

基礎から学ぶ擁壁の検討

目次

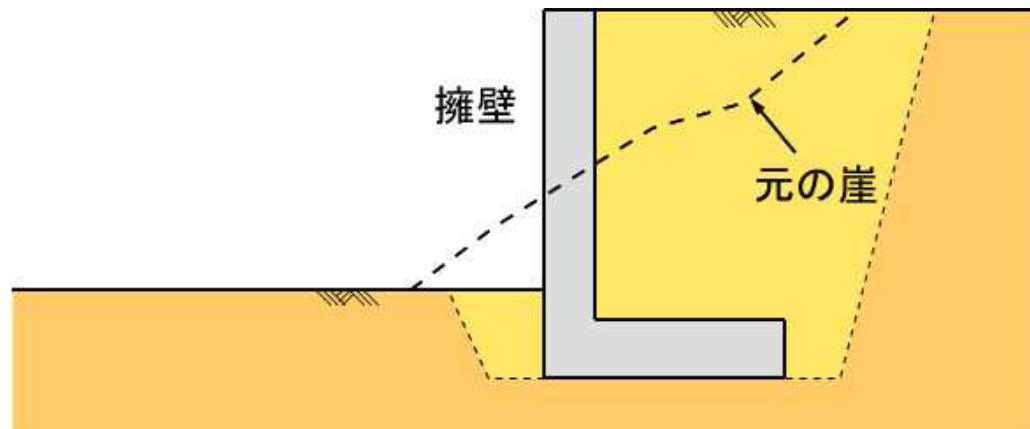
1. 擁壁の役割
2. 擁壁の種類
3. 擁壁設計の検討フロー
4. 擁壁に作用する力
5. 擁壁の安定計算
6. 擁壁たて壁・底版の部材計算（片持ばり式擁壁[L型]：鉄筋コンクリート）
7. 擁壁設計で留意すべき点

1. 擁壁の役割

「擁壁」の定義 その1

【道路土工擁壁工指針】

土砂の崩壊を防ぐために土を支える構造物で、土工に際し用地や地形等の関係で土だけでは安定を保ち得ない場合に、盛土部及び切土部に作られる構造物を擁壁という。



擁壁の概念図

「擁壁」の定義 その2

【宅地防災マニュアルの解説】

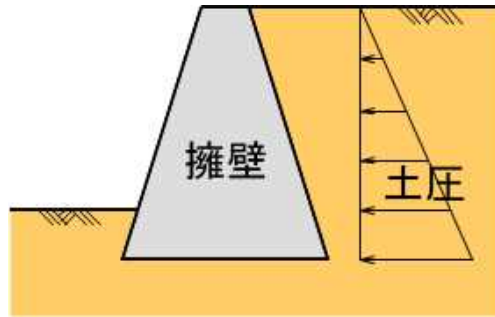
開発事業において、次のような「崖」が生じた場合には、崖面の崩落を防ぐために、原則としてその崖面を覆わなければならない。

1. 切土した土地の部分に生ずる高さが、2mを超える「崖」
2. 盛土した土地の部分に生ずる高さが、1mを超える「崖」
3. 切土と盛土を同時にした土地の部分に生ずる高さが2mを超える「崖」

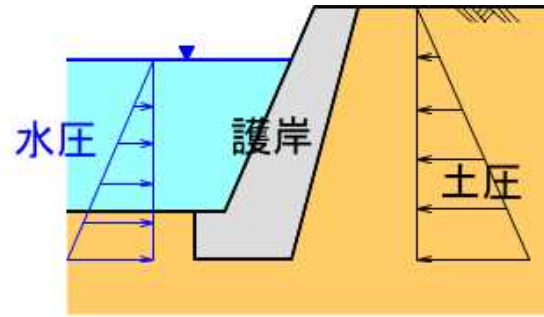
ただし、切土した土地の部分に生ずることとなる崖部分で、「切土のり面の勾配」（説明は省略します）に該当する崖面については、擁壁を設置しなくてもよい。

擁壁・護岸・堤防の違い その1

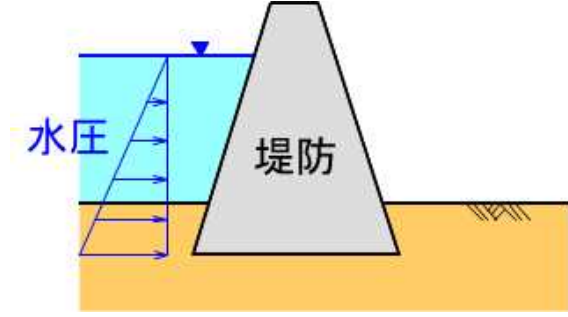
土を支える構造物の**擁壁**と機能的にも類似した構造物として、河川や調整池などの構造物である**護岸**や**堤防**がある。



擁壁



護岸



堤防

擁壁・護岸・堤防の違い その2

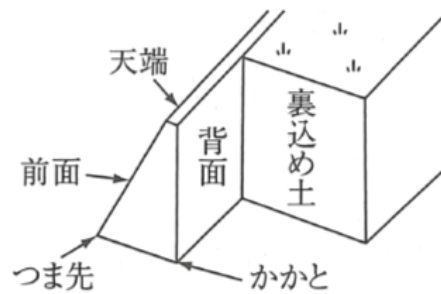
構造物の目的	擁壁	護岸	堤防
土砂の崩壊を防ぐために土を支える構造物	○	○	×
河川や池の水が流れ出ないようにする構造物	×	○	○
河川や池の水により土が侵食されないようにする構造物	×	○	×

