

擁壁等の構造物設計

平成26年9月19日

高知県技術士会
代表幹事 右城 猛

今日の予定

1. 擁壁の設計法
 - a. 基本事項
 - b. 荷重
 - c. 安定性の照査
 - d. 応力度の照査

}

10時～12時

13時～14時
2. 設計演習 14時～15時30分
 - 演習問題1 重力式擁壁の安定計算
 - 演習問題2 大型ブロック積み擁壁の安定計算
 - 演習問題3 直接基礎の支持力
3. 擁壁のトラブル事例 15時30分～17時

1

1. 擁壁設計の基本事項

道路土工一擁壁工指針 H24年度版の主な改定点

1. 性能規定型設計の枠組みを導入し、要求性能及び要求事項を満足させる解析手法、設計方法、材料、構造等の基本的な考え方を示した。
2. 片持ばり式擁壁の仮想背面に作用する土圧、切土部擁壁に作用する土圧の算定方法を見直した。
3. もたれ式擁壁、ブロック積擁壁、U型擁壁の設計方法を見直した。
4. 許容せん断応力度を見直した。
5. プレキャスト擁壁の鉄筋かぶりを規定した。

2

3

設計の基本方針

- 1. 使用目的との適合性、構造物の安全性、**耐久性**、**設計品質の確保**、**維持管理の容易さ**、環境との調和、経済性を考慮すること。
- 2. 想定する作用に対して**要求性能**を設定し、それを満足することを照査すること。
- 3. 論理的な妥当性を有する方法や実験等による検証がなされた手法、これまでの**経験・実績**から妥当と見なせる手法等、適切な知見に基づいて行うこと。

重要

公共工事のコスト縮減を図るため、新工法や新製品が提案されているが、安易に採用してはならない。経済性や施工性だけでなく、類似条件での**施工実績・災害事例**等を十分に調査し、総合的な観点から検討しなければならない。また、計算のみに依存するのではなく、従来から用いられてきた擁壁との相違や被災事例等も考慮して工学的判断を行う必要がある。

想定する作用

想定する作用の基本		想定する作用の内容
常時の作用		自重、載荷重、土圧、水圧や浮力など常に作用するもの
降雨の作用		擁壁の安定性は排水工の設計で考慮
地震動の作用	レベル1地震動	供用期間中に発生確率が高い地震動
	レベル2地震動	発生確率は低いが大きな強度を持つ地震動
その他の作用		凍上、塩害、酸性土壤中での部材の腐食や劣化など

レベル2地震動

タイプⅠ地震動：プレート境界型の大規模地震

タイプⅡ地震動：内陸直下型地震

擁壁設計では区別しない

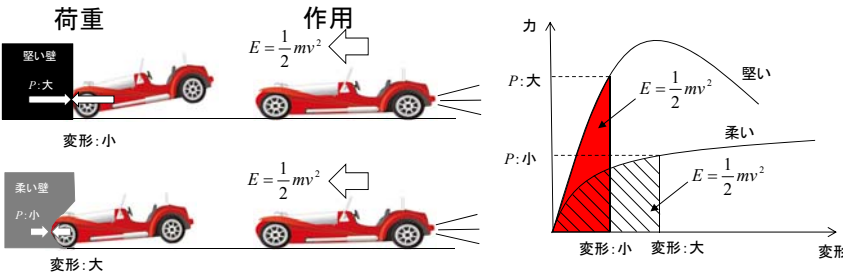
作用と荷重の違い

作用とは、

- ・構造物に働く力学的な力の原因となるもの
- ・構造物の変形の原因となるもの
- ・構造物の材料を劣化させる原因となるもの(環境因子)

荷重とは、

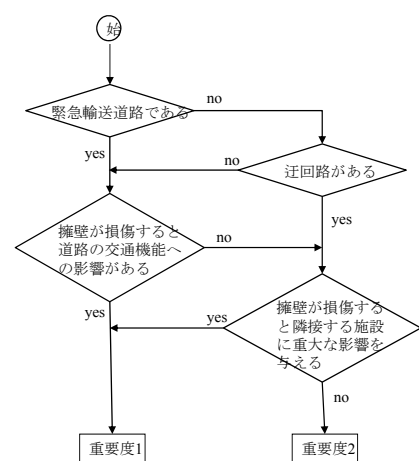
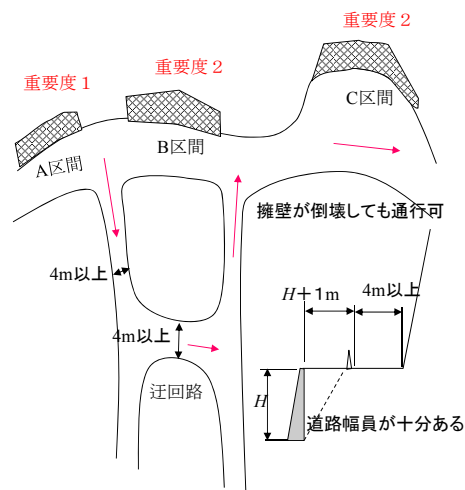
構造物に働く作用をモデル化し、断面力、変位等の算定のために設計計算のインプット用に変換したもの。



擁壁の重要度の区分

重要度の区分		区分の判断
重要度1	万一損傷すると交通機能に著しい影響を与える場合、隣接する施設に重大な影響を与える場合。	擁壁が損傷した場合の道路の交通機能への影響と隣接する施設等に及ぼす影響の重要性を総合的に勘案して定めること。道路の交通機能への影響は、必ずしも道路の規格による区分を指すものではなく、 迂回路の有無 や 緊急輸送路であるか 否か等、万一損傷した場合に 道路ネットワークとしての機能に与える影響の大きさ を考慮して判断すること。
重要度2	上記以外	

擁壁の重要度



擁壁の要求性能の水準

区分	性能の限界状態	満足すべき性能
性能1	健全性を損なわない	安全性, 修復性, 供用性
性能2	損傷が限定的であり, 擁壁としての機能の回復が速やかに行い得る	安全性, 修復性
性能3	損傷が擁壁として致命的とならない	安全性

安全性: 想定する作用等による変状によって **人命を損なうことのない** ようにするための性能

修復性: 想定する作用によって生じた **損傷を修復できる** 性能

供用性: 想定する作用による変形や損傷に対して、擁壁により形成される **道路が本来有すべき通行機能、及び避難路や救助・救急・医療・消火活動・緊急物資の輸送路としての機能を維持** できる性能

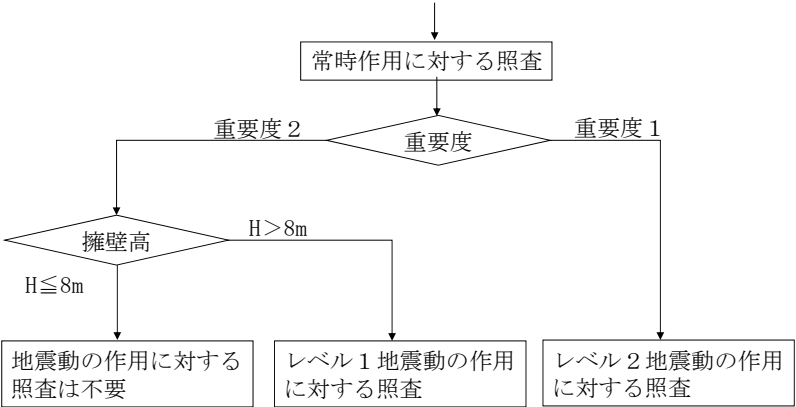
擁壁の要求性能の例

荷重の作用		重要度1	重要度2
常時の作用		性能1	性能1
降雨の作用		性能1	性能1
地震動の作用	レベル1地震動	性能1	性能2
	レベル2地震動	性能2	性能3

照査により満足すると見なせる性能

擁壁高	照査内容	満足すると見なせる性能		
		常時の作用	地震時の作用	
			レベル1地震動	レベル2地震動
$H \leq 8m$	常時の作用で照査	性能1	性能2	性能3
$H > 8m$	常時の作用で照査	性能1	—	—
	レベル1地震時の k_h で照査	—	性能1	性能3
	レベル2地震動の k_h で照査	—	—	性能2

地震動の作用の照査



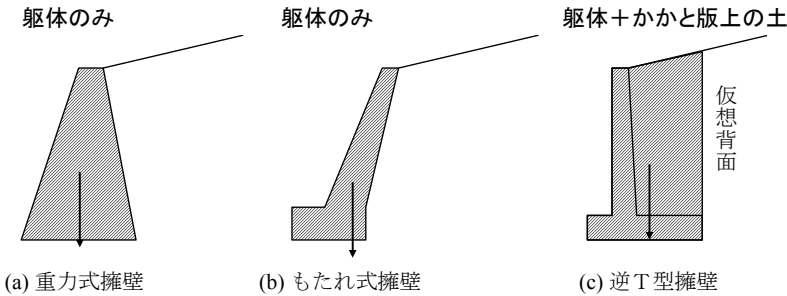
- ①設計水平震度が $k_h=0.18$ 程度以上になると地震時で決まる。
- ②レベル1地震動で擁壁断面が決まることはほとんどない。

荷重の組合せと安全率, 許容応力度の割り増し

荷重の種類	荷重の組合せ	安全性の照査			許容応力度の割り増し係数
		転倒(偏心量)	滑動安全率	支持安全率	
常時の作用	①自重+載荷重+土圧	自立式擁壁 $e \leq \frac{B}{6}$	$F_s \geq 1.5$	$F_s \geq 3.0$	1.0
	②自重+土圧	もたれ式擁壁 $d \geq \frac{B}{2}$			
地震動の作用	③自重+地震の影響(慣性力+地震時土圧)	自立式擁壁 $e \leq \frac{B}{3}$ もたれ式擁壁 $d \geq \frac{B}{3}$	$F_s \geq 1.2$	$F_s \geq 2.0$	1.5
異常時の作用	④自重+土圧+風荷重	明記なし 地震時に準拠?			1.25
	⑤自重+土圧+衝突荷重				1.5

