

3. 設計津波を生じさせる地震の地震動に対する耐震性能照査

3. 1 照査の方針

盛土を含む構造の海岸堤防における設計津波を生じさせる地震の地震動に対する照査は、その地震がレベル1地震動を超える強度の場合においても、これに対して生じる被害が軽微であり、かつ、地震後に来襲する津波に対して所要の構造の安全を確保するとともに当該堤防の機能を損なわないものであることを確認するものとする。

解説

設計津波を生じさせる地震の地震動に対する耐震性能の照査方針及び留意点を表-3.1.1に示す。

表-3.1.1 設計津波を生じさせる地震の地震動に対する耐震性能の照査方針等

項目	安全性能	目的達成性能
照査方針 (設計津波を生じさせる地震の地震動)	地震後に来襲する津波（設計津波）に対して所要の構造の安全を確保 →被害が軽微 (津波の作用に対する海岸堤防の安定性や右記の機能を損なわない範囲の変位：使用限界)	地震後に来襲する津波（設計津波）に対して海岸堤防の機能を損なわない →海水侵入防止機能（津波に限定）
照査基準	<ul style="list-style-type: none"> 右記の天端高が設計津波の水位以上の高さであることの確認をもって、津波に対する海岸堤防の安定性を確認したとみなす。 波返工を有する構造の場合は、波返工や連続する表法被覆工、基礎工、根固工が地震後にも津波の作用に対抗できる構造であることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 天端高は、海水の侵入を防ぐように設定されることから、地震による沈下後にも設計津波の水位以上の高さに天端高があることを確認する。 波返工を有する構造の場合は、地震後の波返工の被災による海水侵入を防ぐため、地震後の波返工の変位が、当該波返工の厚さ等から設定される許容値以内に収まることを確認する。
照査方法	<ul style="list-style-type: none"> 簡易照査法（スクリーニング用） 静的照査法、動的照査法 	
留意点	<ul style="list-style-type: none"> 広域地盤沈下（設計津波を生じさせる地震の地震動時）を考慮すること。 	

(1) 設計津波について

技術上の基準では、「設計津波は、過去の浸水の記録等に基づく最大の津波又は数値計算等により算定した最大の津波を考慮して、原則として、数十年から百数十年に一度程度発生する比較的発生頻度の高い津波を定めるものとする」と規定されている。

また、堤防位置における設計津波の水位の設定手順については「設計津波の水位の設定方法等について（平成 23(2011)年 7 月 海岸省庁課長通知）」¹⁴⁾に示されている。

(2) 安全性能の照査の留意点

①照査基準（盛土）

設計津波を生じさせる地震の場合、地震後の海岸堤防が津波の作用に対して安定であるかを確認することが求められるが、地震後に変形した堤防が津波に対してどの程度の耐力があるかを定量的に算出することは困難である。

「津波防災地域づくりに係る技術検討報告書（平成 24(2012)年 1 月 津波防災地域づくりに係る技術検討会）」¹⁵⁾では、盛土構造物について「水圧、波力、漂流物の衝突その他の事由による振動及び衝撃：考慮不要（圧縮力に盛土は強い）」とされており、東日本大震災では津波越流しない場合には決壊する事例が確認されていないことから、以下の（3）に示す目的達成性能の照査基準である「地震による沈下後の天端高が設計津波の水位以上」であることをもって、安全性能も確認したものとみなすことができる。

②照査基準（波返工）

波返工は、表法被覆工の延長として堤防の天端上に突出した構造物である。このため、波返工だけでなく、表法被覆工、表法被覆工を支える基礎工、根固工が地震後の津波の作用に対抗できることの確認が必要である。

波返工から根固工に至る一連の構造について力学的に設計がなされている場合については、当該設計資料をもとに設計津波の波圧に対して耐力を有しているかを確認することができる。過去の風浪・津波から経験的に設定された構造の場合には、設計津波の波圧と過去の風浪・津波で受けた波圧と比較する方法も考えられるが、風浪・津波の観測記録が限られていることや、設計津波の波圧が観測記録のある風浪・津波での波圧より大きい場合等、判断が難しい。

過去の被災事例では、波返工の水平変位が波返工の厚さ以内に収まる場合、当該波返工や表法被覆工は機能するものとして存置した上でコンクリート巻き立てで復旧している。このため、波返工の構造の安全を確認する指標として、以下の（3）の目的達成性能の照査基準と同様に地震後の波返工の水平変位が波返工の厚さ等から設定される許容値以内であることを目安としてもよい。

