レジリエンス評価を活用した下水道システムの機能回復と強化に向けた提案

中村ゆかり[1]・合田哲朗[1]・呉 俊 傑[1]・中野雅章[1]

[1]日本工営（株）中央研究所（〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304）

災害発生時の被害調査や復旧作業は迅速に行われる必要があるが，実施箇所の選定や手順には明確なルールがなく，管理者の経験や現場判断に依存しているのが現状である．また，耐震化など予防保全対策の整備効果はシステム全体の機能向上という観点では評価されていない．本検討では，被災後の機能低下と復旧による機能回復を時系列で示すレジリエンス三角形を用いて，復旧手順や予防保全対策の効果を定量評価し，レジリエントなインフラマネジメント手法の具体化を目的とした．レジリエンス評価を用いることで，下水道システムの機能に着目した災害復旧や震災対策のより効果的なマネジメントが可能であることを示した．

Key Words ： *レジリエンス評価, 下水道ネットワーク, 復旧手順, 耐震化対策, 機能指標*

１．検討背景

令和6年能登半島地震では，上水道や下水道の基幹施設が甚大な被害を受けたことにより，広範囲での断水や下水道機能が停止し，住民生活に深刻な影響を及ぼした．上水道や下水道施設は大部分が地下築造のため，ひとたび被災すると復旧に長期間を要する場合が多い．また，災害発生時に実施されるべき被害調査や復旧作業に関しては，実施箇所の選定や作業手順に関する明確なルールが存在せず，その多くが管理者の経験や現場での判断に依存している．

下水道のストックマネジメントでは，大規模地震の発生時でも下水道機能および緊急輸送道路などの交通機能を確保することを目的として，予防保全対策が実施されている．下水道事業のマネジメントに関するガイドライン[1),2)]では，これらの対策による効果はアウトカム指標によって評価するとしている（**表-1**）．ここでのアウトカムは，事業量を示すアウトプット指標とは異なり，管渠の劣化ランク（Ⅳ・Ⅴ）延長の減少，道路陥没数の減少，ライフサイクルコストの縮減など数値化を行っている．これらにより一定の効果は評価可能であるものの，直接的な性能評価とは言えず，下水道システム全体の機能向上という観点からの整備効果の評価は不十分である．

気候変動に伴い頻発化・激甚化している自然災害や発生が切迫しているとされる巨大地震に備えるためには，効率的かつ効果的な対策の優先順位付けおよび復旧手順の策定方法を確立することが，喫緊の課題となっている．

表-1　点検・調査及び修繕・改築に関する目標（アウトカム及びアウトプット）の設定例[2)]

点検・調査及び修繕・改築に関する目標（最終アウトカム）				施設種類別事業量の目標（アウトプット）			
項目		目標値	達成期間		項目	目標値	達成期間
安全の確保	本管に起因する道路陥没の削減	道路陥没 0 件/km/年	20 年	管路施設	管渠の改築	管渠調査延長　100km/年 改築延長　30km/年	10 年
	マンホールふたに起因する事故削減	年間事故割合 0 件/処理区/年	20 年		マンホールふたの改築	点検数量 5,000 基/年 改築数量 2,000 基/年	10 年
サービスレベルの確保	安定的な下水道サービスの提供	不明水量の減少 15%→10%以下 主要な施設の健全度を 2 以上 健全度 2 以下の施設割合 50%→0%	20 年	管路施設	管路施設改築	管渠調査延長　100km/年 改築延長　30km/年 ます・取付け管改築 100 箇所/年	10 年
				設備	主要設備の改築	改築設備数　3 件/年	10 年
ライフサイクルコストの低減	目標耐用年数の延長	管渠　65 年→75 年 状態監視保全を行っている設備の目標耐用年数を現在の約 1.2 倍とする。	20 年	管路施設	定期的な点検・調査による劣化の早期発見・早期対応による延命化	点検・調査の延長の見直し 80km/年→100km/年 不具合予防処置（重症になる前の早期対応）の拡充 50km/年→70km/年	10 年
				設備	点検・調査の重視及び劣化の早期発見による延命化	定期的な状態監視保全設備の調査を行うことによって、部品単位の交換を行う。 5 件/年→10 件/年	10 年

