

## 危機耐性に対応した設計手順案と耐震設計事例

(株)NJS ○根岸悠哉 大嶽公康

水道施設耐震工法指針の改訂版では、安全性が損なわれた場合に、危機的状況を避けるための危機耐性という要求性能が導入された。危機耐性を検討するにあたっては、新たな被災シナリオを考え、投資費用等を勘案して可能な範囲で対応を行うことが基本となるが、具体的な検討方法や事例が少ないのが現状である。そこで本稿では、被災シナリオの検討方法や構造解析による危機耐性への対応例について示すとともに、留意点について考察した。

*Key Words* : 危機耐性、耐震設計、構造解析、BDDE

### 1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震以降、「危機耐性」という考え方が土木学会にて提唱されており、土木構造物共通示方書<sup>1)</sup>や、鉄道構造物等設計標準・同解説<sup>2)</sup>、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>3)</sup>にもその概念が盛り込まれつつある。水道では、2022 年に改訂された水道施設耐震工法指針<sup>4)</sup>で、新たな要求性能として危機耐性が導入されたが、検討方法や事例が少なく、事例の共有が不可欠な現状にある。本稿では、危機耐性の検討方法や事例、留意点について整理し、危機耐性に対応した耐震設計の参考となることを目的とした。

### 2. 水道における危機耐性

水道施設における危機耐性とは、「要求性能の「安全性」で定義した事象を超える地震動・津波・風水害などにより安全性が損なわれた場合に、水道施設が危機的な状況に至る可能性を小さくする性能」と定義されている。

事象	設計で設定する地震動、津波、風水害		要求性能の安全性で定義した事象を超える事象※
	レベル1	レベル2	
施設の対応	従来の耐震設計や浸水対策で安全性、復旧性や使用性を確保		危機耐性による対応

※要求性能の安全性で定義した事象を超える事象の例

- ✓安全性の照査で設定した設計地震動を超える地震動
- ✓想定浸水深を超える津波・洪水
- ✓地震と風水害の複合災害
- ✓解析モデルの想定を超える挙動による被害 等

図 1 危機耐性の概念

水道施設の危機的状況とは、①人命が脅かされる状況、②飲料水の供給が停止する状況、③給水が長期間停止する状況の大きく 3 つに分類される。

危機耐性による対応を行うに当たっては、被害が個々の施設に与える影響、水道システム全体に与える影響及び社会的影響等を考慮し、過去の被災事例などを参考に、新たな被災シナリオを考え、水道施設が危機的な状況に至る可能性を小さくするよう、投資費用等を勘案して総合的に判断し、可能な範囲で行うことが重要とされている。

### 3. 危機耐性に対応した設計手順（案）

要求性能としての危機耐性が水道施設耐震工法指針で明確化された一方、設計実務では危機耐性の検討をどのような手順で行うべきかが明確化されていない。

図 2 に危機耐性に対応した設計手順（案）を示す。基本設計では従来の設計内容に加え、危機耐性導入検討を実施する。ここでいう危機耐性導入検討では、図 3 に示すとおり、危機耐性検討要否を判断したのち、危機耐性の詳細検討が必要とされた場合には、シナリオの検討から対策の検討、対策実施の判断まで行う。詳細設計では、従来の設計に加え、危機耐性に対応した設計を行う。この設計は基本設計の危機耐性導入検討にて有効と判断された対策の設計であり、従来設計に加え、浸水対策としての擁壁の設計などを行うものである。