2. 荷重

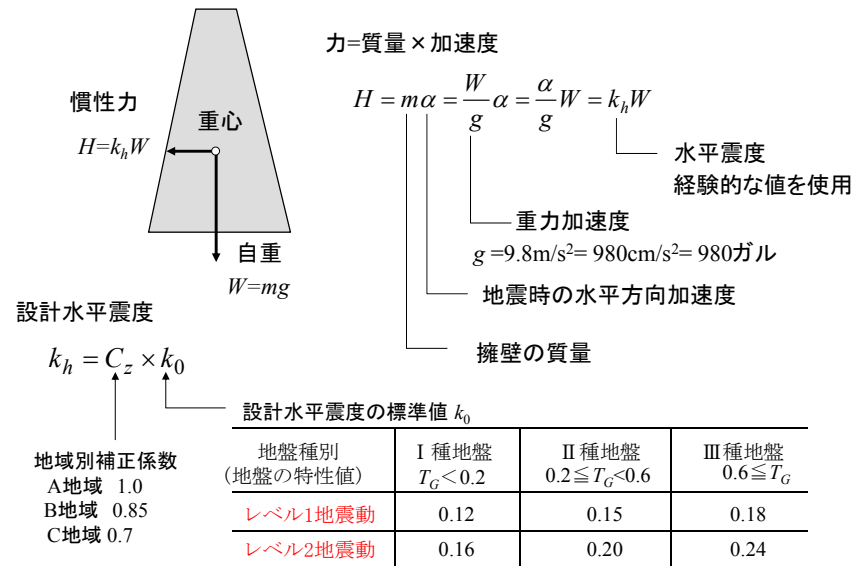
自重



設計計算に用いる単位体積重量

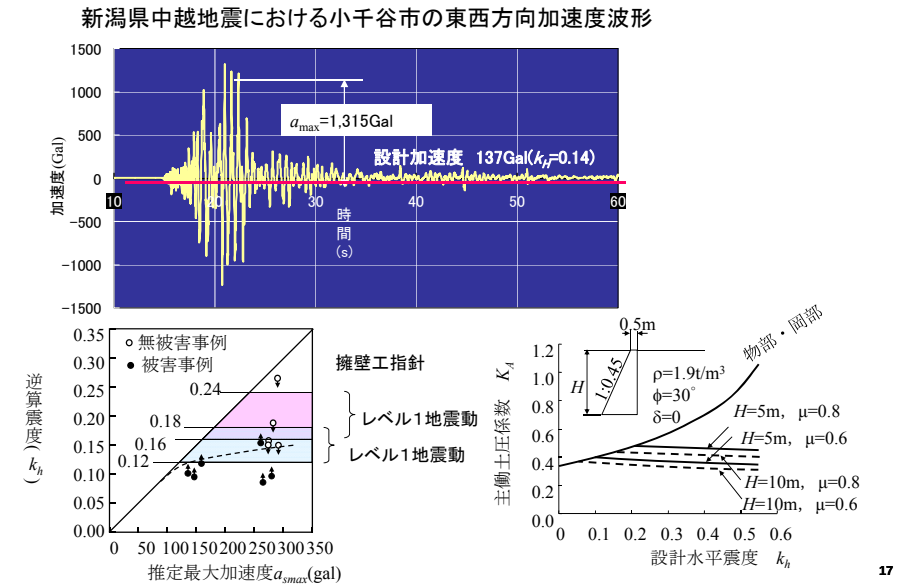
コンクリート	23 kN/m ³
鉄筋	77 kN/m ³
鉄筋コンクリート	24.5 kN/m ³
盛土 礫質土	20kN/m ³
砂質土	19kN/m ³
粘性土	18kN/m ³

