予防保全の意思決定基準
—下水道管路の改築に関する考察—

藤木　修[1]・渡辺　肇[2]

[1]正会員　京都大学客員教授　経営管理大学院（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）
E-mail: fujiki.osamu.d41@kyoto-u.jp

[2]正会員　京都大学特命講師　経営管理大学院（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）
E-mail: HJ-watanabe@yachiyo-eng.co.jp

公共施設に大規模な破損がランダムに起きると仮定して，予防保全を行うことが経済学的に合理的だと判断される基準について考察を行った．簡単な数学モデルに基づき，事後保全のコストと代表的な予防保全方式である予防保全改築，時間計画保全，状態監視保全のコストとをそれぞれ対比する予防保全の選択基準を導出した．さらに，改築まで一定の損害が継続して発生する場合についても考察を行った．このような理論的考察は，重点的に収集すべきデータの特定とその活用等のために有益である．下水道管路を対象として上記の選定基準の幾つかを適用するためのケーススタディを行い，管路の破損に伴う道路陥没や雨天時浸入水によって生下水が道路等に溢水した場合の公衆衛生リスクの算入が，予防保全を推進するうえでどの程度効果的となり得るかを評価した．

Key Words: *preventive maintenance, decision-making criteria, cost benefit analysis, sewer rehabilitation and renewal, public health risk*

1. はじめに

公共施設の老朽化問題が社会的に注目されており，施設や設備のメンテナンスの基本サイクルとして，計画的に点検・調査を行い，その結果に基づいて診断し，必要に応じて補修又は改築を実施するという体系的なプロセスが推奨されている．調査・点検の結果は何段階かの劣化度や緊急度のランクとして評価される．そして，劣化度が最も進行した，或いは緊急度の最も高いランクに評価された施設・設備や部材・部品は，そのまま放置すると破損や故障につながることがあるため，予防保全の考え方を適用して改築又は取り換えが奨められることが多い．

他方，破損や故障は発生してから取り換えや修理が行われる場合もある．例えば水道の配水管の管路更新率は全国平均でわずか 0.74%であり [1]，末端管を中心に多くの水道配水管は破損が見つかった後で更新されるというのが現状である．水道管と比較して下水道管路は敷設後の経過年数が小さいためそれほど意識されていないが，このままでは水道管と同様更新率が向上しないことも十分に想定される．橋梁等と比較して上下水道の管路施設は地下に埋設されていて住民の目に触れることがないうえ，点検・調査にも大きなコストがかかるため，社会一般からも行政サイドからも注目されない傾向がある．

調査・点検等の結果から緊急度が高いと診断され場合に，すぐに改築・交換すべきか，財政状況等に配慮して差し当たって改築・交換を行わずに待つべきかといった意思決定は，事業体の現場においてしばしば直面する問題であろう．しかし，その判断基準は一般に明確ではなく，結局事業体のその時々の財政上の余裕等に依存する可能性が大きいようにも思われる．

一般に，アセットマネジメントは予防保全を行うことであると解されているようであるが，そうではない．アセットマネジメントの国際規格である ISO 55001 は邦訳されて JIS Q 55001 となっているが，「箇条 10.2 予測対応処置」は，「組織は,アセツトのパフォーマンスにおける潜在的な不具合を事前に特定するプロセスを確立し,予測対応処置の必要性を評価しなければならない」と規定している [2]．「予測対応処置」というのは，「潜在的な不適合又はその他の望ましくない起こり得る状況の原因を除去する処置」[3]とされ，一般に「予防保全」と呼ばれているものと同義と考えられる．また，国土交通省の「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－」では，「今後，限られた人員

や予算の中で効果的に予防保全型の施設管理を行っていくためには，各設備の特性等から，処理機能や予算への影響等を考慮し，重要度が高い設備に対し，予防保全を実践していく必要がある」[4]とされており，重要度の高い施設に限定した予防保全の適用を奨めている．

改築・交換を行おうとすれば，そのための予算が必要となる一方，緊急度が高いとはいってもすぐに破損・故障するわけではない．むしろ破損・故障した後で処置するという事後保全の方が経済的だという考え方も成立し得る．

本稿では，老朽化しつつある公共施設を対象とする保全方法の選択基準について考察を行う．考え方の基本は，経済学的に合理的といえるかどうかであって，一般に用いられる費用便益分析と同様の方法である．具体的には予防保全と事後保全のコストを比較するが，事後保全のコストは，予防保全によって回避されるため，これを予防保全の便益と捉えることができる．したがって，予防保全の選択基準は，（事後保全のコスト）／（予防保全のコスト）として表され，この費が 1 より大きければ予防保全を選択する合理的理由となる．

2. 予防保全改築の選択基準

防災施設の費用便益分析では，災害の平均的な発生頻度を用いて防災施設の便益の評価が行われるが [5]，この手法を事後保全のリスクコストの推定に適用することで，予防保全と事後保全のコスト比較を行うことができる．点検・調査の結果，緊急度が高いと判定され，直ちに改築を行う場合のコスト，即ち予防保全改築のコストをC_rとおく．緊急度が高いと判断されたにもかかわらずそのまま使い続け，破損したのちに改築するコストを$C_r + C_s$とおく．破損してからの対応では，改築費用とは別に，取り敢えず下水管路の機能を応急復旧するための修繕費用のほか，その間の通行止め，苦情対応，汚水の溢水に伴う公衆衛生上の被害といった社会的コストも発生する．これらすべての，予防保全コストと比較した事後保全のコストの増分を$C_s(>0)$で表す．

