

8章 構造物の耐震性能の照査

8.1 構造物の種類と耐震性能の照査

構造物の耐震性能の照査に当たっては、構造物の種類および設計地震動に応じて、構造物が所用の耐震性能を有していることを確認するものとする。

【解説】

本ガイドラインは、「1章 概説」に述べたように、設計入力地震動に対して構造物に要求される性能を明確にし、その耐震性能を満足するか否かを照査する体系とした。

本ガイドラインでは、耐震設計を行う構造物として、橋梁（基礎構造物を含む）、抗土圧構造物、盛土、地中構造物、ダム、タンク、埋設管および港湾構造物を規定した。しかしながら、これらの構造物における耐震性能の照査は、現時点では同一の方法で行うことができない。したがって、各構造物の種類に応じた適切な方法を用いて行う必要がある。なお、その他の構造物における耐震性能の照査についても、本ガイドラインの趣旨に則って耐震性能の照査をすることが望ましい。

8.2 橋梁等構造物

8.2.1 橋梁等構造物の耐震性能の設定

橋梁等構造物が保有すべき耐震性能は、設計地震動のほか、構造物の損傷が人命に与える影響、避難・救援・救急活動と二次災害防止活動に与える影響、地域の生活機能と経済活動に与える影響、復旧の難易度と工費等を考慮して定めなければならない。

【解説】

橋梁等構造物が保有すべき耐震性能について、土木構造物の耐震設計に関する提言、コンクリート標準示方書耐震設計編に基づいて示したものである。

一般の場合、橋梁等構造物の耐震性能は、以下の3つとしてよい。

- (1)耐震性能Ⅰ：地震後にも機能は健全で、補修をしないで使用可能
- (2)耐震性能Ⅱ：地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない
- (3)耐震性能Ⅲ：地震によって構造物全体が崩壊しない

耐震性能Ⅰは、構造物に対して機能が健全であることを要求することから「耐震設計上の供用性に関する性能」、耐震性能Ⅱは、地震により被災を受けても早期に機能復旧が可能となるような損傷レベルに抑制することを要求することから「耐震設計上の修復性あるいは復旧性に関する性能」、耐震性能Ⅲは、地震による構造物の崩壊による人命への影響を防ぐことを要求することから「耐震設計上の安全性に関する性能」というような概念となっている。また、構造物の機能としても、道路や鉄道、歩道、水道など、その橋梁が支持する構造の機能についても十分考慮の上、耐震性能とこれを達成するための構造物の限界状態を定める必要がある。

橋梁等構造物は、上部構造、支承、橋脚、基礎、地盤といった各種の部材によって構成される構造物であり、上記の性能を満足する限界状態についても構造物の特性によって異なってくる。例えば、一般的な橋梁や高架橋などに対して、上記の耐震性能を満足する限界状態を例示すると以下のようになる。

(1)耐震性能Ⅰ

橋梁等構造物を構成する各部材が補修をしないで使用可能となるレベルの損傷にとどまる状態であり、一般には、弾性限界や応答変位などが限界状態の評価に用いられる。

(2)耐震性能Ⅱ

ある部材には塑性化を許容し、ここでの変形性能によって地震エネルギーを吸収する構造とするが、塑性化の程度が地震後に機能を短期間で回復できるレベルの損傷にとどまる状態である。一般には、塑性ヒンジの塑性化の程度や残留変位などが限界状態の評価に用いられる。

塑性化を許容する部材に関しては、構造物の特性によって各種の組合せが想定されるが、通常は、被害の発見が容易であるとともにその復旧が比較的容易となる部位を選定する。橋梁等構造物の場合は、支承部、橋脚基部、あるいは、基礎に塑性化を想定する場合が多い。

(3)耐震性能Ⅲ

ある部材には塑性化を許容し、ここでの変形性能によって地震エネルギーを吸収する構造とするが、塑性化の程度が、構造物の全体系の崩壊に結びつかないレベルの損傷にとどまる状態である。一般には、塑性ヒンジの塑性化の程度などが限界状態の評価に用いられる。

参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震設計に関する提言（1次，2次，3次），2000.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書耐震設計編，1996.

8.2.2 橋梁等構造物の耐震性能の照査

橋梁等構造物の耐震性能の照査は、設計で想定する地震動に対して所要の耐震性能を確保すること目的として行う。一般に、以下の項目について検討を行えばよい。

- 1) 部材の損傷度
- 2) 構造物の変位・変形

【解説】

本文は耐震性能の照査の基本的な考え方を示したものである。耐震性能の照査で考慮する設計地震動とこれに対する構造物の耐震性能の組合せは一般に次のようにする。

- ①レベル1地震動に対して耐震性能Ⅰを満足する。
- ②レベル2地震動に対して耐震性能Ⅱまたは耐震性能Ⅲを満足する。

その照査法は一般に次に示すように行う。

耐震性能Ⅰに対する照査は、構造物の特性に応じて適切なモデルを用いて地震作用時の応答値を算定し、一般に地震作用時に、材料の設計強度以下であることを照査すればよい。

耐震性能Ⅱに対する照査は、構造物の特性に応じて適切なモデルを用いて地震作用時の応答値を算定し、構造物の応答変位または残留変位が制限値以下であることを照査すればよい。

耐震性能Ⅲに対する照査は、構造物の特性に応じて適切なモデルを用いて地震作用時の応答値を算定し、構造物が崩壊しないことを照査すればよい。

また、具体的な応答計算および照査は次のように考えるとよい。

耐震性能Ⅰについては、一般に構造系は弾性範囲であり、こうした構造物の特性を適切に考慮した解析モデルを用いて応答計算を行うとともに、得られた最大応答値に基づき部材に発生する応力度が設計強度以下であることを照査するものとする。

耐震性能Ⅱについては、一般に塑性化を期待した部材に塑性化が生じている状態であり、その程度が、構造全体としての地震後の機能の回復に影響を及ぼすため、構造物の非線形挙動を適切に考慮した解析モデルを用いて応答計算を行うとともに、得られた非線形応答が、応答変位や残留変位が制限値以下になっていることを照査するものとする。

耐震性能Ⅲについては、一般に塑性化を期待した部材に生じる塑性化の程度が、構造全体として崩壊を防止できるレベルにとどまることが必要とされる。このため、構造物の非線形挙動を適切に考慮した解析モデルを用いて応答計算を行うとともに、得られた非線形応答が構造物全体の崩壊に結びつかないことを照査するものとする。

参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震設計に関する提言（1次，2次，3次），2000.6.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書耐震設計編，1996.

8.3 抗土圧構造物

8.3.1 抗土圧構造物の耐震性能の設定

抗土圧構造物の耐震性能は、構造物の重要度を考慮して壁体の損傷および基礎構造物の安定に関して設定するものとする。また、背面盛土等構造物周辺地盤の安定にも注意する必要がある。

【解説】

抗土圧構造物の耐震性能の照査においては、その耐震性能を明確にしておく必要がある。抗土圧構造物も橋梁と同様躯体、基礎を有するため、耐震性能の設定はその考え方に従うものとする。

橋台の耐震性能を具体的に定めた基準としては、鉄道構造物等設計標準耐震設計¹⁾がある。以下にその考え方に従った耐震性能を示す。

橋台の耐震性能の指標は以下の3つである。なお、解説表 8.3.1-1 に抗土圧構造物の耐震性能と損傷レベルの制限値を示す。

- ① 基礎の安定レベル（地盤または部材）
- ② く体の損傷レベル
- ③ 残留変位（最大変位）

解説表 8.3.1-1 橋台の耐震性能の制限値

設計地震		L 1		L 2	
		I		II	
耐震性能		I		II	
基礎の損傷	基礎型式	直	杭	直	杭
	地盤	1	2	3	3
	部材	1	2	2	3
く体の損傷		1	2	3	3
残留変位		1	2	3	3

表中：直は直接基礎，杭は杭基礎

ここで、耐震性能の基本的考え方は以下の通りである。

- 耐震性能Ⅰはすべて弾性範囲内
- 耐震性能Ⅱは基礎の損傷レベルは応答塑性率の制限値以内、躯体の損傷レベルについては最大耐力内とする。
- 耐震性能Ⅲは基礎の損傷レベルは応答塑性率の制限値以内、躯体の損傷レベルについては再利用可能な程度の損傷

