

河川構造物の耐震性能照査指針・解説
— V. 揚排水機場編 —

令和6年3月

国土交通省水管理・国土保全局治水課

まえがき

本編は国土交通省河川砂防技術基準のうち揚排水機場の耐震性能の照査に係る事項を補足するものである。平成24年2月（前回）の改定以降、揚排水機場の耐震に係る様々な課題について検討を行ってきた結果、その一部について一定の結論が得られたことから、耐震性能照査の合理化に資するため、河川構造物の耐震性能照査指針・解説（以下、指針・同解説）のうち、揚排水機場に係る部分を改定することとしたものである。

前回の改定は、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東北地方から関東地方の広範囲にわたって河川堤防に甚大な被災が生じたことを受け、様々な課題がある中でその当時の知見を結集して行ったものであった。これらの課題を含め、今回、揚排水機場について、一定の知見が得られたため、指針・同解説のⅠ. 共通編とⅤ. 揚排水機場編のうちから、揚排水機場に係る部分を集約し、新たな揚排水機場編として改定することとした。

主な改定項目のうち、Ⅱ. 堤防編、Ⅳ. 水門・樋門及び堰編との整合の観点による項目は、レベル2-1地震動、液状化判定における細粒分含有率による N 値の補正方法の見直しである。また、耐震性能照査の合理化及び本指針の円滑な運用の観点による改定として、耐震性能に応じた限界状態とこれを超えないことの照査項目・制限値、耐震性能の照査に用いる構造解析手法及び各手法の選定の考え方を明確化するとともに、静的解析法のうち応答変位法を適用する場合の地震外力の算出方法等を具体化した。

レベル2-1地震動については、関東地震の東京周辺の地震動の加速度応答スペクトルをより高度に推定し、政府機関から公表されている東海地震等の地震動予測結果等、あるいは、東北地方太平洋沖地震や東海地震、東南海地震、南海地震、日向灘地震が連動する場合等も考慮し改定を行った。

液状化判定における細粒分含有率による N 値の補正方法は、東北地方太平洋沖地震で被災した河川堤防において数多くの不攪乱試料を採取し、繰返し三軸試験を実施した結果から得られた、細粒分含有率と繰返し三軸強度比、 N 値の関係を踏まえたものである。これにより、細粒分が比較的少ない範囲では改定前の式で求めた繰返し三軸強度比とほとんど変わらないが、粘性土に分類されるような細粒分を多く含む土では改定前に比べ大きな繰返し三軸強度比が得られることとなる。

耐震性能に応じた限界状態と照査項目については、地震中及び地震後における主要機械設備の稼働等を考慮して具体化し、各照査項目に対する制限値の目安を定量化した。

耐震性能の照査に用いる構造解析手法について、動的解析法と静的解析法の使い分け、及び静的解析法を適用する場合の各手法の選定の考え方を明確化した。

応答変位法を適用する場合の地震外力の算出方法については、レベル2-1地震動の速度応答スペクトルの算出方法を設定したほか、地盤の硬軟分布の影響を考慮できるような地震時地盤変位及び地震時周面せん断力の算出方法を新たに示した。

今回の改定では、可能な限り最新の知見を取り入れているが、様々な課題のうちの一部に対応するものであり、指針として規定するためには現時点では十分に解明されていない事項があることも事実である。耐震性能照査や構造解析手法に関する研究・技術開発の進展に応じて、適切に対応していくことが必要とされるのは言うまでもない。

本指針の趣旨が正しく理解され、河川構造物の質の高い整備が一層推進されることを期待するものである。

目 次

1. 総 則	1
1.1 適用の範囲	1
1.2 用語の定義	3
2. 基本方針	5
2.1 耐震性能の照査の基本	5
2.2 照査に用いる地震動及び耐震性能	6
3. 地震の影響	8
4. 耐震性能の照査に用いる地震動	9
4.1 一 般	9
4.2 レベル1地震動	10
4.3 レベル2地震動	12
4.4 地域別補正係数	15
4.5 耐震性能照査上の地盤種別	17
4.6 耐震性能照査上の地盤面	18
4.7 耐震性能照査上の基盤面	18
5. 耐震性能の照査	19
5.1 一 般	19
5.2 機場本体の限界状態	20
5.3 基礎の限界状態	20
5.4 レベル1地震動に対する耐震性能の照査	21
5.4.1 レベル1地震動に対する機場本体の照査	21
5.4.2 レベル1地震動に対する基礎の照査	21
5.5 レベル2地震動に対する耐震性能の照査	22
5.5.1 レベル2地震動に対する機場本体の照査	22
5.5.2 レベル2地震動に対する基礎の照査	27
5.6 構造解析	29
6. 静的解析法による機場本体及び基礎の応答値の算出	31
6.1 一 般	31
6.2 構造解析手法	31
6.3 静的解析法を適用する場合の荷重の算出方法	34
6.3.1 一 般	34
6.3.2 慣性力	34
6.3.3 地震時地盤変位及び地震時周面せん断力	35
6.3.4 地震時土圧	41
6.3.5 地震時動水圧	42
6.3.6 レベル1地震動の水平震度	43

6.3.7 レベル2地震動の水平震度.....	44
6.4 液状化の影響.....	45
6.4.1 一般.....	45
6.4.2 液状化の判定.....	46
6.4.3 液状化に伴う浮上がりの照査.....	49

1. 総 則

1.1 適用の範囲

本編は、揚排水機場の機場本体及び基礎の耐震性能の照査に適用する。

本編の適用の範囲を明らかにしたものである。

本編は、国土交通省河川砂防技術基準のうち、揚排水機場の耐震性能の照査に係る事項を補足するものとしてとりまとめたものである。したがって、本編に規定していない揚排水機場の調査、計画、設計、施工、維持管理の事項については、国土交通省河川砂防技術基準に準拠する必要がある。

国土交通省河川砂防技術基準・調査編

国土交通省河川砂防技術基準・計画編

国土交通省河川砂防技術基準・設計編

国土交通省河川砂防技術基準・維持管理編（河川編）

揚排水機場は、図-解1.1.1 に示すように多数の機器・部位から構成されるが、条文では、これらのうち本編を②機場本体及び⑩基礎に適用することとしている。

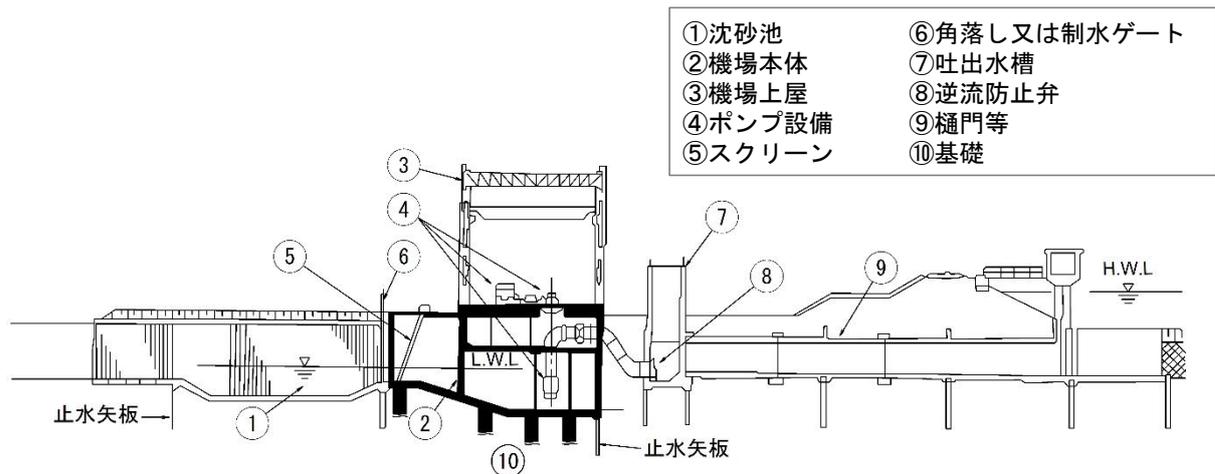


図-解1.1.1 排水機場を構成する機器・部位並びに本編の適用範囲である機場本体及び基礎（黒塗り部）

これら以外の機器・部位に関する耐震性能の照査にあたっては、本指針の他編のほか、次の資料を参考にしてよい。このとき、年月を記載していない図書については、最新版を参照することとする。

建築構造設計基準

機械工事施工管理基準（案）

揚排水ポンプ設備技術基準

道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（平成14年3月）

道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編（平成24年3月）

道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成24年3月）

道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（平成24年3月）

共同溝設計指針

駐車場設計・施工指針 同解説

下水道施設の耐震対策指針と解説

下水道施設耐震設計例-処理場・ポンプ場編-

例えば、①沈砂池や⑥角落し又は制水ゲート、⑦吐出水槽、⑧逆流防止弁、機場本体と吐出水槽をつなぐ配管等の耐震性能の照査は、「下水道施設の耐震対策指針と解説」等を参考とすることができる。

なお、各種土木構造物に関する設計基準類では、近年、部分係数法の導入が進められているところである。しかし、本編の改定にあたっては、揚排水機場の耐震性能の照査の方法を部分係数法に基づいて体系化するための十分な知見が得られていないことから、本編における各種規定は、従来の照査体系に基づいて構成している。上記の参考図書において、平成24年3月以前の道路橋示方書・同解説を挙げているのは、このためである。

揚排水機場以外の河川構造物の耐震性能の照査のうち、盛土による堤防（ただし、高規格堤防を除く）は、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 II. 堤防編」を、水門・樋門及び堰は、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 IV. 水門・樋門及び堰編」を、自立式構造の特殊堤は、耐震性能の照査に用いる地震動を含め、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 I. 共通編、III. 自立式構造の特殊堤編」を、それぞれ適用する。なお、本編には、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 I. 共通編」の一部を見直した内容が含まれていることから、今回の改定以降は、本編を「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 I. 共通編」の適用の対象外とする。

1.2 用語の定義

本編に用いる用語の定義は、次のとおりとする。

(1) 揚排水機場

ポンプによって河川又は水路の流水を河岸又は堤防を横断して取水又は排水するために、河岸又は堤防の付近に設けられる施設であって、ポンプ場とその附属施設（吸水槽又は吐出水槽、樋門等）の総称

(2) 機場本体

揚排水機場のうち、吸水槽、ポンプ室、地下ポンプ室、冷却水槽等からなる構造部分であり、頂版、側壁、底版等の部材から構成される

(3) 基礎

揚排水機場のうち、基礎より上部にある機場本体、機械設備、機场上屋等の荷重を地盤に伝える構造部分

(4) レベル1地震動

揚排水機場の供用期間中に発生する確率が高い地震動

(5) レベル2地震動

対象地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動

(6) レベル2-1地震動

レベル2地震動のうち、プレート境界型の大規模な地震を想定した地震動

(7) レベル2-2地震動

レベル2地震動のうち、内陸直下型地震を想定した地震動

(8) 耐震性能

地震中及び地震後に揚排水機場が具備すべき性能

(9) 限界状態

耐震性能を満足し得る機場本体及び基礎の限界の状態

(10) 液状化

地震動による間げき水圧の急激な上昇により、飽和した砂質土層がせん断強度を失うこと

(11) 耐震性能照査上の地盤種別

地震時における地盤の振動特性に応じて、工学的に分類する地盤の種別

(12) 耐震性能照査上の地盤面

耐震性能の照査において地表面と仮定する面

(13) 耐震性能照査上の基盤面

対象地点に共通する広がりを持ち、耐震性能の照査上、振動するとみなす地盤の下に存在する十分堅固な土層の上面

(14) 静的解析法

地震の影響を静的な荷重等に置き換えて構造物の応答値を算出する方法

(15) 震度法

地震の影響を構造物の重量に水平震度を乗じた静的荷重等に置き換えて構造物の応答値を算出する静的解析の方法

(16) 地震時保有水平耐力法

地震の影響を構造物の重量に水平震度を乗じた静的荷重等に置き換えるとともに、構造物の塑性域の耐力や変形能を考慮して応答値を算出する静的解析の方法

(17) 応答変位法

地震時に地盤に生じる変位を主に考慮し、これを構造物に作用させることにより構造物の応答値を算出する静的解析の方法

(18) 主要機械設備

ポンプ及びポンプを駆動する原動機、減速機等の機械設備

(19) 流水方向

水平方向で、かつ機場本体に流入する河川水の上下流方向

(20) 流水直角方向

水平方向で、かつ流水方向に対して直交する方向

(21) 構造解析ブロック

機場本体及び基礎の構造解析を行う上で、機場本体及び基礎の構造を流水方向又は流水直角方向に分割したときの一単位

(22) 層間変形角

機場本体の頂版や底版、床版等で区切られる各層間のせん断変形による変位量と高さの比

2. 基本方針

2.1 耐震性能の照査の基本

機場本体及び基礎の耐震性能の照査においては、揚排水機場の耐震性能及び耐震性能の照査に用いる地震動を適切に設定するとともに、適切な構造解析手法を用いるものとする。

機場本体及び基礎の耐震性能の照査の基本を規定したものである。耐震性能の照査を構成する要素としては、耐震性能、耐震性能の照査に用いる地震動及び耐震性能の照査に用いる構造解析手法の三者があるが、機場本体及び基礎の耐震性能の照査においては、これら三者のいずれについても、適切に設定又は選定する必要がある。

揚排水機場に求められる耐震性能は、治水上の重要性等により異なる。耐震性能の照査に用いる地震動と、それに応じて確保すべき耐震性能は、本編2.2に規定している。

耐震性能の照査にあたっては、構造物の地震時挙動、必要とされる精度等を考慮して、適切な構造解析手法を選定する必要がある。

2.2 照査に用いる地震動及び耐震性能

- (1) レベル1地震動は、揚排水機場の供用期間中に発生する確率が高い地震動とする。
また、レベル2地震動は、対象地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動とする。ここで、レベル2地震動としては、レベル2-1地震動及びレベル2-2地震動の2種類を考慮するものとする。
- (2) 揚排水機場の耐震性能は、次のとおりとする。
- 1) 耐震性能1
地震によって揚排水機場としての健全性を損なわない性能
 - 2) 耐震性能2
地震中及び地震後においても、揚排水機場の持つ治水機能を保持する性能
 - 3) 耐震性能3
地震による損傷が限定的なものにとどまり、揚排水機場としての機能の回復が速やかに行い得る性能
- (3) レベル1地震動に対しては、すべての揚排水機場について耐震性能1を確保するものとする。
- (4) レベル2地震動に対しては、治水上重要な揚排水機場については耐震性能2を、また、それ以外の揚排水機場については耐震性能3を確保するものとする。

(1) レベル1地震動は、揚排水機場の供用期間中に発生する確率が高い地震動であり、震度法による従来の耐震設計で考慮されていた地震動のレベルを踏襲するように定めたものである。本指針では従来の耐震設計との連続性を確保することに配慮してレベル1地震動を規定した。

レベル2地震動は、「土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)」(平成13年11月)¹⁾、「土木・建築にかかる設計の基本」(平成14年10月)²⁾等を参考にして規定したものである。レベル2-1地震動は大きな振幅が長時間繰り返して作用する地震動であるのに対し、レベル2-2地震動は継続時間は短いが構造物の地震応答に対して支配的な影響を及ぼす周期帯域において極めて大きな振幅を有する地震動である。構造物の地震時挙動は、地震動の振幅特性のみならず、周期特性、継続時間、繰り返し特性等の影響を受けるため、耐震性能の照査においては、地震動特性が異なる2種類の地震動を考慮することとした。

(2) 揚排水機場には、排水や取水といった治水・利水上の機能を有し、常時稼働している施設や、必要時のみ稼働する治水・利水施設、水質浄化等を目的とした治水要素のない施設等があり、揚排水機場ごとに要求される耐震性能が異なる。また、揚排水機場は、損傷の程度によっては速やかな修復が困難になることから、揚排水機場としての機能の回復が速やかに行えるようにする必要がある。このような揚排水機場の特性を踏まえて、耐震性能を規定したものである。

(3) レベル1地震動に対しては、従来の耐震設計と同様に、地震後においても機能回復のための修復をすることなく、地震前と同じ機能を保持することができるように、地震によって揚排水機場としての健全性を損なわない性能を確保することとした。

(4) レベル2地震動に対し、治水上重要な揚排水機場については、地震発生直後においてもポンプの稼働が求められることから、地震によりある程度の損傷が生じた場合でも、揚排水機場の持つ治水機能を保持できることを必要な耐震性能として規定した。ここで、治水上重要な揚排水機場は、常用の治水施設(排水機場)、治水要素のある常用の利水施設

(揚排水兼用の機場)、及び地震直後に稼働が必要となる治水施設としてよい。なお、河川の個別状況を踏まえた設定を妨げるものではない。

また、それ以外の揚排水機場については、地震後に揚排水機場としての機能が応急復旧等により速やかに回復できることを必要な耐震性能として規定した。レベル2地震動に対する耐震性能と対象施設の例を表-解2.2.1に示す。

表-解2.2.1 レベル2地震動に対する耐震性能と対象施設の例

レベル2地震動に対する耐震性能		対象施設
耐震性能2	地震中及び地震後においても揚排水機場の持つ治水機能を保持する性能	治水上重要な揚排水機場 <ul style="list-style-type: none"> ・ 常用の治水施設 (排水機場) ・ 治水要素のある常用の利水施設 (揚排水兼用の機場) ・ 地震直後に稼働が必要となる治水施設 (地震後の津波や防潮水門閉鎖に伴う内水等の排水を目的とした排水機場等)
耐震性能3	地震による損傷が限定的なものにとどまり、揚排水機場としての機能の回復が速やかに行い得る性能	上記以外の揚排水機場

