

1. 施設形状

【概要】

本例で取り上げる取水設備は、下図のような既設床止め工にバースクリーン底部取水型取水工(チロルタイプ)を設置したものである。河川区域内に設置することから、常時(設計洪水時)は基より地震時に対しても安全な構造とする必要がある。

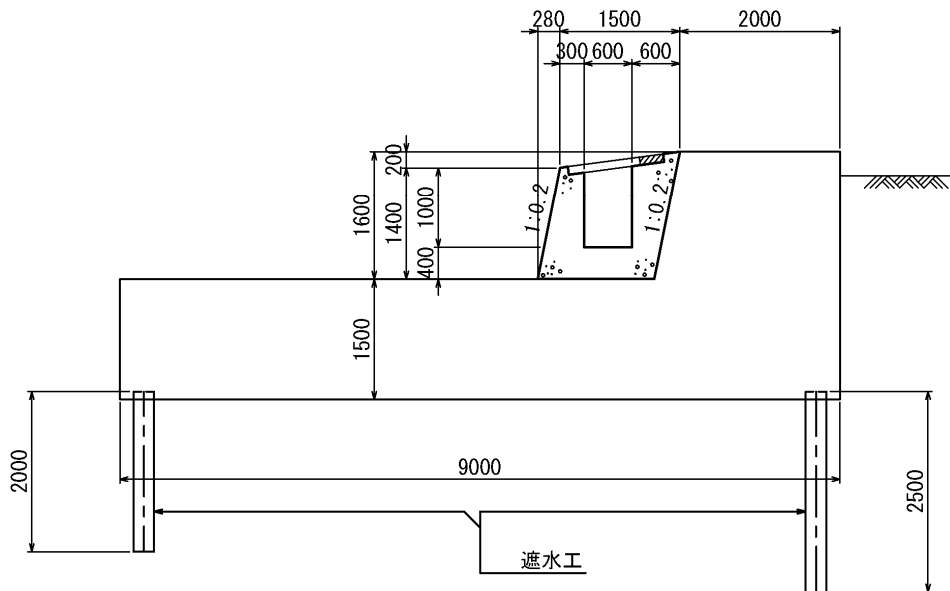
床止めの安定は、取水工を腹付けすることにより重量増加となるため、概して転倒及び滑動に対する安全率は増加する傾向になる。

本例では、既設及び取水工腹付け後について安全率の変化を安定計算により確認するものとする。

(1) 安定条件

安定条件は、以下の3項目である。

- ① 転倒に対する安定
- ② 滑動に対する安定
- ③ 支持力に対する安定



(2) 準拠基準及び参考図書

河川内施設のため、主に以下の基準を使用すれば良い。

- ① 「建設省河川砂防技術基準(案)同解説 設計編」 (社)日本河川協会
- ② 「床止めの構造設計手引き」 (財)国土技術研究センター
- ③ 「コンクリート標準示方書」 土木学会
- ④ その他

2. 取水工の安定計算(1)

