

水道システムの耐震安全性能照査法提案

小池 武¹・長谷川延広²・濱野雅裕³・渡邊 拓⁴

¹正会員 (一財) 災害科学研究所 (〒612-8358 京都市伏見区西尼崎町 898)

E-mail: koike-takeshi@ka3.so-net.ne.jp

²正会員 JFE エンジニアリング株式会社 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2 丁目 1 番地)

E-mail: hasegawa-nobuhiro@jfe-eng.co.jp

³正会員 (株) エイト日本技術開発 (〒164-9801 東京都中野区本町 5-33-11)

E-mail: hamano-me@ej-hds.co.jp

⁴非会員 (株) ベルテクノ (〒530-0041 大阪市北区天神橋 2 丁目北 2 番 6 号)

E-mail: t.watanabe@beltecno.co.jp

水道施設の耐震設計における性能設計化が一向に一般化しない。それは性能設計化を実現するための性能目標が明確かつ定量的に設定されていないためである。この課題に対して、本論では、耐震性能 1,2,3 に対して水道事業者、管路メーカー、管路施工者が目指すべきそれぞれの目標値を算定する方法を提示する。さらに、水道事業者が管理・運営する水道ネットワークシステムの耐震性能を信頼性設計法に基づいて実現する手法を「水道システムの耐震安全性能照査法」として提案する。

Key Words: water supply system, network connectivity analysis, performance-based seismic design

1. はじめに

公共施設の耐震設計における性能設計化が提唱されてから数十年が経過したが、未だに性能設計化が行き渡っているとは言い難い。これは、性能設計法¹⁾が信頼性設計法体系²⁾で定式化されており、設計変数の不規則量を設計実務に取り込むことの難しさを反映しているのが、一つの理由であろう。

その他の理由としては、性能設計を行うことで従来の設計法と比較してどのようなメリットがあるのか実感できない点があったのではないかと。逆に、実務設計者が性能設計にメリットを実感できる事例としては、海外プロジェクトで本国と相手国の設計法が異なる時に性能設計法を基礎にして相互理解が可能となる場合や国内で新規参入を企図して既存品と新規提案品の性能比較を性能設計法に基づいて説明できる場合であろう。

また、発注者あるいは事業者が性能設計法のメリットを実感できるのは、事業として求める性能目標値を満足する製品やサービス成果が得られた場合であろう。

したがって、実現すべき性能目標が明確で性能設計の成果が見通せた時、そのプロジェクトに関わるすべての人々は結果的に性能設計を行うことのメリットを実感で

きることになる。

このことから、公共事業者の事業者も性能設計を行う場合には、性能目標を明確に定量的に示すことが有用であろう。しかし、事業者が性能目標を定量化する手段を持ち合わせていなければ性能目標を定量的に提示することはできない。

その結果、材料メーカーは自社基準に基づいてある性能目標を満足する製品を事業体に納入するが、事業体にとってその製品が運用するシステムの耐震安全性確保に適切かどうか判断基準がないと、事業体は性能目標の視点から製品の良否を判断できない。

水道事業者と管材メーカーの関係もこの例に似たところがある。

この状況を解決し関係者全員が性能設計化の果実を得るには、それぞれの部署が性能設計を進めるにあたって互いに整合性のある定量的評価指標を性能目標として持つことが必要である。

従来、水道事業者は耐震設計における目標として耐震性能³⁾⁴⁾ 1, 2, 3 の実現を目指していた。しかし、事業者の水道システムが上述の耐震性能を満足しているかどうかをどのように判断してきたのか？また、将来のレベル 2 地震動⁵⁾に対して現状の水道システムが耐震性能 2 をど

の程度の確度で実現できるのか？それをどのような尺度で評価するのか？これらの課題に答えるための技術基盤が不十分では、性能設計化⁹⁾も進展することは無かった。

管材メーカーも、提示する製品寸法諸元が実現できる管体の耐震性能は示せても、その性能が水道システム全体の耐震性能とどう関わっているのかを明示する術は当然持ち合わせていなかった。

また、水道システムには、管路以外に浄水場、配水池、ポンプ室、バルブ室などが管路ネットワーク内に配置され、その外側にはエネルギー需給システムや通信・制御システムなどの支援設備が存在する。これらの施設はそれぞれ固有の耐震性能と地震力に対する脆弱性を有しているため、水道システムの耐震安全性を論じる時には管路システムと個々の施設の両者をネットワーク構成要素として総合的に水道システムの耐震安全性について論じなければならない。

ここでは、水道事業者が管理・運営する水道ネットワークシステムの耐震性能を信頼性設計法⁷⁾に基づいて実現する手法を「水道システムの耐震安全性照査法」として提案する。

2. 既往性能照査法の問題点

(1) 水道システムの性能目標

水道施設耐震工法指針・同解説には、実現すべき耐震化目標として、応急復旧日数が評価指標として例示されている。それを実現するために、耐震設計の目標として、耐震設計1,2,3が提示されている。

問題は、応急復旧日数を目標値通りに実現できる確信の度合いがいくらか、それを水道事業者は自ら評価していない点にある。実現の可能性を20~30%程度とするか、70~80%程度とするかで、個々の要素の耐震設計レベルが影響されるはずであるがその点の議論がされていない。

耐震設計法を性能設計化するとは、耐震設計を支配する設計変数の予測誤差を考慮して、この耐震目標の実現確度を確率量で評価することである。

国内の耐震設計法⁸⁾では一般的に、レベル1地震動に対しては建造物の最大応答値は降伏限度以内にあるべきであり、レベル2地震動に対しては塑性変形量が限界変位以内にあるように設計することが求められている。

現行の水道指針では、水道システムの耐震化目標定量化は、過去の被害実測データに基づいて管路被害推定を行い、応急復旧日数を推定している。しかし、応急復旧日数推定は、評価手順におけるさまざまな不確定変数を考慮しなければ確定値となり、不確定変数をすべて確率量として評価しようとする、計算量が膨大となるが応急復旧日数に関する平均値や標準偏差などの確率統計量

は得られる。実務的には、設計コスト削減の観点から各変数を確定量とすることで、応急復旧日数推定自体を確定的に評価することになる。結果的に応急復旧日数の推定確度100%となり、性能設計化の議論に進めないことになる。従来、耐震設計法の性能設計化が進まなかったのは、このあたりの状況を反映した結果と思われる。

