

第2章 密な地盤の液状化に対する影響評価技術

2.1 照査の前提

構造物周辺地盤の液状化の検討は、一般的には緩く堆積した砂などの非粘性地盤が対象であり、原子力発電所屋外重要土木構造物の埋戻土のように締め固め管理された密な砂礫地盤は、これまで液状化しにくい地盤とされてきた。一方で、原子力発電所に係わる新規規制基準の制定および地震に関する知見の蓄積により、基準地震動が見直され増大していく趨勢にあり、加速度振幅が大きく継続時間の長い地震波形が基準地震動として策定されることが多くなっている。そういった地震動が入力された場合、密な砂礫地盤においても過剰間隙水圧が蓄積し、有効応力がほとんどゼロになる瞬間が生じるという意味においては、液状化に至る可能性があり、それを考慮した耐震安全性評価が求められている。本章では、密な砂礫地盤中に構築される屋外重要土木構造物の耐震性能照査に関して、基本事項を整理した上で、解析手法の選定と応答値の算出および耐震性能照査における扱いについて記載する。なお、境界条件に依存する排水性および地盤の細粒分に依存する透水性については、別途検討する必要がある。

一般的な耐震性能照査の流れは、本編である「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 2021」（以下、**2021 年版指針・マニュアル**という）に基づくものとする。地盤のモデル化手法については、**2021 年版マニュアル**の「1.3 解析に用いる地盤のモデル」に記載されており、本章「2.3 解析モデルの作成と応答値の算出」に記載した解析手法が適用可能である。また、部材非線形解析を適用する場合には**2021 年版マニュアル**の「第2章 部材非線形解析を用いた耐震性能照査」を、材料非線形解析を適用する場合は**2021 年版マニュアル**の「第3章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査」を、プッシュオーバー解析を適用する場合には**2021 年版マニュアル**の「第4章 プッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査」をそれぞれ参照するものとする。

2.2 基本事項の整理

2.2.1 対象とする地盤と液状化

(1) 密な地盤

原子力発電所の屋外重要土木構造物は、その構築後、原子炉建屋等の掘削時に発生した岩ずり等を用いて、所定の締固め度となるように施工管理されて埋め戻される。よって、本章で対象とする密な地盤は、締固め度 90%以上に管理された密な砂礫地盤とする。なお、既往の研究¹⁾では、岩ずりの材料特性は砂礫の性質と類似しており、過剰間隙水圧は上昇するものの、それによる大変形が起こりにくいことが示唆されている。

(2) 液状化

土木学会地震工学委員会「レベル 2 地震動による液状化研究小委員会」活動成果報告²⁾によると、液状化は図 2.2-1 のように分類されている。液状化は一般的には緩い非粘性土（飽和した砂や砂礫等）で生じる**非排水条件下**での「(狭義の) 液状化」を示すが、本章では密な砂礫地盤を対象としているため広義の液状化の一部である「繰返し軟化（サイクリックモビリティを含む）」を主な対象とする。なお、実際の地盤は多層構造であり、図 2.2-1 のように明確に分類されないことに留意する必要がある。

「(狭義の) 液状化」とは、地震の繰返しせん断力などによって、飽和した砂や砂礫などの緩い非粘性土からなる地盤内で間隙水圧が上昇・蓄積し、有効応力がゼロまで低下し液体状となり、その後地盤の『流動』をともなう現象、または『流動ポテンシャル』をもった地盤となる現象をいう²⁾。その時、有効応力がゼロ付近のままの状態が継続的に発生する。それに対して、広義の液状化（サイクリックモビリティ）では、有効応力がゼロ付近の状態と、正のダイレイタンスにより負の過剰間隙水圧が発生し有効応力が回復する（モビリティ）状態が交互に繰り返される（サイクリック）。

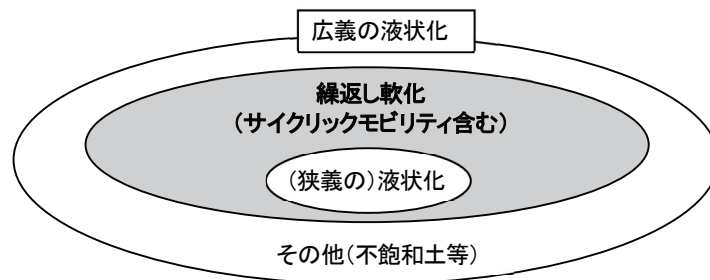


図 2.2-1 液状化の分類²⁾

2.2.2 密な地盤の液状化の特徴

飽和した密な砂礫地盤が繰返しせん断を受ける場合には、繰返し軟化に加えてサイクリックモビリティと呼ばれる挙動を示す。砂礫地盤が繰返しせん断を受けると、地盤を構成する土粒子が互いに隙間に落ち込もうとする方向に土粒子の再配列が生じ、土骨格に負のダイレイタンス（体積収縮）が発生する。飽和地盤では、間隙水の移動にはある程度の時間が必要となるため、地震のような短時間の現象では、瞬間的には概ね非排水条件となる。そのため、実際に土骨格が圧縮する代わりに、圧縮しようとした土骨格を押し返すための正の過剰間隙水圧が発生する。その結果として有効応力が減少し、それに伴いせん断剛性が低下し、せん断ひずみが増加する。さらにせん断ひずみが増加すると、よほど緩い地盤、例えば相対密度 50%未満の砂質土でない限り、土粒子が互いに乗り上げる挙動を示すことで、土骨格には正のダイレイタンス（体積膨張）が発生しようとする。その時、やはり短時間の現象で間隙水の移動が制限されると、実際に体積が膨張する代わりに、土骨格の膨張を抑制する方向の負の過剰間隙水圧が発生する。その結果、有効応力が回復または初期応力以上となり、有効応力が大きくなることで土のせん断剛性も大きくなる（図 2.2-2）。その過程で発生するひずみは限定的であり、密な砂礫ほど、より小さなひずみで正のダイレイタンスが発生することになる。地震波のように、荷重方向が頻繁に反転する場合、この過程が交互に繰り返されることになり、いわゆる“サイクリックモビリティ”という現象になる。