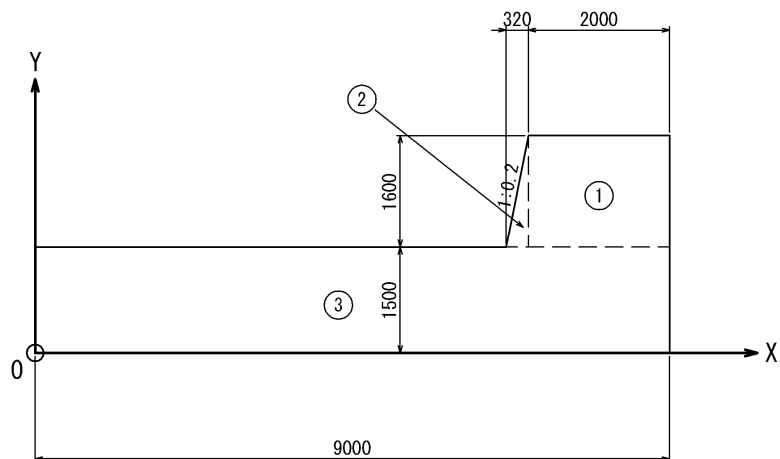
【既設床止めの安定計算】

既設床止め形状は、出典②、P126～130の「直壁型床止めの設計例」に記載されている形状を採用し、計算ケースは以下の2ケースとする。

- ①常時(設計洪水位)
- ②地震時

(1). 外力の計算

1) 自重および重心位置の計算



区分	計算式	鉛直力 W(kN/m)	アーム長		モーメント	
			x(m)	y(m)	W・x (kN・m/m)	W・y (kN・m/m)
①	$2.00 \times 1.60 \times 24.5 =$	78.40	8.00	2.30	627.20	180.32
②	$1/2 \times 0.32 \times 1.60 \times 24.5 =$	6.27	6.89	2.03	43.20	12.73
③	$9.00 \times 1.50 \times 24.5 =$	330.75	4.50	0.75	1,488.38	248.06
合計		415.42			2,158.78	441.11

$$\text{重心位置 } x = \frac{\sum W \cdot x}{\sum W} = \frac{2,158.78}{415.42} = 5.20\text{m}, \quad y = \frac{\sum W \cdot y}{\sum W} = \frac{441.11}{415.42} = 1.06\text{m}$$

2) 土圧の計算

(a) 常時

土圧合力

$$P_1 = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H^2 = \frac{1}{2} \times 0.297 \times 9.81 \times 2.80^2 = 11.42 \text{ kN/m}$$

$$\text{土圧水平分力 } P_{1H} = P_1 \cdot \cos \delta = 11.42 \times \cos 20^\circ = 10.73 \text{ kN/m}$$

$$\text{土圧鉛直分力 } P_{1V} = P_1 \cdot \sin \delta = 11.42 \times \sin 20^\circ = 3.91 \text{ kN/m}$$

ここに、 K_a ; クーロンの主働土圧係数(土の内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$)

δ ; 壁面摩擦角(常時 $2/3 \phi$)

$$\text{作用位置 } y = 2.80/3 = 0.93\text{m}$$

2. 取水工の安定計算(2)

(b) 地震時

土圧合力

$$P_{le} = \frac{1}{2} \cdot K_{ea} \cdot \gamma \cdot H^2 = \frac{1}{2} \times 0.452 \times 9.81 \times 2.80^2 = 17.38 \text{ kN/m}$$

$$\text{土圧水平分力 } P_{lHe} = P_{le} \cdot \cos \delta = 17.38 \times \cos 15^\circ = 16.79 \text{ kN/m}$$

$$\text{土圧鉛直分力 } P_{lVe} = P_{le} \cdot \sin \delta = 17.38 \times \sin 15^\circ = 4.50 \text{ kN/m}$$

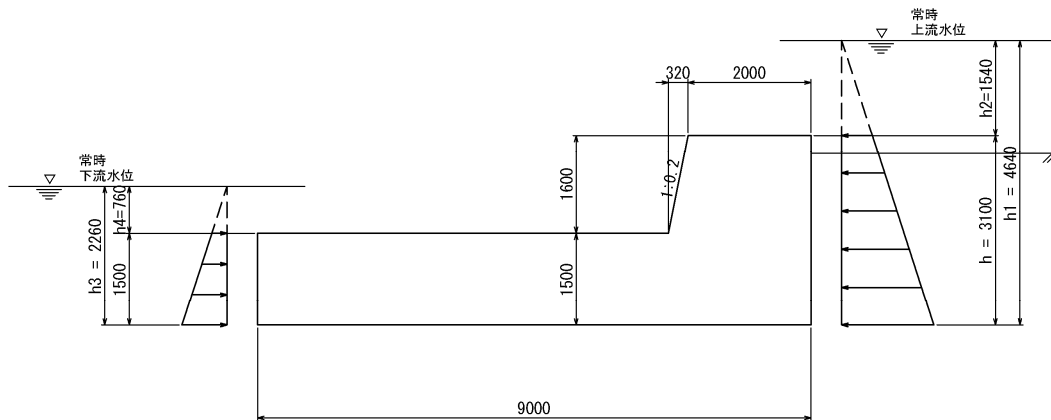
ここに、 K_a ; クーロンの主働土圧係数(土の内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$)