しかし、性能設計化のために応急復旧日数のばらつきを考慮したとして、どれほどの耐震設計上のメリットがあるのか？性能設計法採否の議論をこの問題だけに限定すると、耐震設計上のメリットを云々することが難しくなる。しかし、もし、耐震化目標を応急復旧日数に限定することなく、水道システムとしての給水性能と構成要素である管材の耐震性能や要素施設の耐震性能の関連性を定量評価できれば、給水性能実現のために必要な管材や要素施設の必要耐震性能について具体的な議論ができるはずである。

一方、特定需要（重要給水）拠点の給水性能実現確率が把握できれば、その値を条件として応急復旧日数推定を別作業に分離することができよう。

(2) 管材継手の耐震性能

個々の管材は、直列に繋がってパイプラインを構成する。したがって、一区間管路は管材継手一個の破断によって破断に直結するという脆弱性を有している。しかし、この脆弱性はネットワークの冗長性によって緩和される。すなわち、水道システムの耐震性は、システムを構成する基本要素である管材継手の耐震強度とネットワークシステムとしての冗長性を同時に考慮しなければ、満足な評価はできないはずである。

現行の水道施設耐震工法指針・同解説は、一つの直線管路を想定して、その最大ひずみ発生点の耐震安全性を照査するだけであり、水道システムの耐震性能すなわち、水源地から需要端までの給水性能については何らの規定も無い。したがって、この直線管路の耐震安全性照査で安全性が確認できたとしても、それは水道システムの耐震性能を確認したことにはならない。

水道システムに使用される管材は、一般的にはダクタイル鋳鉄管が汎用されてきたが、幹線用の大口径管には鋼管が多用され、最近の小中口径管ではPE管¹⁰⁾も多く採用されるなど、管材の多様化が進みつつある。

また、ダクタイル鋳鉄管についても耐震安全性を考慮した耐震管が導入され、地震により継手が抜け出すことが無いように継手内部に突起を設ける仕組みが採用されている。すなわち、個々の管材は、継手内部の寸法および継手内部の変位抑止突起の強度の製作誤差を考慮して、継手内寸法を設計することができる。

しかし、既存の継手は水道システムからの必要耐震目標情報無しに製作されるため、これらの管材から構成さ

れる一区間管路および水道システムの耐震性能を保証するものではなく、管材と水道システム間に耐震目標に対する有機的な連携が無かったと言わざるを得ない。

性能設計は信頼性設計法に基づいて行うため設計変数の確率統計値が必要となるが、現行の水道指針では設計変数について確率統計量を明示する規定が無いため、管材メーカーはそれらのデータを自社内から外部に出すことは無かった。しかし、今後、水道システムに対する耐震設計法を性能設計化しようとするなら、水道施設耐震工法指針・同解説は管材メーカーに要求する設計変数の確率統計値を指針内に明記すべきであろう。

3. 水道システムの性能設計

(1) 水道システムの簡易モデル

水道ネットワークシステムの簡易モデルを Figure 1 に示す。設定したモデルは、水供給端（浄水場）が1か所(N1)、配水池、需要端などの施設（ノード、Node）は図中の○印で表しており、図中に7施設が存在する。ここでは、重要拠点(A1)としてノード 7(N7)を設定した。ノードに関するデータは、Table 1, Table 2 に示す。

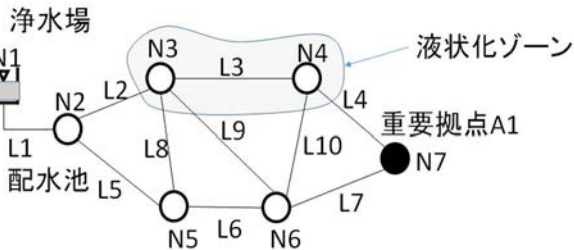


Figure 1 水道ネットワークの簡易モデル

Table 1 管路データ

管路名	管路延長
Link	km
L1	10
L2	5
L3	9
L4	3
L5	6
L6	4
L7	2
L8	8
L9	10
L10	9

Table 2 施設データ

施設名	安全性指標
N1	4
N2	3.5
N3	3
N4	3
N5	3.5
N6	3.5
N7	3.75

管路は、ノード間をつなぐものであり、図中に 10 本の管路が設置されている。管路はネットワークのリンク (Link) に相当する。それぞれの管路データは Table 1 に示している。

耐震安全性能照査のため、各拠点施設の地震時破壊確率を安全性指標で Table 2 内にあらかじめ設定している。管路は、すべてダクタイル鋳鉄管耐震管が敷設されると仮定する。ノード間の管路（リンク、Link）は単管が直列に繋がったものであり、その破壊確率 $p_{f,link}$ は単

