

震動に関する変動状態において壁体の滑動、転倒及び基礎地盤の支持力不足による破壊の照査に用いる照査用震度の算出法は、全て摩擦増大マツトを用いていない場合の壁体幅を求める条件に対して設定されたものである。

(b) 壁体の滑動に対する検討においては、壁体に働く鉛直力として以下を考慮することが多い。

- 1) 壁体と仮想した境界面から前方の積載荷重（バラ荷荷重等）を含まない壁体重量で、浮力を差し引いた値
- 2) 仮想した境界面に作用する土圧の鉛直成分

(c) 壁体の滑動に対する検討においては、壁体に働く水平力として以下を考慮することが多い。

- 1) 載荷重をかけた状態で、壁体と仮想した境界面に作用する土圧の水平分力
- 2) 残留水圧
- 3) 地震動作用時の性能照査では、上記のほか、壁体に作用する慣性力及び動水圧を考慮する。土圧は地震時土圧の水平分力とする。このほか、壁体に荷役機械がある場合は脚の水平力を考慮する。

(d) 摩擦係数については、【作】第11章9摩擦係数に準じることができる。

(e) ブロック積などのように水平目地のある係船岸については、目地ごとに噛み合わせの効果が十分期待され、かつそれにかかる全水平力に耐えるだけの強度をもつ、ほぞを設けることが望ましい。ほぞの構造については、【施】第4章3.1重力式防波堤（混成堤）に準じることができる。

(f) 壁体前面に洗掘防止、法先保護等の目的で、捨石、根固めブロック等を置いた場合でも、壁体の滑動に対しこれらの抵抗力は無視するのがよい。

②壁体の転倒に対する検討

(a) 壁体の転倒に対する安定の検討は、式(2.2.7)によって行うことができる。なお、次式において、添字 k 及び d はそれぞれ特性値及び設計用値を示す。また、当該式中における部分係数は表-2.2.3に示す値を用いることができる。表-2.2.3において「-」と示された部分に関する値は、便宜上、() 内の数値を用いて照査できることを示す。同表に示す部分係数（永続状態）は、過去の基準類における安全性水準を参考として設定した係数¹⁹⁾である。

$$m \cdot \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad R_d = \gamma_R R_k \quad S_d = \gamma_S S_k$$

$$R_k = (aW_k - bP_{B_k} + cP_{V_k}) \tag{2.2.7}$$

$$S_k = dP_{H_k} + eP_{w_k} + hP_{dw_k} + iP_{F_k}$$

ここに、

- W : 壁体を構成する材料の重量 (kN/m)
- P_B : 壁体に作用する浮力 (kN/m)
- P_V : 壁体に作用する鉛直土圧合力 (kN/m)
- P_H : 壁体に作用する水平土圧合力 (kN/m)
- P_w : 壁体に作用する残留水圧合力 (kN/m)
- P_{dw} : 壁体に作用する動水圧合力 (kN/m) (地震動作用時の場合のみ)
- P_F : 壁体に作用する慣性力 (kN/m) (地震動作用時の場合のみ)
- a : 壁体重量合力の作用線から壁体前趾までの距離 (m)
- b : 浮力の作用線から壁体前趾までの距離 (m)
- c : 鉛直土圧合力の作用線から壁体前趾までの距離 (m)
- d : 水平土圧合力の作用線から壁体底面までの距離 (m)
- e : 残留水圧合力の作用線から壁体底面までの距離 (m)
- h : 動水圧合力の作用線から壁体底面までの距離 (m) (地震動作用時の場合のみ)
- i : 慣性力の作用線から壁体底面までの距離 (m) (地震動作用時の場合のみ)

- R : 抵抗項 (kN・m/m)
- S : 荷重項 (kN・m/m)
- γ_R : 抵抗項に乗じる部分係数
- γ_S : 荷重項に乗じる部分係数
- m : 調整係数

表-2.2.3 壁体の転倒の性能照査に用いる部分係数

照査対象	抵抗項に乗じる部分係数 γ_R	荷重項に乗じる部分係数 γ_S	調整係数 m
壁体の転倒 (永続状態)	0.99	1.23	— (1.00)
壁体の転倒 (レベル1地震動に関する変動状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.10

(b) 残留水圧の特性値 P_{wk} は、【作】第4章3.1 残留水圧を参照して適切に算出する。また、ケーソンが海側と陸側の両側に長方形断面のフーチングを有する場合、浮力の特性値は、式(2.2.6)に準じてよい。