予防保全改築によって将来の破損のコスト$C_r + C_s$は回避できるのであるから，$C_r + C_s$は予防保全改築によって得られる将来の便益と捉えられる．これだけで比較すると，必ず事後保全のコストの方が予防保全改築のコストを上回るが，予防保全改築のコストが直ちに発生するのに対して，事後保全のコストは将来時点で発生するため，通常費用便益分析で行われるように，将来時点のコストを現在価値に換算して比較する必要がある．予防保全改築の便益の現在価値Bは次のように表される．

$$B = \frac{C_r + C_s}{(1+\gamma)^t} \tag{1}$$

ここに，t（年）は予防保全改築が行われる時点を基準として下水管路の破損が発生するまでの時間であり，γ は現在価値に換算するための割引率である．

下水管路の破損事象は，一定の頻度でランダムに発生する一様ポアソン過程にしたがうと仮定すると，時間$(0,t)$の間にk回の破損事象が発生する確率$P_o(k,t)$は次のポアソン分布にしたがう．

$$P_o(k,t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda} = \frac{\left(\frac{t}{T}\right)^k}{k!} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} \tag{2}$$

ここに，λは平均破損率（1/年），Tはλの逆数で破損までの平均時間（年）である． tの確率密度関数$h(t)$は，時間$(0,t)$の間に破損事象が発生しないという条件のもとで，その直後に破損事象が発生する条件付き確率となるから，

$$h(t)dt = P_o(0,t)\lambda dt = \lambda e^{-\lambda t} dt \tag{3}$$

すなわち

$$h(t) = \lambda e^{-\lambda t} = \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}} \tag{4}$$

式(1)と式(4)より，Bの期待値$\bar{B}$は次のように表される．

$$\bar{B} = (C_r + C_s)\int_0^\infty \frac{h(t)}{(1+\gamma)^t} dt = \frac{(C_r + C_s)}{1 + T\,ln(1+\gamma)} \tag{5}$$

予防保全改築の費用はC_rであり，予防保全改築が行われる時点を基準，すなわち現在時点としているため，予防保全改築の費用の現在価値CはC_rと等しい．

$$C = C_r \tag{6}$$

したがって，予防保全改築の費用対便益比は次のように表される．

$$\frac{\bar{B}}{C} = \frac{\left(1 + \frac{C_s}{C_r}\right)}{1 + T\ln(1+\gamma)} \tag{7}$$

本稿では，特に断らない限り，予防保全の選択基準を式(7)のような費用対便益比の形式で表示する．この比が 1 を超える場合に，予防保全が事後保全より経済学的に有利と判断される．

劣化や傷みが進んで緊急度が高い場合，破損率λは時間の経過とともに増大すると想定され，実際の$\bar{B}$は式(5)より大きくなると見込まれる．このような条件を加味したより現実的な tの確率密度関数を$q(t)$とおくと，Bの期待値$\bar{B}_q$は次のように表される．

$$\bar{B}_q = (C_r + C_s)\int_0^\infty \frac{q(t)}{(1+\gamma)^t} dt$$

$$= \rho(C_r + C_s)\int_0^{\infty} \frac{h(t)}{(1+\gamma)^t}dt = \frac{\rho(C_r + C_s)}{1 + T\,ln(1+\gamma)} \quad (8)$$

ここに

$$\rho \equiv \{1 + T\,ln(1+\gamma)\}\int_0^{\infty} \frac{q(t)}{(1+\gamma)^t}dt \quad (9)$$

この場合，式(7)は次のように表すことができる．

$$\frac{\bar{B}_q}{C} = \frac{\rho\left(1+\frac{C_s}{C_r}\right)}{1 + T\ln(1+\gamma)}, \qquad (\rho \geq 1) \quad (10)$$

$\bar{B}_q$は，損傷率λの時間変化を加味したBの期待値である．さらに式(1)で表される便益の現在価値Bが確率変数であることに着目し，リスク回避度又は選好度による効用の変化を考慮にいれると，損傷率λの時間変化を加味したBの確実同値額は

$$\hat{B}_\rho = \bar{B}_\rho + \frac{1}{2}rVar(B) \quad (11)$$

と表される．$Var(B)$は損傷率λの時間変化を加味したBの分散，rは絶対的リスク回避度（coefficient of absolute risk aversion）と呼ばれる，意思決定者の選好を代表するパラメータである [6]．リスク回避的な意思決定者は，事後保全に伴うリスクを大きく評価するため予防保全改築の便益が大きくなる．結果として式(7)，式(8)，式(9)より次の関係が導かれる．

$$\frac{\hat{B}_\rho}{C} = \frac{\rho\left(1+\frac{C_s}{C_r}\right) + \Delta}{1 + T\ln(1+\gamma)}, \qquad (\rho \geq 1) \quad (12)$$

$$\Delta \equiv \frac{1}{2C_r}rVar(B) \quad (13)$$

現実の意思決定では，破損するまで放置するかどうかではなく，差し当たって例えば今後 3～5 年程度の間そのまま使い続けることとし，再度点検・調査を行ってその後の処置を決定するといった比較的短期的視点からの意思決定が求められる場合も多い．このような場合は，近似的に$\rho = 0$とおいてよいであろう．さらに意思決定がリスク中立的な場合は$r = 0$，すなわち$\Delta = 0$となる．簡単のため以降の考察は，$\Delta = 0$を前提として進めることとする．