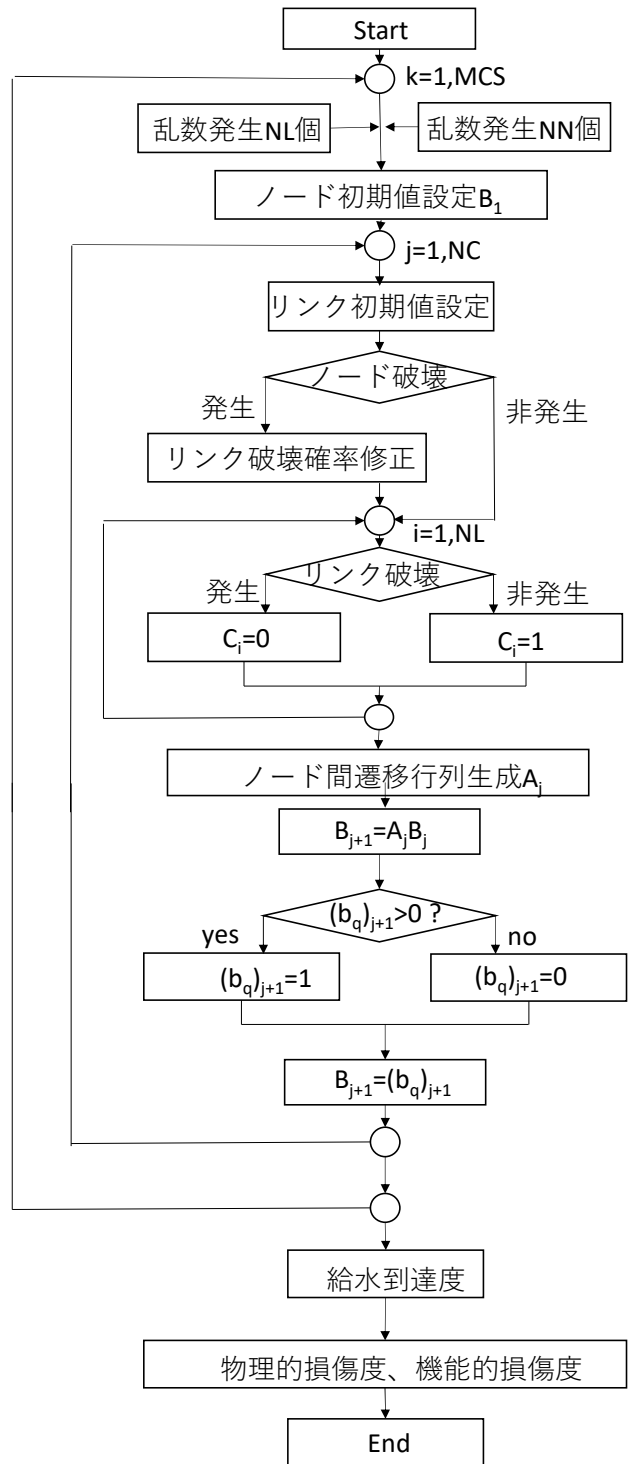


Figure 2 連結性能解析¹⁾のフローチャート

管継手の破壊確率 $p_{f,joint}$ と管路本数 L/ℓ から次式で定式化する。

$$p_{f,link} = 1 - (1 - p_{f,joint})^{L/\ell} \quad (1)$$

ここで、 L はノード間の管路延長、 ℓ は単管長である。管路継手の耐震性能と水道システムの機能性能の関係をj知るため、管路継手はすべて同一の耐震性能を持つと仮定する。すなわち、継手の耐震性能は、破壊確率 p_f あるいは安全性指標 β を用いて表現することにする。

Figure 1 に示す液状化ゾーンは、その領域に属する管路（リンク）と拠点施設（ノード）は液状化地盤上に設置されていて、地震時液状化危険度を有すると仮定する。

(2) 連結性能解析¹⁾

水供給端(N1)から需要端(N7)へ給水できるかどうかは破壊していない管路で連結した経路を通して需要端に到達できるかどうかで評価できる。この到達の割合は、各管路の破壊確率および拠点施設の破壊確率に依存する。

リンクとノードが破壊確率によって規定されている場合のネットワークの供給端から需要端への給水到達度、いわゆる連結性能は、Figure 2 に示すモンテカルロシミュレーションにより求めることができる。同フローチャートに示す諸記号を以下に定義する。すなわち、

MCS：モンテカルロシミュレーション回数

NL：対象ネットワークのリンク数

NN：対象ネットワークのノード数

NC：給水到達度を求めるための最大遷移回数

B_j ：第 j ステップでのノード到達状態ベクトル

$(b_q)_j$ ：ノードベクトル B_j の第 q 成分。すなわち、第 j ステップでの水供給端（浄水場）から第 q 番目ノードへの到達状態を示す変数。

C_i ：第 i 番目リンクの連結状態の値。リンクが連結状態の時は $C_i=1$ 、リンクが破断状態の時は $C_i=0$ の値を与える。

A_j ：第 j ステップでノードベクトル B_j からノードベクトル B_{j+1} へ遷移させる遷移マトリックス。第 s ノードから第 t ノードに繋がるリンクが第 i リンクの時、行列 A_j の第 st 成分 $(a_{st})_j$ は C_i で与えられる。