２．検討目的

災害発生時における被害調査および復旧作業，ならびに予防保全対策を効率的かつ効果的に実施するためには，復旧による機能回復や平常時の機能強化の定量的な評価手法の構築が不可欠である．本検討では，レジリエンスの定量評価に基づく，災害時お

よび平常時の双方で活用可能なインフラマネジメント手法を具体化することを目的とする．レジリエンスの定量評価においては，被災による機能低下と復旧過程における機能回復を時系列で表現する．これにより，システムの状態に応じたレジリエンスの変化を把握し，迅速な機能回復を目的とした復旧計画や予防保全対策の優先順位を示す補強計画の策定に資することが可能となる．

本検討は，下水道ネットワークを検討対象として，①早期機能回復の観点からの応急復旧手順の提示，②システムの機能向上の観点からの予防保全対策優先順位の提案を行った．

なお，本検討は，東京都下水道サービス株式会社との共同研究により実施したものである[3]．

3．レジリエンス評価

レジリエンスは，仙台防災枠組2015-2030で「困難な状況下でも，基本的な機能などを保持し，また災害からの悪影響に対し抵抗できる強い芯をもち，しなやかに回復できるシステム」という意味で使われている．復元力や対応力に近い概念であり，以下の4つの特性で表現できる[4]．

① Robustness(頑強性)は，損傷に対する抵抗性．
② Redundancy(冗長性)は，ある一部の機能が損傷しても全体としての機能を維持する性質で，機能的な余裕や対応策の選択肢の多さ，代替可能なシステムを持ちうること．
③ Resourcefulness(臨機応変性)は，機能を回復するために必要な資源問題を特定し，優先順位を定めて資源・人員を再配置する能力．
④ Rapidity(即応性)は，早期の機能回復能力，優先順位に応じて，目標を迅速に達成する能力．

レジリエンスの定量評価には，縦軸に機能，横軸に時間を表すレジリエンス三角形が用いられる(**図-1**)．これは，平常時の機能が被災により低下し，復旧作業を経て元の機能レベルに達した時点(t_n)で復旧完了となる過程を示している．この機能の経時変化を時間で積分した機能損失量R値(レジリエンス三角形の面積)がレジリエンスを表す指標となる．R値が小さいほどレジリエンスは高く，予防保全対策による機能低下の抑制や，復旧手順による復旧速度の違いがR値に反映され，対策の優劣を評価することが可能となる．

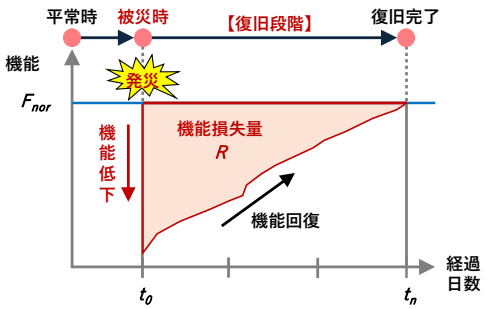
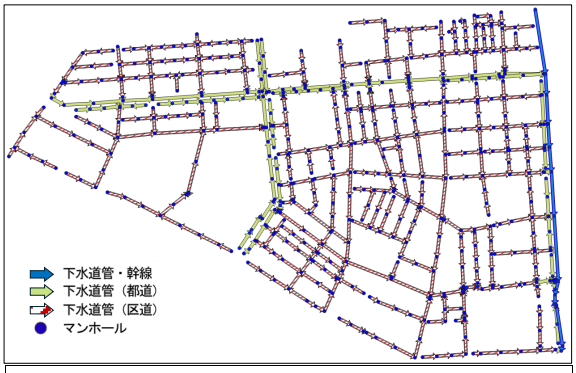


図-1　レジリエンス三角形

4．検討対象システム

本検討では東京都の一部地域の下水道ネットワークを対象とした．対象地域のネットワークモデルと下水道施設の諸元を**図-2**に示す．



・ 流域面積：92.31 ha
・ 下水道管：636 スパン，全延長22,363 m
　円形管（φ200～φ1,800 mm）
　矩形渠や馬蹄形渠（管高1,360～3,330 mm）
・ 人孔：614 個

図-2　下水道ネットワークと施設諸元

5．早期機能回復の観点からの復旧手順の提示

(1) 被害想定

本検討では，復旧が必要となる箇所を把握するため，対象ネットワークがレベル2地震動によって被災した場合の被害想定を行った．なお，対象地域は既に下水道管更生や人孔の耐震化対策が実施されている箇所もあるが，ここでは無対策とした．

