

第4章 地震の影響および環境作用

4.1 一般

地震の影響、通常運用時の荷重(永久荷重+変動荷重)および環境作用など、照査で考慮する荷重を抽出し、想定される照査の条件に対応させてその組合せを設定する。それぞれの組合せに応じて、各荷重の特性値を評価し、荷重係数を乗じた上でそれらを総合して設計荷重を設定する。

また、環境作用については、中性化、塩害(塩化物イオンの侵入、鉄筋腐食の進展)および凍害(凍結融解作用)を対象とし、地域の環境事情に応じてこれらを考慮する。具体的な劣化作用の程度は、現地調査結果に基づいて設定する必要がある。

4.2 荷重

4.2.1 荷重設定の基本

設計耐用期間に作用する個々の荷重のばらつき、照査対象とする限界状態および荷重の組合せを考慮した上で、構造物の限界状態に対して厳しい条件となるように、これらの特性値を設定しなければならない。

4.2.2 荷重の種類

荷重は、作用する頻度、持続性および変動の程度によって、一般に永久荷重、変動荷重、地震の影響に分類される。

(1) 永久荷重

永久荷重は、その作用が解除されることが極めてまれか、変動が平均値に比較して無視できる程度に小さく、持続的に作用する荷重である。躯体自重、機器・配管荷重、土被り荷重、永久上載荷重、静止土圧、外水圧、内水圧等がこれにあたる。

(2) 変動荷重

変動荷重は、頻繁にあるいは連続的に変動が起こり、平均値に比較してその変動量が無視できない荷重である。変動上載荷重、雪荷重、温度荷重等がこれにあたる。

ただし、雪荷重の発生頻度が高い寒冷地では、これを永久荷重として考慮することとが一般的である。

(3) 地震の影響

地震の影響は、設計耐用期間中に作用する頻度がきわめて少ないが、作用するとその影響が非常に大きい荷重である。本指針においては、基準地震動 S_2 および基準地震動 S_1 がこれにあたる。

鉛直方向地震動については、適切にその影響を評価しなくてはならない。鉛直地震動を静的に考慮する場合には、上向きと下向きの2種類を想定する。

4.2.3 荷重の特性値

地震の影響以外の一般的な荷重は、設計耐用期間に作用する個々の荷重のばらつき、荷重の組合せおよび

照査対象とする限界状態を考慮した上で、構造物の限界状態に対して厳しい条件となるように、これらの特性値を設定しなければならない。対象とする荷重の種類と算定方法の概要を表 4.2-1 に示す。

4.2-1 荷重の種類と算定方法の概要

種 別	荷 重	算定方法の概要
永久荷重	躯体自重	設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の単位重量を乗じて算定する。
	機器・配管荷重	機器設計等から与えられる荷重。(機器・配管荷重の重量に基づいて算定する。)
	土被り荷重	構造物天端上の地盤の重量に基づいて算定する。
	永久上載荷重	地盤表層より上部に恒常的に置かれる物の重量に基づいて算定する。
	静止土圧	断面力全体に対して静止土圧が寄与する方向(符合の正負)ならびにばらつきを考慮して定める。具体的には、静止土圧係数の上限値と下限値を採ること、ならびに適切な荷重係数を定める。
	外水圧	地下水に対応した静水圧とする。
	内水圧	取水路、取水ピットのように構造物内部に作用する静水圧とする。
変動荷重	変動上載荷重	構造物上を移行する自動車などの活荷重とする。
	雪荷重	積雪深さ、雪の単位重量および勾配を考慮して算定する。
	温度荷重	温度荷重が主要な荷重でない場合は、温度応力算定時の構造物の剛性を全断面剛性の 50%として算定する。
地震の影響 ^{*1}	水平地震動	時刻歴波形として本指針とは別に設定する。本指針では与条件としての扱いである。
	鉛直地震動	鉛直震度として、敷地の解放基盤表面で定められた基準地震動の水平最大加速度振幅の 1/2 を考慮する。 時刻歴波形を考慮する場合には、水平地震動と同じように与条件として扱う。
	動水圧	地震応答解析において適切なモデル化を行って評価する。