地震時の慣性力と設計水平震度



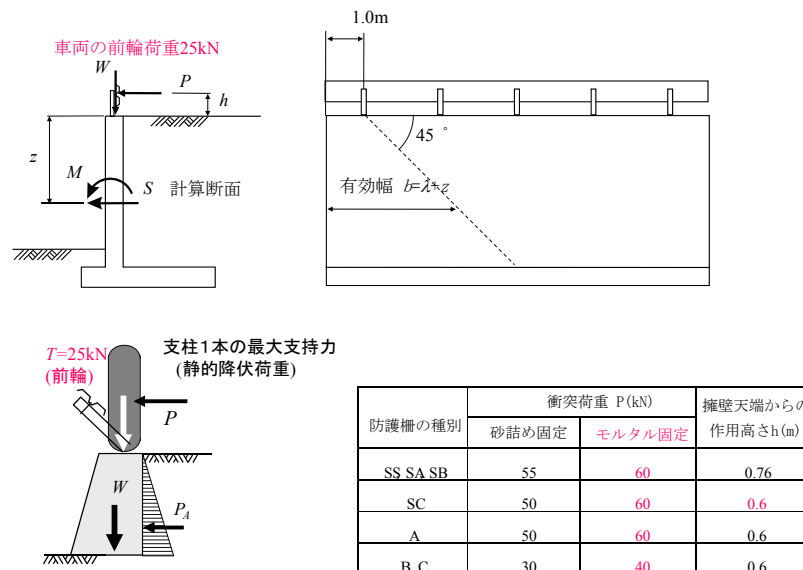
16

地震加速度と水平震度の関係



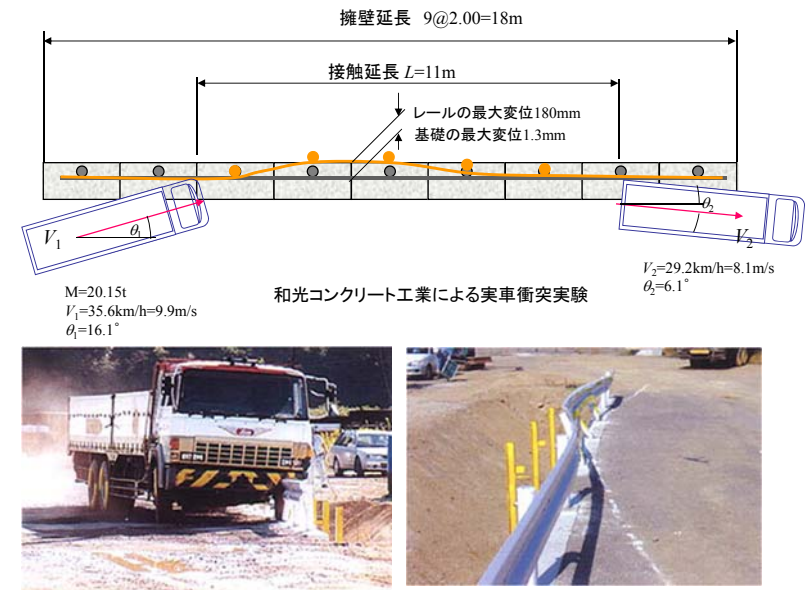
17

衝突荷重



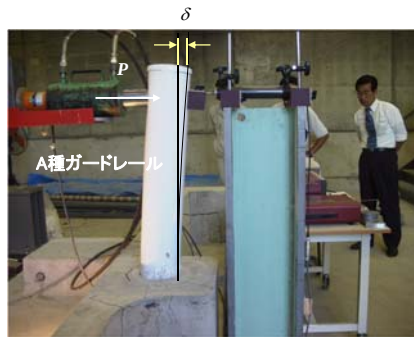
18

自動車の衝突によるガードレールの変形

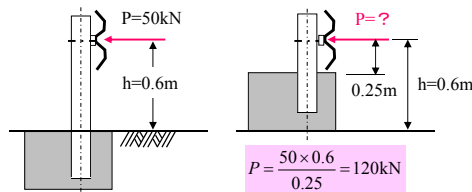


19

自動車衝突荷重とは防護柵支柱の降伏荷重



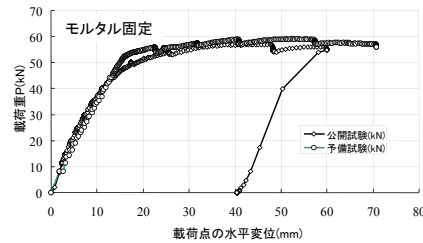
モルタル固定して載荷試験



最大荷重

公開試験 $P_{\text{max}}=56.84\text{kN}$

予備試験 $P_{\text{max}}=59.12\text{kN}$



防護柵の種別	最大支持力(kN)	
	砂詰め固定	モルタル固定
C種	30	40
B種	30	40
A種	50	60

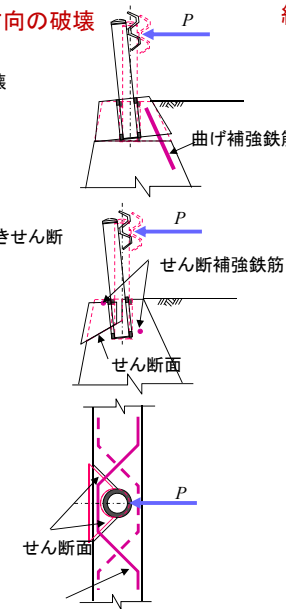
20

衝突荷重による破壊形態

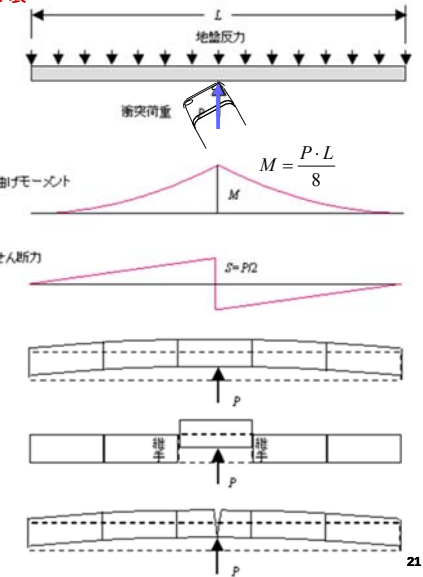
断面方向の破壊

曲げ破壊

押し抜きせん断破壊



縦方向の破壊



21

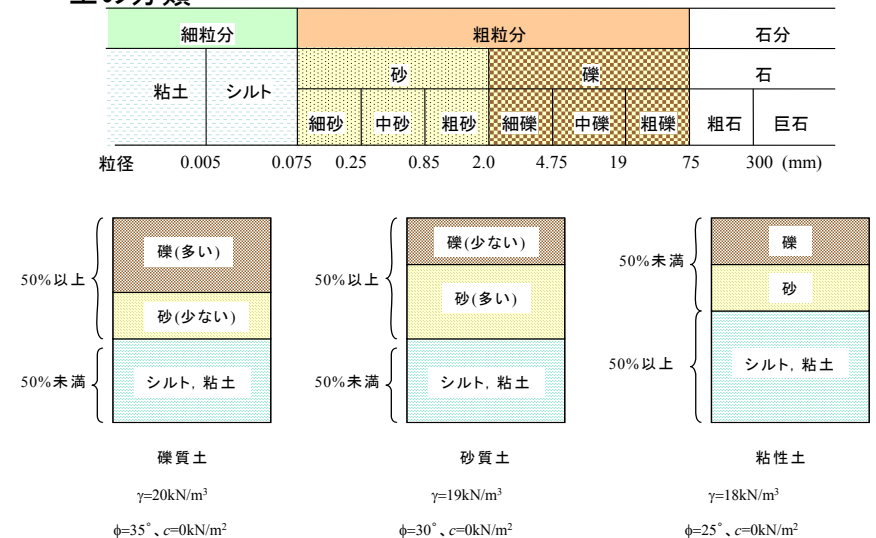
載荷重の載荷方法

	(a) ケース1	(b) ケース2
載荷方法		
擁壁工指針	支持の照査	転倒の照査 滑動の照査
右 城	支持の照査 転倒の照査 滑動の照査	

22

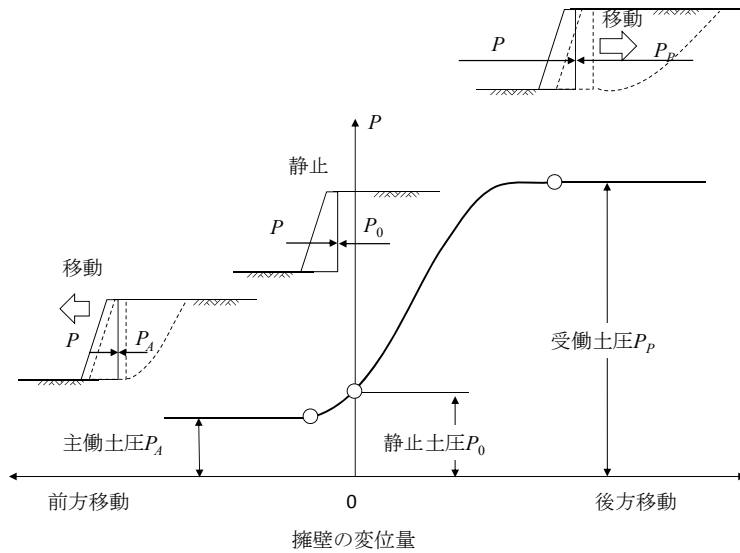
土のせん断強度定数

土の分類



23

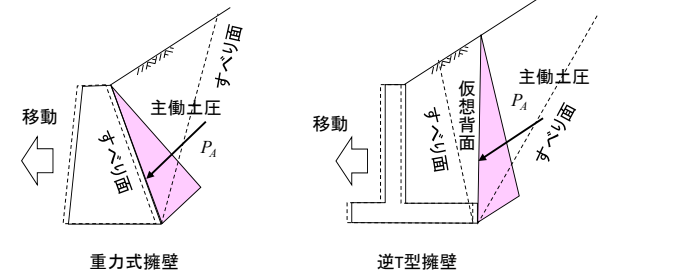
壁の変位と土圧



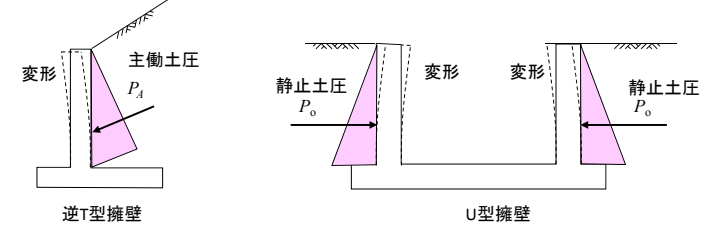
24

設計に用い土圧

(a) 安定性の照査



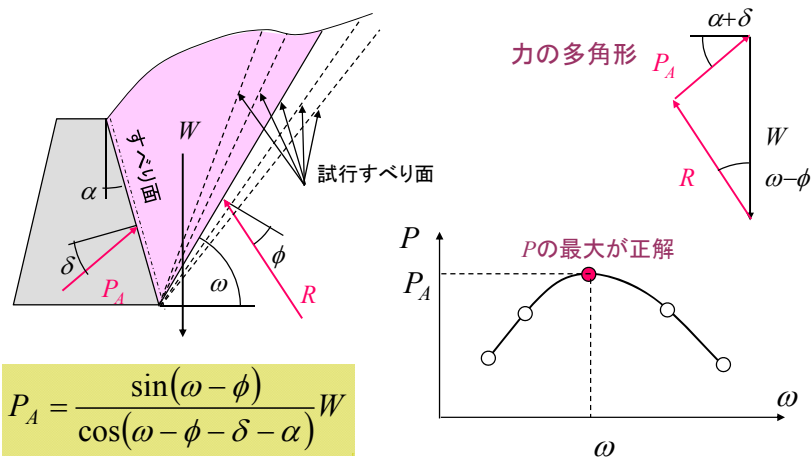
(b) 部材の安全性の照査



25

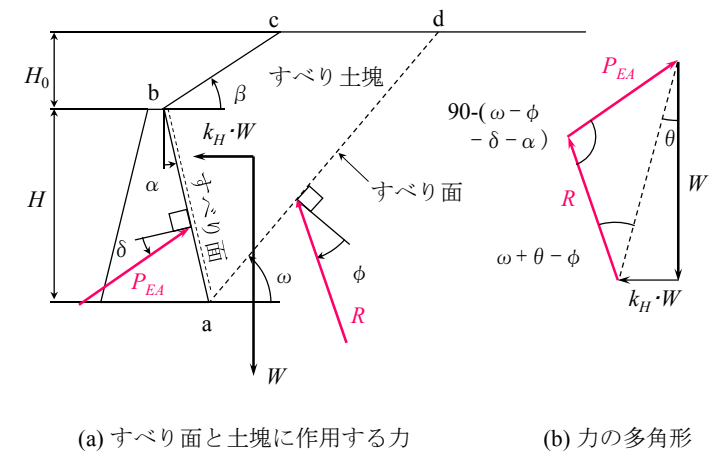
試行くさび法

- ① P が最大となる ω を試行錯誤的に探索する
- ② 地表面が折れ曲がっていても計算可能
- ③ 汎用性がありコンピュータの計算に適する



26

試行くさび法による地震時土圧

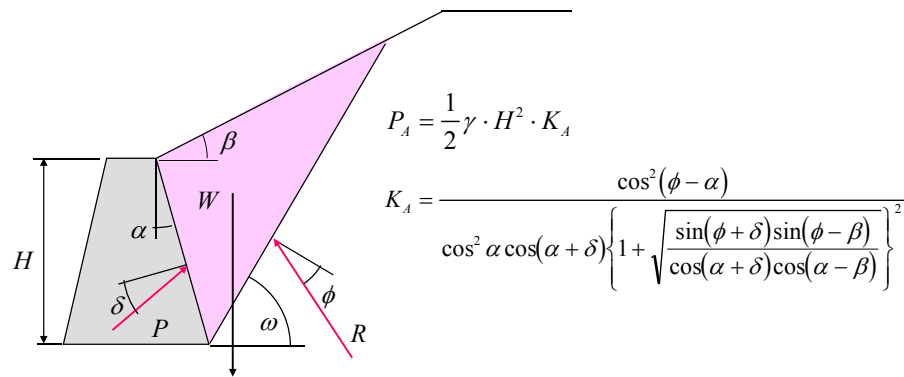


27

クーロン式(ミュラープレスロー式)

page61

地表面は一様勾配
試行錯誤的な計算は不要



28

道路土工指針と道路橋示方書の違い

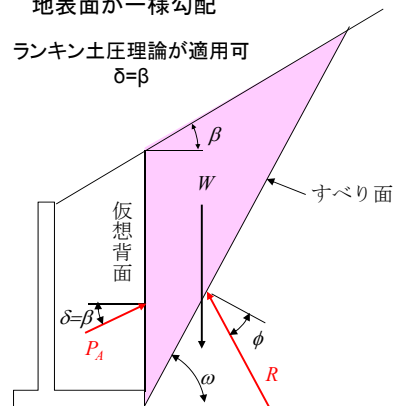
「擁壁工指針は試行くさび法」、「道路橋示方書はクーロン式」というのは間違い。
試行くさび法はクーロンの楔理論の数値解析法。クーロン式は楔理論の解析解。
クーロン公式を誘導したのは、ミュラー・プレスロー。

