

第1章 照査の基本

※緑字：補足説明

1.1 基本的な考え方

1.1.1 追補版の位置づけと構成 ←2021年版マニュアル1.1.1に補足説明を追記

性能規定化とは、技術基準として必要な性能のみを規定し、これを実現するための具体的な手段や方法等については、多様なものを認めることである。すなわち、性能規定化を行うためには、達成すべき性能が明確に示されること、これを実現する手段や方法が民間規格として存在すること等の一定の条件を満たすことが必要である。

2021年に改訂した「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針」は、技術基準体系のうち民間規格としての性格を有するものであり、達成すべき性能を実現する手段や方法として構造解析手法ならびに照査項目に関する基本方針を示した。性能規定型設計では、照査指標については多様なものを認めているが、照査指標の適用性が確認されている必要がある。今回は、国外での耐震設計・研究、国内での英文作成、国外への情報発信などに広く活用してもらうことを意図して、2021年度版指針<日英版>も同時に刊行することとした。屋外重要土木構造物の要求性能・性能設定および**解析方法・照査指標など**については本指針にて記載されている。

東北地方太平洋沖地震以降の基準地震動の増大に伴って、密な地盤であっても液状化を想定する必要性が生じていた。また、鉄筋コンクリート製地中構造物が非活断層と判定された破砕帯と交差する場合には、耐震性能照査が厳しくなる可能性が懸念されていた。これらを踏まえて、今期の地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会では、「密な地盤の液状化」および「破砕帯」に対する屋外重要土木構造物の耐震性能照査に係る課題に取り組むこととした。2024年度版では、2021年度版の指針・マニュアルの内容は変更せず、基本事項を補足・解説するに留め、「密な地盤の液状化」および「破砕帯」に対する耐震性能照査例および技術資料を新たに追補する方針とした。

基本事項の「**第1章 照査の基本**」では、基本的な考え方や耐震性能照査の前提条件、応答値算出に用いる解析手法および耐震性能照査の概要を示した。「**第2章 密な地盤の液状化に対する影響評価技術**」では、密な地盤の特徴などを追記し、解析に用いる地盤のモデル化において密な地盤での取り扱いなどに関して補足説明を加えた。「**第3章 破砕帯に対する影響評価技術**」では、破砕帯に係る基本事項を整理し、耐震性能照査における破砕帯の考慮方法や照査指標などについて記載した。なお、今回の追補版に係る各検討に用いた地震応答解析手法（部材非線形解析、材料非線形解析、プッシュオーバー解析）に係る耐震性能照査の手順等については、マニュアル 2021年版における**第2章～第4章**に詳述しているため、そちらを参照されたい。

また、「**照査例**」は今回新たに検討した代表的な事例に対して具体的な耐震性能照査の流れが分かるように提示した。さらに、調査研究活動や関連研究成果の詳細については「**技術資料**」で参照できるように配慮した。これらにより、実務における屋外重要土木構造物の耐震性能照査に資することを意図している。

1.1.2 前提条件と適用範囲 ←新規に記載

本指針では、地質・地盤調査結果等から断層活動性評価および地盤の安定性評価は既に行われていることを与条件として屋外重要土木構造物の耐震性能照査を行うことを前提条件としているが、耐震性能照査の全体像を示すために、本指針で与条件とする範囲と本指針で主に扱う範囲を図1.1-1に示す。

(1) 本指針で与条件とする範囲

①地質・地盤の調査

検討対象構造物の基礎地盤に断層が存在する場合には、断層の分布、性状および活動性等の調査を行う。また、地盤物性の取得および地盤のモデルを行うために、敷地内地質調査、地盤調査・試験などを行う。具体的には、原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2021などを参照されたい。

