



特集記事・1

寿命100年に挑む水道管

水道管路の耐震化技術

Performance-based Seismic Design Technology of Water Supply Pipelines

小池 武

Takeshi Koike

京都大学 大学院工学研究科
社会基盤工学専攻 教授

1 はじめに

水資源が地球上の有限な資源として国際的な関心が高まるとともに、従来は国内にとどまっていた水道事業が国際的な水ビジネスとして脚光を浴びる時代になっている。その背景を念頭において水道管路の将来の耐震化技術を考えると、次の3つの要件を満足する必要がある。

- ①国際的に通用する耐震化技術であること（管種が異なっても適用できる汎用性を備え、適用国の耐震設計条件に適合しやすい単純明解な設計法）
- ②ISO 準拠¹⁾技術として設計体系が性能設計化されていること
- ③水道システムの耐震安全性を定量的に把握できる設計体系であること

現在の水道工法耐震設計指針はこれらの要件をどの程度満足しているのか？

2009年度に改定された我が国の水道施設耐震工法指針・解説²⁾は、1) 施設に要求すべき性能の規定化を図る、2) レベル1地震動^{*}に対する経済性照査法を導入する、3) 水道システム全体の耐震性を考える視点を提供するなど、性能設計の実現を目指した設計体系の導入に積極的であるが、性能設計で得られる水道システム全体の耐震安全性の評価方法などその具体的な設計手法は明確ではない。

とくに、レベル1地震動に対する経済性照査法については、個別施設の設計ごとにこの手法を適用した場合水道システム内に存在するさまざまな施設の設計震度が互いに異なることになりシステム全体としてどのような地震動に対して耐震安全性をどの程度確保したのかが不明となる点、さらに経済性照査手法によって得られた最適設計震度が水道システム全体の耐震安全性に関わる何を最適化したのかが不明である点、

の2点において設計照査手順として再検討すべき余地があるものと推察される。

水道管路の性能設計を考えると、与えられた性能目標値を満足するために構成する管路や設備の耐震性能を向上させる技術開発を不断に続ける必要があるが、それと同時に現行の水道システムが実現している水道システムとしての耐震性能がどの程度あり、今後実現すべき耐震性能目標値はいくらなのかを明解に把握できなければ、性能設計をどう進めるべきかの方向性が見えなくなる点に注意する必要がある。

本論文では、水道システムの現行耐震設計法を批判的に検証しつつ、本来の水道ライフラインとして水道管路の耐震安全性を実現する性能設計法のあるべき姿について述べる。

2 ライフラインとしての水道管路の特徴

2.1 水道システムの構成と要求耐震性能

水道システムは、水源地で得られた原水を飲料水として需要端に配給するネットワークシステムと定義すると、その間をつなぐさまざまな管路とシステムの途中に配置される浄水場からのポンプ施設、配水施設、送水管理システム、制御バルブシステムなどの施設群から構成されている。その中で、水道管路は、水源地から浄水場に至る導水管、送水管・配水本管などの基幹管路、さらに需要先までの配水管・給水管がそれぞれの役割に応じて階層構造をしており、階層ごとに要請される設計性能は異なるがそれに対応できる管種が採用されるべきなのは言うまでもない。

水道管路に要求される耐震性能は、管種の違いに関わらず本来的には共通でなければならないから、管種ごとに継手特性が異なるが互いに等価な性能要件が設定されるべきである。

* レベル1地震動：地震の毎秒変位が25cm/s程度の比較的頻繁に起こる中規模の地震動

2.2 水道施設の地震被害モード

東日本大震災における水道施設被害³⁾は、過去の地震被害モードと同様に離脱防止機構を持たないダクタイル鋳鉄管の拔出し、鋼管不良溶接継手部破断が見られた。今回の地震の特徴として、図1に見られるように埋設鋼管路コンクリート構造物との取り付け部において、離脱防止機構を持たない伸縮可撓管の脱管被害が複数箇所が発生したが、大口径の基幹管路であったために復旧に時間を要し、末端の利用者に長期間の断水を強いる結果となった。一方、地上構造物では図2に示すように水管橋本体の移動に伴う支承の損壊や伸縮管の破損・脱管被害が見られたが、脱管を免れた伸縮管の修復により水管橋上の変形した水道管路復旧が容易となり、地上での伸縮管の取り扱いやすさが際立っていた。