護岸は、背面の土と前面の水の両方に対して役割を担っています。一方、堤防は、対象を原則、水のみとし、擁壁とは役割が異なります。

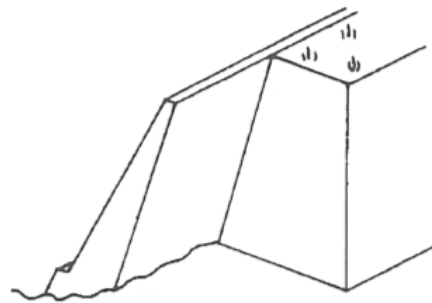
2. 擁壁の種類

「擁壁」の分類

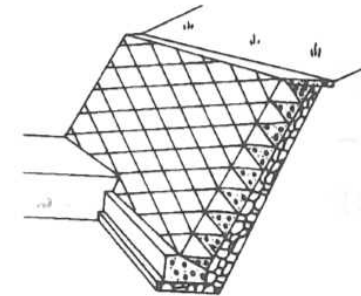
【重力式擁壁】



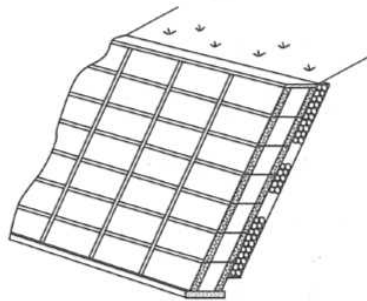
【もたれ式擁壁】



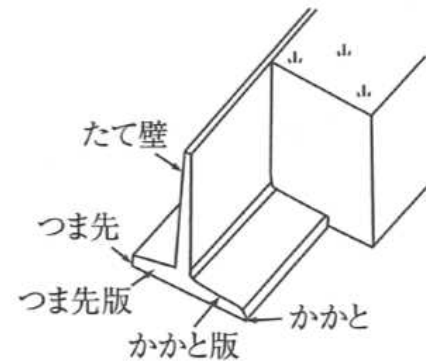
【ブロック積（石積）擁壁】



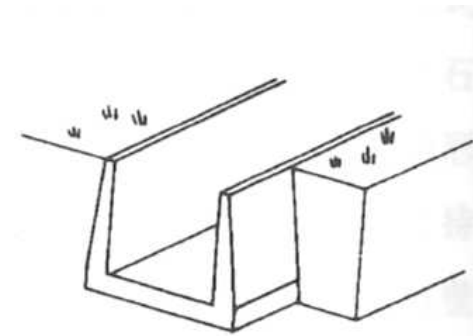
【大型ブロック積擁壁】



【片持ばり式擁壁】



【U型擁壁】



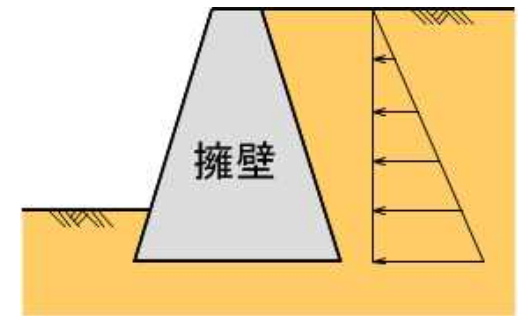
※図は「道路土工擁壁工指針」より引用

重力式擁壁

躯体自重により土圧に抵抗する擁壁

《特徴》

- 基本的には、**無筋コンクリート構造**
- コンクリートの躯体自重で安定性を確保
- 躯体自重が大きいため、基礎地盤が良好な箇所に適する
- 比較的小規模な擁壁に適する



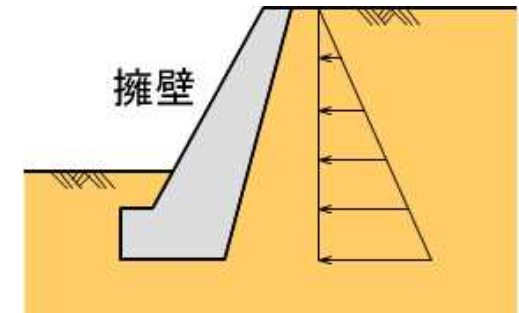
重力式擁壁

もたれ式擁壁

躯体自体では自立せず、背面土にもたれた状態で自重によって土圧に抵抗する形式の擁壁

《特徴》

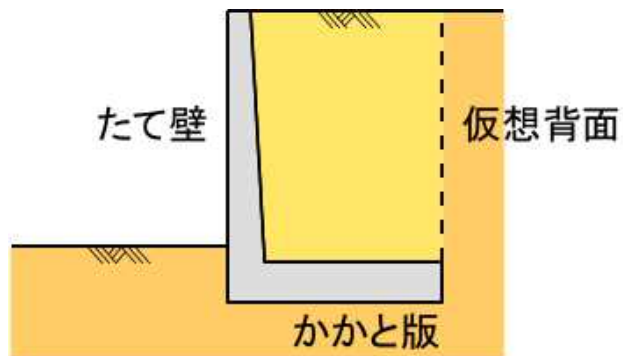
- 基本的には、**無筋コンクリート構造**
- 背面土が比較的安定した地山に適する
- 底版幅が小さいため、堅固な基礎地盤の箇所に適する
- 壁高の高さ（10m程度）がある場合も適用可
- 力学的な特性から**擁壁の厚さを薄く**できる



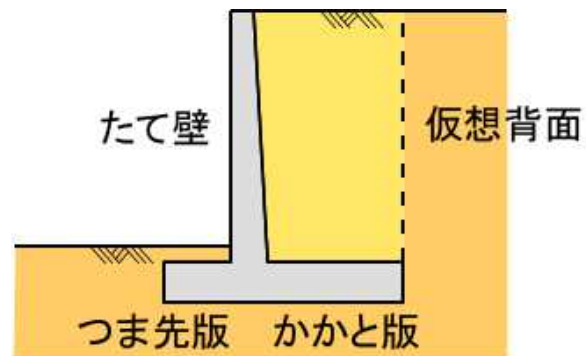
もたれ式擁壁

片持ばり式擁壁（その1）

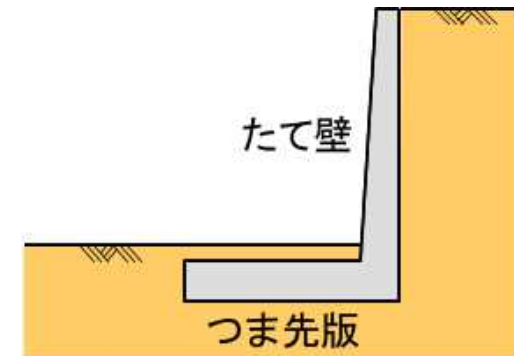
たて壁と底版とからなる擁壁。たて壁の位置により、L型、逆T型、逆L型に分類される。



L型



逆T型



逆L型

片持ばり式擁壁

片持ばり式擁壁（その2）

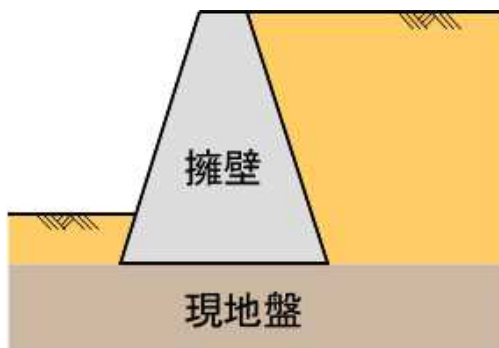
《特徴》

- 基本的には、鉄筋コンクリート構造
- L型、逆T型、逆L型に分類される
- かかと版の上の土を躯体と一体化した荷重とみなせ、合理的な構造である
- プレキャスト製品も多い
- 壁高の高さ（10m程度）がある場合も適用可
- 杭基礎にも適用しやすい
- 鉄筋コンクリート構造であり、部材が薄くできる
- 逆L型は、背面に張り出しがないため、土地境界の制約がある場合に向く
- 逆L型は、かかと版がなく裏込土の重量加算がないため、不合理な構造となる

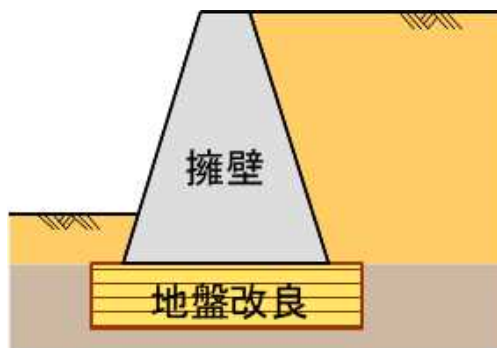
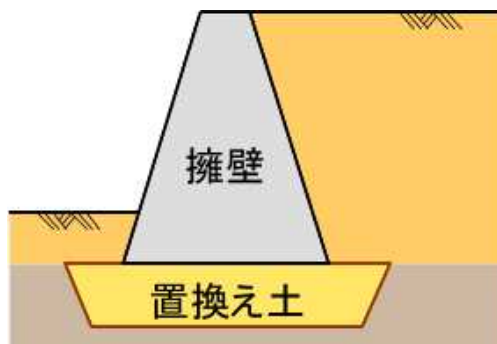
「基礎」の分類