3. 時間計画保全の選択基準

時間計画保全は施設・設備の特性に応じて予め定めた周期（目標耐用年数等）により改築等の対策を行う管理方法である．時間計画保全は，浄水場や下水処理場の処理機能への影響が大きい等，重要度が高い設備であるが，劣化状況の把握が困難な電気計装設備等に適用される場合が多い．したがって，ここでは「破損」より「故障」という呼称の方が適切であろう．ただし，ここでは故障の後に設備の改築や交換が必要となるような致命的な故障を仮定する，

図-1 に時間計画保全と事後保全の概念図を示す．時間計画保全では時間間隔L（年）で定期的に改築が行われ，その間に発生する故障は無視できるものとする．事後保全でも新設又は改築後L（年）の間の故障は無視できるが，それ以降は一定の確率λ（1/年）で故障が生じると仮定する．このとき，故障発生の時間間隔t_1, t_2, t_3 …は指数分布にしたがうため，新設後と改築後の故障間隔tの確率密度関数をそれぞれ$G(t), g(t)$とおくと，

$$G(t) = \begin{cases} 0, & (0 \leq t \leq S) \\ \lambda e^{\lambda S} e^{-\lambda t}, & (S \leq t) \end{cases} \quad (14)$$

$$g(t) = \begin{cases} 0, & (0 \leq t \leq L) \\ \lambda e^{\lambda L} e^{-\lambda t}, & (L \leq t) \end{cases} \quad (15)$$

と表される．また，時間計画保全でも事後保全でも，現在時点は，新設から$(L-S)$年を経た時点とする．t_1が新設時点からではなく，現在時点から最初の故障発生までの時間であることに違和感があるかもしれないが，一様ポアソン過程では，任意の時点から次の事象が起きるまでの時間も隣り合う事象間の時間も同じ指数分布にしたがうことは，式(4)の導出から明らかである．

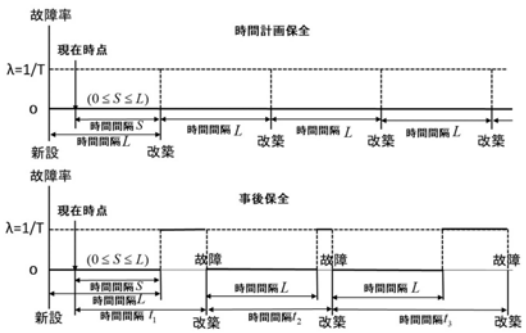

図-1 時間計画保全と事後保全

時間計画保全では改築に要するコストがすべて等しくC_rであると仮定すると，時間$(L-S, \infty)$に必要とされる総コストの現在価値S_cは次のように表すことができる．

$$S_c = \frac{C_r}{(1+\gamma)^S}\left\{1 + \frac{1}{(1+\gamma)^L} + \frac{1}{(1+\gamma)^{2L}} + \frac{1}{(1+\gamma)^{2L}} + \cdots\right\}$$
$$= \frac{C_r}{(1+\gamma)^S}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{\frac{1}{(1+\gamma)^L}\right\}^n = \frac{C_r(1+\gamma)^{L-S}}{(1+\gamma)^L - 1} \quad (16)$$

事後保全の場合，故障・改築のたびに必要となるコストは$C_r + C_r$となり，総コストの現在価値$\hat{s}_c$は，次のように表される．

$$\hat{s}_c = (C_r + C_s)\left\{\int_S^\infty \frac{G(t_1)}{(1+\gamma)^{t_1}}\,dt_1 + \int_L^\infty\int_S^\infty \frac{G(t_1)g(t_2)}{(1+\gamma)^{t_1+t_2}}\,dt_1dt_2 + \int_L^\infty\int_L^\infty\int_S^\infty \frac{G(t_1)g(t_2)g(t_3)}{(1+\gamma)^{t_1+t_2+t_3}}\,dt_1dt_2dt_3 + \cdots\right\}$$

$$= (C_r + C_s)\lambda e^{\lambda S}\left\{\int_S^\infty \frac{e^{-\lambda t_1}}{(1+\gamma)^{t_1}}\,dt_1 + \int_S^\infty \frac{e^{-\lambda t_1}}{(1+\gamma)^{t_1}}\,dt_1\int_L^\infty \frac{e^{-\lambda t_2}}{(1+\gamma)^{t_2}}dt_2 + \int_S^\infty \frac{e^{-\lambda t_1}}{(1+\gamma)^{t_1}}\,dt_1\int_L^\infty \frac{e^{-\lambda t_2}}{(1+\gamma)^{t_2}}dt_2\int_L^\infty \frac{e^{-\lambda t_2}}{(1+\gamma)^{t_2}}dt_2 + \cdots\right\}$$

$$= \frac{(C_r + C_s)}{(1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^S} \times \sum_{n=0}^{\infty}\left\{\frac{1}{(1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^L}\right\}^n$$

$$= \frac{(C_r + C_s)(1+\gamma)^{L-S}}{(1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^L - 1} \quad (17)$$

