

震災時の雨水・下水道管路被害 を想定した浸水リスク評価

INUNDATION RISK ASSESSMENT UNDER THE DAMAGE SITUATION BY EARTHQUAKE OF STORMWATER DRAINAGE SYSTEM

天口英雄¹・河村明²・中川直子³

Hideo AMAGUCHI, Akira KAWAMURA and Naoko NAKAGAWA

¹ 正会員 博(工) 首都大学東京 助教 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

² 正会員 工博 首都大学東京 教授 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

³ 正会員, 博(理) 首都大学東京 特任准教授 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

The sewer system is one of the most important systems in urban infrastructure. The earthquake damage of sewer systems makes drainage by sewage difficult, and it affects runoff and inundation process system. The storm impact on earthquake damage of stormwater drainage systems was assessed on the supposition that a large-scale earthquake and heavy rain occurred in the upper catchment. The Tokyo Storm Runoff (TSR) model is applied for urban runoff analysis. The set-up of this model is based on so-called “urban landscape GIS delineation” that faithfully describes the complicated urban land use features in detail. The effects of earthquake damage of sewer system was examined based on the numerical model results.

Key Words: *TSR Model, sewer system, urban catchment, earthquake damage, inundation analysis*

1. はじめに

現代の都市域の下水道施設は、水供給施設、エネルギー施設、交通施設、通信施設などのライフライン施設として生活に欠かせない重要な都市基盤施設である。我が国ではこれらの施設が地震により被害を受けるリスクが非常に高く、東日本大震災¹⁾をはじめ新潟県中越地震²⁾および阪神・淡路大震災³⁾等において、地盤の液状化によるマンホールの隆起・沈降が多数発生し、管路施設が大きな被害を受けている。このような地震時の下水道管路被害を軽減するため、例えば東京都下水道局では、交通機能の確保のために緊急輸送道路などを対象にマンホール浮上抑制対策を進めている⁴⁾。しかしながら、全施設が耐震化の整備を終えるまでには長い時間を要することから、地震による下水道施設の機能喪失時に発生しうる新たな災害を想定した様々なリスクを事前に評価することは、非常に重要であると考えられる。特に東京都区部のように急激に都市化が進んだ市街地での下水道施設は、雨水および汚水が同一の管路により排水される合流式下水道として整備されており、地震によりその機能が正常に発揮されない場合には、豪雨時の雨水排水機能が著しく低下し、浸水リスクだけでなく伝染病などの感染リスクも高まるものと考えられる。

巨大地震により下水道施設が被害を受け排水機能が低下し、そこに集中豪雨が発生した場合の雨水流出・浸水過程をシミュレートするためには、都市特有の雨水

排水施設を表現可能な分布型の雨水流出・氾濫解析モデルを用いたシミュレーション解析が必要不可欠である。近年、都市流域での下水道システムを考慮した氾濫解析モデル構築および浸水・氾濫現象の評価・検討についての研究^{5)~8)}は数多く行われてはいるものの、本研究のテーマとして取り上げている震災時の下水道施設(主に管路)被害を想定した洪水流出・浸水特性についての研究は見当たらない。

都市域の下水道システムを考慮した氾濫解析モデルとしては、下水道管路にはスロットモデル⁹⁾を考慮した1次元不定流モデルを適用したものが主流であるが、氾濫域には主に地表面を格子状に分割したモデル^{5)・10)}のほか、非構造格子を用いたモデル⁸⁾や道路ネットワークを用いたモデル^{7)・11)}などが用いられている。これらの地表面モデル(解析格子)は氾濫水の挙動を解析するためのもので、直接流出量の算定には浸透・不浸透に関する情報として細密数値情報などの土地利用情報により流出率を推定することが必要である。一方、著者らは都市流域における洪水流出および浸水過程の解析モデルとして、下水道管路システムはもちろんのこと道路および河道に加え、街区内に存在する建物、駐車場、緑地などのあらゆる地物から構成される都市流域の構造を忠実に表現可能な地物データ GIS を用いた洪水流出モデルとして TSR(Tokyo Storm Runoff) モデル^{12)~14)}を提案している。TSR モデルでは、直接流出、地表面・氾濫流、河道流および雨水・下水道管路の圧力流に対し、こ