(c) 比較的小規模な壁体で、高さとの比が大きき縦長形状の場合、基礎捨石の不陸・局所的な変形等による壁体のわずかな傾斜や外力の変化などに対して、非常に敏感な構造断面となることがある。壁体の転倒は施設の機能喪失に直結することから、施工中及び完成後に十分な安全性を確保できるよう、施工方法・施工手順も含め慎重に検討する必要がある。材料・地盤定数や設計条件(残留水位等)の変動による外力変化等を予測することが困難な場合は、壁体幅を広くし滑動に対する安定性で決まる断面形状にするなどの工夫を行うことや、道路土工擁壁工指針の直接基礎の擁壁における転倒に対する安定の照査方法²¹⁻¹⁾などを参考に検討するなどの対応をとることが望ましい。

③基礎地盤の支持力に対する検討

(a) 浅い基礎として検討する場合、壁体の底面に作用する力は、鉛直方向と水平方向の合力であるため、【施】第2章3.2.5 偏心傾斜した作用に対する支持力により検討することができる。なお、性能照査に用いる標準的な部分係数は、表-2.2.4に示す値を用いることができる。

(b) 壁体の底面の地盤の支持力に対する安定の検討は、式(2.2.8)を用いて照査することができる。式(2.2.8)中における部分係数は、表-2.2.4に示す数値を用いることができる。なお、次式において、添字 k 及び d はそれぞれ特性値及び設計用値を示す。表-2.2.4において「—」と示された部分に関する値は、便宜上、() 内の数値を用いて照査できることを示す。式(2.2.8)を用いる場合、まず補助パラメータ F_f を $R_k = F_f \times S_k$ を満たすように、繰り返し計算 (R_k の式中に F_f が含まれていることに注意) によって決定し、これによって得られる R_k 及び S_k を用いて支持力の安定性照査を行う。

$$\begin{aligned}
 m \cdot \frac{S_d}{R_d} &\leq 1.0 \quad R_d = \gamma_R R_k \quad S_d = \gamma_S S_k \\
 F_f &= \frac{R_k(F_f)}{S_k} \\
 R_k &= \sum \left[\frac{\{c'_k s + (w'_k + q_k) \tan \phi'_k\} \sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi'_k / F_f} \right] \\
 S_k &= \sum \left\{ (w'_k + q_k) \sin \theta \right\} + \frac{a P_{Hk}}{r}
 \end{aligned} \tag{2.2.8}$$

ここに、

- P_H : 円弧滑りの滑り円内の土塊への水平作用の値 (kN/m)
- a : P_H の作用位置の円弧滑りの滑り円中心からの腕の長さ (m)

- c' : 粘性土地盤の場合においては、非排水せん断強さ、砂質土地盤の場合においては、排水条件における見掛けの粘着力 (kN/m^2)
- s : 分割細片の幅 (m)
- w' : 分割細片の有効重量 (kN/m) (水面上で気中重量、水面下で水中重量)
- q : 分割細片に作用する上載荷重 (kN/m)
- ϕ' : 有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角 ($^\circ$)
- θ : 分割細片底面が水平面となす角 ($^\circ$)
- F_f : 抵抗項と作用項の比を示す補助パラメータ
- r : すべり円弧の半径 (m)
- R : 抵抗項 (kN/m)
- S : 荷重項 (kN/m)
- γ_R : 抵抗項に乗じる部分係数
- γ_S : 荷重項に乗じる部分係数
- m : 調整係数

表-2.2.4 基礎地盤の支持力破壊の性能照査に用いる部分係数

照査対象	抵抗項に乗じる部分係数 γ_R	荷重項に乗じる部分係数 γ_S	調整係数 m
基礎地盤の支持力破壊 (永続状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.20
基礎地盤の支持力破壊 (レベル1地震動に対する変動状態)	— (1.00)	— (1.00)	1.00

また、分割細片に作用する上載荷重の特性値及び分布幅に関しては、【施】第2章3.2.5偏心傾斜した作用に対する支持力を参照することができる。

(c) 一般に基礎地盤の支持力の検討は、壁体部に載荷重をかけない状態に対して行う。しかし、壁体部に載荷重がかかる場合、偏心量は減少するが、鉛直分力は増大することになるので、必要に応じて検討を行う場合もある。