式(7)と同様に時間計画保全の費用対便益比$\bar{B}_T/C_T$を求めると次のようになる，

$$\frac{\bar{B}_T}{C_T} = \frac{\hat{s}_c}{S_c} = \frac{(1+\gamma)^L - 1}{(1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^L - 1}\left(1 + \frac{C_s}{C_r}\right) \quad (18)$$

$\bar{B}_T/C_T$が大きくなる，或いは時間計画保全が有利となるのは，①Tが小さい，すなわち改築後に時間計画保全の改築間隔Lの時間が経過すると，平均故障率λが大きく増大するとき，②C_s/C_rが大きい，すなわち時間計画保全の改築コストと比較した，故障発生時に必要となるコストの増分（社会的コストを含む）が大きいとき，③Lが大きい，すなわち時間計画保全の改築間隔が大きいとき，並びに④γが大きいときである，①～④は，改築後時間計画保全の改築間隔Lを超えて故障するまで使い続ける場合に期待されるコストの増分の現在価値が比較的大きくなる条件を示している，

式(8)と同様の方法で，故障率λが時間の経過とともに増大するような現実的な t の確率密度関数 Q(t), $q(t)$に対する事後保全に係るコストの現在価値の総和$\bar{B}_q$を次のように表すことができる．

$$\bar{B}_q = (C_r + C_s)\int_0^\infty \frac{Q(t)}{(1+\gamma)^t}\,dt \sum_{n=0}^{\infty}\left\{\int_0^\infty \frac{q(t)}{(1+\gamma)^t}dt\right\}^n \quad (19)$$

$$\int_0^S \frac{Q(t)}{(1+\gamma)^t}\,dt \cong 0, \quad \int_0^L \frac{q(t)}{(1+\gamma)^t}\,dt \cong 0 \quad (20)$$

ここで

$$\rho_S \equiv (1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^S\int_0^\infty \frac{Q(t)}{(1+\gamma)^t}\,dt \quad (21)$$

$$\rho_L \equiv (1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^L\int_0^\infty \frac{q(t)}{(1+\gamma)^t}\,dt \quad (22)$$

とおくと，

$$\bar{B}_q = \frac{\rho_S(C_r + C_s)(1+\gamma)^{L-S}}{(1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^L - \rho_L} \quad (23)$$

$$\frac{\bar{B}_q}{C_T} = \frac{\rho_S\{(1+\gamma)^L - 1\}}{(1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^L - \rho_L}\left(1 + \frac{C_s}{C_r}\right) \quad (24)$$

が得られる．

時間計画保全の費用対便益比は，ρ_L，ρ_Sの増大に伴って大きくなる．$\rho_L = \rho_S = 1$のとき，λは時間にかかわらず一定とみなされ，式(23)，式(24)はそれぞれ式(17)，式(18)と一致する．式(24)はSの関数であるため，時間計画保全の選択基準は意思決定を行う時点の影響を受ける．時間計画保全における次期改築までの時間を表す変数Sが大きいとき，すなわち新設又は改築からあまり時間を経ていない段階では，ρ_Sの値は比較的大きく，時間計画保全の相対的優位性が高い．反対に改築時期が近くなると，事後保全の相対的優位性が高まる．しかし，λが一定とみなされる式(18)はSの関数ではなく，時間計画保全の選択基準は意思決定の時点の影響を受けない．

式(16)，式(17)は，現時点から長期の将来にわたるコストの現在価値の総和を示している，しかし，短期的な視点からの意思決定では，両式の第 2 項以降は無視でき，$\bar{B}/C$は次のように表される，

$$\frac{\bar{B}_q}{C_T} = \frac{\hat{s}_c}{S_c} \cong \frac{(C_r + C_s)}{(1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^S}\cdot\frac{(1+\gamma)^S}{C_r} = \frac{\left(1 + \frac{C_s}{C_r}\right)}{1+T\ln(1+\gamma)} \quad (25)$$

式(25)は式(7)と一致する，短期的な視点からの意思決定基準である式(7)，或いは式(25)は，意思決定の時点の影響を受けない．

4. 状態監視保全の選択基準

状態監視保全は，施設・設備の劣化状況や動作状況の確認を行い，その状態に応じて改築等の対策を行う管理方法である．状態監視に必要な毎年のコストをC_C（一定）とし，この状態監視保全によって故障間際の前兆を確実に捉えることができ，かつ前兆があった場合は直ちにコストC_rをかけて改築を行うこととする．時間計画保全で仮定したように，対象とする故障は，施設・設備の改築が必要となるような致命的なものとする，また，前兆が把握できた後実際に故障が発生するまでの時間は