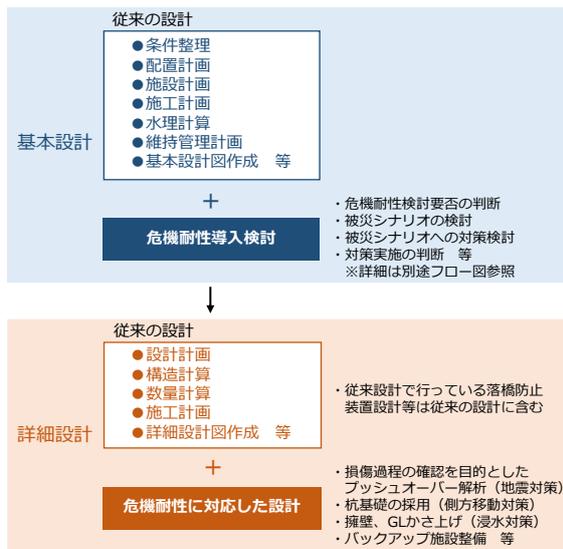


図 2 危機耐性に対応した設計手順（案）

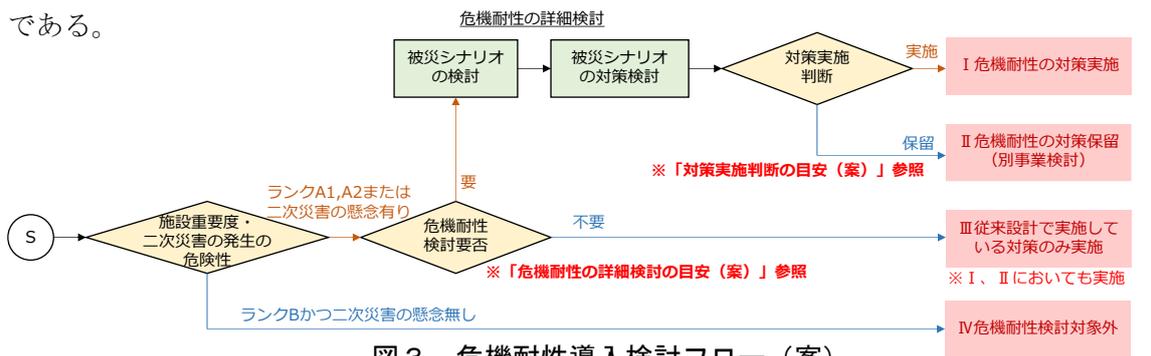


図 3 危機耐性導入検討フロー（案）

表 1 危機耐性の詳細検討の検討目安（案）

項目	評価指標	評価			
		百程度	中程度	数百以上	
重要度	施設規模	浄水場施設能力 (m3/日) または配水池有効容量 (m3)	□	□	□
	事業体内の重要度	水道事業体で占める給水割合	数%	中程度	数十%
	人命	施設被災時に人命が脅かされる可能性	低い	中程度	高い
	第三者被害	隣地・周辺家屋等への被害の可能性 (浸水被害、道路陥没等)	低い	中程度	高い
	影響の長期化	長期間の給水停止の可能性	低い	中程度	高い
リスク	地震	地盤条件 (液化化・不整形・断層等)	良い	中程度	悪い
	水害	津波・洪水浸水時の被害エリア	遠い	近い	エリア内
	土砂災害	土砂崩れ危険区域	遠い	近い	エリア内
	二次災害	施設被災時に近隣家屋や近隣施設への被害の可能性	低い	中程度	高い
	その他	その他リスク	無し	中程度	有り
危機耐性の詳細検討判断		全項目該当の場合必要に応じて検討	1項目以上該当の場合検討を考慮	1項目以上該当の場合検討が必要	

※本表はあくまで目安とし、事業体等にて対象施設の重要度とリスクを見定める必要がある。

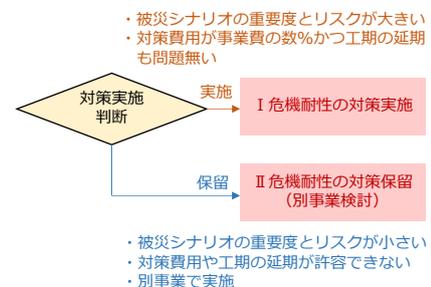


図 4 対策実施判断の目安（案）

## 4. 被災シナリオの検討方法

### (1) 考慮すべき事象

武田・西村<sup>5)</sup>は、危機耐性を「BDBE (Beyond Design Basis Event=設計基準外部事象) に対しても、社会への影響をより小さくする性能」と定義しており、DBE (Design Basis Event=設計基準内部事象) 以外の事象を危機耐性の対象としている。水道における危機耐性は、「要求性能の「安全性」で定義した事象を超える事象」を対象としているが、これは BDBE と非常に近い概念といえる。

