

水道施設耐震工法の性能設計化試論

小池 武¹・濱野雅裕²・渡邊 拓³・長谷川延広⁴

¹正会員 JICA EEHE Project (〒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 (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

³正会員 (株)ベルテクノ (〒530-0041 大阪府北区天神橋 2 丁目北 2 番 6 号)

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

⁴正会員 JFE エンジニアリング(株) (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2 丁目 1 番地)

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

本研究は、現行水道施設耐震工法指針改定の動向に合わせて具体的な性能設計法のイメージ化を図るために、現行設計法の問題点を克服して国際的な共通尺度に基づく性能設計法を提案したものである。

現行設計法の検討課題をそれぞれ入力方法、性能分類、要素構造物設計、安全性照査法の 4 項目に分け、性能設計法による定式化を示すとともに、性能設計化することの良否を海外で活躍する日本人技術者の視点から明解にし、最後に水道システムの総合的な事業戦略策定への性能設計法の適用性を例示した。

Key Words: performance-based design, current seismic design, water pipeline, water facility, network system, reliability analysis, probability of failure

1. はじめに

世界経済を活発化するには、貿易ルールを世界的に統一し製品品質を世界標準化することが必要で、これが実現すれば市場はおのずと拡大する。このルール作りを取りまとめているのが世界貿易機関¹⁾(WTO)であり、貿易立国である我が国は、率先してこの世界的協定を批准し、経済活動のあらゆる分野で世界標準化を推進しようとしている。

構造設計の分野でも、国内設計法を国際的基準に適合させるため、道路橋示方書をはじめとして多くの設計指針改訂作業が進められている。

本研究では、水道施設耐震工法指針・解説²⁾に関して性能設計法に基づいた新耐震設計法を提案する。

とくに、性能設計法に従うことで、設計者・水道事業者にとってどのようなメリット、デメリットが得られるのかを考慮しつつ新設計法を展開する。

ここでは、性能設計法の意義を次のように設定する。

- 1) 世界的に共通尺度で設計を評価できる体制にする。そのためには、信頼性設計法準拠が適切である。
- 2) 新規部材の構造特性を提案するのは、設計者、メーカーにとって自由である。性能設計法を導入することで、現行ルールよりやり易い方法で新規提案ができるようになる必要がある。
- 3) 海外の事業者が国際間でそれぞれの水道施設の性能比較を行う場合、共通評価指標が必要である。

国内でも、異なる事業者の性能比較では同じことが言える。

我が国では、すでにほとんどの水道事業者で水道設備が整備され、地域住民向けに安定給水されている。その意味では、今後新たに水道施設を新規に建設する機会は殆どないかもしれない。しかし、もし過去の水道施設既設の前提条件が変更され、現行施設の耐震安全性を新しい基準に則って再度安全性を照査しなければならないとすれば、既存施設のすべてがその対象となる。

50 年以上前に建設した施設は現在も稼働しているが、低い設計地震動で設計されており、弾性限界までの安全性照査はしても塑性変形領域については何の照査もしていない構造物が多々存在する。これらの構造物に対して、新設計法の条件に基づいて耐震性不適格の判定ができるものと、その判定が出来かねる微妙なもの(少しの補強で耐震性を確保できる)が存在する可能性がある。資源の有効活用の面からは、低コストの耐震補強をして使用可能となる構造物は大いに再利用させたい。

問題は、簡易式などを利用した低コスト安全性照査手法が無く、構造物の適格・不適格が判定できない状況にある場合である。実際、国内の多くの事業者がこの状況にある。

性能設計化することで、その努力に対してどのようなメリットが得られるのか、明確でなければならない。

性能設計化による設計の自由度が拡大されると言われる

が、水道施設の設計段階でどのように反映するのか？設計者・メーカーにとっては、個別構造物の更新時に新規部材の導入を図る時、今以上に簡単に導入提案できることが重要である。また、事業者にとっては劣化する現行水道システムをどこまで改善するか、地震危険度にさらされるシステムをどこまで改善するか。システム内の細かい議論よりも、システム全体の機能性能の評価結果が必要である。

水道システム全体の機能性能を定量化して初めて、次の打手の判断ができる。ネットワークのノード、リンクが破壊確率を持つ条件下で、水源地から目標需要端までの給水可能性の確率を推定できれば、給水機能性能安全性確率が算定できることになる。これらの判断をするために、性能設計法は適切な判断資料を与えてくれる。