②断層活動性評価

「断層活動性評価」は事前実施され、対象とする断層が将来的に活動する可能性があるかないか、すなわち活断層か非活断層かが判定される。

なお、残余のリスクとして断層変位に対する影響を評価する必要がある場合には、＜別冊＞「断層変位に対する影響評価技術」を参照できる。

③地盤の安定性評価

本追補版では、「地盤の安定性評価」は事前実施されていることを前提とする。概要は「第2章 密な地盤の液化化に対する影響評価技術」2.2も参照されたい。

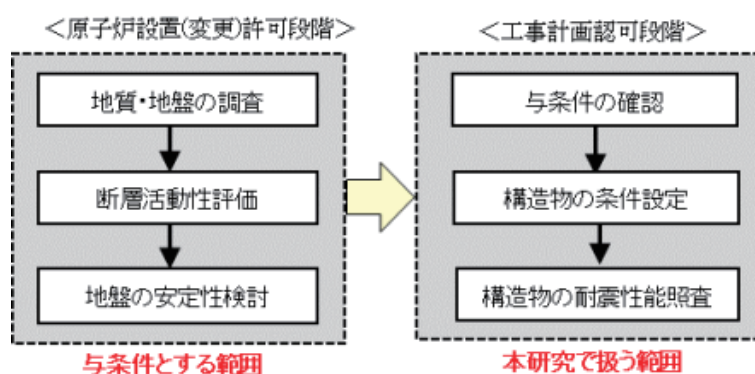


図 1.1-1 本指針における耐震性能照査の全体像と前提条件

(2) 本指針で取り扱う範囲

④与条件の確認

前述に示した①地質・地盤の調査、②断層活動性評価、③地盤の安定性評価が既に行われていることを確認して、屋外重要土木構造物の耐震性能照査に必要な情報を与条件とする。耐震性能照査に必要な情報が不足する場合には、与条件を再確認しなければならない。

本追補版では、「断層活動性評価」は事前実施され、対象とする断層が将来的に活動する可能性が否定された破碎帯であることを前提とする。すなわち、屋外重要土木構造物の耐震性能照査では「活断層」ではない破碎帯を対象としている。概要は「第3章 破碎帯に対する影響評価技術」3.2も参照されたい。

⑤構造物の条件設定

屋外重要土木構造物に対する地震時の性能照査では、基準地震動 S_s を考慮するとともに、構造物の耐震性能を設定する。また、調査した地質条件や地盤物性を整理し、構造物の照査条件（構造寸法・構造形式、断面諸元、使用材料など）を確認する。具体的には、本指針（本追補版）の「照査例」に記載されている。

⑥構造物の耐震性能照査

本指針は、原子力発電所屋外重要土木構造物を対象として、耐震性能照査の基本を示したものである。概

要は「1.2 応答値の算出に用いる解析手法と耐震性能照査」に記載している。詳細はマニュアル2021年版を参照されたい。

1.1.3 本指針に関連する主な文献 ←2021年版指針1.1解説から抜粋・追加

屋外重要土木構造物の耐震性能照査にあたっては、本指針の他に下記の指針・規定などを遵守、参考、準用することができる。

- ・耐震設計に係る工事認可審査ガイド（以下、「工認審査ガイド」という）：原子力規制委員会，2013年6月19日（2020年3月31日改正）
- ・原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2021（以下、「JEAC4601-2021」という）：日本電気協会，2022年
- ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針，マニュアル，照査例，技術資料：土木学会原子力土木委員会 2005年6月（以下、「2005年版指針，マニュアル，照査例，技術資料」という）
- ・2007, 2012, 2017年制定コンクリート標準示方書 [設計編]：土木学会(以下、「示方書 [設計編]」という)
- ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針，マニュアル，照査例，技術資料：土木学会原子力土木委員会 2021年10月（以下、「2021年版指針，マニュアル，照査例，技術資料」という）

これらの指針・規定などは適宜改訂されるため，基本的にはその最新版の内容を遵守，参考・準用することとするが，その内容を十分吟味・理解した上で利用する必要がある。

1.2 応答値の算出に用いる解析手法と耐震性能照査 ←2021年版マニュアル1.2の再掲

1.2.1 解析手法の要件

耐震性能照査においては、以下の要件を満たす解析手法を用いることを標準とする。

(1) 地盤－構造物連成系の時刻歴地震応答解析

地震応答解析に用いられる解析手法は、地盤および構造物の動的挙動の非線形性の程度に応じて線形解析、等価線形解析および非線形解析に大別され、照査の対象となる限界状態に応じて適宜選択される。一般に、高度な解析手法を用いることにより、簡便な解析手法よりも合理的な照査が可能となることから、本指針では非線形時刻歴地震応答解析を標準としている。しかし、比較的簡便な解析手法は関係資料が豊富にあり、既往の実績も十分に得られている場合が多いことから、これを適用して照査を実施することを否定するものではない。各解析手法では、解析される出力値の種類、解析精度、適用範囲等が異なることから、設定される照査項目に応じて解析手法を選択する必要がある。なお、簡便な解析手法を用いたとしても、適用性の判断や結果の解釈は必ずしも容易ではなく、高度な判断能力を必要とする場合もある。表 1.2-1 には、耐震性能の区分とその内容、およびそれぞれの区分に対応できる解析手法の分類と照査項目の例を示す。一般に、高度な解析手法は、簡便な解析手法の適用領域を包含する。