*1) 本指針では、構造解析として時刻歴地震応答解析を行うことを標準としている。その他の方法による構造解析を行う場合には、地震の影響は、以下のように扱う。

地震時土圧増分	動的解析法により動土圧を求めることを基本とするが、実績があれば他の方法を使用してもよい。
地震時慣性力	水平方向の影響は、動的解析法による水平震度の解析結果に質量を乗じて算出する。鉛直方向の影響は、鉛直震度として基準地震動の水平最大加速度振幅の 1/2 を考慮する。
動水圧	ウェスタガード式により算定する。

(1) 永久荷重

以下に、各荷重の特性値の算定方法を示す。

a. 躯体自重

躯体自重の特性値は、設計図書に基づいて、構造物の体積に構成材料の単位重量を乗じて算定する。単位重量は、表 4.2-2 に示す値を用いてよい。ただし、実際の単位重量が明確なものは、その値を用いるものとする。

表 4.2-2 材料の単位重量

材 料	単位重量(kN/m ³)
鋼・鋳鋼・鍛鋼	77
鋳 鉄	71
アルミニウム	27.5
鉄筋コンクリート	24.0~24.5
プレストレストコンクリート	24.5
コンクリート	22.5~23.0
セメントモルタル	21.0
アスファルトコンクリート	22.5

b. 機器・配管荷重

機器・配管荷重の特性値は、設計図書等に基づいて算定する。

c. 土被り荷重

土被り荷重の特性値は、構造物天端上にある地盤の重量に基づいて算定する。

d. 永久上載荷重

永久上載荷重の特性値は、構造物天端もしくはその上方に位置する上載機械重量、建物重量等、実際に構造物の上に恒常的に置かれるものの全重量より算定する。

e. 静止土圧

地中構造物を対象とした場合、全体の設計断面力に占める静止土圧の割合が、他の荷重に比較して大きくなるのが、過去の試設計の結果より明らかとなっている。したがって、その特性値の算定にあたっては、他の荷重より厳密に行う必要がある。

ただし、通常運用時の荷重作用および地震の影響による構造物の応答を、一連の非線形解析で計算する場合は、構造物の側方地盤の質量に下向きの重力加速度を乗じて自重として作用させ、その結果、構造物に作用する土圧を静止土圧として評価するのが一般的である。その場合、適切な地盤物性を与えなければならない。例えば、静止土圧係数(K_0)=0.5 とするには、地盤のポアソン比を 0.33 とする必要がある。

f. 水圧

水圧の特性値は、静水圧として算定する。浮力は、構造物底版に作用する揚水圧であるので、水圧と同様に扱うものとする。

(2) 変動荷重

変動荷重は、通常、変動上載荷重、雪荷重および温度荷重の 3 種類である。これ以外の無視できない変動荷重がある場合には、荷重の組合せの基本に従って、別途、特性値を算出しなければならない。

変動荷重については、永久荷重や地震の影響と異なり、照査対象とする限界状態や荷重の組合せによって、異なる特性値を設定することがある。

a. 変動上載荷重

変動上載荷重とは、構造物天端もしくはその上方に荷重が考えられる活荷重をいう。工事用車輛等の重量車輛の通行が考えられる時には、その影響を考慮する。変動上載荷重の特性値は、実際の作用荷重を算定して用いることが基本であるが、不明確な場合には 9.8 kN/m^2 とする。

b. 雪荷重

雪荷重の特性値は、「示方書[構造性能照査編]」に基づいて算定することを基本とする。一般には、式(4.2-1)で算定してよい。

$$SN = W_s \cdot z \cdot I \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.2-1)$$

ここに、 SN : 雪荷重の特性値

W_s : 雪の設計用単位重量(kN/m^3)