技術基準類	道路土工—擁壁工指針		道路橋示方書下部構造編
盛土形状			
土圧計算法	試行くさび法	試行くさび法 クーロン式	クーロン式
壁面摩擦角	$\delta = \frac{2}{3} \phi$		$\delta = \frac{1}{2} \phi$
土圧分布	三角形		台形

29

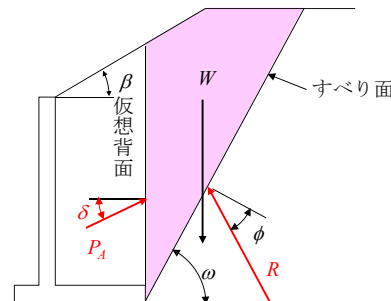
片持ちり式擁壁の仮想背面に作用する土圧

地表面が一様勾配
ランキン土圧理論が適用可
 $\delta = \beta$



未知量 P_A, R
条件式 $\Sigma V=0, \Sigma H=0$
静定問題

嵩上げ盛土

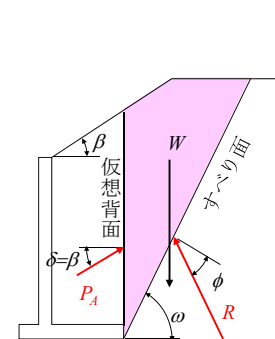


未知量 P_A, R, δ
条件式 $\Sigma V=0, \Sigma H=0$
1次の不静定問題

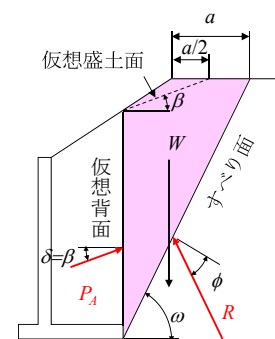
30

道路土工—擁壁工指針の考え方の変遷

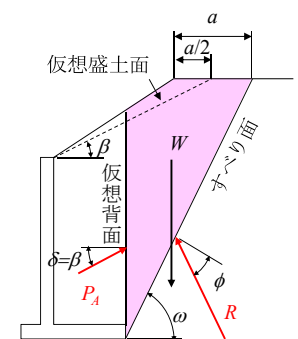
昭和52年版



昭和62年版, 平成11年版



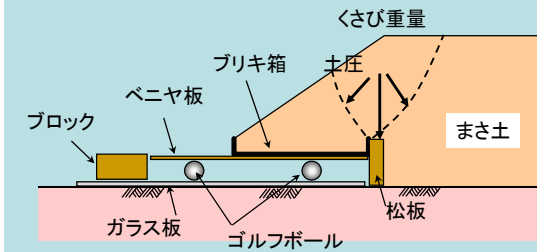
平成24年版



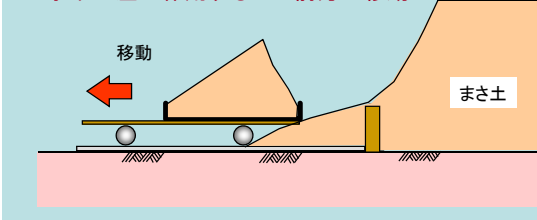
31

すべり面の実験 28歳

会社の横の空き地で実験



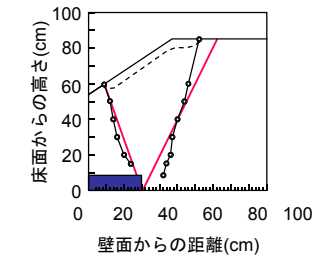
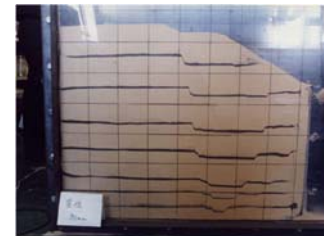
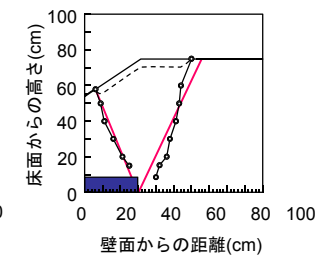
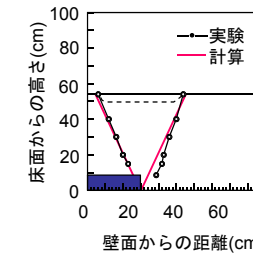
水平土圧が作用するため前方へ移動



新しい土圧理論「改良試行くさび法」に発展

32

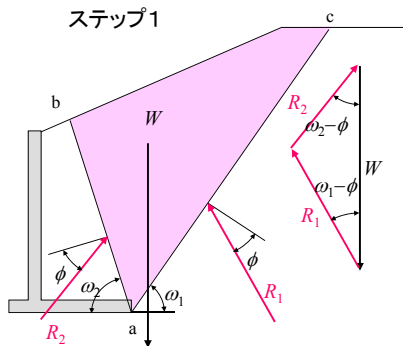
主働すべり面の実験 (愛媛大学)



33

改良試行くさび法

ステップ1

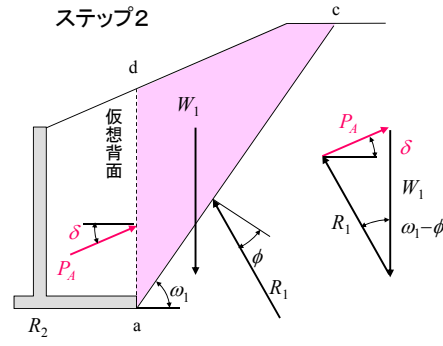


土塊abcに作用する力は W 、 R_1 、 R_2 の3個未知量はすべり面の反力 R_1 、 R_2 の2個力のつり合い条件式($\Sigma V=0$, $\Sigma H=0$)から未知量は求められる。

$$R_1 = \frac{\sin(\omega_2 - \phi)}{\sin(\omega_1 + \omega_2 - 2\phi)} W$$

$$R_2 = \frac{\sin(\omega_1 - \phi)}{\sin(\omega_1 + \omega_2 - 2\phi)} W$$

ステップ2



土塊adcに作用する力は W_1 、 R_1 、 P_A の3個未知量は仮想背面の内力 P_A と作用角 δ の2個力のつり合い条件式($\Sigma V=0$, $\Sigma H=0$)から未知量は求められる。

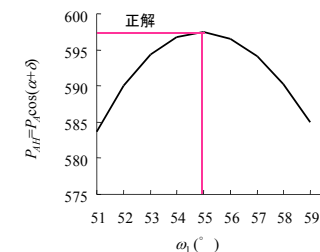
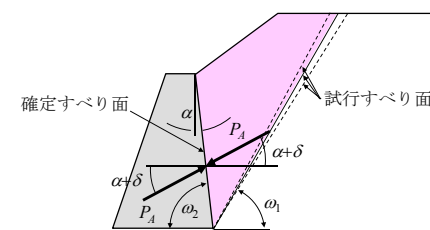
$$\delta = \tan^{-1} \frac{W_1 - R_1 \cos(\omega_1 - \phi)}{R_1 \sin(\omega_1 - \phi)}$$

$$P_A = \frac{\sin(\omega_1 - \phi)}{\cos \delta} R_1$$

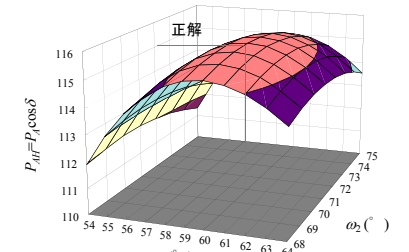
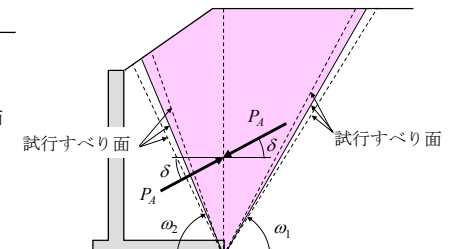
34

片持ちり式擁壁と重力式擁壁の違い

試行くさび法



改良試行くさび法

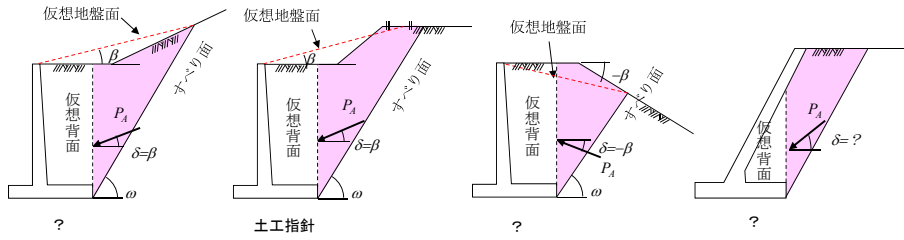


土圧合力ではなく、土圧合力の水平成分の最大値を探索することに注意

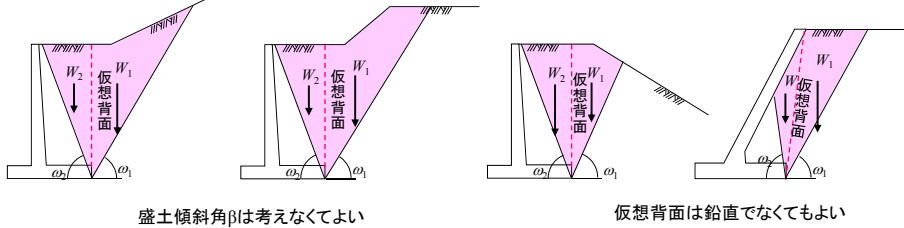
35 35

改良試行くさび法ではδを仮定する必要がない

試行くさび法(δを適当に仮定)