土木学会発刊の耐震設計入門<sup>6)</sup>で例示されている BDBE に、水道施設特有の事象を加筆したものを表 2 に示す。被災シナリオの検討に当たっては、各種事象が及ぼす影響の大きさや発生頻度について考慮のうえ、重要度が高い事象に対して立地環境や周辺環境を踏まえた検討が求められる。

表 2 BDBE の例

大分類	小分類	BDBEの例	(参考) 水道施設の従来設計におけるDBEへの対応例	(参考) 水道施設の従来設計におけるBDBEへの対応例
作用	地震作用の不確定性	地震強度、鉛直地震動、余震・前震、橋脚間の位相差、局所的な増幅、継続時間、振動特性、位相特性	動的非線形解析を用いた耐震設計	限界状態設計法における荷重係数、破壊モード判定
	地震随伴事象	斜面崩壊、断層変位、津波、地盤沈下、地盤の不同沈下、地盤の液状化、側方流動	各事象に対する設計、有効応力解析	各事象に対する設計上での安全率
	風水害の不確定性	風速、浸水位、浸水継続時間、土砂災害（土石流、がけ崩れ、地滑り）	最大洪水浸水位に対する施設設計	浸水位などで余裕を確保
	複合災害	豪雨、台風、大潮、火事、パンデミック	耐火構造等	一般的に考慮されない
応答・限界値	地盤の不確定性	地盤性状、地層構成、支持層の傾斜や不陸、地盤の液状化、軟弱粘性土のすべり、地盤の流動化、不同沈下、洗掘、基礎の塑性化の不確実性	動的非線形解析を用いた耐震設計（地盤・構造物連成モデル）	液状化による低減係数等
	材料特性の不確定性	材料のばらつき、材料劣化、温度依存性、速度依存性	材料特性	限界状態設計法における材料係数
	応答解析・限界値算定の不確定性	設計モデルの不確実性、周辺環境の変化、地盤の振動変位、隣接する構造物との連成、特殊構造物の応答、複数種類の部材が塑性化した時の応答、幾何学的非線形の影響、局所的な応力集中、変形性能の算定	-	限界状態設計法における部材係数および構造解析係数
状態	支承の破壊、下部構造の倒壊、橋台背面の沈下、過大な残留変位、停電、施設機能停止（浄水施設停止・導水管閉塞等）、施設損傷（河川護岸損傷、導水施設損傷等）、施設亡失（水管橋落橋等）	-	落橋防止装置施設、自家発電設備、バックアップ施設、管路の二重化等	

### (2) 被災シナリオの検討例

被災シナリオの検討例を表 3 に示す。本検討例では立地環境を 4 つに分類し、各環境における被災シナリオの例を整理した。設計実務においては、類似した施設の過去の被災事例や、周辺環境の過去の災害などから、適切なシナリオを想定することが重要である。

表 3 被災シナリオの検討例

b.立地環境 a.事象	一般環境 (全環境共通)	急傾斜地・不整形地盤	軟弱地盤	沿岸部・河川付近
地震および地震随伴事象	<ul style="list-style-type: none"> <li>想定外の強度や振動特性、位相特性を持つ地震による施設損傷や倒壊、漏水による機電設備停止</li> <li>断層変位による施設や管路の損傷</li> <li>道路被害等による薬品や燃料等の不足・遅れ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>土砂災害による施設損傷や倒壊、埋没、管路流出</li> <li>局所的な地盤変位、不同沈下による施設や管路の損傷</li> <li>側方流動による地下構造物（杭基礎等）の損傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>液状化による施設の不同沈下や浮き上がり、管路の継手抜け落ち</li> <li>地盤変位、流動化による地下構造物（杭基礎等）の損傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>津波や津波による漂流物の衝突による施設流出や損傷</li> <li>津波到来による機電設備の停止、原水の長期塩水化</li> </ul>
風水害	<ul style="list-style-type: none"> <li>内水氾濫等による機電設備の水没、機能停止</li> <li>送電線等の被害による停電の長期化、機能停止</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>土砂災害による施設損傷や倒壊、埋没、管路流出</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>河川氾濫等による機電設備の水没、機能停止</li> <li>取水施設閉塞による取水機能停止</li> <li>河川増水による水管橋や添架橋の落橋、流出</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>火山噴火時、火山灰による水処理機能の停止、道路被害等による薬品や燃料等の不足・遅れ</li> <li>寒波による管路凍結、破損</li> <li>異物や毒物の投げ込みによる水処理停止</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>圧密沈下による施設や管路の損傷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>塩害による断面欠損、耐力の低下による施設損傷、倒壊</li> <li>河川の濁水や汚染による取水停止</li> </ul>

