

## 第6章 性能照査

### 6.1 一般

- (1) 屋外重要土木構造物の耐震性能照査は、照査用応答値が所要の安全性をもって照査用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) 照査用限界値は、照査に用いる解析手法および目標性能に応じてこれを設定する。

【解 説】 (1)について ここでは、耐震性能照査の基本を示している。照査項目毎に、その応答値が所要の安全性をもって限界値に到達しないことを確認することにより照査を行う。一般に、照査は(解 6.1-1)により行う。

$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0 \quad (\text{解 6.1-1})$$

ここに、 $S_d$ ：照査用応答値  $S_d = S(\gamma_f, \gamma_m) \cdot \gamma_a$

$R_d$ ：照査用限界値  $R_d = R(\gamma_m) / \gamma_b$

$S$ ：応答値の特性値

$R$ ：限界値の特性値

$\gamma_i$ ：構造物係数

$\gamma_f$ ：荷重係数

$\gamma_a$ ：構造解析係数

$\gamma_m$ ：材料係数

$\gamma_b$ ：部材係数

注) 各安全係数については、以下「6.2 安全係数」を参照のこと。

### 6.2 安全係数

- (1) 安全係数は、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数の5つを考慮することを原則とする。
- (2) 安全係数は、使用する材料や想定される荷重・環境作用の特性値からの構造物に与える影響が厳しくなる方向への変動、構造解析の不確実性、経年劣化評価法、限界値の算定あるいは設定等における不確実性を考慮し、それぞれ設定する。
- (3) 安全係数は、照査に用いる解析手法ならびに照査項目に応じて、適切なものを選択し、それぞれの値を設定する。

【解 説】 (1)～(3)について 安全係数についての基本的な考え方は、「示方書[構造性能照査編]」および「示方書[施工編]」に準拠する。解説 表 6.2-1 に曲げ系の破壊およびせん断破壊に対する照査に用いる安全係数の標準値を示す。

解説 表 6.2-1 耐震性能照査に用いる標準的な安全係数

照査項目		変形による照査 (曲げ系の破壊に対する照査)		断面力による照査 (せん断破壊に対する照査)		
		応答値算定	限界値算定	応答値算定	限界値算定	
材料係数	コンクリート	1.0 ※1	1.0	1.0 ※1	1.3	
	鉄筋	1.0 ※1	1.0	1.0 ※1	1.0	
	地盤	1.0 ※1	—	1.0 ※1	—	
部材係数	曲げ軸力	曲げ卓越	—	—	1.1	
		軸力卓越	—	—	1.3	
	せん断	コンクリート	—	—	—	1.3(1.56) ※2
		鉄筋	—	—	—	1.1(1.32) ※2
	変形, ひずみ	—	1.0	—	—	
荷重係数	1.0		1.0		—	
構造解析係数	1.2~		—		1.05~	
構造物係数	1.0		1.0		—	

※1: 解析に用いる材料特性についてはすべて特性値を用いる。

※2: 部材係数(せん断)の( )内の数値は、高応力繰返しによる割り増しを考慮したものである。

安全係数は、『変形による照査(曲げ系の破壊に対する照査)』と『断面力による照査(せん断破壊に対する照査)』に分けて設定することとした。

変形に対する照査における安全係数は、地盤と構造物の非線形性を考慮できる連成系の時刻歴地震応答解析に基づくことを前提としている。等価線形により材料の非線形性を考慮して曲げ、軸力に対する断面力で照査する場合は、「示方書[構造性能照査編]」で示される方法を用いる。

材料係数の標準値について 変形に対する照査の際に用いる材料特性は、限界値の算出に用いるものと、応答値の算出に用いるものに分けられる。

限界値には、コンクリートの圧縮ひずみのように材料特性そのものや、限界層間変形角のように評価式で求められるものがある。後者の場合には、具体的な数値を求めるために材料特性を用いる。この限界値の評価では、特性値を用いることを基本としているため、材料係数は全て1.0とした。