3. 地震の影響

機場本体及び基礎の耐震性能の照査においては、揚排水機場の構造特性や解析手法に応じて、次の(1)～(6)に示す地震の影響を考慮するものとする。

- (1) 構造物の質量に起因する慣性力
- (2) 地震時地盤変位及び地震時周面せん断力
- (3) 地震時土圧
- (4) 地震時動水圧
- (5) 液状化の影響
- (6) その他

機場本体及び基礎の耐震性能の照査において考慮すべき地震の影響の種類を規定したものである。機場本体及び基礎の照査においては、各部の質量に起因する慣性力の影響を考慮する必要がある。加えて、機場本体及び基礎の地震時挙動に対しては周辺地盤の影響が支配的となることから、構造解析手法に応じて、地震時土圧又は地震時地盤変位及び地震時周面せん断力を考慮する必要がある。また、水槽内の水の影響による地震時動水圧を考慮する必要がある。さらに、基礎地盤が液状化した場合には、その影響を受けるため、耐震性能の照査においては、これらの影響を考慮する必要がある。

耐震性能の照査において考慮すべき地震の影響の種類は、適用する構造解析手法によって異なる。(1)～(5)に規定している地震の影響は、静的解析法のうち、本編6. に規定する震度法、地震時保有水平耐力法、応答変位法を適用する場合を想定したものである。震度法又は地震時保有水平耐力法を適用する場合は(1)、(3)、(4)を考慮する必要があるほか、必要に応じて6.4 に規定する(5)液状化の影響を考慮する。応答変位法を適用する場合は(1)、(2)、(4)を考慮する必要があるほか、必要に応じて6.4 に規定する(5)液状化の影響を考慮する。これら以外の構造解析手法を適用する場合は、(6)その他を含め、手法に応じた地震の影響を適切に設定する必要がある。

4. 耐震性能の照査に用いる地震動

4.1 一般

レベル1地震動及びレベル2地震動は、それぞれ、4.2及び4.3の規定により設定するものとする。ただし、レベル2地震動については、対象地点周辺における過去の地震情報、活断層情報、プレート境界で発生する地震の情報、地下構造に関する情報、対象地点の地盤条件に関する情報、既往の強震記録等を考慮して対象地点における地震動を適切に推定できる場合には、その結果に基づいて設定してもよい。

レベル1地震動及びレベル2地震動は、それぞれ、4.2及び4.3に規定する加速度応答スペクトルに基づいて設定することとした。レベル1地震動は、従来の耐震設計で考慮されていた地震動のレベルを踏襲するようにしたものであり、4.2に規定するように、標準的な加速度応答スペクトルに各種の補正係数を乗じて算出すればよい。

また、本指針では、レベル2地震動を対象地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動と定義しているが、将来、発生が予想される地震動を適切に推定することは一般的に容易ではない。そこで、4.3では耐震性能の照査に用いる標準的な地震動を規定した。

一方、これを上回る地震動が生じる可能性もあるため、中央防災会議、地震調査研究推進本部、地方自治体等による活断層の調査、断層を特定した上での地震動の評価等を参考に、対象地点における地震動を適切に推定できる場合には、その結果に基づいてレベル2地震動を設定してもよいこととした。

なお、耐震性能の照査において、6. に示す静的解析法により機場本体及び基礎の応答値を算出する場合は、6.3 に基づき荷重を算出することができる。

4.2 レベル1地震動

- (1) レベル1地震動は、(2)に規定する加速度応答スペクトルに基づいて設定するものとする。
- (2) レベル1地震動の加速度応答スペクトルは、原則として、耐震性能照査上の地盤面において与えるものとし、式(4.2.1)により算出するものとする。

$$S=c_z c_D S_0 \dots\dots\dots (4.2.1)$$

ここに、

- S : レベル1地震動の加速度応答スペクトル (1cm/s²単位に丸める)
- c_z : 4.4に規定するレベル1地震動の地域別補正係数
- c_D : 減衰定数別補正係数であり、構造物の減衰定数 h に応じて、式(4.2.2)により算出するものとする。
- $$c_D=1.5/(40h+1)+0.5 \dots\dots\dots (4.2.2)$$
- S_0 : レベル1地震動の標準加速度応答スペクトル (cm/s²) であり、4.5に規定する地盤種別及び固有周期 T に応じて表-4.2.1の値とする。

表-4.2.1 レベル1地震動の標準加速度応答スペクトル S_0

地盤種別	固有周期 T (s)に対する S_0 (cm/s ²)		
I種	$T < 0.10$ $S_0 = 431T^{1/3}$ ただし、 $S_0 \geq 160$	$0.10 \leq T \leq 1.10$ $S_0 = 200$	$1.10 < T$ $S_0 = 220/T$
II種	$T < 0.20$ $S_0 = 427T^{1/3}$ ただし、 $S_0 \geq 200$	$0.20 \leq T \leq 1.30$ $S_0 = 250$	$1.30 < T$ $S_0 = 325/T$
III種	$T < 0.34$ $S_0 = 430T^{1/3}$ ただし、 $S_0 \geq 240$	$0.34 \leq T \leq 1.50$ $S_0 = 300$	$1.50 < T$ $S_0 = 450/T$

(1) 耐震性能の照査に用いる地震動の表し方としては、時刻歴波形や加速度応答スペクトル等がある。加速度応答スペクトルは、特定の地震動に対して任意の固有周期及び減衰定数を持つ1自由度系の最大応答加速度として定義され、耐震設計基準類における地震動の表し方として広く用いられている。また、耐震性能の照査において加速度時刻歴波形を用いる場合でも、加速度応答スペクトルを設定した上で、当該加速度応答スペクトルに近い特性を有するように加速度波形を調整する、あるいは、地震動の振幅及び周期特性は加速度応答スペクトルに基づき設定し、経時特性は別途モデル化することにより加速度波形を合成することが行われている。このように、加速度応答スペクトルは地震動の表し方として汎用性を有するものであり、本指針では、耐震性能の照査に用いる地震動を加速度応答スペクトルに基づいて設定することとした。

(2) レベル1地震動の加速度応答スペクトル S は、表-4.2.1に規定する標準加速度応答スペクトル S_0 を、地域別補正係数 c_z 及び減衰定数別補正係数 c_D により補正して算出することとした。ここで、 S は水平方向の加速度応答スペクトルである。地震動には水平成分に加えて鉛直成分が含まれるが、鉛直方向の地震動が機場本体及び基礎の耐震性に及ぼす影響は一般に小さいため、耐震性能の照査に用いる地震動としては水平成分のみを考慮すればよい。

レベル1地震動は、震度法による従来の耐震設計で考慮されていた地震動のレベルを踏襲したものであり、発生する確率が高い中規模程度の地震による地震動に相当するものである。表-4.2.1を図示すると、図-解4.2.1のようになる。

なお、表-4.2.1に規定している標準加速度応答スペクトルは、減衰定数0.05の加速度応答スペクトルである。減衰定数別補正係数 c_D は、これを任意の減衰定数 h の加速度応答スペクトルに補正するための係数である。

条文では、「河川構造物の耐震性能照査指針 I. 共通編」及び「II. 堤防編」、「IV. 水門・樋門及び堰編」との整合を考慮し、耐震性能の照査に用いる地震動の入力位置を4.6に規定する耐震性能照査上の地盤面とする場合の加速度応答スペクトルを規定した。

一方、機場本体及び基礎の耐震性能の照査において、動的解析法により耐震性能照査上の基盤面以浅の地盤の応答計算を行う場合は、地震動の入力位置を耐震性能照査上の基盤面とする必要がある。その場合は、地震の影響を適切に考慮し、条文に規定した耐震性能照査上の地盤面位置の加速度応答スペクトルに整合した地震動を、耐震性能照査上の基盤面の位置において設定する必要がある。

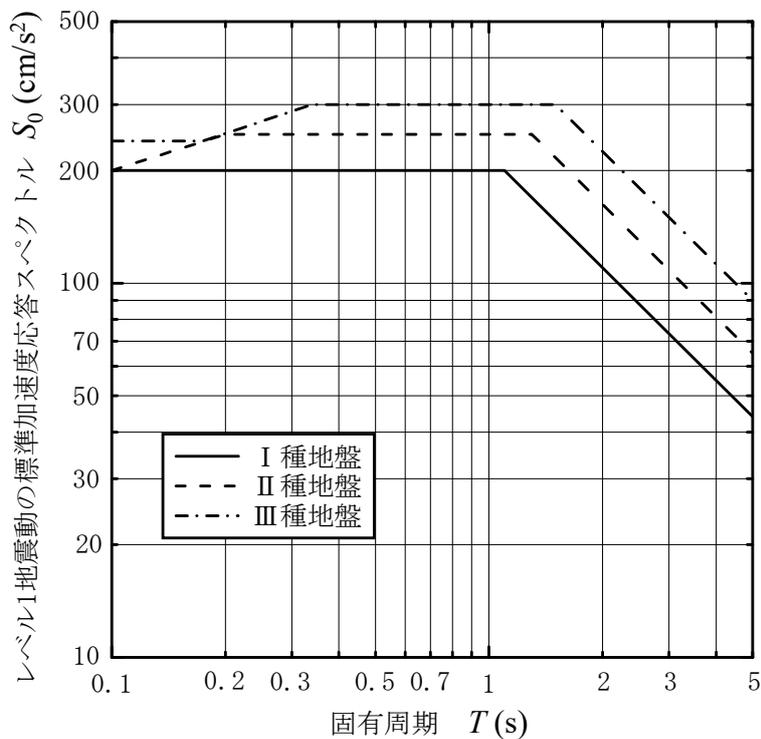


図-解4.2.1 レベル1地震動の標準加速度応答スペクトル S_0

4.3 レベル2地震動

- (1) レベル2地震動は、(2)に規定する加速度応答スペクトルに基づいて設定するものとする。
- (2) レベル2地震動の加速度応答スペクトルは、原則として、耐震性能照査上の地盤面において与えるものとし、地震動の種別に応じて、それぞれ、式(4.3.1)及び式(4.3.2)により算出するものとする。

$$S_1 = c_{1Z} c_D S_{10} \dots\dots\dots (4.3.1)$$

$$S_2 = c_{2Z} c_D S_{20} \dots\dots\dots (4.3.2)$$

ここに、

S_1 : レベル2-1地震動の加速度応答スペクトル (1cm/s²単位に丸める)

S_2 : レベル2-2地震動の加速度応答スペクトル (1cm/s²単位に丸める)

c_{1Z} : 4.4に規定するレベル2-1地震動の地域別補正係数

c_{2Z} : 4.4に規定するレベル2-2地震動の地域別補正係数

c_D : 減衰定数別補正係数であり、構造物の減衰定数 h に応じて、式(4.2.2)により算出するものとする

S_{10} : レベル2-1地震動の標準加速度応答スペクトル (cm/s²) であり、4.5に規定する地盤種別及び固有周期 T に応じて表-4.3.1の値とする。

S_{20} : レベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル (cm/s²) であり、4.5に規定する地盤種別及び固有周期 T に応じて表-4.3.2の値とする。

表-4.3.1 レベル2-1地震動の標準加速度応答スペクトル S_{10}

地盤種別	固有周期 T (s)に対する S_{10} (cm/s ²)		
I種	$T \leq 0.16$ $S_{10} = 2,579T^{1/3}$	$0.16 \leq T \leq 0.60$ $S_{10} = 1,400$	$0.60 < T$ $S_{10} = 840/T$
II種	$T < 0.22$ $S_{10} = 2,153T^{1/3}$	$0.22 \leq T \leq 0.90$ $S_{10} = 1,300$	$0.90 < T$ $S_{10} = 1,170/T$
III種	$T < 0.34$ $S_{10} = 1,719T^{1/3}$	$0.34 \leq T \leq 1.40$ $S_{10} = 1,200$	$1.40 < T$ $S_{10} = 1,680/T$

表-4.3.2 レベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル S_{20}

地盤種別	固有周期 T (s)に対する S_{20} (cm/s ²)		
I種	$T < 0.30$ $S_{20} = 4,463T^{2/3}$	$0.30 \leq T \leq 0.70$ $S_{20} = 2,000$	$0.70 < T$ $S_{20} = 1,104/T^{5/3}$
II種	$T < 0.40$ $S_{20} = 3,224T^{2/3}$	$0.40 \leq T \leq 1.20$ $S_{20} = 1,750$	$1.20 < T$ $S_{20} = 2,371/T^{5/3}$
III種	$T < 0.50$ $S_{20} = 2,381T^{2/3}$	$0.50 \leq T \leq 1.50$ $S_{20} = 1,500$	$1.50 < T$ $S_{20} = 2,948/T^{5/3}$

(1)耐震性能の照査に用いる地震動の表し方としては、時刻歴波形や加速度応答スペクトル等があるが、レベル1地震動と同様の理由により、レベル2地震動についても耐震性能の照査に用いる地震動を加速度応答スペクトルに基づいて設定することとした。

(2)レベル2-1地震動及びレベル2-2地震動の加速度応答スペクトル S_1 及び S_2 は、それぞれ、表-4.3.1及び表-4.3.2に規定する標準加速度応答スペクトル S_{10} 及び S_{20} を、地域別補正係数 c_{1Z} 、 c_{2Z} 及び減衰定数別補正係数 c_D により補正して算出することとした。ここで、 S_1 及び S_2 は、レベル1地震動の加速度応答スペクトル S と同様に、いずれも、水平方向の加速度応答スペクトルである。

レベル2-1地震動は、発生頻度が低いプレート境界で発生する大規模な地震を想定した地震動を与えるものである。従来、標準加速度応答スペクトルの最大値は、地盤種別に応じて 700cm/s^2 、 850cm/s^2 、 1000cm/s^2 だったものを、今回の改定では 1400cm/s^2 、 1300cm/s^2 、 1200cm/s^2 としている。関東地震の東京周辺の地震動の加速度応答スペクトルをより高度に推定し、政府機関から公表されている東海地震等の地震動予測結果等も踏まえ、規定された³⁾ものであることから、この値を採用することとした。

一方、レベル2-2地震動は、発生頻度が極めて低いマグニチュード7級の内陸直下型地震を想定した地震動を与えるものである。レベル2-2地震動についても、これまでに最大規模の被害を引き起こした地震として平成7年(1995年)兵庫県南部地震を考慮し、同地震により地盤上で実測された加速度強震記録に基づき、レベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル S_{20} を定めることとした。平成7年(1995年)兵庫県南部地震では、神戸海洋気象台(I種地盤)、JR西日本鷹取駅(II種地盤)、東神戸大橋周辺地盤上(III種地盤)等において加速度が大きく構造物に破壊的な影響を与えた地震動が観測されており、これらの加速度応答スペクトルを計算し、特別に大きなピークは平滑化して求めた加速度応答スペクトルがレベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル S_{20} である。

表-4.3.1及び表-4.3.2を図示すると、それぞれ、図-解4.3.1及び図-解4.3.2のようになる。

条文では、「河川構造物の耐震性能照査指針 I.共通編」及び「II.堤防編」、「IV.水門・樋門及び堰編」との整合を考慮し、耐震性能の照査に用いる地震動の入力位置を4.6に規定する耐震性能照査上の地盤面とする場合の加速度応答スペクトルを規定した。

一方、機場本体及び基礎の耐震性能の照査において、動的解析法により耐震性能照査上の基盤面以浅の地盤の応答計算を行う場合は、地震動の入力位置を耐震性能照査上の基盤面とする必要がある。その場合は、地震の影響を適切に考慮し、条文に規定した耐震性能照査上の地盤面位置の加速度応答スペクトルに整合した地震動を、耐震性能照査上の基盤面の位置において設定する必要がある。