ここで注意が必要なのは、①密な地盤ほど正のダイレイタンスを発揮するために必要なひずみが小さい、②室内試験の結果においては繰返しせん断回数が増えるほど正のダイレイタンスを発揮するためその必要なひずみが拡大していくという性質がある³⁾ため、実際の地盤の地震応答では、過剰間隙水圧の時刻歴において、密な地盤の方が負の過剰間隙水圧が大きく・何度も観察され易いという傾向があるだけであり、サイクリックモビリティは密な地盤の“性質”ではない。すなわち、緩い地盤においても、モビリティに達するまでのせん断がサイクリックに行われれば、粒状体の“性質”としては、室内実験のようにサイクリックモビリティが観察されることになる。

しかし、実際の地盤応答を考えた場合、そのような大きなひずみが発生する前に地震波の方向は反転するか、地盤全体としては高次のモードの振動に転換し³⁾、やはり大きなせん断ひずみにいたらないため、緩い地盤では、現実的には“サイクリック”に“モビリティ”は観測されず、室内試験で（緩い供試体でも）見られるような応力経路やせん断応力-せん断ひずみの関係が確認できないというだけである。通常地震波の周波数成分・振幅では、振動成分による変形は高々数%であるため、緩い地盤では正のダイレイタンスが発生するひずみ領域には達しないが、斜面の変形が停止するような残留変位を対象とする場合には、緩い地盤であっても正のダイレイタンスが発生するまでに発生するひずみの大きさとそれによる有効応力や剛性の回復が重要となる。その極端な場合、すなわち極端に地盤密度が小さい場合はいわゆる液状化時の“側方流動”と呼ばれる現象になる⁴⁾

設計上の観点から整理すると、初期密度が小さい緩い砂礫地盤では、負のダイレイタンス（体積収縮）が発生することより有効応力がゼロになってしまうタイミングで地上構造物がある場合には支持力を失い、地上構造物

に大きな沈下・傾斜等が発生する原因となる。また、有効応力がゼロになった後、地盤剛性が回復するまでのせん断ひずみ量が大きくなるため、液状化地盤として地中構造物に対する地震被害も多く、地盤改良等の対策が必要な地盤として分類される。

一方で、密な砂礫地盤の場合には、繰返しせん断によって間隙水圧が上昇し、有効拘束圧ゼロとなっても直ちに破壊するには至らず、繰返しせん断の進行に伴って徐々にひずみが増大する。せん断応力比 0.3 以上ではせん断応力比の増加に伴う液状化強度の低下も少ないと言われている。これまで構造物に対して大きな被害事例の報告も少なく、**地盤のせん断ひずみ量が増大する過程において正のダイレイタンスーにより地盤剛性が回復するため**、液状化しない地盤として整理されている。密な砂礫地盤では、サイクリックモビリティの特性が顕著に表れて、地盤剛性が低下したり、回復したりを何回も繰り返すことになる。一般的な材料特性、例えばコンクリート材料のようにひずみが増加することで塑性化して剛性が低下するケースとは真逆の特性である。これは、コンクリートではひずみが増加することでクラック等が増加し部材としての要件を満たさなくなるのに対し、土では最初から粒々の状態であり、単にその配置が変わることで変形しているため、せん断面の形成などの局所化が発生しない限り、同じ挙動が繰り返されることによる。

緩い砂と密な砂において中空ねじりの室内試験結果を実施した結果を図 2.2-3 に示す。密な砂の挙動を解析にて再現する場合には、これら特性を表現できる地盤モデルを適用することが求められる。緩い砂では、数回の繰返し載荷で、有効応力がゼロ近くまで低下し、直後に大きなせん断ひずみが発生する。一方で、密な砂では、徐々に有効応力が低下するものの、せん断ひずみは徐々に大きくなる。