表 1.2-1 耐震性能と地震応答解析手法との対応

目標性能		選択される標準的な解析手法と耐震性能の照査に用いる物理量
区分	限界状態	
1	構造物の構成部材が降伏に至らない	手法①：線形解析 ・鉄筋およびコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力
		手法②：等価線形解析 ・鉄筋およびコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力 ・最大せん断力 ・最大曲げモーメント
2	構造物が最大耐力に至らない	手法③：部材非線形の解析 ・最大曲げモーメント ・最大曲率 ・最大変位 ・最大層間変形角 ・最大せん断力
		手法④：材料非線形の解析 ・最大層間変形角 ・最大せん断力 ・最大変位* ・最大ひずみ
3	構造物が崩壊しない	

※マニュアル 2021 年版第 3 章参照

時刻歴地震応答解析を実施するにあたっては、地盤および構造物それぞれのモデル化を行う上で、以下の事項について留意することが肝要である。

- ①時刻歴地震応答解析開始時点での地盤および構造物の応力状態を定めるために、初期応力解析を行う。
- ②時刻歴地震応答解析においては、応答結果に大きく影響を与える条件の設定に、特に注意を払うことが必要である。このうち、地盤の境界条件については、波動の伝播、エネルギー吸収能を適切に考慮したものでなければならない。
- ③周辺地盤の有限要素分割については、時刻歴地震応答解析に用いる入力加速度波形の特徴と、地盤および構造物の変形モードを考慮して行うことが重要である。

④地中構造物の地震応答挙動は、地盤の応答挙動に支配されるため、地盤および構造物のモデル化を適切に行うためには、あらかじめ自由地盤の時刻歴地震応答解析を行い、地盤のせん断ひずみの最大値に関する深度分布を把握しておくことよい。

(2) 地盤のモデル化

地盤の非線形性を考慮するモデルとしては、比較的小さなひずみ範囲を対象とし、主に周波数領域の計算に用いられる等価線形モデル、大規模なひずみ領域の応力-ひずみ関係の非線形性を考慮し、時間領域での逐次非線形解析に用いられる全応力モデル、有効応力モデルなどがある。全応力モデルと有効応力モデルの相異は、後者が地盤のダイレイタンス特性に起因する間隙水圧の変動を考慮できる点である。一般に、考慮できるひずみの範囲が広がるほどパラメータの数や計算時間が増大するため、地盤のひずみレベルや地下水面の位置などを考慮し適切なモデルを選択する必要がある。特に、飽和地盤を対象として鉛直地震動を動的に入力する場合には、地震のような比較的短時間の現象では土粒子骨格からの水の排水がほとんど生じないため、飽和地盤の体積弾性係数は水のそれよりも小さくならないことが想定される。したがって、地盤の体積弾性係数が地震中に一定となる解析モデルを用いることを基本とする。ただし、地中構造物に与える鉛直地震動の影響がほとんど無いと考えられる場合には、ポアソン比一定の解析モデルを用いても良い。

なお、現時点の解析技術では地盤の液状化評価の信頼性が十分ではないため、全応力解析と有効応力解析の両者を実施することを基本とする。

(3) 構造物のモデル化

地中構造物をモデル化するには、地中構造物の特徴(土圧に起因する分布荷重を受けること)や、地盤要素の設定条件との整合性に配慮することが必要である。

鉄筋コンクリート部材の非線形モデルとして、線材モデルや有限要素モデルがある。これらについては、構造物に予想される応答挙動のレベルを考慮して、適宜選択することが肝要である。はり・柱部材は、線材要素としてモデル化する。鉄筋コンクリート部材としての非線形性を考慮する比較的簡便なモデルであるため、一般に計算時間は比較的短い。しかし、鉄筋コンクリート部材の損傷状況や破壊モードなどの詳細な評価は難しく、部材としての非線形特性が規定された範囲で適用する必要がある。

一方、有限要素モデルは、現在では多数のモデルが提案されており、一般に、線材要素でモデル化した場合と比べより高精度な解析が可能となる。しかし、提案されたモデルの全てが地中構造物の時刻歴地震応答解析に適した構成則であるとは限らないため、その精度と適用範囲が検証されたモデルを用いなければならない。また、有限要素解析の出力情報は膨大であるため、不適切な離散化や境界条件の設定による解析結果への悪影響を見落とす危険性が高い。このため、耐震性能照査に用いる指標のみならず、その他の物理量についても精査し、時刻歴地震応答解析結果の妥当性を確認することが重要である。