改良試行くさび法(δは理論的に求まる)



盛土傾斜角βは考えなくてよい

仮想背面は鉛直でなくてもよい

36

3. 安定性の照査

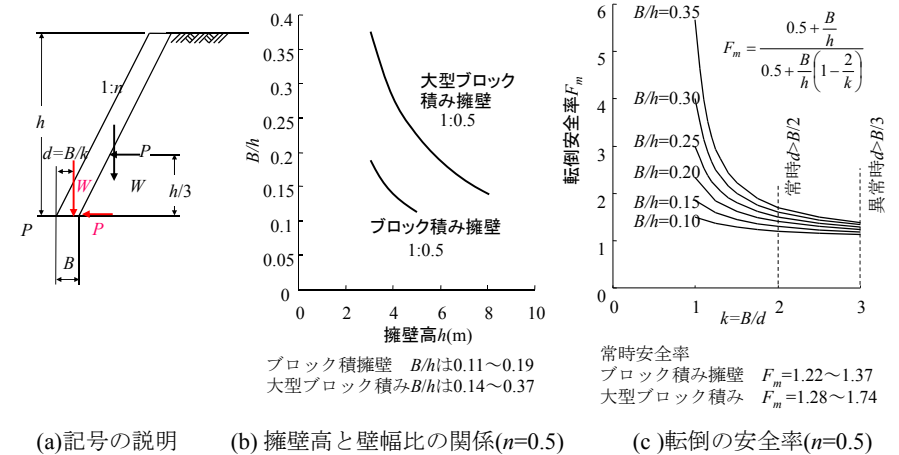
37

転倒に対する安定の照査

	常時	地震時
自立式	$e \leq \frac{B}{6}$	$e \leq \frac{B}{3}$
もたれ式	$d > \frac{B}{2}$	$\frac{B}{3} \leq d \leq \frac{B}{2}$

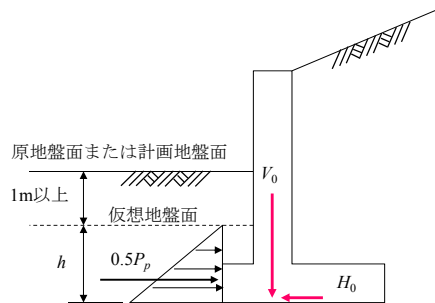
38

荷重合力位置dと転倒安全率の関係



39

滑動の安全率



安全率

$$F_s = \frac{H_u}{H_o} \leq 1.5 (\text{異常時} 1.2)$$

底面が平坦の場合の滑動抵抗力

$$H_u = V_o \mu + 0.5 P_p$$

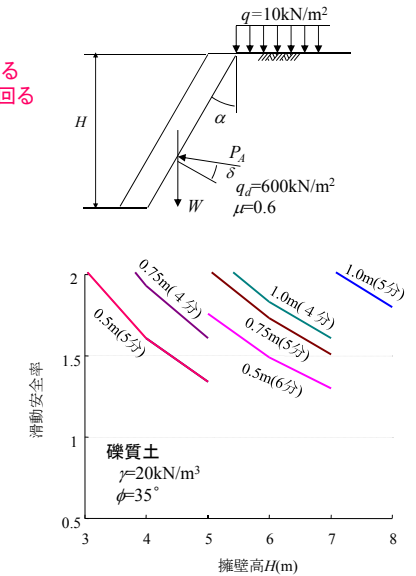
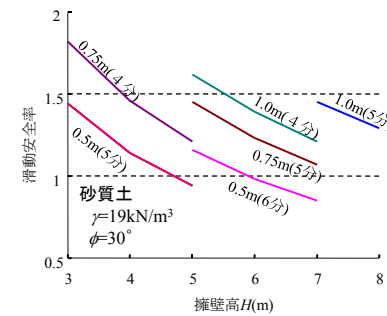
$$P_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

40

ブロック積み擁壁の滑動に対する安全率

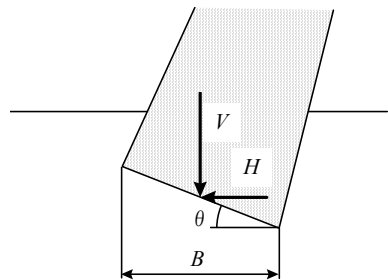
盛土を砂質土にすると滑動の安全率が1を下回る
盛土を礫質土にすると滑動の安全率が1.5を下回る

$$\text{滑動安全率 } F_s = \frac{W + P_A \sin(\delta - \alpha)}{P_A \cos(\delta - \alpha)} \mu$$

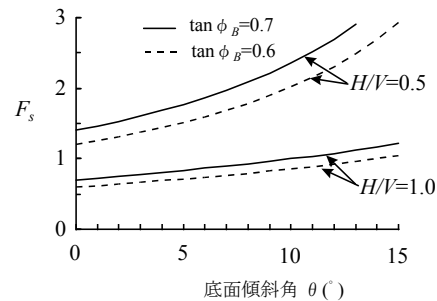


底面を傾斜させたときの滑動安全率

$$F_s = \frac{V \cos \theta + H \sin \theta}{H \cos \theta - V \sin \theta} \tan \phi_B$$



(a) 基礎底面の傾斜

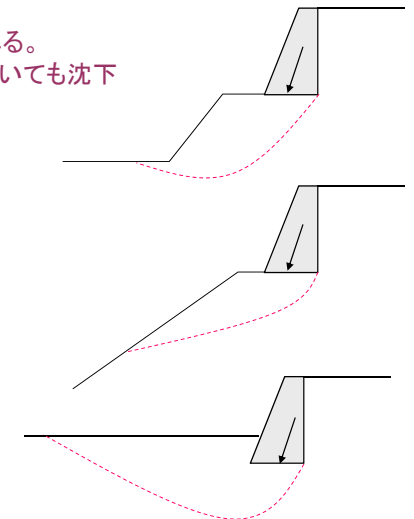
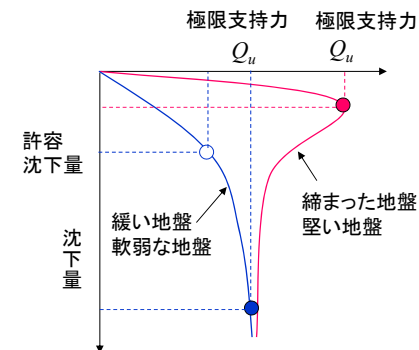


(b) 傾斜角と滑動の安全率

42

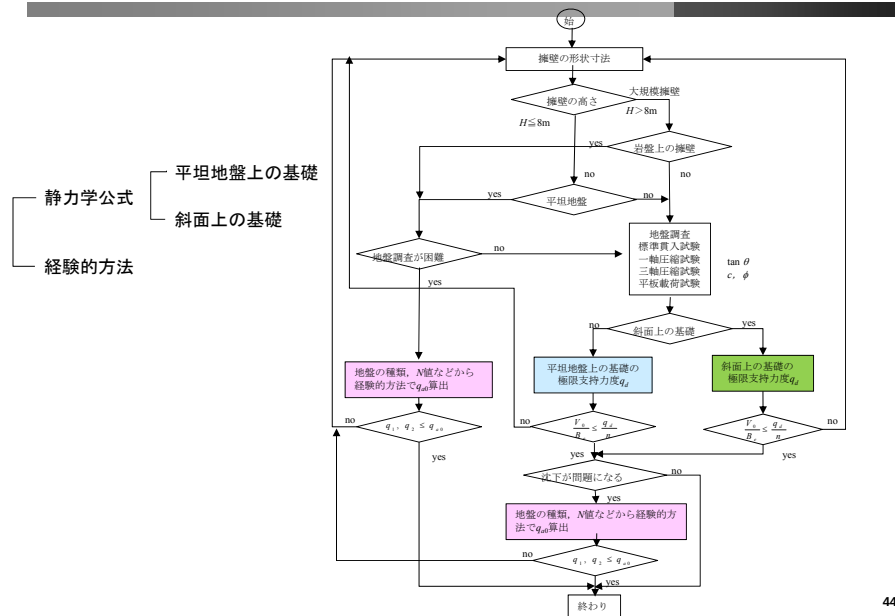
支持力に関する留意点

- ・支持力は地盤の形状によって支配される。
- ・軟弱な地盤では、安全率が確保されていても沈下量が大きくトラブルになることがある。



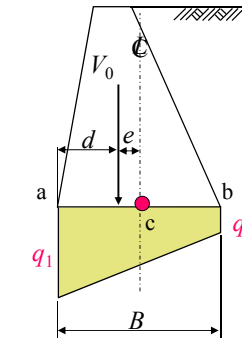
43

支持に対する安定性の照査



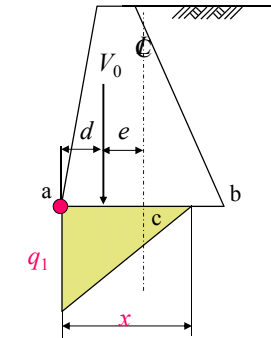
自立式擁壁の鉛直地盤反力度の算定

合力が中央1/3の内 $e \leq \frac{B}{6}$



$$\left. \begin{aligned} \Sigma V=0 \text{より} \\ \frac{1}{2}(q_1 + q_2)B = V_0 \\ \Sigma Mat \text{ } c=0 \text{より} \\ \frac{1}{2}(q_1 - q_2)B \times \frac{B}{6} = V_0 \times e \end{aligned} \right\} \begin{aligned} q_1 &= \frac{B}{6} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) \\ q_2 &= \frac{B}{6} \left(1 - \frac{6e}{B} \right) \end{aligned}$$