また、基礎の安定レベルについては解説表 8.3.1-2 に示す塑性率の制限値を満足するものとする。

解説表 8.3.1-2 基礎の塑性率の制限値

基礎の安定レベル	基礎の塑性率の制限値
安定レベル 1	1
安定レベル 2	2.5
安定レベル 3	4

ここで、抗土圧構造物基礎の塑性率の制限値は、通常の橋脚基礎に比して厳しく設定した。これは、

- ① 橋台は通常の橋脚に比して一方向への累積変形により厳しい状態になることが予想される。
 - ② 地震後も背面土からの土圧に対して抵抗する必要がある
- 等、転倒に対して通常の橋脚よりも厳しい条件になることを考慮したためである。

参考文献

- 1) (財)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，1999。

8.3.2 抗土圧構造物の耐震性能の照査

抗土圧構造物の耐震性能は、次について照査するものとする。

- (1) 壁体の損傷
- (2) 基礎構造物の安定
- (3) 背面盛土等構造物周辺地盤の安定

【解説】

(1)について

壁体の損傷に関する照査は、「6.2 部材の損傷レベルの照査」および部材の材料種別に応じて「6.3 鉄筋コンクリート部材」，「6.4 プレストレストコンクリート部材」，「6.5 鉄骨鉄筋コンクリート部材」，「6.6 コンクリート充填鋼管部材」，「6.7 鋼部材」に基づいて行うものとする。

(2)について

抗土圧構造物の基礎の安定レベルに関する照査は、「8.2 橋梁等構造物」に基づいて行うものとする。

(3)について

軟弱な地盤に構築される抗土圧構造物は、背後地盤の重量による基底破壊や側方移動が生じることがある。また、斜面上における抗土圧構造物には、一般的に斜面安定上の問題がある。したがって、このような場合には構造物の周辺地盤の安定に関する照査が必要となり、

- 1) 基底破壊に関する検討
- 2) 側方移動に関する検討
- 3) 斜面の安定に関する検討

について検討を行うものとする。

8.4 盛土

8.4.1 盛土の耐震性能の設定

盛土の耐震性能は、その重要度を考慮し、安定および変形に関して設定するものとする。

【解説】

盛土は従来復旧しやすいこと等を勘案して、重要な盛土を除き耐震設計は行われていなかったが、道路や鉄道の場合盛土が地震被害を受けた場合にシステム全体の機能におよぼす影響の度合い等を勘案すると、地盤条件や構造物の重要度、復旧の難易度などによっては耐震設計を行う必要がある。

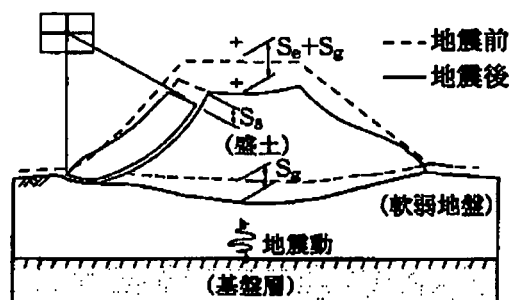
その場合、耐震性能の設定が必要となるが、これまで耐震設計手法が確立していたとは言い難い盛土において耐震性能を設定するのは難しいが、現在のところ耐震性能を表す指標としてその特性から安定および変形がよいと考えられる。そこで、その変形を指標として盛土の損傷程度を表すレベルを変形レベルと呼ぶこととする。

本ガイドライン「1.6 耐震設計の原則」に従うと、盛土に要求される耐震性能と変形レベルの対応は解説表 8.4.1-1 のようになる。

解説表 8.4.1-1 盛土の耐震性能と変形レベル

盛土の耐震性能	耐震性能 I	耐震性能 II	耐震性能 III
盛土の変形レベル	変形レベル 1	変形レベル 2	変形レベル 3

この変形のレベルは、盛土上面における変位量で規定するのがよい。変形を生じさせる要因を具体的に述べたものとして、鉄道構造物等設計標準・耐震設計¹⁾があげられる。解説図 8.4.1-1 にその地震時における盛土の変形のイメージを示す。



<盛土の沈下の模式図>

$$S_T = S_s + S_e + S_g < S_a$$

ここに、 S_s ：すべり土塊の滑動による沈下

S_e ：盛土体の揺すり込み沈下

S_g ：地盤の揺すり込み沈下

S_a ：許容沈下量

解説図 8.4.1-1 盛土の変形イメージ

盛土の地震時変形量は、「7.7.4 ニューマーク法」で計算される円弧すべりによる滑動変形量の他に、盛土や地盤の揺すり込み沈下量や、軟弱地盤の流動化による変形量などによって算出される。しかしこの計算方法は、地盤や盛土の不均質性などの不確実性を勘案すると、現在の技術レベルでは変形量や破壊の予測を必ずしも正確に行えるわけではない。したがって、変形レベルを定めるための目安で

あって、算出された変形量そのものには不確実性が含まれていることを認識しておく必要がある。

耐震設計を行うためには変形レベルの具体的な値を設定する必要があるが、例えば先に述べた鉄道構造物等設計標準耐震設計では解説表 8.4.1-2 によってなっている。これは変形からみた盛土の損傷レベルの分類と、それに対応した補修方法を示したものである。ここで示す変形のレベルは、盛土の損傷程度を定義し分類する指標であり、破壊降伏強度が低い盛土やじん性の低い盛土を見つけだすために用いる。

解説表 8.4.1-2 変形レベルと補修工法のイメージ

	変形のレベル	補修工法のイメージ
変形レベル 1	すべり破壊が生ぜず、ほとんど残留変形が生じない損傷 (円弧すべり計算で 1.0 以上の所要の安全率を確保)	無補修 (必要に応じて軌道整備)
変形レベル 2	すべり破壊は生じるが、それに伴う残留変形は小さい軽微な損傷 (円弧すべり計算では 1.0 以上の所要の安全率を確保することは困難であるが、計算される残留変形量が小さい状態)	バラストの補充やのり面再転圧、施工基面の部分的な拡幅などの軽微な補修
変形レベル 3	盛土体や地盤の残留変形が大きく、部分的に盛土の再構築が必要となる損傷 (計算される残留変形量は大きい破壊的な破壊にはいたらない状態)	のり表面や路盤面を部分的に撤去し、盛土や軌道を再構築する。
変形レベル 4	地盤の流動などによって壊滅的に盛土が破壊し、全面的に再構築が必要となる損傷 (計算される残留変形量が極めて大きく、壊滅的な破壊に至る状態)	盛土を全面的に撤去し、全面的に再構築する。

参考文献

- (財) 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，1999

8.4.2 盛土の耐震性能の照査

盛土の耐震性能の照査は安定および変形について照査するものとする。

【解説】

盛土の耐震性能の照査は「8.4.1 耐震性能の設定」で示したように安定および変形についておこなう。次にその方法について示す。

(1) 安定の照査法 (変形レベル 1 の照査法)

安定については「7.7.4 ニューマーク法」に示した地震時円弧すべり安定計算法により算出した安全率 F_s が、所用の安全率以上であることを照査する。

所用の安全率は例えば前出の「鉄道構造物等設計標準耐震設計」では解説表 8.4.2-1 の値が示されている。表中で、安定計算に用いる設計水平震度 K_h を動的応答計算から設定した場合は、一義的に設計震度を定めた場合に比べて入力に対する不確実性が解消されるため、所要の安全率を若干低減した。

また、張りブロックや格子枠工など構造物系ののり面工を用いた場合は、変形が生じた際の追従性に乏しいため、極力変形が生じないように所要の安全率を表中の()内に示すように多少向上して設定した。

設計断面に対して、L1地震動に対する安定計算を行った結果、植生の場合と異なり、所要の安全率が得られない場合でも、変形量が極めて小さく、許容できる範囲であればよいとする考え方もあるので、耐震補強工の採否にあたっては、それらを総合的に判断した上で決定すべきである。

解説表 8.4.2-1 応答値の設定方法と所要安全率(レベル1地震時)

設計震度の設定方法	設計水平震度 K_h	所要の安全率 F_a
地震応答計算などでPGAを求めて算出した場合	$K_h = k_{eq} \cdot PGA / G$ ここに、 $k_{eq}=1, G=980\text{gal}$	0 (1.1)
一義的に定めた設計震度を用いる場合	$K_h = \nu a \cdot Kh = 0.20 \nu a$ ここに、 νa : 地域別係数	1.1 (1.2)