無視できるものと仮定する．

状態監視のコストの現在価値の総和C_mは，次のように表される．

$$C_m = \int_0^\infty \frac{C_c}{(1+\gamma)^t} dt = \frac{C_c}{\ln(1+\gamma)} \qquad (26)$$

前兆を捉える時間間隔は，故障発生の時間間隔と同じと考えることができ，かつ故障発生前に改築が行われるため，状態監視保全のコストの現在価値の総和C_Mは，事後保全のコストの現在価値の総和を表す式(23)で$C_s = 0$とおいたものに，上記のC_mを加えたものとなる．時間計画保全で設定した式(20)の条件は必要なく，$Q(t) = q(t),\ S = L = 0,\ \rho_S = \rho_L = \rho$とおく．

$$C_M = \frac{\rho C_r(1+\gamma)}{(1+T\ln(1+\gamma)) - \rho} + C_m \qquad (27)$$

$$\rho \equiv (1+T\ln(1+\gamma)) \int_0^\infty \frac{q(t)}{(1+\gamma)^t}\, dt \qquad (28)$$

状態監視保全の便益は，状態監視保全によって回避される事後保全のコストの現在価値の総和によって表されるから，式(23)より

$$\bar{B}_M = \frac{\rho(C_r + C_s)}{(1+T\ln(1+\gamma)) - \rho} \qquad (29)$$

式(27)，式(29)より，状態監視保全の$\bar{B}_M / C_M$は次のようになる．

$$\frac{\bar{B}_M}{C_M} = \frac{\rho \ln(1+\gamma)\left(1+\frac{C_s}{C_r}\right)}{\rho(1+\gamma)\ln(1+\gamma) + \{(1+T\ln(1+\gamma)) - \rho\}\frac{C_c}{C_r}} \qquad (30)$$

式(30)から，C_s/C_rが大きいほど，C_c/C_rが小さいほど，Tが小さい，すなわち平均故障発生率λが大きいほど，状態監視保全が優位となることがわかる．

5. 持続費用最小化の基準

ここまでは対象とする１つのアセットに着目し，予防保全又は事後保全を選択する基準として，コストの現在価値を比較する方法について検討を行った．しかし，同種類のアセットが多数存在し，それらの点検，調査，修繕，改築といったライフサイクルがバラバラで非同期の状態である場合には，個別アセットにおいても，現在価値への割引を行わずにライフサイクルにわたる平均費用を最小化する保全方法を採用することで，アセットシステム全体の持続的費用の最小化を達成できることがわかっている[7]．

式(24)で，$\gamma \to 0$とする．分母分子で定数と$0/0$となる因子を残し，分母，分子をそれぞれγで微分すると

$$\lim_{\gamma\to 0}\frac{\bar{B}_T}{C_T} = \lim_{\gamma\to 0}\frac{\frac{d}{d\gamma}\{(1+\gamma)^L - 1\}}{\frac{d}{d\gamma}\left\{1 - \int_0^\infty \frac{q(t)}{(1+\gamma)^t}dt\right\}}\left(1+\frac{C_s}{C_r}\right)$$

$$= \lim_{\gamma\to 0}\frac{L(1+\gamma)^{L-1}}{\int_0^\infty tq(t)(1+\gamma)^{-(t+1)}dt}\left(1+\frac{C_s}{C_r}\right)$$

$$= \frac{(C_r + C_s)/T_L}{C_r/L} \qquad (31)$$

ここにT_Lは次のように定義され，事後保全における改築から故障までの時間間隔の期待値を表す．

$$T_L \equiv \int_0^\infty tq(t)dt \qquad (32)$$

式(31)の分母は時間計画保全の平均費用，分子は事後保全の平均費用を表している．このように，平均費用最小化の保全方法の選択基準は，ライフサイクル費用の現在価値を比較する方法で割引率$\gamma \to 0$とすることによって求められる．しかしながら，短期的な視点からの意思決定基準である式(7)，式(25)で$\gamma \to 0$としても，平均費用最小化の保全方法の選択基準は得られない．また，当然のことながら，平均費用最小化の選択基準である式(26)は，意思決定の時点の影響を受けない．

状態監視保全については，式(30)で$\gamma \to 0$とする．

$$\lim_{\gamma\to 0}\frac{\bar{B}_M}{C_M} = \lim_{\gamma\to 0}\frac{(C_r + C_s)\frac{d}{d\gamma}\ln(1+\gamma)}{\frac{d}{d\gamma}\left\{C_r\ln(1+\gamma) + \frac{C_c}{\int_0^\infty \frac{q(t)}{(1+\gamma)^t}dt}\right\}}$$

$$= \frac{(C_r + C_s)/T_L}{C_r/T_L + C_c} \qquad (33)$$

式(33)の分母は状態監視保全の平均費用，分子は事後保全の平均費用である．

以上のように，事後保全と比較した時間計画保全，状態監視保全の選択基準は，割引率$\gamma \to 0$とすると，持続的費用の最小化を達成するための平均費用最小化の選択基準となる．

6. 改築まで一定の損害が継続して発生する場合の基準

「2. 予防保全の選択基準」では，点検・調査の結果緊急度が高いと判定された場合に，予防保全処置として直ちに改築を行うかどうか判断するための基準について考察した．同様の状況で，改築までの間一定の損害が発生し続ける場合を取り上げる．破損するまで放置するかどうかではなく，そのまま使い続けるかどうかの判断基準

