

地震システムリスク解析を用いた浄水場配管の最適投資額の算定
**ESTIMATION OF OPTIMUM INVESTMENT
IN PIPE LINE OF WATER TREATMENT PLANT
USING SEISMIC SYSTEM RISK ANALYSIS**

馬場啓輔¹⁾, 大嶽公康²⁾, 静間俊郎³⁾, 吉川弘道⁴⁾

Keisuke Baba¹⁾, Kimiyasu Ohtake²⁾, Toshiro Shizuma³⁾, Hiromichi Yoshikawa⁴⁾

1) 日本上下水道設計 (株), プロジェクトエンジニア

¹ Project Engineer, NJS Co.,LTD.

e-mail : Keisuke_Baba@njs.co.jp

2) 日本上下水道設計 (株), プロジェクトエンジニア, 工博

¹ Submanager, NJS Co.,LTD. , Dr.Eng

3) 株式会社篠塚研究所, 主任研究員

³ .Senior Research Engineer, Shinozuka Research Institute

4) 東京都市大学総合研究所, 教授, 工博

⁴ Professor, Tokyo City University, Dr.Eng

ABSTRACT: One of the causes not advanced about the waterworks facilities earthquake-proof is hard to understand the effect by the user. In this study, the effect of measures of seismic strengthening in the water treatment plant was expressed as shortening of no water supply period. And the best level of investment was decided by calculating an indirect damage cost corresponding to the investment level.

キーワード: システム信頼性理論, 費用対効果分析, 復旧シミュレーション, 復旧曲線,

1. 序論

水道施設における耐震化の指標としては、管路や構造物の耐震化率が用いられることが多い。例えば、管路耐震化率はレベル2地震動に対する耐震性が確保されている管路の延長比率を示すものであり、水道事業者が耐震化達成度合いを俯瞰的に把握する指標として有効である。一方、水道利用者の視点からすると、耐震化率だけでは耐震化事業の効果や、投資額が適正であるか等を判断することは難しいため、地震時の「断水復旧期間」を耐震化の指標とした方が理解を得られやすいと考えられる。

本研究では仮想の中規模浄水場を対象として、信頼性理論に基づいた配水機能の復旧シミュレーションを実施し、断水復旧期間に着目した耐震化対策の効果について考察する。また、耐震化ケースごとの事業効果を復旧過程に応じて貨幣価値化し、水道事業者が耐震化事業における投資の最適案を導き出すための意思決定手法として活用した一例を示す。

2. 解析対象モデル及び解析手法の概要

2.1 解析対象モデル

配水機能復旧シミュレーションの対象施設を、仮想の中規模浄水場（急速濾過方式，浄水能力100,000m³/日）とし，神奈川県内に位置するものと設定した。対象施設の概要は以下に示すとおりである。

【 対象施設概要 】

施設位置：神奈川県内
 浄水処理：急速濾過方式
 配管口径：600～1000
 浄水能力：100,000 m³/日
 給水人口：200,000 人
 1日最大給水量：100,000 m³/日
 うち工場用20,000 m³/日

図-1に対象施設の平面配置を示す。施設は1期工事と2期工事に分割して建設され，1期で築造された施設は，2期で築造された施設に比べて管路継手部の耐震性が劣っている。さらに，浄水池周辺は埋土地盤であり軟弱である。