対象地域は液状化が発生しやすい地域であるため，人孔と下水道管の両方の被害検討を実施し，その結果を「管路閉塞被害(閉塞スパン)」として考慮した．人孔については，浮上量を算出し，10cm以上浮上する人孔より上流は流下不可とし閉塞スパンとした．下水道管については，管種，管径，土被りから簡易的に断面方向の耐震照査ができるチャート[5]を用いた耐震評価や軸方向の地震時計算[6]からレベル2地震動で要求性能を満足しない下水道管は損傷するとし閉塞スパンとした．被害計算の結果，閉塞スパンは518スパン(総延長17,418m)となった(**図-3**)．

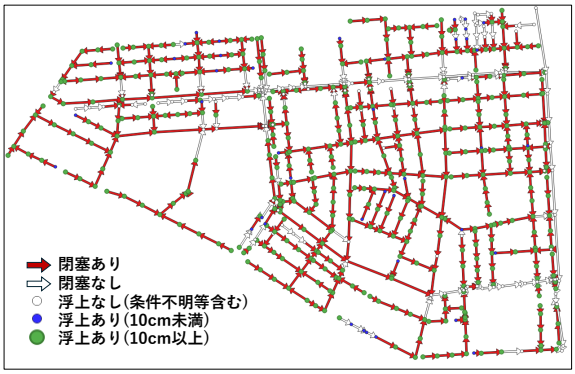


図-3　被害状況(下水道管閉塞発生箇所)

(2) 評価方法[7]

被災により下水道システムが損傷して下水道管の閉塞が生じると，対象流域内の下水を最下流に流すことができなくなる．それを日々の応急復旧により閉塞を解消し，流下可能範囲を広げていくことで被災前の状況に復旧させる．この被災による機能低下から復旧による機能回復を評価するために，システムの機能評価指標を「最下流人孔に流入する下水流量」とした．

復旧による流域変化と機能回復のレジリエンス評価イメージを**図 - 4**に示す．被災により閉塞した下水管の復旧を複数日に分けて行い，その復旧日ごとに最下流人孔の流量変化を求める．経過日数に対する最下流部での流量の推移を求め，レジリエンス三角形の面積(＝総損失流量)により評価を行う．被災後の復旧の考え方については，首都直下地震等における東京の被害想定報告書(東京都防災会議)の被害想定手法-ライフライン被害-下水道の中で示されている「復旧日数予測の考え方」を踏襲することとし，復旧の単位は一律400m/班・日とした[8]．

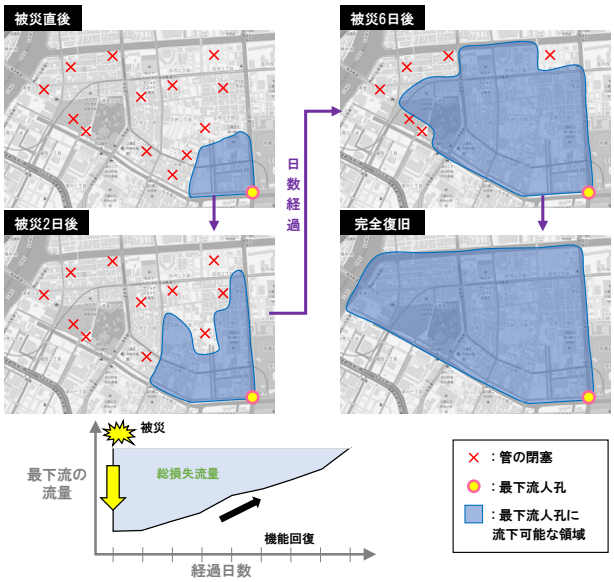


図 - 4　復旧による流下可能流域の変化と最下流流量の回復のイメージ(OpenStreetMapに加筆して作成)

(3) レジリエンス評価による復旧手順の提示

ここでは，応急復旧手順が下水道システムの機能回復に与える影響を評価し，早期に機能回復可能な復旧手順を導出するため，以下の2つのケースで検討を行った．

・ケース1：管路をランダムに復旧
・ケース2：下流の管路から復旧

復旧単位は400m／班・日とし，対象地域では1班体制で復旧を行うこととした．総延長17,418mをすべて復旧するには，44日(=17,418[m]／400[m/日])を要する．