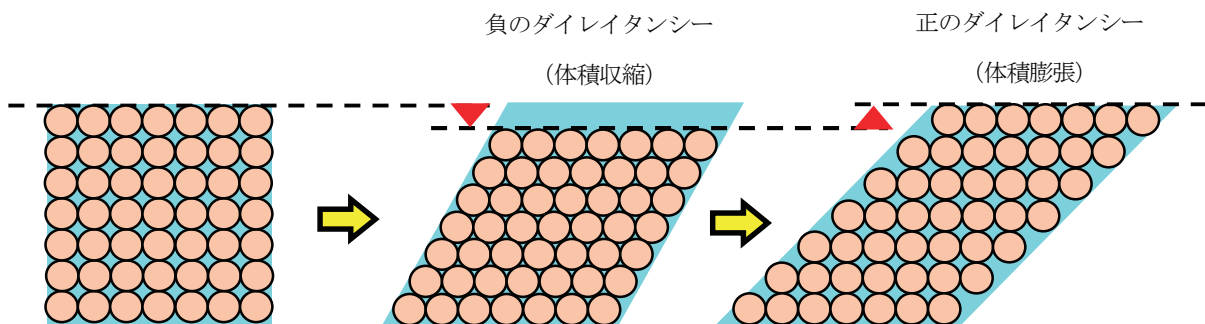


図 2.2-2 砂地盤の正負ダイレイタンスー挙動

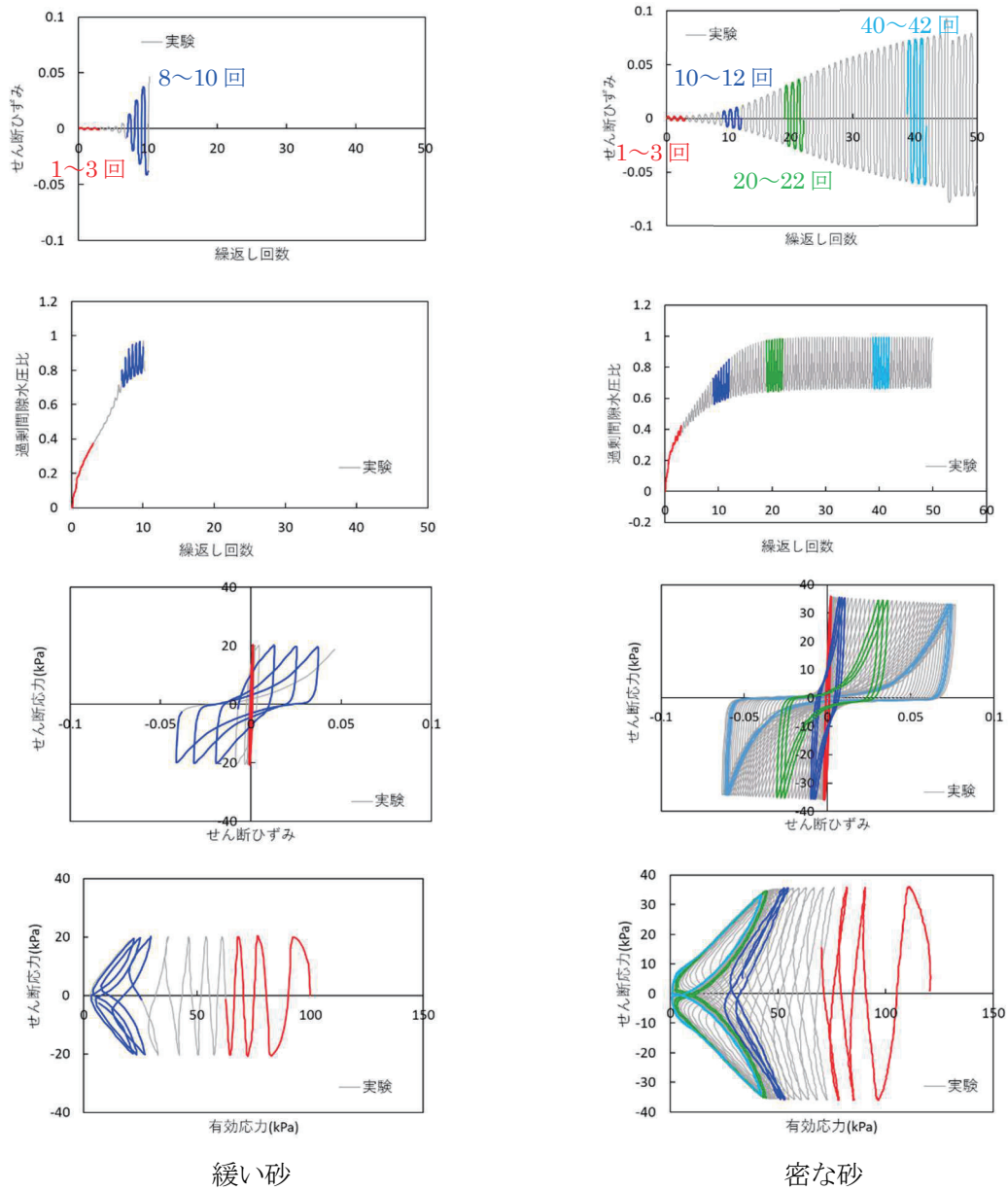


図 2.2-3 中空ねじりの室内試験結果 (緩い砂と密な砂との比較)

2.3 解析モデルの作成と応答値の算出

2.3.1 密な地盤のモデル化

原子力発電所においては、砂礫地盤の液状化現象を考慮する方法として、間隙水圧の蓄積を考慮した有効応力解析手法が広く活用されている。本解析手法は、地震時における地盤内の有効応力の変化を踏まえて、屋外重要土木構造物および津波防護施設等の耐震評価が必要な場合に適用されている。