さらに、フローチャート内の語句について以下のように定義する。

リンク破壊確率修正：

破壊ノードをバイパスする連結リンクはノード破壊確率分が増加すると仮定してリンク破壊確率を修正する。

遷移行列：

第 s 番目のノードから第 t 番目ノードへの連結さ

れている場合の遷移行列成分は 1、連結されていない場合はその成分は 0 とする。

給水到達度：

試行回数 MCS の内、水供給端（浄水場）から重要拠点までの連結経路が確保できた回数 M を得た時、給水到達度は M/MCS で定義する。

物理的損傷度：

損傷管路の期待発生数を全管路数で除したもの。

機能的損傷度：

ノードへの期待非到達数を全ノード数で除したものの。

耐震化率：

管路区間ごとに従来継手のダクタイル鋳鉄管を耐震性のある継手を持つダクタイル鋳鉄管（耐震管）に置換した時、置換管路長を全管路長で除した値とする。

Figure 3 は重要拠点への給水到達度と継手安全性指標との関係を図示したものである。同図によれば、安全性指標 β_{joint} が

$$\beta_{joint} = 3.2 \sim 3.7 \quad (2)$$

の範囲では、給水到達度は 0.2~0.8 の範囲にあることを示している。

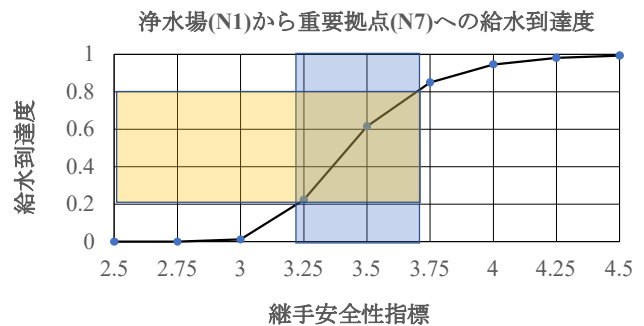


Figure 3 重要拠点への給水到達度

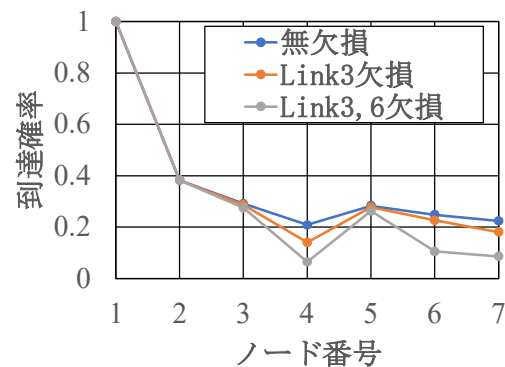


Figure 4 各ノードへの給水到達度に及ぼす管路欠損の影響

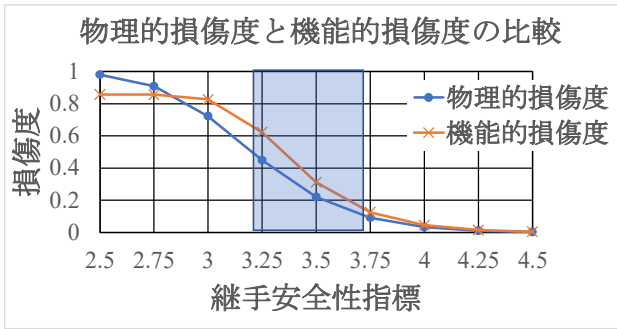


Figure 5 物理的損傷度と機能的損傷度の関係

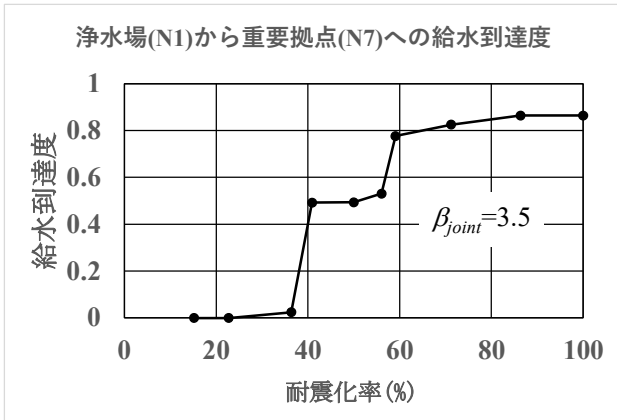


Figure 6 耐震化率と給水到達度の関係

この水道システムの場合、管路継手の断面寸法や材料強度が継手安全性指標の値を満足するように製作されることで、水道システムは所要の耐震安全性能を得られることになる。この時、給水到達度が0.2~0.8であることを示している。

もし、水道システムの給水到達度が少なくとも0.2~0.8に存在することを期待するなら、管路継手の安全性指標は3.2以下では継手安全性能が不十分であること、また3.7以上では過度な継手安全性能を要求することになる。

Figure 4 は管路欠損が発生した場合（あるいは、逆に欠損管路を修復した場合）の給水到達度に及ぼす影響を見たものである。同図によれば、欠損管路が増加するにつれて到達水準が低下する様子がわかる。

Figure 5 は物理的損傷度と機能的損傷度を比較したものである。同図によれば、継手安全性指標3.2~3.7の範囲では、機能的損傷度が構造的損傷度よりも0.2程度上回っていることが見てとれる。これは、実地震被害データから得られる構造的損傷度データ以上に機能的損傷度すなわち水道システムの給水能力低下が著しいことを示唆している。

Figure 6 は、耐震化率と給水到達度の関係を示したものである。同図によれば、給水到達率は耐震化率20%以下ではゼロ近くであるが、耐震化率が40%前後になると0.5程度に急増し、耐震化率が60%を超えると0.8程度に増加し、それ以上の耐震化率に対しても0.8程度を維持

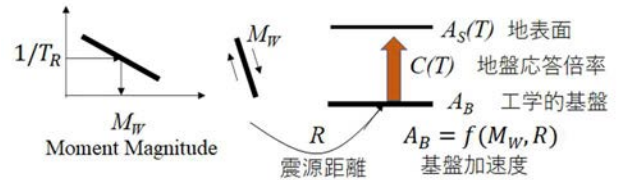


Figure 7 地震動予測手順



Figure 8 ダクタイル鋳鉄管耐震管継手¹²⁾の変位量

する傾向を示している。

これらの情報が得られた時、水道事業者の担当者は事業者が求める到達度に見合う継手性能を獲得するために、継手安全性指標を満足する耐震管路継手の調達を管材メーカーに要請することになる。

これにより、継手安全性指標が提示されるので、管材メーカーは耐震性目標としてのこの値を満足する管路継手の性能設計が可能となる。

4. パイプラインの性能設計

(1) 管材継手の耐震設計

水道事業者から管材メーカーに対して継手安全性指標が与えられた時、管材メーカーの管路継手に関する耐震設計および性能設計は以下の手順で行うことができる。

- 地震動の大きさを確認。
- 地盤震動による最大地盤変位、管・地盤間の相対変位算定
- 地盤変位を吸収するのに必要な単管本数算定
- 破断限界に至るまでの最大単管連結本数
- 管路継手の破断予測

上記手順のすべての段階で現れる設計変数は予測誤差、測定誤差、製作誤差などの影響を受けて不規則変数の特性を示すことになる。

設計変数の不規則性を考慮した場合の管材継手性能設計式は、以下の手順で定式化できる。

- 地震動の大きさを確認¹³⁾

国内の耐震設計ではレベル1、2地震動がCode writerにより指定されている。これに従う場合は、以下の検討過程は不要である。一方、日本とは異なる地震環境にある所で地震動の大きさを設定す

る場合は、下記の手順に従う。想定期間 n 年中の地震発生確率 p を指定して地震規模を設定する場合は、次式で再帰年数 T_R を求め、

$$T_R = \frac{1}{1 - (1 - p)^{1/n}} \quad (3)$$

Figure 7 よりそれに対応する地震のモーメントマグニチュード M_w を設定することになる。

地震発生が想定される活断層から検討対象地点までの距離 R から距離減衰式 $^{14)}f(M_w, R)$ により工学的基盤における地震動規模 A_B を推定する。固有周期 T の表層地盤の応答倍率 $C(T)$ を考慮して地表での地震加速度 $A_S(T)$ が推定され、1 自由度振動系モデルに対する加速度応答スペクトルの形で地震動 $S_d(T)$ が設定できる。