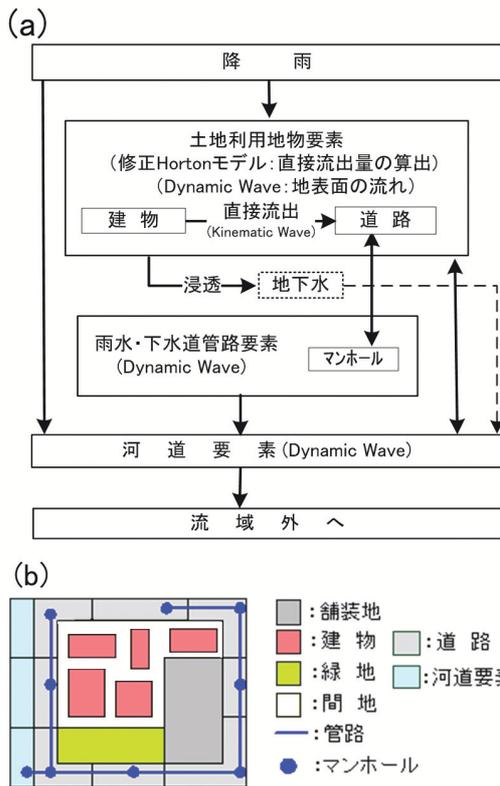


図-1 TSRモデルの洪水流出過程と高度な地物データ GIS の構成要素, (a)TSRモデルの雨水流出過程, (b)土地利用地物要素および雨水・下水道管路要素

これら全ての流れを同時に解析することが可能となっている。

そこで本研究では、地震と豪雨による複合災害を想定し、震災時の雨水・下水道管路被害を仮定した浸水リスクについての評価を試みる。まず、東京都を代表する都市河川である神田川上流域を対象に高度な地物データ GIS を構築し、流域のモデル化を行う。TSRモデルに対しては、地表面と雨水・下水道管路との雨水の流出入はマンホールのみとしていた¹⁴⁾が、本研究では道路の側溝などから流入するという実状を考慮できるように雨水・下水道管路のモデルについて改良を加えた。震災時には液状化のリスクがある場所に埋設されている雨水・下水道管路が被害を受けるものと想定し、TSRモデルを用いて豪雨時の洪水流出シミュレーションを行い、下水道の排水機能の低下が流出・浸水特性に及ぼす影響について評価・検討を行う。

2. 解析手法と対象流域への適用条件

(1) 解析モデルの概要^{12)~14)}

図-1(a)はTSRモデルの洪水流出過程を、図-1(b)はTSRモデルで用いている高度な地物データ GIS の構成要素をそれぞれ示したものである。TSRモデルに用いる高度な地物データ GIS の構成要素は、直接流出、浸

(a) 建物から道路への流れ

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad q = \alpha h^\beta$$

h : 建物の水深, q : 単位幅流量, x : 距離 (要素間距離), r_e : 有効雨量, α : 等価粗度係数と勾配の関数, β : 定数

(b) 土地利用地物要素間の流れ

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |v|}{R^{4/3}} = 0$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} = (\Sigma Q_s + \Sigma Bq + \Sigma Q_{div} + r_e A_s - IA_s) / A_s$$

Q : 流量, A : 流積, H : 水位, x : 要素間距離, n : 粗度係数, v : 流速, R : 径深 h_s : 地表面の水深, ΣQ_s : 隣接地表面要素からの流入出量, r_e : 雨量, I : 浸透量, A_s : 地表面要素面積, B : 微小土地利用要素の斜面幅, q : 街区内地利要素の単位幅流量

(c) 雨水・下水道管路の流れ

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |v|}{R^{4/3}} = 0$$

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = \Sigma Q_m - \Sigma Q_{out}$$

Q : 流量, A : 流積, v : 流速, H : 水位, x : 管路長, n : 粗度係数, R : 径深 S_m : マンホールの貯留量 (マンホール部の貯留量・水位換算式により水位を算出), Q_m : マンホール部流入量, Q_{out} : マンホール部流出量

(d) 河道の流れ

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |v|}{R^{4/3}} = 0$$

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial x} - \Sigma q = 0$$

Q : 流量, v : 流速, x : 要素間距離, H : 水位, n : 粗度係数, A : 流積, Σq : 降水量, 雨水・下水道管路および地表面からの横流入量