δ ; 壁面摩擦角(地震時 $\phi/2$)

$$\text{作用位置 } y = 2.80/3 = 0.93\text{m}$$

3) 水圧の計算

(a) 常時(設計洪水時)



上流側水圧

$$P_{w1} = \frac{1}{2} \cdot w_0 \cdot (h_1^2 - h_2^2) = \frac{1}{2} \times 9.8 \times (4.64^2 - 1.54^2) = 93.87 \text{ kN/m}$$

作用位置

$$y = \frac{h_1 - h_2}{3} \times \frac{h_1 + 2h_2}{h_1 + h_2} = \frac{4.64 - 1.54}{3} \times \frac{4.64 + 2 \times 1.54}{4.64 + 1.54} = 1.29\text{m}$$

下流側水圧

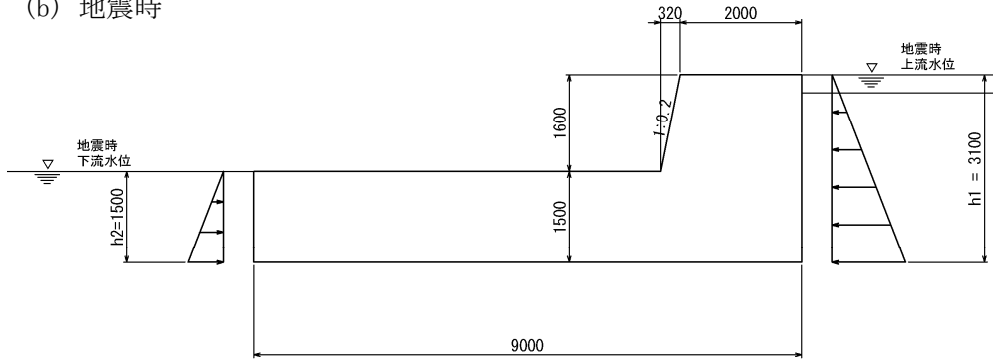
$$P_{w2} = \frac{1}{2} \cdot w_0 \cdot (h_3^2 - h_4^2) = \frac{1}{2} \times 9.8 \times (2.26^2 - 0.76^2) = 22.20 \text{ kN/m}$$

作用位置

$$y = \frac{h_3 - h_4}{3} \times \frac{h_3 + 2h_4}{h_3 + h_4} = \frac{2.26 - 0.76}{3} \times \frac{2.26 + 2 \times 0.76}{2.26 + 0.76} = 0.63\text{m}$$

2. 取水工の安定計算(3)

(b) 地震時



上流側水圧

$$P_{w1} = \frac{1}{2} \cdot w_0 \cdot h_1^2 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times 3.10^2 = 47.09 \text{ kN/m}$$