この過程で現れるすべての設計変数が予測不確実を有している。しかし、実務的観点からの最も簡便な設計変数の確率統計的取り扱い、 $S_d(T)$ の確率統計量に上記過程のすべての不確実量の影響を集約してしまうことである。

この時、地震動の確率統計量は次式で表現できることになる。

$$\text{平均値} : E[S_d(T)], \text{分散} : \text{VAR}[S_d(T)]$$

b) 地盤震動による最大地盤変位算定

応答変位法により、地盤変位 $U_h(T)$ は次式で算定する。

$$U_h(T) = \frac{2}{\pi^2} S_V(T) \cdot T \quad (4)$$

ここで、

T : 地盤卓越周期

$S_V(T)$: 速度応答スペクトル

c) 地盤変位を吸収するのに必要な単管本数

必要単管本数を m とすると、

$$m = \frac{U_h}{\delta} \quad (5)$$

ここで、

δ : 単管継手許容変位

管材継手変位のバラツキは、管材の製作誤差および管路埋設施工時の継手位置の変動に起因して発生する。

d) 破断限界に至るまでの最大単管連結本数

耐震管の継手引張強度は、継手内ロッキングリング (locking ring) が挿し口突部を剪断破壊する強度で規定されその大きさは約 $3D$ (kN) と言われている。ただし、 D は管口径で mm 単位で表される。

連結管路の破断は、連結された管の周面に沿

って作用する剪断力に起因する継手引張力が単管の継手引張強度を上回った時に発生する。この時の連結管本数が破断必要管数となり、次式で表される。

$$m_{cr} = \frac{3D}{\pi D \ell \tau_{cr}} \quad (6)$$

ここで、

τ_{cr} : 管周辺土の滑り開始限界剪断応力

ℓ : 単管長

ところで、この式を構成する $3D$ および τ_{cr} は鑄鉄管材料や周辺土の限界強度であり、基本的に不規則量である。 $3D$ の不規則性を明確化するため、 3 の代わりに F_3 の記号で置き換える。したがって、その不規則量 F_3 は

$$\text{平均値} : E[F_3], \text{分散} : \text{VAR}[F_3]$$

となる。

また、周辺土の滑り開始限界剪断強度は土被り 1.8 m の埋設管周辺土を用いた剪断実験による計測値であり、基本的に不規則変数である。したがって、その確率統計量は、

$$\text{平均値} : E[\tau_{cr}], \text{分散} : \text{VAR}[\tau_{cr}]$$

となる。

e) 管材継手の破断予測

連結管路の破断は、地盤変位吸収に必要な管本数 m が破断必要管数 m_{cr} を上回った時に発生する。したがって、管材継手の破壊確率は次式で定式化できる。

$$p_{f,joint} = P[m_{cr} - m < 0] \quad (7)$$

(2) 管材継手の性能設計

現在使用されている管材継手許容変位寸法は Figure 7 では 60 mm に設定されている。この値の妥当性は、以下に展開する継手変位性能照査により判断できる。

いま、式(7)の変数 m に式(5)を代入すると、管材継手の破壊確率 $^{16)}p$ は

$$p_{f,joint} = P[m_{cr} \delta - U_h < 0] \quad (8)$$

となる。式(8)内の破壊条件式を自然対数形式で書き換えると、次の破壊条件式が得られる。

$$Z = \ln \left(\frac{F_3 \cdot \delta}{\pi \tau_{cr} \ell} \right) - \ln(U_h) \quad (9)$$

確率変数 Z を標準正規変数 z に変換することで、式(9)は、次式で表現できる。

$$p_{f,joint} = P \left[z < -\ln \left\{ E[\delta] / \left(\frac{\pi E[\tau_{cr}] \ell E[U_h]}{E[F_3]} \right) \right\} / \sigma_z \right] \quad (10)$$

ここで、標準正規変数 z の平均値は 0、標準偏差は 1 であり、確率変数 Z の標準偏差は次式で与えられる。

$$\sigma_z = \sqrt{\delta_{U_h}^2 + \delta_{\tau_{cr}}^2 + \delta_{F_3}^2 + \delta_{\delta}^2} \quad (11)$$

ただし、 δ_x に使用された δ は変数 X の変動係数を表す記号である。

したがって、式(10)は標準正規分布関数 Φ を用いて次式で表現することができる。

$$p_{f,joint} = \Phi \left[-\ln \left\{ E[\delta] / \left(\frac{\pi E[\tau_{cr}] \ell E[U_h]}{E[F_3]} \right) \right\} / \sigma_z \right] \quad (12)$$

式(12)から継手の必要変位量平均値は次式で求められる。

$$E[\delta] = \frac{\pi E[\tau_{cr}] \ell E[U_h]}{E[F_3]} \exp(-\sigma_z \cdot \Phi^{-1}[p_{f,joint}]) \quad (13)$$

いま、埋設管土被りを 1.8 m として各設計変数の値を Table 3 のように設定すると、継手必要変位量と継手安全性指標の関係が Figure 9 で表現できる。

Figure 8 に現状の継手許容変位量が 60 mm と記されているが、Figure 9 では式(13)の設計値と現状の値とを併記して両者を比較している。同図によれば、現状の継手変位量は、継手の安全性指標が 3.5 以下では設計値より少し大きい目の値を示し、3.5 以上の場合は設計値以下の値であることを示している。水道事業者が必要とする安

Table 3 解析条件

	T	Sv	Uh	F ₃	τ _{cr}	ℓ	σ _z	δ
	sec	m/sec	m	kN/mm	kN/m ²	m	*	m
Mean	1	1	0.2026	3	15	6	*	*
COV	0	0	0.3	0.05	0.1	0	0.324	0.05