応答値の算出において地盤と構造物の非線形性を考慮できる連成系の時刻歴地震応答解析を用いる場合、変位量などの解析結果は特性値を算出することを基本としている。解析に用いる材料特性は、すべて特性値と同値のものを用いることとする。このため、材料係数においては、構造物に与える影響が厳しくなる方向への変動は考慮しない。したがって、材料係数を1.0とする。「示方書[構造性能照査編]」では、断面力に抛らない安全性の照査が示されており、材料係数は、応答値の評価にも適用されるようになっている。本指針でも、同じ考え方を採用しており、材料係数の適用をより具体的に記述することとした。

一方、せん断破壊に対する照査において、限界値であるせん断耐力を求めるための材料係数については、コンクリート強度の影響度の大きさを考慮して1.3とした。

部材係数の標準値について 変形に対する照査については、限界値自体に十分な安全裕度を設定していることを考慮して1.0とした。せん断力に対する照査については、せん断耐力の計算上のばらつき、ならびに脆性的な破壊の確実な回避が不可欠であることを考慮して、コンクリートで1.3、鉄筋で1.1とした。また、主鉄筋降伏後の繰返し荷重下では脆性的な破壊が生じる場合があることが確認されており、耐力評価式にこのような影響を考慮していないので、部材係数を1.2倍する(コンクリート:  $1.3 \times 1.2 = 1.56$ , 鉄筋:  $1.1 \times 1.2 = 1.32$ , 表中( )内の値)ことで安全性を担保することとした。

荷重係数の標準値について 耐震性能照査の照査用応答値の評価において、荷重係数としての安全係数を考慮する荷重要因は、基本的に入力地震動と永久荷重である。入力地震動については、構造物係数の項で記

述するように、地点毎にサイト特性を考慮して十分に安全側のものが設定される。また、永久荷重については、評価が容易で特性値により設定することとしている。以上のことから、耐震性能照査における荷重係数は1.0とする。

構造解析係数の標準値について 地盤と構造物の非線形性を考慮できる連成系の時刻歴地震応答解析を用いる場合、本来、構造解析係数で考慮すべき解析手法自体の精度や不確定性の他に、応答値の算出に用いる荷重や材料のバラツキについても構造解析係数で考慮することとした。

解説 表 6.2-1 に示すように、変形および断面力に対する照査で構造解析係数の値に差を付けている。これは、構造物の変形状態の如何にかかわらず、標準的な解析手法を用いて算定される応答値では、断面力の評価精度が変形の評価精度に比べ高いことを考慮しているためである。ここで、曲げ系の破壊の構造解析係数が1.2より大きくなる場合とは、構造のモデル化や材料(地盤や鉄筋コンクリート)のモデル化において、極端に近似的な扱いをした場合を想定している。【耐震性能照査マニュアル】に提示する標準的な方法で解析を行う場合は、1.2としてよい。構造解析係数に関わる主な要因としては、地盤物性の拘束圧依存性、 $G-\gamma$  ( $h-\gamma$ ) 関係のモデル化の精度、地盤と構造物の境界部の特性、構造物の非線形特性のモデル化で、これらが、【耐震性能照査マニュアル】の標準的な方法で設定される場合には、構造解析係数を1.2としてよい。推奨する方法を大きく逸脱する場合、例えば、要素分割、大型構造物の無筋領域の評価、材料強度・乾燥収縮の評価、多方向ひび割れの考慮などで、標準的な方法を用いない場合には1.2より大きくする。

断面力評価における構造解析係数1.05は、地盤と構造物の非線形性を考慮できる連成系の時刻歴地震応答解析により断面力を算定する際の、入力条件として設定される荷重、材料特性のバラツキの影響に配慮したものである。

構造物係数の標準値について 屋外重要土木構造物の重要度は非常に高い。したがって、構造物係数を1.0より大きくとるのが一般の構造物における考え方である。しかし、屋外重要土木構造物の耐震性能照査に用いる基準地震動は、地点毎にサイト特性を考慮し、さらに、対象構造物の耐震重要度分類に対応して、十分に安全側の評価を与えて選定される。したがって、入力地震動そのものに構造物の重要性を考慮していると言えるため、さらに構造物係数で構造物の重要性を考慮する必要はなく、耐震性能照査における構造物係数は1.0とした。