表 1.2-2 には、部材非線形解析および材料非線形解析に用いられる要素を分類したものを示した。詳細については、マニュアル 2021 年版「第 2 章 部材非線形解析を用いた耐震性能照査」および「第 3 章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査」で述べるが、各モデルの特徴と構造物の目標性能(限界状態)とを勘案して選択することが重要である。

(4) 境界のモデル化

有限要素法を用いて地盤—構造物連成系の時刻歴地震応答解析を行う場合には、仮想境界を設けて地盤のある有限の領域で区切る必要がある。しかし、これによって構造物の振動、あるいは地盤の不規則な構造によって生ずる散乱波のエネルギーは、その系の中で閉じこめられてしまうことになるため、人為的に導入した仮想境界で波動エネルギーを吸収する工夫が必要となる。その際に用いられる境界としては、粘性境界、エネルギー伝達境界、混合境界、境界要素法との結合手法などが存在する¹⁾。解析を行う際には、対象とする問題の性質とそれぞれの境界条件の特徴に留意して、境界条件を設定する。

エネルギー伝達境界、境界要素法との結合手法は、いずれも周波数領域の解析を基本とするため、時間領域で地震応答解析を実施する場合は、粘性境界や混合境界を用いるのが一般的である。粘性境界は、地盤密度および地盤境界部における変位速度と、S波またはP波速度を乗じて求めた応力を仮想境界上に与えるもので、その取り扱いは容易であり、混合境界のように自由度の増加はない反面、境界に対する散乱波の入射角度によっては、境界におけるエネルギー吸収能が他の手法より劣ることもある。混合境界は、固定境界と自由境界、速度一定境界とひずみ一定境界の組み合わせのように、異なる境界条件から求まる解を重ね合わせる手法であり、粘性境界と比較してエネルギー吸収能は良いものの、有限要素網を全域または部分的に二重化するため、自由度が増大するという短所がある。

いずれの境界処理方法を用いた場合でも、その性能は解析領域内で発生する散乱波の吸収によって評価され、解析対象領域外の地形・地盤条件による影響も含めた解析境界上の応答を評価するものではない。したがって、地震波の特性や地盤のS波、P波速度、剛性の非線形化の程度などによって、解析範囲の妥当性を評価するか、地盤領域の広さを変えて計算を行い、設計の対象となる構造物の加速度や変位などの応答値が、解析領域を変えた場合でも、設計上問題のない程度の変化に留まることなどを確認することが望ましい。

なお、要素長に関しては、一般には、対象とする主要な波長との対応および構造物の変形モードを考慮して適切な長さを選択する。その場合、1波長当たり6～8節点以上が目安となる。

表 1.2-2 地中構造物の解析に用いる要素の分類

解析手法		部材非線形モデル		材料非線形モデル	
モデル化		骨組・シェル要素		有限要素	
二次元解析	要素	はり要素 ^{※1}	ファイバー要素 ^{※1}	平面要素	
	次元	一次元	一次元	二次元	
	構成則	$M-\phi$, $M-\theta$ など	応力-ひずみ曲線	応力-ひずみ曲線	
	ガウス積分	$M-\phi$, $M-\theta$ など	$M-\phi$ に換算	応力-ひずみ	
三次元解析	要素	シェル要素	積層シェル要素	立体要素	
	次元	二次元	二次元	三次元	
	構成則	$M-\phi$ など ^{※2}	応力-ひずみ曲線	応力-ひずみ曲線	
	ガウス積分	$M-\phi$ など ^{※2}	$M-\phi$ に換算	応力-ひずみ	
特徴	汎用性	狭い ← → 広い			
	解析時間	短い ← → 長い			