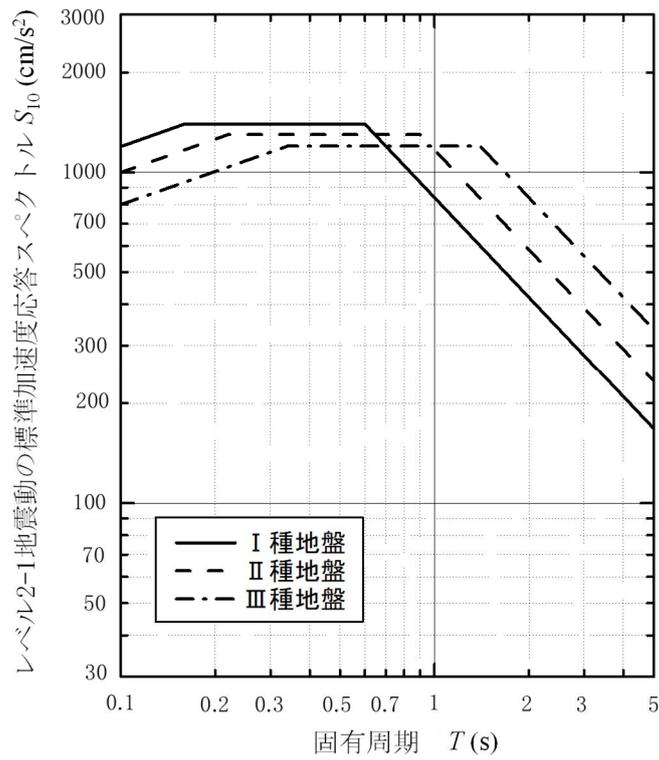


図-解4.3.1 レベル2-1地震動の標準加速度応答スペクトル S_{10}

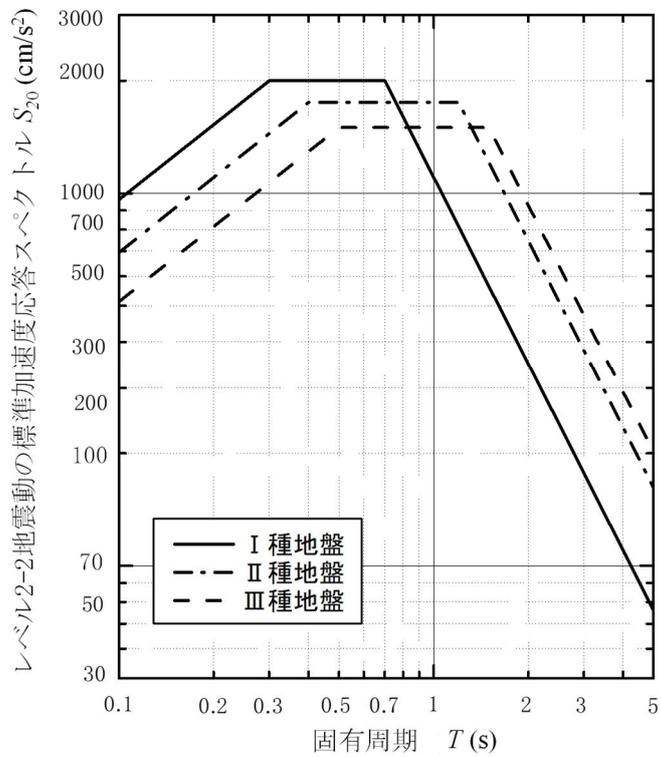


図-解4.3.2 レベル2-2地震動の標準加速度応答スペクトル S_{20}

4.4 地域別補正係数

地域別補正係数 c_Z 、 c_{1Z} 、 c_{2Z} は、地域区分に応じて表-4.4.1の値とする。ただし、対象地点が地域区分の境界線上にある場合は、係数の大きい方をとらなければならない。

表-4.4.1 地域別補正係数と地域区分

地域区分	地域別補正係数			対象地域
	c_Z	c_{1Z}	c_{2Z}	
A1	1.0	1.2	1.0	千葉県のうち館山市、木更津市、勝浦市、鴨川市、君津市、富津市、南房総市、夷隅郡、安房郡 神奈川県 山梨県のうち富士吉田市、都留市、大月市、上野原市、西八代郡、南巨摩郡、南都留郡 静岡県 愛知県のうち名古屋市、豊橋市、半田市、豊川市、津島市、刈谷市、西尾市、蒲郡市、常滑市、稲沢市、新城市、東海市、大府市、知多市、豊明市、田原市、愛西市、清須市、弥富市、あま市、海部郡、知多郡、額田郡、北設楽郡のうち東栄町三重県（津市、松阪市、名張市、亀山市、いなべ市、伊賀市、三重郡菰野町を除く。） 和歌山県のうち新宮市、西牟婁郡、東牟婁郡 徳島県のうち那賀郡、海部郡
A2	1.0	1.0	1.0	A1, B1, B2, C 地域以外の地域
B1	0.85	1.2	0.85	愛媛県のうち宇和島市、北宇和郡、南宇和郡 高知県（B2 地域に掲げる地域を除く。） 宮崎県のうち延岡市、日向市、児湯郡（西米良村及び木城町を除く。）、東臼杵郡のうち門川町
B2	0.85	1.0	0.85	北海道のうち札幌市、函館市、小樽市、室蘭市、北見市、夕張市、岩見沢市、網走市、苫小牧市、美唄市、芦別市、江別市、赤平市、三笠市、千歳市、滝川市、砂川市、歌志内市、深川市、富良野市、登別市、恵庭市、伊達市、北広島市、石狩市、北斗市、石狩郡、松前郡、上磯郡、亀田郡、茅部郡、二世郡、山越郡、檜山郡、爾志郡、奥尻郡、瀬棚郡、久遠郡、島牧郡、寿都郡、磯谷郡、虻田郡、岩内郡、古宇郡、積丹郡、古平郡、余市郡、空知郡、夕張郡、樺戸郡、雨竜郡、上川郡（上川総合振興局）のうち東神楽町、上川町、東川町及び美瑛町、勇払郡、網走郡、斜里郡、常呂郡、有珠郡、白老郡 青森県のうち青森市、弘前市、黒石市、五所川原市、むつ市、つがる市、平川市、東津軽郡、西津軽郡、中津軽郡、南津軽郡、北津軽郡、下北郡 秋田県、山形県 福島県のうち会津若松市、郡山市、白河市、須賀川市、喜多方市、岩瀬郡、南会津郡、耶麻郡、河沼郡、大沼郡、西白河郡 新潟県 富山県のうち魚津市、滑川市、黒部市、下新川郡 石川県のうち輪島市、珠洲市、鳳珠郡 鳥取県のうち米子市、倉吉市、境港市、東伯郡、西伯郡、日野郡 島根県、岡山県、広島県 徳島県のうち美馬市、三好市、美馬郡、三好郡 香川県のうち高松市、丸亀市、坂出市、善通寺市、観音寺市、三豊市、小豆郡、香川郡、綾歌郡、仲多度郡 愛媛県（B1 地域に掲げる地域を除く。） 高知県のうち長岡郡、土佐郡、吾川郡（いの町のうち旧伊野町の地区を除く。） 熊本県（C 地域に掲げる地域を除く。） 大分県（C 地域に掲げる地域を除く。） 宮崎県（B1 地域に掲げる地域を除く。）
C	0.7	0.8	0.7	北海道のうち旭川市、留萌市、稚内市、紋別市、士別市、名寄市、上川郡（上川総合振興局）のうち鷹栖町、当麻町、比布町、愛別町、和寒町、剣淵町及び下川町、中川郡（上川総合振興局）、増毛郡、留萌郡、苫前郡、天塩郡、宗谷郡、枝幸郡、礼文郡、利尻郡、紋別郡 山口県、福岡県、佐賀県、長崎県 熊本県のうち荒尾市、水俣市、玉名市、山鹿市、宇土市、上天草市、天草市、玉名郡、葦北郡、天草郡 大分県のうち中津市、豊後高田市、杵築市、宇佐市、国東市、東国東郡、速見郡 鹿児島県（奄美市及び大島郡を除く。） 沖縄県

地震動強度の地域特性については、建設省総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」（昭和47～51年度）において詳細な検討が行われ、その結果は新耐震設計法(案)における地域区分図としてまとめられている。その後の多くの耐震設計基準類では、地震動強度の地域特性として新耐震設計法(案)による地域区分を基礎としている。今回の改定でも、レベル2-2地震動で用いる地域別補正係数 c_{22} は、従来の強震帯地域（A1、A2）、中震帯地域（B1、B2）、弱震帯地域（C）と同じ地域で同じ係数を規定した。一方、レベル2-1地震動に関しては、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震、北海道の太平洋沖の地震動が連動する場合や、東海地震、東南海地震、南海地震及び日向灘地震が連動する場合などの大規模な地震の震源域が連動する影響も考慮し、レベル2-1地震動で用いる地域別補正係数 c_{12} を規定した³⁾。

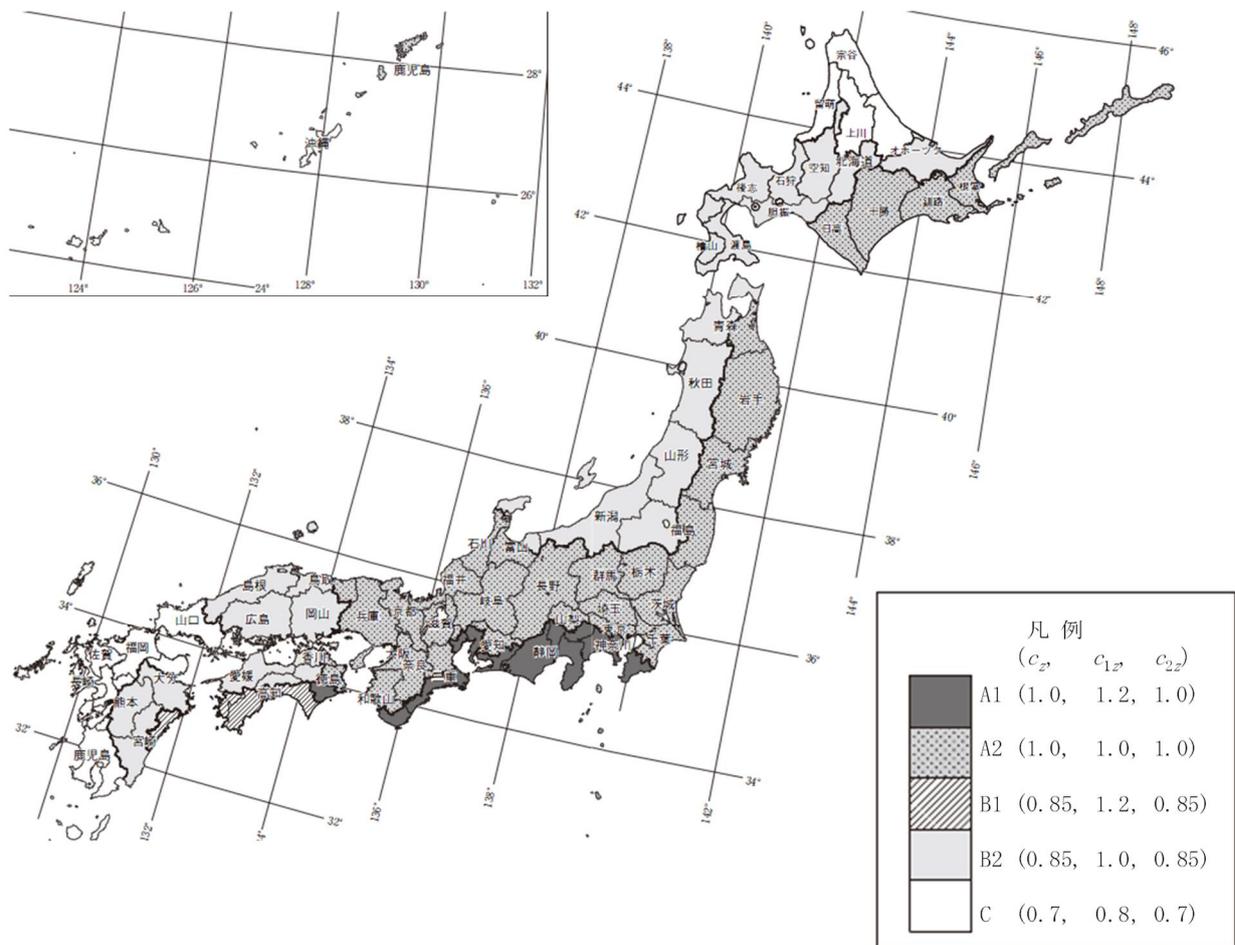


図-解4.4.1 表-4.4.1に示す地域別補正係数

4.5 耐震性能照査上の地盤種別

耐震性能照査上の地盤種別は、原則として、式(4.5.1)により算出する地盤の基本固有周期 T_G をもとに、表-4.5.1により区分するものとする。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \dots\dots\dots (4.5.1)$$

ここに、

T_G : 地盤の基本固有周期 (s)

H_i : i 番目の土層の厚さ (m)

V_{si} : i 番目の土層の平均せん断弾性波速度 (m/s)

i : 当該地盤が地表面から耐震性能照査上の基盤面まで n 層に区分されるとき
の地表面から i 番目の土層の番号

表-4.5.1 耐震性能照査上の地盤種別

地盤種別	地盤の基本固有周期 T_G (s)
I種	$T_G < 0.2$
II種	$0.2 \leq T_G < 0.6$
III種	$0.6 \leq T_G$

地表面における地震動特性は地盤条件の影響を受けることが知られており、耐震性能照査上の地盤種別はそれを考慮するために規定したものである。概略の目安としては、I種地盤は良好な洪積地盤及び岩盤、III種地盤は沖積地盤のうち軟弱地盤、II種地盤はI種地盤及びIII種地盤のいずれにも属さない洪積地盤及び沖積地盤と考えてよい。洪積地盤及び沖積地盤は、それぞれ、主として洪積層及び沖積層から構成される地盤であるが、ここでいう沖積層には、がけ崩れ等による新しい堆積層、表土、埋立土及び軟弱層を含み、沖積層のうち締まった砂層、砂れき層、玉石層等については洪積層として取り扱ってよい。

地盤種別は、地盤の基本固有周期 T_G により区分するものとした。地盤の基本固有周期 T_G は、微小ひずみ振幅領域における地盤の基本固有周期に相当するものであるが、レベル2地震動といった強震動の特性も地盤の周期特性に強く影響を受け、また、工学的に簡便に算出することができるため、本指針ではレベル2地震動についても地盤条件を区分するために T_G を用いてよい。

平均せん断弾性波速度 V_{si} は、弾性波探査やPS検層によって測定するのが望ましいが、実測値がない場合は式(解4.5.1)によって N 値から推定してもよい。この場合の N 値は各土層の平均的な N 値で代表し、むやみに計算を繁雑にする必要はない。

$$\left. \begin{array}{l} \text{粘性土層の場合} \\ V_{si} = 100N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 25) \\ \text{砂質土層の場合} \\ V_{si} = 80N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 50) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (解4.5.1)$$

ここに、

N_i : 標準貫入試験による i 番目の土層の平均 N 値

式(解4.5.1)は、粘性土層については $N=1 \sim 25$ の範囲、砂質土層については $N=1 \sim 50$ の

範囲での実験値から導いた推定式である。なお、地盤の基本固有周期 T_G の算出にあたっては、平均的な N 値が0の土層の平均せん断弾性波速度を $V_{si}=50\text{m/s}$ としてよい。

4.6 耐震性能照査上の地盤面

耐震性能照査上の地盤面は、機場本体の周辺地盤の上面とする。

耐震性能照査上の地盤面とは、4.2及び4.3に規定するレベル1地震動及びレベル2地震動の加速度応答スペクトルの設定位置である。揚排水機場においては、機場本体の周辺地盤の上面を耐震性能照査上の地盤面とすることとした。

4.7 耐震性能照査上の基盤面

耐震性能照査上の基盤面は、対象地点周辺に広がりをもつ、工学的に十分堅固な土層の上面とするものとする。

耐震性能照査上の基盤面としては、対象地点周辺に広がりを持ち、耐震性能の照査上、振動するとみなす地盤の下に存在する十分堅固な土層の上面を想定することとした。ここで、十分堅固な土層とは、せん断弾性波速度 300m/s 程度（式（解4.5.1）より、粘性土層では N 値25、砂質土層では N 値50）以上の値を有している剛性の高い土層と考えてよい。ただし、底版下面又は杭先端の深度をせん断弾性波速度 300m/s 程度以上の地層よりも下方に設定する場合は、底版下面又は杭先端のうち、いずれか深い方を耐震性能照査上の基盤面とするのがよい。

5. 耐震性能の照査

5.1 一般

- (1) 機場本体及び基礎に対する耐震性能の照査にあたっては、地震動及び耐震性能に応じて、機場本体の限界状態を5.2の規定、基礎の限界状態を5.3の規定に従って適切に設定するものとする。
- (2) 機場本体及び基礎の耐震性能1の照査は、レベル1地震動によって生じる機場本体及び基礎の状態が、5.2(1)に規定する機場本体の限界状態1及び5.3(1)に規定する基礎の限界状態1を超えないことを照査することによって行う。
- (3) 機場本体及び基礎の耐震性能2の照査は、レベル2地震動によって生じる機場本体及び基礎の状態が、5.2(2)に規定する機場本体の限界状態2及び5.3(2)に規定する基礎の限界状態2を超えないことを照査することによって行う。
- (4) 機場本体及び基礎の耐震性能3の照査は、レベル2地震動によって生じる機場本体及び基礎の状態が、5.2(3)に規定する機場本体の限界状態3及び5.3(3)に規定する基礎の限界状態3を超えないことを照査することによって行う。
- (5) 機場本体及び基礎の応答値を算出するための構造解析は5.6の規定によるものとする。

(1)～(4)機場本体及び基礎の耐震性能の照査では、機場本体及び基礎の限界状態を適切に設定する必要があることを規定したものである。地震動及び耐震性能に応じた機場本体及び基礎の限界状態の関係を表にまとめると、表-解5.1.1のとおりである。

表-解5.1.1 地震動及び耐震性能に応じた機場本体及び基礎の限界状態

地震動	耐震性能		機場本体の限界状態	基礎の限界状態
レベル1 地震動	耐震性能1	地震によって揚排水機場としての健全性を損なわない性能	機場本体の限界状態1 (5.2(1)に規定)	基礎の限界状態1 (5.3(1)に規定)
レベル2 地震動	耐震性能2	地震中及び地震後においても、揚排水機場の持つ治水機能を保持する性能	機場本体の限界状態2 (5.2(2)に規定)	基礎の限界状態2 (5.3(2)に規定)
	耐震性能3	地震による損傷が限定的なものにとどまり、揚排水機場としての機能の回復が速やかに行い得る性能	機場本体の限界状態3 (5.2(3)に規定)	基礎の限界状態3 (5.3(3)に規定)

5.2 機場本体の限界状態

機場本体の限界状態1～3は、(1)～(3)のとおりとする。

- (1) 機場本体の限界状態1は、原則として、機場本体の力学特性が弾性域を超えない限界の状態とする。
- (2) 機場本体の限界状態2は、機場本体を構成する各部材に生じる損傷及び変位が揚排水を妨げず、かつ修復を容易に行い得る限界の状態とする。
- (3) 機場本体の限界状態3は、機場本体を構成する各部材に生じる損傷等の修復を容易に行い得る限界の状態とする。