各ケースの評価結果を**図 - 5**に示す．機能損失量を示すR値はケース1が29.3，ケース2が17.4であり，下流の管路から復旧する手順では約半分の機能損失に抑えられることがわかる．また，流量50%以上回復するまでには，ケース1では32日を要するのに対して，ケース2では14日であった．また，80%以上の回復もケース2では33日で回復できている．

本計算では，復旧箇所を日別に把握し機能回復量を算出していることから，R値の小さい手順を早期機能回復が可能な復旧手順として提示できる．

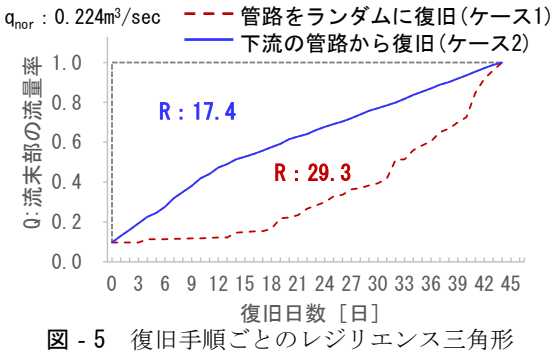


図 - 5　復旧手順ごとのレジリエンス三角形

6．システムの機能向上の観点からの予防保全対策優先順位の提案

(1) 被害想定

レベル2地震動で被災した場合の被害想定を行った．下水道管と人孔の整備状況を考慮し，各対策の人孔浮上抑制効果を人孔浮上量に反映した[9]．また，管更生スパンについては被災により管の閉塞が生じないと仮定した．閉塞スパンの判定結果を**図 - 6**に示す．閉塞スパンは430スパン(総延長15,068m)であった．閉塞スパンが対策の対象スパンとなる．

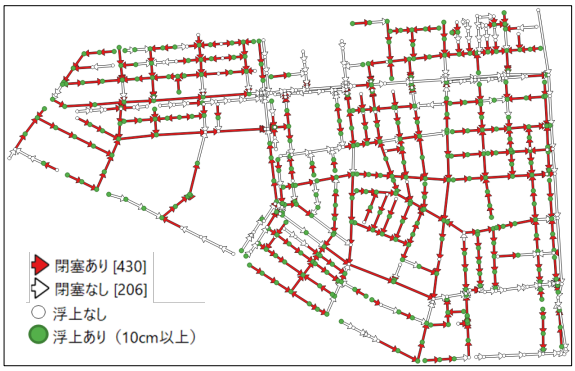


図 - 6　被害状況(下水道管閉塞発生箇所)

(2) 評価方法[7]

ここでは，対象地域を複数のエリアに分割して検討した(**図 - 7**)．複数年にわたり予防保全対策として管更生による補強を段階的に実施する中で，最もレジリエンスを高める実施エリアの順序を求めた．具体的には，各年の補強完了後に地震で被災し，無対策箇所に被害が生じたと仮定して復旧計算を行い，このときのR値が最小となるエリアを最も実施効果の高いエリアと評価した．そして，必要箇所への補強が完了するまで，この計算を繰り返した．

管路の補強計画の検討に用いる補強リソースであ

る年間予算と工事費については次のとおりとした．

再構築事業の年間予算は，これまでの再構築事業費と整備実績から本検討で対象とした流域面積比で算出し，対象地域の枝線再構築予算を年間4億とした．管路の補強に用いる管更生工法の口径毎の工事費は，委託者提供資料より設定した．設定した工事費と補強を必要とするスパンから補強対策費の合計は23.3億円となり，対象地域では6か年で対策完了となった．

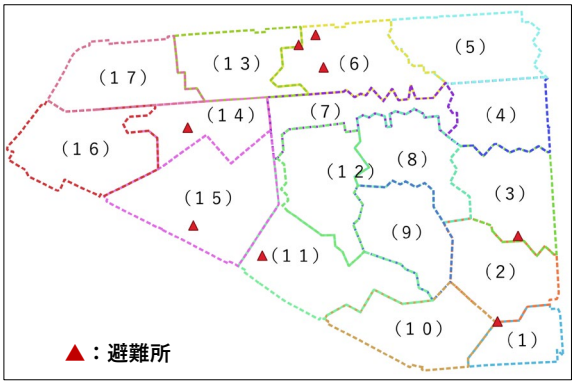


図 - 7　対象地域のエリア分割図(管路表示なし)