合力が中央1/3の外 $e > \frac{B}{6}$

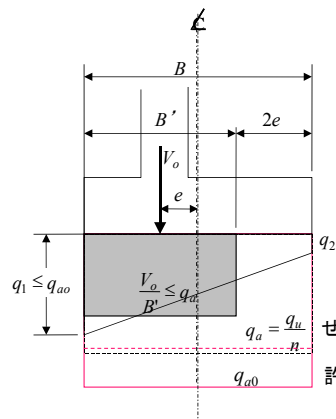


$$\left. \begin{aligned} \Sigma V=0 \text{より} \\ \frac{1}{2}q_1 \times x = V_0 \\ \Sigma Mat \text{ } a=0 \text{より} \\ \frac{1}{2}q_1 \times x \times \frac{1}{3}x = V_0 \times d \end{aligned} \right\} \begin{aligned} x &= 3d \\ q_1 &= \frac{2V_0}{3d} \end{aligned}$$

45

支持の安定に対する照査

	せん断破壊の照査	沈下の照査
重要度が高い擁壁大規模(>8m)な擁壁軟弱地盤上の擁壁 斜面上の擁壁特殊な施工条件の擁壁	$\frac{V_0}{B'} \leq \frac{q_u}{n}$	$q_1 \leq q_a$
上記以外の擁壁、岩盤上の擁壁	—	$q_1 \leq q_a$



せん断破壊から決まる許容鉛直支持力度
静力学支持力式より算定する。
平坦地盤 道路橋示方書式IV下部構造編・同解説
斜面地盤 設計要領第二集(NEXCO総研)
許容沈下量から決まる許容鉛直支持力度
道路土工・擁壁工指針

せん断破壊から決まる許容鉛直支持力度
許容沈下量から決まる許容鉛直支持力度

46

沈下量から決まる許容鉛直支持力度

基礎地盤の種類		許容鉛直支持力度 q_d (kN/m ²)	目安とする値	
			一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)	N値
岩 盤	亀裂の少ない均一な硬岩	1,000	10,000以上	
	亀裂の多い硬岩	600	10,000以上	
	軟岩・土丹	300	1,000以上	
礫 層	密なもの	600		
	密でないもの	300		
砂 質 地 盤	密なもの	300		30~50
	中位なもの	200		20~30
粘性土 地 盤	非常に堅いもの	200	240~400	15~30
	堅いもの	100	100~200	10~15

「道路橋下部構造設計指針・直接基礎の設計篇(昭和43年)」,「道路橋示方書・同解説IV下部構造編」に掲載
「荷重の傾斜角の正接(水平力/鉛直力)が0.1以下の場合で、かつ構造物の重要度が高くないと考えられる場合」
に適用。平成6年版からは削除

テルツァギー・ベックの経験式(砂質地盤)

$$q_a = 1,000\delta_a \left(1.36N - 3 \right) \left(\frac{B + 0.3}{2B} \right)^2$$

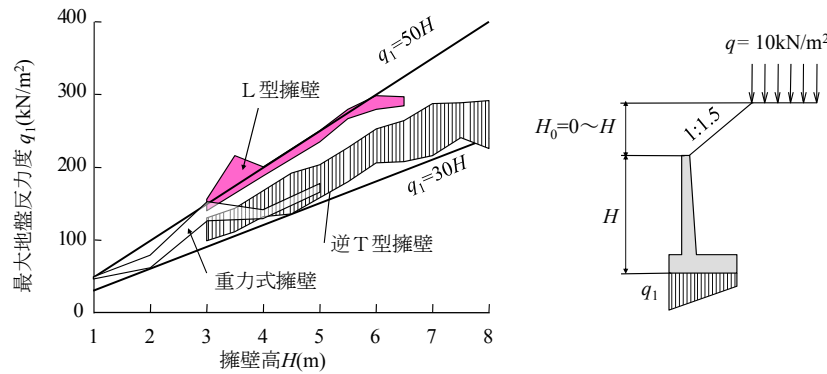
$\delta_a = 0.025\text{m}$ (1インチ), $B = 2\text{m}$ とおくと

$$q_a = 11.2N - 25 \approx 10N$$

47

支持層と見なせるN値の目安

支持層と見なせるN値 $N=5H$

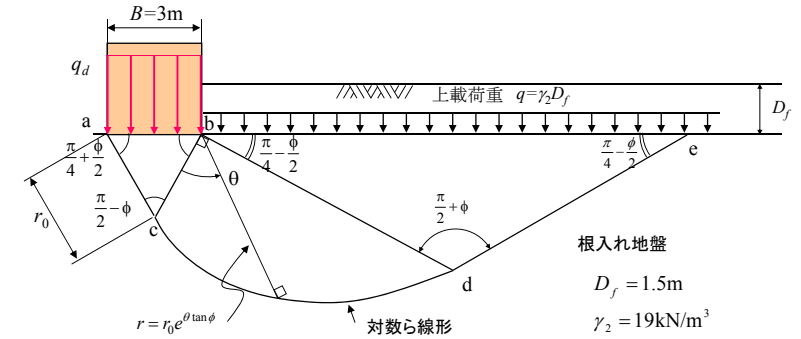


最大地盤反力度 $q_1=50H$
許容支持力度 $q_a \doteq 10N$ } $q_1=q_a$ とおくと $N=5H$

擁壁高 $H=3$ m の場合 支持層の N 値は $5 \times 3 = 15$ 以上必要

48

地盤の極限支持力 テルツァギー式



$$q_d = c \cdot N_c + q \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma$$

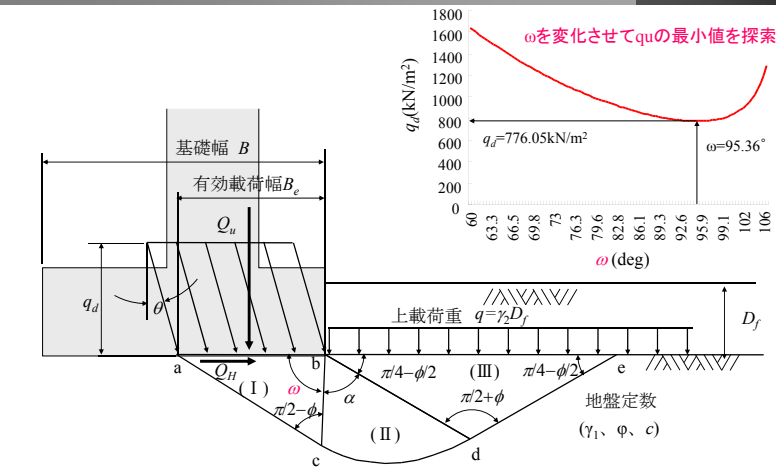
$$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_\gamma \approx (N_q - 1) \tan(1.4\phi)$$

49

平坦地盤の極限鉛直支持力度



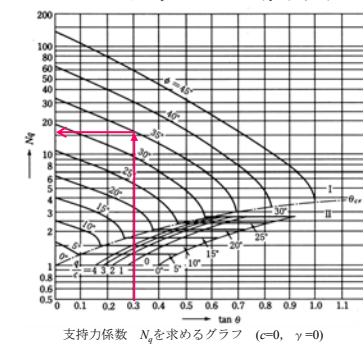
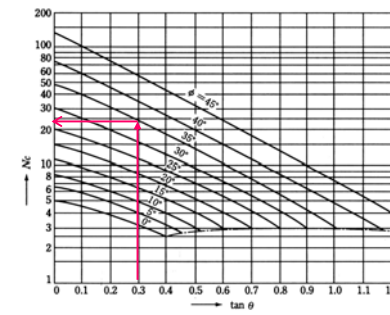
$$q_d = \alpha \kappa c N_c S_c + \kappa q N_q S_q + \frac{1}{2} \gamma_1 B B_e N_\gamma S_\gamma$$