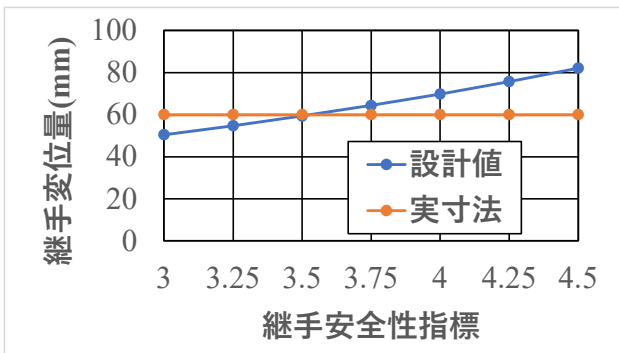


Figure 9 継手安全性指標と継手変位量の関係

全性指標が 3.5 以上の場合は継手許容変位量を現行の 60 mm よりもやや拡張することの必要性を示唆していると言えよう。

継手変位量が式(13)で与えられた場合の継手安全性指標と必要管本数の関係は、Figure 10 に示されている。同図によると、破断必要管数 m_{cr} が地盤変位吸収必要管数 m を約 3 倍程度上回っていることがわかる。

(3) ノード構造物の性能設計

水道システムに存在する代表的な施設として Figure 11 の配水池を性能設計の検討対象として取り上げる。それらの構造物に対する耐震安全性能照査に至る定式化の詳細は既発表論文^{17),18)}に記載しているので、ここではその成果を利用する。

配水池は、比較的低層の RC 構造物が多く、1 自由度系振動モデルでの等価線形化解析が適用可能となる場合が多い。レベル 2 地震動を用いた修復限界に対する安全性照査は、以下の式で安全性判定ができる。

$$\delta_A^{repair} < \delta_{cr} \quad (14)$$

ただし、 δ_A^{repair} は修復限界モードにおける地上構造物の変位応答、 δ_{cr} は限界値である。

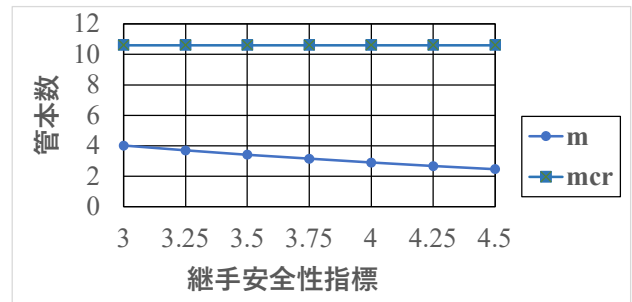


Figure 10 継手安全性指標と必要管本数の関係

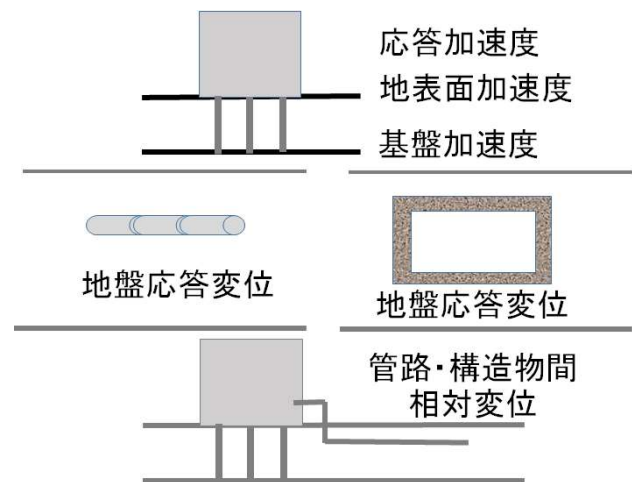


Figure 11 地上構造物、地中構造物、接続部と作用外力

一方、地中構造物の耐震安全性判定は次式で行うことができる。

$$\gamma_U^{repair} < \gamma_{cr} \quad (15)$$

ただし、 γ_U^{repair} は修復限界モードにおける地中構造物の剪断ひずみ応答、 γ_{cr} はその限界ひずみである。

したがって、それぞれの配水池の破壊確率は、式(14)、式(15)の事象の逆事象発生確率として次式で評価することができる。

地上式配水池の破壊確率：

$$p_{f,A} = P[\delta_{cr} - \delta_A^{repair} < 0] \quad (16)$$

地下式配水池の破壊確率：

$$p_{f,U} = P[\gamma_{cr} - \gamma_U^{repair} < 0] \quad (17)$$

5. 事例検討

(1) 水道ネットワークシステムの実大モデル

水道事業体の一般的な水道システムにおける配水本管網を検討モデルとして採用する。Figure 12 は採用した水道システムモデルである。

対象とする水道ネットワークシステムは、ノードが15箇所、管路（リンク）は19本から構成されており、3か所の水供給端(N1, N2, N3)を持つ。水道システムの機能性能を確認するための重要給水拠点とはノードN14とする。管路は送水管と配水本管であり、すべての管材が耐震管で構成されていると仮定する。Table 4, 5 に管路長さや施設（ノード）の安全性指標を示し、ノードN4-N15の安全性指標を3.5と設定した。

(2) 重要拠点への給水到達度と継手安全性指標との関係

実大モデルの場合は、Figure 13 に示すように、給水到達度が0.2~0.8となる継手安全性指標は3.0~3.25となりFigure 3 に示す簡易モデルの場合と比較すると、その安全性指標範囲が狭まる傾向を示している。ただし、両者の安全性指標範囲が異なる原因は必ずしも明確ではないが、ネットワーク構造が異なることが原因と推察される。また、実大モデルのFigure 14 と簡易モデルのFigure 5 を比較すると、実大モデルでは物理的損傷度と機能的損傷度が安全性指標の検討範囲内では交差しない特徴を示す。

Figure 15 では実大モデルの継手安全性指標と継手変位量の関係を示す。Figure 8 の簡易モデルの場合とは異なり、継手変位量の実寸法は設計値を上回っており、安全性に余裕があることになる。

