及び類似の住宅地域である $f_r=0.8$ とした¹⁰⁾。また r' を式(6)、(7)に示す。

$$r'_{(t)} = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t r_{(t)} dt \quad (6)$$

$$T_c = \frac{L_p}{3.6v_b} + 0.5 \quad (7)$$

r には各分水人孔の集水域における降雨量を用いる。また、到達時間内降雨強度式 T_c は、第1項の流入時間と第2項の流出時間を足し合わせた値であり、地表面から下水道管内に流入するまでの時間を1800秒²⁾とした。分水人孔までの集水管内平均流速 v_b は、勾配のとれる地域の管内流速の目安¹⁰⁾の範囲内となるように1.26m/sと定めた。式(2)中の各分水人孔の集水域 A_r は、下水道台帳を参考に各分水人孔へつながる枝線・幹線を図-8のように把握することで、算出した。式(3)の流量係数 $C(t)$ は、越流水深と分水堰幅の値により変化する長方形堰を用いた⁹⁾。算出した各流量を式(8)のように分水人孔の底面積で除することで、分水人孔内の水位 Z_m を算定する。

$$Z_{m(t+\Delta t)} = Z_{m(t)} + \frac{(Q_{s(t)} + Q_{o(t)} + Q_{r(t)})\Delta t}{A_m} \quad (8)$$

ここで検討に用いた諸元は、 v_s ：下水道管内流速、 A_s ：下水道管断面積、 A_r ：集水面積、 f_r ：流出係数、 r' ：到達時間内降雨強度、 C ：流量係数、 B ：堰幅、 h' ：越流水深、 A_g ：流出孔断面積、 h_o ：流出孔の中心から人孔内水面までの高さ、 f_i ：摩擦係数、 R ：径深、 K_e ：流出損失

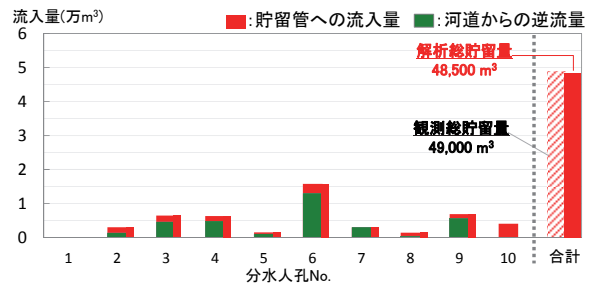


図-12 各分水人孔から地下貯留管への総流入量

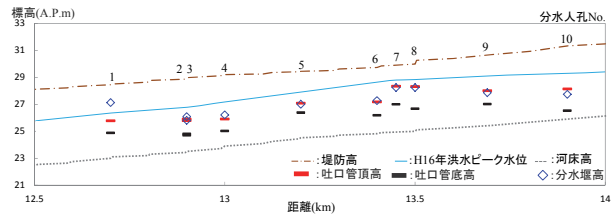


図-13 分水堰高と河道における対象洪水のピーク水面形

係数、 K_0 ：流入損失係数、 r ：各分水人孔の集水域の降雨量、 L_p ：管路長である。人孔は他の人孔と污水管で連結するが、河道と接続する管径と比較すると污水管はごく細いためここでは考慮していない。

b) 解析結果と考察

図-8のNo.6人孔での水理計算結果を代表例として示す。図-10にNo.6吐口での神田川本川と分水人孔の計算水位ハイドログラフを示す。図-11は図-9に示す河道と分水人孔の関係において、計算より求めた人孔内への流入と人孔内から河道への流出流量の時間変化を示す。図-10および図-11より、次のことが分かる。吐口地点の河川水位が吐口管の底高より高く、分水堰高に達する前は人孔水位は河川水位より高く、量的に多くはないが人孔から河道への流れが生じている。一方、河川水位が分水堰高を越えると、人孔水位と河川水位の間に水頭差が生じ、下水管内の流れの向きは河道から人孔へと変化する。地下貯留管への流入流量は、河道から人孔への流入流量 Q_s と集水流量 Q_r が重なり合い、ピーク時には約1.5m³/sとなった。図-12に各分水人孔から貯留管への総流入量、図-13は分水人孔番号に対応する吐口管頂底高及び分水堰と対象洪水ピーク時における河川水位縦断面の高さ関係を示す。各人孔の解析貯留量の合計量48,500m³は観測総貯留量49,000m³をほぼ再現している。

各分水人孔については、分水堰高よりも河川水位が大きく上回った地点では、河道からの流入量が多くそれに伴い貯留管への流入量が増加している。一方、No.1人孔のように、河川水位が分水堰高に達しなかった地点では、貯留管への流入が生じていない。重要なことは、貯留管への流入量は分水人孔堰高及び下水道吐口の標高に対する河川水位の標高に依存することである。この事実に基