(d) 基礎マウンドの厚さは、基礎地盤の支持力不足による破壊の検討のほか、本体据付けのための平坦性、部分的な応力集中の緩和等の検討により決定することができる。その最小厚さは次の値とすることが望ましい。

- 1) 設置水深4.5m未満の係船岸については、0.5m以上、ただし捨石の平均直径の3倍以上。
- 2) 水深4.5m以上の係船岸については、1.0m以上、ただし捨石の平均直径の3倍以上。

(e) 重力式係船岸に対して、基礎杭を用いた構造形式は少ないが、その場合は【施】第2章3.4杭基礎に準じることができる。沈下の生じやすい地盤に支持杭を用いた場合は、杭に壁体底面を直接載せると壁体底面に空洞ができて不安定となり、裏埋材の流出の原因ともなる。この場合、杭頭を捨石層で覆う構造とする必要がある。

④沈下に対する検討

(a) 重力式係船岸は、地盤の特性及び構造の特性に応じ、地盤の圧密等による沈下に対して構造の安定を確保するものとする。

(b) 沈下の生じるおそれのある基礎地盤では、十分な土質調査を行い、【作】第5章1地盤の沈下によりあらかじめ沈下量を推定しておくことが重要である。推定された沈下量を基に、基礎面を高く設定することや、天端高を所定の高さに上げるため、上部工において最終的な調整が行えるような工夫を行う等の配慮をすることが望ましい。また、不同沈下により目地部の破壊及び不整合、上部工及びエプロン舗装の破壊等を生じやすいので注意が必要である。

(4) レベル2地震動に関する偶発状態における性能照査

レベル2地震動に対する耐震性能照査は、以下の本章2.2.4地震時における施設の変形量に対する性能照査を参考に、適切な地震応答解析あるいは実験により具体的に施設の変形量等を算定して行う。なお、レベル2地震動に関する偶発状態における変形量の標準的な限界値については本章1.5耐震強化施設に関する留意点を参照して、適切に設定することができる。

2.2.4 地震時における施設の変形量に対する性能照査

(1) 地震時における施設の変形等に対する性能照査手法

地震時における施設の変形等に対する性能照査手法は、大別すると地震応答解析による方法と、振動台等による振動実験による方法の二種類がある。実際に地震応答解析による変形照査を行うにあたっては、使用する解析手法の適用性が被災事例の再現解析等により確認されている必要がある。例えば、重力式係船岸などの港湾の施設に対しての適用性が確認されている手法としてはFLIP²²⁾等がある。この他の手法でも、被災事例等の再現などにより適用性が確認されていれば、適宜手法を選択してよい。

新規に考案された構造形式などで、解析手法の適用性を確認できるだけの被災事例が存在しない場合には、適切な振動実験の実験結果の再現解析などを通じて適用性を確認する必要がある。

これらの一般的な手法及びその留意点について記載する。なお、地震応答解析の詳細は、[参(施)]第1章2地震応答解析に関する基本事項を参照することができる。

①地震応答解析による方法

地震応答解析は表-2.2.5のように分類できる。以下に、この分類にしたがって、各種の地震応答解析法を説明する。地震応答解析手法によっては、変形等の照査を行う目的には適さないものもあるため、下記の説明を踏まえて、目的に応じた解析手法を選択する必要がある。

表-2.2.5 地震応答解析の分類

解析法 (飽和地盤の取り扱い)	有効応力解析法、全応力解析法 (固層及び液層、固層)
計算対象領域(次元)	一次元、二次元、三次元
一般的な計算モデル	重複反射モデル、質点モデル、有限要素モデル
材料特性	線形、等価線形、非線形
計算領域	時間領域解析法、周波数領域解析法

(a) 有効応力解析法と全応力解析法

液状化の予測・判定という観点や、土の変形挙動の予測という観点から見ると、地震応答解析は有効応力解析法に基づくものと全応力解析法に基づくものに分けることができる。特に、地震動作用時の港湾の施設の変形予測に際しては、地盤内の過剰間隙水圧の発生に伴う有効応力の減少(その極端な状態が液状化である)を考慮する必要がある場合が多い。これは、有効応力の減少など土の応力状態の変化に伴い、土の応力-ひずみ関係や減衰特性などが変化し、地盤の変形特性や応答特性が変化するためである。有効応力解析法は地盤に発生する過剰間隙水圧を計算により直接求めることができる方法であるが、全応力解析法では過剰間隙水圧の変化が計算されない。このため、例えば地盤の地震応答の計算において、ある程度以上の過剰間隙水圧(条件にもよるが、過剰間隙水圧比で概ね0.5以上)が発生する場合には、全応力解析法による計算結果は実際の地震応答とかなり異なる可能性が大きい。