機場本体の限界状態を定めたものである。

- (1) 機場本体の限界状態1は、地震後においても機能回復のための修復をすることなく、地震前と同じ揚排水機場としての機能を保持することができるように定めたものである。
- (2) 機場本体の限界状態2は、地震中及び地震後においても揚排水機場の持つ治水機能を保持するため、機場本体を構成する各部材に生じる損傷及び変位を、ポンプの運転が可能な程度までに抑えることができるように定めたものである。また、主要機械設備が設置される部材以外の部材等も含めて、機場本体を構成する各部材の損傷等を、修復を容易に行い得る程度まで抑えることができるように定めたものである。
- (3) 機場本体の限界状態3は、揚排水機場としての機能の回復が速やかに行えるようにするために、機場本体を構成する各部材に生じる損傷等を、修復を容易に行い得る程度までに抑えることができるように定めたものである。

5.3 基礎の限界状態

基礎の限界状態1～3は、(1)～(3)のとおりとする。

- (1) 基礎の限界状態1は、原則として、基礎の力学特性が弾性域を超えない限界の状態とする。
- (2) 基礎の限界状態2は、基礎の損傷が揚排水を妨げず、かつ修復を容易に行い得る限界の状態とする。
- (3) 基礎の限界状態3は、基礎の損傷が基礎の修復を容易に行い得る限界の状態とする。

基礎の限界状態を定めたものである。

- (1) 基礎の限界状態1は、地震後においても機能回復のための修復をすることなく、地震前と同じ揚排水機場としての機能を保持することができるように定めたものである。
- (2) 基礎の限界状態2は、地震後においても揚排水機場としての機能を保持できるよう、基礎に生じる損傷がポンプの運転が可能な程度までに抑えられるように定めたものである。
- (3) 基礎の限界状態3は、揚排水機場としての機能の回復が速やかに行えるようにするために、基礎に生じる損傷が修復を容易に行い得る程度までに抑えられるように定めたものである。ただし、一般に、地震後に基礎の損傷を確認することが難しく、また、損傷が確認された場合の修復を行うことが困難である。このため、5.5.2では、基礎の限界状態2及び限界状態3に関する照査を同じ方法によって行うことを標準としている。

5.4 レベル1地震動に対する耐震性能の照査

5.4.1 レベル1地震動に対する機場本体の照査

レベル1地震動に対して機場本体が限界状態1を超えないことの照査として、機場本体を構成する各部材に生じる応力度が許容応力度を超えないことを照査する。

レベル1地震動に対する機場本体の耐震性能の照査は、機場本体を構成する各部材に生じる応力度が許容応力度を超えないことを照査することとした。なお、許容応力度の値は、国土交通省河川砂防技術基準・設計編⁴⁾（第1章 第7節 堰）に準じるものとし、地震時の割り増しを考慮するものとする。

機場本体の限界状態1を超えないことの照査における照査項目及び制限値は表-解5.4.1に示すとおりである。

表-解5.4.1 機場本体が限界状態1を超えないことの照査項目及び制限値

耐震性能	限界状態	照査対象	照査項目	制限値
【耐震性能1】 地震によって揚排水機場としての健全性を損なわない性能	機場本体の限界状態1	機場本体を構成する各部材	機場本体を構成する各部材に生じる応力度が許容応力度を超えないことを照査	許容応力度

5.4.2 レベル1地震動に対する基礎の照査

レベル1地震動に対して基礎が限界状態1を超えないことの照査として、基礎が次の1)～3)の全てを満たすことを標準とする。

- 1) 基礎を構成する各部材に生じる応力度が許容応力度を超えないこと。
- 2) 基礎が支持、転倒、滑動及び液状化に伴う浮上がりに対して安定であること。
- 3) 基礎の変位が許容変位を超えないこと。このとき、許容変位は、揚排水機場の健全性を保持するように、機場本体から決まる変位を考慮して定める。

レベル1地震動に対する基礎の耐震性能の照査では、基礎を構成する各部材に生じる応力度が許容応力度を超えず、かつ、基礎として安定であること、基礎の変位が許容変位を超えないことを照査することとした。なお、許容応力度の値は、国土交通省河川砂防技術基準・設計編⁴⁾（第1章 第7節 堰）に準じるものとし、地震時の割り増しを考慮するものとする。ここで、基礎を構成する各部材に生じる応力度の算出にあたっては「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編」（平成24年3月）⁵⁾を参照してよい。

基礎の支持、転倒及び滑動に対する安定性の照査についても、「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編」（平成24年3月）⁵⁾を参照してよい。液状化に伴う浮上がりの照査の方法は、6.4.3に規定している。

基礎の変位に対する照査は、杭基礎の場合、水平変位が許容変位を超えないことによって照査することとした。ここで、揚排水機場の健全性を保持するための基礎の許容変位としては、国土交通省河川砂防技術基準・設計編⁴⁾（第1章 第7節 堰）に準じ、10mmとしてよい。直接基礎の場合は、1)及び2)の照査を満足することを前提に、基礎の変位に対する照査を省略してよい。

基礎の限界状態1を超えないことの照査における照査項目及び制限値の例は表-解5.4.2に示すとおりである。

表-解5.4.2 基礎が限界状態1を超えないことの照査項目及び制限値の例

耐震性能	限界状態	照査対象	照査項目	制限値
【耐震性能1】 地震によって揚排水機場としての健全性を損なわない性能	基礎の限界状態1	基礎	基礎を構成する各部材に生じる応力度が許容応力度を超えないことを照査	許容応力度
		基礎	基礎が支持、転倒、滑動及び液状化に伴う浮上に対して安定であることを照査	<ul style="list-style-type: none"> ・支持：許容支持力 ・転倒（荷重の合力の作用位置）：底版幅の1/3 ・滑動（せん断地盤反力）：許容せん断抵抗力 ・液状化に伴う浮上：安全率1.1
		基礎杭	基礎の変位が許容変位を超えないことを照査	許容変位

5.5 レベル2地震動に対する耐震性能の照査

5.5.1 レベル2地震動に対する機場本体の照査

(1) 機場本体の限界状態2を超えないことの照査

レベル2地震動に対して機場本体が限界状態2を超えないことの照査として、機場本体が次の1)～4)の全てを満足することを標準とする。

- 1) 機場本体に生じる変位が、ポンプの軸継手の芯ずれ及び面振れから決まる機場本体の変位の制限値を超えないこと。このとき、機場本体の変位の制限値は、地震中及び地震後において機場本体に生じた変位が揚排水を妨げない範囲を考慮して定める。
- 2) 機場本体を構成する各部材のうち、主要機械設備が設置されている部材に生じる曲率が降伏曲率を超えないこと。
- 3) 機場本体に生じる層間変形角が層間変形角の制限値を超えないこと。このとき、層間変形角の制限値は、機場本体に生じた損傷の修復を容易に行い得る範囲を考慮して定める。
- 4) 機場本体を構成する各部材に生じるせん断力がせん断耐力を超えないこと。

(2) 機場本体の限界状態3を超えないことの照査

レベル2地震動に対して機場本体が限界状態3を超えないことの照査として、機場本体が次の1)～4)の全てを満足することを標準とする。

- 1) 機場本体に生じる変位が、ポンプの軸継手の芯ずれ及び面振れから決まる機場本体の変位の制限値を超えないこと。このとき、機場本体の変位の制限値は、地震中及び地震後において機場本体に生じる変位が主要機械設備の修復を容易に行い得る程度に抑えられる範囲を考慮して定める。
- 2) 機場本体を構成する各部材のうち、主要機械設備が設置されている部材に生じる曲率塑性率が曲率塑性率の制限値を超えないこと。
- 3) 機場本体に生じる層間変形角が層間変形角の制限値を超えないこと。このとき、層間変形角の制限値は、機場本体に生じた損傷の修復を容易に行い得る範囲を考慮して定める。
- 4) 機場本体を構成する各部材に生じるせん断力がせん断耐力を超えないこと。

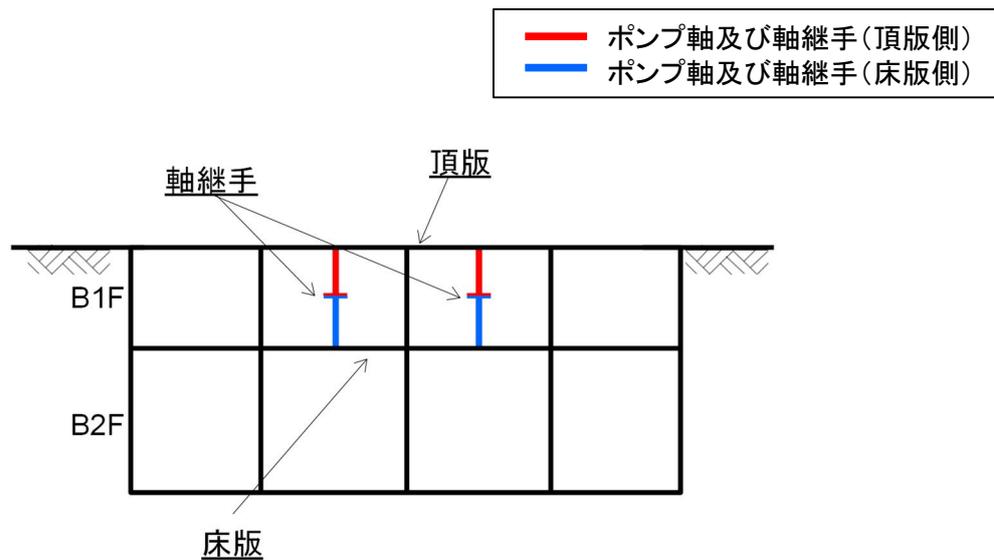
(1) 5.2(2)に規定する機場本体の限界状態2を超えないことの照査として1)～4)を規定した。

1) 地震の影響によって、機場本体に生じた変位により減速機とポンプの軸継手又は減速機と原動機の軸継手に制限値を超えるような芯ずれや面振れが生じた場合、ポンプの運転に支障をきたす可能性がある。このため、機場本体に生じる変位が、ポンプの軸継手の芯ずれ及び面振れから決まる機場本体の変位の制限値を超えないことを照査することとした。

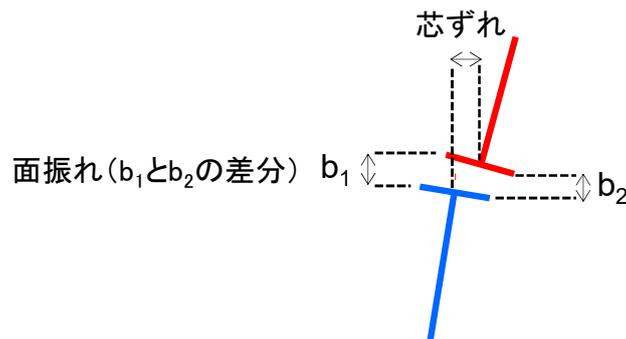
ここで、機場本体に生じる変位として、図-解5.5.1に例示する方法でポンプの軸継手の芯ずれ及び面振れを算出し、ポンプの軸継手の芯ずれ及び面振れの制限値と比較することで、機場本体の変位に関する照査を行うことができる。ポンプの軸継手の芯ずれ又は面振れの制限値としては、「機械工事施工管理基準(案)」⁶⁾(第3章 揚排水ポンプ設備)に示されている管理基準値やポンプごとに個別に設定されている制限値等を用いることができる。ただし、ポンプの軸継手の芯ずれ及び面振れの制限値が厳しく、これらを満たすように機場本体の変位を抑制することが難しい場合があるため、機場本体ではなく機械設備による対応も含めて検討する必要がある。

なお、床版(はり部材に支持されるものを含む)に生じる水平面内での変形量は極めて小さいと考えられることから、横軸ポンプや、一床式のうちポンプ、原動機及び減速機

が同一床に設置される機場本体については、機場本体の変位に関する照査を省略してよい。



(a) ポンプの軸継手のモデル化



(b) ポンプの軸継手の芯ずれ・面振れの評価方法

図-解5.5.1 機場本体の変位によって生じるポンプの軸継手の芯ずれ・面振れの例

2)地震中及び地震後においてもポンプの運転を可能とするためには、主要機械設備の機能が保持されている必要がある。主要機械設備が設置されている部材が降伏点を超え、著しい曲げひび割れが生じると、当該部材の補修を行う上で主要機械設備の一時撤去が必要となり、結果としてポンプの運転が困難となることや、地震直後におけるポンプの稼働に支障をきたす可能性が考えられる。このため、主要機械設備が設置されている部材に対しては、当該部材が降伏に達しないことを照査することとした。

3)地震後における機場本体の修復を容易に行い得る状態にとどめるためには、主要機械設備が設置されている部材以外の部材も含めて、機場本体を構成する各部材の塑性変形量を一定以下に制限する必要がある。このため、機場本体に生じる層間変形角が層間変形角の制限値を超えないことを照査することとした。ここで、層間変形角は式(解5.5.1)により算出することができる。

$$\gamma = \delta_s / h \dots \dots \dots \text{(解5.5.1)}$$

ここに、

γ : 層間変形角

δ_s : 層間変形量で式 (解5.5.2) により算出する。

$$\delta_s = (d_2^2 - d_1^2) / 4b \dots\dots\dots (解5.5.2)$$

b : 機場本体の幅

h : 機場本体の高さ

d_1 : 機場本体の短い方の対角線長さ

d_2 : 機場本体の長い方の対角線長さ

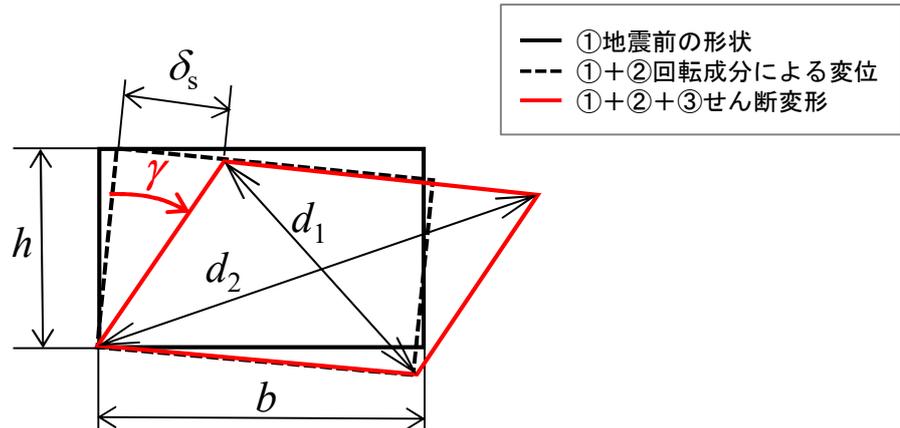


図-解5.5.2 層間変形角の算出方法

層間変形角は、機場本体の階ごとに算出することを基本とする。例えば、一床式の場合は機場本体の全体に対して算出し、二床式の場合は機場本体における各階の四隅の変位量に基づいて算出する。

層間変形角の制限値については、例えば道路構造物であるボックスカルバートを対象とした、層間変形角と損傷特性に関する既往の実験研究では、最大荷重に達した後内側コンクリートの剥落が生じており、最大荷重に達した状態の層間変形角が4/300であったことが報告されている⁷⁾。また、原子力発電所屋外重要土木構造物では、終局に対して十分な余裕を持った層間変形角の値として1/100が示されている⁸⁾。これらの知見を参考に、部材の損傷がひび割れ程度で、コンクリートの剥離が発生しない範囲内であれば、修復を容易に行い得ると考えられることから、このような層間変形角の値としては、1/100を目安としてよい。

4) 機場本体を構成する各部材にせん断破壊が生じると、機場本体の損傷が揚排水の妨げとなることや、修復を容易に行うことができなくなることが考えられる。したがって、機場本体を構成する各部材に生じるせん断力がせん断耐力を超えないことを照査することとした。ここで、せん断耐力は「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」(平成24年3月)³⁾を参考に算出することができる。このとき、曲げ降伏に達しない部材については、繰返し載荷に伴う耐力低下が生じないことから、荷重の正負交番繰返し作用の影響に関する補正係数 c_c を1.0としてせん断耐力を算出してよい。

なお、主要機械設備が設置されている部材にせん断破壊が生じると致命的な損傷に至るおそれがあることから、こうした好ましくない形態の破壊を確実に避ける観点から、当該部材については、せん断耐力 P_s を曲げ耐力 P_u 以上とすることが望ましい。

(2) 5.3(3)に規定する限界状態3を超えないことの照査として、1)~4)を規定した。揚排水機場としての機能の回復に要する期間等は施設等に異なるが、これらの照査項目に従って照査を行い、制限値を満足する場合は限界状態3を超えないとみなしてよい。

1)揚排水機場としての機能の回復を容易に行い得る状態にとどめるためには、ポンプの軸継手の芯ずれ及び面振れが一定以下となるように機場本体の変位を制限する必要がある。しかし、(1)1)で解説した変位の制限値を超え、かつ、軸継手の修復を容易に行い得るような芯ずれ及び面振れの制限値の設定方法については、十分な知見がないのが現状である。

一方で、過去の地震において、主要機械設備の修復が困難となる機場本体の変位が生じた事例が報告されていないのも事実である。また、(2)2)～4)に規定する照査を満足することで、機場本体に生じる変位を一定以下に制限し、ポンプの軸継手に対する悪影響を軽減することができると考えられる。以上に鑑み、これまでに実績のあるポンプ設備及びその設置方法を用いる場合には、機場本体が限界状態3を超えないことの照査において、ポンプの軸継手の芯ずれ及び面振れから決まる機場本体の変位に関する照査を省略してよい。