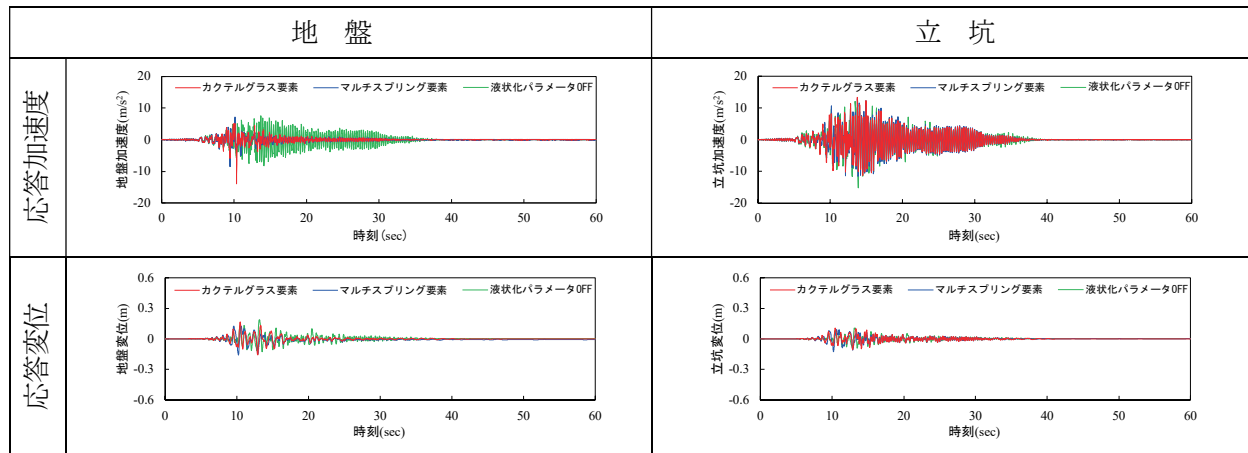
新規制基準⁵⁾による審査では、水・土骨格の二相混合体理論に基づき土骨格を弾塑性構成式で定式化した解析コード「FLIPROSE 2D」のマルチスプリングモデル⁶⁾を用いた有効応力解析が主流である。同解析コードは港湾施設の設計において十分な実績を有しており、近年では、FLIP マルチスプリングモデルでは考慮できなかった過剰間隙水圧の消散に伴う沈下等を考慮可能な FLIP カクテルグラスモデル⁷⁾が開発されており、今後の新規制基準による審査での活用が期待される。この他、液状化影響評価における審査実績はないものの、GEOASIA、LIQCA 等が開発されている。これら解析コードの特徴については、文献 8 を参照されたい。

密な砂礫地盤を対象に、有効応力解析において、間隙水圧の上昇・消散を考慮したケース（FLIP カクテルグラスモデル）と、過剰間隙水圧の上昇のみを考慮するケース（FLIP マルチスプリングモデル）および液状化を規定するパラメータを OFF にしたケースとの比較を図 2.3-1 に示す。最大変位および最大加速度に着目すると、神戸波（内陸型地震）のような継続時間が短い地震波では、3つのケースで概ね同等になっている。これは密な地盤で繰り返しが比較的少ない地震波では、過剰間隙水圧が上昇するものの地盤変位が大きくなることから、その影響が小さかったことを示している。一方で、十勝沖波（海洋プレート型地震波）のように継続時間が長い地震波の場合には、過剰間隙水圧の上昇・消散およびサイクリックモビリティの影響を考慮できる FLIP カクテルグラスモデルを用いたケースで最大変位および最大加速度が大きくなっている。これは、地震波の繰り返し振幅が連続し、地震波の後半にも大きな加速度が入力されるような場合には、それまでの応答変位の蓄積とサイクリックモビリティによる地盤剛性の回復の影響により、構造物に作用する荷重が大きくなる可能性があることを示している。

以上より、非線形挙動を考慮した耐震安全性評価が必要な場合には、構造物モデルの選定だけでなく、地盤モデルについてもその特徴を把握し、構造物と地盤との相互作用として保守的な評価結果になるように適切な地盤モデルの選定する必要がある。

なお、評価対象構造物の周辺に、①不透水層など透水係数に差異がある地盤が存在する場合、②盛土などの偏荷重により地盤に残留変位が生じる可能性がある場合には、これらを適切にモデル化するなど地盤のモデル化に留意する必要がある。

神戸波 (内陸型地震波)



十勝沖波 (海洋プレート型地震波)

