

劣化する既設配水管網の地震被害コスト推定

武蔵工業大学 学生会員 ○来須雄士
武蔵工業大学 正会員 小池 武

1. はじめに

建設以来半世紀以上を経過した既設配水管網は、管路継ぎ手や PC 配水池壁など配水システムの各所で劣化が進展している。

本研究は、劣化対策として管路耐震補強をどの程度の進捗率で進めるべきかを検討する目的で劣化速度や管路継ぎ手交換速度が将来の配水管システム地震被害コストに及ぼす効果について検討したものである。

2. 既設配水管網の地震防災対策

2. 1 既設配水管網の耐震補修の考え方

既存配水管網の多くは 500mm 以下の小口径の鋳鉄管およびダクタイル鋳鉄管で構成されており、最近では耐震継ぎ手など地盤振動による引き抜き力に抵抗できる継ぎ手に置換する耐震補強対策も行われているが、未対策管路が過半数以上である場合が一般的である。鋳鉄管路継ぎ手は、図 1 に示すように機械的接合形式のため経年劣化として継ぎ手全体ゆるみにより地震時に抜け出し易い状況が進展している可能性が高い。

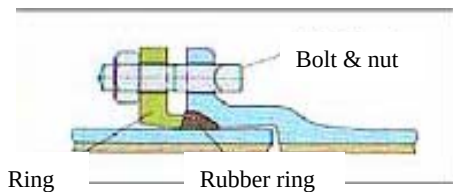


図 1. 旧式管路の継ぎ手事例

継ぎ手のゆるみによる抜け出し易さを次式の劣化関数によりモデル化する。

$$\psi(t) = \left(1 - d_1 \frac{t}{T_D}\right)^{d_2} \quad (1)$$

一方新式継ぎ手に置換することで耐震補強を実施した場合には、継ぎ手抜け出し強度が R_0 から R_1 に向上するものとする。いま、時点 T_p において耐震補強を実施した場合の対象管路（位置 x ）の地震時耐震性能を信頼性理論の機能関数 $Z(x, t)$ を用いて表現する。

1) 劣化時

$$Z(x, t) = \psi(t) \cdot R_0(t) - S(x) \quad \text{for } t < T_p \quad (2a)$$

2) 補修後

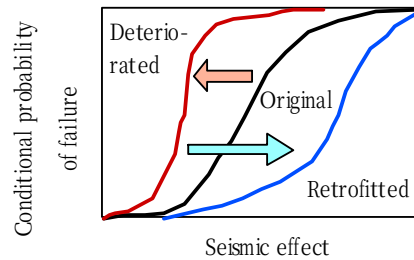
$$Z(x, t) = \psi(t) \cdot R_1(t) - S(x) \quad \text{for } T_p \leq t \quad (2b)$$

このとき、劣化状態、補強水準を考慮した単位距離あたりの地震時管路被害発生率は次式で表される。

$$v(x) = v_0 P[Z(x, t) < 0 | EQ] \quad (3)$$

ここで、 v_0 は単位距離あたりの潜在継ぎ手抜け出し箇所数。

図 2 は、補強前後の配水管路の地震時管路被害発生確率を模式的に示したものである。



管路継ぎ手の fragility curves

3. 地震被害コスト

一般的にライフラインシステムの地震被害コスト C_{EQ} は、損傷した管路の復旧コスト C_R と、給水機能停止に伴う便益損失 ΔB 、収益損失 ΔI より次式で表される。

$$C_{EQ} = C_R + \Delta B + \Delta I \quad (4)$$

(1) 復旧費

復旧費は、配水管網内の損傷管路ごとの復旧コストを積み上げて算定する。ただし、地震発生時点 T での配水管網は一部管路が旧式継ぎ手、その他の管路が新式継ぎ手の混在状態であり、かつそれぞれの継ぎ手が劣化状況を反映していることを考慮して期待管路損傷箇所数を算定する必要がある。

$$C_R = \sum_{i=1}^M (n_i^{old} c_{R_i}^{old} + n_i^{new} c_{R_i}^{new}) \quad (5)$$

$$n_i^{old} = \int_0^{L_i^{old}} v^{old}(x) dx, n_i^{new} = \int_0^{L_i^{new}} v^{new}(x) dx \quad (6)$$

ここで、 n_i^{old} , n_i^{new} , $c_{R_i}^{old}$, $c_{R_i}^{new}$, L_i^{old} , L_i^{new} , v^{old} , v^{new} はそれぞれ第 i 番目管路の新旧継ぎ手に対する損傷個数、一箇所あたりの復旧費、管路延長、被害発生率であり、 M は管路種別の総数である。

(2) 便益損失と収益損失

便益と収益の損失は配水管網により給水されている地区全体の給水停止期間に依存する。配水管網の断水率（給水停止率）は、送水幹線の復旧特性とは異なり、供給閉止したエリア全体の管路復旧状況に影響される。そこで川上英二の提案式を参考にして、断水率を次式で表現する。

$$\xi_{mz}^{md}(x) \frac{1}{1 + h^{md}\{v_{mz}(x)\}} h^{md}\{v_{mz}(x)\} = a_{md}\{v_{mz}(x)\}^{b_{md}} \quad (7)$$