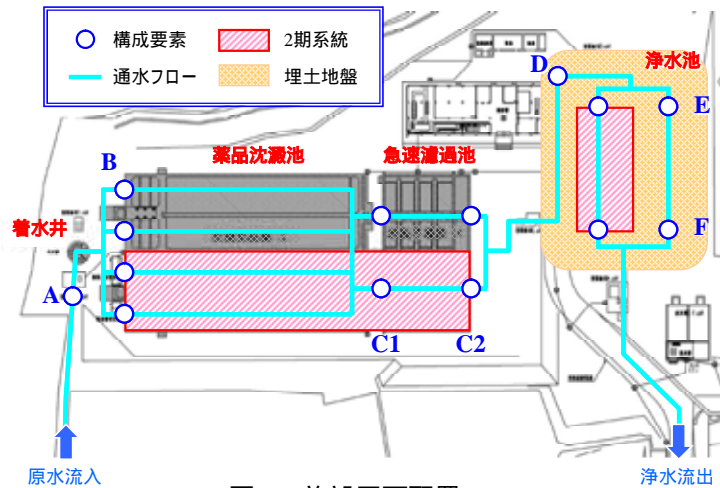


図-1 施設平面配置

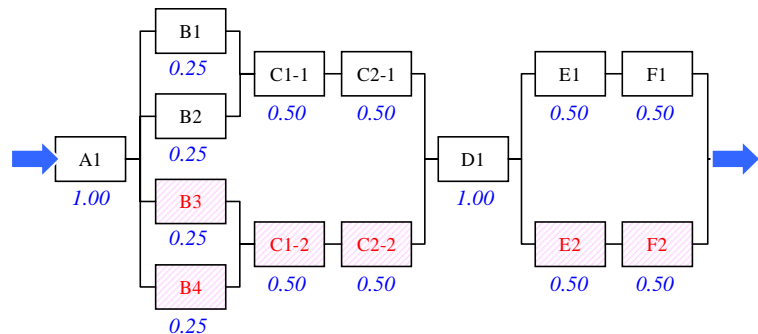


図-2 解析モデル

過去の地震による水道施設の被害は，埋設管路と構造物との接続部（管路継手部）で多く発生していることから，浄水場内の管路継手部を構成要素として図-2に示す解析モデルを構築した。図中のブロックA1～F2はシステム構成要素（14要素）を表しており，システム全体としての通水能力（以下，性能）を1.00とした構成要素ごとの性能をブロック下に併記している。

2.2 地震システムリスク解析

地震システムリスク解析は，中村ら¹⁾による手法をベースとして実施するものであり，ここではその概要を説明する。

(1) 構成要素を考慮したシステム性能の評価

システム構成要素 A1～F2 が被災する確率を P_i ($i = A1, A2, \dots, F2$) とした性能の確率変数を R_i とすると，図-2 に示す直列・並列混合システムの性能 R_{sys} は以下の式で表すことができる。

$$R_{sys} = \min(R_{A1}, \min(R_{B1} + R_{B2}, R_{C1-1}, R_{C2-1}) + \min(R_{B3} + R_{B4}, R_{C1-2}, R_{C2-2}), R_{D1}, \min(R_{E1}, R_{F1}) + \min(R_{E2}, R_{F2})) \quad (1)$$

上式において，システムの直列部は構成要素の最小性能，並列部は要素の合計性能で計算されることがわかる。なお，各構成要素性能の確率関数は，要素被害の可能性を示す Fragility Curve を用いることにより求められる。

(2) 構成要素の脆弱性評価

水道施設耐震工法指針²⁾によると，管路と構造物との接続部にある継手伸縮量を静的解析で簡易に算定する場合，地盤変位量と構造物変位量の和より求めてよいとされている。今回対象施設である薬品沈

澱池や急速濾過池，浄水池等の構造物は，アスペクト比が大きく剛性が非常に高いため，構造解析による地震時変位量は地盤変位量の1/10以下となる。従って本研究においては，継手伸縮量の評価は地盤変位量のみを考慮するものとした。

表-1 に構成要素が被災する限界最大速度（耐力中央値）と復旧期間を示す。なお，中央耐力値は継手限界変位量（1期系統：20mm，2期系統：100mm）を図-3 に示す手順（下式（2）～（4））に従い，工学的基盤最大速度（以下，PBV）へと換算している。

$$U_h = \frac{2}{\pi} \cdot S_V \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{2H}\right) \quad (2)$$

$$\log(\text{amp}) = 2.367 - 0.852 \cdot \log AVS30 \pm 0.166 \quad (3)$$

$$S_{VB} = S_V / (ARV - 1) \quad (4)$$

ここで，Fragility Curve は，対数正規分布の累積関数とし，耐力と地震動の不確実性（対数標準偏差）を合わせた複合偏差を0.5と設定した。

(3) システム性能の復旧過程とボトルネック

システム性能の復旧過程を示すものとして，横軸に復旧に要する期間，縦軸に当初性能を1.00とした性能回復率で表現した復旧曲線を定義する。なお，同曲線の評価方法は，文献¹⁾を参照されたい。