図-2 TSRモデルの水文・水理モデルの基礎式

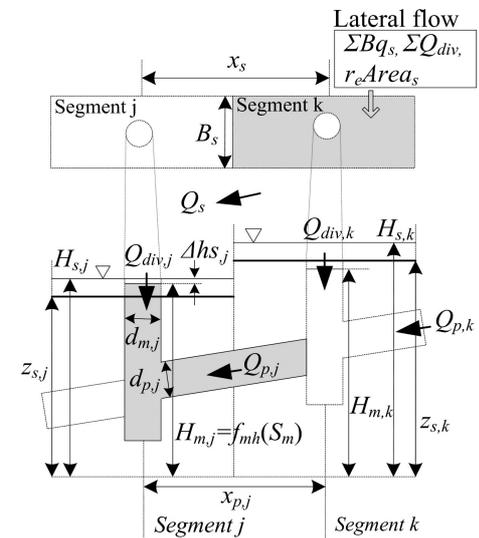


図-3 地表面と雨水・下水道管路

透、および地表面・氾濫流に用いる土地利用地物要素、河道要素および雨水・下水道管路要素である。本モデルは洪水流出として降雨の直接流出成分のみを取り扱っているため、図-1(a)の破線で示した地下水から河道要素への長期流出成分については考慮していない。

図-2はTSRモデルに用いている主要な水文・水理モデルの基礎式を示したものである。有効降雨モデルには修正Hortonモデル、家屋から近傍道路への流出にはKinematic Waveモデル、そして地表面・氾濫流、雨水・下水道管路流には河道流には一次元不定流モデルを用いている、また、図-3は、地表面と雨水・下水道管路の接合状況を模式的に示したものである。

解析手順としては、降水量を入力データとし、地表面の土地利用種別に応じた浸透・不透透特性に基づいて浸透能を算定し、初期水深に降雨量と周囲からの流入出量を加えた水量から浸透量を差し引いて水深を算定する。ここで、建物への雨水は近傍の道路へ流出するものとしている。地表面・氾濫流は、隣接する地表