・降りたての雪 : 1.47 kN/m^3

・やや落ち着いた雪 : 2.94 kN/m^3

・圧縮された雪または多量に水を含んだ雪 : $4.90 \sim 6.86 \text{ kN/m}^3$

z : 設計用地上積雪深さ(m)

I : 勾配による係数 $I=1+(30-\theta)/30$

θ : 積雪対象面の勾配($^{\circ}$)

ただし、 $\theta \leq 30^{\circ}$ の場合には、 $I=1.0$ $60^{\circ} \leq \theta$ の場合には、 $I=0.0$

c. 温度荷重

温度荷重には、部材間の温度差によるものと各部材の内側と外側の温度差によるものの2種類が考えられる。設計では、これらの荷重の組合せを考慮して最大荷重を与えるものを用いなければならない。ただし、温度荷重が全体荷重の中で主要な荷重でない場合は、他の荷重との組合せによってひびわれが発生し、剛性が低下することを考慮して、温度荷重を算定する際の応力解析では、構造物の剛性を全断面有効剛性の1/2として計算してよい。この剛性の低下比率については、原子炉格納容器¹⁾、LNG地下タンク躯体²⁾³⁾等の設計で用いられている値(全断面有効時の1/2)を採用している。

ただし、日射ならびに外気温変化以外の温度変化を考慮する場合(機器から発生する熱が無視できない場合)などで、温度荷重が大きな比率を占める場合には、別途検討することとする。

(3) 地震の影響

発電用原子炉施設の耐震設計に用いる基準地震動は、地点毎にサイト特性を考慮して設定される。屋外重要土木構造物においては、Asクラス、Aクラスなどの機器の耐震重要度分類に対応してその重要性が判断され、耐震性能照査を行うための荷重としての地震動が選定される。そのため、本指針で取り扱う地震の影響は、照査項目や荷重の組合せに係わらず、照査用地震動として別途設定されているものとする。

a. 水平方向地震動

水平方向地震動は、時刻歴波形として地震応答解析に適用することを基本とする。

b. 鉛直方向地震動

鉛直方向地震動(上下方向)の影響については、「耐震設計審査指針」にしたがって考慮する。「耐震設計審査指針」では、敷地の解放基盤表面で定められた基準地震動の水平最大加速度振幅の1/2の値を鉛直震度として考慮することとしている。本指針でも、この考え方を踏襲する。ただし、上記「耐震設計審査指針」などにより、水平および鉛直の照査用地震動が時刻歴波形として与えられる場合は、これらを同時入力することにより評価する。

4.3 荷重の組合せ

4.3.1 荷重の組合せの基本

荷重の組合せを設定する際には、考慮する個々の荷重の性質・特徴、それらが同時に作用する確率および限界状態に与える影響度合を考慮しなければならない。本指針では、照査条件に対応させて、表4.3-1に示す荷重の組合せを標準として考慮する。