一般に油・ガス輸送用高圧パイプラインでは、高圧仕様の伸縮継手がピット内のバルブ近傍に設置されることはあっても、固定支点となる構造物近傍に直接地中埋設されることはない。本来、コンクリート構造物との取り付け部に伸縮可撓管を設置するのは、構造物と管の間の相対変形（管軸直角方向の不同沈下の影響）を吸収するためであるが、伸縮可撓管は基本的に軸直角方向の変位吸収性能は高いが、軸方向の変形性能は低い。可撓性能（flexibility）の低い鋳鉄管の場合には、相対変位を吸収するために伸縮可撓管の設置が不可欠であったが、鋼管の場合には管の変形で追従できる区間にまで伸縮



図1 東日本大震災における伸縮管の破損・脱管被害事例
(提供：宮城県ホームページ)



図2 東日本大震災における水管橋被害事例

可撓管を挿入してしまうと、むしろ潜在的な脱管危険度要因を増加させることになる。伸縮可撓管を多用する背景には、水道管路の90%以上がダクタイル鋳鉄管で占められているため、ダクタイル鋳鉄管の特性に基づく設計思想が支配的な中で設計体系がつくられていることが原因の一つではないかと推察される。

2.3 耐震管としての性能要件

地盤震動や地盤変状に対して追従性のよい水道管を耐震管と呼ぶとすれば、その耐震管としての性能要件は以下のことが期待される。

- 1) 地盤震動に対する必要機能として、震動変位繰返しでの拔出しおよび座屈に対する強度が大きく、また異形管の変位吸収性能も大きい
- 2) 地盤変状（液状化、流動化、すべり、沈下など）に対する必要機能として伸び変形が著しい

水道管路を構成する管種は継手特性により従来から一体型継手管路（溶接継手鋼管）と鎖式継手管路（鋳鉄管、ダクタイル鋳鉄管）に分類され、耐震性能の観点から基幹管路において溶接鋼管が多用されてきた経緯がある。しかし、最近では図3に示すような離脱防止機能付きのダクタイル鋳鉄管が耐震管として利用される頻度が増えている。これは複数継手の伸び合計で地盤変位吸収でき、継手破断は離脱防止機構の限界破壊力に比例する特徴を有し、一体型継手と等価な抵抗特性を示すためであろう。したがって、耐震設計法の体系化にあたっては、一体型継手管路と離脱防止機能付きのダクタイル鋳鉄管は地震時挙動が等価な耐震管として、その耐震性能を比較すべきである。

3 性能設計手法から見た 現行耐震設計法の課題

3.1 レベル1地震動に対する経済性照査法

水道施設の現行耐震設計法において特徴的なことの一つは、レベル1地震動に対する経済性照査法が導入されたことである。

しかし、冒頭で述べたように、システム全体で経済性最適化を図る必要があるとき、それぞれの施設ごとに異なる設計

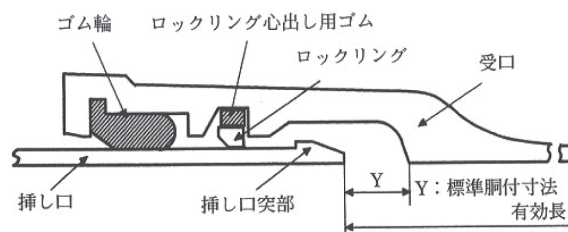


図3 離脱防止機能付きのダクタイル鋳鉄管

震度を最適条件として設計してもシステム全体の最適化にはならない。すなわち、独立した一つの施設の経済性照査を行う場合と、水道ライフラインのように複数の要素構造物と管路ネットワークによって構成される一つのシステムの中の各要素構造物を個別かつ独立に経済性照査を行った場合に同一の手法を適用すべきかどうかの議論が必要であり、水道システムとしての想定地震動に対する全体的な耐震安全性がどう担保されているのかについて明確化される必要がある。