【直接基礎】

基礎底面に作用する鉛直力を、基礎地盤面で直接、地盤反力として支持する基礎形式



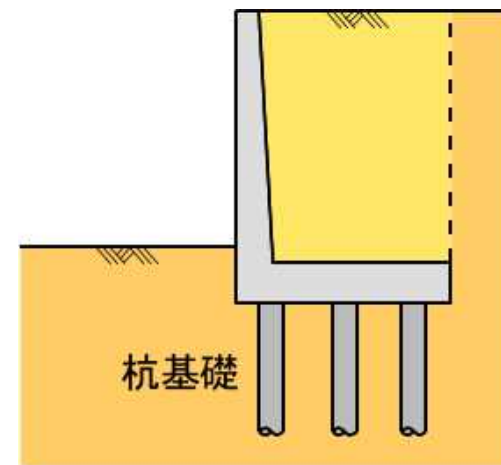
現地盤



置換え土・地盤改良

【杭基礎】

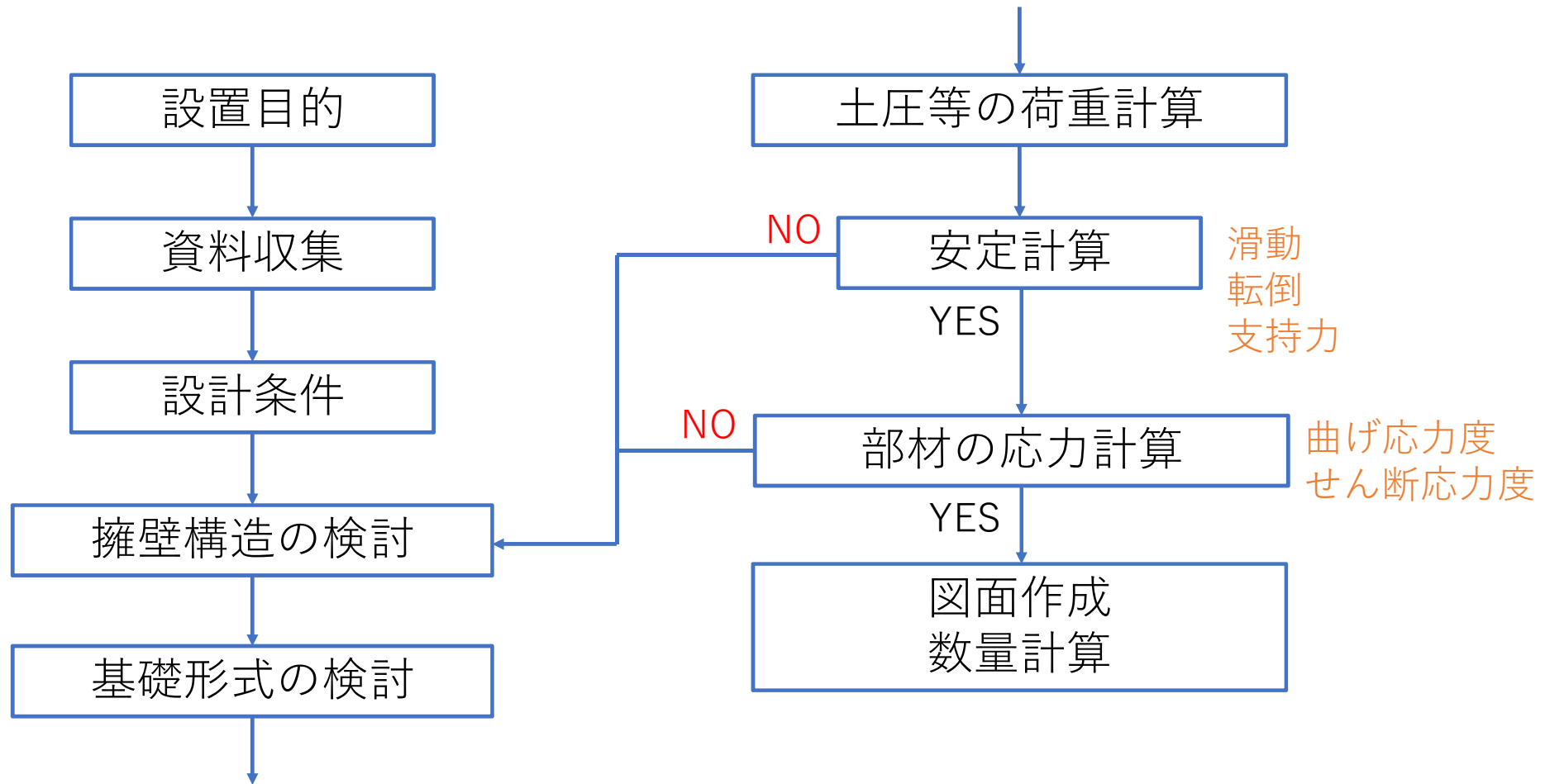
基礎底面に作用する鉛直力を杭に伝達して、杭先端の固い岩盤面や杭の周辺摩擦で支持する基礎形式



杭基礎

3. 擁壁設計の検討フロー

一般的な検討フロー



4. 擁壁に作用する力

擁壁に作用する一般的な荷重

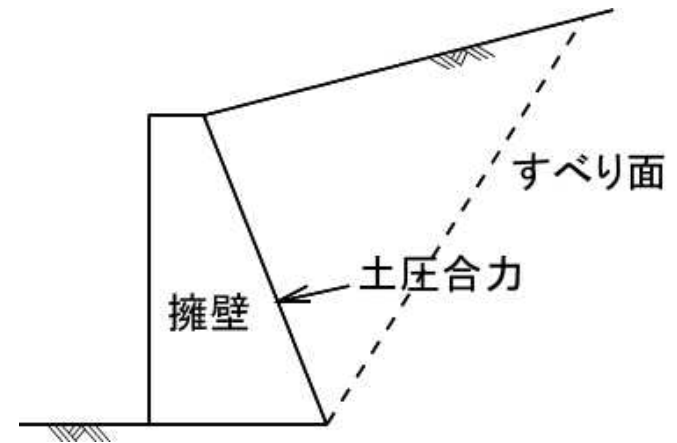
- 自重
- 上載荷重（自動車荷重、群集荷重、宅地荷重など）
- 土圧
- 水圧及び浮力
- 地震の影響（地震時の土圧、地震時慣性力など）
- 風荷重（※道路土工擁壁工指針）
- 衝突荷重（※道路土工擁壁工指針）
- フェンス荷重（※宅地防災マニュアルの解説）
- 雪荷重
- その他荷重（擁壁に直接載荷する工作物荷重など）