また，本研究では，ボトルネックとなる要素を効率的に選定するため，ボトルネック指標（Bottleneck Index；以下，B.I.）³⁾を参照する。B.I.はシステム全体機能への影響度（重要性），脆弱性（耐震性），復旧難易度（修復性）の積で表される。ここで，各構成要素の影響度は，図-2に示す性能，脆弱性は，Fragility Curveから求められる被害発生確率，復旧難易度は復旧期間にそれぞれ相当する。

2.3 最適投資額の算定方法

経済性照査の指標値を断水復旧期間として，耐震化事業のトータルコスト（対策コストと被害コストの合計）から最適な投資水準を算出する。図-4は最適投資額の算定フローであり，算定期間は50年間とする。

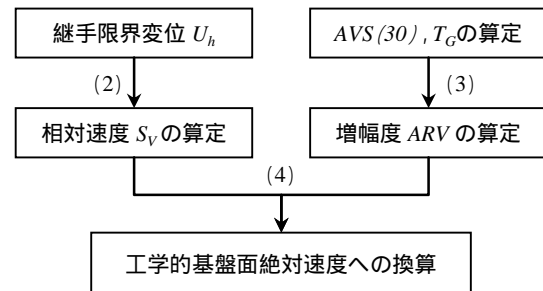
(1) 被害コスト算出

水道事業の費用対効果分析マニュアルに基づき，被害額（断水被害額）を算出する。被害額は，断水復旧期間と性能回復過程から生活用，業務営業用，工場用の間接被害額をそれぞれ求める。

浄水場の性能（0.00～1.00）を添字（*i*）で示し，性能が（*i*）の期間を $T_{(i)}$ とすると，間接被害額（潜在リスク額）は次式で表される。

表-1 構成要素の耐力中央値と復旧期間

構成要素			1期系統		2期系統	
記号	系列数	性能	PBV	復旧	PBV	復旧
A	1	1.00	65 cm/s	5日		
B	2	0.50	65 cm/s	2日	325 cm/s	2日
C	4	0.25	65 cm/s	3日	325 cm/s	3日
D	1	1.00	20 cm/s	5日		
E	2	0.50	20 cm/s	3日	98 cm/s	3日
F	2	0.50	20 cm/s	3日	98 cm/s	3日



地盤増幅度ARVの算定式は藤本・翠川(2006)の式を適用した

図-3 耐力中央値のPBV (cm/s) 換算手順

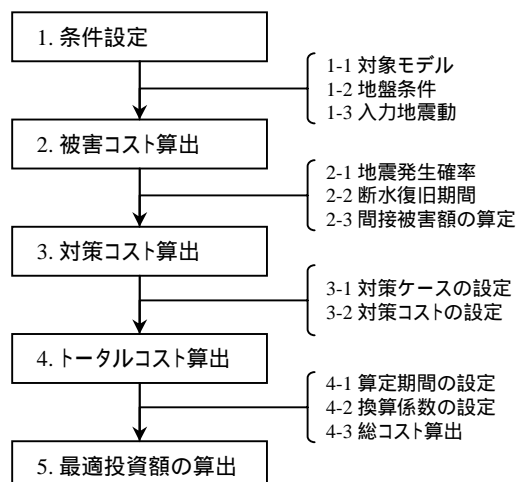


図-4 最適投資額算定フロー

$$C_d = \sum_{i=0}^{1.00} \{ (C_{生(i)} + C_{業(i)} + C_{工(i)}) \times T_{(i)} \times R_{sys(i)} \} \quad (5)$$

ここで、 C_d : 間接被害額 (百万円)
 $C_{生}$: 生活用被害額 (百万円/日) 生活用原単位 (千円/人/日) × 給水人口 (人)
 $C_{業}$: 業務・営業用被害額 (百万円/日) 業務・営業用原単位 (千円/日) × 影響度 (%)
 $C_{工}$: 工場用被害額 (百万円/日) 工場用原単位 (千円/m³) × 工場用水量 (m³/日)
 T : 断減水日数 (日) $T_{(0.50)}$ は復旧過程で浄水場性能が0.50となる期間