また、別の事例として、老朽管更新による耐震化を進めるためにどのような耐震化投資が妥当か検討する場合がある。このとき、投資コストを最小化する耐震化率が最適な耐震化投資であるとして、経済性照査から最適耐震化率を算定する適用事例⁴⁾がある。しかし、水道利用者が本来求める耐震化率は100%であって、算定された最適値ではない。この矛盾は、経済性照査の最適化基準の誤適用に起因するものであり、今後経済性照査を取り扱う際に注意すべき点である。

この場合、本来検討すべき手順は、耐震化投資により実現できる水道システムの目標耐震性能に対する破壊確率と投資指標の損失確率の双方の得失を比較して、受け入れ可能な耐震化投資額を決定する手順⁵⁾を取るべきであり、得られた最適耐震投資額は水道関係者の合意形成に有用な情報となる。

3.2 水道管路の現行耐震性能規定

現行の水道施設耐震工法指針²⁾においては、厚生労働省令⁶⁾によって施設の重要度ならびに要求耐震性能のアウトラインが規定されており、水管橋を含む管路については漏水発生の有無でその耐震性能が規定されている。すなわち、レベル1地震動に対しては耐震性能1(地震によって健全な機能を損なわない性能)、レベル2地震動^{*2)}に対しては耐震性能2(地震によって生ずる損傷ならびに地震後の修復が軽微でその機能に大きな影響を及ぼさない性能)が要求されている。

同指針ではさらに、水道施設全般に対する定義として、耐震性能3を「地震によって生じる損傷が軽微であって、地震後に修復を必要とするが、機能に重大な影響を及ぼさない性能」と設定している。この定義では耐震性能2と3の差異が地震による損傷程度が後者の方がやや深刻だが基本的には軽微な程度に留まるというニュアンスに聞こえるが、より明確に解釈するなら以下のようなだろう。すなわち、構造損傷は、耐震性能2では修復が容易な程度の損傷であり、耐震性能3では修復にある程度の日数を要する程度の損傷という違いがある。しかし、いずれも軽微な損傷との表現は、漏水事故発生は想定していないと解釈できよう。一方、機能損傷については、耐震性能2では地震後短時間のうちに機能再開が可能

となるが、耐震性能3では機能再開にある程度の時間を要する場合を想定していることになる。

耐震性能を以上のように解釈すると、性能設計法の設計手法として基本となる限界状態設計法で取り扱う限界状態とこれらの耐震性能の対応付けは、耐震性能1は使用限界状態に、耐震性能2は修復限界状態⁷⁾に、そして耐震性能3は終局限界状態に対応することになる。ここで、耐震性能2についてあえて修復限界状態を当てたのは、早期機能回復できる程度の補修という意味で修復性という言葉が使用される事例⁷⁾から、修復に重点をおくこの場合にも適用可能と考えて当てはめることにした。

同指針においては、各水道施設構造物要素に対して、上記の要求耐震性能をより具体化した形で規定しており、この規定による埋設管の部材としての限界状態は表1に示すとおりである。しかしながら、漏水発生の有無を基準とした上記規定は、管路以外の水道施設に対する規定と異なり、耐震性能3を規定しておらず、水道施設耐震工法指針¹⁾における統一的な耐震性能の定義ならびに要求耐震性能の規定と必ずしも合致していない。