記事：()内は構造物系ののり面工を用いた場合の所要安全率
 k_{eq} : 想定最大地表面加速度 (gal)

(2) 変形性能の照査法 (変形レベル2以上の照査法)

変形レベル2以上については「7.7.4 ニューマーク法」によって算定される盛土上面での地震時沈下量が沈下量の制限値以内であることを照査する。ここで、変形量の制限値は、地震の規模や構造物の特性、使用条件、復旧に要する時間などを総合的に判定して定められるものである。盛土の場合には、RC など他構造物と比べると破壊に至るまでの変形量が大きく、破壊した場合でも復旧が容易であるため、許容される変形量は大きいと考えられる。

その具体的な例として、「鉄道構造物等設計標準耐震設計」の値を解説表 8.4.1-4, 8.4.1-5 に示す。

これは、既往の震害事例を参考に、地震時沈下量と災害復旧の程度を示したものである。一般的には、L1地震時で変形レベル1～2、L2地震時で変形レベル2～3に設定することが目安となるが、計算精度や復旧の難易度、社会的重要性などを勘案して、適宜定めるものとする。

しかし、この方法では、地震動や許容沈下量の設定如何では、全線にわたり耐震補強を行わなければならない場合も起こりうるが、現実的では無くなる。一方、盛土は、他構造物に比べて強度のバラツキが大きく計算精度も劣るため、許容変形量を一義的に定めてその絶対値と計算された変形量の絶対値を厳密に照査する意義は小さく、むしろ多くの断面において変形量を相対的に比較し、耐震性の低い盛土を抽出する方が重要であると思われる。この場合には、計算された盛土の地震時変形量は、線路延長方向に条件が異なる盛土断面の耐震性を相対的に評価する上での指標と捉えていることになる。

解説表 8.4.1-4 盛土の被害程度と沈下量の目安

変形レベル	被害程度	沈下量の目安
1	無被害	無被害
2	軽微な被害	沈下量 20cm 未満
3	応急処置で復旧が可能な被害	沈下量 20cm 以上 50cm 未満
4	復旧に長期間を有する被害	沈下量 50cm 以上

解説表 8.4.1-5 橋台部の被害程度と沈下量の目安

変形レベル	被害程度	沈下量の目安
1	無被害	無被害
2	軽微な被害	橋台背面の沈下差 10cm 未満
3	応急処置で復旧が可能な被害	沈下差 10cm 以上 30cm 未満
4	復旧に長期間を有する被害	沈下差 30cm 以上

8.5 地中構造物

8.5.1 地中構造物の耐震性能の設定

想定する地震動レベルに対する地中構造物の耐震性能の照査は、構造物の重要度とともに、その用途や設置条件および構造特性などを、総合的な観点より考慮した、具体的な評価指標の規定によるものとする。

【解説】

地中構造物の耐震性能の照査においても、これに先立ち、その耐震性能を明確に設定しておくことが必要である。想定する地震動および重要度に応じた構造物の耐震性能は、地中構造物においても、第1章に規定した区分したがい、

耐震性能Ⅰ：無被害

耐震性能Ⅱ：構造物としての機能を維持しているが補修が必要な状態

耐震性能Ⅲ：崩壊または完全な崩壊ではないが構造物の機能が喪失している状態

と設定することとし、レベル1地震動時においては耐震性能Ⅰを、また、レベル2地震動時においては、重要度の高いものについては耐震性能Ⅱを、その他の構造物については耐震性能Ⅲを、それぞれ確保することが基本となる。しかしながら、実際に照査を行う場合には、各構造物に要求される上記耐震性能を担保しうる具体的な評価指標を、その諸条件を鑑みて規定しておくことが重要となる。

一般に、地中構造物として定義される構造物を用途種別ごとに分類すると、道路トンネルおよびその付帯構造物、駅部を含む鉄道トンネル、上下水道や電力通信設備などのライフライン施設や、これらを統合して収容する共同溝、地下駐車場や地下貯留施設および地下河川など、多種多様なものとなる。このため、それぞれの構造物に要求される具体的な耐震性能も、これら構造物の機能に応じて自ずと異なる。例えば、道路トンネルや鉄道トンネルでは、耐震性能Ⅱを満たす、すなわち地震後の機能確保のためには、構造物が損傷後に保有する耐力のみならず、内空断面や走行性が必要程度確保されていることが重要である。したがって、このような構造物については、部材の損傷レベルとともに、構造物およびそのジョイント部における段差の発生等も含めた残留変位に対する評価が必要となる。これに対して共同溝では、構造物に大きな損傷が生じて、崩壊等が回避され、内部に設置されている施設に対する影響が小さければ、その機能は当面確保されることとなるため、耐震性能ⅡとⅢは比較的類似した状態となると考えられる。さらには、例えば上下水道管路や地下河川など、機能確保のためには止水性や水密性の確保が重要である構造物もある。このうち止水性に関しては、周辺地盤の透水性が高く、地下水圧が大きい条件か否かなどの設置条件も重要な判断基準となる。すなわち、特に耐震性能Ⅱを対象とした地中構造物の耐震性能照査に際しては、このような対象構造物の用途や諸条件を鑑み、想定した機能を確保するために必要な指標を具体的に規定しておく必要がある。

一方、地中構造物は、基礎構造物と同様に地盤内に設置されるため、一般に、地震後における損傷の発見や補修補強が困難となることにも留意が必要である。例えば、河川横断部や海底部、または、地盤に接する部材、その周辺に密に設備が配置されており補修補強に要するスペースが確保できない部材などでは、損傷が生じた場合の復旧や補修補強の難易度が高いと判断されるため、このような条

件を照査に適切に反映させるべく、耐震性能を通常のものよりも厳しく設定することが必要となる。逆に復旧が容易な構造物や、ネットワークとしての整備がされており損傷が生じた場合においてもシステムとしての代替性がある構造物については、一律に高い耐震性能を要求することが合理的ではない場合もある。また、損傷の発見が困難なことに起因して、地震直後、もしくは、復旧完了までの期間に二次的な災害が発生することが懸念される場合には、これを防止することに配慮した指標の規定が必要となる。

さらに、その構造形式が施工法ごとに異なることも、地中構造物の大きな特徴である。例えば、開削工法による RC 構造を主体とするもの、シールド工法によるもの、非開削工法やプレキャスト構造など施工上の優位性より決定され特殊な構造となるものなど、地中構造物は施工法に応じて種々の構造形式となっている。そこで、これら構造形式の特性を考慮した照査指標の設定が必要となる。例えば、シールドトンネルは、セグメントと継手、および、場合によっては二次覆工より構成される複雑な構造形式であり、地震時においては、特に継手部の損傷が支配的となる。したがって、このような構造物の耐震性能においては、セグメント本体や継手を構成する各部材、および、二次覆工など、単独部材の損傷レベルとともに、継手の目開き量など、一体として評価すべき部材における損傷レベルにも着目しておく必要がある。

そこでここでは、構造物の機能確保における必要条件や、これが満足されない場合に生じる機能阻害、および、これを復旧するために必要とされる対策など、対象構造物の特性を総合的な観点より十分考慮したうえで、具体的な評価指標を規定し、想定する地震動レベルや重要度に応じた地中構造物の耐震性能の照査を行うこととした。

なお、これら地中構造物のうち、地下タンク、埋設管については、それぞれ特徴的な設計法が体系化されているので、後節の規定を参考にされたい。

8.5.2 地中構造物の耐震性能の照査

- (1) 地中構造物の耐震性能の照査に先立ち、構造物に影響を及ぼす地盤変状の有無や程度を適切に評価するものとする。
- (2) 地中構造物の耐震性能の照査は、「8.5.1 地中構造物における耐震性能の設定」で規定した耐震性能に関する具体的な指標を評価しうる適切な手法を用い、必要に応じて以下の観点に着目して行うものとする。
 - ①部材の損傷レベル
 - ②構造物全体の損傷レベル

【解説】

(1)について

地中構造物は、地盤により支持されている構造物であるため、その地震時安定性は、周辺地盤の安定性、すなわち、構造物に影響を及ぼす地盤変状の有無や程度に大きく依存することとなる。また、照査を行う際に実施する応答値の算定方法も、このような事象発生の有無に応じて異なるものを用いる必要がある。そこでここでは、地中構造物の耐震性能の照査に先立ち、このような地盤変状の発生の有無や程度を評価検討することとした。