2)主要機械設備が設置されている部材に生じる曲げ損傷の程度は、機能回復に要する期間に大きく影響する。このため、主要機械設備が設置されている部材については、修復を容易に行い得る程度の損傷にとどめるための照査として、曲率塑性率が曲率塑性率の制限値を超えないことを照査することとした。なお、曲率塑性率の制限値は、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」(平成14年3月)、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 IV水門・樋門及び堰編」を参考に、式(解5.5.3)により算出してよい。

$$\mu_a = 1 + \frac{\phi_u - \phi_y}{\alpha \phi_y} \dots\dots\dots (解5.5.3)$$

ここに、

- μ_a : 部材の曲率塑性率の制限値
- ϕ_u : 部材の終局曲率(1/m)
- ϕ_y : 部材の降伏曲率(1/m)
- α : 安全係数で、1.5とする。

3) (1)3)と同様に、層間変形角の照査を規定したものである。(1)3)の解説では、機場本体を構成する各部材の曲げ損傷が修復を容易に行い得る程度に抑えるための層間変形角の制限値として、1/100を目安にしてよいこととしている。このため、限界状態3における層間変形角の制限値も、限界状態2と同様に1/100を目安にしてよい⁸⁾。

4)せん断力に対する弾性限界から耐荷力の喪失に対応する状態を明確に区別することが難しいことから、機場本体の限界状態2と同様に、機場本体を構成する各部材のせん断力がせん断耐力を超えないことを照査することとした。

なお、主要機械設備が設置されている部材にせん断破壊が生じると致命的な損傷に至るおそれがあることから、こうした好ましくない形態の破壊を確実に避ける観点から、当該部材については、せん断耐力 P_s を曲げ耐力 P_u 以上とすることが望ましい。

機場本体の限界状態2、3を超えないことの照査における照査項目及び制限値の例は表-解5.5.1に示すとおりである。

表-解5.5.1 機場本体が限界状態2、3を超えないことの照査項目及び制限値の例

耐震性能	限界状態	照査対象	照査項目	制限値
【耐震性能2】 地震中及び地震後においても、揚排水機場の持つ治水機能を保持する性能	機場本体の限界状態2	機場本体	機場本体に生じる変位が、ポンプ軸継手の芯ずれ及び面振れから決まる機場本体の変位の制限値を超えないことを照査	ポンプ軸継手の芯ずれ、面振れから決まる機場本体の変位の制限値
		主要機械設備が設置されている部材	機場本体を構成する各部材のうち、主要機械設備が設置されている部材が降伏を超えないことを照査	降伏曲率（降伏モーメント）
		機場本体	機場本体に生じる層間変形角が層間変形角の制限値を超えないことを照査	層間変形角の制限値 1/100
		機場本体を構成する各部材	機場本体を構成する各部材に生じるせん断力がせん断耐力を超えないことを照査	せん断耐力
【耐震性能3】 地震による損傷が限定的なものにとどまり、揚排水機場としての機能の回復が速やかに行い得る性能	機場本体の限界状態3	機場本体	機場本体に生じる変位が、ポンプ軸継手の芯ずれ及び面振れから決まる機場本体の変位の制限値を超えないことを照査*	ポンプ軸継手の芯ずれ、面振れの修復性から決まる機場本体の変位の制限値
		主要機械設備が設置されている部材	機場本体を構成する各部材のうち、主要機械設備が設置されている部材に生じる曲率塑性率が曲率塑性率の制限値を超えないことを照査	曲率塑性率の制限値
		機場本体	機場本体に生じる層間変形角が層間変形角の制限値を超えないことを照査	層間変形角の制限値 1/100
		機場本体を構成する各部材	機場本体を構成する各部材に生じるせん断力がせん断耐力を超えないことを照査	せん断耐力

※これまでに実績のあるポンプ設備及びその設置方法を用いる場合は、この照査を省略してよい。

5.5.2 レベル2地震動に対する基礎の照査

(1) 基礎の限界状態2を超えないことの照査

レベル2地震動に対して基礎が限界状態2を超えないことの照査として、次の1)及び2)を満足することを標準とする。

1) 基礎全体としての塑性率が塑性率の制限値を超えないこと。このとき、塑性率の制限値は、揚排水を妨げず、かつ修復を容易に行い得る状態にとどめるよう設定する。

2) 基礎を構成する各部材に生じるせん断力がせん断耐力を超えないこと。

(2) 基礎の限界状態3を超えないことの照査

レベル2地震動に対して基礎が限界状態3を超えないことの照査として、(1)を満足することを標準とする。

レベル2地震動に対する基礎の耐震性能の照査について規定したものである。ただし、直接基礎は一般に良質な地層に支持されることが多いこと、また、機場本体は水平力に対して側面地盤から大きな抵抗が得られることに加え、大きな底面積を有するため直接基礎底面からも十分な抵抗力を期待することができ、直接基礎底面の地盤に変形が生じたとしても、機場本体等の支持が困難な状況となることは想定しにくいことから、直接基礎については、レベル1地震動に対する照査を満足することを前提として、レベル2地震動に対する耐震性能の照査を省略してよい。

(1) 5.3(2)に規定する基礎の限界状態2を超えないことの照査として、1)及び2)を規定した。揚排水機場の基礎形式の多くは直接基礎又は杭基礎であることから、杭基礎の場合の塑性率の制限値の目安について以下に示す。基礎形式が直接基礎又は杭基礎以外の場合は、適切な塑性率の制限値を個別に設定する必要がある。

1) 道路橋の杭基礎を模擬した組杭に対する既往の載荷実験によると、組杭全体としての塑性率を4以内にとどめることで、基礎が最大耐力を保持することができ、かつ、地震後に無補修のままでも橋の供用に影響を与えない状態にとどめることができるとされている⁹⁾。これを踏まえると、機場本体等を支持する杭基礎においても、杭基礎全体としての塑性率が4を超えないことで、揚排水を妨げず、かつ修復を容易に行い得る状態にとどめることができると考えられる。ただし、後述する応答変位法や応答震度法など、周辺地盤の変形を考慮して行う解析手法を用いる場合には、杭基礎全体系での塑性率を定義することが難しい。このような解析手法を用いる場合は、基礎杭に生じる曲率塑性率が曲率塑性率の制限値4を超えないことを照査することで、基礎が限界状態2を超えないとみなしてよい。

2) せん断に対しては、基礎杭に生じるせん断力がせん断耐力を超えないことを照査することとした。

(2) 一般に、地震後に基礎の損傷を確認することが難しく、また、損傷が確認された場合の修復を行うことが困難である。このため、基礎の限界状態3を超えないことの照査として、(1)1)、2)と同一の照査を行うことを標準とした。

基礎の限界状態2、3を超えないことの照査における照査項目及び制限値の例は表-解5.5.2に示すとおりである。

表-解5.5.2 基礎が限界状態 2、3 を超えないことの照査項目及び制限値の例

耐震性能	限界状態	照査対象	照査項目	制限値
【耐震性能 2】 地震中及び地震後においても、揚排水機場の持つ治水機能を保持する性能	基礎の限界状態 2	基礎杭	杭基礎全体系としての塑性率が塑性率の制限値を超えないことを照査	塑性率の制限値4
			基礎杭に生じるせん断力がせん断耐力を超えないことを照査	せん断耐力
【耐震性能 3】 地震による損傷が限定的なものにとどまり、揚排水機場としての機能の回復が速やかに行い得る性能	基礎の限界状態 3	基礎杭	杭基礎全体系としての塑性率が塑性率の制限値を超えないことを照査	塑性率の制限値4
			基礎杭に生じるせん断力がせん断耐力を超えないことを照査	せん断耐力

5.6 構造解析

- (1) 機場本体及び基礎の構造解析にあたっては、流水方向及び流水直角方向に対する地震の影響を考慮する。ただし、機場本体又は基礎に対していずれか一方のみが支配的な影響を及ぼす場合は、その方向に対してのみ地震の影響を考慮すればよい。
- (2) 機場本体及び基礎の構造解析にあたっては、部材の耐荷機構及び三次元的な配置を適切に考慮するものとする。ただし、機場本体を構成する各部材の耐荷機構等を適切に考慮した上で機場本体及び基礎を適切な位置で複数の構造解析ブロックに分割し、分割した構造解析ブロックについて構造解析を行う場合は、この規定を満足するものとみなしてよい。
- (3) 機場本体及び基礎の構造解析は、揚排水機場の特性、機場本体及び基礎の限界状態等に応じて、適切な方法に基づいて行うものとする。ただし、地震時の挙動が複雑ではない揚排水機場に対しては、6. の規定に基づき静的解析法によって機場本体及び基礎の応答値を算出すれば、本規定を満足するとみなしてよい。

(1) 耐震性能の照査を行う上では、流水方向及び流水直角方向に対する地震の影響を考慮する必要がある。ただし、機場本体の形状や地盤の剛性分布等から機場本体又は基礎に対していずれか一方のみが支配的な影響を及ぼすと判断できる場合、その方向に対してのみ地震の影響を考慮すればよいこととした。

機場本体は、流水方向と平行な方向に配置された側壁等の壁部材が大きな面内剛性を有することが多く、こういった場合、流水直角方向に作用する地震の影響が機場本体に対して支配的な影響を及ぼすことが考えられるため、流水直角方向に対する地震の影響のみを考慮すればよい。

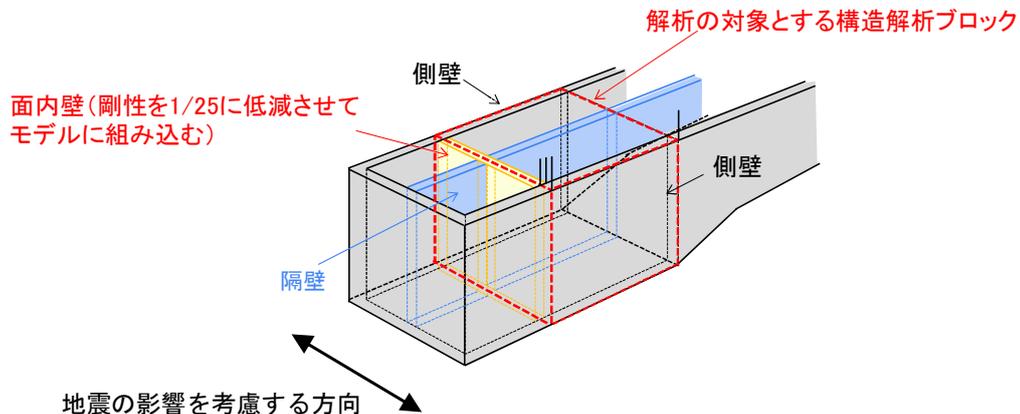
また、基礎に対しては、基礎が支持する機場本体等の地震の影響による挙動が支配的な影響を及ぼすことが考えられる。このことから、機場本体に支配的な影響を及ぼす方向と、基礎に支配的な影響を及ぼす方向が同一となることが想定される。こういった場合、機場本体及び基礎ともに流水直角方向に対する地震の影響のみを考慮すればよい。

(2) 機場本体は棒部材、版部材やこれらを複合した部材によって構成され、これらの部材構成によって耐荷機構が異なることから、機場本体のせん断変形に対する抵抗を期待できるような主たる構造部材とそれ以外の部材に適切に区分した上で、主たる構造部材による耐荷機構を適切に構造解析モデルに反映させる必要がある。

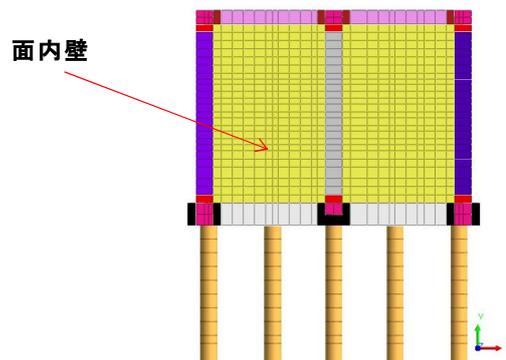
地震時の機場本体の変形に対しては、地震の影響の作用方向と平行な方向に配置された壁部材による面内剛性が大きな抵抗要素となることが確認されている。このため、機場本体及び基礎の構造解析にあたっては、こうした壁部材の面内剛性も含めて、機場本体を構成する部材の三次元的な配置の影響を適切に考慮することを規定した。構造解析において、部材の三次元的な配置の影響を過不足なく考慮するためには、三次元モデルを用いるのが望ましい。ただし、支配的な影響を及ぼす方向及び機場本体の構造を成す各部材の耐荷機構等を適切に考慮して、機場本体及び基礎を適切な位置で複数の構造解析ブロックに分割できる場合には、分割された構造解析ブロックに対する二次元の構造解析を行うことで、部材の三次元的な配置が適切に考慮されたとみなしてよい。機場本体の適切な構造解析ブロック分割の方法を画一的に示すことは難しいが、機場本体を構成する各部材の配置や寸法、配筋、主要機械設備の配置、機場上屋や機械設備等の荷重配分及び荷重作用位置、基礎杭の配置等に着目し、各構造解析ブロックを構成する各部材が、その奥行き方向に一樣な変形を示すと考えられる範囲となるように分割を行うのがよい。

なお、当該構造解析ブロック全体の構造寸法等に基づいて設定した二次元モデルに対

し、面内壁の剛性を1/25に低減させて組み込むことにより、三次元解析相当の層間変形角が再現されることが一事例で確認されている¹⁰⁾ (図-解5.6.1参照)。これは、一般的な規模を有する機場本体の断面形状や耐荷機構等に基づき構造解析ブロックに分割し、二次元解析、三次元解析を行った結果を比較して設定した値であり、面内壁の剛性の効果に関する力学的メカニズムを考慮したものと解釈できる。このことから、当面は、二次元解析の実施にあたり、面内壁の剛性を1/25に低減させて組み込んでよい。



(a) 解析の対象とする構造解析ブロックと面内壁の配置



(b) 二次元解析によるモデル化

図-解5.6.1 二次元解析による面内壁のモデル化の例

(3) 機場本体及び基礎の構造解析手法は、構造物の地震時挙動を動的に解析する動的解析法と地震の影響を静力学的に解析する静的解析法に大別される。

地震時の挙動が複雑となる揚排水機場の例として、以下のいずれかの条件に該当する場合は動的解析法を適用する必要がある。

- ・ 機场上屋が複雑な固有振動特性を示し、かつ、その慣性力が機場本体に大きな影響を与える場合
- ・ 機場本体及び基礎の周辺地盤の地層が著しく傾斜している場合

上記のいずれにも該当しないなど、地震時の挙動が複雑ではない揚排水機場に対しては、6. に規定する静的解析法によって機場本体及び基礎の応答値を算出することができる。

6. 静的解析法による機場本体及び基礎の応答値の算出

6.1 一般

- (1) 静的解析法によって機場本体及び基礎の応答値を算出する場合の構造解析手法は6.2の規定によるものとする。
- (2) 静的解析法による機場本体及び基礎の応答値の算出にあたっては、6.3の規定により荷重を算出する。
- (3) 液状化の可能性がある場合には6.4の規定によりその影響を考慮するものとする。

6.2 構造解析手法

- (1) 静的解析法による機場本体及び基礎の応答値の算出にあたっては、揚排水機場の特性並びに機場本体及び基礎の限界状態に応じて、震度法、地震時保有水平耐力法、応答変位法等から適切な方法を選択するものとする。
- (2) 1)、2)の静的解析法を用いる場合は、(1)の規定を満足するとみなしてよい。
 - 1) レベル1地震動に対する機場本体及び基礎の構造解析手法として、震度法又は応答変位法を用いることを標準とする。
 - 2) レベル2地震動に対する機場本体及び基礎の構造解析手法として、応答変位法を用いることを標準とする。ただし、直接基礎構造の揚排水機場の場合、機場本体及び基礎の構造解析手法として地震時保有水平耐力法を用いてもよい。

(1)、(2)静的解析法によって機場本体及び基礎の応答値を算出するにあたっては、適切な構造解析手法を選択する必要がある。

機場本体の地震時挙動に対し、慣性力の影響が支配的である場合には図-解6.2.1(a)に示すような震度法を用いることができる。

一方、地震時地盤変位の影響が支配的な場合には、図-解6.2.1(b)に示す応答変位法、周辺地盤を平面ひずみ要素で模擬する静的解析法である応答震度法を用いることができる。