3.3 提案する耐震性能規定

耐震性能2はレベル2地震動で地震時被害を生じても速やかに復旧できる状態を意味しているが、実際の水道システムでは復旧日数が数週間に及ぶ場合が確実に想定される。事実、新潟県中越沖地震をはじめとする多くの大規模地震では、実際に水道施設の応急復旧に数週間を要している。これらの状況に鑑み、現状では復旧日数として数週間を要する場合も許容し、管路に対しても「耐震性能3」(管体にある程度の損傷が発生して復旧が必要となるが、一時的な通水は可能で、数週間以内に復旧が可能な状態)を規定すべきであると考えられる。

耐震性能3を規定することで、水道事業者における耐震化計画の策定においてより実際に即した耐震設計指針の運用が可能となるほか、事業価値の評価や事業出資者との合意形成に必要なリスク評価指標の検討が容易になる効果が期待でき

表1 水道管路の現行耐震性能規定

対象要素	耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
限界状態	使用限界状態	修復限界状態	終局限界状態
一体構造管路	力学的特性が弾性域を超えない限界状態	部分的に塑性変形しても漏水が発生しない限界状態	—
継手構造管路(管体)	力学的特性が弾性域を超えない限界状態	力学的特性が弾性域を超えない限界状態	—
継手構造管路(継手)	継手から漏水が発生しない限界状態	継手から漏水が発生しない限界状態	—

*2 レベル2地震動：構造物の耐震設計に用いられる入力地震動で、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動

る。また、継手構造管路については現状の更新工事においても離脱防止機構の無い継手管路が数多く採用されていることから、離脱防止機構付きの耐震管路とそうでない管路を分類してその差異を明記すべきであると考えられる。

表1に耐震性能3を追加して規定すれば表2のようになる。ただし、離脱防止機構無しの場合では、実際上、継手構造の特性からレベル2地震動により許容変位以上の地盤変位を受けると、抵抗することなく継手離脱を引き起こすので、耐震性能2,3について議論することは無意味とも考えられるが、その他の対象要素との比較の都合上、上表では並列的に記載している。また、上記の表2に示す限界状態に対応した埋設管の耐震性能と照査基準を再定義すれば、表3を得る。なお、表中の「すべり検討／非すべり検討」とは埋設管と地盤とのすべりを考慮するか否かを示している。また、同表中の管路区分ランクA1、A2、Bはそれぞれ最重要管路、重要管路、その他一般管路である。

ところで、現行指針における鋼管路の許容ひずみとしては、上記のようにレベル1地震動・レベル2地震動とも鋼管の圧縮座屈試験⁸⁾結果から得られた局部座屈開始ひずみが基準として定められており、さらに地盤変位に対する許容ひずみについてもレベル2地震動に対する許容ひずみが準用されている。しかし、破壊限界状態を基準にして性能評価を行う性能設計の考え方からすると、水道管路の機能損傷状態は、破壊条件である漏水の有無を基準として、すなわち亀裂発生ひずみもしくは漏洩開始ひずみを限界状態として規定すべきであることは言うまでもない。

4 今後の展望

水道システムの耐震対策を着実に実施するためには、地震

防災投資を実践できる体制を整える必要がある。そのためには、水道ライフラインに関わるすべての関係者の間で、地震防災投資に関する合意を得る必要がある。その意思決定のためには、地震リスクマネジメントの観点より以下の課題について関係者間で検討する必要がある。

- 1) 水道ライフラインシステムに対する目標耐震性能の設定
 - 2) 維持管理目的の明確化
 - 3) 耐震化対策の目標値の明確化
 - 4) 地震防災投資に関するコスト分析とそれに基づく意思決定
- 現行耐震設計法が指向する性能設計法は、上記課題解決のための有用な手法であることから、本論文で提起した諸課題の解決に向けた今後の研究発展が期待される。

参考文献

1) 構造物の信頼性に関する一般原則, ISO, (1998)

2) 水道施設耐震工法指針・解説 2009年版, 日本水道協会, (2009)

3) 楢田泰子, 片桐信: 土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書, 土木学会, (2011), 10.1-10.61.