※1：奥行きを想定した疑似的な三次元効果を考慮した二次元解析が用いられることもある（疑似三次元解析）

※2：現状は線形要素が用いられることも多い

1.2.2 耐震性能照査における応答値算定の手順

(1) 時刻歴地震応答解析の実施手順

耐震性能照査における応答値算定の手順を図 1.2-1 に示す。解析時に留意する項目も併せて示した。

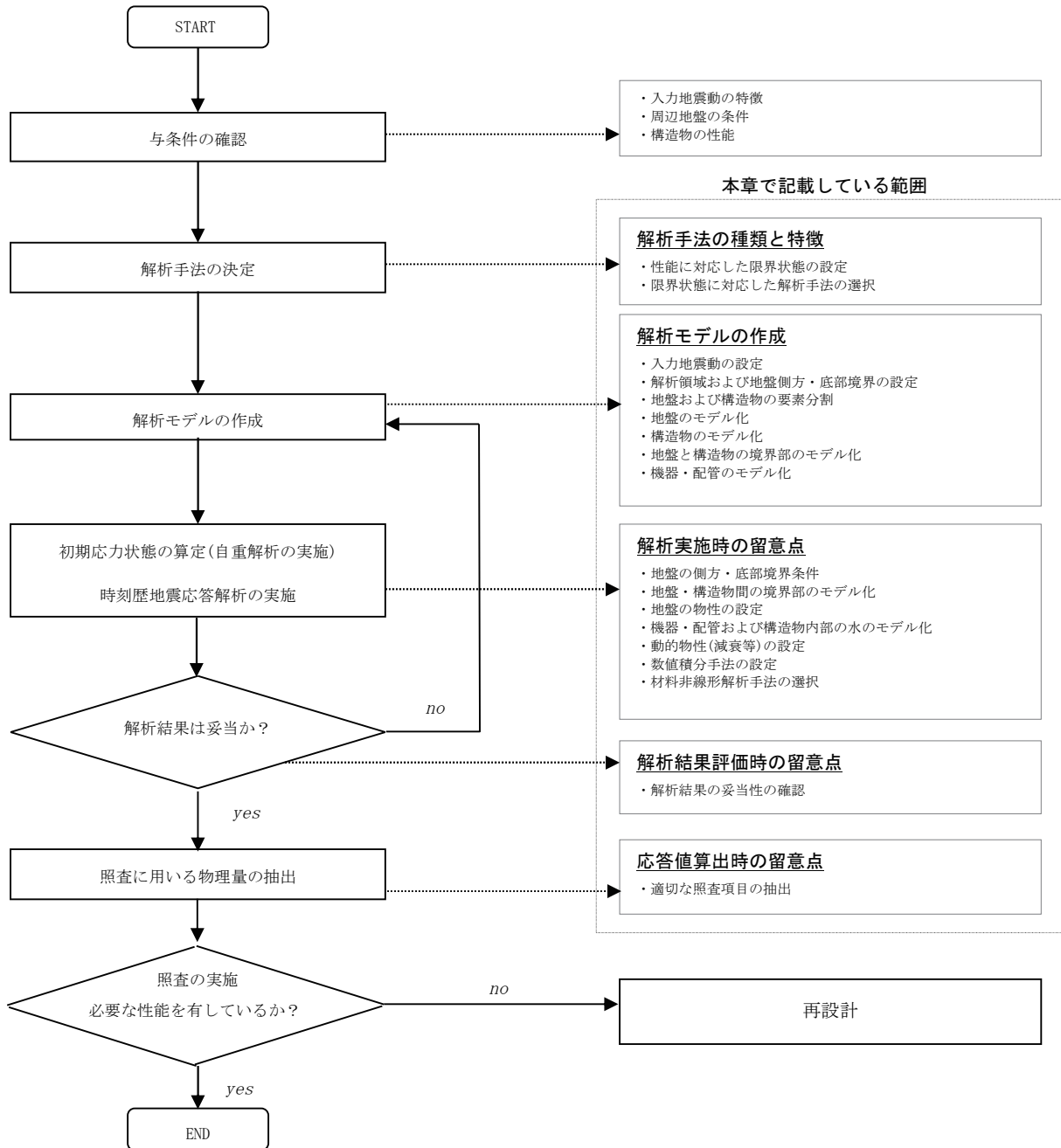


図 1.2-1 地盤-構造物連成系の時刻歴地震応答解析による応答値算出の手順

(2) 解析手法における解析次元の選択

耐震性能照査に用いる解析手法は、図 1.2-1 に示した手順において、前述の「1.2.1 解析手法の要件」に基づいて、耐震性能に対応した限界状態が設定され、その限界状態に対する解析精度が保証される解析手法を決定する。解析手法の決定後、解析モデルの作成段階で、対象とする地盤条件、構造条件、地震作用条件を勘案して必要に応じて二次元または三次元の解析次元についても適切に選択することができる。

マニュアル 2021 年版では、①構造のモデル化、②作用・応答のモデル化、③実務面での照査条件などに

基づいて、工学的に合理的な解析次元を選定することを基本とされている。なお、三次元解析を選択する場合には地盤と構造物の三次元的挙動を適切に評価可能な材料構成則を適用する必要がある。