次に、間接被害額に想定地震の発生確率を乗じて単年度の平均被害額とし、換算係数 (21.48) により50年間の総被害コストを算出する。

$$C_{td} = \frac{C_d \times P_e(50)}{50} \times 21.48 \quad (6)$$

ここで、 C_{td} : 総被害コスト (百万円/50年)
 $P_e(50)$: 対象地震の50年発生確率

(2) 対策コスト算出

総対策コストは、構成要素A1～F2の耐震化に必要な建設改良費に、施設耐用年数に応じた換算係数を乗じて算出する。構成要素の補強は限界変位を200mm (基盤最大速度 195cm/s) に強化し、構成要素に接続する管路はダクタイル鋳鉄管 (NS型) に布設替えするものとする。検討ケース及び対策コストは表-2に示すとおりであり、後述するボトルネック指標 (以下、B.I.) をもとに、現状 (対策なし) を含む5ケースを設定した。

表-2 検討ケース及び対策コスト

Case	対策箇所	管路延長 (m)	可撓管 (箇所)	建設改良費 (百万円)	換算係数	対策コスト (百万円)
現状	対策なし	0	0	0	1.13	0
Case-1	D1	50	1	55		62
Case-2	D1, E1, F1	90	3	117		132
Case-3	A1, D1, E1, F1	120	4	156		176
Case-4	全構成要素	200	14	324		366

管路施設の耐用年数を38年とした場合の換算係数は1.13

(3) トータルコスト算出

経済性照査は、総被害コストと総対策コストの合計をトータルコストとし、トータルコストが最小となる耐震化レベルを最適投資水準と設定する手法である。図-5は経済性照査の概念図である。図は総被害コストと総対策コストが交わり、トータルコストが最小となる点が最も効率的な耐震化レベルであることを示している。

前項で示した検討ケースごとに、対策後の被害額およびトータルコストを算出し、対象施設における最適投資額を求める。なお、今回の試算においては、耐震化レベルは断水復旧日数で表現される。

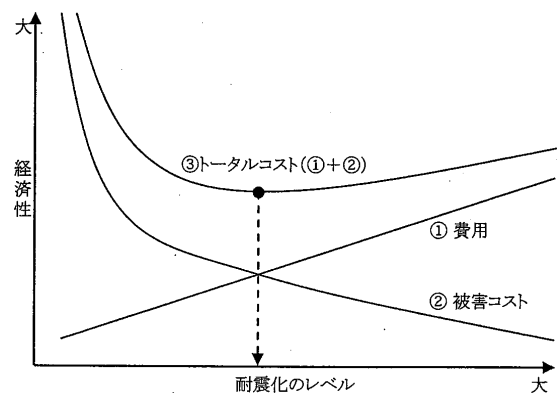


図-5 経済性照査の概念図

(出典: 水道施設耐震工法指針・解説, 2009)

3. 解析結果と評価

3.1 断水復旧期間

復旧シミュレーションでは、M8.0 および M7.0 関東地震の 2 シナリオ地震⁴⁾ を対象地震として設定した。当該敷地における PBV は、安中の距離減衰式より、M8.0 関東地震で 91Kine、M7.0 関東地震で 28Kine となる。また、対象地震が算定期間中に 1 度発生する確率は、ポアソン過程を適用して算出した。なお、以下の結果は、各構成要素の被災は独立して発生し、復旧は同時に行われるという前提に基づいている。

(1) 現況の復旧シミュレーション

現況の復旧曲線を図-6 に示す。M7.0 関東地震では、4 日弱で性能の 50% が回復するのに対して、M8.0 関東地震では 5 日間一切性能が回復しない結果となった。ある日数を経過後に一気に性能が回復する傾向は両地震に共通しており、特に 1 系統しかない構成要素(全体への影響度が高い)D1 の損傷率が高く、他の構成要素の復旧が完了した後も通水が行えないためである。

図-7 は M7.0 関東地震、M8.0 関東地震時の B.I. を示している。B.I. は全体の性能復旧に構成要素が影響する制約の大きさを示している。前項 2.3 (2) で示した検討ケースは、B.I. の高い構成要素の補強を優先するものとして設定している。同図より、M8.0 関東地震では影響度の高い D1、A1 の値が特に大きく、M7.0 関東地震では、耐震性能の劣る D1、E1、F1 の値が上位となっていることがわかる。