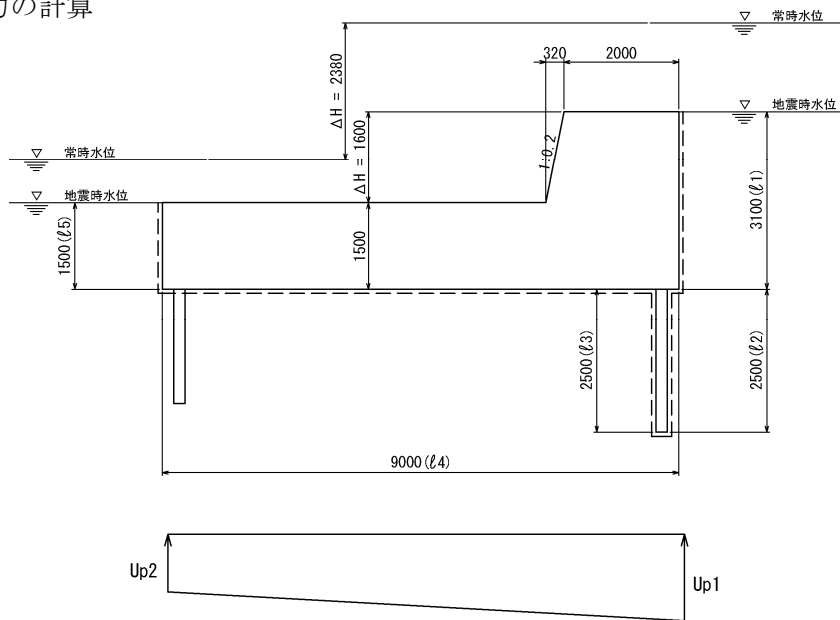
$$\text{作用位置 } y = \frac{h_1}{3} = \frac{3.10}{3} = 1.03 \text{ m}$$

下流側水圧

$$P_{w2} = \frac{1}{2} \cdot w_0 \cdot h_2^2 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times 1.50^2 = 11.03 \text{ kN/m}$$

$$\text{作用位置 } y = \frac{h_2}{3} = \frac{1.50}{3} = 0.50 \text{ m}$$

4) 揚圧力の計算



全浸透路長

$$\Sigma l = \overset{l1}{3.10} + \overset{l2}{2.50} + \overset{l3}{2.50} + \overset{l4}{9.00} + \overset{l5}{1.50} = 18.60 \text{ m}$$

本例では、下流側遮水工はウィープホールを設けることで、浸透路長とは見なさないこととした。

2. 取水工の安定計算(4)

(a) 常時(設計洪水時)

上流端

$$U_{p1} = \left(d + \Delta H \cdot \frac{\Sigma \ell - \ell_3}{\Sigma \ell} \right) \cdot W_o$$

$$= \left\{ 1.50 + 2.38 \times \frac{18.60 - (3.10 + 2.50 + 2.50)}{18.60} \right\} \times 9.8^{\text{kN/m}^3} = 27.87 \text{ kN/m}^2$$

下流端

$$U_{p2} = \left(d + \Delta H \cdot \frac{\Sigma \ell - \ell_4}{\Sigma \ell} \right) \cdot W_o$$

$$= \left\{ 1.50 + 2.38 \times \frac{18.60 - (3.10 + 2.50 + 2.50 + 9.00)}{18.60} \right\} \times 9.8^{\text{kN/m}^3} = 16.58 \text{ kN/m}^2$$

揚圧力

$$U_p = \frac{1}{2} \times (27.87 + 16.58) \times 9.00 = 200.03 \text{ kN/m}$$

作用位置

$$x = \frac{9.00}{3} \times \frac{16.58 + 2 \times 27.87}{16.58 + 27.87} = 4.88 \text{ m}$$

(b) 地震時

上流端

$$U_{p1} = \left(d + \Delta H \cdot \frac{\Sigma \ell - \ell_3}{\Sigma \ell} \right) \cdot W_o$$

$$= \left\{ 1.50 + 1.60 \times \frac{18.60 - (3.10 + 2.50 + 2.50)}{18.60} \right\} \times 9.8^{\text{kN/m}^3} = 23.55 \text{ kN/m}^2$$

下流端

$$U_{p2} = \left(d + \Delta H \cdot \frac{\Sigma \ell - \ell_4}{\Sigma \ell} \right) \cdot W_o$$

$$= \left\{ 1.50 + 1.60 \times \frac{18.60 - (3.10 + 2.50 + 2.50 + 9.00)}{18.60} \right\} \times 9.8^{\text{kN/m}^3} = 15.96 \text{ kN/m}^2$$