2. 現行設計法の問題点

(1) 入力

耐震設計において地震荷重を決定するとき、確率論的地震危険度解析手法³⁾に基づいて当該地点の地震規模を推定し、最終的にその地震動を想定する手法がとられるべきである。

現行設計法では、管路設計用にはレベル 1、レベル 2 地震動に対応する設計速度応答スペクトルより地震荷重を算定する。一方、一般構造物については設計加速度応答スペクトルが設定されてきた。とくに、大規模事業体の重要構造物については、該当地域の地震履歴と周辺活断層データからその地点に適合したレベル 1、レベル 2 地震動を設定し、その設計加速度応答スペクトルを設定してきた。

水道システムを構成する管路と構造物でそれぞれ速度応答スペクトルと加速度応答スペクトルが設計値として別々に設定されているが、それら両者の整合性は不明である。

一方、海外の地震荷重は、基本的には設計加速度応答スペクトルが主であり、必要に応じて設計速度応答スペクトルが算定されている。

国内と海外で地震入力の設定方法が大きく異なる時、相手国に対して日本の事情を理解してもらうのは必ずしも簡単なことではない。

将来的には、日本の地震入力設定法を確率論的地震危険度解析に基づく設定法に統一化すべきではなかろうか。なぜなら、設計地震加速度が固定されると、その地震動の持つ発生確率が不明で、とくに海外における相手技術者に日本での設計地震動の適合性について明解な説明をすることができない。

地盤データが整備されている国もあれば、未整備の国もある。地盤データの整備水準に応じた対応が必要であり、整備水準が悪ければ、予測誤差が大きいとする仕組

みを用意すればよい。

また、日本の技術者は管路についての固定された設計速度スペクトルを用いた設計手法に習熟しているが、実地震記録が無い国で水道システムの耐震設計を行う場合に、その国に適合した設計地震荷重をどう設定するかについて日本の設計者には対処方法が判らないことになる。地震動入力設定法が海外の手法と概念的に同じものであれば、日本の技術者も海外で国内と同様の手法で作業ができることになり、日本の技術者の国際化を図る上での有用となる。

(2) 耐震性能分類

地震動と照査すべき耐震性能は、国内でも海外でも同一の概念で表現されていることが望ましい。海外指針では、地震動と耐震性能が以下の形で一対一対応している。

表 1 米国 Vision2000 の耐震性能分類⁴⁾

Earthquake Design Level	Return Period	Earthquake Performance Level				Earthquake
		Fully Operational	Operational	Life Safe	Near Collapse	
		S-1	S-2	S-3	S-4	
Frequent	43 year	●				
Ocasional	72 year	■	●			MOE
Rare	475 year	★	■	●		DBE
Very rare	970 year		★	■	●	MCE

(Note)
 ●: Basic Objective
 ■: Essential/Hazardous Objective
 ★: Safety Critical Objective

MOE:Maximum Operational Earthquake
 DBE:Design Basic Earthquake
 MCE:Maximum Considered Earthquake

日本でも、同様の考え方で耐震性能が定義されているが、レベル 2 地震動の分類を修復限界に適用するのと終局限界に適用するのでは、その再現期間が異なるが、日本の基準はその点で不明確と言わざるを得ない。この部分を修正することで表 2 の形で分類することができる。結局日米の分類を整合するためには、日本の地震動分類を下記の表のように修正する必要がある。

表 2 日本の耐震性能分類⁵⁾

超過確率	再現期間	構造物の性能レベル			耐震基準
		S-1	S-2	S-3	
50%/50yrs	72yrs	■、●			日本 レベル1
20%/50yrs	225yrs		○		
10%/50yrs	474yrs		■	●	レベル2
2%/50yrs	2473yrs			□	(レベル2)

注) 要求性能の定義
 S-1 使用限界
 S-2 修復限界
 S-3 終局限界
 (人命安全限界)

● 基本構造物
 ■ 重要構造物
 ○、□ 検討不要

本来レベル2地震動が稀に発生する地震と定義されているので、その意味では再現期間が2473年に対応する地震となるが、修復限界の定義からは再現期間は474年が整合的である。したがって、ここでは、終局限界に対応する地震は(レベル2)の表現でレベル2地震動と区別して分類している。

海外との整合性を図るためには、日本のレベル2地震動は米国のDBEと対応付けが必要であろう。一方、終局限界に対応する(レベル2)地震動は、必ずしも耐震性照査が求められていないことから、その要否を含めて検討が必要であろう。