(2) 対策後の復旧シミュレーション

対策後の復旧曲線を図-8 に示す。M8.0 関東地震では性能(影響度)の大きい D1 と A1 を耐震化する Case-3 が大きな効果(復旧日数 5.0 日 3.2 日)を示したのに対して、M7.0 関東地震では Case-2 と Case-3 の対策効果(復旧日数 4.5 日 0.7 日、0.5 日)に大きな違いは見られない。これは、M7.0 関東地震では A1 の B.I. が小さく、A1 の耐震化が全体の性能復旧にあまり影響しないことを意味している。つまり、B.I. が大きな構成要素を耐震化した場合に、復旧期間の大幅な短縮が期待される。

このように、復旧曲線を用いることで、対策箇効果を復旧期間の減少として表現することができた。また、対象地震に応じた対策箇所の違いも明確となった。

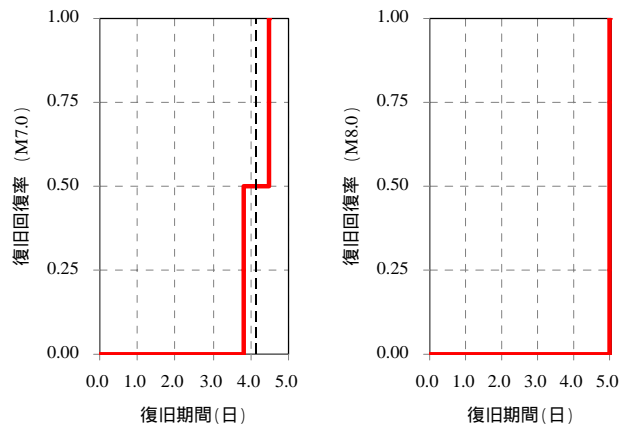


図-6 現況の復旧曲線(左: M7.0, 右: M8.0)

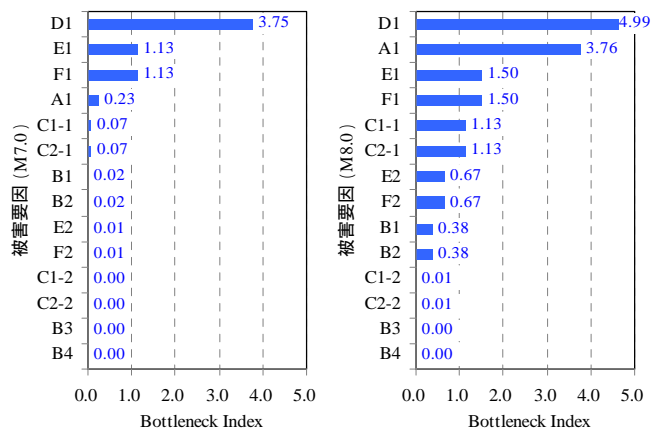


図-7 現況の B.I. (左: M7.0, 右: M8.0)

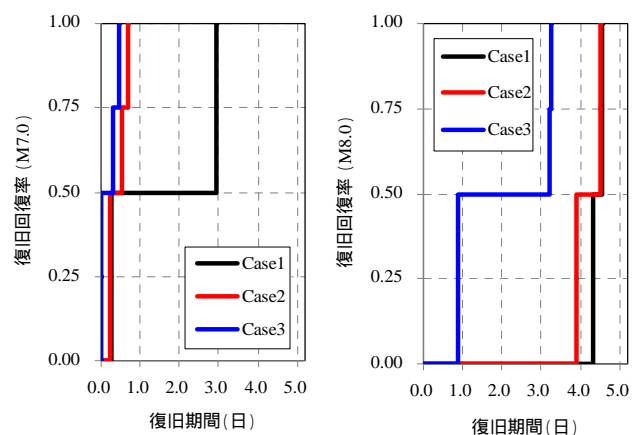


図-8 対策後の復旧曲線(左: M7.0, 右: M8.0)