揚圧力

$$U_p = \frac{1}{2} \times (23.55 + 15.96) \times 9.00 = 177.80 \text{ kN/m}$$

作用位置

$$x = \frac{9.00}{3} \times \frac{15.96 + 2 \times 23.55}{15.96 + 23.55} = 4.79 \text{ m}$$

2. 取水工の安定計算(5)

(2) 安定計算(既設)

1) 常時(設計洪水時)

	鉛直力 W (kN/m)	水平力 H (kN/m)	アーム長		モーメント	
			x (m)	y (m)	Mr=W・x (kN・m/m)	Mo=H・y (kN・m/m)
自重	415.42	—	5.20	1.06	2,160.18	—
土圧	3.91	10.73	9.00	0.93	35.19	9.98
水圧(上流側)	—	93.87	—	1.29	—	121.09
水圧(下流側)	—	-22.20	—	0.63	—	-13.99
揚圧力	-200.03	—	4.88	—	-976.15	—
合計	219.30	82.40			1,219.23	117.09

(a). 転倒に対して

合力の作用位置 (0点からの距離)

$$d = \frac{\sum W \cdot x + \sum H \cdot y}{\sum W} = \frac{1,219.23 - 117.09}{219.30} = 5.03 \text{ m}$$

偏心距離 e

$$e = \frac{B}{2} - d = \left| \frac{9.00}{2} - 5.03 \right| = 0.53 \text{ m} \leq \frac{B}{6} = \frac{9.00}{6} = 1.50 \text{ m} \text{ ----- OK}$$

安全率

$$F_s = \frac{M_r}{M_o} = \frac{1,219.23}{117.09} = 10.41 \geq 1.5 \rightarrow \text{OK}$$

故に、転倒に対して安全である。

(b). 滑動に対して

$$F_s = \frac{\sum W \cdot \mu}{\sum H} = \frac{219.30 \times 0.7}{82.40} = 1.86 > 1.5 \text{ ----- OK}$$

故に、滑動に対して安全である。

(c). 地盤反力の計算

地盤反力

$$q = \frac{\sum V}{B} \left(1 \pm \frac{6 \cdot e}{B} \right)$$

$$= \frac{219.30}{9.00} \times \left(1 \pm \frac{6 \times 0.53}{9.00} \right) = \begin{cases} 32.98 \text{ kN/m}^2 \\ 15.76 \text{ kN/m}^2 \end{cases} \leq q_a = 294 \text{ kN/m}^2 \text{ ----- OK}$$

故に、支持力に対して安全である。

2. 取水工の安定計算(6)

2) 地震時

	鉛直力 W (kN/m)	水平力 H (kN/m)	アーム長		モーメント	
			x (m)	y (m)	Mr=W・x (kN・m/m)	Mo=H・y (kN・m/m)
自重	415.42	83.08	5.20	1.06	2,160.18	88.07
土圧	4.50	16.76	9.00	0.93	40.50	15.59
水圧(上流側)	—	47.09	—	1.03	—	48.50
水圧(下流側)	—	-11.03	—	0.50	—	-5.52
揚圧力	-177.80	—	4.79	—	-851.66	—
合計	242.12	135.90			1,349.02	146.64

(a). 転倒に対して

合力の作用位置 (0点からの距離)

$$d = \frac{\sum W \cdot x + \sum H \cdot y}{\sum W} = \frac{1,349.02 - 146.64}{242.12} = 4.97 \text{ m}$$

偏心距離 e

$$e = \frac{B}{2} - d = \left| \frac{9.00}{2} - 4.97 \right| = 0.47 \text{ m} \leq \frac{B}{3} = \frac{9.00}{3} = 3.00 \text{ m} \text{ ----- OK}$$