なお、耐久性照査の安全係数は、中性化や塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食の発生、鉄筋腐食に起因するひびわれの発生および凍結融解作用による品質劣化を照査項目とするため、耐震性能照査とは別に設定する必要がある。考慮する安全係数は、材料係数、耐久性に関する設計式の精度を考慮する安全係数、および構造物係数で、さらに、中性化速度係数や塩化物イオンの拡散係数の予測値に関する精度を考慮する安全係数がある。これらの係数を定める際には、コンクリートの施工性に関する事項、それぞれの方法の評価精度および構造物の重要度を勘案する必要がある。具体的な数値は、「示方書[施工編]」に従うものとする。

## 6.3 耐震性能照査

### 6.3.1 照査項目とその限界値

(1) 『構造物が崩壊しない』ことを確認するために、以下を照査項目とその限界値とする。

照査項目	限界値
層間変形角	限界層間変形角
圧縮縁コンクリートひずみ	剥落が生じない限界ひずみ
せん断力	せん断耐力

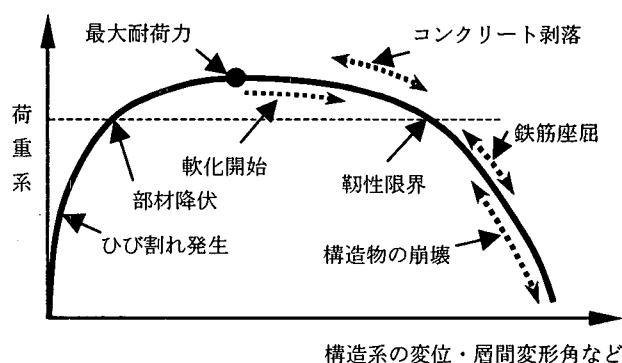
(2) 機器・配管を支持する構造物については、『機器・配管の機能維持のための与条件』を照査項目およびその限界値とする。

【解 説】 (1)について 『構造物が崩壊しない』という耐震性能を確認するために、照査項目およびその限界値を明示する必要がある。『構造物の崩壊』を一般的に定義することは難しいが、屋外重要土木構造物の役割から①機器の稼動を維持すること、②配管を潰さないこと、③構造物の内空間を確保することが必要で、これらの条件から判断すると、上床版が崩落しないことおよび側壁・隔壁が倒壊しないことと定義できる。(2)の条件とあわせることにより、屋外重要土木構造物の要求性能を満足できる。

上床版の崩落や側壁・隔壁の倒壊は、構造系の塑性状態から崩壊への移行(以下、「メカニズムへの移行」という)や部材断面の曲げ破壊、せん断破壊で一般的に表現される。つまり、構造物の限界変形や部材の断面破壊を考えることで、『構造物が崩壊しない』という耐震性能を確認するための照査項目とその限界値を設定することができる。本指針では、曲げ系の破壊に対して、メカニズムへの移行に対応させた層間変形角もしくは圧縮縁コンクリートひずみを、せん断破壊に対してせん断耐力を照査項目とする。

層間変形角は、ピット構造、ダクト構造などにおける底版と上床版間の水平方向の相対変位を底版と上床版間の距離で除したものとして定義する。これは、メカニズムへの移行までの挙動を的確に表現できる指標である。同じくメカニズムへの移行を考えるとき、隅角部近傍で最も大きな回転変形を生じる断面が存在するので、この断面の曲げ変形を制限することで構造系が崩壊しないとすることもできる。断面の曲げ変形の限界を圧縮縁コンクリートひずみや終局曲率で照査するものである。終局曲率は条文に示していないが、圧縮縁コンクリートひずみの限界値を用いて終局曲率を精度良く評価できれば、その評価式を用いてもよい。これら3つの照査項目は、どれか一つを照査すればよく、照査項目の選択は、使用する解析手法に依存することになる。

これら一般的に曲げ・軸力系といわれる部材断面の破壊形態について、荷重と変形の関係の模式図を解説図 6.3-1 に示す。本指針では、現状の解析技術を勘案し、図中におけるかぶりコンクリートの剥落の領域を、限界状態とする。