$$c = 0, q = 0$$

$$q_a = \frac{q_d}{3} = \frac{1}{6} \gamma_1 N_\gamma (B - 2e)^{\frac{2}{3}}$$

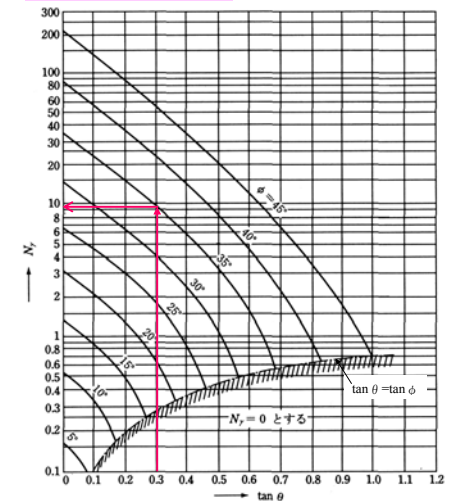
c, ϕ をどのように決めるかが問題

50



$$\tan \theta = \frac{H}{V} = \frac{360}{1,200} = 0.3$$

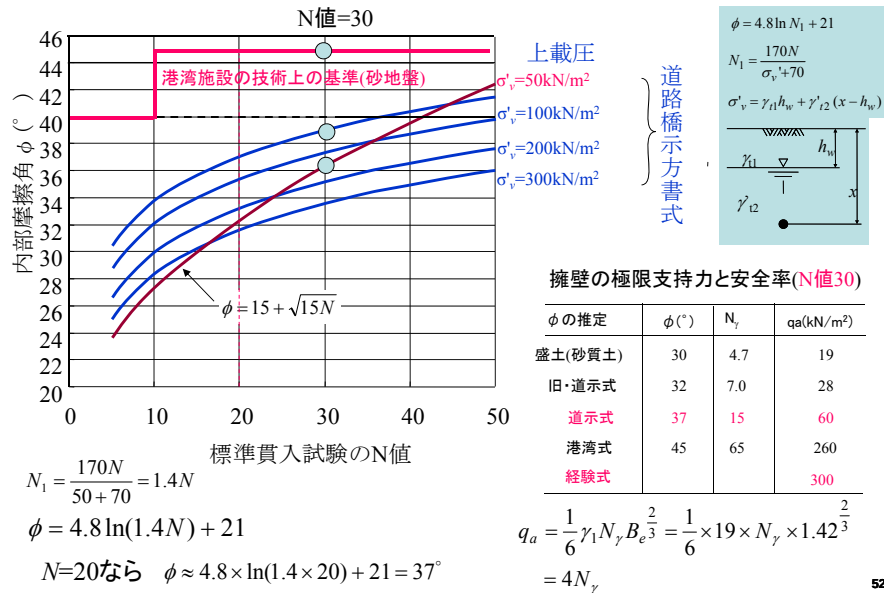
$\phi = 35^\circ$



道路橋示方書IV下部構造編・同解説

51

N値とφと許容支持力度 q_a の関係



52

ブロック積擁壁の安定の照査

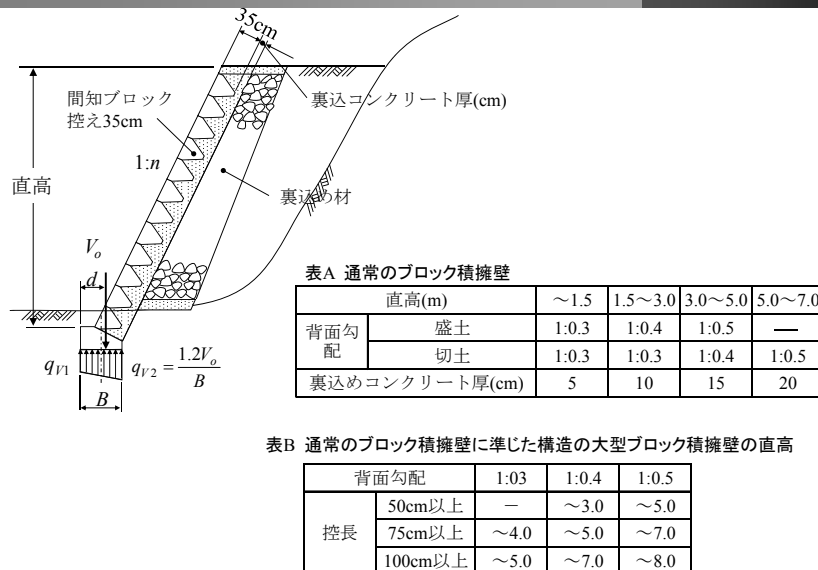
	ブロック間の結合や製品寸法による分類	構造特性	設計方法
通常 の ブ ロ ッ ク 積 擁 壁	通常 の ブ ロ ッ ク 積 (石積)擁壁 積みブロックの控長を35cmのまま大型化したブロック積擁壁	原則として胴込めコンクリートを設ける練積みで、水平方向の目地が直線とならない谷積み等で積み上げる形式	表Aを用いた「経験に基づく設計法」による
大 型 ブ ロ ッ ク 積 擁 壁	通常 の ブ ロ ッ ク 積 (石積)擁壁に準じた構造の大型ブロック積擁壁	控長の大きい大型積みブロックで、ブロック間の結合にかみ合わせ構造や突起等を用いたり、胴込めコンクリートで練積みにした形式	表Bを用いる。直高が5m以上は支持に対する安定の照査を行う。
	もたれ式擁壁に準じた大型ブロック積擁壁	控長の大きい大型積みブロックで、鉄筋コンクリートや中詰めコンクリート等を用いてブロック間の結合を強固にした形式	表Cを用いて、もたれ式擁壁に準じて擁壁の安定性及び部材の安全性を照査する。

表C もたれ式擁壁に準じた構造の大型ブロック積擁壁の最小控長

背面勾配	1:0.3	1:0.4	1:0.5
直 高 H (m)	~5.0	~7.0	~8.0
最小控長 b (m)	0.15H以上	0.12H以上	0.1H以上

53

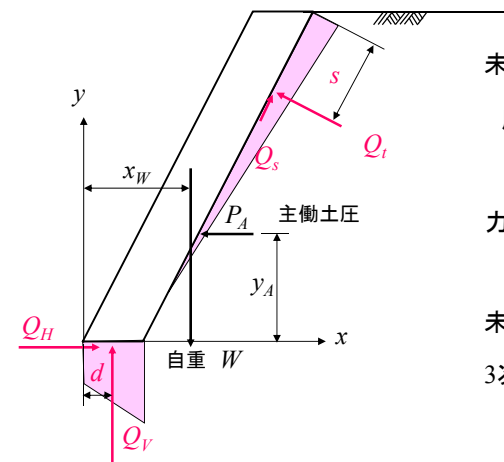
ブロック積擁壁擁壁鉛直地盤反力度



54

もたれ式擁壁の地盤反力

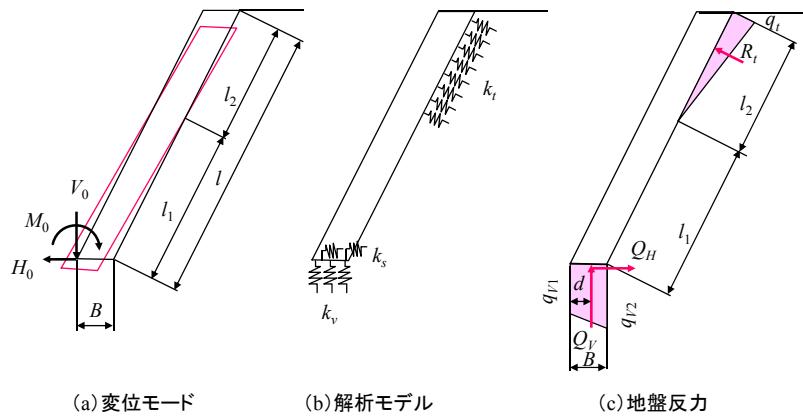
もたれ式擁壁は、背後の盛土にもたれかかって安定を保つ。
壁面土圧は主動土圧より大きくなる。