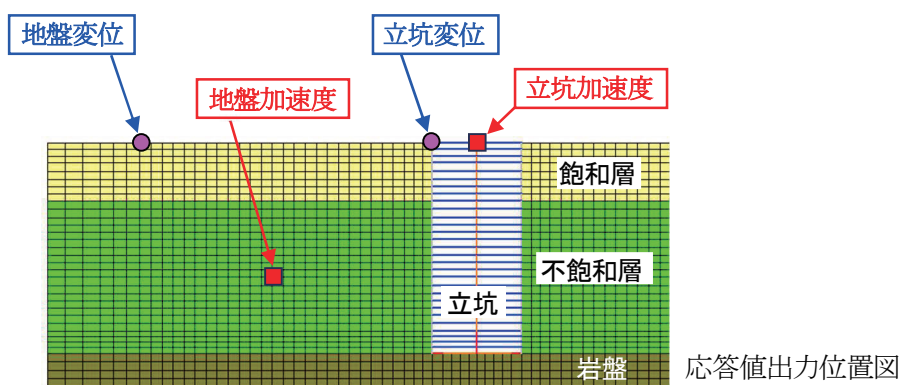
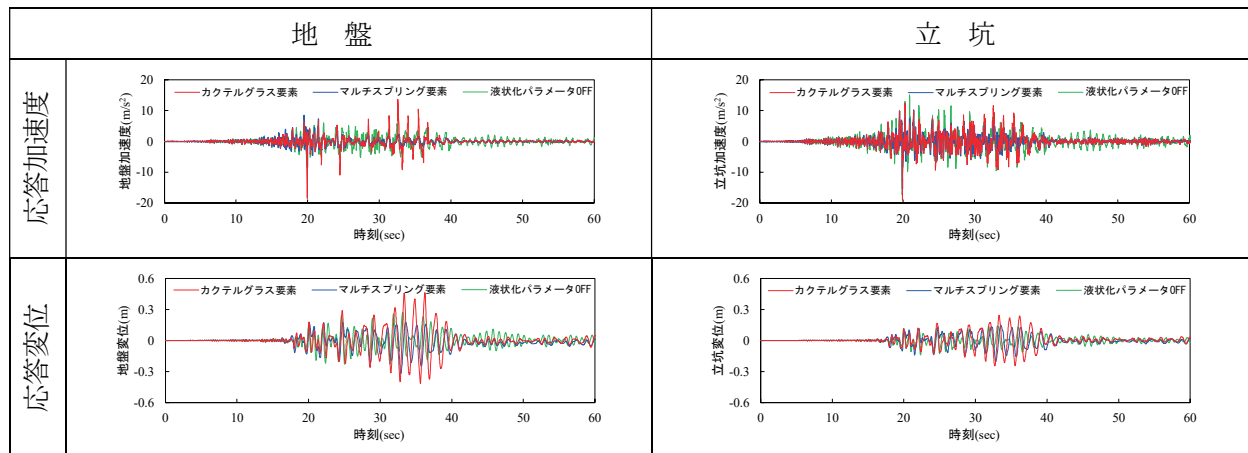


図 2.3-1 有効応力解析による応答解析結果の一例

2.3.2 応答値算出に用いる主な解析手法

屋外重要土木構造物および津波防護施設等の耐震評価においては、地盤と構造物の動的相互作用を考慮できる構造物—地盤連成の地震応答解析を適用することが一般的である。原子力規制委員会によって制定された「耐震設計に関わる設工認審査ガイド」⁹⁾においても、屋外重要土木構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる連成系の地震応答解析が原則とされている。屋外重要構造物の耐震評価において地震時作用を詳細に予測するためには数値解析の適用が不可欠であり、その結果を設計や性能評価に用いる場合にはそこで得られた結果が信頼できるものであることが必要とされる。

屋外重要土木構造物は、一般にボックスカルバートのように同じ輪切り断面が連続する構造物に対して、二次元モデルを作成し、構造物—地盤連成系の二次元地震応答解析が適用されている。一方で、箱型構造物、立坑構造物（矩形断面、円形断面）および複雑な形状の地中構造物に対しては、三次元形状を考慮した解析が求められる。そのような場合に、地盤と構造物との相互作用を考慮するために、地盤と構造物の両方を三次元でモデル化した構造物—地盤連成系の三次元地震応答解析が最も再現性があると考えられる。三次元地震応答解析では、特に構造物が複雑な構造であり地盤に起伏や傾斜がある場合には、そのモデル化と解析に時間とコストが必要となる。そのため、実務では、安全側になるように配慮した二次元地震応答解析手法、二次元地震応答解析（作用荷重評価）とプッシュオーバー解析（構造物損傷評価）との二段階に分離した解析手法が用いられている。後者は、**構造物を等価な剛性**を有する二次元モデルに置き換えて、構造物—地盤連成系の二次元地震応答解析を実施し、そこから算出される作用荷重を三次元構造物モデルに漸増載荷する方法である。プッシュオーバー解析手順の一例を図 2.3-2 に示す。

なお、一般的な地中構造物については、これまで応答変位法が適用されるケースが多かったが、サイクリックモビリティのような地盤剛性が低下した後に再び回復するような現象に対して地盤バネを適切に設定することは難しく、安全側の設定などが必要とされる。また、密な砂礫地盤を対象に、応答変位法を適用する場合には、サイクリックモビリティの影響により地盤剛性が回復した直後に、作用土圧および応答加速度が最大となることから、構造物の設計では、最大土圧と最大応答加速度による作用が概ね同時に加わることを考慮する必要がある。

新規制基準による審査実績では、**液状化の有無による影響を検討するため、FLIP を用いた地震時の有効応力の低下を考慮した解析に加えて、FLIP の液状化を規定するパラメータを OFF にすることにより地震時の有効応力の低下を考慮しない解析も実施される。**これは、地震時に地盤が液状化するよりも液状化しない状況の方が、間接支持構造物の床応答が短周期側に大きくなり機器・配管系に対してより厳しい評価となるケースも想定されること、構造物に作用する土圧や加速度が大きくなり構造物に対してもより厳しい評価となるケースも想定されることによる。