Figure 16 では実大モデルの耐震化率と給水到達度の関係を示す。管路耐震化の施工順序をFigure 12 のL1 から

L19の順番に施工する場合を正順、一方、L19からL1の順に施工する場合を逆順として、施工順序の影響を検討

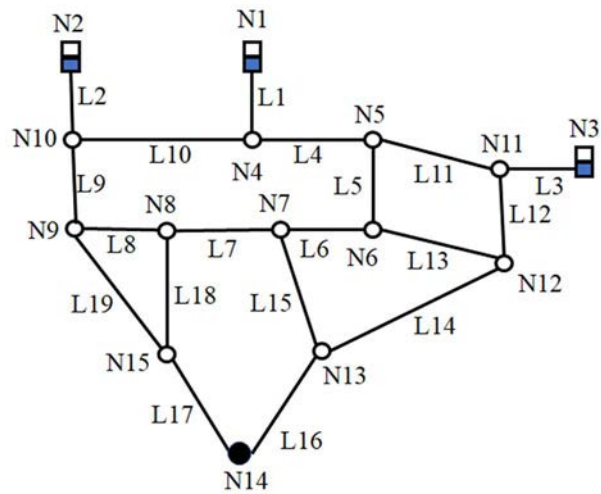


Figure 12 水道システムの実大モデル

Table 4 実大モデルの
管路データ

Link	Length km
L1	2
L2	2
L3	2
L4	1.94
L5	3.2
L6	4.86
L7	1
L8	2.2
L9	1
L10	8.26
L11	3.78
L12	2.86
L13	2.44
L14	3.2
L15	6.46
L16	2.72
L17	2.44
L18	7.85
L19	8.84

Table 5 実大モデルの
施設データ

Node	Safety index β
N1	4.5
N2	4.5
N3	4.5
N4	3.5
N5	3.5
N6	3.5
N7	3.5
N8	3.5
N9	3.5
N10	3.5
N11	3.5
N12	3.5
N13	3.5
N14	3.5
N15	3.5

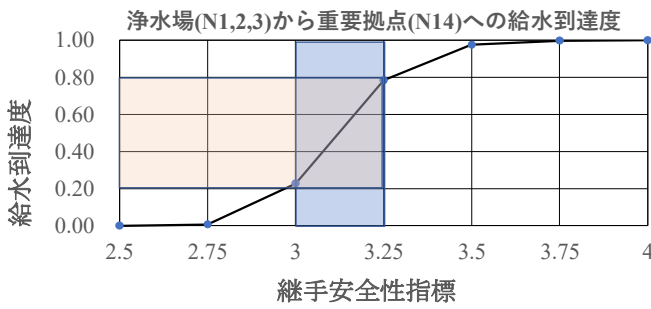


Figure 13 実大水道システムの重要拠点への給水到達度

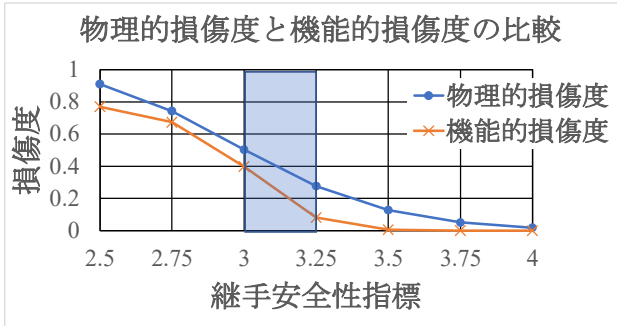


Figure 14 実大水道システムの物理的損傷と機能的損傷の関係

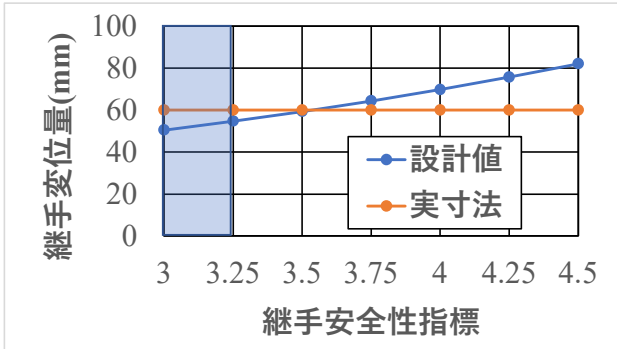


Figure 15 実大モデルの継手安全性指標と継手変位量の関係

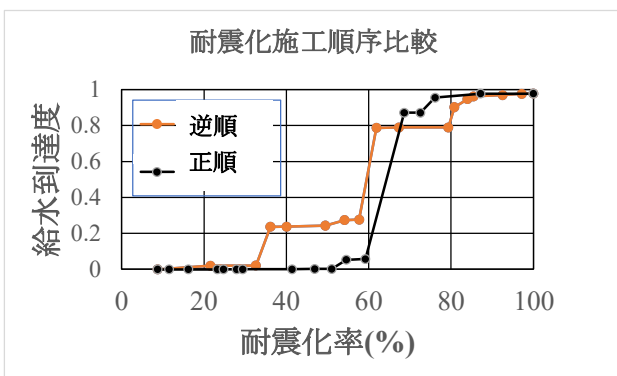


Figure 16 実大モデルの耐震化率と給水到達度の関係

している。耐震化前の管路継手の安全性指標は $\beta_{joint} = 2.5$ 、耐震化後の管路継手の安全性指標を $\beta_{joint} = 3.5$ と設定した。同図によれば、正順の場合は耐震化率 60%以下では給水到達度が低いが 60%を超えると急激に増加

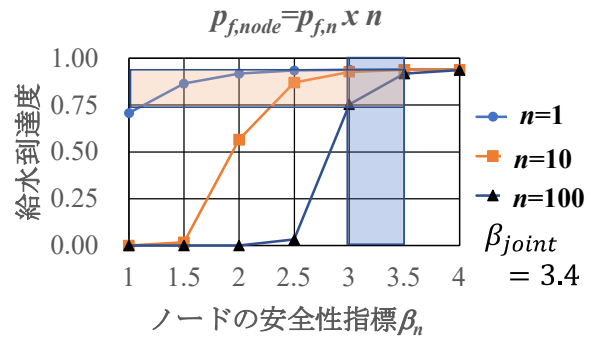


Figure 17 ノード施設の安全性指標水準と給水到達度との関係

する傾向を示している。一方、逆順の場合は、耐震化率が 40%を越えると給水到達度が一段階上昇し、さらに耐震化率が 60%を超えともう一段階増加する傾向を示す。このことから、管路耐震化は施工順序に関わらず、耐震化率が 40%を越えなければ給水到達度の改善は見られないことを示している。また、管路耐震化施工順序によって給水到達度の進捗状況が変わり得ることも示唆している。また、正順方式は水道管路網の上流側から耐震化施工をする傾向をもっており、逆順方式は下流側から施工する傾向をもっている。そして、Figure 16の結果は、逆順（下流側）の場合には管路耐震化の進捗に応じて次第に給水到達度が上昇する傾向が見受けられる。一方、正順の場合には、耐震化率が 60%を越えると給水到達度が一気に上昇する傾向となっている。