キーワード 既設配水管網、地震被害コスト、劣化関数、被害率

連絡先 〒158-8557 東京都 世田谷区 玉堤 1-28-1 武蔵工業大学工学部都市基盤工学科 TEL:03-3703-3111

ここで、 ξ_{mz}^{md} は管路損傷モードが mz のとき、対象地区の断水率が md となる断水発生率を断水率として表現したものである。 mz, md はそれぞれ *minor, moderate, major* を指定することができる。表1に式(7)のパラメータを示す。

表1. 断水率パラメータ

	Serviceability damage state		
	Minor	Moderate	Major
a	∞	0.319	0.0473
b	0	-1.18	-1.61

社会的便益の地震発生前後の変動状況を模擬的に示したものが、図3である。

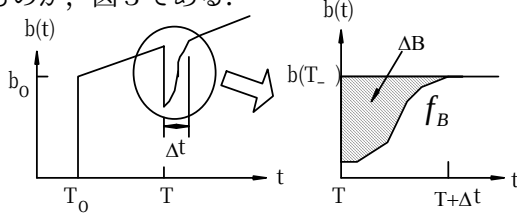


図3. 社会的便益の地震後復旧時変動

このとき、便益損失の期待値と分散を次式で表される。

$$E[\Delta B_{mz}^{md}] \approx b(T_-) \cdot \xi_{mz}^{md} \int_0^{\Delta T} \{1 - f_B^{md}(t)\} dt \quad (8)$$

$$\text{Var}[\Delta B_{mz}^{md}] \approx \{\delta_f(T_-) \cdot E[\Delta B_{mz}^{md}]\}^2 \quad (9)$$

ただし、 b, ξ, f_B, δ_f は便益の単年度値、配水管網全体の管径ごとの断水率の平均値、図3の復旧曲線、復旧曲線の変動係数。

収益損失は、社会的便益に比例的であるとして次式で評価できるものとして仮定する。

$$\Delta I \approx \frac{I}{B} \Delta B \quad (10)$$

(3) 地震被害コスト

$$E[C_{EQ}] = E[C_R] + E[\Delta B] + E[\Delta I] \quad (11)$$

$$\sigma_{C_{EQ}}^2 = \text{Var}[C_R] + \text{Var}[\Delta B] + \text{Var}[\Delta I] \quad (12)$$

4. 解析結果と考察

4. 1 数値解析条件

解析対象配水管網の管路構成を表2に示す。また式(1)の劣化パラメータを表3に示す。さらに、新旧継ぎ手の抜け出し特性値を表4のように仮定する。レベル1、レベル2地震動より継ぎ手部に作用する地盤相対変位を表5に示す。

表2. 配水管口径別延長

Dia. mm	Pipe length (m)				
	CIP	DCIP		Steel Pipe	
	Old	Old	New	Old	New
200	4738	20091	0	1390	0
250	52	53	0	0	0
300	3620	14898	0	925	0
350	2820	14049	0	2121	0
400	0	0	0	879	0
500	0	7000	5260	0	23023
Subtotal	11230	56091	5260	5315	23023
Total	100919				

表3. 劣化パラメータ

Type	Deterioration factors	
	d_1	d_2
Old joint	0.5	0.25
New joint	0.1	0.05

表4. 継ぎ手強度

	Joint of Resistance (mm)		
Type	Mean		
	Minor	Moderate	Major
Old joint	5	10	15
New joint	30	45	60
Type	COV		
	Minor	Moderate	Major
Old joint	0.2	0.25	0.3
New joint	0.05	0.05	0.1

表5. 地震荷重の統計値

Type	Seismic Response (mm)	
	Mean	COV
EQ1	8	0.3
EQ2	37	0.4

4. 2 解析結果

図4は、横軸に地震発生時期を、縦軸に地震被害コストを初期投資 C_0 で除したものを示した図である。

毎年同じ割合で継ぎ手を40年かけて更新した場合を2.5%、100年かけて更新した場合を1.5%、全く更新しなかった場合を0%とした3つのケースで検討を行った。

同図から0%の時は地震被害コストが上昇している。また、継ぎ手更新の割合が高いほど地震被害コストは減少した。

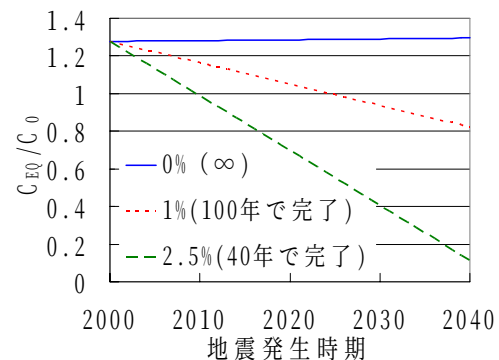


図4. 地震被害コストと地震発生時期との関係

5. まとめ

本研究で、地震被害コストの事例一つを計算することができた。これらは各パラメータによって変化していく。これらの傾向をより詳しく調べるため各パラメータを変化させ、どう変化させるとどのような傾向があるかを調べていく必要があると思われる。

参考文献

1) 川上英二：埋設ライフラインの震害例と耐震設計、配管技術、1996年5月号、pp.65-71, 1996.