解説 図 6.3-1 鉄筋コンクリート構造物の曲げ系の破壊過程に関する模式図

一方、せん断破壊は、破壊現象の発生後、構造物の耐荷力が急激に低下することが特徴である。特に、側壁や隔壁における面外方向のせん断破壊は、曲げ・軸力における延性的な破壊に比較して非常に脆性的であり、確実に回避しなければならない破壊形式である。側壁や隔壁のせん断破壊が、必ずしもすぐに構造物の内空間の喪失につながるものではないが、現状の解析技術では、せん断破壊後までの状態を予測することができないため、構造物のすべての部材に対してせん断破壊しないことを限界状態とした。

(2)について As クラスもしくは A クラスの機器・配管を支持する屋外重要土木構造物の場合には、これら機器・配管の機能維持を担保するために、『構造物が崩壊しない』状態より損傷の小さい状態に限界状態を設定し、構造物の変形を抑えることが要求される場合が想定される。これは、機器・配管側との設計時のやり取りで決定されるものである。このため、すべての屋外重要土木構造物に対して、担保すべき状態を一般化して示すことはできない。本指針では、このような場合を『機器・配管側からの与条件』として設定している。耐震性能照査においては、この与条件を照査項目およびその限界値と考えることにする。したがって、与条件は、対象となる屋外重要土木構造物の変形状態を示す力学的指標およびその状態量として、機器・配管側から与えられるものでなければならない。

例えば、ポンプの機能維持を保証するための最大床応答加速度や、ポンプが貫通する床間の限界層間変位、配管の接続部の最大変位などが、与条件としての照査項目およびその限界値となる。

### 6.3.2 照査用限界値の設定

耐震性能照査に用いる限界値を以下のように設定する。曲げ系の破壊に対する限界値およびせん断破壊に対する限界値を同時に満足しなくてはならない。

#### (1) 曲げ系の破壊に対する限界値

以下のどちらかの限界値を満足する。

① 圧縮縁コンクリートの限界ひずみは、曲げと軸力を受けた断面のかぶりコンクリートが剥落しないひずみ量とする。

② 限界層間変形角は、圧縮縁コンクリートが限界ひずみに達する状態を考慮した評価式により求める。

#### (2) せん断破壊に対する限界値

せん断耐力は、構造物や荷重状態の特徴を考慮できる評価式により求める。

【解説】 (1)①について この照査項目は、材料非線形モデルを使用する解析手法を適用した場合に応答値として計算することができる。その場合、コンクリートの構成則として、軟化領域における応力-ひずみ関係(コンクリートが応力的にほとんど抵抗しない状態まで)を表現できるものを適用していることが前提条件となる。

圧縮縁コンクリートの限界ひずみは、かぶりコンクリートの剥落が生じない程度のひずみ量としている。剥落発生時のひずみ量は、耐久性性能照査における限界状態の設定に依存するので、これを考慮することが必要である。具体的な値は、【耐震性能照査マニュアル】に示す。

(1)②について 限界層間変形角は、上下の剛床版に挟まれた柱構造を想定して導いた評価式により算定する。この評価式は、側壁・隔壁と上床版との接合部断面において曲げによる回転変形とひび割れ部における鉄筋の伸び出しを考慮し、部材断面形状、鉄筋量、コンクリート圧縮強度、鉄筋降伏強度、構造物の土被り(断面の軸圧縮応力に換算)等をパラメータとして感度解析を実施し、導いたものである。この評価式では、圧縮縁コンクリートの限界ひずみをかぶりコンクリートの剥落が生じない程度のひずみ量として、限界層間変形角を評価している。評価式の詳細は【耐震性能照査マニュアル】に示す。

(2)について 解析手法によらずせん断破壊に対する限界値をせん断耐力とする理由は、①脆性的な破壊現象であるためせん断耐力以降の変形性能がほとんどないこと、②せん断破壊後の構造物の状態を予測する信頼性のある評価手法が現状ではないこと等である。部材としてのせん断耐力は、照査時点での断面力(曲げモーメント、軸力)分布、荷重の作用形態、部材寸法等に依存することが知られている。本指針におけるせん断耐力評価式は、これらの影響を既往の実験や研究成果などに基づいて適切に考慮している。評価式の詳細は【耐震性能照査マニュアル】に示す。