地中構造物に影響を及ぼす地盤変状としては、

- ①液状化による浮上り
- ②液状化後の再圧密による沈下
- ③液状化に伴う側方流動
- ④斜面等の地滑り
- ⑤断層変位

などが挙げられる。

このうち、レベル2地震動時における液状化の発生が予想される場合については、レベル1地震動時のように対策工により発生を防止することが合理的ではない場合もある。したがって、これに起因する浮き上がりや沈下、および、側方流動に対する照査においては、発生の有無の判定のみならず、発生した場合の浮き上り量や沈下量、および、流動量を定量的に評価し、これを構造物の照査に反映させることが望ましい。

同様に、地滑りや断層変位に関しても、その発生位置や変位量の定量的な評価に基づく照査を行うことが望ましいが、これらについては、十分な精度で予測できない、もしくは、十分な技術的対策を施すことが困難であることが多いのが現状である。そのような場合には、拡幅やダブルルート化などのシステムとしての対応や、復旧期間短縮のためのソフト的対応に関する照査を行い、その影響を評価してもよい。

(2)について

地中構造物の耐震性能の照査は、(1)に示した地盤変状に関する検討結果を踏まえたうえで、「7章 構造物の応答値の算定」に示した方法を適切に選択し、必要に応じて以下の点に着目して行うこととする。

①部材の損傷レベル

②構造物全体の損傷レベル

現状では、地中構造物の耐震性能の照査は、部材の損傷レベルのみに着目して行うことが一般的である。このような部材の損傷レベルについては、「6章 部材の評価」に基づき、使用する部材種別に応じて照査することとなる。ただし、前項で示したように、具体的な照査項目は、応答塑性率などを指標とした部材の耐力評価のみならず、その損傷レベルに応じた目開き量や貫通びわれ幅などのように要求される耐震性能に応じた評価や、シールドトンネルの継手のように構造形式を考慮した評価を行うことが必要となる。

また、地中構造物は地盤に支持される高次不静定の構造物であるため、部材レベルの許容損傷状態が構造系全体の力学的な許容損傷状態と対応しているとは考えにくい。したがって、要求される耐震性能によっては、例えば、構造物全体の応答損傷状態における残存耐力や、地震後の残留変形など、構造物全体に着目した応答損傷レベルに対する照査が必要となる場合もある。

なお、部材の損傷レベルに着目した照査を行うことにより、構造物全体の損傷レベルが経済合理性のもとで自動的に保証されると考えられる場合は、要求性能によらず、後者の照査は省略してもよい。また、構造物全体の損傷レベルに着目した照査を行うことにより要求性能を保証する場合は、部材損傷レベルの照査を省略することが可能な場合もある。

また、システム全体としての機能が重要な場合は、これに着目した損傷レベルの照査を行う場合もある。その際には、将来における整備状況も鑑み、総合的な観点より行う必要がある。特に、地滑りの発生が懸念される箇所や断層部を通過する線状地中構造物において、構造物の寸法以上の変位が想定される場合など、現段階では技術的に対応困難な場合に関する照査については、システム全体としての耐震性能を照査しておくのがよい。

8.6 ダム

8.6.1 ダムの耐震性能の設定

ダムの機能としては、水を貯える貯水機能、水を利用するための取水機能、洪水調節のための放流機能などがある。したがって、ダムの耐震性能については、想定される地震動に対して、これらの機能が保持されるように設定する必要がある。

【解説】

ダムは地震時安全性に対する社会的要求度は、自然条件や社会条件などの状況に応じて変化するものと考えられる。環太平洋地震帯の中でも複数のプレートが複雑に交錯するエリアに位置し、国土が狭い上に可住地面積が少なく、河川流域の土地利用が高密度に進んでいる我が国においては、万が一、ダムが地震によって決壊した場合には、その下流域において重大な二次災害が派生する潜在的危険性が高い。そのため、ダムは、地震時安全性に対する社会的要求度が非常に高い土木構造物であると位置付けられる。

ダムの機能としては、貯水機能を基本として、取水・利水機能、洪水調節・放流機能等がある。そのため、ダムの耐震性能に関しては、ダム堤体および基礎岩盤のように、ダム本体の地震時安全性に直接的に関連する事項のみならず、洪水吐や取水塔などの附属設備の安全性およびダム全体としての使用性能も含めて、総合的に設定することが必要である。ここでは、ダムの耐震性能について、ダムに要求される最も基本的な機能である、貯水機能が保持されることに着目して、つぎの2つの耐震性能を設定する。

- ① 耐震性能Ⅰ：地震によって構造的な損傷が生じないこと。
- ② 耐震性能Ⅱ：地震によって構造的な損傷が生じた場合でも、構造的な損傷が修復可能であり、ダムの貯水機能が保持されること（具体的な要件としては、解説表 8.6.1-1 に例示）

レベル1地震動に対しては、耐震性能Ⅰを、レベル2地震動に対しては、地震時の堤体および基礎岩盤の損傷過程や損傷様式を考慮した上で耐震性能Ⅱを満足するものとする。

なお、わが国においては、第四紀断層が存在しないことがダムサイト選定条件のひとつとなっているため、断層変位に伴う構造的な損傷は考慮していない。

解説表 8.6.1-1 耐震性能Ⅱに関してダムの貯水機能が保持されるための要件

ダムの種類	要件
コンクリートダム	<ul style="list-style-type: none">・ダムが、転倒・滑動しないこと。・堤体および基礎岩盤に貫通クラックが生じないこと。・ダムが、決壊に至らないこと。
フィルダム	<ul style="list-style-type: none">・遮水壁および基礎岩盤に貫通するクラックが生じないこと。・貯水が、堤体を越流しないこと。・ダムが、決壊に至らないこと。

8.6.2 ダムの耐震性能の照査

ダムの耐震性能の照査は、築堤材料および基礎岩盤の物性、堤体および基礎岩盤における構造的損傷の発生の有無、損傷過程や損傷様式等を評価し得る手法を用いて行なうものとする。

【解説】

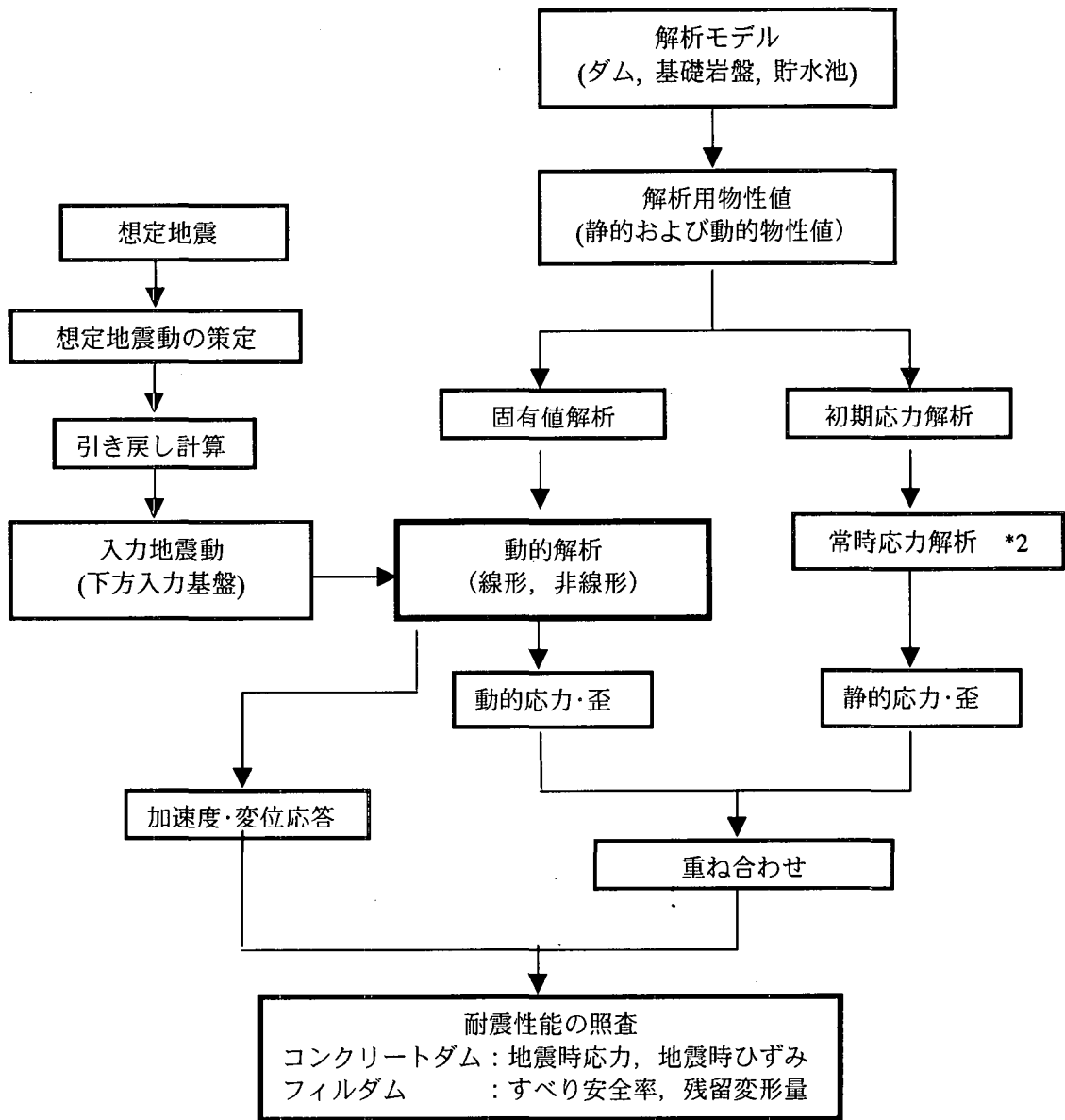
ダムは、その築堤材料により、コンクリートダム（重力式コンクリートダム、アーチ式コンクリートダム等）とフィルダム（ロックフィルダム、アースフィルダム等）に大別されるが、両者の構造特性は大きく異なり、地震時の挙動、損傷過程や損傷様式、損傷発生の判定方法も異ってくる。そのため、ダムの耐震性能の照査は、コンクリートダムとフィルダムとに分けて考える必要がある。