このように、着目点や状況に応じて、保守的・安全側の評価になるように、適した解析手法・解析条件（地盤の物性値など）の設定が必要となる。

本章では、実務的な二次元でモデル化する手法および二段階にモデルを分離した解析を実施する手法、より合理的な評価が可能な三次元解析手法を示す。

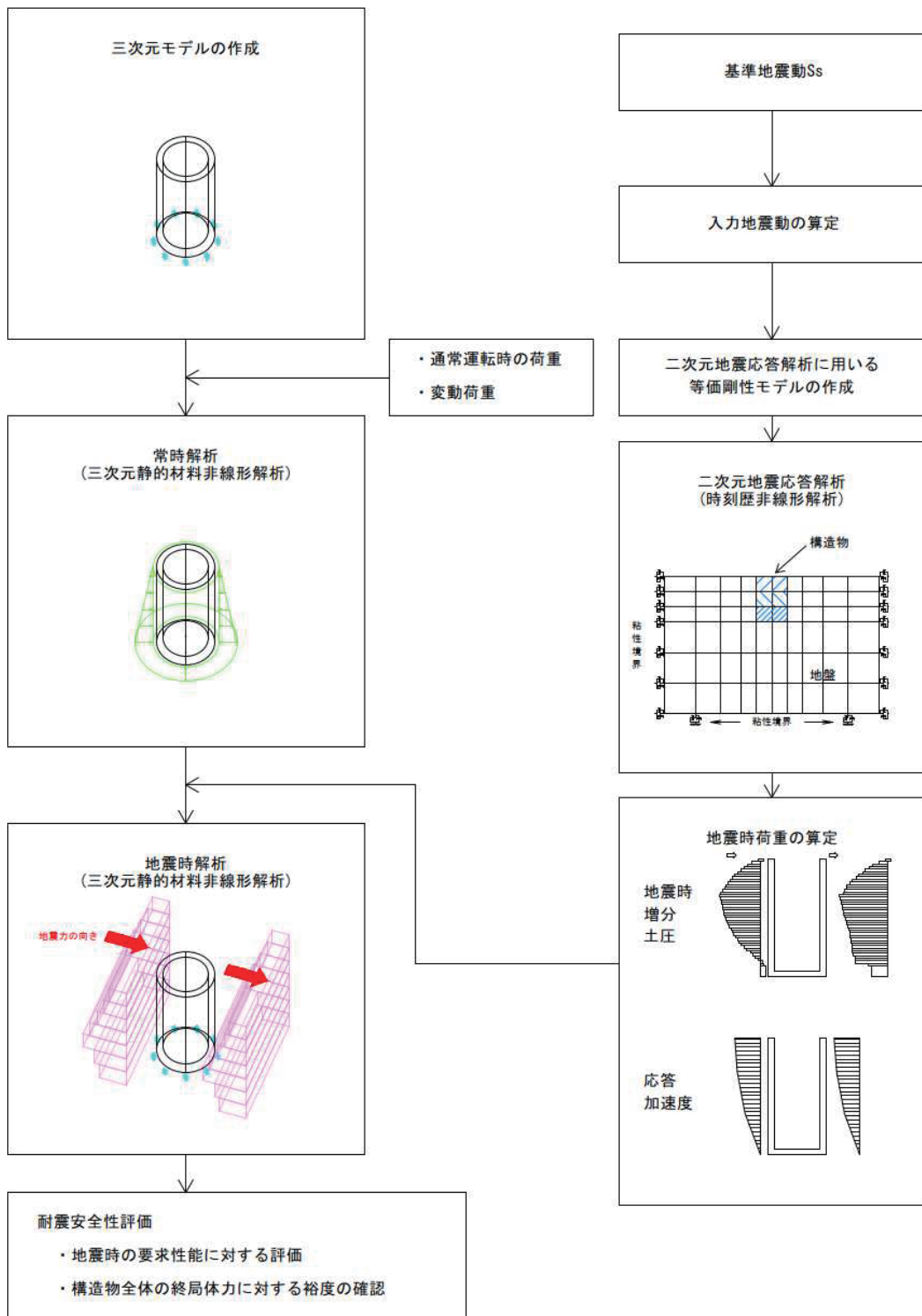


図 2.3-2 プッシュオーバー解析手順の一例

2.4 耐震性能照査

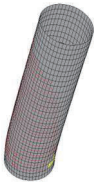
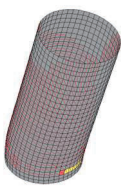

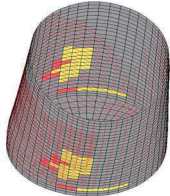

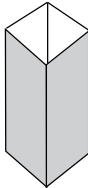
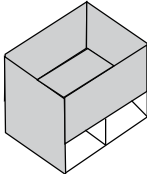
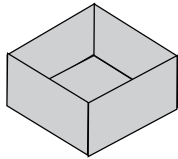
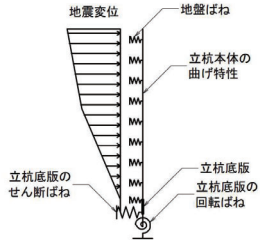
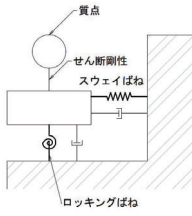
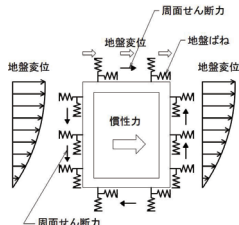
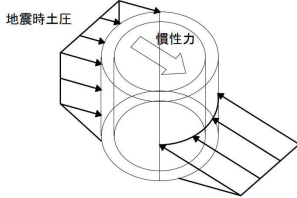
密な砂礫地盤中に構築された鉄筋コンクリート構造物の耐震性能照査方法の一例として、円形立坑を対象とした耐震性能照査方法を以下に示す。なお、本節に示す耐震性能照査方法は、密な地盤中に構築された円形立坑のみならず、一般的な地盤や矩形立坑にも適用できる。