(3) 管路・施設の安全性照査

現行設計法では、個別要素の耐震安全性照査は限界状態設計法に従っている。個別要素は、大きくは管路、地上構造物、地中構造物、付属設備に分類でき、直管、異形管、付属設備それぞれ別個に、応答変位法に基づいた耐震性能照査が行われてきた。この部分は水道技術分野の核心部分であり、老朽化対策など解決すべき課題への対応は相対的に精力的に行われてきた。

今後、新規技術導入を容易にする環境を整備して性能設計化を進めるためには、新規技術の性能を評価する第三者機関を整備するのが必要であろう。

地上構造物の多くがFEMモデルによる非線形動的解析により耐震安全性照査を行っている。この手法はモデル化作業の手間と計算コストの観点から、出来ることなら避けたい、可能ならより低いコストで簡便な照査法を整備できないかと、長年切望されてきた。実際、発注者は動的解析結果の良否を判定する手段が無く、複数ケースの比較検討など本来あるべき設計行為がなかなかできない環境におかれている。

新規構造物の場合は、詳細な構造的検討を行うために、FEMモデルによる動的解析も必要かもしれないが、限られた予算内で既存設備の安全性照査をする場合は、より簡便な照査方法が望まれる。

地中構造物は本来地盤挙動に制約される構造物であることから、慣性力を主体とする動的モデルによる挙動解析の適用は手法としてふさわしくない。

地下構造物については、管路で使用されている応答変位法に準拠した静的解析法の開発が望まれる。

付属設備の地震時挙動解析は、適切なモデル化が難しく、統一化された解析手法も提案されてこなかった。しかし、地震時被害の多くが構造体と管路を接合する部分に介在する付属設備(エキスパンション、バルブ、立坑)付近から発生している。したがって、耐震設計上は今以上に注目すべき箇所になると言える。

(4) システムの安全性照査

現行設計指針では、耐震設計の基本方針として、水道システムの視点からの地震対策が記述されている。

水道事業者にとってこれらの耐震対策が必達目標であれば、その実現度合を定量的に把握しなければならない。しかし、従来は、事業者は耐震対策のいくつかの面を見て、地震対策の達成を確認すればよく、水道システム全体の耐震性能がどの程度向上したのかを定量的に把握する必要が無く、その照査方法も決められていなかった。また、そのような評価が耐震予算獲得と結びつかないと照査自体を行う必要性が無いはずである。

性能設計法は水道システムの地震対策がどの程度実現しているかを定量的に把握するのに有用な手法であるが、水道事業者はその評価結果をどう活用することになるのか?現行設計指針の性能設計化を図る時には、Code writerはこの適用性について明確化することが望ましい。

3. 新設計法の試案

(1) 入力

日本の設計地震動は、阪神・淡路大震災以来レベル1、レベル2地震動を用いた耐震設計法体系が導入され、今日まで踏襲されてきた。この方式は国内での耐震設計に限定する限りでは日本国内の地震環境を反映した設計地震動として20年以上使用されている。

しかし、国外の耐震設計法との整合性を求めると、日本の地震動モデルが適切かどうかは十分に吟味する必要がある。

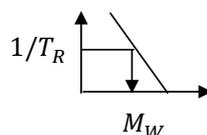
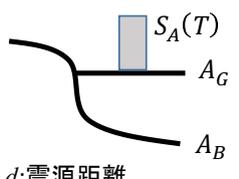
項目	記号	確率論的予測手法
年間発生率	P_{EQ}	$P_{EQ}=1-\left(1-\frac{1}{T_R}\right)^n$
再帰年間	T_R	
供用年数	n	
マグニチュード (Moment Magnitude)	M_W	
距離減衰式	$f(M_W, d)$	
基盤加速度	A_B	
地表面加速度	A_G	
設計加速度応答	$S_A(T)$	

図1 地震動入力設定手順⁶⁾

現行設計法ではレベル1、レベル2地震動の設定方法が詳細に述べられている。しかし、日本国内の地震環境

を前提とした設定方法は、国内向けには問題ないが、他国の関係者に耐震設計法の入力モデルとして妥当性を理解してもらうにはできていないと言わざるを得ない。

少なくとも、海外には日本ほどに厳しい地震環境にある国はなく、耐震設計水準も自ずから異なることになる。それを考慮した理論的な地震入力設定方法としては、確率論的地震危険度解析手法が適当と思われる。図1はその手順を示したものである。