現在、我が国では、ダムの耐震設計は、河川法に基づいて制定された、河川管理施設等構造令及び同施行規則(1976年制定)に準拠して行われているが、兵庫県南部地震を契機に、動的解析による既設ダムの耐震性の再評価が行われるようになっている。

コンクリートダムに関する耐震性能Ⅰについては、静的解析や動的解析によって、ダム堤体に発生する地震時応力が所定の地震時強度を越えないこと、および、ダムの基礎岩盤が地震時応力に対して

安定であることに着目して、地震による構造的な損傷が発生しないことを照査することができる。フィルダムに関する耐震性能Ⅰについては、静的解析や動的解析によって、堤体や基礎岩盤にすべり破壊や重大な構造的損傷を及ぼす残留変形が発生しないことに着目して照査することができる。

耐震性能Ⅱの照査に関しては、コンクリートダムに関しては、クラックの発生やその進展を精度良く評価できる動的解析手法が有効であり、フィルダムに関しては、塑性変形や残留変形を精度良く評価できる動的解析手法が有効であるが、これらの解析評価技術については、今後とも、高度化を進めて行く必要がある。



【備考】 *1：フィルダムにおいては、盛立解析、湛水解析が必要
*2：コンクリートダムにおいては、温度応力解析が必要

解説図 8.6.2-1 ダムの耐震性能照査の基本的なフロー

【参考情報】

1999年に発生した台湾集集地震では、ダムの直下を通る断層の変位によって、石岡ダムが決壊した。この事例によって、断層の変位に対する地震時安全性の重要性が改めて認識されている。古くは、1906

年のサンフランシスコ地震において、断層直上に位置したダム地震被害が報告されているおり、海外では、今を遡ること約 60 以上も昔に断層の変位に対する耐震対策が実施された事例が報告されている。今後の参考のために、これらの事例の概要を付表 8.6.2-1 に示す。

付表 8.6.2-1 1906 年サンフランシスコ地震における既設ダムでの断層変位の実測事例

ダム名	所在国	ダム形式	堤高	建設年	断層の概要	断層変位の実測値
Old San Andreas	USA カリフォルニア	アースフィルダム	8.5m	1875 以前	San Andreas 断層直上 サンフランシスコ地震 (1906 年 M8.3)	水平変位: 2.1m
Upper Crystal Springs	USA カリフォルニア	アースフィルダム	23m	1878	San Andreas 断層直上 サンフランシスコ地震 (1906 年 M8.3)	水平変位: 2.4m 縦クラック: 幅 0.15m, 深さ 1.2m
Upper Howell	USA カリフォルニア	アースフィルダム	11m	1878	San Andreas 断層直上 サンフランシスコ地震 (1906 年 M8.3)	基礎にクラックが発生 クラックは堤体にも連続
Lower Howell	USA カリフォルニア	アースフィルダム	12m	1877	San Andreas 断層直上 サンフランシスコ地震 (1906 年 M8.3)	断層変位により放水管 (φ 25cm) が破壊

付表 8.6.2-2 海外における断層直上に建設されたダムの耐震対策事例

ダム名	所在国	ダム形式	堤高	建設年	断層の概要	耐震対策
Coyote 1), 6)	USA カリフォルニア	ゲート型 アースフィルダム 農業用水	43m	1936	Calaveras 断層の分岐断層 の直上に位置 予測変位量: 水平 4.5m 鉛直 1.2~1.5m, 開口 0.3m	中央部のアースコアを著しく 厚く設計。コアの外側を砂礫 (3~27m 厚) で覆う設計。 1936 年当時に建設前に耐震 対策を実施。
Morris 1)	USA カリフォルニア	コンクリート 重力式ダム 都市用水	99m	1934	San Andreas 断層と Sierra Madre 断層の中間部に位置 ダムサイトで微小地震発生	断層の直上部に特殊ジョイント を配置 (0.9m の走向方向変位 に対応できる設計)
Palmdale 1)	USA カリフォルニア	アースフィルダム 都市用水 農業用水	9.6m (旧) 15.3m (新)	1891 1967 (改修)	San Andreas 断層直上 1955 年に安全再評価 予測横ずれ: 6.1m 以上 予測鉛直変位: 0.6~0.9m	横ずれ 9m, 鉛直変位 1.5m に 対応できるように, センター コアを厚くした。トランジシ ョンゾーンには粘着性のない 砂礫を使用。
Cedar Springs 1), 6)	USA カリフォルニア	ロックフィルダム 都市用水 農業用水	76m 原設計 102m	1972	San Andreas 断層より 8km の場所に分布 予測垂直変位: 0.9~1.5m	ダム高を極力低くした。コア に特別に細粒の粘土を用いて 遮水性と耐侵食性を改善。
Auburn 5)	USA カリフォルニア	アースダム 設計段階	213m	未解決	Bear Mountain 断層 予測変位量: 0.9m (USGS)	ダム形式を問わず, 次の要件 を州当局が決定。①M6.5 の直 下地震に耐える。②基礎岩盤 に 0.13m の変位が生じても安 全性が確保される。
Los Angeles 1)	USA カリフォルニア	ゲート型 フィルダム	39.6m	1977	San Fernando 断層の活動に 伴い断層がダム基礎に生じ ると予測。予測垂直変位量: 最 大 2.7m。1.4m の急激な変位 を想定	粘着力を全く持たない鉛直ド レン層により, 変位追従を可能 とした対策工を実施
Clyde 2)	ニュージー ランド	コンクリート 重力式ダム 発電	102m	1989	Dunstan 断層 (左横ずれ断層) 許容最大水平変位: 2m 許容最大鉛直変位: 1m	堤体に特殊ジョイントを採用 (スリップジョイント)
Steno 9)	ギリシャ	アースダム	185m	計画中	Steno 断層 最大数十 cm の変位を予測 50km 以内で M6.5 の地震	堤体に特殊ジョイント (鉛直および水平) 最大 1m のズレに対応可能