堤体のすべり防止を目的にカウンターウェイトとして設置された根固工（波浪による洗掘防止を目的とした根固工は除く）については、当該根固工の被災によって、堤体、表法

被覆工及び基礎工が不安定となり、津波の作用に対する波返工自体の抵抗力が弱まる可能性がある。このため、例えば、根固工が砕石であり変形を確認できる照査方法がある場合は、地震後の砕石の勾配が安息角より緩くなっていることを確認する等、根固工の変形の状況を確認することが望ましい。

なお、波返工を含め海岸保全施設は経年的な劣化や変状が懸念されるため、「海岸保全施設維持管理マニュアル～堤防・護岸・胸壁の点検・評価及び長寿命化計画の立案～（平成26(2014)年3月 海岸省庁）」¹⁶⁾に基づき適切に維持管理がなされていることをあらかじめ確認する必要がある。

（3）目的達成性能の照査の留意点

①照査基準（天端高）

「海岸保全施設の技術上の基準・同解説（平成16(2004)年6月）」⁴⁾の「3. 2. 2 設計の方針」の解説にあるとおり、「堤防の天端高は、最も重要な構造諸元である。すなわち、高潮や津波による海水の侵入を防ぐ」とされていることから、津波による海水侵入防止機能を確認する指標は「天端高」とし、沈下後の天端高が設計津波の水位以上であることを確認の目安とすることができる。

なお、海水侵入防止機能の確認では上記の天端高に加えて海岸堤防の安定性も重要であることや、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 II 堤防編（平成28(2016)年3月）」¹²⁾に示すとおり、変形解析手法では地震による堤防の損傷状況は完全に模擬することはできないことから、解析結果において沈下後の盛土の天端形状に凹凸がある場合には、設計津波の水位の高さにおける盛土幅が極端に小さくなっていないかを確認する必要がある。また、波返工が設置されている場合、上記（2）に示したとおり、当該波返工が設計津波の波圧に対して安定性を有していることが確認できれば、地震後の当該波返工の天端高を照査基準としてもよい。

②照査基準（波返工）

波返工は、堤体と一体となって海水が堤内側に侵入することを防ぐ目的で設置されている。波返工は表法被覆工と一体に取り付ける必要性から、波返工と表法被覆工の伸縮目地の位置は一致する。このため、波返工が地震により変位し目地に開きが生じると、海水が侵入する恐れがある。伸縮目地の間隔は6～10m程度であるが、地盤調査の箇所数の制限から伸縮目地間隔の精度で波返工同士の相対変位を推定することは困難である。このため、波返工の目的達成性能を確認する指標としては、照査断面での地震後の波返工の水平変位が波返工の厚さ等から設定される許容値以内であることを目安とすることができる。

③広域地盤沈下について

技術上の基準では「広域にわたって地殻変動に伴う地盤沈下が予測される場合には、そ

の影響を考慮するものとする」とされている。海岸堤防の地震時の変形解析では、広域地盤沈下は考慮されないため、耐震性能照査上の地盤面の高さについて、あらかじめ設計津波を生じさせる地震の地震動の津波浸水計算の過程で算出¹⁷⁾される広域地盤沈下量を加味して設定する必要がある。

なお、広域の地盤変動で陸側の隆起が想定される場合は、「津波浸水想定の設定の手引き Ver. 2.00（平成24(2012)年10月）」¹⁷⁾と同様に、万が一、隆起しなかった際の危険性を踏まえて隆起は考慮しないことが必要である。

（４）設計津波の水位より天端高が低い海岸堤防について

「設計津波の水位の設定方法等について（平成23(2011)年7月 海岸省庁課長通知）」¹⁴⁾では、海岸堤防の天端高について「設計津波の水位を前提として（中略）海岸の機能の多様性への配慮、環境保全、周辺環境との調和、経済性、維持管理の容易性、施工性、公衆の利用等を総合的に考慮しつつ、海岸管理者が適切に定めるものである」とされている。

上記の総合的な考慮から設計津波の水位に対して天端高を低く設定した海岸堤防については、地震後に来襲する津波（設計津波）に対して表-3.1.1 に示す安全性能や目的達成性能を有していないため、3. の耐震性能照査の対象外である。