2.4.1 損傷モードの把握

構造物を設計する上で、構造物の靱性や要求性能に対する余裕度を考慮する意味で、構造物の損傷モードを把握しておくことは重要である。屋外重要土木構造物の種別、要求性能より様々な形状の構造物が選定または必要とされており、その形状により同じ役割の構造物であっても損傷モードが異なる。よって、構造物に対する解析モデルの選定を間違えると、実際の損傷モードを再現できない可能性があるため、解析モデルの選定に当たっては、損傷モードの再現性に注意が必要である。

三次元ソリッドモデルでモデル化した場合は、その再現性に問題はないが、上記に記載したような三次元的特性を持つ構造物を二次元モデルとしてモデル化する場合には、その損傷モードを把握し、二次元モデルにおいて損傷モードを再現できるようなモデル化または保守的な評価結果となるモデル化を行う必要がある。

損傷モードの変化する一例を図 2.4-1 に示す。図 2.4-1 は、円形立坑を対象として、立坑の高さ (H) を固定し直径 (D) を変化させ、縦横比 (D/H) 0.2~1.4 にける構造物の損傷モードの変化について検討したものである。変形ひび割れ図より、縦横比が小さい場合 (本例では 0.2~0.4)、側壁下端の曲げ圧縮を受ける側でコンクリート圧縮損傷が生じ、曲げ引っ張りを受ける側で多数のひび割れが発生し、構造物の全体系での曲げ損傷であることが分かる。縦横比が大きくなる (本例では 0.4~1.0) につれ、曲げ損傷から側壁下端の側部の方にコンクリートの圧縮域が移動し、側壁の面内せん断損傷が卓越するように変化している (本例では縦横比 1.0 において、コンクリートひび割れは壁側面全体に広がり、コンクリートを貫通するひび割れが発生している)。更に縦横比が大きくなると (本例では 1.0~1.4)、面内せん断損傷に追加して、地震時の水平土圧が作用する前面側の側壁の面外曲げ損傷が生じる。なお、本例では面外せん断損傷について線形でのモデル化であり、せん断破壊先行モードの場合には、適切に評価できない可能性があり、注意が必要である。また図 2.4-1 の下段に、一般的に適用されている「簡便化した解析モデル例」および「三次元モデルによる解析が必要な範囲」についての一例を示している。曲げ損傷となる縦横比 (本例では 0.2~0.4) では、構造物をはり要素でモデル化できる (断面力などによる照査)。面内せん断損傷が卓越する縦横比 (本例では 1.0) では、面内せん断壁のみでモデル化できる (面内変形角などによる照査)。面内せん断損傷および面外曲げ損傷が生じる縦横比 (本例では 1.4) では、安全側に配慮した輪切り断面をはり要素でモデル化できる (断面力などによる照査)。なお、面内せん断損傷が生じる場合 (本例では 0.4~1.4) には、その影響を適切に評価可能な三次元モデルが有効となる。

縦横比※	小 ←————→ 大			
	(0.2)	(0.4)	(1.0)	(1.4)
変形ひび割れ図	 曲げ破壊	 曲げ破壊	 面内せん断破壊	 面外曲げ破壊
代表的な構造物	杭 	立坑 	箱型構造物, ポンプ室 	貯水槽 
簡便化した解析モデル例				
詳細モデル (三次元モデル) 例				

※縦横比=直径(D)÷高さ(H)
() 内は、本例における参考値を示す。

図 2.4-1 円形立坑の損傷モード変化の一例

2.4.2 主な照査手法

有効応力解析等から得られた応答値に基づき、対象構造物の耐震性能評価を実施する。耐震性能評価は、第1章に示す対象構造物の用途、要求性能等に対応した照査を行う。

地震波のように作用が繰り返し発生し、それに耐えうる構造性能を保守的に担保するためには、対象構造物の各部材に対して終局耐力以下に応答値を抑える必要がある。一方で、一定の損傷を許容する場合には、構造物全体系での崩壊を表現できる指標を選定し、その限界値以下に抑える手法を用いることができる。

各機能に対する損傷指標とその閾値について、構造物の損傷状況（縦軸）と対比した一例を図2.4-2に示す。なお、構造物全体崩壊の照査に用いる指標「構造全体変形角・変位」の閾値については、対象構造物の構造形式や損傷モードを勘案して、構造物全体系のプッシュオーバー解析などにより設定する。

密な砂礫地盤中に構築される鉄筋コンクリート構造物の照査の一例として、屋外重要土木構造物で一般的に用いられている照査手法を適用した円形断面を持つ海水管立坑の照査例を以下に示す。

(1) 二次元地震応答解析による断面力照査

照査例Ⅰに、2021年版マニュアル「第2章 部材非線形解析を用いた耐震性能照査」の2.3節に基づいて、構造物－地盤連成系の二次元地震応答解析を行い、構造物の断面力による照査の一例を示す。