参考文献

- 1) Leps T. M. : The Influence of Possible Fault Offsets on Dam Design, Water Power & Dam Construction, pp36~43, April, 1989
- 2) Hatton J.W., J.C. Black, P.F. Foster : New Zealand's Clyde Power Station, Water Power & Dam Construction, pp15~20, December, 1987
- 3) Harpster R. E., : Selected Clay used as Core for a Rock-fill Dam designed to cross a Potentially Active Fault, Clay Fills, Institution of Civil Engineers, London, pp119~125, 1978
- 4) Seed H.B., F.I. Makdisi, P.D. Alba : Performance of Earth Dams During Earthquake, ASCE GT7, pp967~994, July 1978
- 5) Bennett J.H. : Crustal Movement on the Foothills Fault System near Auburn, California California Geology pp177~182, August 1978
- 6) Sherard J.L., L. S. Cluff, C.R. Allen : Potentially Active Faults in Dam Foundations, Geo-technique 24, No. 3, pp367~428, 1974
- 7) Ambraseys N.N. : On the Seismic Behavior of Earth Dams, pp331~356, Louderback G.D. : Characteristics of Active Faults in the Central Coast Ranges of California, with
- 8) Application to the Safety of Dams, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.27 No.1 pp1~27, January 1937
- 9) 中村康夫 : ダム基礎地盤における断層変位(その2) - 断層変位に対するダムの設計例 -, 応用地質 Vol.32, No.1, pp19~27, 1991. 4
- 10) 中村康夫 : ダム基礎地盤における断層変位(その1) - ダム近傍の断層変位例 -, 応用地質 Vol.31, No.4, pp37~45, 1990. 12
- 11) 阿部勝征, 岡田篤正, 垣見俊弘 : 地震と活断層, アイ・エス・ユー株式会社, 1985, 建設省河川局開発課 : ダム建設における第四紀断層の調査と対応に関する指針(案), 昭和 59 年 5 月
- 12) 菅原捷 : ダムにおける断層の諸問題, 応用地質 Vol.22, No.1, pp160~169, 1981. 4
- 13) 磯崎義正 : ダムと活断層, 水と土, 第 43 号 pp54~64, 1980

8.7 地下タンク

8.7.1 地下タンクの耐震性能の設定

地下タンクには、貯蔵される内容物の種類に応じて、所定の安全性と使用性が求められる。地下タンクの側壁などの土木構造物の耐震性能はこれらの要求性能を満足するように設定する。

【解説】

(1)について

本節では鉄筋コンクリート製躯体で構成されるLNG地下タンクを対象として、耐震性能の設定と照査の基本を示す。LNG地下タンクは、火力発電燃料、都市ガス原料等として用いられる液化天然ガス（以下、「LNG」と呼ぶ）を貯蔵するための構造物である。可燃性のLNGを大量に貯蔵するLNG地下タンクについては、高水準の安全性が求められる。また、所定の容量のLNGを安定して運用できる使用性が求められる。

地震作用時及び地震後においてLNG地下タンクに要求されるこれらの性能は、耐震性能の水準に応じて解説表 8.7.1-1 のように段階的に与えられる。

解説表 8.7.1-1 地震時に確保すべき地下タンクの要求性能¹⁾

性能設定の分類	性能の水準		
	耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ	耐震性能Ⅲ
安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・基地内外の人身と設備の安全を損なわない ・基地内外の日常活動が制約されるような危険を生じない 	<ul style="list-style-type: none"> ・基地内外の人身と設備の安全を損なわない ・基地外の日常活動が制約されるような危険を生じない 	<ul style="list-style-type: none"> ・基地外の人身安全を損なわない ・基地内の人身安全に重大な影響を与えない（人命保護） ・基地外の日常活動が長期に制限されるような直接的な危険を生じない
使用性 [LNG基地機能への影響]	<ul style="list-style-type: none"> ・発電・ガス製造機能に支障を与えない [・液の受入れ, 貯蔵供給に支障なし] ・耐久性の低下は, 軽微である. 	<ul style="list-style-type: none"> ・発電・ガス製造機能に重大な支障を与えない（短期間で機能復旧） [・短期間の対策後, 通常受入れ, 供給開始可能. 補強は不要. ・継続的に貯液可能 ・気化ガス量の増加は許容内] ・耐久性の著しい低下はない 	<ul style="list-style-type: none"> ・発電・ガス製造機能への支障は除去することが可能 [・補強により再利用も可能 ・当面の貯液は可能]

解説表 8.7.1-1 で示された地下タンク躯体の要求性能を満足するための、地下タンクの目標性能は、耐震性能の水準に応じて耐荷性能（変形性能）と止水性能に集約できる。その結果を解説表 8.7.1-2 に示す。地下の貯液空間は鉄筋コンクリート製躯体によって構造的に保持され、その内側は保冷の断熱材と貯液のためのメンブレン（薄肉の金属膜）が取り付けられている。要求性能から耐荷性能（変形性能）及び止水性能を設定する過程の考え方は文献¹⁾に記述されている。止水性能については、タンク躯体が弾性範囲内であることを限界値とした場合は十分に目標性能を満足しているため照査を省略できる。また、周辺地下水位を低下させる等の止水対策を施し、躯体に止水性能を求めない場合には止水性能の照査を省略できる。

解説表 8.7.1-2 LNG 地下タンク躯体の耐震性能¹⁾

性能設定の分類	耐震性能Ⅰ (健全)	耐震性能Ⅱ (機能維持)	耐震性能Ⅲ (崩壊せず)
耐荷性能 (変形性能)	○地震作用時および地震後の躯体の変位・変形は次の条件を満たす程度に十分小さい ・貯液容量（躯体内空容積）の変化は微小（実用上無視し得る程度） ・メンブレン・屋根の液密・気密性能の低下なし ○地震後の躯体の耐力低下はない	○地震後の躯体の変位・変形は次の条件を満たす程度である。 ・貯液容量（躯体内空容積）の変化は一定の許容量以下 ・メンブレンの液密・気密性能および屋根の気密性能の低下は一定の許容量（継続使用が可能な範囲）以下 ○地震後の躯体の耐力低下はない	○地震後の躯体の変位・変形は次の条件を満たす程度である。 ・貯液容量（躯体内空容積）の変化はLNGが流出しない程度以下 ・地震後の作用荷重によって躯体の変位・変形が進行しない ・メンブレンの液密性能は著しく低下しない（構内の保安設備により安全性確保が可能） ・屋根の気密性能は著しく低下しない（構内の保安設備により安全性確保が可能）
止水性能	○地震後の周辺地下水の躯体内浸透は次の条件を満たす程度に十分小さい ・躯体内外の水位の運用条件と、それを維持する地下水管理システムの条件また凍結温度線の運用条件のもとで、躯体内面に接する保冷層の断熱性能は低下しない	○地震後の周辺地下水の躯体内浸透は次の条件を満たす程度である ・躯体内外の水位の運用条件と、それを維持する地下水管理システムの条件また凍結温度線の運用条件のもとで、躯体内面に接する保冷層の断熱性能が一定の許容範囲内（気体ガスの安定した処理が可能）	○地震後の周辺地下水の躯体内浸透は次の条件を満たす程度である ・躯体内外の水位の運用条件と、それを維持する地下水管理システムの条件また凍結温度線の運用条件のもとで、メンブレンに大変形を生じるような水圧が作用しない

LNG 地下タンク躯体が地震に対して保有すべき性能は、地震の程度に応じて、地震時および地震後のタンクの安全性と使用性に関する要求性能を満足するように、一般に以下の3段階に区分して設定する。

- ① 耐震性能Ⅰ：地震時および地震後において、タンクは十分な安全性を有し、使用性の低下も大きくなく、ごく軽微なものを除いて補修しないで使用できる。
- ② 耐震性能Ⅱ：地震によって、タンクの安全性が損なわれることなく、補強しないで使用できる。
- ③ 耐震性能Ⅲ：地震によって躯体が崩壊せず、LNGの貯液空間が保全されている。補強を行えば、再利用は可能である。

耐震性能は、タンクの要求性能に従い、照査用地震動のレベルに応じて適切なものを設定する。一般には、以下を標準とする。

- 1) レベル1地震動に対しては、耐震性能Ⅰを満足する。
- 2) レベル2地震動に対しては、耐震性能Ⅱまたは耐震性能Ⅲを満足する。

参考文献

- 1) LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針，2章LNG地下タンク躯体の構造性能，土木学会，コンクリートライブラリー第98号，1999.10.