4) 大嶽公康: 水道施設耐震工法指針・解説の改訂ポイント, 日本上下水道設計株式会社, 関西ライフライン第87回オープン研究会, (2010)

5) 小池武, 今井俊雄: 価値指標による既設ライフラインシステムの地震防災投資評価, 土木学会論文集A, 65 (2009) 3, 589-600.

6) 「平成20年厚生労働省令第60号 水道施設の技術基準を定める省令の一部を改正する省令」, 厚生労働省, (2008)

7) 大内一: コンクリート系構造物の耐震設計法, 森北出版株式会社, (2008)

8) WSP 060-96水道用鋼管圧縮座屈試験, 日本水道鋼管協会, (1996)

(2011年8月24日受付)

表2 提案する水道管路の耐震性能規定

対象要素	耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
限界状態	使用限界状態	修復限界状態	終局限界状態
一体構造 管路	力学的特性が弾性域を超えない限界状態	座屈は発生するが、座屈しわの重量が無く、漏水が発生しない限界状態	座屈しわの重量があるが、漏水が発生しない限界状態
継手構造 管路(管体)	力学的特性が弾性域を超えない限界状態	力学的特性が弾性域を超えない限界状態	力学的特性が弾性域を超えない限界状態
継手構造 管路(離脱防止機構 無し継手)	一個の継手内で地震時変位を吸収でき、さらなる伸び変形に余裕がある状態にあり、継手からの漏水が発生しない限界状態	一個の継手内で地震時変位を吸収しても、更なる伸び変形に対して余裕がある状態にあり、継手からの漏水が発生しない限界状態	一個の継手内で地震時変位を吸収し、更なる伸び変形にも拘わらず継手からの漏水が発生しない限界状態
継手構造 管路(離脱防止機構 付き継手)	一個の継手内で地震時変位を吸収でき、さらなる伸び変形に余裕がある状態にあり、継手からの漏水が発生しない限界状態	複数の継手変位で地震時変位を吸収しても、更なる伸び変形に対して余裕がある状態にあり、継手からの漏水が発生しない限界状態	複数の継手変位で地震時変位を吸収し、更なる伸び変形にも拘わらず継手からの漏水が発生しない限界状態

表3 提案する水道管路の耐震安全性照査方法

対象項目	耐震安全性照査方法		
耐震性能	耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
限界状態	使用限界状態	修復限界状態	終局限界状態
レベル1地震動を適用する管路区分	ランクA1, ランクA2	ランクB	—
レベル2地震動を適用する管路区分	—	ランクA1	ランクA2
一体構造 管路	(原則として弾性域検討) 管体応力≦降伏点応力 管体ひずみ≦許容ひずみ	(塑性域検討) 管体ひずみ≦座屈波形重量開始ひずみ	(塑性域検討) 管体ひずみ≦漏洩開始許容ひずみ
継手構造 管路(離脱防止機構無し)	(管体:弾性域検討) 管体応力≦降伏点応力 (継手部:非すべり検討) 継手部伸縮量≦設計照査用最大伸縮量	(管体:弾性域検討) 管体応力≦降伏点応力 (継手部:非すべり検討) 継手部伸縮量≦設計照査用最大伸縮量	(管体:弾性域検討) 管体応力≦降伏点応力 (継手部:非すべり検討) 継手部伸縮量≦設計照査用最大伸縮量
継手構造 管路(離脱防止機構付き)	(管体:弾性域検討) 管体応力≦降伏点応力 (継手部:すべり検討) 継手部伸縮量≦設計照査用最大伸縮量	(管体:弾性域検討) 管体応力≦降伏点応力 (継手部:すべり検討) 継手部伸縮量≦設計照査用最大伸縮量	(管体:弾性域検討) 管体応力≦降伏点応力 (継手部:すべり検討) 継手部伸縮量≦設計照査用最大伸縮量