土圧の計算方法

【主な土圧の計算方法】

- クーロン土圧
- 試行くさび法による土圧

これらは、擁壁背後の土にすべり面が生じ、くさび状の土塊がすべり面に沿って動くという考えで導かれた。



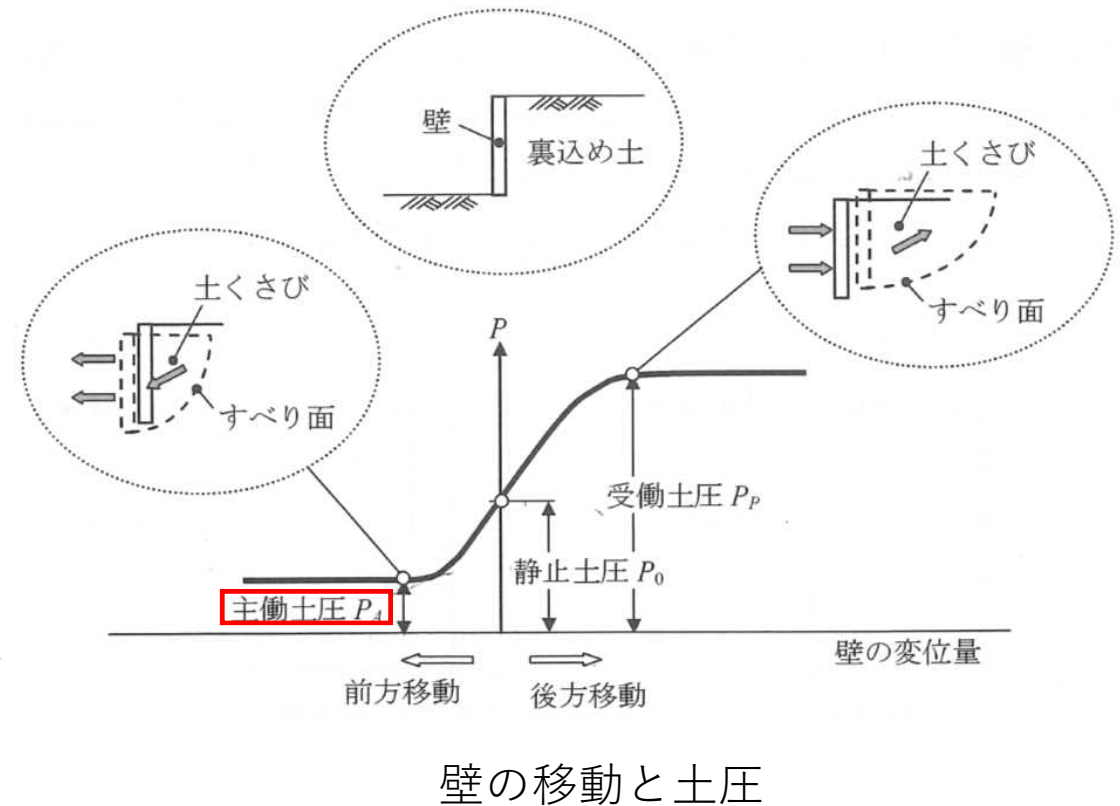
土圧の概念図

主働土圧と受働土圧

【擁壁に作用する土圧】

土圧は擁壁の変位に影響を受されるものとし、主働土圧・受働土圧・静止土圧の考え方があある。

通常、擁壁設計で適用する土圧は主働土圧である。



※図は「道路土工擁壁工指針」より引用

クーロン土圧（その1）

砂質土を対象とし、擁壁背後の土にすべり面が生じ、くさび状の土塊がすべり面に沿って動くという考えで導かれた計算方法。

クーロンの主働土圧（常時）の計算式

$$P_a = K_A \cdot \gamma \cdot H + K_A \cdot q$$

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot K_A \cdot \gamma \cdot H^2 + K_A \cdot q \cdot H$$

$$K_A = \frac{\cos^2(\phi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\alpha + \delta) \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha + \delta) \cdot \cos(\alpha - \beta)}} \right\}^2}$$

P_a : 土圧強度(kN/m)

P_A : 土圧(kN)

K_A : 主働土圧係数

γ : 土の単位体積重量(kN/m³)

H : 土圧作用高(m)

q : 上載荷重(kN/m)

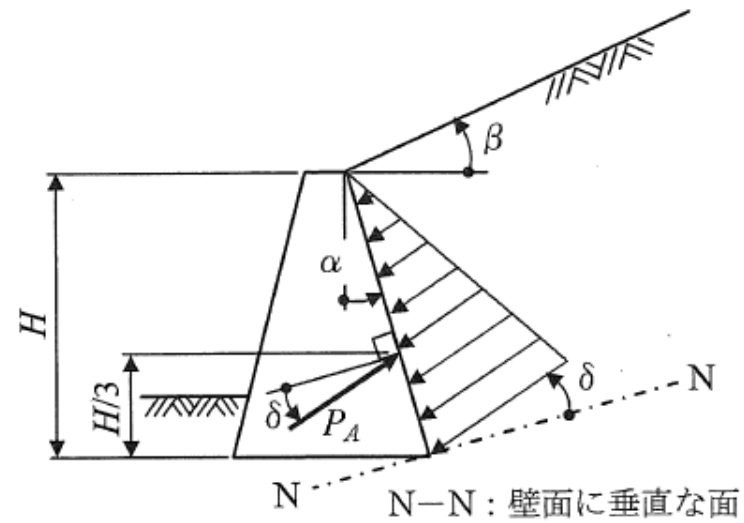
ϕ : 土の内部摩擦角(°)

δ : 壁面摩擦角(°)

α : 擁壁背面のなす角(°)

β : 背面土のなす角(°)

クーロン土圧（その2）



クーロン土圧（主働土圧）

※図は「道路土工擁壁工指針」より引用

クーロン土圧（その3）

《クーロン土圧の適用上の制限》

- 切土部土圧には適用できません。
- 土の内部摩擦角(ϕ) < 背面のなす角(β)となる場合は適用できません。
- 粘着力(c)を考慮することができません。
- 背面が水平または単一の傾斜地以外での使用は望ましくありません。

試行くさび法による土圧（その1）

背面が多段盛土のような複雑な場合にも対応できる。クーロン土圧を図解によって求める方法。

試行くさび法によるの主働土圧（常時）の計算式

$$P_A = \frac{W \cdot \sin(\omega - \phi)}{\cos(\omega - \phi - \alpha - \delta)}$$

P_A : 土圧(kN)

W : 土くさびの重量(kN)

ω : 仮定のすべり面の角(°)

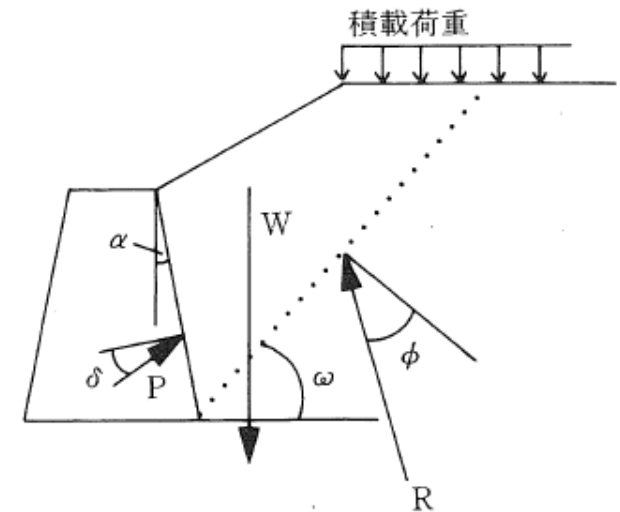
ϕ : 土の内部摩擦角(°)

δ : 壁面摩擦角(°)

α : 擁壁背面のなす角(°)

β : 背面土のなす角(°)

R : すべり面からの反力(kN)



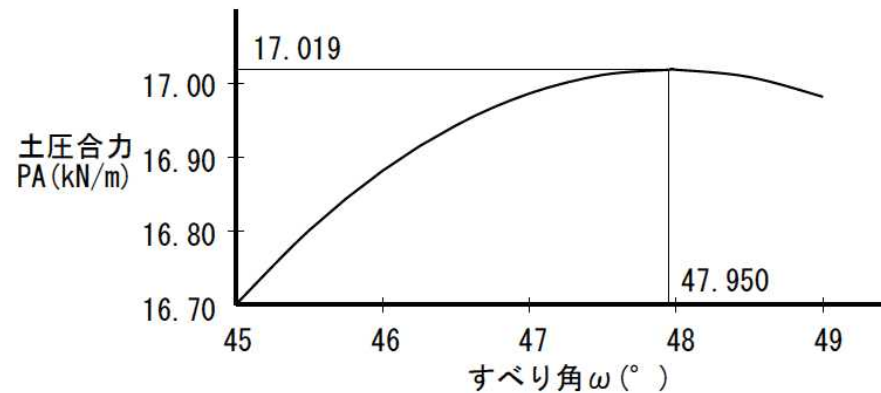
試行くさび法（主働土圧）

※図は「宅地防災マニュアルの解説」より引用

※載荷(上載)荷重は W に加算して計算する。

試行くさび法による土圧（その2）

図解法（通常は計算プログラム等による収束計算法）であるため、計算チェックが行いにくい。



計算プログラムによる最大値の収束計算例

地震時の検討

【地震時の検討】

道路土工擁壁工指針(H24年) >

擁壁の設計では、その構造物の重要度と要求性能に応じて、レベル1地震動とレベル2地震動の分類がされている。一般的には、高さ8mを超える擁壁が対象とされている。

宅地防災マニュアルの解説 >

擁壁の設計では、中地震時、大地震時に分類されている。一般的には、高さ2m程度を超えるの擁壁が対象となることが多い。

【地震時の照査】

擁壁の設計においては、**設計水平震度(k_h)を用いた震度法**による計算が一般的である。

追加) 地震動について

道路土工擁壁工指針

- レベル1 地震時 供用期間中に発生する確率が高い地震動
- レベル2 地震時 供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動
タイプI (プレート境界型の大規模な地震を想定)
タイプII (内陸直下型地震を想定)