簡便な全応力解析法を実務で用いることも多いが、液状化の発生が懸念されるような港湾の施設の変形照査においては、有効応力解析法を用いることが基本である。

(b) 計算対象領域(次元)による分類

計算の対象とする領域によって、解析は一次元、二次元、三次元と分類できる。平面的に広く水平に堆積した地層構造を持つ地盤を対象に、地震応答解析をする場合には、一般に一次元の解析が用いられることが多い。ただし、変形照査の対象となる構造物は三次元的な構造を持っているため、高次の解析法を必

要とする。岸壁のように奥行き方向に一様とみなすことのできる構造物—地盤系を対象とした変形照査を行う場合には、二次元の解析法を用いることが一般的である。杭のような構造物を含む領域を対象とする場合であっても、本来であれば三次元的な取り扱いが必要であるが、杭—地盤相互作用ばね等の特殊な要素を用いて二次元解析で近似されることが多い。三次元解析は、モデル化の煩雑さや計算時間の制約から必ずしも実務的に広く一般的な解析手法とはなっていないものの、重要度の高い施設や研究目的では実施される場合もある。

(c) 一般的な計算モデルの種類

1) 重複反射モデル

この計算モデルは、地盤を水平な土層の重なりとみなし、基盤から垂直に入射したせん断波が上方に進行し各層の境界で透過と反射を繰り返すとするものである。線形あるいは等価線形化手法により地震応答解析を行うモデルであり、一般には構造物の変形照査に用いられるモデルではない。

2) 質点モデル

地盤や構造物を1つまたは複数個の質点とばね及び減衰機構の組み合わせに置き換えるものである。この方法は、計算プログラムが比較的簡単であり、ばねに非線形な変位—復元力関係を導入することもできる。計算結果として簡易に変形量を得ることができるが、精度等の問題から一般には詳細な変形照査で用いられるモデルではない。建築物や地中構造物（埋設管や杭）に作用する応力等を算定する目的での動的解析で用いられることが多い。

3) 有限要素モデル等

このモデルは、図-2.2.8に示すように、地盤や構造物を有限個数の要素に分割するもので、幅広い分野で利用されている。この方法の特徴は、地盤の層厚や物性の二次元的な変化を容易に表現できることにある。実用プログラムとしては、FLUSH²³⁾、FLIP²²⁾等があるが、FLUSHの様な等価線形手法は、残留変形の予測には適さないことに注意が必要である。FLIPは、兵庫県南部地震の被災事例等の分析を通じて、数多くの港湾の施設の変形照査への適用性が確認されている²⁴⁾。また、陽解法による有限差分法のプログラムとしてはFLAC²⁵⁾があり、構成則に注意すれば有限要素法と同様の変形解析が実施できることが報告されている。

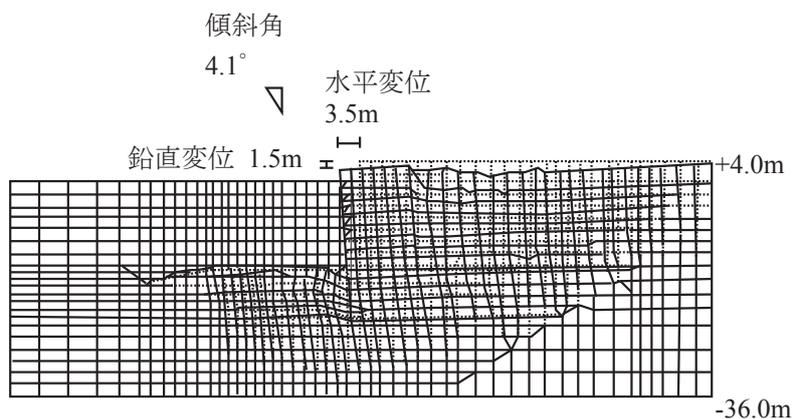


図-2.2.8 有限要素モデル（重力式係船岸）

4) 個別要素モデル等

個別要素モデルは、土や消波ブロック等の構造物を個々の粒状体にモデル化し、粒状体同士の接触による相互作用を計算して変形解析を実施するものである²⁶⁾。消波ブロックの回転等に伴う変形などの解析を得意とし、有限要素法とのハイブリッド解析手法なども提案されている²⁷⁾。