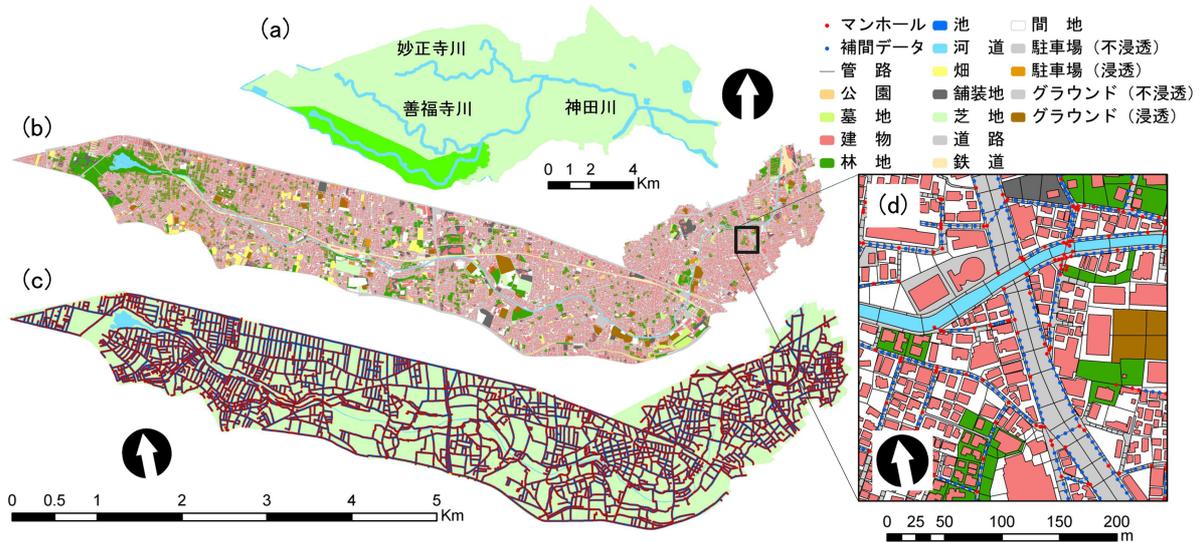


図-4 対象流域のモデル化, (a) 神田川上流域の位置図, (b) 土地利用地物要素, (c) 雨水・下水道管路要素, (d) 拡大図

面要素に対し、要素の重心点間を流れの方向と定めた矩形断面水路とみなして一次元的に算定される(図-3)。マンホールを介して雨水・下水道管路に排水された雨水に対しては、管路の頂部にスロットを取付けた仮想断面を考慮することで開水路・管水路状態を同一の方程式で表現することが可能なスロットモデルにより、管路内の流れが計算される。ここでマンホール部と地表面の接合部では、マンホール部とそれに接続する上流側の管路をコントロールボリュームとしてマンホール部に設定(図-3の鼠色部分)し、このマンホールへの管路流入量、地表面との流入量を考慮してマンホール部の水位を計算している。計算された水位が地表面の水位より高い場合には、超過容量を地表面への溢水量とし、それが低い場合には地表面から雨水・下水道管路へ雨水が排水されることとなる。その排水量は、マンホール部のコントロールボリュームを上限として、地表面とマンホール部での水位を用いて越流公式¹⁵⁾により評価される。震災により雨水・下水道管路の排水機能が失われた場合は、例えば図-3のSegment jが被害を受けたとするとSegment kからjには雨水は流下せずに、地表面のSegment kに溢水するものとして解析を行う。

(2) 対象流域

本研究で対象とする神田川は、三鷹市の井の頭池にその源を発し、途中善福寺川と妙正寺川を合流して隅田川に流入する東京都内の代表的な都市河川である。本研究では、井の頭池から善福寺川合流点までの神田川上流域(流域面積約11.5km²、流路延長約9km)を設定した(図-4(a))。神田川上流域の下水道は合流式で整備されており、流域内の雨水は自然排水により神田川に流出している。図-4(b)は、東京都1/2500地形図の電子データおよび航空写真より構築した神田川上流域の高度な地物データGISを示したものである。土地利用地物要

素の数は104,342で、建物、道路、緑地および間地の全流域面積に対する面積率はそれぞれ0.29, 0.16, 0.09および0.30となっている。図-4(c)は、神田川上流域の雨水・下水道管路要素を示したものである。下水道システムのモデル化には下水道台帳より行政が監理する直径25cm以上の全ての管路を対象とした。また、道路の側溝からの排水を表現するために、地表面と管路との雨水の流出入を行うノード間の最大管路長を15mと設定し、ノード29,193個、リンク(管路)29,193個を新たに追加した結果、それぞれの合計値は38,831, 39,102となっている。

(3) 解析条件

対象流域において東京都建設局が公表している浸水ハザードマップ¹⁶⁾においては、対象降雨として平成12年9月の東海豪雨が解析に用いられている。本研究では、地震と豪雨による複合災害に対する解析条件として同降雨を対象とした。ただし、流域規模の状況から全降雨期間のうち最大浸水深の算出が可能であると考えられる4時間最大雨量の降雨期間を設定した。雨量特性として、総雨量は270mm、60分最大雨量は114mmである。表-1は本研究で用いた水文・水理パラメータを示しており、ここに示す値により河道流量が再現されていることを確認している¹⁷⁾。主要パラメータの設定には、終期浸透能は藤村ら¹⁸⁾を、地表面の粗度係数は川池ら¹⁹⁾を参考にした。本研究では流域の初期状態として、浸透域では前期降雨などにより土壌水分量が既に飽和状態となっていることを想定し、終期浸透能のみを用いる。また、神田川に設置されている地下調節池は、前期降雨などによって雨水が流入し、空容量が無い状態を想定する。下水道幹線による下水処理場への送水量は、対象となる管路の流下能力を算出して設定した。

表-1 モデルパラメータ

パラメータ名	設定値
終期浸透能 (mm/hr)	林地: 20
	緑地: 20
	グラウンド: 5
	間地: 5
地表面粗度係数	道路: 0.043
	その他: 0.067
雨水・下水道管路の粗度係数	0.013
河道の粗度係数	0.0225