なお、海岸堤防を設計津波の水位より天端高を低く設定した場合、設計津波が来襲した際の背後地への影響を考慮する必要があることから、海岸管理者は浸水解析の与条件として3. 2や3. 3を用いて地震で沈下した後の堤防高（広域地盤沈下含む）を把握しておく必要がある。

3. 2 照査方法

設計津波を生じさせる地震がレベル1地震動を超える強度の場合の当該地震に対する盛土を含む構造の海岸堤防における耐震性能は、変形、応力、ひずみ量等を精度よく評価できる手法により照査するものとする。

解説

照査方法の選択にあたっては、各照査法に関する文献や適用事例を参考に、照査対象の海岸堤防の構造に適した照査方法であることをあらかじめ確認する必要がある。

（１）簡易照査法

簡易照査法の代表例としては、レベル1地震動に対する耐震性能照査で用いられる震度法（2. 2参照）があるが、最近では動的照査法や静的照査法の知見を活かして簡易的に沈下量を算出できる「チャート式耐震診断システム」¹⁸⁾や「液状化による堤防の沈下量簡易推定法」¹⁹⁾がある。

このため、これら簡易照査法を活用して概略の沈下量や液状化可能性を確認することによって、静的照査法又は動的照査法を優先的に行うべき海岸堤防をスクリーニングするこ

とが考えられる。

なお、簡易照査法は一般的に安全側に沈下量が算出されるため、簡易照査法が想定している堤防・地盤条件と照査対象の海岸堤防が同等の条件であれば、簡易照査法の結果で照査基準を満足した場合には、簡易照査法の結果をもって照査したとみなしてもよい。ただし、堤防・地盤条件が複雑あるいは不明確である場合や、照査基準に近い沈下量の結果が算出された場合には、簡易照査法だけでなく静的照査法や動的照査法による確認が必要である。

○チャート式耐震診断システム（近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所）¹⁸⁾

<http://www.pa.kkr.mlit.go.jp/kobegicyo/gijyutsu/chart103.pdf>

○液状化による堤防の沈下量簡易推定法（国立研究開発法人 土木研究所）¹⁹⁾

http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/wf_environment/structure/pdf/ref06.pdf

（2）静的照査法

静的照査法は、地震の影響を静力学的に解析する手法であり、液状化の発生による土層の剛性低下を仮定し、土構造物としての自重を作用させ、その変形を算定するものである。

静的照査法の一つであるALID (Analysis for Liquefaction-Induced Deformation)は、河川堤防の耐震性能の照査に広く活用されている。

なお、解析の性質上、慣性力による破壊は考慮されない。このため、レベル1地震動に対する耐震性能（慣性力、液状化）を満足する構造であり、かつ、河川堤防のように盛土による傾斜堤の構造について、静的照査法は適用できる。

（3）動的照査法

動的照査法は、構造物の地震時挙動を動力的に解析するもので、地震動の時刻歴波形から構造物の地震時挙動を算定するものである。動的照査法には、FLIP、LIQCA、GEOASIA等様々な手法があるが、その一つであるFLIP (Finite element analysis program of Liquefaction Process)は港湾構造物の耐震性能の照査に広く活用されている。

動的照査法は、慣性力、液状化による変形を解析できる手法であるため、直立壁との複合型の盛土といった複雑な構造でも適用できる。

3. 3 照査に用いる設計震度、設計入力地震動

設計津波を生じさせる地震の地震動に対する照査に用いる設計震度、設計入力地震動を適切に設定するものとする。

解説

(1) 簡易照査法における震度、入力地震動

3. 2 (1) において、「チャート式耐震診断システム」¹⁸⁾及び「液状化による堤防の沈下量簡易推定法」¹⁹⁾について述べた。これらは、静的照査法又は動的照査法を優先的に実施する箇所のスクリーニングに用いるため、照査に用いる震度、入力地震動については、対象となる海岸堤防地点の設計津波を生じさせる地震の地震動と同等又はそれ以上の震度、入力地震動で沈下量を簡易推定してもよい。

例えば、中央防災会議の東海・東南海・南海の想定地震に係る強震断層モデルによる工学的基盤面の地震動データや、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 II 堤防編（平成 28(2016)年 3 月）4. 耐震性能の照査に用いる地震動」¹²⁾や「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（平成 24(2012)年 3 月）4.3 レベル 2 地震動、7.2 動的解析に用いる地震動」²⁰⁾に示す標準的なレベル 2 地震動（海岸堤防の地盤面）を用いることが考えられる。