であり，その間に破損する確率は無視できるものとする．

毎年の損額額をC_Lとおくと，時間τだけ待って$t=\tau$で改築を行う場合の費用の現在価値の総和$C_{L.\tau}$は次のように表される．

$$C_{L,\tau}=\frac{C_r}{(1+\gamma)^\tau}+C_L\int_0^\tau\frac{1}{(1+\gamma)^t}dt$$
$$=\frac{C_r}{(1+\gamma)^\tau}+\frac{C_L}{\ln(1+\gamma)}\left\{1-\frac{1}{(1+\gamma)^\tau}\right\} \quad (34)$$

$t=0$ で改築を行う場合の費用はC_rであるから，費用便益比$\bar{B}_D/C_D$は

$$\frac{\bar{B}_D}{C_D}=\frac{C_{L.\tau}}{C_r}=\left\{1-\frac{C_L/C_r}{\ln(1+\gamma)}\right\}\frac{1}{(1+\gamma)^\tau}+\frac{C_L/C_r}{\ln(1+\gamma)} \quad (35)$$

直ちに改築を行う条件は，$\bar{B}_D/C_D>1$であるから

$$\left\{1-\frac{C_L/C_r}{\ln(1+\gamma)}\right\}\left\{1-\frac{1}{(1+\gamma)^\tau}\right\}<0 \quad (36)$$

式(36)が成り立つ条件は次のとおりである．

$$\frac{C_L}{C_r}>\ln(1+\gamma) \quad (37)$$

式(37)より，直ちに改築するかどうかの判断基準は，待ち時間τによらず，C_L/C_rと割引率γとの関係のみによって決まることがわかる．

7. 下水道管路の改築に関する考察

(1) 問題の設定

ここでは，「2. 予防保全の選択基準」のケーススタディとして，次のような仮想的なケースについて検討を行う．

> 管径 1,000mm，延長 30m の老朽化した下水道管渠があり，点検の結果緊急度Iと判定された．管路内面のひび割れ等の性状から判断して，このまま放置すると早晩管渠は破損して道路陥没が発生するリスクが懸念される．破損を未然に防止するため，直ちに下水道管路更生工法による改築を行うことが望ましいと考えられる．しかし，改築工事を今すぐに行うべきだろうか．

(2) 費用の想定（公衆衛生リスク費用を除く）

a) 更生工法による改築費用

$1m$ 当りの単価を 400 千円とすると，400 千円×30m=12,000 千円．すなわち

$$C_r=12{,}000{,}000\text{（円）} \quad (38)$$

b) 応急修繕費

下水道管路が破損した場合の応急修繕についての統計データは見当たらないため，ここでは概算の応急修繕費として 2,000（千円/破損）と設定する．

c) 下水道管路の破損に起因する交通渋滞の社会的費用

道路陥没による交通規制の時間は，交通事故と同程度の渋滞を引き起こすものと考え，渋滞の損失として，217（千円／破損）を用いる [8]．

d) 苦情に係る費用

これは下水道事業体側が適切に苦情を処理するための費用にとどまらない．住民等が苦情を発する背景には，身近に不満足な状況が発生していることを意味しており，その社会的費用を見積もる必要がある．国内においては，適当な文献が見当たらないため，英国の文献を参考に苦情電話 1 件当たりの費用を 30 ポンド（4,000 円）と仮定する [9]．また，1 件の陥没事故で 50 件の苦情電話があると仮定し，陥没事故 1 件当たりの費用を 4（千円/破損）×50（苦情/破損）=200（千円/破損）とおく．

上記の b)～d)から

$$C_s=2{,}417{,}000\text{（円）} \quad (39)$$

e) 予防保全改築の検討

式(38)，式(39)を式(7)に代入する．ただし，

$$\left.\begin{array}{r}\gamma=0.03\\ T=10\ or\ 20\text{（年）}\end{array}\right] \quad (40)$$

とする．

$$\frac{\bar{B}}{C}=\frac{\left(1+\frac{C_s}{C_r}\right)}{1+T\ln(1+\gamma)}=0.93\quad(T=10)$$
$$=0.76\quad(T=20) \quad (41)$$

$\bar{B}/C<1$であるため，直ちに改築するという選択肢は必ずしも正当化されない．

f) 状態監視保全の検討

式(40)を前提に，式(30)から状態監視保全が選択される条件を求めると

$$C_c\le 205{,}700\quad(T=10)$$
$$\le 102{,}850\quad(T=20) \quad (42)$$

持続費用最小化の観点から平均費用に関する式(33)を用いると

$$C_c\le 241{,}700\quad(T=10)$$
$$\le 120{,}850\quad(T=20) \quad (43)$$

破損までの平均時間T（年）の想定にもよるが，コストが 10～20（万円/年）程度以下の適切な状態監視方法があれば，状態監視を選択すべきであろう．

(3) 公衆衛生リスクの評価と意思決定への影響

微生物学的リスク評価に基づく公衆衛生リスクの評価は，わが国の下水道分野では，もっぱら下水処理水のリスクアセスメントで行われている．このリスク評価方法を適用し，下水道管渠の破損及び道路陥没に伴って生下水が道路上に溢水する事象が通行人の健康に及ぼす影響を評価することを試みる．