宅地防災マニュアルの解説

- 中地震時 宅地または該当宅地を敷地とする建築物等の供用期間中に1～2度程度発生する一般的な地震時
- 大地震時 発生確率は低いが直下またはプレート境界で発生する地震を想定した高レベルな地震時

	常時	中地震時	大地震時
安定計算	○	—	○
部材計算	○	○	○

地震時の作用力

擁壁設計に用いる地震時荷重

道路土工擁壁工指針	宅地防災マニュアルの解説
<ul style="list-style-type: none">・ 擁壁の自重による慣性力・ 地震時土圧 (従来は常時土圧の使用も認められていた) これらを 共に作用 させる	<ul style="list-style-type: none">①地震時土圧②常時土圧 + 擁壁の自重による慣性力 ①②のいずれか大きい方 の荷重を作用させる

・ 地震時土圧

土圧計算式に地震合成角(θ)が考慮

$$\theta = \tan^{-1} k_h \quad k_h: \text{設計水平震度}(\text{°})$$

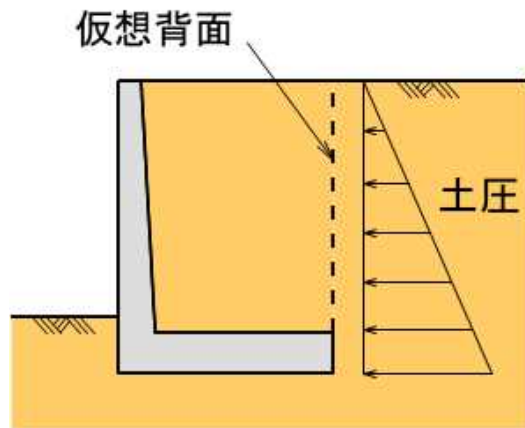
・ 擁壁の自重による慣性力(H)

$$H = V \cdot k_h$$

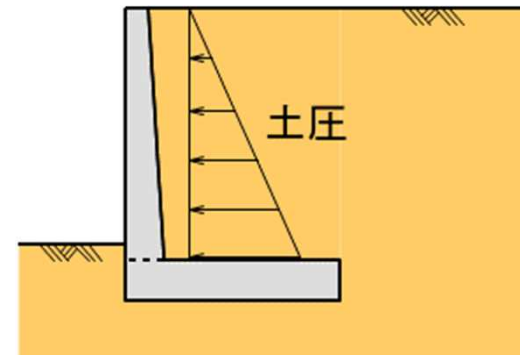
V : 擁壁の自重(kN)
 k_h : 設計水平震度(°)

土圧の作用面

かかと版を有する片持ばり式擁壁では、安定計算において、かかと版上の埋戻土も擁壁一体として考えるため、かかと版端部位置には土圧が作用する**仮想背面**があるもの考える。



安定計算



たて壁の部材計算

土圧の水平成分・鉛直成分

土圧は、擁壁背面のなす角(α)、壁面摩擦角(δ)を考慮する場合、土圧が斜め方向に作用する。斜め方向に作用した土圧は、水平成分と鉛直成分に分力計算を行う。

通常、鉛直土圧は下向きに作用すると考えるが、もたれ式擁壁やブロック積擁壁の擁壁背面が逆ころびであるため、鉛直成分が上向きとなることがある。擁壁背面が逆ころびとした場合の利点とも言え、もたれ式擁壁やブロック積擁壁の部材が薄くても、安定性が確保できる一つの理由でもある。

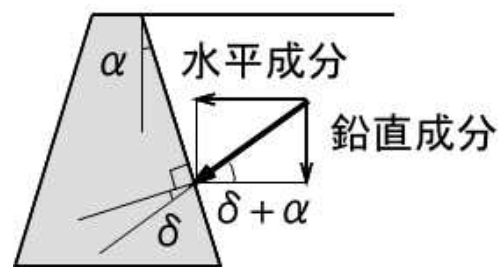
$$P_{AH} = P_A \cdot \cos(\delta + \alpha)$$

$$P_{AV} = P_A \cdot \sin(\delta + \alpha)$$

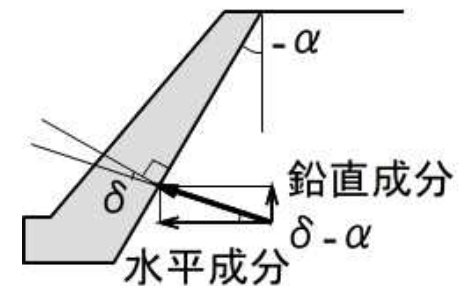
P_{AH} : 主働土圧の水平分力(kN)

P_{AV} : 主働土圧の鉛直分力(kN)

P_A : 主働土圧の合力(kN)



背面ころび



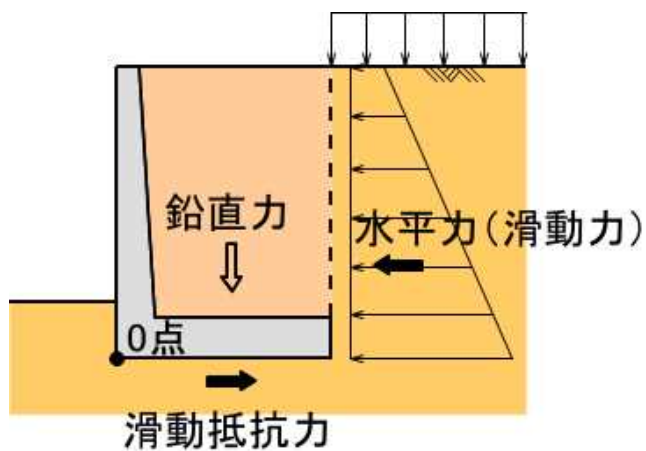
背面逆ころび

5. 擁壁の安定計算

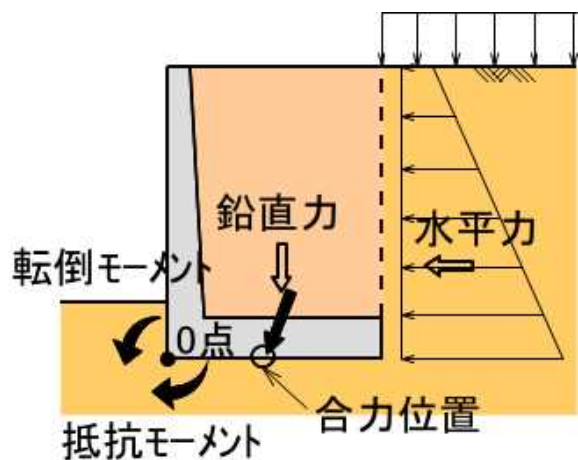
擁壁の安定計算

【擁壁の安定計算の照査項目】

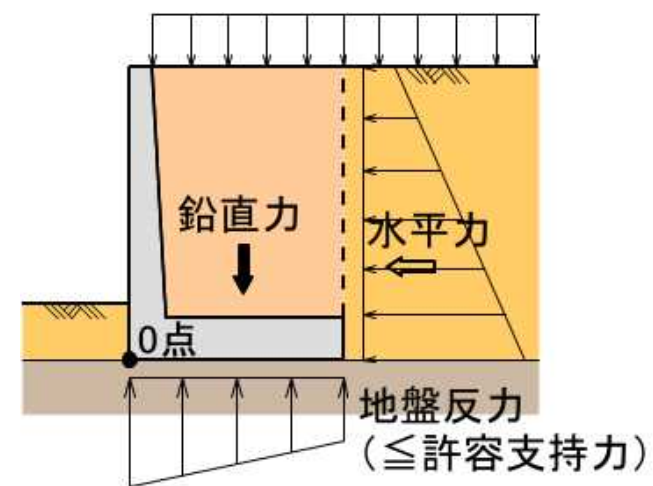
一般的には、安定計算では、滑動・転倒・支持力の3つの照査を行う。



滑動照査



転倒照査



支持力照査

安定計算：滑動照査

【滑動照査】

擁壁を前面に押し出そうとする滑動力と、これに対して擁壁底面と地盤との間に生じる滑動抵抗力が作用するが、滑動抵抗力が不足すると擁壁は前方に押し出されるように滑動する。これに対する安定性の照査をいう。