(2) 設計津波を生じさせる地震の設計入力地震動の設定手順

設計津波の水位については、「設計津波の水位の設定方法等について（平成 23(2011)年 7 月 8 日海岸省庁課長通知）」¹⁴⁾に基づき、過去に発生した実績や想定地震津波から設定されており、その設定段階において津波断層モデルが選定されている。このため、設計津波を生じさせる地震の地震動の設定にあたっては、当該断層モデルを参考にすることとなる。

ここで、注意すべきは津波を推定するための津波断層モデルと強震動を推定するための強震断層モデルは断層パラメータが同じではないということである。理由としては、津波断層モデルが津波痕跡等を、強震断層モデルが震度分布等をそれぞれ再現するために設定されることから、両モデルは一致しない場合があるためである。

実績の地震や中央防災会議等の想定地震では、津波断層モデルと強震断層モデルの双方が公表されていることが多いため、当該資料を参考に以下の①～③の手順で設計入力地震動を設定することができる。

なお、強震断層モデルによる工学的基盤面の加速度の時系列波形データが既に公表されている場合については、①～③の手順によらず公表されたデータを用いてもよい。

- ①設計津波の水位の設定段階において対象の地域海岸における対象津波の地震を選定
- ②設計津波を生じさせる地震に係る断層パラメータを調査
(津波断層モデルと強震動断層モデルは同じではない)
- ③②から、地震調査研究推進本部の「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）（平成 28(2016)年 6 月）」²¹⁾を参考に、対象地震について、照査対象の海岸堤防における工学的基盤面の加速度の時系列波形を設定

(3) 静的照査法における設計入力地震動、設計震度

静的照査法を用いた耐震性能の照査では、(2)で算出した設計津波を生じさせる地震に係る工学的基盤面の加速度の時系列波形を設計入力地震動として、一次元地震応答解析により地盤面～工学的基盤面までの地震時せん断応力比を算出し、これをもとに F_L （液状化に対する抵抗率）の値を設定することができる。

なお、設計津波を生じさせる地震の地震動が、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 II 堤防編（平成 28(2016)年 3 月）」¹²⁾や「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（平成 24(2012)年 3 月）」²⁰⁾に示す標準的なレベル 2 地震動と同等以下の場合には、上記の方法によらず、標準的なレベル 2 地震動の設計震度（海岸堤防の地盤面）を用いて静的照査を行ってもよい。設計津波を生じさせる地震の地震動が、標準的なレベル 2 地震動と同等以下であることを確認する方法としては、例えば、加速度応答スペクトル（地盤面）や、速度の PSI（Power Spectral Intensity）値²²⁾（工学的基盤面）を用いた比較がある。

(4) 動的照査法における設計入力地震動

動的照査法を用いた耐震性能の照査では、(2)に示す設計津波を生じさせる地震に係る工学的基盤面の加速度の時系列波形を設計入力地震動として設定する必要がある。

なお、設計津波を生じさせる地震の地震動が、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 II 堤防編（平成 28(2016)年 3 月）」¹²⁾や「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（平成 24(2012)年 3 月）」²⁰⁾に示す標準的なレベル 2 地震動と同等以下の場合には、上記の方法によらず、標準的なレベル 2 地震動の加速度の時系列波形（ただし海岸堤防の地盤面の波形であることに注意）を用いて動的照査を行ってもよい。設計津波を生じさせる地震の地震動が、標準的なレベル 2 地震動と同等以下であることを確認する方法としては、例えば、加速度応答スペクトル（地盤面）や、速度の PSI（Power Spectral Intensity）値²²⁾（工学的基盤面）を用いた比較がある。

4. レベル 2 地震動に対する耐震性能照査

4. 1 照査の方針

盛土を含む構造の海岸堤防のうち、堤防の機能及び構造、堤防背後地の重要度、地盤高、当該地域の地震活動度等に基づいてより高い耐震性能が必要と判断されるものについてのレベル 2 地震動に対する照査は、レベル 2 地震動に対して生じる被害が軽微であり、かつ、地震後の速やかな機能の回復が可能なものであることを確認するものとする。
--

解説

レベル 2 地震動に対する耐震性能の照査方針及び留意点を表-4.1.1 に示す。