Figure 17 では、水道システム内の各ノード施設の安全性指標を 1.0 から 4.0 まで変化させた時の給水到達度への影響を検討している。施設破壊に伴う機能性能損傷の影響により施設に接続する管路の破壊確率が增大するとして、その増加した管路破壊確率は、元の管路破壊確率と施設機能損傷確率の和集合で評価できると仮定する。ここで、施設機能破壊確率 p_{node} は、施設破壊確率 p_{fi} に影響度合い係数 n を乗じて得られるものとする。その影響度合いを 3 ケース ($n=1, 10, 100$) について検討した。同図では、 $n=1$ はノード施設の機能破壊の影響が無視できる場合に相当し、 $n=100$ はノード施設の機能破壊の影響が施設破壊確率の 100 倍に相当すると仮定してそれらの影響度合いを比較している。同図によれば、 $n=1$ では、給水到達度に及ぼす影響はノードの安全性指標全般に亘って小さいが、 $n=10, 100$ と増大するに連れてノード施設の安全性指標が小さい領域では給水到達度が急減している様子が見て取れる。 $n=100$ の場合には、ノード施設の安全性指標を 3~3.5 にすると給水到達度を 0.75 以上確保できることになる。この情報は、ノード施設の構造設計に際して少なくともどの程度の安全性指標が必要かを推定する際に有用になるとと思われる。

6. 結論

水道システムを検討対象にして、ネットワークシステムの耐震安全性目標を実現する実用的な性能設計法を開発した。その成果をまとめると、以下のものが得られた。

- (1) 水供給端（浄水場）から重要拠点までの給水到達度を水道システムの機能性能評価目標とした時、到達度と管材継手安全性指標の関係を明確化した。
- (2) 水道システムの到達度を0.2~0.8とする時、ダクタイル鑄鉄管耐震管の継手安全性指標は水道システムの簡易モデルでは3.2~3.7程度、実大モデルでは3.0~3.25程度が必要であることが判明した。
- (3) 地盤変位を吸収するための継手変位量と継手に要請される継手安全性指標との関係を定式化した。
- (4) 耐震化率が40%を超えると、給水到達度が増加し始め、60%を越えると給水到達度が大きく改善する特徴を示しており、水道システムの耐震化指標として耐震化率を用いる場合の管理目標水準を明確化できた。
- (5) ノード施設の機能破壊の影響を施設破壊確率の100倍と仮定した場合には、ノード施設の安全性指標を3~3.5にすると給水到達度を0.75以上確保できることになる。

謝辞：本研究は、（一財）災害科学研究所の支援により実施できたものであり、「管路の耐震設計基準の性能設計化」研究会に参加した学識経験者、水道事業者、民間企業の研究会メンバーの議論を踏まえて達成できた成果である。ここに、研究所および研究会参加メンバー各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 香月 智：構造設計の国際標準化と性能設計法、砂防学会誌, Vol.52, No.4, pp.60-63, 1999.
- 2) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本, 2002.
- 3) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説, 2009年版, 2009.
- 4) SEAOC: Vision 2000, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, 1995.
- 5) 土木学会地震工学委員会：レベル2地震動研究小委員会

の活動成果報告書, 2000.

- 6) 小池 武, 濱野雅裕, 渡辺 拓, 長谷川延広：水道施設耐震工法の性能設計化試論, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, N0.4 (地震工学論文集第39巻), I_196-I_204, 2020.
- 7) Wen Y.K.: Reliability and Performance-based Design, *Structural Safety*, **23**, pp.407-428., 2001.
- 8) 土木学会：耐震設計ガイドライン (案), 2001.
- 9) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」解説,, 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会, 2000.
- 10) 水道配水用ポリエチレン管の耐震性評価検討委員会：水道配水用ポリエチレン管の耐震設計の手引き, 配水用ポリエチレンパイプシステム協会, 2018.
- 11) Mochizuki, F. and Koike, T.: Performance of water lifeline network with damaged node structures under seismic risk, Application of Statistics and Probability in Civil Engineering-Kanda, Takada & Furuta (eds), Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-45134-5, 2007.
- 12) 日本ダクタイル鉄管協会：耐震管継手断面図, Q&A コーナー (施工編), 日本ダクタイル鉄管協会, 2019.
- 13) Robert. Kramer, S. L. : *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 1996.
- 14) McGuire, R. K.: *Seismic Hazard and Risk Analysis*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley., 2004.
- 15) 小池 武：埋設パイプラインの地震時ひずみ評価, 土木学会論文報告集, 第331号, pp.13-24, 1983.
- 16) Ang, H-S. Ang and Wilson H. Tang : *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II: Decision, Risk and Reliability*, John Wiley & Sons, pp.338-340, 1984.
- 17) 長谷川延広, 大沼博幹, 小池 武：すべりを考慮した地下式配水池の耐震安全性照査法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, N0.4 (地震工学論文集第39巻), I_172-I_179, 2020.
- 18) 小池 武, 渡邊 拓, 濱野雅裕, 長谷川延広, 大沼博幹, 党 紀：地上式配水池の耐震安全性能照査法提案, 第40回地震工学研究発表会講演論文集, ISSN2189-0080, 土木学会地震工学委員会, 2020.

(Received November 1, 2021)

(Accepted ?)

PERFORMANCE-BASED SEISMIC SAFETY ASSESSMENT METHOD OF WATER NETWORK SYSTEM

Takeshi KOIKE, Nobuhiro HASEGAWA, Masahiro HAMANO and Taku WATANABE

Performance-based seismic assessment for water pipeline system has not been generalized in the several decade in Japan, Even though the performance-based approach is forced, it cannot be proceeded without the goal of performance. The seismic safety performance of Level 1,2,3 in the Japanese design code is developed based on reliability approach in which any appropriate goal of seismic design should be given in terms of the safety index for water supply authority, pipe suppliers and pipeline construction companies. Exsample study of the model network shows that the safety index of pipe joint should be 3.2~3.7 in order to obtain the performance level of 0.2~0.8 for water supply at the target demand.