地震動予測における不確実性は、活断層からのマグニチュード (M_w) 予測誤差、距離減衰誤差、表層地盤の応答予測誤差、構造物自体の挙動推定誤差などが総合されて、設計地震動の予測誤差として把握される。確率論的地震動予測法としてはこの予測誤差を詳細に検討する必要があるが、実務段階で詳細な予測誤差評価が必要無い場合は、工学的判断を取り入れる余地がある。結果的に変動係数の形で例えば10%程度の数値を仮定することも可能であろう。

(2) 耐震性能分類

従来日本では、限界状態は図2に示すように使用限界、修復限界、終局限界に分類されてきた。

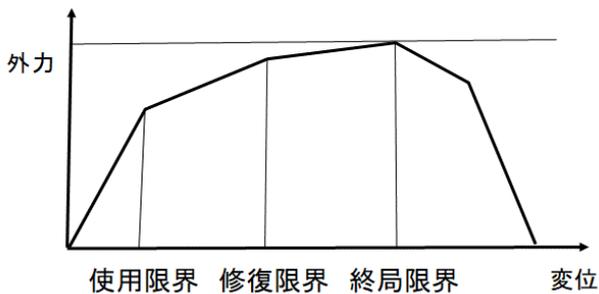


図2 日本における限界状態モデル⁸⁾

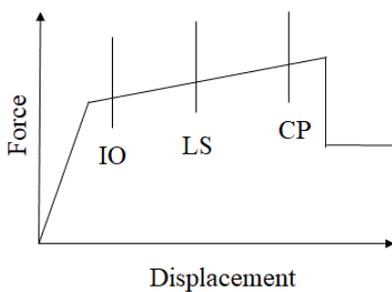


図3 米国における限界状態モデル⁹⁾

一方、例えば米国では、図3に示すような区分がなされてきた。ここで、図中の記号は、IO(Instantaneous Operational), LS(Life Safety), CP(Collapse Preparation)である。

日本では、設計地震動としてレベル1地震動とレベル2地震動が導入されているが、米国ではMOE(Maximum Operational Earthquake), DBE(Design Basic Earthquake), MCE(Maximum Considered Earthquake)が定義¹⁰⁾されている。

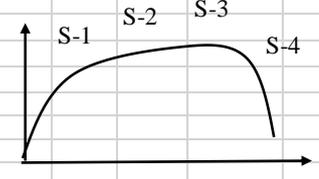
両者の関係をみるために、両方の限界状態をまとめて

一覧表にしたのが表3である。

表3からわかるように、レベル1地震動はMOEと対応し、レベル2地震動はDBEと対応しているように見える。しかし、元々はレベル2地震動の本来の定義では構造物耐用期間内に発生する確率の極めて小さい強い地震動が想定されていたにも関わらず、表3ではDBEに相当する地震動という位置付けになっている。したがって、日本の設計地震動と海外の設計地震動が等しい水準であるためには、レベル2地震動の発生条件をDBEの発生条件に合わせる必要がある。

表3 再現期間と耐震性能の関係

超過確率	再現期間	構造物の性能レベル				耐震基準	
		S-1 IO	S-2	S-3 LS	S-4 CP	日本	米国
50%/50yrs	72yrs	●				レベル1	MOE
20%/50yrs	225yrs	■	●				
10%/50yrs	474yrs		■	●		レベル2	DBE
5%/50yrs	970yrs			■	●		MCE
2%/50yrs	2473yrs				□	(レベル2)	
注) 要求性能の定義							
S-1	使用限界						
S-2	修復限界						
S-3	人命安全限界						
S-4	終局限界						
●	基本構造物						
■	重要構造物						



しかし、既往の耐震設計指針ではレベル2地震動は元々の定義に基づいて厳しい大きさの地震動として設定され、該当する設計地震動スペクトルも十分に大きく、DBE相当の再帰年数474年の地震動とは対応していない。その場合、国内では過大は設計地震動スペクトルを用いて耐震設計が行われている可能性もあり得ることになる。

また、表3では、修復限界状態を照査する地震動が日本、米国両方で定義されていないことがわかる。さらに、日本の指針ではMCEに相当する地震動が設定されていないことになる。代わりに(レベル2)地震動が設定されている。