表-1に生下水の溢水に伴う公衆衛生リスクを算定するための条件と算定結果を示す．

表-1 生下水の溢水に伴う公衆衛生リスクの算定

病原微生物	Campylobacter	Cryptosporidium	Rotavirus	
パラメータ：α	0.145[10]	0.116[11]	0.253[10]	
パラメータ：β	7.59[10]	0.121[11]	0.422[10]	
濃度：c(1/L)	7,200[13]	100[12]	100,000[12]	
摂取量：V(mL)	0.05	0.05	0.05	
感染確率：Pinf	0.007	0.005	0.476	
年間感染確率	0.007	0.005	0.476	
健康負荷[14] (DALY/1,000ﾋｰｽ)	4.6	1.5	1.4	合 計
健康負荷 (DALY/100暴露)	0.003	0.001	0.067	**0.070**

対象とした病原微生物は表-1 にある 3 種類で，感染確率$Pinf(cV;\alpha,\beta)$は，Beta-Poisson Model と呼ばれる次の式で計算される[10][11]．

$$Pinf(cV;\alpha,\beta) = 1 - \left(1 - \frac{cV}{\beta}\right)^{-\alpha} \qquad (44)$$

計算に用いたパラメータと下水中の濃度は，文献値を参考に設定した．1 人 1 回当たりの摂取量を 0.05mL とし，1 回につき 100 人が暴露されると仮定した．

1 回の暴露で発生する総体的な公衆衛生リスクは，0.070（DALY）と推計される．DALY は障害調整生命年で，病的状態，障害，早死により失われた年数を意味し，疾病負荷を総合的に示すものである．この要素を意思決定に反映させるためには，公衆衛生リスクを金銭に換算する必要がある．ここでは世界自然保護基金 WWF が REACH と呼ばれる EU における化学品の登録，評価，認可及び制限に関する規制政策を評価するための報告書で用いられている，DALY の経済評価の数値 90,000（ドル/DALY）≈ 10,000,000（円/DALY）を用いることとする[15]．

リスク費用は次のように算定される．

0.070（DALY）×10,000,000（円/DALY）=700,000（円）

これを式(39)に加えると

$$C_s = 3{,}117{,}000 \text{（円）} \qquad (45)$$

したがって式(41)は

$$\frac{\bar{B}}{C} = \frac{\left(1 + \frac{C_s}{C_r}\right)}{1 + T\ln(1+\gamma)} = 0.97 \quad (T = 10)$$
$$= 0.79 \quad (T = 20) \qquad (46)$$

上記のような仮定のもとでの計算では，公衆衛生リスクの影響は$\bar{B}/C$の値を若干上昇させる程度である．

(4) 雨天時浸入水による溢水に伴う公衆衛生リスクの評価と意思決定への影響

改築まで一定の損害が継続して発生する事例として，雨天時浸入水の影響で希釈生下水が道路上に溢水し，通行人の健康に影響が及ぶという事象に係る公衆衛生リスクを取り上げる．溢水する下水は雨水で 10 倍に希釈され，毎年 3 回の溢水が発生すると仮定する．その他の条件は前節(3)と同じである．

この場合，**表-2**に示すように，希釈生下水の溢水に伴う公衆衛生リスクは 0.064（DALY）と推計される．これは

0.064（DALY）×10,000,000（円/DALY）=640,000（円）

のリスクコストに相当する．これを式(37)のC_Lに代入すると

$$\frac{C_L}{C_r} = \frac{640{,}000}{12{,}000{,}000} = 0.053$$
$$> \ln(1 + 0.03) = 0.030 \qquad (47)$$

の関係が成立する．実際には公衆衛生リスクだけでなく苦情に係る費用も発生する可能性が高く，この場合は直ちに改築等の対策を講じるべきであろう．

表-2 雨天時浸入水による希釈生下水の溢水に伴う公衆衛生リスクの算定

病原微生物	Campylobacter	Cryptosporidium	Rotavirus	
パラメータ：α	0.145	0.116	0.253	
パラメータ：β	7.59	0.121	0.422	
濃度：c(1/L)	720	10	10,000	
摂取量：V(mL)	0.05	0.05	0.05	
感染確率：Pinf	0.001	0.000	0.179	
年間感染確率	0.002	0.001	0.447	
健康負荷 (DALY/1,000ﾋｰｽ)	4.6	1.5	1.4	合 計
健康負荷 (DALY/100暴露)	0.001	0.000	0.063	**0.064**

8. おわりに

本稿では，予防保全の代表的な方法として，①破損する前に早めに改築を行う「予防保全改築」，②予め定めた周期で改築等の対策を行う「時間計画保全」，③劣化状況や動作状況の確認を行い，その状態に応じて改築等の対策を行う「状態監視保全」を取り上げ，経済合理性の観点から，それらの予防保全の意思決定を行うための選択基準について考察を行った．選択基準を再掲すると，次のとおりである．