滑動の計算式

$$F_s = \frac{V_o \cdot \mu + c \cdot B}{H_o}$$

安全率(F_s)が、通常、常時では1.5、地震時では1.2を下回ってはいけない。

F_s : 安全率

V_o : 擁壁底面における全鉛直荷重(kN)

H_o : 擁壁における全水平荷重(kN)

μ : 地盤の摩擦係数

c : 地盤との粘着力(kN/m²)

B : 擁壁底面幅(m)

安定計算：転倒照査（その1）

【転倒照査】

擁壁のつま先を支点として擁壁を転倒させようとする**転倒モーメント**と、擁壁の転倒を抑止しようとする**抵抗モーメント**が作用し、転倒モーメントが過大となると擁壁は前面側に転倒を起こす。これに対する安定性の照査をいう。

転倒の計算式①

$$F_s = \frac{M_r}{M_o}$$

F_s ：安全率

M_r ：つま先(0点)での抵抗モーメント(kN・m)

M_o ：つま先(0点)での転倒モーメント(kN・m)

安全率(F_s)が、通常、常時では1.5、地震時では1.2を下回ってはいけない。

安定計算：転倒照査（その2）

転倒の計算式②

$$d = \frac{M_r - M_o}{V_o} = \frac{\sum V_i \cdot x_i - \sum H_i \cdot y_i}{\sum V_i}$$

$$e = \frac{B}{2} - d$$

荷重合力の作用位置(e)が、安全条件の範囲内に入っていることが安定性の条件となる。

計算式②の照査方法が一般的である。

d ：つま先(0点)から荷重合力までの水平距離(m)

e ：擁壁中心軸から荷重合力までの水平距離(m)

V_i ：擁壁に作用する各荷重の鉛直荷重(kN)

x_i ：つま先(0点)から各荷重の水平距離(m)

H_i ：擁壁に作用する各荷重の水平荷重(kN)

y_i ：つま先(0点)から各荷重の鉛直距離(m)

B ：擁壁底版幅(m)

	偏心距離(e)
常時	$e \leq B/6$
地震時	$e \leq B/3$

安定計算：支持力照査（その1）

【支持力照査】

擁壁に作用する荷重は、基礎地盤によって支持されるが、荷重の偏心によって地盤反力分布が異なり基礎地盤の鉛直支持力が不足すると前面側又は背面側が地盤にめり込むような変状を起こす。これより、基礎地盤の許容支持力度を求めて、地盤反力度との照査を行う。

安定計算：支持力照査（その2）

地盤反力度の計算式

$$q_1 = \frac{V_o}{B} \cdot \left(1 + \frac{6e}{B} \right)$$

$$q_2 = \frac{V_o}{B} \cdot \left(1 - \frac{6e}{B} \right)$$

許容支持力度の計算式

$$q_a = \frac{1}{n} \left(i_c \cdot \alpha \cdot c \cdot N_c + i_\gamma \cdot \beta \cdot \gamma_1 \cdot N_\gamma + i_q \cdot \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q \right)$$

q_1, q_2 : 擁壁両端部における地盤反力度(kN/m²)

e : 擁壁中心軸から荷重合力までの水平距離(m)

V_o : 擁壁底面における全鉛直荷重(kN)

B : 擁壁底版幅(m)

q_a : 地盤の許容支持力度(kN/m²)

n : 安全率 (※常時 : 3、地震時 : 2)

$i_{c,\gamma,q}$: 荷重の傾斜角による各補正係数

$N_{c,\gamma,q}$: 基礎地盤の各支持力係数

c : 基礎地盤の粘着力(kN/m²)

D_f : 根入れ深さ(m)

$\gamma_{1,2}$: 土の単位体積重量(kN/m³)

α, β : 底版面の形状における係数

6. 擁壁たて壁・底版の部材計算

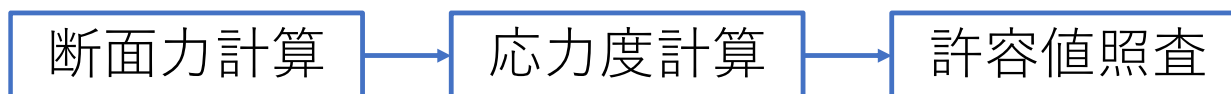
片持ばり式擁壁[L型]：鉄筋コンクリート

部材計算とは

【擁壁における部材計算】

擁壁の部材照査方法は、従来からの許容応力度設計法と限界状態設計法がある。準拠基準で定める重要度と要求性能等によっても設計方法が異なるが、一般的には **許容応力度設計法**が使用されている。

【許容応力度設計法】



【鉄筋コンクリートにおける部材計算の考え方】

- 鉄筋は引張力に強い ⇒ **曲げ引張力は鉄筋が負担**
- コンクリートが圧縮力に強い ⇒ **曲げ圧縮力はコンクリートが負担**

部材計算の主な照査

【たて壁・底版の部材設計における主な照査】

- 曲げ圧縮応力度の照査
- 曲げ引張応力度の照査
- せん断応力度の照査

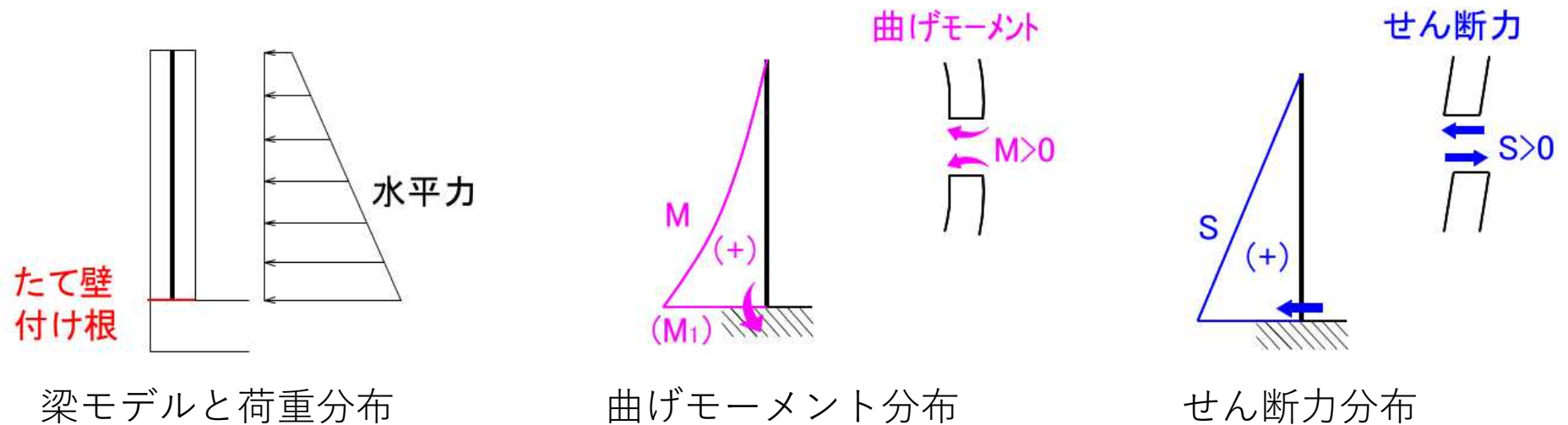
部材の照査対象

	無筋コンクリート構造	鉄筋コンクリート構造
曲げ圧縮応力度	コンクリート（縁応力度）	圧縮側のコンクリート
曲げ引張応力度	コンクリート（縁応力度）	引張側の鉄筋
せん断応力度	コンクリート	コンクリート（有効高さ）