一旦、設計加速度が上記のように定められると、設計速度応答スペクトルと加速度応答スペクトルの関係も、現行の日本のように独立に設定するのではなく、振動論に基づいて次式で関係づける手法の方が我が国でも採用されるべきであろう。

$$S_V(T) = \frac{T}{2\pi} S_A(T) \quad (1)$$

ここで、 T は構造物の固有周期である。

地盤変状は地中に埋設される管路に作用する地震時被害として最も致命的なものであり、近年益々その重要性が注目されている。管路への影響が大きい地盤変状としては、液状化(沈下、側方流動)、断層変位そして地滑りがある。設計者が地盤変状量を精確に予測できればそれ

だけ予測誤差を小さくできる形で、設計努力が評価されることになる。地盤変状発生時の管路破壊発生確率は表3の形でそれぞれ求めることができる。すなわち、地震が発生(P_{EQ})し、それに伴って地盤変状モード(P_X)が発生する。この時、管路の破壊確率($P(Z_X < 0|X)$)は発生した地盤変位が限界変位を超過する確率として算定できる。

表4 地盤変状モード毎の管路破壊確率計算式

地震発生		地盤変状モード		管路破壊
レベル2地震動	P_{EQ}	液状化	p_L	$P(Z_L < 0 L)P_L P_{EQ}$
		断層変位	p_F	$P(Z_F < 0 F)P_F P_{EQ}$
		地滑り	p_{LS}	$P(Z_{LS} < 0 LS)P_{LS} P_{EQ}$

注) Z:地震時管路破壊事象

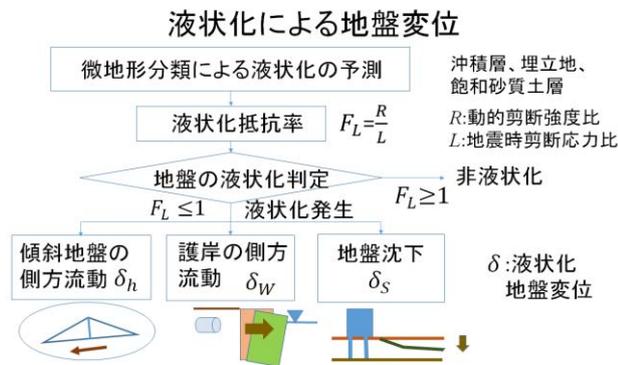


図4 液状化による地盤変位解析手順

液状化被害確率は、図4に示す地盤変位解析手順にしたがって算定することができる。すなわち、液状化危険度解析結果に基づいて液状化抵抗率 F_L の液状化発生確率($F_L \leq 1$)が算定できると、次にそれぞれの地盤変状モードに従って破壊モードに対する破壊確率を求められれば、最終的に液状化被害確率が表4のように算定できることになる。

(3) 管路・施設の耐震設計・安全性照査

図5に水道システムの代表的な管路、構造物、接続部のイメージを示す。

これらすべての設計において、構造体・設備・機器の品質を確保するには、許容値が安定的であることが望ましい。その意味で、安全性指標で許容値を指定する場合は、ISOの方針に従うのも一つの方策である。ISO¹¹⁾およびEUでは $\beta=3.5\sim 3.8$ を推薦している。ランダム変数の標準偏差あるいは変動係数は、本来は変数ごとにばらつくが、関係するすべての変動要因を考慮して荷重側変動係数を求めるのは、作業の膨大さに比較して得られる成果は少ない。このことが、実務段階で荷重側変動係数予

測の簡便法が期待される由縁である。地震荷重以外のランダム変数変動係数を δ_L とし、地震荷重の変動係数を δ_E と分離して概算評価することも可能であろう。

直管継手の地震時被害発生率は、震災調査で単位距離当たりの被害実績として集計できる。この実測結果に整合する形で設計被害率を想定すれば、区間 L kmの管路被害発生確率は被害発生のパアソン分布仮定下では次式で算定できる。

$$P_p = 1 - \exp(-\lambda L) \quad (2)$$

ここで、 λ は1km当たりの被害発生率である。

対応する設計破壊確率を設計安全性指標 β_{cr} を用いて次式で表せるものとする。

$$P_{cr} = \Phi(-\beta_{cr}) \quad (3)$$

この時、安全性照査条件は次式で与えられる。

$$P_p \leq P_{cr} \quad (4)$$

異形管、バルブ、管路沿いのさまざまな治具類の破壊実績も直管と同様に現地集計されるので、それらの実績と整合する被害発生確率を推定することが可能である。

いま、簡単のために、被害発生率に直管、異形管、バルブ、治具すべての被害数が含まれる場合を想定する。この時、管路区間長さ L の耐震安全性を安全性指標 β_{cr} 以上とするには、管路被害率が次の条件を満足していることを確認する必要がある。