3. 豪雨による浸水リスク評価

(1) 下水道管きよ被害箇所の設定

神田川上流域における地震発生時の下水道被害箇所について個々に行った調査事例などは無いため、ここでは以下のように管きよ被害箇所を設定することとした。東京都防災会議では、東日本大震災を受けて首都直下地震および多摩直下地震により受ける様々な被害想定を行っており、その中で下水道管きよの区市町村別の被害率を求めている²⁰⁾。下水道管きよの被害想定手法としては、震度分布と液状化分布を基に管種別被害率を用いて算出されたものである。神田川上流域に関する区市での被害率は0.15~0.26で、本流域の7.5割を占める杉並区では0.26と最大の被害率となっている。本研究では具体的な下水道管きよの被害箇所を設定する必要があるため、神田川上流域における液状化分布を特定し、その領域内の下水道管きよが被害を受けるものとする。東京都防災会議による液状化危険度は250mメッシュ単位でリスク評価が行われており、神田川上流域においては、液状化危険度が高い箇所が数メッシュあるほか、液状化危険度自体は低いものの、特に重要な構造物に対してより詳細な調査が必要と判定されたメッシュが河道沿いに、不連続ではあるものの数多く存在している。そこで、液状化危険度のリスクがある範囲を把握するため、土地条件図^{21),22)}を用いて、地形分類が河川および盛土地に相当する部分を抽出し、そこを管きよ被害想定範囲として設定した。図-5は、土地利用地物要素を用いて管きよ被害想定範囲を水色、それ以外を緑色として示したものである。250mメッシュで推定されている液状化危険度でリスク有りのメッシュが連続していない理由としては、河道横断方向の人工盛土部の幅は長いところで約300m、短いところでは約100mという地形特性による影響が大きいものと考えられる。設定された管きよ被害想定範囲の面積は約3km²であり、流域に対して約0.26の面積率に相当する。神田川上流域の下水道管路の総延長約269kmに対し、被害想定範囲の総延長は約65kmで被害率は約0.24となっており、これは杉並区の下水道管きよ被害率にほぼ相当する。また、東京都下水道局では震災時の交通機能を確保するために、緊急輸送道路等を対象にマンホールの浮上抑制対策を進めている⁴⁾。図-5には、東京都が指定する緊

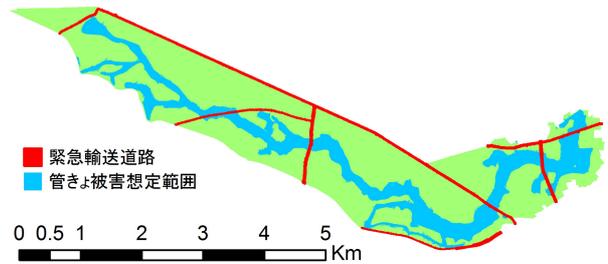


図-5 管きよ被害想定範囲の設定

急輸送道路を赤色で示した。

以上から、洪水流出・浸水解析のケースは、管きよ被害のない現状の状態(現状)、地震発生時の下水道被害のシナリオとして、図-5の水色で示す範囲の下水道管きよが全て被害を受けた場合としてCase B、マンホールの浮上抑制対策を行った緊急輸送道路では管きよ被害を受けない場合をCase Cとして設定し、さらに参考のために、被災した管きよが全く無い場合としてCase Aを設定する。なお、Case BとCでは、管きよ被害を受けた下水道管きよにおいては管路内貯留量は前期降雨などにより空容量が無いものと想定した。

(2) 解析結果と考察

洪水流出・浸水解析の結果として図-6には、入力雨量、河道下流端流量、地表面の全貯留高、下水道管路の全貯留高および河道への総流出量を計算開始から480分までの時間変化を示す。また、表-2は、計算終了時の浸透高、地表面および雨水・下水道管路の貯留高、雨水管路による下水処理場への総流出高を示したものである。管きよ被害を想定したCase BおよびCase Cは参考のために計算したCase Aよりも若干河道流量が大きいものの全体的な傾向は一致しており、現状と比べて河道への到達時間は遅く、ピーク流量は約6m³/s大きく、降雨終了後には急激な流量低下が見られる。河道ピーク流量の差は、現状においては管路による下水処理場への送水量を考慮していることが大きく影響している。また、緊急輸送道路を考慮したCase Cは、それを考慮しなかったCase Bにほぼ一致しており、以下ではCase Bに対して考察を行う。