8.7.2 地下タンクの耐震性能の照査

- (1) 地下タンク躯体の性能照査は，目標性能を満足することを判断するための適切な照査項目およびその限界値を設定し，設計荷重に対して計算される構造物の応答値が限界値に到達しないことを確認することによって行う。
- (2) 目標性能を満足することを判断する照査項目とその限界値は，目標性能と照査に用いる解析手法に応じて適切に設定する。

【解説】

(1)について

地下タンク躯体の性能照査を合理的に行うためには，躯体の変形性能の厳密な評価が不可欠である。特に地下タンクのような3次元構造体に対しては，実挙動を精度よく解析し，構造体のどの領域がどのような変形状態・応力状態にあるかを把握することによって，耐震性能に応じた限界状態に対する適切な照査が可能となる。地下タンク躯体の性能照査のフローを解説図9.7.2-1¹⁾に示す。

(2)について

耐震性能Ⅰの照査の基本は，躯体が健全であることを確認するため断面力を照査項目とし，降伏耐力を限界値とすることによって行う。照査に用いる解析手法は，部材が降伏するまでの剛性を評価できる準動的等価線形解析手法を用いることを基本とし，地下タンク躯体の剛性は，ひび割れによる非線形性を部材の等価剛性として考慮する。躯体の剛性は，温度応力や地震動の作用によって発生するひび割れ間隔の影響を受けるので，躯体の等価剛性の設定にあたっては，作用する温度応力や地震動レベルに応じた作用荷重を考慮して設定する。

耐震性能Ⅱの照査の基本は，地下タンクの部材の変形が，部材の最大耐力時の変型量以内となることを確認することによって行う。照査に用いる解析手法としては，部材の鉄筋降伏以降の非線形挙動を部材レベルの履歴依存モデルとして評価できる，動的非線形解析手法を用いることを基本とする。耐震性能Ⅲの照査は，地下タンク躯体全体が崩壊しないことを確認するものである。このため，照査に用いる解析手法は，材料非線形を直接的に評価し構造物全体の大変形や構成要素の損傷度までを直接解析できる動的非線形解析手法を用いることが理想である。しかし，この手法はタンクの終局的な挙動を最も精密に把握し得る手法であるが，必要とする技術レベルは非常に高く，現状では実用化のための技術的研究・検討の余地が残されている。このため，部材レベルでの変形性能を解析する手法，あるいは部材の非線形性を等価剛性として設定する方法を安全側に代用することもあり得る。その場合は耐震性能Ⅱの照査項目とその限界値を用いることにより，安全側に耐震性能Ⅲを照査することが可能である。

具体的な照査項目とその限界値は3つの耐震性能に応じてそれぞれ設定される。実際には照査に用いる解析手法によって構造物の応答値の内容が異なるので，目標性能を考慮した解析手法を選択し，その解析手法に対応した照査項目とその限界値を設定する必要がある。詳細は文献²⁾に記載されている。

参考文献

- 1) LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針，1章総則，土木学会，コンクリートライブラリー第98号，1999.10.
- 2) LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針，4章解析手法，5章性能照査方法，土木学会，コンクリートライブラリー第98号，1999.10.

8.8 埋設管

8.8.1 埋設管の耐震性能の設定

埋設管の耐震性能は，埋設管の種類・重要度等に応じ適切に設定しなくてはならない。

【解説】

都市生活に必要なライフラインと言われる電気，ガス，上下水道，電話等の埋設管は，その種類ごとに市民生活への影響，重要度，復旧に要する時間，2次災害の防止の観点等から，適切な耐震性能を定めるものとする。

耐震性能の例として次のものがある。

解説表 8.8.1 ガス導管の例¹⁾

	地震動 A (一般的な地震動)	地震動 B (高レベルの地震動)
被害が発生した場合の影響の大きな設備	・被害なし 修理することなく直ちに運転再開が可能	構造物に変形は生じるが，倒壊，漏えい等は生じず，人身事故を防止
その他の設備	・被害なし若しくは僅少 若干の被害は生じるがおおむね機能は維持	構造物としての機能を喪失するが，一層の被害極小化を図る

解説表 8.8.2 水道管の例²⁾

	L 1	L 2
重要度の高い施設 (ランク A)	無被害であること	人命に重大な影響を与えないこと。 個々の施設に軽微な被害が生じても，その機能保持が可能であること。
その他の施設 (ランク B)	個々の施設に軽微な被害が生じても，その機能保持が可能であること。	個々の施設には構造的損傷があっても，水道システム全体としての機能を保てること。 また，早期の復旧が可能なこと。

参考文献

- 1) ガス地震対策検討会，ガス地震対策検討会報告書，p.16，1996.3.
- 2) (社)日本水道協会，水道施設耐震工法指針・解説，p.6，1997.3.

8.8.2 埋設管の耐震性能の照査

- (1) 耐震性能の照査は埋設管に発生するひずみまたは変位と埋設管のひずみまたは変位の限界値により評価するものとする。
- (2) 埋設管に発生するひずみまたは変位は、地盤ひずみまたは地盤変位をもとに、埋設管の継手タイプごとに適切に評価する手法を用いるものとする。
- (3) 埋設管のひずみまたは変位の限界値の算定にあたっては、埋設管の継手タイプごとに耐震性能に応じて、適切に設定するものとする。

【解説】

(1)について

埋設管は、一般にみかけの単位体積重量が周辺地盤に比べて小さく、地上構造物のように慣性力によって振動性状が支配されず、周辺地盤の変形によってその変形が支配されると考えられる。このため、耐震性能の照査に当たっては、応答変位法等を用いて地盤のひずみまたは変位を算定し、本数値を適切な方法により埋設管に入力して計算される発生するひずみまたは変位が、埋設管が保有する耐力を上回らないことを確認することを原則とする。

(2)について

埋設管の継手タイプには、大別して下記の3つの構造がある。

- ① 一体構造：溶接鋼管のように溶接継手部が管体材料と同等の強度及び変形性能を有するタイプ
- ② 柔構造：メカニカル継手のように継手部が伸縮・屈曲してひずみを吸収するタイプ
- ③ 鎖構造：柔構造タイプの性能に加えて離脱防止機構を有するタイプ

このため、使用する埋設管の継手タイプに応じて適切な照査の可能な評価手法を用いなくてはならない。

また、一般的に埋設管は地盤に対して強度が大きく、埋設管の表面と埋戻し土との間で滑りが生じるため、埋設管に発生するひずみまたは変位の算定に当たっては、地盤ひずみまたは地盤変位が埋設管に伝達する係数を考慮するものとする。

(3)について

埋設管には、その用途に応じて様々な材料・継手が使用されている。このため、埋設管のひずみまたは変位の限界値の算定にあたっては、埋設管の重要度等により定めた耐震性能に応じ、埋設管の継手タイプを勘案して適切なひずみまたは変位の限界値を設定しなくてはならない。

8.9 港湾構造物

8.9.1 港湾構造物の耐震性能の設定

港湾構造物の耐震性能は、対象構造物の機能・重要度を考慮して構造物本体および地盤・基礎地盤の安定性に関して設定するものとする。

【解説】

港湾構造物の耐震性能の照査において、その耐震性能を、地震後の構造物本体の安定およびその機能の観点から、過去の地震被災事例における機能の障害程度（損傷程度）などにに基づき設定する。港湾構造物は、構造物の地震時安定性に地盤および基礎地盤の影響が大きく、かつ、地下水位が高いことに留意する。

耐震性能設計における許容損傷程度は解説表 8.9.1-1 のように整理できる。

解説表 8.9.1-1 港湾構造物の耐震性能と許容損傷程度

損傷程度	構造物	機能
損傷程度 I(稼働可)	無損傷・軽微な損傷	機能低下無し・軽微な機能低下
損傷程度 II(補修可)	制御された損傷	短期間の機能低下
損傷程度 III(崩壊に近い)	損傷が激しく崩壊に近い	長期間の機能低下
損傷程度 IV(崩壊)	崩壊	機能停止

また、耐震性能のグレードとして解説表 8.9.1-2 のようにまとめられる。

解説表 8.9.1-2 港湾構造物の耐震性能グレードと設計地震動の関係

耐震性能グレード	地震動 L1	地震動 L2
耐震性能 S	損傷程度 I	損傷程度 I
耐震性能 A	損傷程度 I	損傷程度 II
耐震性能 B	損傷程度 II	損傷程度 III
耐震性能 C	損傷程度 III	損傷程度 IV

設計の手順としては以下のようなになる。

- (1) 耐震性能の設定：解説表 8.9.1, 8.9.2 から、施設のユーザーや設置者の判断により構造物本体および機能の面から損傷の程度を設定する。この際、施設の重要度に応じて耐震性能 S~C を設定する。
- (2) 損傷程度の定義：許容損傷程度を工学的なパラメータと対応させる。例えば、変位・応力レベルなど。具体的な例は「8.9.2 港湾構造物の耐震性能照査」に示す。
- (3) 耐震性能照査：「8.9.2 港湾構造物の耐震性能照査」に示す。