(3) レジリエンス評価による補強順の提案

レジリエンス評価による補強順の結果を**表-2**に示す．同一のエリア番号が複数年にわたり出現しているのは，エリア内のスパン全てを補強するのに複数年を要したためである．補強回数ごとの復旧時の機能推移を**図 - 8**に示す(補強回数6回では被害発生がなく，機能推移グラフは省略)．補強が進むにつれ，機能低下が小さくなり，復旧完了までの日数も補強回数0回の38日から，補強1回で30日，2回で23日，3回で17日，4回で12日と短縮された．補強回数5回の場合は6日となり，1週間以内での機能回復が可能となった．また，R値(機能損失量)は補強回数0回の3.92に対して，補強回数5回では0.07と大幅に低減し，レジリエンスが高まった．これにより，各年の補強による下水道システム全体への効果を定量的に評価できた．

表-2　補強回数とエリア番号

補強回数	エリア番号
1	3,5,7,15
2	1,2,3,4,10,16
3	6,11,13,16
4	11,12,14
5	8,9,12
6	9,17

※各補強回数のエリア番号順は意味は持たない

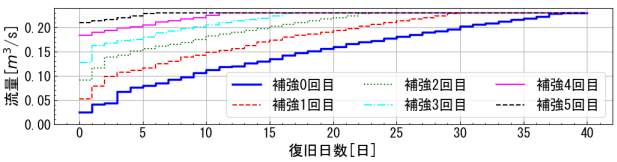


図 - 8　補強回数ごとの復旧時の機能推移

7．まとめと今後の課題

本検討より以下の2点の結果を得た．

1つ目は，レジリエンス三角形を用いて下水道システムのレジリエンスを定量評価・比較することで，復旧手順の違いが機能回復に与える影響が明らかとなったことである．これにより，これまで管理者の経験に依存してきた復旧を，早期機能回復の観点からで実施可能な手順として提示できる．

2つ目は，複数年にわたる補強計画に対して，各年の対策完了時点でのレジリエンス三角形を最小化にする最適化計算を行うことで，下水道システム全体の機能向上を最大化する予防保全対策の優先順序の提示が可能となる．

以上の結果から，レジリエンス評価を用いることで，下水道システムの機能に着目した被災後の早期機能回復を可能にする復旧計画や，より効果的な震災対策のマネジメントが可能であることを示した．

本検討では下水道に焦点を当てているが，実際の災害対応では都市全体の早期機能回復が求められる．現在は下水道との関連性の高い上水道との相互作用を考慮した計画立案の検討を進めているところである．今後は，上下水道に加え道路や電力など複数のインフラの相互関係を考慮した複合レジリエンス評価の確立に取り組み，より安心・安全な都市インフラマネジメント手法の構築を進めていく．

参考文献

1) 国土交通省：下水道事業における事業マネジメント実施に関するガイドライン-2024年版-, 令和6年7月.
2) 国土交通省：下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン-2015　年版-, 平成27年11月（令和4年3月改定）, p.21, 表2-3.
3) 武藤真, 中村ゆかり, 合田哲朗, 堀口陽子, 小林義和, 大沢昌玄：レジリエンス評価の適用による下水道ネットワークの効率的な応急復旧に関する研究, 土木学会論文集, 80巻（2024）7号.
4) Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A. and Von Winterfeldt, D.: A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. Earthquake spectra, 19(4), 733-752, 2003.
5) 酒匂邦生，本波温士，和田淳，日野和功，杉本克美：管きょ内面被覆工法(製管工法)における耐震設計の効率化検討．土木学会論文集 F1, 75(2), I_49-I_66, 2019.
6) 公益社団法人日本下水道協会：下水道施設耐震対策指針と解説2014年版，2014.
7) 合田哲朗, 中村ゆかり, 辻井純平, 中野雅章：レジリエンスの定量評価に基づく下水道ネットワークの応急復旧計画及びストックマネジメント計画の最適化, 土木学会論文集, 81巻（2025）1号.
8) 東京都防災会議：首都直下地震等による東京の被害想定報告書，2022.
9) 武藤真ら：液状化によるマンホールの浮上抑制に対する耐震化工法の実験的研究，下水道協会誌，Vol.60, No.733, pp.130-139, 2023.