づき、東京都は平成25年から、貯留管へ接続する下水道の分水人孔内の水位を多点で河川水位と同時に観測収集している。

平成25年10月に発生した洪水では、環七地下調節池の取水量は約43万 m^3 と調節地容量の83%を使用する大きな洪水で、神田川水位に環七地下調節池の効果が強く表れるものであった。その結果、図-14では、分水人孔底高を洪水水位を超えると分水人孔の観測水位は河川水位とほぼ同様の变化を示しており、環七地下調節池への取水時間帯には、分水人孔水位も大きく減じている。このことは、分水人孔から和田弥生幹線下水道貯留管に流入する流量を減じたことが明らかになっており、これは統合管理の重要性を如実に示した最近の実例である。

4. 河川施設と下水道施設の連携排水の有効性

3章で、H16年10月神田川洪水の観測水面形時系列データを用いることにより、河川洪水調節施設である環七地下調節池の取水量約21万 m^3 、下水道和田弥生幹線への流入量約5万 m^3 を算出し、神田川流域の豪雨時の雨水の移動実態を明らかにした。洪水時は河川水位が上昇し下水道吐口に達した時点から人孔内水位は河川水位に依存するようになり、さらに河川水位が分水堰高に達すると貯留管への河川水流入が増大する。

図-14に示すように、環七地下調節池の取水中は河川水位が大きく下降するため、和田弥生幹線への流入流量は低下する。雨水の移動実態を簡単な水理モデル化により算定した結果からも環状七号線地下調節池の取水量および貯留管への流入量は、河川及び分水人孔内の水位関係に規定されることが確かめられた。このように、下水道施設の水位と河川水位は連動しているため、河川と下水道施設の配置関係や構造、さらには管理・運用方式を統合的に考えることにより、洪水調節施設及び貯留施設をバランスよく有効に使用することが可能となる。

今後は本解析方法を用い、神田川流域での人孔内の観測水位分布と河川水位の関係から豪雨時の人孔からの水の吹き上げ等による内水被害が、どのような場所で、どのような機構で起こるのか等を調べ、外水、内水被害を軽減する総合排水計画を検討する。さらに、都市計画部局とも協同し、水災害に対して安全な街づくりを進めることは、今後の重要な課題である。

5. 結論

- 1) 平成16年10月台風性豪雨を対象に、本川観測水面形の時間変化を用い神田川の洪水流を再現することで、神田川流量ハイドログラフ、環状七号線地下調節池取水量、下水道和田弥生幹線貯留管への流入量を推算した。これらの解析から求めた値は、神田川の洪水流下、観測流量、貯留量を概ね

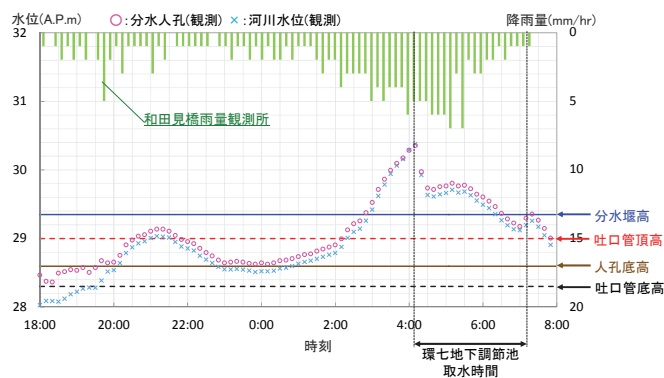


図-14 平成25年10月洪水の河川水位と分水人孔水位の観測

説明できた。

- 2) 洪水解析より求めた神田川本川の時空間水位と観測降雨量分布を用い、河川への吐口を通じて分水人孔と河道間の流出入流量算出モデルを構築した。このモデルは、マンホールの実測水位ハイドログラフ分布を説明するものであり、河道施設と下水道施設の水のやり取り、貯留量等の算定を可能にした。
- 3) 雨天時は河川施設と下水道施設が河川水位を介して影響しあうことから、流域の水災害軽減のためには、流域における豪雨時の雨水移動実態を明らかにし、河川と下水道が連携して流域の排水を行う統合排水が有効であることが示された。

参考文献

- 1) 東京都下水道整備計画図：東京都，2010。
- 2) 谷岡 康，福岡捷二：都市中小河川・下水道の連携した治水計画—台地部既成市街地を対象として—，土木学会論文集，No.733/II-63，pp.21-35，2003。
- 3) 福岡捷二：都市の豪雨災害軽減のための下水道と河川の排水計画の一体化に向けて，巻頭言，下水道協会誌，Vol.50，No.608，pp.1，2013。
- 4) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 5) 松本敬司，福岡捷二，須見徹太郎：利根川河道沿い三調節群の洪水調節量の算定，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.69，No.4，I_793-798，2013。
- 6) 沼田麻未，福岡捷二，入澤昭芳：豪雨時における神田川への大規模下水道幹線からの流入流量ハイドログラフの推算，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.69，No.4，I_799-I_804，2013。
- 7) 東京都建設局ホームページ，過去の災害記録。
- 8) 東京都下水道台帳：東京都下水道局。
- 9) 土木学会：水理公式集，平成11年版，丸善，1999。
- 10) 国土交通省：河川砂防技術基準 調査編，平成24年6月版，第3章第2節，2012。

(2014.4.3受付)