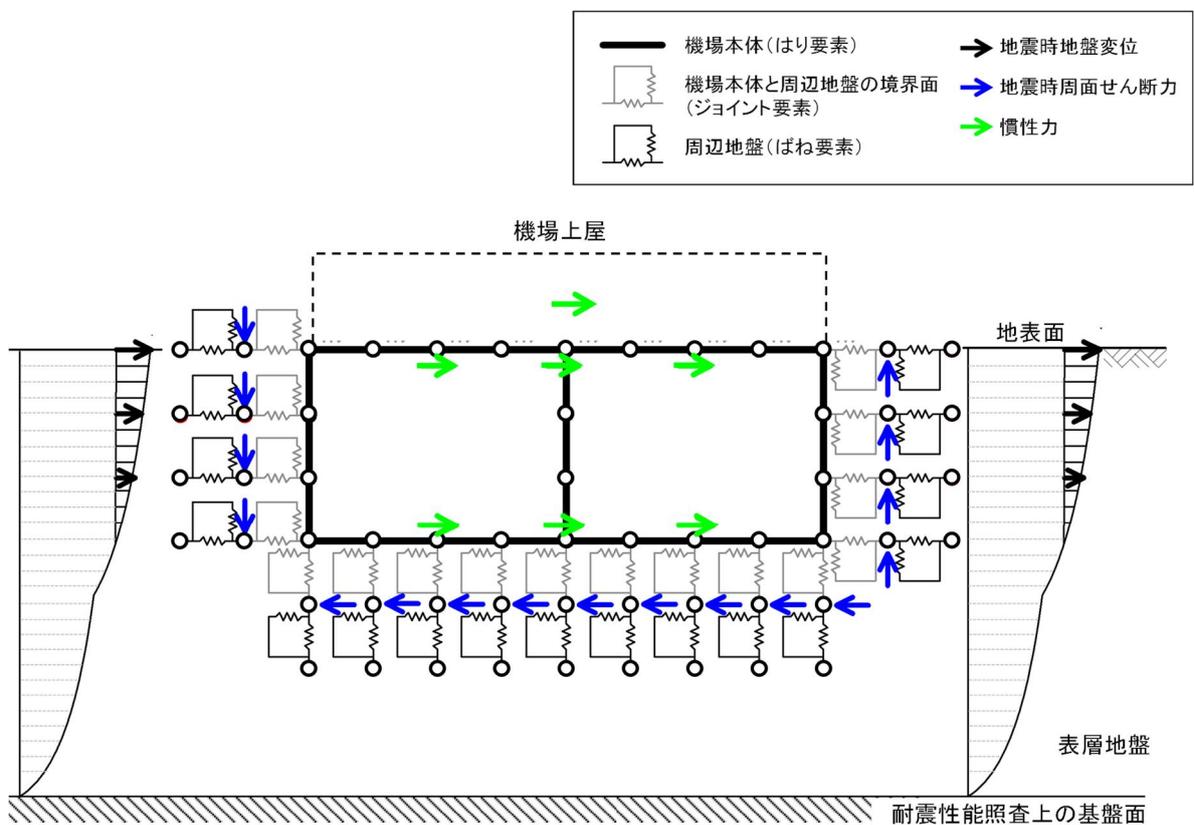
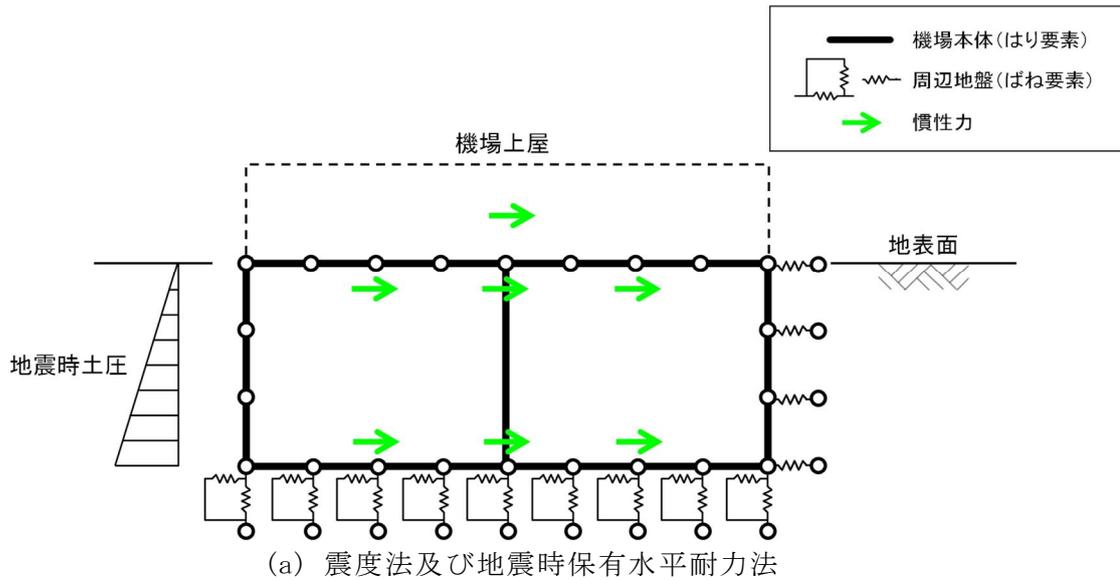


図-解6.2.1 静的解析法の模式図

1) 機場本体及び基礎の各部材の力学特性が弾性域を超えないことを照査とするレベル1地震動に対する機場本体及び基礎の静的解析法としては、震度法、応答変位法のいずれを用いてもよい。ただし、震度法によって設計された既設の揚排水機場が、地震により大きな被害を受けた例がないことから、経験的にその有効性が実証されていると考え、震度法を用いることが一般的である。

2) レベル2地震動に対する機場本体及び基礎の静的解析法には、従来、機場本体及び基礎

の耐震性能の照査において原則として用いられてきた地震時保有水平耐力法のほか、応答変位法、応答震度法等がある。

従来用いられてきた地震時保有水平耐力法では、杭基礎に支持される揚排水機場を対象とした場合、特に床版部に発生する断面力が応答変位法や応答震度法等の解析手法と比較して過大になる等の問題点が確認されている。これは、地震時保有水平耐力法では杭に対する地震時地盤変位の影響が適切に表現されないことによるものである。このため、地震時の挙動が複雑ではない揚排水機場に対しては、レベル2地震動に対する機場本体及び基礎の静的解析法として、応答変位法を用いれば、5.6の規定を満足するとみなしてよいこととした。

応答変位法を用いる場合のモデル化にあたっては、構造物と周辺地盤の間のすべり、剥離の影響等を適切に考慮することができる方法が文献12) に示されており、機場本体及び基礎の構造解析手法としての適用性も検証されていることから、これを参考にするのがよい。ただし、杭基礎に支持される機場本体の地震時挙動の解析に応答変位法を適用する場合でも、杭に対する地震時地盤変位の影響を適切に考慮するためには、杭頭位置に集約ばねを配置したモデルを用いるのではなく、図-解6.2.2に示すような杭に分布ばねを配置したモデルを用いる必要がある。

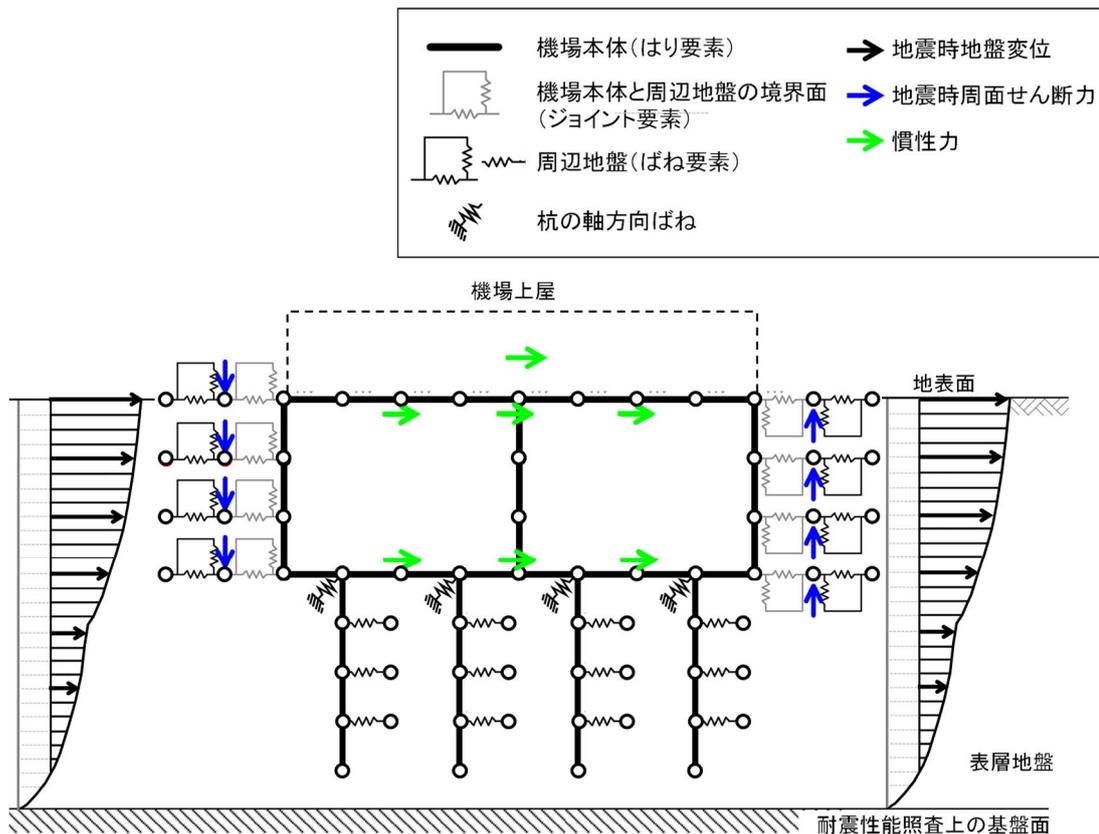


図-解6.2.2 応答変位法を適用する場合の杭のモデル化

地盤を構成する土質が様々である等、機場本体の周辺地盤の応答特性をより精度高く反映する必要がある場合は、レベル2地震動に対する機場本体及び基礎の静的解析法として、応答震度法を用いてもよい。

直接基礎構造の場合は、レベル2地震動に対する機場本体の静的解析法として、従来どおり地震時保有水平耐力法を用いてもよい。

6.3 静的解析法を適用する場合の荷重の算出方法

6.3.1 一般

- (1) 6.2(1)に規定する静的解析法のそれぞれに対し、3. に規定する地震の影響を適切に考慮するものとする。震度法又は地震時保有水平耐力法により機場本体及び基礎の応答値を算出する場合には、地震の影響を、構造物の質量に起因する慣性力、地震時土圧、地震時動水圧として考慮する。応答変位法により機場本体及び基礎の応答値を算出する場合には、地震の影響を、構造物の質量に起因する慣性力、地震時地盤変位及び地震時周面せん断力、地震時動水圧として考慮する。
- (2) 構造物の質量に起因する慣性力、地震時地盤変位及び地震時周面せん断力、地震時土圧並びに地震時動水圧は、それぞれ、6.3.2、6.3.3、6.3.4及び6.3.5の規定により算出するものとする。また、液状化の影響は6.4の規定に基づいて考慮するものとする。

(1) 6.4(4)に規定する静的解析法（震度法、応答変位法）を適用する場合において考慮すべき地震の影響を規定したものである。また、これらの地震の影響を静的解析法の中で考慮するためには、適切な手法に基づいて静的荷重として算出しなければならない。ここで、地震時地盤変位の影響は狭義には力として作用する荷重ではないが、設計上の従来の慣例に従い、荷重と呼称している。

(2) 構造物の質量（機场上屋を含む）に起因する慣性力、地震時地盤変位及び地震時周面せん断力、地震時土圧並びに地震時動水圧は、それぞれ、6.3.2、6.3.3、6.3.4及び6.3.5に算出式を示した。さらに、液状化が生じる可能性のある場合には、6.4の規定に基づいて、その影響を構造解析において考慮することとした。

6.3.2 慣性力

慣性力は、構造物の重量に6.3.6又は6.3.7に規定する水平震度を乗じることで算出する。

機場本体及び基礎の応答値の算出にあたっては、機場本体や機械設備等に作用する慣性力を考慮する必要がある。その水平震度としては、耐震性能照査上の地盤面における水平震度の標準値を基に、6.3.6又は6.3.7の規定に基づき算出するものとした。

機场上屋に作用する慣性力を精度よく算出するためには、機场上屋の固有振動特性を考慮するとともに、機场上屋が保有水平耐力に達するときの各柱の反力を算出し、これが機場本体に伝達されることを考慮する必要がある。ただし、機場本体に比して機场上屋の重量が小さい場合や、機场上屋の固有周期が十分に小さく、機场上屋及び機場本体が周辺地盤と一体的に挙動すると考えられる場合には、機场上屋の重量に対し、6.3.6又は6.3.7に規定する水平震度を乗じた水平力として算出してよい。

6.3.3 地震時地盤変位及び地震時周面せん断力

地震時地盤変位及び地震時周面せん断力は、地震時の地盤の応答特性を考慮して算出するものとする。

地震時地盤変位及び地震時周面せん断力は、静的解析法のうち、応答変位法を適用する場合に考慮するものである。地震時の地盤の応答には、地盤の層序や物性、地震動特性等が大きな影響を及ぼすため、地震時地盤変位及び地震時周面せん断力の算出にあたっては、これらの影響を適切に考慮する必要がある。

地表面から*i*番目の地層の深さ z_i における地震時地盤変位 $u_i(z_i)$ 及び地震時周面せん断力 $\tau_i(z_i)$ は、耐震性能照査上の基盤面以浅の地盤を図-解6.3.1のようにモデル化した上で、文献11)、12)に基づき、それぞれ式(解6.3.1)及び式(解6.3.2)により算出してよい。なお、図-解6.2.1(b)に示すように地震時地盤変位 $u_i(z_i)$ を右向きに作用させる場合、地震時周面せん断力 $\tau_i(z_i)$ は同図中の矢印の方向に作用させる必要がある。

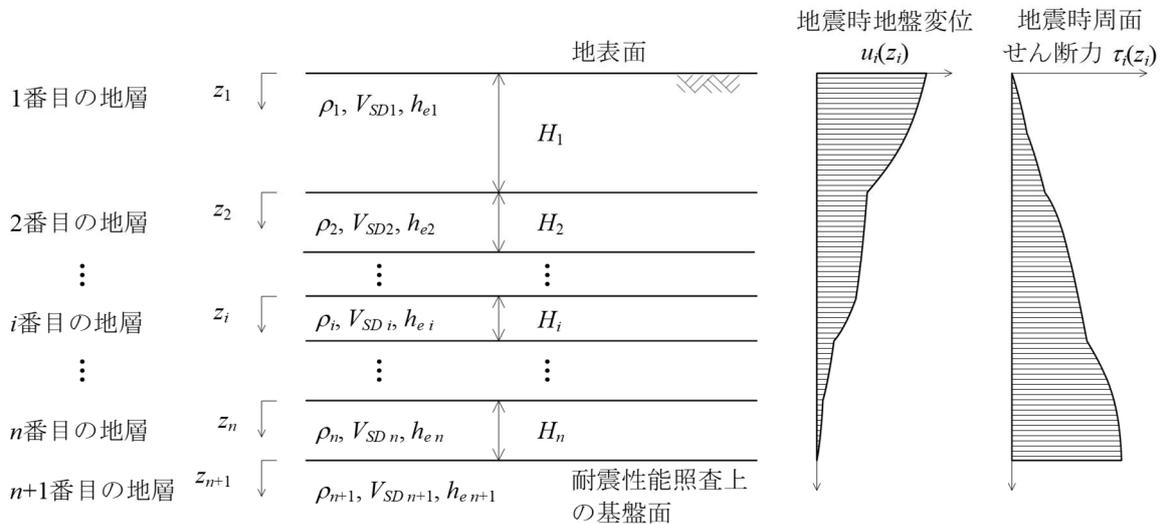


図-解6.3.1 地震時地盤変位 $u_i(z_i)$ 及び地震時周面せん断力 $\tau_i(z_i)$ を算出するための地層モデル

$$u_i(z_i) = \beta \cdot \frac{c_D}{c_{D0}} \cdot \frac{T_S}{2\pi} \cdot \frac{S_V}{100} \cdot \phi_i(z_i) \dots\dots\dots (解6.3.1)$$

$$\tau_i(z_i) = \beta \cdot \frac{c_D}{c_{D0}} \cdot \frac{T_S}{2\pi} \cdot \frac{S_V}{100} \cdot \rho_i V_{SDi}^2 \cdot \eta_i(z_i) \dots\dots\dots (解6.3.2)$$

ここに、

z_i : 地表面から*i*番目の地層上面からの深さ (m)

β : 刺激係数で、式(解6.3.3)により算出する。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i (A_i C_i + B_i S_i)}{\sum_{i=1}^n \rho_i (A_i^2 C C_i + 2 A_i B_i C S_i + B_i^2 S S_i)} \dots\dots\dots (解6.3.3)$$

c_D : 減衰定数別補正係数で、式(解6.3.4)により算出する。

$$c_D = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \dots\dots\dots (解6.3.4)$$

h : モード減衰定数で、式(解6.3.5)により算出する。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n \{h_{ei} \rho_i \omega_s^2 (A_i^2 SS_i - 2A_i B_i CS_i + B_i^2 CC_i)\}}{\sum_{i=1}^n \{\rho_i \omega_s^2 (A_i^2 SS_i - 2A_i B_i CS_i + B_i^2 CC_i)\}} \dots\dots\dots (解6.3.5)$$

c_{D0} : 速度応答スペクトルの減衰定数を調整するための補正係数で、レベル1地震動及びレベル2-1地震動に対して0.8、レベル2-2地震動に対して0.7とする。

T_S : 地震時における表層地盤の1次固有周期(s)

S_V : 耐震性能照査上の基盤面における応答速度(cm/s)

$\phi_i(z_i)$: i 番目の地層の変位モード分布で、式(解6.3.6)により算出する。

$$\phi_i(z_i) = A_i \cos \frac{\omega_s z_i}{V_{SDi}} + B_i \sin \frac{\omega_s z_i}{V_{SDi}} \dots\dots\dots (解6.3.6)$$