図-6(b)に示す地表面貯留高はCase A, Case Bそして現状の順に高く、河道流量がほぼ一致する時刻480分においては、Case Bで約50mm、現状で約20mmが地表面に残っている。図-6(c)の雨水・下水道管路の貯留高は、降雨開始後60分まではほぼ一致して上昇するものの、それ以降は現状のみが約12mmまで上昇するが、Case Bでは約8mmまでしか上昇しない。降雨が終了する240分以降においては、現状では約3mmまで徐々に低下するものの、Case Bは約6mmとあまり低下がみられない。図-6(d)に示す河道への流出量においては、現状では地表面、雨水・下水道管路およびこれらの合計値を、Case AおよびCase Bでは地表面の値を示

しており、上述の図-6(a)の河道流量と同様の傾向があることが読み取れる。

図-7は、現状の最大浸水深と現状を基準としてCase AおよびCase Bの最大浸水深の水位差に加え、参考のために対象流域の地盤高を示したものである。神田川上流域の地形は図-7(b)に示すように、河道沿いの低平地とそこから離れた台地部から構成されている。現状での浸水域は、河道付近の低地部および河道周辺から台地部に延びる谷地部に広がっている。現状とCase Aとの水位差を示した図-7(c)において、その差は河道沿いで減少し台地部では上昇している。一方、現状とCase Bとの水位差を示した図-7(d)において、Case Aの場合との違いは上流部であり見られないが、中下流部では浸水深が若干低下していることである。震災時の管きよ被害により浸水リスクが上昇するのは、河道から離れた台地の一部であり、逆に浸水リスクが低下するのは、河道周辺に集中している。

まず、現状の雨水排水特性について考察する。河道流量の内訳は図-6(d)より、120分までは雨水・下水道管路からの流入が大半を占めているが、60分頃から降雨強度が増加するとともに地表からの流入量が増加し、120分以降では逆転して地表面からの流量が6割を占めていることが分かる。降雨が終了する240分以降は、地表面から河道への流入量は徐々に減少する一方で、雨水・下水道管路からの流量が350分頃まで微増している。この理由として、この間は地表面水の一部が雨水・下水道管路に流入していることが原因であると考えられる。現状では350分以降においても雨水・下水道管路により雨水が河道に排水されているので、地表面および雨水・下水道管路の貯留高が徐々に減少している一方、Case Bでは、河道と接続する雨水・下水道管路から雨水排水がなされずに河道への到達時間に遅れが発生している(図-6(d))。現状においても地表面から河道への流出量が卓越している120分から300分までは、図-6(d)の河道への流出ハイドログラフが全ケースでほぼ一致しており、図-6(a)の河道流量での違いはあまり見られないが、300分以降は、地表面から河道への流出量が急激に低下している。図-6(c)の雨水・下水道管路貯留高に着目すると、現状の最大値は約12mmでCase Bのそれは約8mmで、この差4mmが管きよ被害箇所、一方の8mmが被害を受けなかった総貯留高に相当するものと考えられる。計算終了時には雨水・下水道管路の総貯留高が約6mmへ約2mm減少するものの、雨水の大半は雨水・下水道管路内に残されたままとなっている。

管きよ被害による浸水状況を詳細に把握するために、図-8(a)に示す排水区の幹線管路を対象に、河道から台地に至るマンホール地点の最高水位縦断面を作成した(図-8(b))。現状では河道から台地にかけて徐々に水位が上昇しているが、Case Bの場合は管きよの被害想定範囲を反映し、河道からの距離160mでマンホール水位は地盤高付近まで上昇し、さらに上流側の地盤高が低い箇所でも溢水している。すなわち管きよ被害想定範囲