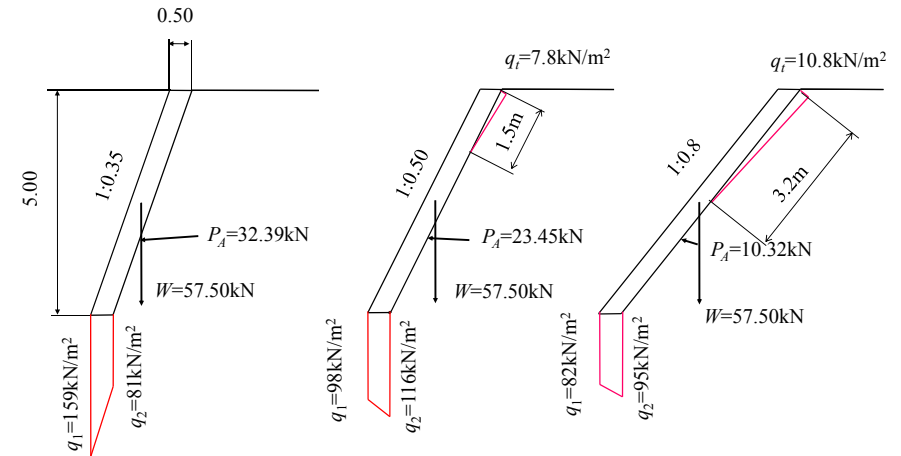
55

地盤係数法(変位法)による地盤反力の算定

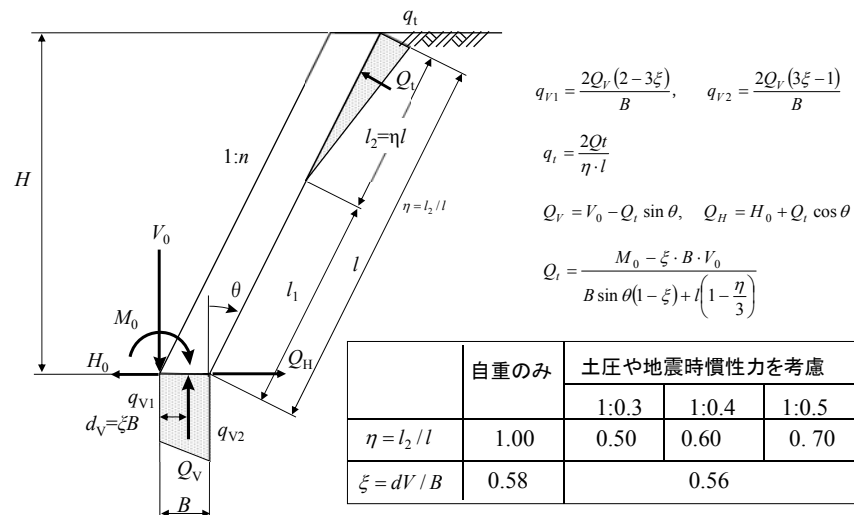
底面と壁面の圧縮域を離散型バネで支持



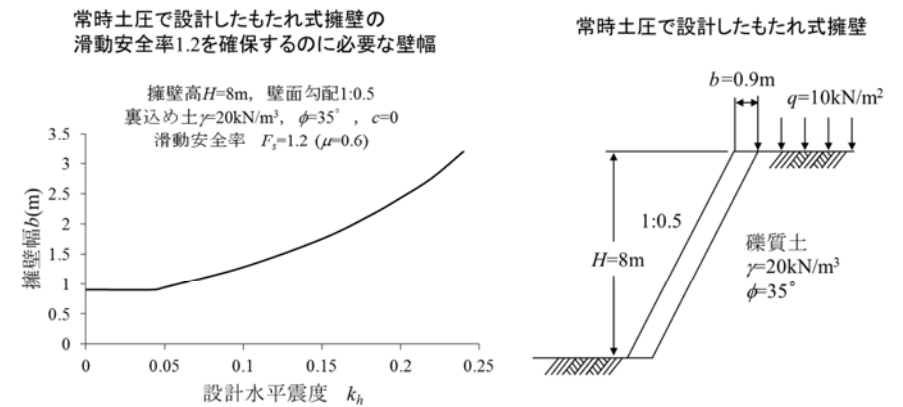
地盤係数法による地盤反力の計算結果



簡便法による鉛直地盤反力度の算定

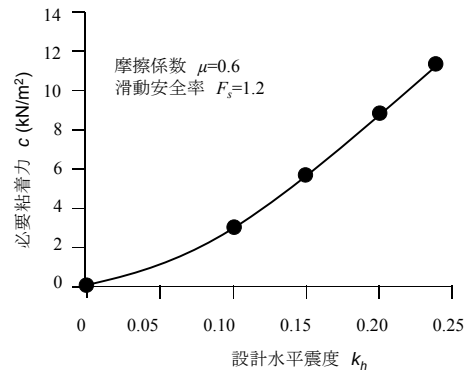


設計水平震度と壁幅

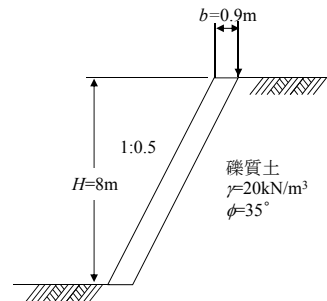


設計水平震度と粘着力

常時土圧で設計したもたれ式擁壁の
滑動安全率1.2を確保するのに必要な粘着力

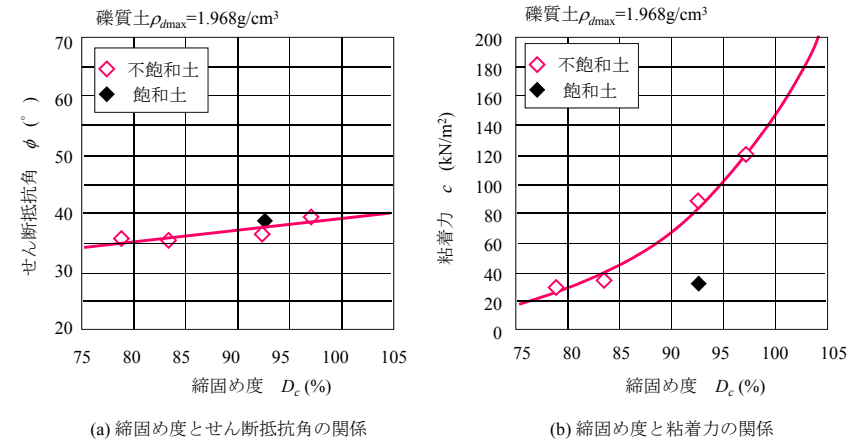


常時土圧で設計したもたれ式擁壁



60

盛土の締固度と c, ϕ

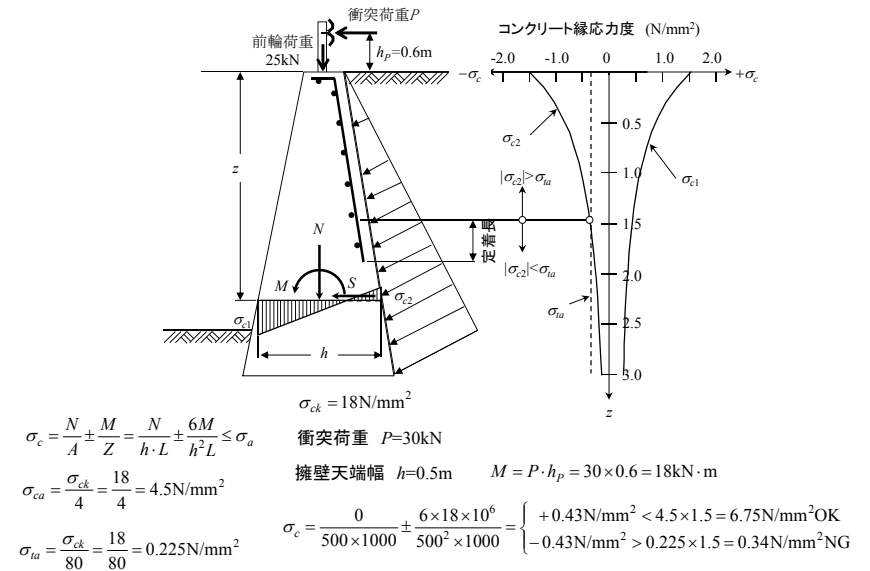


データは「川崎廣貴, 長澤正明: 高盛土の沈下挙動と地盤の性能評価技術, 基礎工, 2009.7」による

61

3. 応力度の照査

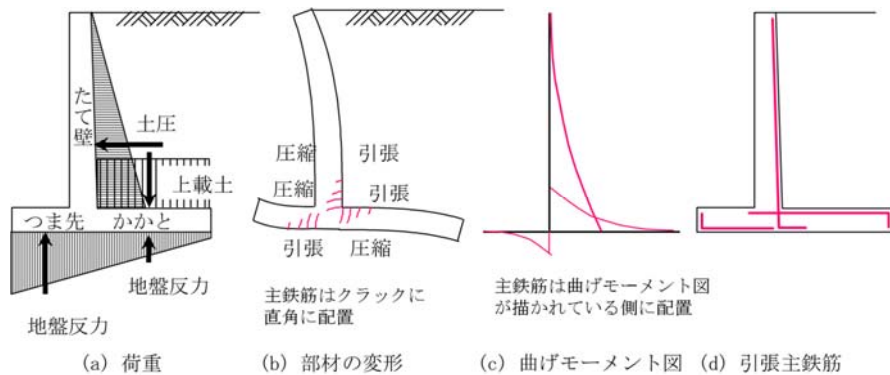
重力式擁壁(無筋コンクリート)の応力度



62

63

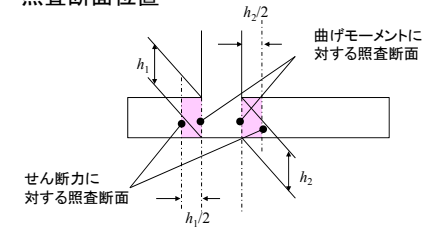
配筋の基本



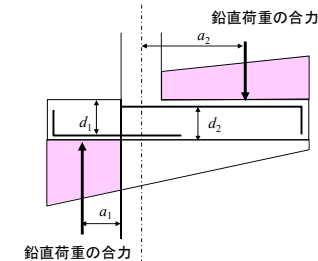
64

逆T型擁壁の底版の照査断面とせん断スパン

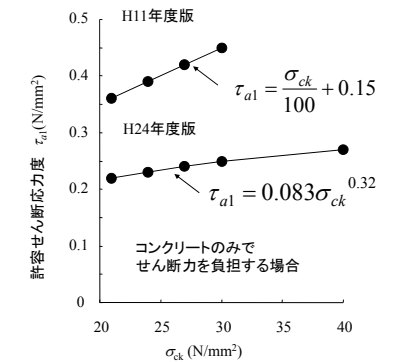
照査断面位置



せん断スパンの取り方



許容せん断応力度の基本値



$$\tau_{a1} = C_e \cdot C_{pt} \cdot C_N \cdot C_{dc} \left(0.083\sigma_{ck}^{0.32} \right)$$

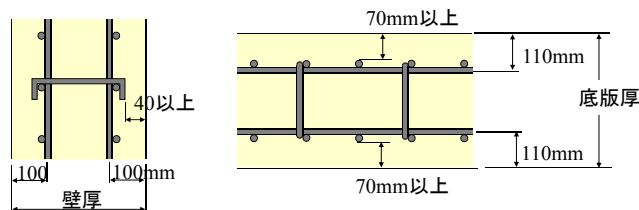
せん断スパン比による補正係数
軸方向圧縮力の影響による補正係数
軸方向引張鉄筋比 $p_t(\%)$ による補正係数
有効高 $d(\text{mm})$ による補正係数

鉄筋のかぶり

	現場打ち コンクリート	プレキャストコンクリート $C_{min} = \alpha \cdot K \cdot c_0$			
		現場製造		工場製品	
		$30 \leq \sigma_{ck} < 35 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 35 \text{ N/mm}^2$	$30 \leq \sigma_{ck} < 35 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{ck} \geq 35 \text{ N/mm}^2$
たて壁	40	40	32	32	25
底版	70	70	56	56	45

ボックスカルバートは25mm

土木構造物設計マニュアル案(H11年)



重要なポイント

1. 擁壁の重要度
2. 要求性能
3. ブロック積擁壁の常時性能, 地震時性能
4. 支持力計算に用いる c , ϕ は妥当か
5. 嵩上げ盛土がある逆T型擁壁, L型擁壁の土圧の算定法
6. 許容せん断応力度
7. 鉄筋のかぶり