$\eta(z_i)$: i 番目の地層のせん断ひずみモード分布(1/m)で、式(解6.3.7)により算出する。

$$\eta_i(z_i) = \frac{\omega_s}{V_{SDi}} \left(A_i \sin \frac{\omega_s z_i}{V_{SDi}} - B_i \cos \frac{\omega_s z_i}{V_{SDi}} \right) \dots\dots\dots (解6.3.7)$$

ρ_i : i 番目の地層の湿潤密度(t/m³)

V_{SDi} : 地震時における i 番目の地層のせん断波速度(m/s)

ω_s : 地震時における表層地盤の1次固有円振動数(rad/s)であり、式(解6.3.8)により算出する。

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T_S} \dots\dots\dots (解6.3.8)$$

i : 当該地盤が地表面から耐震性能照査上の基盤面まで n 層に区分されるとき、地表面から i 番目の地層の番号

式(解6.3.3)及び式(解6.3.5)における C_i 、 S_i 、 CC_i 、 CS_i 、 SS_i は i 番目の地層の波動伝播特性に関するパラメータであり、式(解6.3.9)～式(解6.3.13)により算出する。

$$C_i = \frac{V_{SDi}}{\omega_s} \sin \frac{\omega_s H_i}{V_{SDi}} \dots\dots\dots (解6.3.9)$$

$$S_i = \frac{V_{SDi}}{\omega_s} \left(1 - \cos \frac{\omega_s H_i}{V_{SDi}} \right) \dots\dots\dots (解6.3.10)$$

$$CC_i = \frac{1}{4} \left(2H_i + \frac{V_{SDi}}{\omega_s} \sin \frac{2\omega_s H_i}{V_{SDi}} \right) \dots\dots\dots (解6.3.11)$$

$$CS_i = \frac{V_{SDi}}{4\omega_s} \left(1 - \cos \frac{2\omega_s H_i}{V_{SDi}} \right) \dots\dots\dots (解6.3.12)$$

$$SS_i = \frac{1}{4} \left(2H_i - \frac{V_{SDi}}{\omega_s} \sin \frac{2\omega_s H_i}{V_{SDi}} \right) \dots\dots\dots (解6.3.13)$$

ここに、

H_i : i 番目の地層の厚さ(m)

式(解6.3.2)、式(解6.3.5)～式(解6.3.7)、式(解6.3.9)～式(解6.3.13)における V_{SDi} 及び h_{ei} は、地震動強さやひずみ依存性等に関連したパラメータであり、室内土質試験や地

震応答解析等の結果に基づいて設定することができる。ただし、これらの結果が得られていない場合は、文献11)、12)に基づき、それぞれ式(解6.3.14)及び式(解6.3.15)により算出してよい。

$$V_{SDi} = c_{Vi} V_{Si} \dots\dots\dots (解6.3.14)$$

$$h_{ei} = h_{maxi} (1 - c_{Vi}^2) \dots\dots\dots (解6.3.15)$$

V_{Si} : i 番目の地層の平均せん断弾性波速度 (m/s)

c_{Vi} : 地震時における i 番目の地層のS波速度比で、各地層の平均弾性せん断波速度及び土質に応じて、表-解6.3.1により設定してよい。

h_{maxi} : i 番目の地層の最大減衰定数で、0.20としてよい¹¹⁾。

表-解6.3.1 S波速度比 c_V

		S波速度比 c_V	
		レベル1地震動	レベル2地震動
$V_S < 300\text{m/s}$	砂質土層	0.8	0.2
	粘性土層	0.8	0.4
$V_S \geq 300\text{m/s}$		1.0	0.8

式(解6.3.14)の平均せん断弾性波速度 V_{Si} は、式(解4.5.1)に基づいて設定することができる。ただし、 N 値が0の土層を有する地盤においては、弾性波探査やPS検層によって直接的に測定することが望ましい。

式(解6.3.3)、式(解6.3.5)～式(解6.3.7)の A_i 、 B_i は i 番目の地層の変位パラメータであり、式(解6.3.16)～(解6.3.19)に基づいて算出する。

$$\begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \end{Bmatrix} = [L_{i-1}] \dots [L_j] \dots [L_2] [L_1] \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (解6.3.16)$$

$$[L_j] = \begin{bmatrix} \cos \frac{\omega_s H_j}{V_{SDj}} & \sin \frac{\omega_s H_j}{V_{SDj}} \\ -R_j \sin \frac{\omega_s H_j}{V_{SDj}} & R_j \cos \frac{\omega_s H_j}{V_{SDj}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (解6.3.17)$$

$$R_j = \frac{\rho_j V_{SDj}}{\rho_{j+1} V_{SDj+1}} \dots\dots\dots (解6.3.18)$$

$$A_1 = 1, B_1 = 0 \dots\dots\dots (解6.3.19)$$

ここに、

$[L_j]$: j 番目の地層の層マトリックス

R_j : j 番目の地層と $j+1$ 番目の地層の実数インピーダンス比

地震時における表層地盤の1次固有周期 T_S は、式(解6.3.16)～式(解6.3.19)により算出される A_{n+1} が式(解6.3.20)を満たすように、収束計算によって定める。

$$A_{n+1} = 0 \dots\dots\dots (解6.3.20)$$

この条件を満たす T_S は無数に存在するが、それらのうち最大の値を1次固有周期 T_S とする。

式(解6.3.1)及び式(解6.3.2)における耐震性能照査上の基盤面における応答速度 S_V は、

耐震性能の照査に用いる地震動に応じて、式(解6.3.21)～式(解6.3.23)に基づいて算出する。

【レベル1地震動】

$$S_V = c_Z S_{V0} \dots\dots\dots (解6.3.21)$$

S_V : レベル1地震動の応答速度 (cm/s)

c_Z : 4.4に規定するレベル1地震動の地域別補正係数

S_{V0} : レベル1地震動の標準応答速度 (cm/s) で、表-解6.3.2による。

【レベル2地震動】

$$S_{V1} = c_{1Z} S_{V10} \dots\dots\dots (解6.3.22)$$

$$S_{V2} = c_{2Z} S_{V20} \dots\dots\dots (解6.3.23)$$

S_{V1} : レベル2-1地震動の応答速度 (cm/s)

S_{V2} : レベル2-2地震動の応答速度 (cm/s)

c_{1Z} : 4.4に規定するレベル2-1地震動の地域別補正係数

c_{2Z} : 4.4に規定するレベル2-2地震動の地域別補正係数

S_{V10} : レベル2-1地震動の標準応答速度 (cm/s) で、表-解6.3.3による。

S_{V20} : レベル2-2地震動の標準応答速度 (cm/s) で、表-解6.3.4による。

表-解6.3.2 レベル1地震動の標準応答速度 S_{V0} (cm/s)

表層地盤の固有周期 T_S (s)に対する S_{V0} の値		
$T_S < 0.2$ $S_{V0} = 42.8 T_S^{4/3}$	$0.2 \leq T_S \leq 1.0$ $S_{V0} = 25 T_S$	$1.0 < T$ $S_{V0} = 25$

表-解6.3.3 レベル2-1地震動の標準応答速度 S_{V10} (cm/s)

表層地盤の固有周期 T_S (s)に対する S_{V10} の値		
$T_S < 0.16$ $S_{V10} = 262 T_S^{4/3}$	$0.16 \leq T_S \leq 0.6$ $S_{V10} = 142 T_S$	$0.6 < T$ $S_{V10} = 85$

表-解6.3.4 レベル2-2地震動の標準応答速度 S_{V20} (cm/s)

表層地盤の固有周期 T_S (s)に対する S_{V20} の値		
$T_S < 0.4$ $S_{V20} = 237 T_S^{3/2}$	$0.4 \leq T_S \leq 0.8$ $S_{V20} = 150 T_S$	$0.8 < T$ $S_{V20} = 120$

以上に示した地震時地盤変位及び地震時周面せん断力の計算方法は、各地層の硬軟分布や非線形性の影響を考慮した表層地盤の1次モード解として導かれたもの¹¹⁾である。

レベル1地震動の標準応答速度 S_{V0} は「駐車場設計・施工指針 同解説」¹⁴⁾を準用したものであり、平成24年2月の「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 V. 揚排水機場編」を踏襲したものである。レベル2-1地震動の標準応答速度 S_{V10} は、耐震性能照査上の基盤面で観測された近年のプレート境界型地震の強い地震動を観測した記録の速度応答スペクトルを包絡するものとして、今回の改定において新たに設定したものである。また、レベル2-2地震動の標準応答速度 S_{V20} は、平成7年(1995年)兵庫県南部地震による加速度強震記録を耐震性能照査上の基盤面に引き戻した波形を基に速度応答スペクトルを算出した結果に基づくものである。ここで、 S_{V0} 及び S_{V10} の設定にあたっては、レベル1地震動及びレベル2-1地震動が生じた際の表層地盤の減衰定数を、いずれも0.10と見込んでいる。また、 S_{V20} の設定にあたっては、レベル2-2地震動が生じた際の表層地盤の減衰定数を0.15

と見込んでいる。表-解6.3.2～表-解6.3.4を図示すると、図-解6.3.2のようになる。

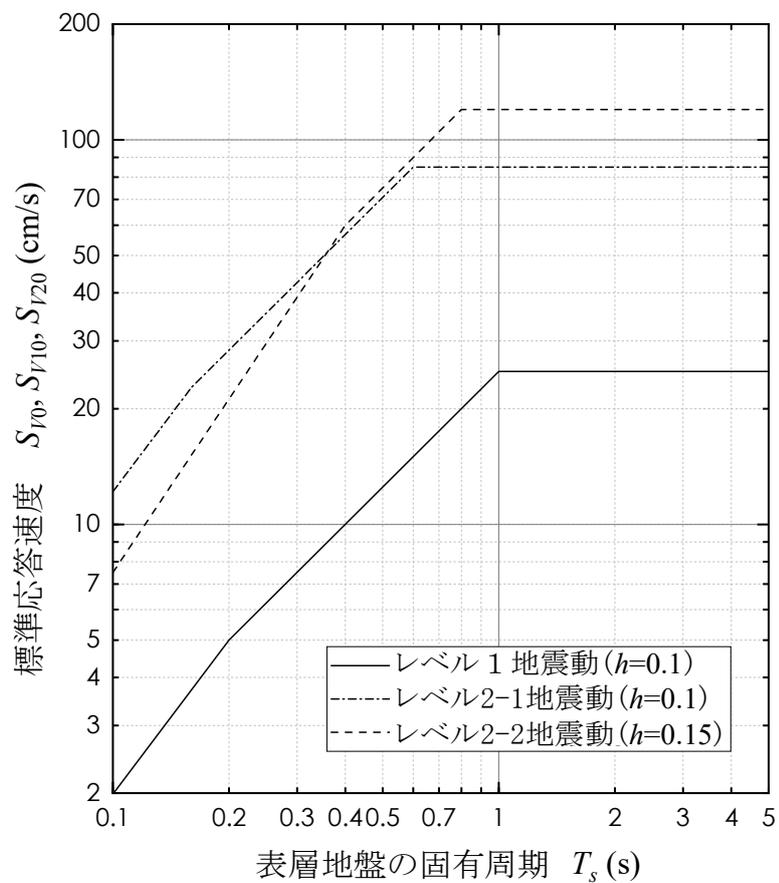


図-解6.3.2 レベル1地震動、レベル2-1地震動及びレベル2-2地震動の標準応答速度

6.3.4 地震時土圧

地震時土圧は、6.3.6又は6.3.7に規定する水平震度を用いて、構造物の形状、土質条件、地盤の動的挙動等を考慮して、適切に設定するものとする。

地震時土圧は、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」（平成24年3月）³⁾に基づき、式（解6.3.24）により分布荷重として算出する。

$$p_{EA} = \gamma x K_{EA} + q' K_{EA} \dots \dots \dots \text{（解6.3.24）}$$

ここに、

p_{EA} ：深さ x (m)における地震時主働土圧強度（kN/m²）

K_{EA} ：地震時主働土圧係数で、式（解6.3.25）により算出してよい。

- | | | |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 1) 背面が土とコンクリートの場合 | | |
| 砂及び砂れき | $K_{EA} = 0.21 + 0.90k_{hg}$ | } |
| 砂質土 | $K_{EA} = 0.24 + 1.08k_{hg}$ | |
| 2) 背面が土と土の場合 | | |
| 砂及び砂れき | $K_{EA} = 0.22 + 0.81k_{hg}$ | |
| | | $\dots \dots \dots \text{（解6.3.25）}$ |
| | 砂質土 | $K_{EA} = 0.26 + 0.97k_{hg}$ |

k_{hg} ：6.3.6に規定するレベル1地震動の地盤面における水平震度 k_{hg} 又は6.3.7に規定するレベル2地震動の地盤面における水平震度 k_{h1g} 若しくは k_{h2g} であり、 $c_u = 1.0$ として算出する。

γ ：土の単位体積重量（kN/m³）

q' ：地震時の地表載荷荷重（kN/m²）

ただし、 q' は地震時に確実に作用するもののみとし、活荷重は含まないものとする。

ここで、式（解6.3.25）は、物部・岡部による土圧の算出式をレベル2地震動まで適用できるように拡張した修正物部・岡部法による地震時主働土圧係数を簡易な近似式として与えたものである。

また、式（解6.3.25）は地下水位以浅の土を対象としたものであり、地下水位以深の土による地震時土圧は、式（解6.3.26）により水中の見かけの水平震度を算出した上で、式（解6.3.24）及び式（解6.3.25）を用いて算出するのがよい。なお、式（解6.3.24）を用いる際には、地下水位以深の土の単位体積重量に水中単位体積重量を用いるものとする。また、静水圧は地震時土圧と別に考慮しなければならない。

$$k_{hg}' = \frac{\gamma \cdot h_1 + \gamma' \cdot h_2 + \gamma_w \cdot h_2 + q'}{\gamma \cdot h_1 + \gamma' \cdot h_2 + q'} \times k_{hg} \dots \dots \dots \text{（解6.3.26）}$$

ここに、

k_{hg}' ：水中の見かけの水平震度

γ ：地下水位以浅の土の単位体積重量（kN/m³）

γ' ：地下水位以深の土の水中の見かけの単位体積重量（kN/m³）

γ_w ：水の単位体積重量（kN/m³）

- h_1 : 地下水位以浅の土層厚 (m)
- h_2 : 地下水位以深の土層厚 (m)
- q' : 地震時の地表載荷荷重 (kN/m²)
- k_{hg} : 6.3.6.に規定するレベル1地震動の地盤面における水平震度 k_{hg} 又は6.3.7に規定するレベル2地震動の地盤面における水平震度 k_{h1g} 若しくは k_{h2g} であり、 $c_u = 1.0$ として算出する。

6.3.5 地震時動水圧

地震時動水圧は、水位、構造物の形状及び地震時の応答等を考慮して、適切に設定するものとする。

地震時動水圧は、Westergaardの式を基本として、式(解6.3.27)により算出し、慣性力の作用方向と同一の方向に作用させるのがよい。

$$p_d = \frac{7}{8} \gamma_w k_{hS} \sqrt{H \cdot h} \dots\dots\dots \text{(解6.3.27)}$$

ここに、

- p_d : 地震時動水圧 (kN/m²)
- γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m³)
- k_{hS} : 地震時に構造物に生じる応答に相当する水平震度で、レベル1地震動に対しては式(6.3.1)、レベル2地震動に対しては式(6.3.3)もしくは式(6.3.4)に基づいて算出してよい
- H : 水深 (m)
- h : 水面から地震時動水圧が作用する点までの水深 (m)

ここで、Westergaardの式は、ダムのような片側にのみ水が存在する壁状構造物に作用する地震時動水圧を与えるものであるが、解析上の簡便さを考慮して、水門及び堰の堰柱の水流直角方向に対する耐震性能の照査のように、両側に水が存在する場合にも用いてよい。また、「下水道施設の耐震対策指針と解説」¹³⁾を準用し、池幅による補正式を適用してもよい。

なお、地震時動水圧の算出においては、通常想定される水位を用いればよい。機場本体を離散型の骨組構造にモデル化するにあたって、ある節点に水面から深さ $h_1 \sim h_2$ (m)における地震時動水圧を負担させる場合、その節点には式(解6.3.28)により算出される付加質量 m_d (t)を与えればよい。

$$m_d = \frac{7}{12} \frac{\gamma_w}{g} b \left(\sqrt{H \cdot h_2^3} - \sqrt{H \cdot h_1^3} \right) \dots\dots\dots \text{(解6.3.28)}$$

ここに、

- b : 断面奥行き幅 (m)

6.3.6 レベル1地震動の水平震度

レベル1地震動の水平震度は、式(6.3.1)により算出する地盤面における水平震度 k_{hg} を用いるものとする。

$$k_{hg} = c_z \cdot c_U \cdot k_{hg0} \dots \dots \dots (6.3.1)$$

ここに、

k_{hg} : レベル1地震動の地盤面における水平震度 (小数点以下2けたに丸める)

k_{hg0} : レベル1地震動の地盤面における水平震度の標準値で、地盤種別がI種、II種、III種に対して、それぞれ、0.16、0.20、0.24とする。

c_z : 4.4に規定するレベル1地震動の地域別補正係数

c_U : 水平震度の深さ方向の低減係数で、式(6.3.2)により算出する。

$$c_U = 1 - 0.015z \quad (\leq 1.0) \dots \dots \dots (6.3.2)$$

z : 耐震性能照査上の地盤面からの深さ (m)