### 5. 構造解析による危機耐性への対応事例

前述した想定シナリオのうち、日本全国の水道施設で想定される事象として、想定を超える地震動が挙げられる。レベル 2 地震動とは、「当該施設の設置地点において発生すると想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するもの」とされているが、ここでいう最大規模の強さとは、物理的に発生し得る最大の地震動ではなく、高度な工学的判断により起こり得ると考えられる地震動であり、レベル 2 地震動を超える地震動の発生は、過去の地震被害の経験からも可能性がある事象である。

想定外の作用が発生した際に危機的状況を避けるための具体的な方法論として、武田・西村<sup>5)</sup>は、①致命的な破壊の防止、②崩壊様態の制御（コラプスコントロール）、③影響波及の抑制の 3 段階での対応を提案している。致命的な破壊の防止とは、部材が脆的な破壊を避けるため、部材を曲げ破壊先行型とすることなどが挙げられ、従来の耐震設計においても考慮されていた対策である。一方、崩壊様態の制御や影響波及の抑制は、水管橋の落橋防止工など、一部の施設では従前から考慮されている性能だが、個別の耐震設計の中では活発な議論が無かった領域である。

ここでは、破壊様態の制御や影響波及の抑制を目的とし、構造物の損傷過程の確認が可能なプッシュオーバー解析を行った 2 事例を紹介する。なお、本事例では、耐震性能照査を目的とした動的非線形解析と別でプッシュオーバー解析を実施しているが、動的非線形解析で入力地震動を割り増しして損傷を確認する方法も有効と考えられる。

#### (1) 2次元フレーム解析による方法

本事例は、水道施設耐震工法指針<sup>4)</sup>の参考資料 1-7 に掲載されている、RC 造地上式配水池の損傷過程を確認した検討例である。本施設は奥行方向に同一な断面を持つことから、2次元フレームモデルを用いている（表 4、図 5 参照）。

一般的な水道施設では、レベル 2 地震時に限界状態 2（最大耐荷力）を満足することを照査するが、本事例では原子力発電所屋外重要土木構造物耐震性能照査指針<sup>7)</sup>を参考に、安全限界（限界状態 3）の目安とされる層間変形角 1/100 の変位及び、更にその 1.5 倍の変位まで変形させることで、損傷過程や破壊点を確認している。

解析結果より得られた設計震度-変位曲線を図 6 に、代表的な変形図を図 7 に示す。レベル 2 地震時の変形以上に変位を加えると、側壁下端が最初に最大耐荷力を超過し、更に変位が大きくなると、隔壁下端、柱下端の順に最大耐荷力を超過し、

表 4 施設概要・解析条件

項目	内容
構造形式	鉄筋コンクリート構造（土木構造物）
内空寸法	B10.75m×H6.0m×L18.25m×2池（有効容量2000m <sup>3</sup> ）
柱間隔	横方向3@3.75m、奥行方向5@3.75m
地盤・基礎	I 種地盤・直接基礎
解析手法	静的非線形解析（変位増分法）
解析モデル	2次元フレーム