安全率

$$F_s = \frac{M_r}{M_o} = \frac{1,349.02}{242.12} = 5.57 \geq 1.2 \rightarrow \text{OK}$$

故に、転倒に対して安全である。

(b). 滑動に対して

$$F_s = \frac{\sum W \cdot \mu}{\sum H} = \frac{242.12 \times 0.7}{135.90} = 1.25 > 1.2 \text{ ----- OK}$$

故に、滑動に対して安全である。

(c). 地盤反力の計算

地盤反力

$$q = \frac{\sum V}{B} \left(1 \pm \frac{6 \cdot e}{B} \right)$$

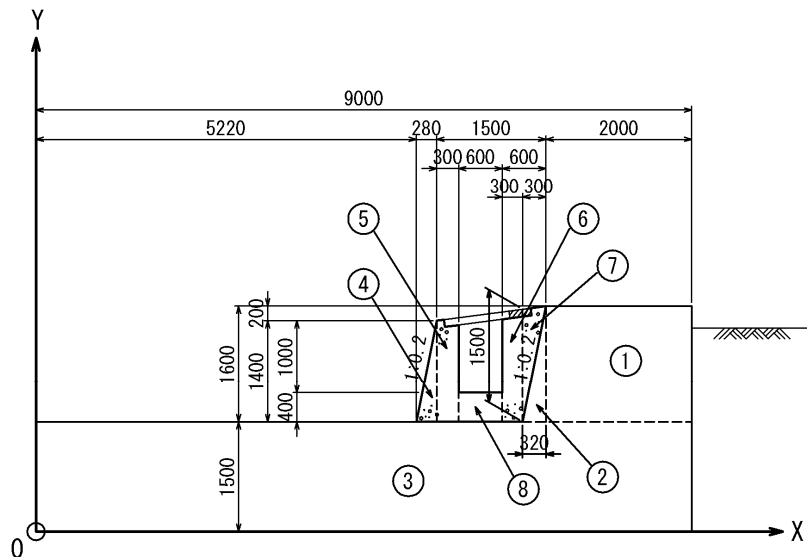
$$= \frac{242.12}{9.00} \times \left(1 \pm \frac{6 \times 0.47}{9.00} \right) = \begin{cases} 35.33 \text{ kN/m}^2 \\ 18.47 \text{ kN/m}^2 \end{cases} \leq q_a = 441 \text{ kN/m}^2 \text{ ----- OK}$$

故に、支持力に対して安全である。

2. 取水工の安定計算(7)

【腹付け後の安定計算】

腹付け後は、自重のみが変化し、他の作用力は同じため【既設の安定計算】の項を参照のこと。



区分	計算式	鉛直力 W (kN/m)	アーム長		モーメント	
			x (m)	y (m)	W・x (kN・m/m)	W・y (kN・m/m)
①	$2.00 \times 1.60 \times 24.5 =$	78.40	8.00	2.30	627.20	180.32
②	$1/2 \times 0.32 \times 1.60 \times 24.5 =$	6.27	6.89	2.03	43.20	12.73
③	$9.00 \times 1.50 \times 24.5 =$	330.75	4.50	0.75	1,488.38	248.06
④	$1/2 \times 0.28 \times 1.40 \times 24.5 =$	4.80	5.41	1.97	25.97	9.46
⑤	$0.30 \times 1.40 \times 24.5 =$	10.29	5.65	2.20	58.14	22.64
⑥	$0.30 \times 1.50 \times 24.5 =$	11.03	6.55	2.25	72.25	24.82
⑦	$1/2 \times 0.30 \times 1.50 \times 24.5 =$	5.51	6.80	2.50	37.47	13.78
⑧	$0.60 \times 0.40 \times 24.5 =$	5.88	6.10	1.70	35.87	10.00
合計		452.93			2,388.48	521.81

$$\text{重心位置 } x = \frac{\sum W \cdot x}{\sum W} = \frac{2,388.48}{452.93} = 5.27\text{m}, \quad y = \frac{\sum W \cdot y}{\sum W} = \frac{521.81}{452.93} = 1.15\text{m}$$