3.2 最適投資額

最適投資額は、検討ケースごとのトータルコスト（総被害コストと総対策コストの合計）を比較することによって算定することができる。

表-3 は、M7.0 関東地震，M8.0 関東地震それぞれの被害コストを示している。各シナリオ地震は独立して発生すると仮定しているため，対象施設の総被害コストは両シナリオ地震の合計被害コストとなる。

図-9 にトータルコストの試算結果を示す。現状のトータルコスト約 2,600 百万円は Case-1 ~ Case-4 の対策によって大幅に軽減できる結果となった。また，Case-3 と Case-4 でトータルコストが逆転し，Case-3 が最も有利な検討ケースとなった。

これは，耐震化を行う構成要素の B.I. が大きいほど被害軽減額も大きくなるためである。なお，このときの建設改良投資額（最適投資額）は 156 百万円と算定された。

4. 結論

本研究では，浄水場を対象とした耐震対策前後の復旧過程を定量化することで，耐震化事業の効果を断水復旧日数の短縮として表すことができた。同時に，対策効果を間接被害の軽減額として貨幣価値化することで，耐震化事業の最適投資額を算出することが出来た。

今後は，研究成果の精度向上に努めるとともに，浄水施設から配水管路ネットワークを含めた水道システムの全体最適化評価手法として適用を試みる予定である。

謝 辞

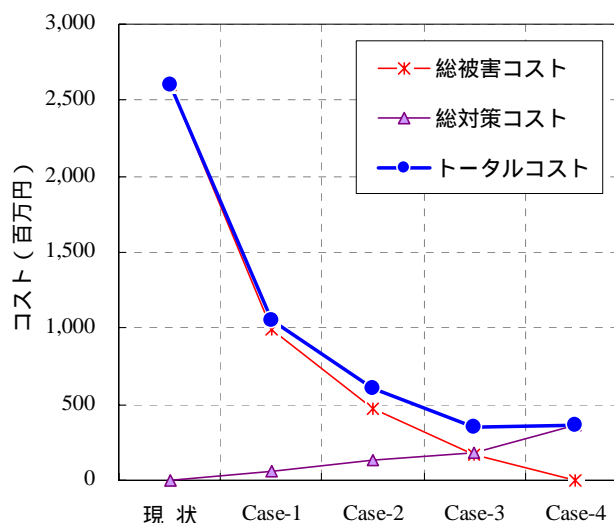
本論文は，平成21年度に東京都市大学総合研究所にて実施された重点推進研究「地震時システムリスク研究会」の研究成果を活用して執筆したものである。執筆にあたりご指導頂いた関係者の皆様には，ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 中村孝明他：構成要素の個別性能を考慮したシステムの地震時復旧曲線，土木学会年講 講演集，2010
- 2) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2009年版
- 3) 中村孝明，遠藤透：BCPへの貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究，建築学会総合論文誌，第7号 都市・建築に係る安全・安心のフロンティア，pp.87-92，2009
- 4) 宇賀田健：シナリオ地震による日本全国の地震危険度評価，建築学会構造系論文集，第541号，2001.
- 5) 大嶽公康他：浄水場配管の地震時復旧シミュレーション，土木学会年次学術講演会講演集，2010

表-3 各シナリオ地震の被害コスト算定結果

関東 M7.0	被害額 (百万円)	50年確率 (%)	年平均額 (百万円)	換算係数 (無次元)	被害コスト (百万円)
現状	9,965	53.4%	106	21.48	2,277
Case-1	3,082		33		709
Case-2	882		9		193
Case-3	327		3		64
関東 M8.0	被害額 (百万円)	50年確率 (%)	年平均額 (百万円)	換算係数 (無次元)	被害コスト (百万円)
現状	12,246	6.2%	15	21.48	322
Case-1	10,782		13		279
Case-2	10,139		13		279
Case-3	4,309		5		107



検討ケース	総被害コスト (百万円)	総対策コスト (百万円)	トータルコスト (百万円)	改良投資 (百万円)
現状	2,599	0	2,599	0
Case-1	988	62	1,050	55
Case-2	472	132	604	117
Case-3	171	176	347	156
Case-4	0	366	366	324

図-9 トータルコスト算定結果