【予防保全改築】

$$\frac{\bar{B}_q}{C} = \frac{\rho\left(1+\frac{C_s}{C_r}\right)}{1+T\ln(1+\gamma)},\ (\rho \geq 1) \qquad (10)$$

【時間計画保全】

$$\frac{\bar{B}_q}{C_T} = \frac{\rho_S\{(1+\gamma)^L - 1\}}{(1+T\ln(1+\gamma))(1+\gamma)^L - \rho_L}\left(1+\frac{C_s}{C_r}\right) \qquad (24)$$

（時間計画保全の持続的費用最小化）

$$\frac{\bar{B}}{C} = \frac{(C_r + C_s)/T_L}{C_r/L} \qquad (31)$$

【状態監視保全】

$$\frac{\bar{B}_M}{C_M} = \frac{\rho\ln(1+\gamma)\left(1+\frac{C_s}{C_r}\right)}{\rho(1+\gamma)\ln(1+\gamma) + \{(1+T\ln(1+\gamma)) - \rho\}\frac{C_c}{C_r}} \qquad (30)$$

（状態監視保全の持続的費用最小化）

$$\frac{\bar{B}_M}{C_M} = \frac{(C_r + C_s)/T_L}{C_r/T_L + C_c} \qquad (33)$$

【改築まで一定の損害が継続して発生する場合の基準】

$$\frac{C_L}{C_r} > \ln(1+\gamma) \qquad (37)$$

上記のような理論的考察は，重点的に収集すべきデータの特定とその活用等のために有益である．

持続的費用最小化の式(31)，式(33)は，それぞれ式(24)，(30)において割引率$\gamma \to 0$とする場合と一致する．

下水道管路を対象として上記の選定基準の幾つかを適用するためのケーススタディを行った．下水道管路の破損に伴って生下水が溢水することによる公衆衛生リスクを加味することが意思決定基準に及ぼす影響について検討した．その結果，予防保全改築の選択基準への影響は比較的軽微であったが，雨天時浸入水による道路上への溢水については，直ちに改築等の対策を行う合理的理由となり得ることがわかった．

参考文献

1) 厚生労働省 医薬・生活衛生局 水道課：最近の水道行政の動向について，水道の基盤強化のための地域懇談会 （第４回），p5，2017.
2) JIS Q 55001 アセットマネジメント ― マネジメントシステム ― 要求事項，p10，日本規格協会，2017.
3) JIS Q 55000 アセットマネジメント ― 概要，原則及び用語，p16，日本規格協会，2017.
4) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部他：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－，p60，2015.
5) 日本下水道協会：下水道事業における費用効果分析マニュアル（案），pp.172-177, 2006.
6) ポール・ミルグロム，ジョン・ロバーツ（奥野正寛，伊藤秀史，今井晴雄，西村理，八木甫訳）：組織の経済学，p. 235，NTT 出版，1997.
7) 小林潔司：分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性，土木学会論文集，No.793/IV，pp59-71, 2005.
8) 内閣府政策統括官：平成 23 年度交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査報告書，2012.
9) Ward, Kawalec and Savic: An optimised total expenditure approach to sewerage management, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2014.
10) Takashi Asano, et al. : Water Reuse, Metcalf & Eddy, p203, 2007.
11) Michael J. Messner, Philip Berger: Cryptosporidium Infection Risk: Results of New Dose-Response Modeling, Risk Analysis, pp1-14, 2016.
12) Oakley, S. and Mihelcic, J.R.: Pathogen Reduction and Survival in Complete Treatment Works, 2019 In: J.B. Rose and B. Jiménez-Cisneros, (eds) Global Water Pathogen Project. http://www.waterpathogens.org (J.R.Mihelcic and M.E. Verbyla) (eds) Part 4 Management Of Risk from Excreta and Wastewater)
13) S. Fiona Barker, et al.: Pathogen reduction requirements for direct potable reuse in Antarctica: Evaluating human health risks in small communities, Science of The Total Environment, Vol.461–462, p728, 2013.
14) WHO: Guidelines for drinking-water quality - 4th ed., p132, 2011.
15) David W Pearce, Phoebe Koundouri: The Social Cost of Chemicals, The Cost and benefits of future Chemicals, Policy in the European Union, World Wildlife Fund, 2003.

(Received June 19, 2020)

DECISION MAKING CRITERIA FOR PREVENTIVE ACTIONS ― CONSIDERATIONS ON SEWER REHABILITATION AND RENEWAL ―

Osamu FUJIKI, Hajime WATANABE

The economic decision-making criteria for preventive maintenance was analysed on the assumption that critical failures occur randomly on the public infrastructures. Based on a simple mathematical model, the criteria were derived from the comparison between the cost for preventive maintenance such as preventive

rehabilitations, time-based maintenance, condition-based maintenance, and that for break-down maintenance. Furthermore, a study was made on the case in which the loss from the damaged infrastructure is expected continuously until the rehabilitation. The result of the theoretical considerations could be useful to identify the information to be collected and utilize it. An application of derived decision-making criteria was virtually tried to deteriorated sewer assets. An assessment was made on to what extent the consideration of public health related risks of overflowed sewage brought by the sewer breakdown or infiltration/inflow can contribute to the decision making for preventive maintenance.