断面力計算：たて壁

【たて壁の断面力】

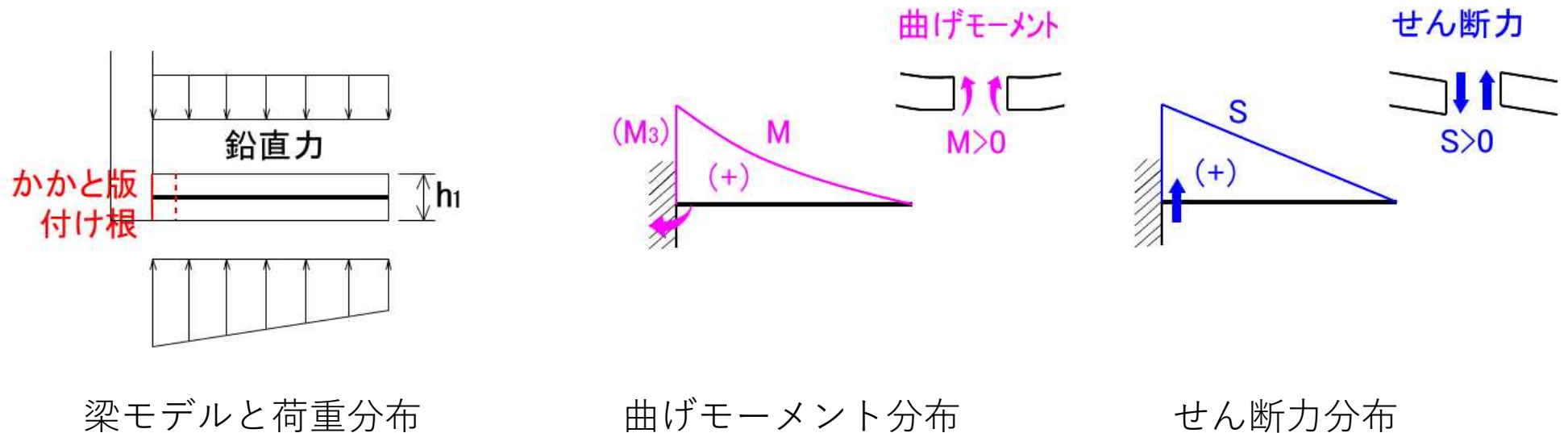
たて壁は、片持ちばりという構造モデルに荷重を作用させ、その時の断面力（曲げモーメント、せん断力）を計算する。



断面力計算：底版（かかと版）

【底版（かかと版）の断面力】

底版（かかと版）は、たて壁と向きが異なるが、同様に片持ばりという構造モデルに荷重を作用させ、その時の断面力（曲げモーメント、せん断力）を計算する。



応力度計算

【鉄筋コンクリートの応力度計算】

一般的な鉄筋コンクリート（鉄筋は引張側のみ）の応力度計算式

$$\sigma_c = \frac{2M}{k \cdot j \cdot b \cdot d^2}$$

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \cdot j \cdot d}$$

$$\tau_m = \frac{S}{b \cdot d}$$

σ_c : コンクリートの圧縮応力度(N/mm)

σ_s : 鉄筋の引張応力度(N/mm)

τ_m : コンクリートの平均せん断応力度(N/mm)

M : 照査位置の曲げモーメント(N・mm)

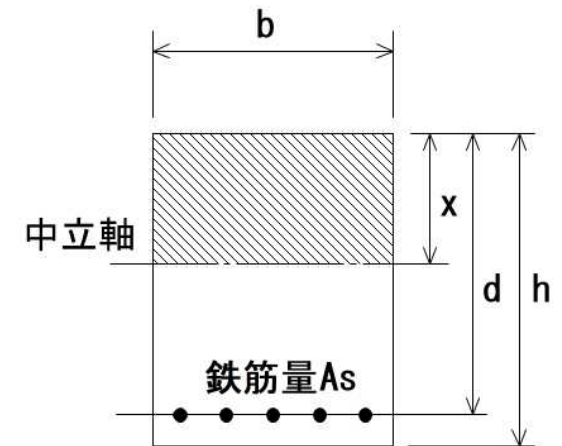
S : 照査位置のせん断力(N)

b : 部材幅(mm)

d : 部材の有効高(mm)

A_s : 引張主鉄筋の断面積(mm²)

$$k = \sqrt{2np + (np)^2} - np \quad p = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad j = 1 - \frac{k}{3}$$



応力度計算：たて壁

【たて壁の応力度計算】

たて壁の指定した位置（通常は付け根位置）で、その位置の断面力（曲げモーメント、せん断力）をその位置のコンクリートと鉄筋で許容できるかを照査する。

応力度計算：底版（かかと版）

【底版の応力度計算】

底版の指定した位置（通常は付け根位置）で、その位置の断面力（曲げモーメント、せん断力）をその位置のコンクリートと鉄筋で許容できるかを照査する。

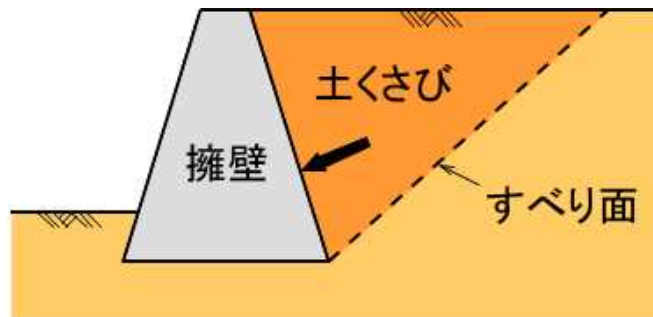
< 道路土工擁壁工指針の照査条件 >

- 底版かかと版の付け根の曲げモーメント(M_3)が、たて壁の付け根の曲げモーメント(M_1)より大きくなる場合($M_3 > M_1$)は、底版かかと版の付け根の部材計算に M_1 を用いる。
- 底版かかと版については、せん断力に対する照査は、たて壁の背面から底版厚さの1/2離れた位置($h_1/2$)で行う。

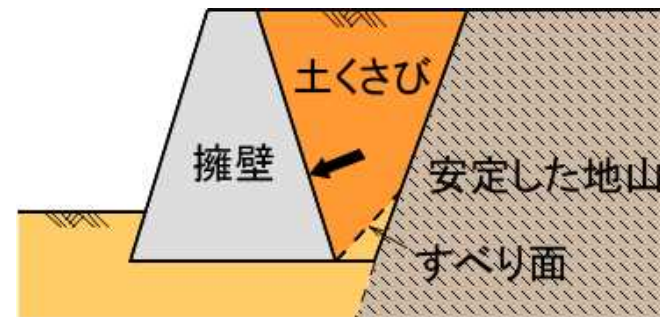
7.擁壁設計で留意すべき点

切土部擁壁の設計上の扱い（その1）

擁壁の施工をする際には、背後に砕石を設けたり、型枠を組むために、予め、地山の邪魔になる範囲をカットし整形等を行うが、**施工でカットした一時的のり面整形**を切土部擁壁でいう地山面と勘違いして、**切土部擁壁**として扱ってしまうことがある。