$$\lambda < -\frac{1}{L} \ln[1 - \Phi(-\beta_{cr})] \quad (5)$$

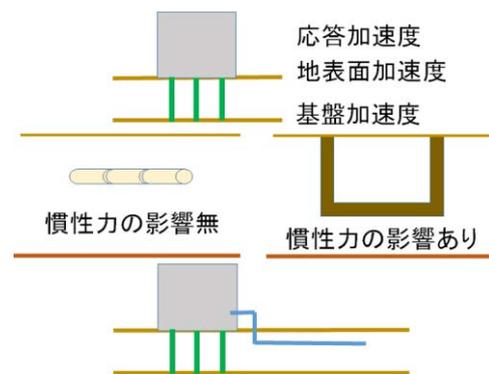


図5 地上構造物、地中構造物、接続部のイメージ

λ がこの条件を満足しない場合は、管路の耐震性能を上げるため老朽管あるいはその他の付属部品を耐震性の

ある新品と交換することが必要となる。

地上施設は基本的に慣性力に支配される構造物であるから、設計加速度による応答値が限界値以下であることを確認すればよい。

レベル 1, 2 地震動による安全性照査では、先ず静的 Pushover 解析で構造物の降伏値を確認し、次にその降伏値に対してレベル 1 地震動に対する応答値が設計条件を満たしているかを確認する必要がある。したがって、構造物の降伏値を設計の第一ステップで確定することが重要である。

水道施設は、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、以下の式で安全性照査ができる。

$$P_A \leq P_{cr} \quad (6)$$

ここで、地上構造物の修復限界に対する破壊確率 P_A は次式で求められる。

$$P_A = P[\delta_{cr} - \delta_A^{repair} < 0] \quad (7)$$

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。いずれの変数も本来ランダム変数であるので、式(7)の超過確率は信頼性理論の評価式方法に従って算定することが必要である。

地中構造物は基本的に応答変位法で耐震評価することができる。とくに、周辺地盤より剛性は相当に大きい地中構造物は、地盤との間にすべりを発生することで、地震荷重は大きく削減され、構造物変位も小さくなることが予想される。また、構造物の 3 次元の特徴は、静的 Pushover 解析で潜在危険箇所を事前確認することで、安全性照査箇所を押さえることができる。

以上の考察から、地中構造物の耐震安全性は次式で行うことができる。

$$P_U \leq P_{cr} \quad (8)$$

ここで、地中構造物の修復限界に対する破壊確率 P_U は次式で求められる。

$$P_U = P[\delta_{cr} - \delta_U^{repair} < 0] \quad (9)$$

ただし、 δ_U^{repair} は修復限界モードにおける地中構造物の変位応答。

水道管路は各種施設間を管路で結合したシステムであり、構造物と管路の接続箇所は比較的耐震性が低く、従

来から多くの地震時被害が発生してきた。この部分の耐震安全性照査は、接続部の相対変位が限界変位を超過しない形で下記のように照査することができる。

$$P_C \leq P_{cr} \quad (10)$$

ここで、接続部の修復限界に対する破壊確率 P_C は次式で求められる。

$$P_C = P[\Delta_{cr} - \Delta_C^{repair}] \quad (11)$$

ただし、 Δ_C^{repair} は修復限界モードにおける接続部の変位応答。

(4) ネットワークシステムの安全性照査

水道システムの総合的な機能性能の一つが、水源から目標需要端への給水性能である。とくに、震災直後の給水性能は重要な耐震安全性指標となる。

水道システムの全体的な耐震性能向上策を論じるためには、ネットワークレベルでのシステム機能の特徴を把握することが必要である。しかし、従来の水道システムの耐震対策ではこの点の議論がともすれば定性的な議論で終わっていた。

しかし、性能設計法はネットワークの機能性能を分析し、その性能の確率的評価を与えるものであることから、水道事業者の地震防災対策に対する判断情報を提供できる点に特徴がある。

図 6 は水道システムのネットワークの特徴を説明するためのイメージ図である。同図に示すノードは水道システムの拠点に設置されている浄水場や配水池などの基幹施設に相当し、リンクは管路を意味する。