(1)～(2)について 本指針で設定したこれらの限界値は、現時点での研究成果を参考にして記載したものである。今後これらの限界状態に関する研究が進み、より合理的な限界を算定する方法が開発されたり、実験により確認した場合には、それを適用することができる。

「第5章 解析手法」では、地盤と構造物の非線形性を考慮できる連成系の時刻歴地震応答解析を適用することを標準とすることを記載した。構造物の非線形性を表現する代表的なモデルとして、①部材非線形モデル、②材料非線形モデルがある。照査項目と解析手法の対応関係を示すと次の通りである。

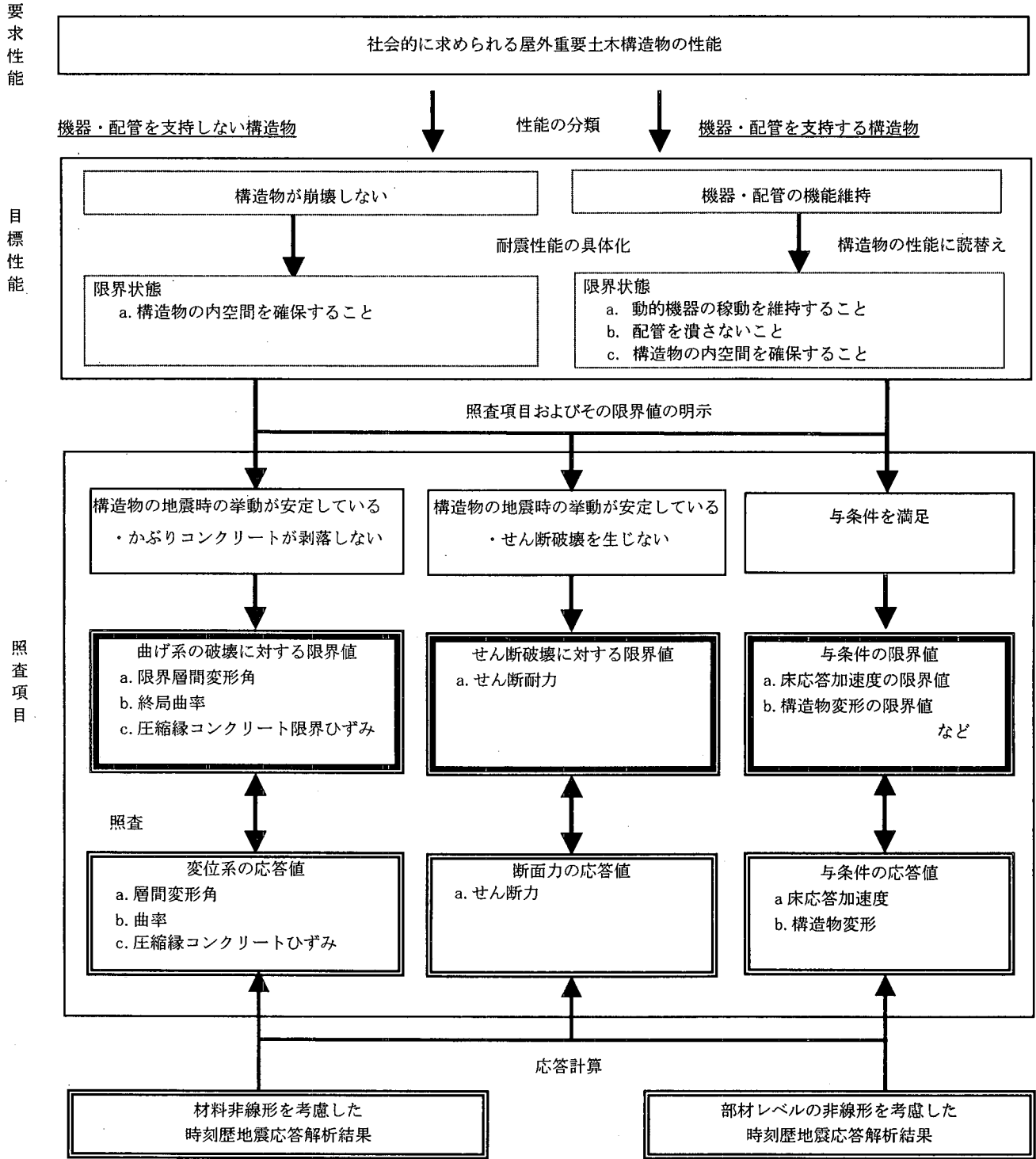
① 部材非線形モデル：層間変形角、曲率変形、せん断力

② 材料非線形モデル：層間変形角、曲率変形、圧縮縁コンクリートひずみ、せん断力

また、照査項目は、構造形式、変形モード等から決定される場合がある。比較的単純なボックスラーメン構造で変形が単純な層変形のモードを呈する構造物の場合には、層間変形角で照査するのが簡便である。構造物の形状が複雑で非対称な構造形式では、変形が単純な層変形のモードとはならないため、曲率変形、圧縮縁コンクリートひずみを照査項目とするのがよい。ただし、これらの断面性能の照査では、構造物全体の履歴挙動の安定性(応答解析による荷重-変形関係が安定したループを描いていること)を確認しておくことを付帯条件とする。

これらの耐震性能照査の流れを解説 図 6.3-2 に示す。また、照査項目の限界値およびその算定法は、【耐震性能照査マニュアル】に示す。

原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針



解説 図 6.3-2 耐震性能照査の流れ

## 6.4 耐久性能照査

### 6.4.1 照査項目とその限界値

次の3項目を、耐久性能の照査項目および限界値とする。

- (1) コンクリートの中性化に対する照査では、中性化が鉄筋の腐食に影響を与えないことを照査項目とし、中性化深さがかぶり以下であることを限界値とする。
- (2) 塩化物イオンの侵入に対する照査では、鉄筋腐食に起因するコンクリートのひび割れの有無を照査項目として、ひび割れが発生する鉄筋の腐食量を限界値とする。