①では、主として構造条件や地盤条件に対して、対象構造物の変形性状や破壊モードを二次元で適切にモデル化可能かどうかなどといった点を踏まえて判断する。例えば、対象とする構造物が三次元形状であり、二次元解析によるモデル化が適さないなど二次元解析が不合理と判断される場合、および二次元構造であっても地盤条件が三次元に变化している場合などには、三次元解析を選択する必要がある。

②では、地震作用・荷重条件を二次元でモデル化可能か、または二次元断面方向の応答が支配的か、などを踏まえて判断する。例えば、地震動の水平二方向入力の影響が大きく、三次元応答の影響が無視できない場合などには、三次元解析を選択する必要がある。

③では、三次元解析の優位性や照査対象となる地震動レベル、解析に要する負荷（計算時間・費用）、事前の照査結果等を総合的に勘案して判断する。例えば、従来、海水管ダクトや取水ピット等について余裕を見込んで二次元解析により照査していたものの照査用地震動レベルが高くなった場合を想定してみよう。海水管ダクトのような線状構造物では、横断面の地震応答に支配されるので、三次元解析の採用が必ずしも効果的とはならない。この場合には、別途、二次元プッシュオーバー解析によって横断面の全体構造系を対象とした照査を選択するのもよい。取水ピットのような箱型構造物では、実務では妻壁等の三次元効果を考慮した擬似二次元解析が採用される場合もある。これにより耐震性能照査を満足できれば、三次元解析を選択する必要はない。一方、耐震性能照査を満足しない場合、解析に要する負荷を許容できるのであれば、三次元解析の選択が有効である。すなわち、妻壁や側壁等の三次元構造を適切にモデル化して、より実現に近い地震応答を再現することで、合理的な照査が可能である。

1.2.3 照査指標の選定

(1) 照査指標の種別

現状の耐震解析技術において、耐震性能照査で適用できる照査指標を表 1.2-3 に示す。この表では、左列から順に、局所から全体系、すなわち、ミクロからマクロに向かう照査項目を整理した。実務では、同表の「部材全体」または「断面・部位」レベルでの曲げ破壊およびせん断破壊に対する照査項目を設定して、部材破壊に対する照査が行われることが多い。また、材料非線形有限要素解析の応答値である応力・ひずみ等に基づいて「局所（材料）」損傷に対する照査も実施される。なお、「構造全体系」としての水平方向荷重や変位等に関する照査項目を設定することも可能である。この場合には、材料非線形モデルを用いた静的解析法（プッシュオーバー解析）が応答値や限界値の算出に有効となる。なお、「構造全体系」では、部材レベルの曲げ破壊・せん断破壊の破壊モードを区別しない。

一般には、ミクロ側の照査用限界値を安全側に設定することでマクロ側の照査は満足される。すなわち、「局所（材料）」において許容応力度を照査項目に設定すれば、部材レベルの照査は満たされる。また、「断面・部位」の照査項目で部材耐力を曲げ耐力、せん断耐力で照査していれば、おのずと構造物全体系の照査も満足できる。一方で、「局所（材料）」の照査指標において、局所的な材料損傷を大きく許容する場合は、マクロ側の「部材全体」または「構造全体系」での照査などで抑制する必要がある。また、「構造全体系の照査を行う場合は、一部の部材や局所的な材料損傷をある程度許容することが可能である。

表 1.2-3 適用可能な照査指標

照査区分	局所(材料)	断面・部位	部材全体	構造全体系
主な照査指標	・応力，ひずみ（圧縮，引張，せん断） ・正規化累加ひずみエネルギー，偏差ひずみ第2不変量など	・断面力(曲げ，せん断，軸力) ・曲率，回転角，部材厚増分など	・変形角（曲げ：層間変形角など） ・部材変位(せん断：沈下など)	・全体荷重（水平方向・鉛直方向） ・全体変位，変形角
特徴	ミクロ ← → マクロ			