設計者は、ネットワークを構成するすべてのノード、リンクの破壊確率を評価式(2)から(11)にしたがって算定し、そのネットワークノード間の連結性能を解析することで、水道システムのネットワークとしての特徴、弱点を総合的に把握することができる。そして、その情報を基礎に水道事業者は次の耐震投資の方針を検討すること

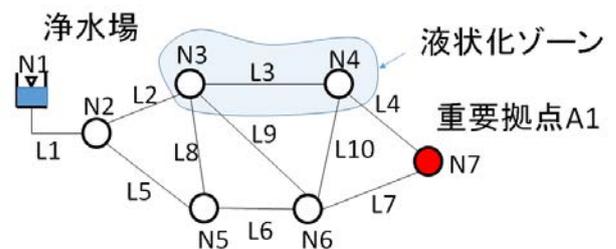


図 6 水道システムのネットワークイメージ

ができる。その意味で、性能設計法は水道システムの総

合的な事業戦略策定のための有用な手段と言えよう。

4. まとめ

本研究では、現行水道施設耐震工法指針の性能設計化に向けて検討すべき課題とその改善策について、とくに海外で活躍する日本の水道技術者の立場を踏まえて、提言した。その成果を列挙すると下記となる。

(1) 地震入力設定法について

日本では、レベル1地震動、レベル2地震動を前提とする地震荷重設定が耐震設計の基本となっているが、国際的には確率論的地震危険度解析に基づく地震動設定手法が一般的である。この手法への転換を提案する。

(2) 耐震性能分類について

日本の設計指針では、重要構造物に対して修復限界に対する耐震性能検討をレベル2地震動を用いて行うことになっているが、この点についても米国 Vision 2000 との整合性を考慮すると、レベル2地震動の水準を米国の DBE 水準に合わせることを提言する。

また、構造物の弾塑性設計を行うとき、設計の初期段階で構造物の降伏値を確定させることの必要性を指摘した。

(3) 耐震設計における安全性照査レベルについて

管路、構造物の耐震設計品質を維持するためには、設計許容値水準を安定化させることが重要である。この観点から、限界安全性指標 β_{cr} の値を例えば ISO が推奨する値に Code writer 側で規定することを提言する。

(4) 水道ネットワークシステムの性能設計化の意義について

管路システムの耐震性能を総合的に評価するには、性能設計法に基づく水道ネットワークの機能性能解析が有用であることを指摘した。この手法により、水道システムの総合的な事業戦略策定に活用されることを提言する。

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、その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) WTO: World Trading Organization, 外務省, <https://www.mofa.go.jp>, 1986.
- 2) 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説, 2009年版, 2009.
- 3) McGuire, R. K.: *Seismic Hazard and Risk Analysis*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, 2004.
- 4) SEAOC: Vision 2000, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, 1995
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, pp.110-119, 1996.
- 6) Robert Kramer, S. L.: *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 1996.
- 7) Chopra, A. K.: *Dynamics of structures*, Pearson Education, 2017.
- 8) 国土交通省: 土木・建築にかかる設計の基本, 2002.
- 9) GIANNIPOULOS, Ioannis P.: *Seismic Assessment of a RC Building according to FEMA 356 and Eurocode 8*, TEE, ETEK, Kipros, 2009.
- 10) Wen Y.K.: *Reliability and Performance-based Design*, *Structural Safety*, **23**, pp.407-428., 2001.
- 11) 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.

(Submitted September 10, 2019)

Proposal on performance-based seismic design method of water supply systems

Takeshi KOIKE, Masahiro HAMANO, Taku WATANABE and Nobuhiro HASEGAWA

This study is developed to propose a method to make a performance-based seismic safety design of water supply pipeline network systems.

Several proposals are prepared from the international point of view as well as from Japanese one. Mainly 4 issues are discussed: 1) earthquake load prediction, 2) classification of seismic performances, 3) performance-based design method for pipeline and related structures and 4) effectiveness on performance-based approach for seismic disaster prevention of water supply network system.

Main proposals are as follows: 1) current method of Japanese seismic load should be revised based on the international one which is based on probabilistic method. 2) the Level 2 earthquake ground motion in Japan should be re-examined to be compatible with the international concept on the repairable limit state. 3) Formulation of reliability-based safety assessment method for pipeline and its related structures, and 4) the effectiveness of performance-based approach for the decision making of water supply system planning.