盛土部擁壁

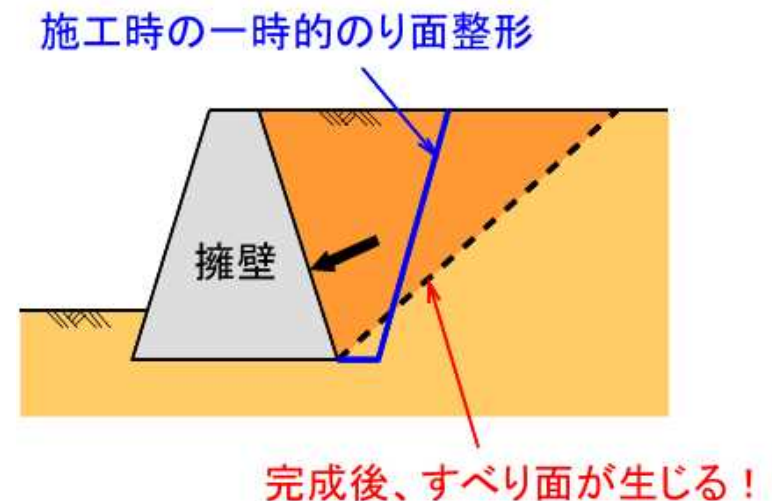


切土部擁壁

切土部擁壁の設計上の扱い（その2）

- 一時的な施工整形のり面は、切土部擁壁でいう自立した堅固な地山ではない。完成後、次第に擁壁背後の土圧が作用する。
- 切土部擁壁は、背面に自立した堅固な安定した地山（軟岩や硬岩など）などがある場合で、その地山からの土圧が一切、擁壁に生じないと技術的に確信できる場合のみ適用できる計算方法です。

擁壁の設計では、通常、ほとんどの場合は盛土部擁壁として設計する。切土部擁壁は限られた場合のみである。

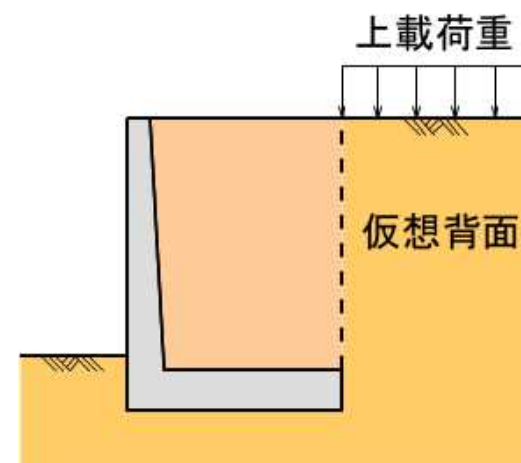


安定計算の項目によって異なる上載荷重の載荷範囲（その1）

安定計算には、滑動・転倒・支持力の3つの照査項目があるが、かかと版を有する片持ばり式擁壁の安定計算においては、背面に作用させる上載荷重の載荷範囲に注意を要する。

【滑動・転倒照査】

かかと版上（仮想背面の内側）に上載荷重がある場合は、その荷重分も躯体自重として計上される。転倒と滑動照査では、躯体自重は抵抗力の大きさに反映してしまうことから、通常、上載荷重は**仮想背面の外側のみに載荷**させる。

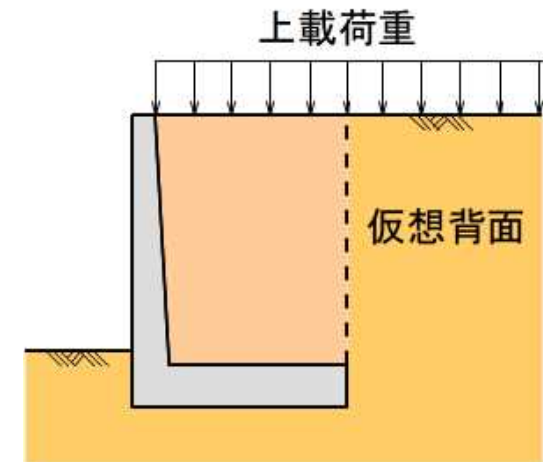


上載荷重の載荷範囲
（滑動・転倒照査）

安定計算の項目によって異なる上載荷重の載荷範囲（その2）

【支持力照査】

一方、支持力照査では、荷重鉛直合力が大きい方が安定性の高い照査となることから、上載荷重は、かかと版上（仮想背面の内側）も含めた**全面に載荷**させる。

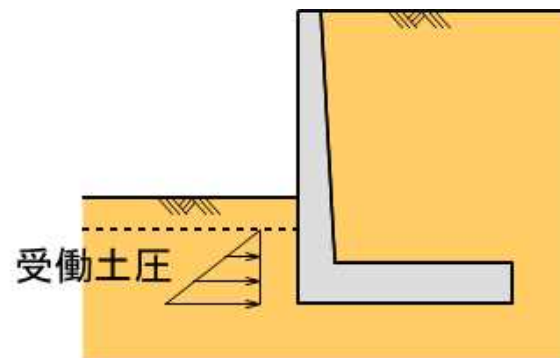


上載荷重の載荷範囲
（支持力照査）

擁壁前面の受働土圧の考慮（その1）

近年、会計検査でも指摘事項として挙げられた内容である。

擁壁前面の土被りがある場合、この土被りによる受働土圧を見込んで擁壁の安定照査を行う場合がある。受働土圧は主働土圧とは逆向きに作用するため、擁壁を助ける抵抗力として作用する。この力を考慮した計算をするということは、擁壁の滑動の安定性を低下させた設計を行っていることになる。



擁壁に作用する受働土圧

擁壁前面の受働土圧の考慮（その2）

- 擁壁前面の土被りは、常に存在しているとは限らない。（施工時、施工後の前面側工事、前面環境の変化など）
- 前面地盤の土質性状によっては、計算通りの土圧が期待できるとは限らない。

十分に設計条件を考察しないで、安易に受働土圧を考慮した計算を行ってしまう場合があり、検査時に条件根拠が認められずに指摘事項とされてしまう。受働土圧を考慮する場合は、それなりの正当な条件根拠が必要とされる。

道路土工擁壁工指針では、**原則、受働土圧の考慮を認めていない。**

底版に突起を設ける場合

底版基礎面に設ける突起は、**堅固な地盤や岩盤**の場合に採用され、これらの地盤を乱さないように周辺地盤との密着性を確保できるように施工されてはじめてその効果が期待できる。

基礎地盤の特性を十分に考察しないで、安易に突起を設けた計算を行ってしまう場合があり、これは、**滑動の安定性**に不安を残す**危険な構造物**となってしまう可能性がある。

$$H_k = c \cdot b_1 + v_1 \cdot \tan \phi + (v_2 + v_3) \cdot \tan \phi_B$$

$$F_s = \frac{H_k}{H_o}$$

F_s : 滑動に対する安全率

H_k : 基礎地盤のせん断抵抗力(kN)

H_o : 底面に作用する全水平力(kN)

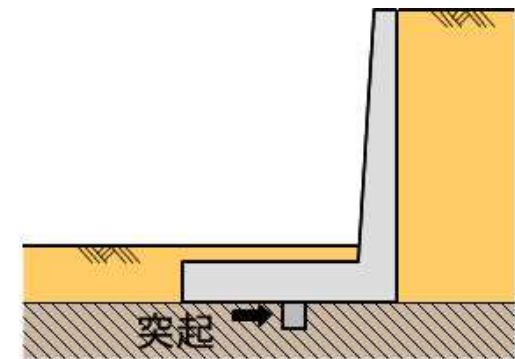
c : 基礎地盤の粘着力(kN/m)

v_1, v_2, v_3 : 各鉛直荷重(kN)

b_1 : 前面から突起までの距離(m)

ϕ : 基礎地盤のせん断抵抗角(°)

ϕ_B : 基礎地盤の摩擦角(°)



擁壁底版の突起

参考文献

- 道路土工擁壁工指針 平成24年7月 公益社団法人日本道路協会
- 第二次改訂版 宅地防災マニュアルの解 宅地防災研究会・ぎょうせい

※参考文献より、一部、図の引用をしております。