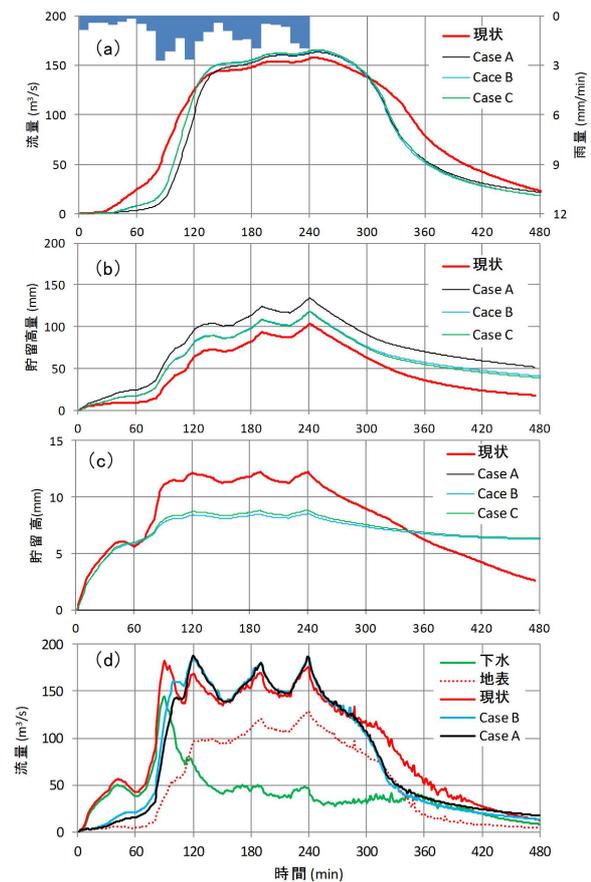


図-6 解析結果, (a) 河道下流端流量, (b) 地表面貯留高, (c) 雨水・下水道管路貯留高, (d) 河道への流出量

表-2 計算終了時の状態 (単位: mm)

	浸透高	地表面貯留高	下水道貯留高	流域外
現状	22.75	17.81	2.61	7.80
Case A	25.33	51.68	0.00	0.00
Case B	24.27	41.41	6.27	0.00
Case C	24.21	39.18	6.34	0.00

の外周部では、雨水は地表面に溢水すると同時に、その影響が管きよ被害を受けていない上流側にも及ぶため雨水・下水道管路は満管となり雨水は地表面へ溢水し、その後は河道まで地表面流として流下するものと判断される。以上の理由から、Case Bが雨水・下水道管路の流れを考慮していないCase Aと同様の流出特性を有しているものと考えられる。

4. むすび

本研究では、地震と豪雨による複合災害を想定し、地震により下水道施設が被災し雨水排水機能が低下した場合の洪水流出・浸水シミュレーション解析により、雨水排水機能の低下が流出・浸水特性におよぼす影響について評価・検討を行った。神田川上流域を対象に、地震による下水道施設被害を液状化のリスクのある神田

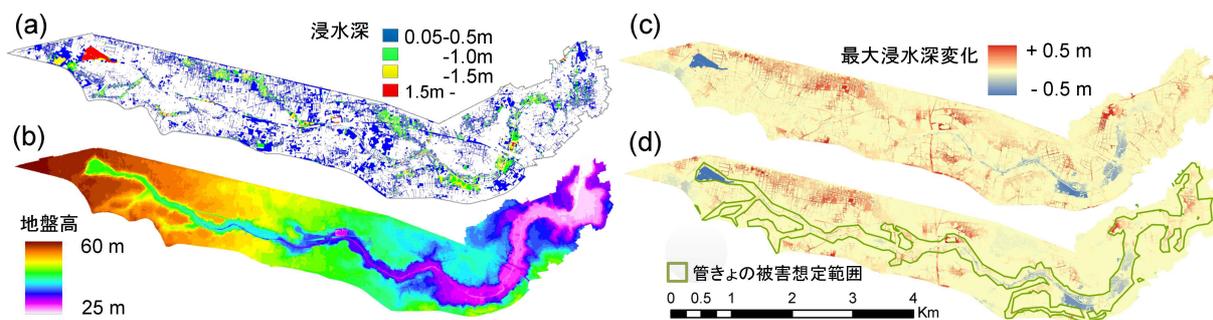


図-7 解析結果, (a) 最大浸水深 (現状), (b) 地盤高, (c) 最大浸水深の変化 (Case A - 現状), (d) 最大浸水深の変化 (Case B - 現状)

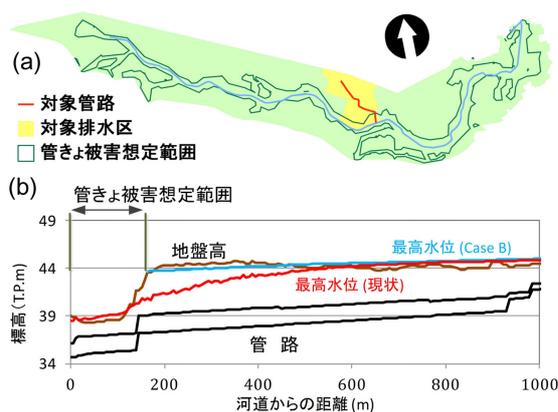


図-8 幹線管路沿いの水位変化の一例 (現状および Case B), (a) 位置図, (b) 最高水位縦断面

川沿いの人工盛土区域に設定し、本流域での氾濫想定区域図作成に用いられている東海豪雨を入力とする洪水・浸水シミュレーションを TSR モデルにより行った。その結果、管きよ被害想定範囲外周部の雨水・下水道管路では管きよ被害により雨水が地表面に溢水し、その影響が上流側に及ぶために河道から離れた台地部において浸水リスクが上昇することが明らかとなった。