(2) 解析手法と照査指標の組み合わせ

本指針では，耐震性能照査の応答算出に用いる構造解析は，屋外重要土木建造物の非線形挙動を考慮可能な部材非線形解析と材料非線形解析を基本としている．また，地盤と建造物の地震時の応答挙動を適切に評価するために，地盤－建造物連成系の地震応答解析を用いることを標準としている．ただし，静的な地震作用が設定可能な場合には，応答値算出のために静的解析法（プッシュオーバー解析）を適用してもよいものとしており，マニュアル 2021 年版第 4 章では，プッシュオーバー解析による建造物全体系の挙動照査を扱っている．応答解析手法の適用範囲は，それに採用されている地盤や建造物部材または材料の非線形モデルの特性に依存する．一方，照査項目(応力・ひずみ，断面力，変形角など)および照査方法(耐力照査または変形照査)に応じた解析精度が要求される．このため，応答解析手法や想定する限界状態および照査項目などに応じて，適切な照査指標を選定する必要がある．

表 1.2-4 は，応答解析の区分（部材非線形解析と材料非線形解析）に沿って推奨あるいは標準とされる照査項目・指標を示したものである．ここで，本指針で対象とする屋外重要土木建造物の耐震性能照査では，せん断破壊(面外)の照査の影響が大きい場合が多い．このことを踏まえ，同表では，主としてせん断照査指標に着目して，照査指標を①せん断耐力（示方書式），②せん断耐力（等価スパン a/d 考慮），③せん断耐力（材料非線形解析），④偏差ひずみ第 2 不変量(1000μ)，⑤部材厚増分(5mm またはせん断補強筋の破断)，⑥建造物全体系の挙動(概ね最大耐荷力の範囲)，に区分した．これらを参考にして，適切な解析手法と照査指標の組み合わせを選定するとよい．ただし，照査項目はせん断照査だけではなく，照査手法は応答挙動の解析精度や照査指標の適用範囲なども勘案して選択する必要がある．なお，一般に高度な解析手法は簡便な解析手法の適用範囲を包含するため，材料非線形解析を用いてせん断耐力照査を行うことも可能である．

部材非線形解析は，部材としての非線形特性が規定されたマクロモデルを適用しているため，断面力や部材変形の照査との適用性が良い．また，曲げは非線形性を考慮しているものの，せん断は線形であるため，部材非線形解析では，曲げは変形照査としつつも，せん断は耐力照査が基本となる．このようなことから，部材非線形解析に対応した指標は①～③に大別できる．指標①は安全側で簡便な照査が可能であり，横断面に対する照査に多く用いられる．指標①はこれまでの実績が豊富で実務にも適用しやすい．指標②は，応答値算出時に等価スパン a/d を算出する必要があるものの，分布荷重に対する適用性が良く，指標①よりも合理的な耐力照査が可能である．指標③では，部材非線形解析に基づいて静的地震力を設定し，合理的な部材のせん断耐力を評価するために，限界値の設定にせん断の非線形特性を考慮可能な材料非線形解析を適用している．ただし，照査結果は材料非線形解析の精度によって異なるため，それを考慮した安全係数が必要となる．

材料非線形解析では，材料の構成則モデルを適用しており，曲げとせん断ともに非線形性を考慮しているため，曲げ・せん断照査ともに，部材・建造物の変形や材料の損傷に対する照査が可能である．ただし，材

料構成則や解析者の影響および要素寸法依存性などにより、解析結果のばらつきが部材非線形解析よりも相対的に大きい傾向にある。材料非線形解析の特徴を生かした指標として、④～⑥が挙げられる。指標④では、材料の損傷に対する指標を用いるため、一般に適用範囲が広く、局所的な損傷を含めて評価可能であり、三次元解析モデルとの親和性が良い。指標④においては、要素寸法依存性を低減するために、一般に、損傷指標に平均化処理が行われる。しかしながら、通常は平均化領域が固定となるため、構造寸法や部材厚が大きい場合などは、安全側に評価する傾向が否めない。指標⑤は、部材のせん断照査を合理化するため、せん断耐力以降の挙動までに踏み込んだ照査指標である。また、曲げ、せん断ともに部材の変形指標であるため、局所的損傷の影響を受けにくく、指標④に比べて、応答値算出時に要素寸法の影響を受けにくい。指標⑥は、曲げ破壊・せん断破壊を包含した構造物全体の挙動に関する限界値を設定可能とした照査に位置づけられる。指標⑥を設定すれば、照査対象とする限界状態を超過した場合の状態や裕度などを把握するためにも活用することができる。プッシュオーバー解析を用いて指標⑥に基づく照査を実施する場合、地震作用時における静的地震力を用いて、応答値の算出も可能である。ただし、静的地震力を安全側に設定する必要があるため、応答値が安全側に評価されることに留意する必要がある。さらに、地震時応答が複雑な場合には適用が難しく、適用範囲は荷重漸増時における構造物の変形モードが概ね同等な範囲などに限定される。