- (3) 凍結融解作用に対する照査では、凍結融解抵抗性が確保されていることを照査項目とし、所要の耐久性指数を限界値とする。

【解 説】 一般に、劣化の進行は不可逆的であるため、設計耐用期間終了時が最も劣化が著しい状態であると考えられる。耐震性能は、この時点の劣化状態を考慮した上での性能として照査すべきものである。しかし、経年劣化を考慮した上で地震応答解析を行うことが現状ではできないため、設計耐用期間終了時点の劣化状況が耐震性能に影響しない範囲であることを確認することにより、耐震性能の時間的な変化は考慮しなくてもよいこととした(本指針「2.5 耐久性能」参照)。

耐震性能に影響しない劣化状況とは、鉄筋腐食に起因するひび割れが発生していない状態、およびコンクリートが所要の品質を保持している状態として、照査項目およびその限界値を設定している。本指針では、耐久性能を満足するために、以下の3項目を照査対象とする。

コンクリートの中性化や塩化物イオンの侵入により鉄筋の腐食が進むと、コンクリートにひび割れが発生し、さらに劣化が進行すると剥離が生じる。しかし、このひび割れが発生する直前では、鉄筋の腐食量はそれほど大きくなく、鉄筋コンクリートの力学的挙動はあまり変化しないことが知られている。

一般に、屋外重要土木構造物が設置される臨海環境では、塩化物イオンの侵入速度がコンクリートの中性化進行速度に比較して著しく速いため、中性化よりも塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食が支配的な劣化機構となる場合が多い。そこで、塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食を主たる劣化機構と考え、塩化物イオンによる鉄筋腐食によりひび割れが発生しないことを照査用の限界値とする。また、中性化が塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食の進行に影響を与えないように、中性化深さがかぶり以下になることも照査することとする。

凍結融解作用については、コンクリートの品質を耐久性指数で照査する。

これらの照査項目の限界値およびその算定法は、【耐震性能照査マニュアル】に示す。