(d) 材料特性のモデル化

地震応答解析を実施する場合には、地盤を構成する土の材料非線形特性のモデル化が重要である。ここで、土の応力—ひずみ関係のような挙動特性を示した数理的なモデルを構成則とよぶ。地震動作用時のせん断

ひずみが比較的小さなレベルの場合、土の応力-ひずみの関係は線形的であるが、中程度のひずみあるいは大ひずみレベルでは顕著な非線形を示すため、このような場合の変形照査では非線形性を考慮できる構成則を用いる必要がある。

地震応答解析では、地盤の材料非線形性を考慮しない線形解析法、地盤が受けるひずみレベルに応じた材料定数を用いて線形解析を行う等価線形解析法、あるいは大ひずみ時までの土の応力-ひずみ関係を考慮する非線形応答解析法の種々の方法が提案されている。しかし、変形照査では、残留変形を調べるという目的から、線形解析法や等価線形解析法の適用が必ずしも適切ではない場合があり、非線形性を考慮できる構成則に基づく非線形応答解析法の適用が必要となる。

(e) 計算領域による分類

計算領域の観点から見ると、地震応答解析は時間領域解析法と周波数領域解析法に分類できる。有効応力解析法、あるいは材料特性を非線形として取り扱う計算は時間領域で逐次的に行われるのが一般的である。

②振動実験による方法

力学的な相似を考慮し、構造物に振動を与えるもので、地盤を含む構造物の全体的挙動を把握するのに有効な手段である。ただし、相似性を十分満たすような模型の作製等に、かなり高度な実験技術が必要となる。振動台等による振動実験は次のように分類される。

(a) 1G重力場における模型振動実験

対象とする構造物及び地盤の形状、力学的性質も考慮の上、相似率を満足するような模型を作製し、振動台により想定する地震動を重力場で与えるものである。一般に、大型の模型を作製することが可能であり、地盤形状や構造物の形状が複雑な場合にも対応が可能である。相似則としては、土の物性の拘束圧依存性を考慮したものが用いられることが多い²⁸⁾。

(b) 遠心力载荷装置による模型振動実験

遠心力载荷装置による遠心力を用いて、実物と同じ応力状態を模型中に再現し、相似則を満足させた状態で振動実験装置により想定する地震動を与えるものである。一般に、模型は小型となるが、土の物性と有効拘束圧との関係については仮定することなく拘束圧依存性を考慮した実験が可能となる。ただし、透水係数などについて相似則に基づく配慮が必要なほか、実験に用いる地盤材料の粒径の影響についても注意が必要となる。

(c) 現場振動実験

建設予定地点、あるいはそれと類似する地盤条件の下で、対象構造物と同種なもの、あるいはあまり縮小していない模型を作成し、人工地震あるいは自然地震による応答を観測する。人工地震を起こす方法としては、起震機の他に、発破による方法などがある²⁹⁾。

なお、模型振動実験や現場振動実験は有効な方法であるが、実際の境界条件等をそのまま再現できるわけではないという点にも注意する必要がある。例えば模型振動実験の場合、剛基盤入力条件となるため、下方への逸散減衰が考慮されず、地盤-構造物系の固有周期が強調されたような実験結果になりやすい。また、現場振動実験で発破を用いる場合、地震動による慣性力の影響等は反映されない。

2.2.5 セルラーブロックの性能照査

(1) 壁体が底版のないセルラーブロックで構成されている重力式係船岸は、他の重力式係船岸と異なり、中詰めにより壁体との一体性を保持する構造となっている。このため、他の重力式係船岸の安定検討に加えて、転倒に対して中詰めの抜け出しを十分考慮した検討を行うべきである。

(2) セルラーブロックの転倒に関する安定照査式

セルラーブロックの中詰めの抜け出しを考慮した転倒に対する検討は、式(2.2.9)によって行うことができる。なお、次式において、添字 k 及び d はそれぞれ特性値及び設計用値を示す。また、当該式中における部分係数は表-2.2.6に示す値を用いることができる。表-2.2.6において「-」と示された部分に関する値は、便宜上、()内の数値を用いて照査できることを示す。