8.9.2 港湾構造物の耐震性能照査

港湾構造物の耐震性能は、設定された許容損傷程度を反映した工学的パラメータ（例えば残留変位、残留応力など）について照査するものとする。

【解説】

港湾構造物の耐震性能照査の方法として、(1)模型振動実験、(2)過去の被災事例からの経験式、(3)数値解析などが挙げられる。

(1)模型振動実験：港湾構造物の特性である、地震時の動水圧等を考慮できる施設による模型振動実験により設定された耐震性能を照査する。適切な相似則を用い、過去の被災事例による再現性の確認が必要である。

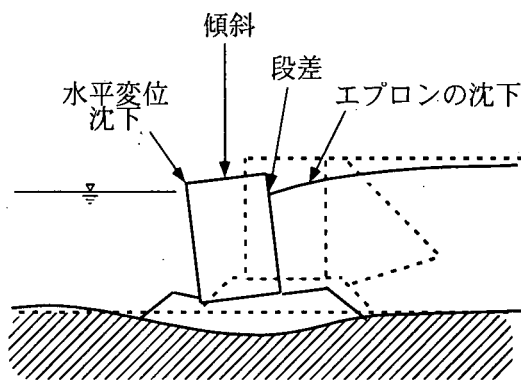
(2)被災事例に基づく経験式：適用に当たっては経験式の構築過程を十分理解し、適用範囲を逸脱しないことが重要である。

(3)数値解析：解析手法として多数提案されているが、解析手法の選定に当たっては、要求される許容損傷程度を反映した工学的パラメータを計算する能力を有することを確認する必要がある。特に、港湾構造物の地震時被害には地盤の液状化現象が大きく関与していることから液状化現象を反映できる解析手法が用いられることが多い。

港湾構造物には多様な構造形式があり、構造形式やその機能により照査項目が異なる。本節では代表的な構造形式について解説する。

1) 重力式岸壁：解説図 8.9.2-1 に示すように、ケーソンの水平変位・沈下・回転およびエプロンとの段差、エプロンの沈下などが照査項目となる。許容被災程度は、目安として解説表 8.9.2-1 のように設

定される。ここで示した数値は目安であり、施設のユーザーや設置者の判断で決定するものである。



解説図 8.9.2-1 重力式岸壁の照査項目

解説表 8.9.2-1 許容損傷程度の目安

許容損傷程度	損傷程度 I	損傷程度 II	損傷程度 III	損傷程度 IV
正規化水平変位(d/H)	1.5%以下	1.5~5%	5~10%	10%以上
海側への傾斜角	3度以下	3~5度	5~8度	8度以上
エプロンとケーソンの段差	0.03~0.1m以下	-	-	-
エプロンの沈下	0.3~0.7m以下	-	-	-

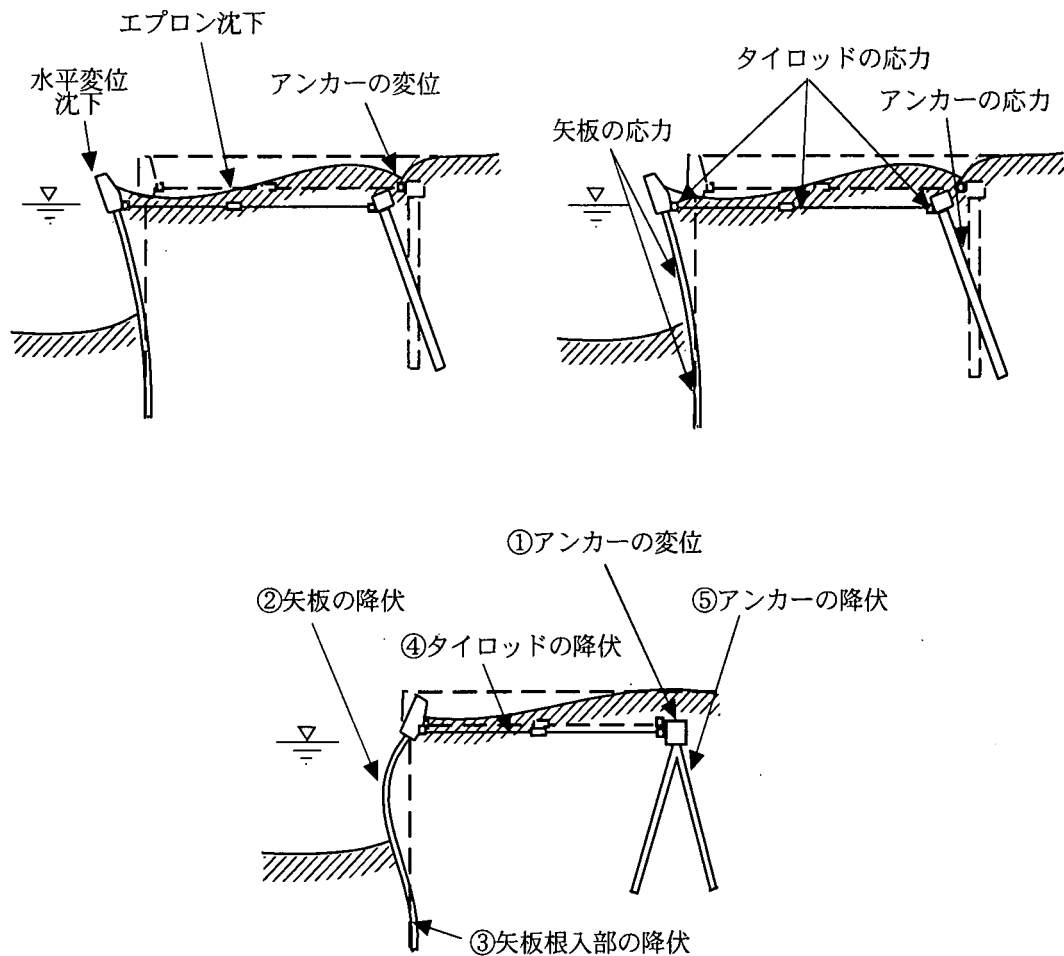
重力式岸壁の場合、過去の地震被災事例においてケーソンの部材の破壊が少ないことから、主として全体安定を照査項目とすることが多い。

コンテナクレーンを有する重力式岸壁において、海側脚がケーソン上に陸側脚がエプロン上にあり、損傷程度 I を設定した場合には、地震後の機能維持の観点からコンテナクレーンのレールスパンの変位は数 mm 以内である必要がある。よって解説表 8.9.2-2 に示す目安とは大きく異なることに留意する必要がある。

2) 矢板式岸壁：矢板構造の場合には地盤の挙動が矢板本体の安定性に大きく影響する。解説図 8.9.2-2 に示すように①アンカーの変位、②矢板の降伏、③矢板根入部の降伏、④タイロッドの降伏、⑤アンカーの降伏などが挙げられる。

解説表 8.9.2-2 矢板岸壁の許容損傷程度

許容損傷程度			損傷程度 I	損傷程度 II	損傷程度 III	損傷程度 IV
残留変位	矢板	正規化水平変位(d/H)	1.5%以下			
		海側への傾斜角	3度以下	-	-	-
最大応答	エプロン	段差	0.03~0.1m以下			
		根入上部	弾性	塑性 (許容塑性率内)	塑性 (許容塑性率内)	塑性
		根入部	弾性	弾性	塑性 (許容塑性率内)	塑性
	タイロッド		弾性	弾性	塑性	塑性
	アンカー		弾性	弾性	塑性 (許容塑性率内)	塑性



解説図 8.9.2-2 矢板岸壁の照査項目

岸壁の構造として、この他に栈橋式岸壁・鋼矢板セル式岸壁・鋼板セル式岸壁・ブロック式岸壁など多様な構造形式がある。また、港湾施設としては防波堤・ドルフィン・親水護岸などが挙げられる。これらの耐震性能評価にあたっては、過去の被災事例の分析による破壊過程を十分に把握し、構造物本体および機能の観点から適切な耐震性能設定および照査手法の選定が必要となる。耐震性能照査結果の吟味にあたっては、過去の被災事例等による精度確認、計算結果の数値にのみとらわれない総合的な判断が求められる。