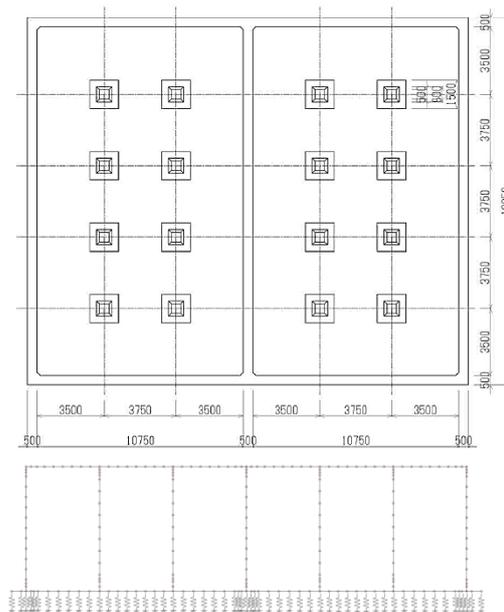


図 5 施設平面図・解析モデル

曲げ破壊による倒壊に至る可能性が高いことが示されている。対策案としては、安全率を 2 程度確保するようにせん断補強筋を多く配置することや、迅速な復旧工事が行えるように、施設周辺に重機が配置可能なスペースを確保することが挙げられる。また、本施設のような施設については、復旧が困難な底版の破壊を避けるなどが有効な対策と考えられる。

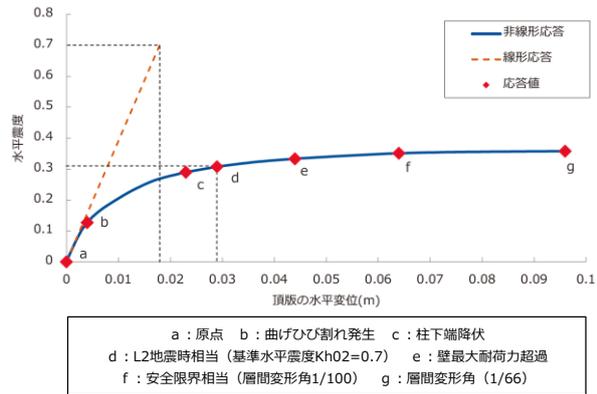


図 6 設計震度－変位曲線

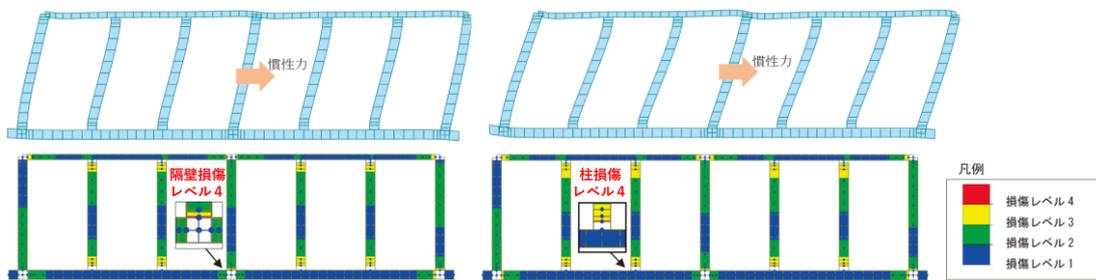


図 7 変形図及び損傷図（左図：f 点 安全限界相当、右図：g 点 安全限界の 1.5 倍）

## (2) 3次元一貫解析による方法

本事例は A 市浄水場の浄水施設（図 8 参照）の損傷過程を確認した事例である。本構造物は構造分類Ⅱ類に属する土木・建築複合構造物であり、梁要素による 3次元一貫解析（静的非線形解析）を用いて、土木部の損傷過程を確認した（表 5 に解析条件等を示す）。

図 9 に解析結果より得られた設計せん断力-変位を示す。本構造物は設計せん断力を超える荷重作用時においても弾性応答に近い応答を示し、塑性変形が進まない結果が得られた。L2 地震動の 4 倍のエネルギー量と等価な状態まで変形させた状態では、管廊・歩廊部の柱が曲げ耐力を超過したが、主要部材の損傷は確認されなかった。これは壁部材の断面が厚く、構造全体の三次元剛性が高いことが理由と考えられる。本構造物のような水平剛性が高い構造物の場合、構造全体での崩壊に至ることが少なく、局所的な損傷となることに留意が必要である。

表 5 施設概要・解析条件

項目	内容
構造形式	鉄筋コンクリート構造（土木建築複合構造物）
床面積	建築面積 約7500m <sup>2</sup> 、延床面積 約19000m <sup>2</sup>
階数	塔屋1階、地下4階
基礎形式	直接基礎
構造分類	Ⅱ類・水槽付建築物
解析手法	静的非線形解析（変位増分法）
解析モデル	3次元フレーム（一貫解析）