今後の課題として、通常では浸水被害の発生しない下水道計画規模での降雨による影響を評価することや、対象流域の雨水・下水道管路施設の弱点を把握するために、震災時の管きよ被害範囲がどのように浸水被害に影響を与えるかを検討することなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，独立行政法人土木研究所，2011。
- 2) 下水道地震対策技術検討委員会：下水道地震対策技術検討委員会報告書，国土交通省，2008。
- 3) 細井由彦，上月康則，野田茂，能島暢呂：阪神・淡路大震災における静脈系ライフラインの被災および復旧，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，1996。
- 4) 東京都下水道局：東京都の下水道，2011。
- 5) 武田誠，高橋俊彦，長尾佳幸，平山康典，松尾直規：都市域の内水氾濫モデルの検討と浸水時対策への応用について，水工学論文集，第 56 巻，pp.I.1015-I.1020,2012。
- 6) 川池健司，中川一，今井洋兵：都市域の雨水排水過程に

- 7) 着目した内水氾濫解析モデル，水工学論文集，第 53 巻，pp.817-822，2009。
- 7) 関根正人，青野雅士，風間大彰：雑司ヶ谷幹線下水道における水難事故に関する数値解析，水工学論文集，第 54 巻，pp.901-906，2010。
- 8) 秋山壽一郎，重枝未玲，草野浩之：都市域浸水・減災対策検討シミュレータによる飯塚市街地の浸水被害評価，水工学論文集，第 56 巻，pp.I.1063-I.1068,2012。
- 9) Preissmann, A. and Cunge, J.A. : Calcul des intumescences sur machinas électroniques. Pro. 9th Cong. of IAHR, Dubrovnik, Yugoslavia, pp.656-664, 1961.
- 10) 林健一郎，寶馨，佐野肇，津守博通，関井勝善：損害保険に適用可能な国土基盤情報準拠型の分布型降雨流出・洪水氾濫モデルの開発，水工学論文集，第 56 巻，pp.I.1069-I.1074，2012。
- 11) 馬場洋光，真野明：電子データベースを統合した都市氾濫モデルの構築，水工学論文集，第 52 巻，pp.871-876，2008。
- 12) 天口英雄，河村明，高崎忠勝：地物データ GIS を用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案，土木学会論文集 B, Vol63 No.3, pp.206-223, 2007。
- 13) 天口英雄，河村明，高崎忠勝，中川直子：個別の地物情報を考慮した密集市街地における Tokyo Storm Runoff Model の提案，水工学論文集，第 55 巻，pp.S517-S522, 2011。
- 14) Amaguchi, H., Kawamura, A., Olsson, J. and Takasaki, T. : Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation, *Journal of Hydrology*, No.420-421, pp.205-215, 2012。
- 15) 土木学会編：水理公式集，技報堂，pp.265-266, 1971。
- 16) 東京都建設局：神田川流域浸水予想区域図，2003。
- 17) 天口英雄，河村明，荒木千博，高崎忠勝：神田川上流域の地物データを用いた洪水流出モデルの構築とその適用，河川技術論文集，第 15 巻，pp.377-382, 2009。
- 18) 藤村和正，安藤義久：表層浸透能の変化を考慮した多摩丘陵都市流域における水循環解析，水工学論文集，第 46 巻，pp.271-276, 2002。
- 19) 川池健司，井上和也，林秀樹，戸田圭一：都市域の氾濫解析モデルの開発，土木学会論文集，No.698/II-58, pp.1-10, 2002。
- 20) 東京都：首都直下型地震等による東京都の被害想定，東京都防災会議，2012。
- 21) 国土地理院：土地条件図，東京西部，2011。
- 22) 国土地理院：土地条件図，吉祥寺，2011。

(2012.9.30 受付)