レベル1地震動の水平震度 k_{hg} は、レベル1地震動の地盤面における水平震度の標準値 k_{hg0} を4.4に規定する地域別補正係数 c_z 及び深さ方向の低減係数 c_U により補正して算出することとした。これは、「駐車場設計・施工指針」¹⁴⁾のうち、地下駐車場の耐震設計を参考としたものであり、地下駐車場は一般に、見かけの単位体積重量が周辺地盤に比して小さく、地震時地盤変形がその挙動に対して支配的である点で、機場本体と類似した構造物であるためである。

ここで、レベル1地震動の地盤面における水平震度の標準値 k_{hg0} は、地盤種別に応じて、0.16~0.24とした。これは、「道路橋示方書・同解説 (V耐震設計編)」(平成24年3月)³⁾等を参考にして設定したものである。

6.3.7 レベル2地震動の水平震度

レベル2地震動の水平震度は、(1)及び(2)の規定により算出するものとする。

(1) レベル2-1地震動の水平震度

レベル2-1地震動の水平震度は、式(6.3.3)により算出する地盤面における水平震度 k_{h1g} を用いるものとする。

$$k_{h1g} = c_{1Z} \cdot c_U \cdot k_{h1g0} \dots \dots \dots (6.3.3)$$

ここに、

k_{h1g} ：レベル2-1地震動の地盤面における水平震度（小数点以下2けたに丸める）

k_{h1g0} ：レベル2-1地震動の地盤面における水平震度の標準値で、地盤種別がI種、II種、III種に対して、それぞれ、0.50、0.45、0.40とする。

c_{1Z} ：4.4に規定するレベル2-1地震動の地域別補正係数

c_U ：水平震度の深さ方向の低減係数で、式(6.3.2)により算出する。

(2) レベル2-2地震動の水平震度

レベル2-2地震動の水平震度は、式(6.3.4)により算出する地盤面における水平震度 k_{h2g} を用いるものとする。

$$k_{h2g} = c_{2Z} \cdot c_U \cdot k_{h2g0} \dots \dots \dots (6.3.4)$$

ここに、

k_{h2g} ：レベル2-2地震動の地盤面における水平震度（小数点以下2けたに丸める）

k_{h2g0} ：レベル2-2地震動の地盤面における水平震度の標準値で、地盤種別がI種、II種、III種に対して、それぞれ、0.80、0.70、0.60とする。

c_{2Z} ：4.4に規定するレベル2-2地震動の地域別補正係数

c_U ：水平震度の深さ方向の低減係数で、式(6.3.2)により算出する。

レベル2地震動に対する水平震度としては、2.2の規定に基づいて、レベル2-1地震動の水平震度とレベル2-2地震動の水平震度の2種類を規定した。

レベル2-1地震動及びレベル2-2地震動の水平震度 k_{h1g} 及び k_{h2g} は、地盤面における水平震度の標準値 k_{h1g0} 及び k_{h2g0} を地域別補正係数 c_{1Z} 又は c_{2Z} 及び深さ方向の低減係数 c_U により補正して算出することとした。ここで、地盤面における水平震度の標準値は、地盤種別に応じて、レベル2-1地震動に対しては0.40～0.50、レベル2-2地震動に対しては0.60～0.80とした。これらは、レベル2-1地震動については、大正12年（1923年）関東地震において東京周辺で生じた地盤上の加速度が、関東地震の際の被害状況の記録等に関する近年の分析を踏まえると、0.4～0.5G程度と考えられていること、また、レベル2-2地震動については、平成7年（1995年）兵庫県南部地震において地盤上で実測された加速度記録が0.6～0.8G程度であったことを考慮して設定したものである。

6.4 液状化の影響

6.4.1 一般

機場本体及び基礎の応答値の算出においては、土層の液状化の判定を6.4.2の規定により行う。液状化の判定を行う必要がある土層が存在する場合には構造形式等に応じて適切に液状化の影響を考慮するものとし、少なくとも、6.4.3の規定により、浮上りが生じないことを照査するものとする。

埋設管等の地下構造物の震災事例において、基礎地盤における土層の液状化に伴う構造物の浮上り現象が確認されている。機場本体に浮上りが発生した場合、揚排水機場としての機能に影響を及ぼすことが懸念されるため、機場本体及び基礎の応答値の算出にあたって、土層に液状化が生じる可能性のある場合には、液状化の判定を行う必要がある。

土層の液状化の判定は、6.4.2の規定に従うものとし、液状化の判定を行う必要がある土層が存在する場合、少なくとも6.4.3の規定により浮上りが生じないことを照査することとした。

震度法又は地震時保有水平耐力法を用いる場合、液状化を考慮するケースと考慮しないケースの2通りを検討する必要がある。このとき、液状化が生じると判定された土層の土質定数は「河川構造物の耐震性能照査指針Ⅳ．水門・樋門及び堰編」に準じて適切に低減させる必要がある。

応答変位法を用いる場合、地盤の液状化を考慮すると、地震時地盤変位が大きくなる一方で、機場本体周辺の地盤反力も低下し、それらの結果として機場本体及び基礎にとって厳しい状態とはならない場合が多いため、液状化の影響を考慮する必要はない。

本指針では、耐震性能照査にあたって考慮すべき液状化の影響として少なくとも浮上りについて照査することを基本としているが、浮上り以外に懸念される事象がある場合は、それらの事象を適宜考慮する必要がある。例えば、地盤の液状化や側方流動により機場本体の不同沈下が生じることが考えられる。

6.4.2 液状化の判定

(1) 液状化の判定を行う必要がある土層

沖積層の土層で次の3条件すべてに該当する場合には、(2)によって液状化の判定を行わなければならない。

- 1) 地下水位が現地盤面から10m以内にあり、かつ、現地盤面から20m以内の深さに存在する飽和土層
- 2) 細粒分含有率 FC が35%以下の土層、又は、 FC が35%を超えても塑性指数 IP が15以下の土層
- 3) 50%粒径 D_{50} が10mm以下で、かつ、10%粒径 D_{10} が1mm以下である土層

(2) 液状化の判定

(1)により液状化の判定を行う必要がある土層に対しては、液状化に対する抵抗率 F_L を式(6.4.1)により算出し、この値が1.0以下の土層については液状化するとみなすものとする。

$$F_L = R/L \dots\dots\dots (6.4.1)$$

$$R = c_W R_L \dots\dots\dots (6.4.2)$$

$$L = r_d k_{hgL} \sigma_v / \sigma'_v \dots\dots\dots (6.4.3)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x \dots\dots\dots (6.4.4)$$

$$k_{hgL} = c_z k_{hgL0} \dots\dots\dots (6.4.5)$$

$$\sigma_v = \gamma_{t1} h_w + \gamma_{t2}(x - h_w) \dots\dots\dots (6.4.6)$$

$$\sigma'_v = \gamma_{t1} h_w + \gamma'_{t2}(x - h_w) \dots\dots\dots (6.4.7)$$

(レベル1地震動及びレベル2-1地震動の場合)

$$c_W = 1.0 \dots\dots\dots (6.4.8)$$

(レベル2-2地震動の場合)

$$c_W = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases} \dots\dots\dots (6.4.9)$$

ここに、

F_L : 液状化に対する抵抗率

R : 動的せん断強度比

L : 地震時せん断応力比

c_W : 地震動特性による補正係数

R_L : 繰返し三軸強度比で、(3)の規定により求める。

r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

k_{hgL} : 液状化の判定に用いる地盤面の水平震度

c_z : 地域別補正係数で、4.4に規定する c_z 、 c_{1Z} 、又は c_{2Z} とする。

k_{hgL0} : 液状化の判定に用いる地盤面の水平震度の標準値で、表-6.4.1に規定する値

σ_v : 全上載圧 (kN/m²)

σ'_v : 有効上載圧 (kN/m²)

x : 地表面からの深さ (m)

γ_{t1} : 地下水位以浅の土の単位体積重量 (kN/m³)

γ_{t2} : 地下水位以深の土の単位体積重量 (kN/m³)

γ'_{t2} : 地下水位以深の土の有効単位体積重量 (kN/m³)

h_w : 地下水位の深さ (m)

沖積層の土層については、液状化が生じると判定される土層を特定するために、液状化の判定を行うものとする。

液状化の判定に用いる地盤面の水平震度は、地震動のタイプと地盤種別に応じて、表-6.4.1の標準値に地域別補正係数を乗じた値を用いるものとする。

表-6.4.1 液状化の判定に用いる地盤面の水平震度の標準値 k_{hgL0}

地盤種別	レベル 1	レベル2-1地震動	レベル2-2地震動
I 種	0.12	0.50	0.80
II 種	0.15	0.45	0.70
III 種	0.18	0.40	0.60

(3) 繰返し三軸強度比

繰返し三軸強度比 R_L は式 (6.4.10) により算出するものとする。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \dots\dots\dots (6.4.10) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7 + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5}} & (14 \leq N_a) \end{cases}$$

$$N_1 = 170N / (\sigma'_{vb} + 70) \dots\dots\dots (6.4.11)$$

ここに、

R_L : 繰返し三軸強度比

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値で、50%粒径 D_{50} に応じて式 (6.4.12) 又は式 (6.4.14) により算出する

N_1 : 有効上載圧100kN/m²相当に換算した N 値

σ'_{vb} : 標準貫入試験を行ったときの有効上載圧 (kN/m²)

【 $D_{50} < 2$ mmの場合】

$$N_a = c_{FC}(N_1 + 2.47) - 2.47 \dots\dots\dots (6.4.12)$$

$$c_{FC} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \dots\dots\dots (6.4.13) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{cases}$$

【 $D_{50} \geq 2$ mmの場合】

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\} N_1 \dots\dots\dots (6.4.14)$$

N : 標準貫入試験から得られる N 値

c_{FC} : 細粒分含有率による N 値の補正係数

FC : 細粒分含有率 (%) (粒径75 μ m以下の土粒子の通過質量百分率)

D_{50} : 50%粒径 (mm)

レベル1地震動及びレベル2地震動に対する液状化の判定方法を規定したものである。なお、特に必要がある場合には、対象地点における詳細な地盤調査、室内土質試験等を実施し、液状化の判定を行うのがよい。

式(6.4.10)によって繰返し三軸強度比を推定するにあたっては、 N 値と細粒分含有率の組合せが特に重要である。したがって、粒度分布試験は深さ1m間隔程度ごとに行う必要があり、粒度分布試験の結果に応じて液性限界・塑性限界試験も同等の頻度で実施する必要がある。これらの試験結果は、地盤特性の総合的な評価を行う際にも役立つものである。

また、繰返し三軸強度比 R_L の算出式(6.4.10)、粒度の影響を考慮した補正 N 値 N_a の算出式(6.4.12)、細粒分含有率による N 値の補正係数 c_{FC} の算出式(6.4.13)を最新の検討成果¹⁵⁾を踏まえ改定した。東北地方太平洋沖地震後に、被災した河川堤防において数多くの不攪乱試料を採取し、繰返し三軸試験を実施した。これらの試料の中には、従来ほとんど試験が実施されてこなかった細粒分を多く含むものも含まれており、ここで得られた細粒分含有率と繰返し三軸強度比 R_L 、 N 値の関係から式(6.4.10)、式(6.4.12)、式(6.4.13)を見直したものである。式(6.4.10)で求めた繰返し三軸強度比 R_L は、細粒分含有率が比較的少ない範囲では改定前の式で求めた繰返し三軸強度比とほとんど変わらないが、粘性土に分類されるような細粒分を多く含む土では改定前に比べ大きな繰返し三軸強度比が得られる。

6.4.3 液状化による浮上がりの照査

6.4.2の規定により液状化の判定を行う必要がある土層がある場合は、機場本体に作用する過剰間隙水圧に伴う揚圧力を考慮した上で浮上がりの照査を行うものとする。

機場本体底版下面以深の土層が、6.4.2の規定によりレベル1地震動に対して液状化が生じると判定された場合には、「下水道施設の耐震対策指針と解説」¹³⁾を参考とし、浮上がりに対する安全率 F_S を式(解6.4.15)により算出し、1.1以上となることを照査するものとした。

$$F_S = \frac{W_S + W_B + Q_S + Q_B}{U_S + U_D} \dots\dots\dots \text{(解6.4.15)}$$

ここに、

- W_S : 機場本体の上載土の全重量 (kN)
- W_B : 機場本体、機械設備、機场上屋等の自重 (kN)
- Q_S : 機場本体の上載土のせん断抵抗 (kN)
- Q_B : 機場本体側面の摩擦抵抗 (kN)
- U_S : 機場本体底版下面に作用する静水圧による揚圧力 (kN)
- U_D : 機場本体底版下面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力 (kN) で、式(解6.4.16)により算出する。

$$U_D = \Delta u \cdot A = L_U \cdot \sigma'_v \cdot A \dots\dots\dots \text{(解6.4.16)}$$

ここに、

- A : 機場本体の底面積 (m²)
- σ'_v : 静水圧状態における機場本体底版と同じ深さの土中の有効上載圧 (kN/m²)
- L_U : 過剰間隙水圧比で、液状化に対する抵抗率 F_L に応じて式(解6.4.17)により算出する。なお、抵抗値 F_L は、機場本体直下における地下水面から深さ20mまでの土層のうち、液状化の判定を行う必要がある土層の深さ1m毎の F_L の平均値とする。
- Δu : 過剰間隙水圧 (kN/m²)

$$L_U = \begin{cases} F_L^{-\gamma} & (F_L \geq 1) \\ 1 & (F_L < 1) \end{cases} \dots\dots\dots \text{(解6.4.17)}$$

ただし、液状化に対する抵抗率 F_L が1.0以下の土層における Q_S 、 Q_B は考慮する必要はない。また、機場本体の上載土がない場合もあるため、 W_S 、 Q_S は必要に応じて考慮する。

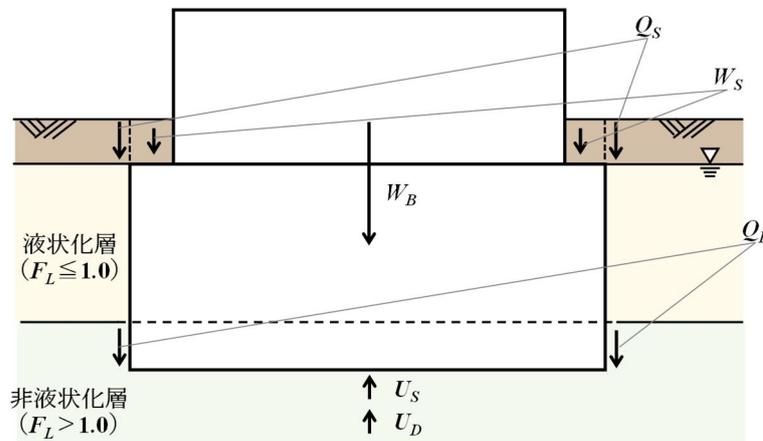


図-解6.4.1 浮上がりに対する照査の考え方

機場本体底版下面以深の土層の液状化に対する抵抗率 F_L が1.0を上回る場合であっても、機場本体周辺に液状化に対する抵抗率を算出する必要がある土層が存在し、過剰間隙水圧が機場本体底版下面にまわり込むことが懸念される場合は、浮上りの照査を行う必要がある。ただし、「下水道施設の耐震対策指針と解説」¹³⁾にあるとおり、液状化の判定を行う必要がない土層に1m以上根入れされている場合には、浮上りの照査を行う必要はない。

なお、液状化に伴う浮上りについては、レベル1地震動において浮上りに対する安全率 F_S が1.1以上となることを照査すればよい。これは、「道路土工-カルバート工指針」¹⁶⁾により、レベル1地震動において浮上りに対する安全性を確保していれば、レベル2地震動における浮上り変位は限定的であることが示されているためである。

また、直接基礎構造ではなく杭基礎構造の場合は、「下水道施設の耐震対策指針と解説」¹³⁾に示されている照査方法や安全率等を準用し、式(解6.4.16)で算出される揚圧力を用いて浮上りの影響を考慮して、引き抜き強度の照査を行う必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会 地震工学委員会 耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計ガイドライン (案) - 耐震基準作成のための手引き - , 2001年11月
- 2) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本, 2002年10月
- 3) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2012年3月
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 設計編, 2022年6月部分改定
- 5) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, 2012年3月
- 6) 国土交通省総合政策局建設施工企画課：機械工事施工管理基準 (案), 2010年4月
- 7) ハツ元 仁, 藤原 慎八, 星隈 順一, 谷口 哲憲, 北村 岳伸, 玉越 隆史：1連道路ボックスカルバートの地震時限界状態の評価に関する研究, 土木学会論文集A1, 構造・地盤工学, Vol. 71, No. 3, pp. 295-314, 2015年
- 8) 公益社団法人土木学会 原子力土木委員会：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, 2018年10月
- 9) 独立行政法人土木研究所：深い基礎の許容塑性率に関する工学的意義について, 土木研究所資料第4030号, 2006年12月
- 10) 一般財団法人国土技術研究センター：二次元解析を用いた揚排水機場の耐震性能照査における応答値の算出方法に関する検討資料, 令和6年3月
- 11) 国立研究開発法人土木研究所：大規模地震動に対する地中構造物の耐震設計のための表層地盤の実用的な応答評価手法, 土木研究所資料第4430号, 2022年6月
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人土木研究所：大型のボックスカルバートの耐震性照査手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料第1247号・土木研究所資料第4440号, 2023年4月
- 13) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策設計指針と解説, 2014年5月
- 14) 日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説, 1992年11月
- 15) 国立研究開発法人土木研究所：細粒分を含む砂の液状化強度の評価法に関する再検討, 土木研究所資料第4352号, 2016年3月
- 16) 日本道路協会：道路土工-カルバート工指針 平成21年度版, 2010年3月