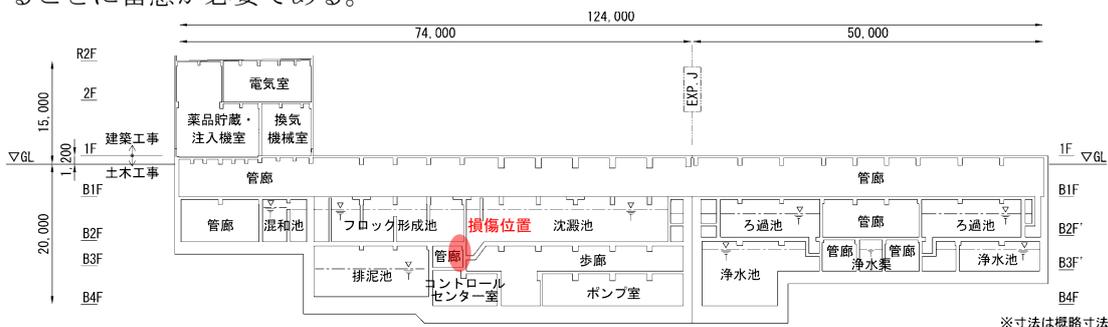


図 8 施設断面図及び損傷位置

浄水施設等では、水槽部の漏水による機器の故障等がシナリオとして想定される。危機耐性への対応としては、水槽部が漏水した場合でも機器に影響が無いようレイアウトに配慮するか、水槽部についてはレベル 2 地震動においても限界状態 1（使用性）を満足するなどの対応が有効と考えられる。

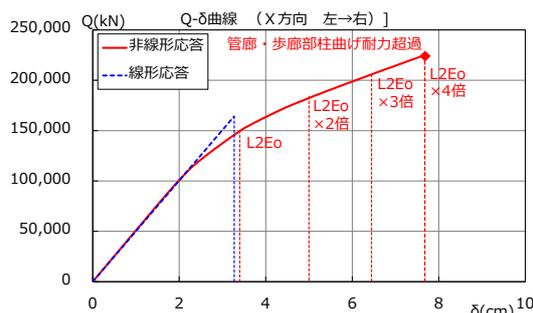


図 9 設計せん断力－変位曲線

### (3) 留意点

- ・ 最大耐荷力を超過した部材の剛性を精度良く解析に反映するのは課題があるため、本事例の解析はあくまで損傷過程の確認を目的としている点に留意が必要である。
- ・ 本事例は損傷過程の解析的なアプローチに着目しているが、実設計においては損傷過程の結果を踏まえて、投資費用を勘案して危機耐性への対応に反映することが重要である。

## 6. おわりに

- ・ 危機耐性の詳細検討については、検討実施の判断指標等が無いことから検討が必要である。また、危機耐性の対策実施についても、発生確率が低い事象ほど費用が高い傾向にあり、費用対効果の可視化が難しいことから、対策実施の判断指標の検討が必要である。
- ・ 本稿では地震に着目した危機耐性への対応例について示したが、風水害や斜面崩壊、津波などの外力に対する危機耐性検討方法について、検討と事例の共有が望まれる。
- ・ 危機耐性に対応した設計では、従来の耐震設計に加えて別途構造物の設計や解析が必要となる場合があり、追加の設計委託費と期間を要する点に留意が必要である。
- ・ 危機耐性の検討及び対策について、更なる事例の蓄積と共有が望まれる。

### 【参考文献】

- 1) 土木学会：土木構造物共通示方書，2016
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012
- 3) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，平成 30 年 5 月
- 4) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版，令和 4 年 6 月
- 5) 武田篤史，西村隆義．橋梁耐震への危機耐性導入に関する一考察．土木学会論文集 A1，Vol.75，No.4，I688-I700，2019
- 6) 土木学会：実務に役立つ耐震設計入門－2022 年改訂版－，2022
- 7) 土木学会原子力：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針 2018 年版，土木学会原子力土木委員会地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会，2018 年 10 月，
- 8) 野津厚，室野剛隆，本山紘希，本田利器．鉄道・港湾構造物の設計指針と「危機耐性」．土木学会論文集 A1，vol.72，No.4，I448-I458，2016