表 1.2-4 で示した照査指標①～⑥の適用性は次のようになる。指標①～③は、部材の最大耐荷力に至らない範囲において、一般に①→②→③の順に合理的な評価が可能となる。一方、簡便性に関しては、③→②→①の順になることは言うまでもない。指標④については指標①～③と同様に、概ね部材の最大耐力までが適用範囲である。これに対して、指標⑤は、概ね部材が最大耐荷力を超過した後降伏荷重まで低下しない範囲で適用される。指標⑥は、部材としては最大耐荷力を超過し、降伏荷重まで低下する可能性はあるものの、構造物全体としての最大耐荷力に至らない範囲に適用される。これらの特徴を踏まえれば、一般には、④→⑤→⑥の順にせん断照査における合理的な限界状態の設定が可能となると言える。

いずれにせよ、応答解析手法と照査指標の選定に際しては、解析・照査手法の簡便性・保守性や適用範囲、および応答挙動の解析精度、照査可能な限界状態などを総合的に勘案する必要がある。一般に高度な解析手法を採用することにより、簡便な手法で得られる応答量に加えて、実現象に近い部材変形や局所損傷状況を評価できるものの、解析に伴う計算負荷や費用などが増大する傾向にある。このため、より簡便な指標手法で照査可能であれば、必ずしも高度な指標を指向する必要はない。

表 1.2-4 主な応答解析と照査指標の組み合わせ

応答解析		照査項目・指標				
区分	適用範囲・特徴	区分	曲げ破壊	せん断破壊	適用性	
<ul style="list-style-type: none"> ・部材非線形：曲げの非線形性を考慮、せん断は線形 ・地盤・構造物連成解析：地震作用および地震時挙動を概ね適切に評価可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・部材としての非線形特性が規定された範囲で適用 ・断面力や部材変形の照査との適用性が良い ・一般には横断面に対する照査に多く用いられる。 	指標①	層間変形角 曲率 圧縮縁ひずみ	せん断耐力 (示方書式)	<ul style="list-style-type: none"> ・これまでの実績が豊富で実務に適用し易い ・安全側で簡便な耐力照査 	
		指標②	層間変形角 曲率 圧縮縁ひずみ	せん断耐力 (a/d 考慮)	<ul style="list-style-type: none"> ・応答値算出時に等価スパンを算出する必要があるが、分布荷重に対する適用性が良い ・せん断耐力式より合理的な耐力照査 	
		指標③	層間変形角 曲率 圧縮縁ひずみ	せん断耐力 (材料非線形形解析)	<ul style="list-style-type: none"> ・荷重漸増時における部材の変形モードが概ね同等な範囲 ・せん断耐力照査は材料非線形形解析の精度によって異なる ・合理的な部材のせん断耐力照査（非線形性考慮） 	
	<ul style="list-style-type: none"> ・材料非線形：曲げとせん断の非線形性を考慮 ・地盤・構造物連成解析：地震作用および地震時挙動を概ね適切に評価可能 ・プッシュオーバー解析を適用する場合は、静的地震力を安全側に設定し、応答値を安全側に評価する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・材料の構成則として規定された範囲で適用 ・局所的な損傷や収束が過大ではない範囲 ・局所的な材料損傷も評価可能 ・構成則や解析者の影響、要素依存性などが相対的に大きい ・三次元解析に対する適用性が良い 	指標④	正規化累加ひずみ エネルギー (1500 μ)	偏差ひずみ第 2 不変量 (1000 μ)	<ul style="list-style-type: none"> ・部材の曲げ破壊およびせん断破壊を安全側に照査可能 ・材料の損傷指標のため、一般に適用範囲が広い ・構造寸法が大きい場合などに、安全側に評価する傾向がある
			指標⑤	圧縮縁変位差 (面外、面内)	部材厚増分 (5mm, またはせん断補強筋の破断)	<ul style="list-style-type: none"> ・部材の変形照査（非線形考慮） ・部材の合理的な変形照査を適用 ・曲げ、せん断ともに部材の変形照査のため、局所的な損傷や要素寸法の影響を受けにくい
			指標⑥	部材の損傷状況(終局ひずみ)の確認 構造物全体系の挙動(概ね最大耐力の範囲)		<ul style="list-style-type: none"> ・曲げ破壊・せん断破壊を包含して最も合理的な限界値を設定可能 ・荷重漸増時における構造物の変形モードが概ね同等な範囲 ・限界状態を超過した後の挙動も把握することが可能