(2) 三次元非線形のプッシュオーバー解析を用いた照査

照査例Ⅱに、2021年版マニュアル「第4章 プッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査」の4.3節に基づいて、構造物を等価な剛性を有する二次元モデルに置き換えた構造物－地盤連成系の二次元地震応答解析による構造物への作用荷重（地震時荷重）の算定と、構造物単体の三次元静的非線形解析により算定されるひずみなどによる照査の一例を示す。

(3) 三次元動的非線形解析によるひずみ等の照査

照査例Ⅲに、2021年版マニュアルの「第3章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査」の3.3節に基づいて、構造物－地盤連成系の三次元地震応答解析を行い、構造物のひずみなどによる照査の一例を示す。

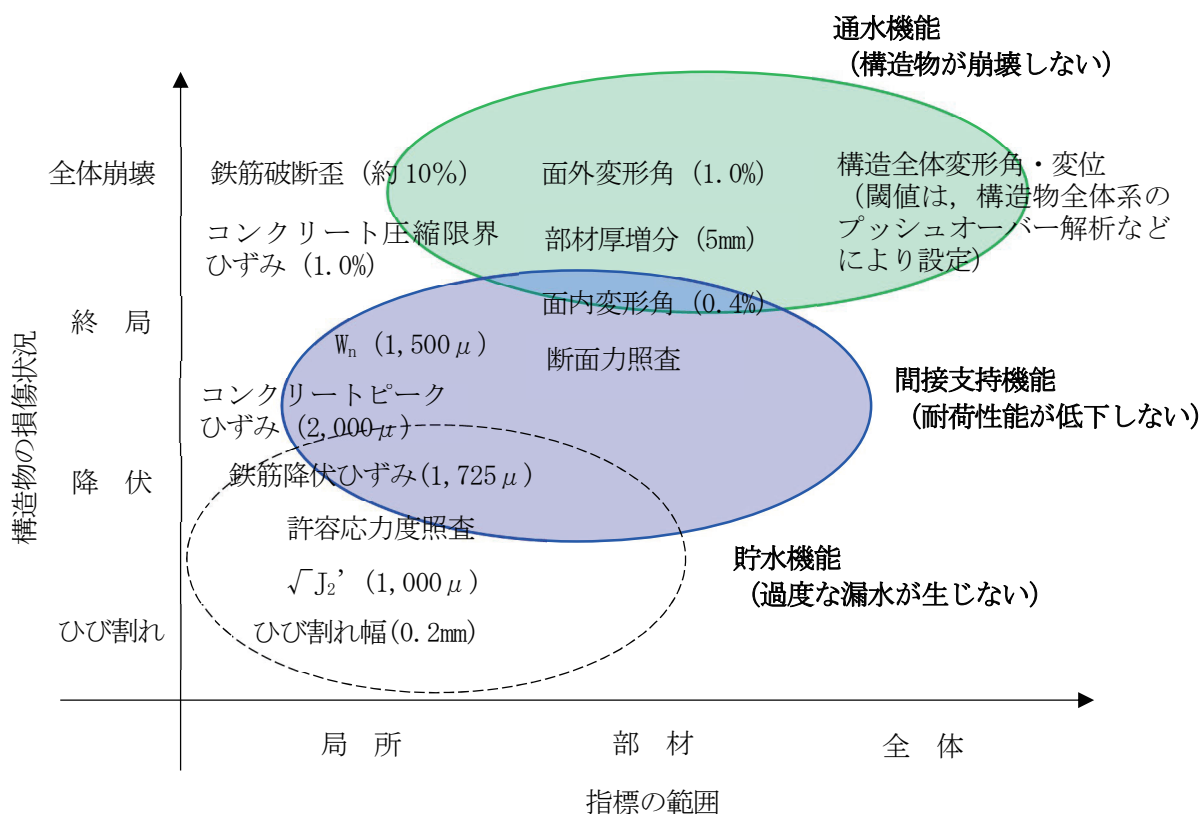


図 2.4-2 各機能に対する損傷指標とその閾値の一例

参考文献

- 1) 土木学会原子力土木委員会基礎地盤の変形評価に関する研究小委員会：原子力発電所における基礎地盤の変形評価技術<技術資料>「2023年度版」, 2024.10.
- 2) 土木学会・地震工学委員会・レベル2地震動による液状化研究小委員会：レベル2地震動による液状化研究小委員会活動成果報告書, 2003.
- 3) 佐藤清：振動台実験および室内土質試験による密な飽和砂質地盤のモビリティ挙動の理解と設計における評価手法の提案, 東北大学学位論文, 2022.10.25. (<https://tohoku.repo.nii.ac.jp/records/138544>)
- 4) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫：液状化に伴う簡易評価方法：土木学会論文集, No. 638, III-49, pp.71-89, 1999.12.
- 5) 原子力規制委員会：実用発電用原子炉に係る新規制基準について－概要－, 2016.2
- 6) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp.1-15, 1992.
- 7) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K. : Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 35, No. 3, pp.360-392, 2011.
- 8) 室井謙吾：みずほリサーチテックノロジーズ コンサルティングレポート vol.2, 2022 (https://www.mizuho-rt.co.jp/publication/report/2022/pdf/mhrt02_liquefaction.pdf)
- 9) 原子力規制委員会：耐震設計に係る設工認審査ガイド, 令和3年6月23日