4.3.2 耐震性能照査における荷重

耐震性能照査において組み合わせる荷重は、基本的に永久荷重と地震の影響である。

影響の大きい荷重作用として、永久荷重としての静止土圧および地震の影響である動土圧をはじめとする

表 4.3-1 本指針における設計荷重の組合せ

耐震性能照査	永久荷重+地震の影響 (変動荷重は考慮しない)
耐久性能照査	永久荷重+変動荷重
通常運用時の照査	永久荷重+変動荷重

地盤から構造物が受ける作用がある。これらは、地盤特性を考慮して計算するか、あるいは適切な地盤特性を地震応答解析の入力条件として設定する必要がある。

一般に、原地盤の種別、不均一性および埋戻し地盤の施工時における締固め程度により、地盤特性は大きく変化する。ここで言う地盤特性とは、静止土圧係数、せん断波速度、応力-ひずみ関係、履歴モデルのパラメータ等の総称である。また、地盤の試験方法によっても、地盤特性はばらつく。そのため、全体の変形量および発生断面力(せん断力、曲げモーメント、軸力)などの構造物の応答に対して、構造物に与える影響が厳しくなるように想定して地盤の特性値を定めることが肝要である。一般に、地盤の試験結果の平均値(統計的な処理をした中央値と同値)は特性値とは一致しない。地盤特性の設定の段階で、照査項目(変形、せん断力)に対して安全側の設定(構造物に与える影響が厳しくなる方向への変動の見積もり)がなされている場合は、1種類の地盤特性を考慮すればよい。特性値の設定段階で、その物性が構造物に与える影響が厳しくならない場合は、試験結果の平均値や既往の研究結果などを参考にして、複数の地盤特性を設定することが望ましい。

本指針が対象としている原子力発電所の鉄筋コンクリート構造物の多くは、変形で不利になる地盤特性と断面力のせん断力照査で構造物に与える影響が厳しくなる場合は一致しており、厳しくなると想定される1種類の地盤特性を考慮すればよい。

また、構造物に内水が存在する場合には、地震の影響として動水圧を考慮する。地震応答解析においては、内水を付加質量としてモデル化する方法、あるいは流体要素としてモデル化する方法により動水圧を考慮する。方法の詳細は、本マニュアル「5.3.2 解析モデルの作成」、 「5.4.2 解析モデルの作成」に示す。

4.3.3 耐久性能照査および通常運用時の性能照査における荷重の組合せ

考慮する荷重は永久荷重と変動荷重である。耐久性能照査と通常運用時の性能照査は、同じ荷重条件を想定する。

個々の変動荷重が単独で作用する場合に加え、温度荷重と変動上載荷重が同時に作用する場合も考慮する。その他の組合せ、すなわち温度荷重と雪荷重、雪荷重と変動上載荷重およびそれらの荷重全ての組合せは考慮しない。これは、雪荷重と温度荷重、変動上載荷重と雪荷重の組合せでは、それぞれ二つの荷重が同時に作用する確率はきわめて低いと判断されるためである。

耐久性能照査では、まず、ひび割れに関する照査を行わなければならない。これは、ひび割れの有無、ひび割れ幅の照査結果を、塩害に対する照査における塩化物イオンの拡散係数の設定に反映させる必要があるためである。また、ひび割れが許容値以下であれば、中性化の照査ではひび割れを無視することができる。

通常運用時の性能照査は、鉄筋およびコンクリートの応力度照査であり、大変形時の照査を対象とする耐震性能照査に比べ、剛性が大きい状態を想定している。したがって、温度荷重を考慮する必要がある。

表 4.3-2 に、耐久性能照査および通常運用時の性能照査における荷重の組合せを示す。

表 4.3-2 耐久性能照査時および通常運用時の性能照査における荷重の組合せ

変動荷重		
変動上載荷重	雪荷重	温度荷重
○		
	○	
		○
○		○

a. 変動荷重を単独に考慮する場合

変動上載荷重，雪荷重および温度荷重について，通常用いられている方法により算出した荷重の 1/2 を特性値とする。

b. 温度荷重と変動上載荷重を組み合わせる場合

これらの荷重が同時に作用する確率が低いことを考慮して，a. で示している単独で作用した場合に用いた荷重値をさらに低減させる。低減係数については，ここでは 0.7 を用いることとした。この場合，各荷重の特性値の算定法は以下のとおりである。

- ① 変動上載荷重： $9.8 \text{ kN/m}^2 \times 0.5 \times 0.7 = 3.43 \text{ kN/m}^2$ を荷重の特性値とする。
- ② 温度荷重：(計算された温度荷重) $\times 0.5 \times 0.7$ を荷重の特性値とする。

【参考文献】

- 1) 火力原子力発電技術協会：通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課監修「発電用原子力技術基準；コンクリート製原子炉格納容器に関する構造等の技術基準」，1994.
- 2) 日本瓦斯協会：LNG 地下式著層指針，1981.
- 3) 電気事業連合会：LNG 地下式著層指針(土木設備)設計指針，1978.10