2. 取水工の安定計算(8)

(1) 常時(設計洪水時)

	鉛直力 W (kN/m)	水平力 H (kN/m)	アーム長		モーメント	
			x (m)	y (m)	Mr=W・x (kN・m/m)	Mo=H・y (kN・m/m)
自重	452.93	—	5.27	1.15	2,386.94	—
土圧	3.91	10.73	9.00	0.93	35.19	9.98
水圧(上流側)	—	93.87	—	1.29	—	121.09
水圧(下流側)	—	-22.20	—	0.63	—	-13.99
揚圧力	-200.03	—	4.88	—	-976.15	—
合計	256.81	82.40			1,445.98	117.09

1). 転倒に対して

合力の作用位置 (0点からの距離)

$$d = \frac{\Sigma W \cdot x + \Sigma H \cdot y}{\Sigma W} = \frac{1,445.98 - 117.09}{256.81} = 5.18 \text{ m}$$

偏心距離 e

$$e = \frac{B}{2} - d = \left| \frac{9.00}{2} - 5.18 \right| = 0.68 \text{ m} \leq \frac{B}{6} = \frac{9.00}{6} = 1.50 \text{ m} \text{ ----- OK}$$

安全率

$$F_s = \frac{M_r}{M_o} = \frac{1,445.98}{117.09} = 12.35 \geq 1.5 \rightarrow \text{OK}$$

故に、転倒に対して安全である。

2). 滑動に対して

$$F_s = \frac{\Sigma W \cdot \mu}{\Sigma H} = \frac{256.81 \times 0.7}{82.40} = 2.18 > 1.5 \text{ ----- OK}$$

故に、滑動に対して安全である。

3). 地盤反力の計算

地盤反力

$$q = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 \pm \frac{6 \cdot e}{B} \right)$$

$$= \frac{256.81}{9.00} \times \left(1 \pm \frac{6 \times 0.68}{9.00} \right) = \begin{cases} 41.47 \text{ kN/m}^2 \\ 15.60 \text{ kN/m}^2 \end{cases} \leq q_a = 294 \text{ kN/m}^2 \text{ ----- OK}$$

故に、支持力に対して安全である。

2. 取水工の安定計算(9)

(2) 地震時

	鉛直力 W (kN/m)	水平力 H (kN/m)	アーム長		モーメント	
			x (m)	y (m)	Mr=W・x (kN・m/m)	Mo=H・y (kN・m/m)
自重	452.93	90.59	5.27	1.15	2,386.94	104.17
土圧	4.50	16.76	9.00	0.93	40.50	15.59
水圧(上流側)	—	47.09	—	1.03	—	48.50
水圧(下流側)	—	-11.03	—	0.50	—	-5.52
揚圧力	-177.80	—	4.79	—	-851.66	—
合計	279.63	143.41			1,575.78	162.75

1). 転倒に対して

合力の作用位置 (0点からの距離)

$$d = \frac{\Sigma W \cdot x + \Sigma H \cdot y}{\Sigma W} = \frac{1,575.78 - 162.75}{279.63} = 5.05 \text{ m}$$

偏心距離 e

$$e = \frac{B}{2} - d = \left| \frac{9.00}{2} - 5.05 \right| = 0.55 \text{ m} \leq \frac{B}{3} = \frac{9.00}{3} = 3.00 \text{ m} \text{ ----- OK}$$

安全率

$$F_s = \frac{M_r}{M_o} = \frac{1,575.78}{162.75} = 9.68 \geq 1.2 \rightarrow \text{OK}$$

故に、転倒に対して安全である。

2). 滑動に対して

$$F_s = \frac{\Sigma W \cdot \mu}{\Sigma H} = \frac{279.63 \times 0.7}{143.41} = 1.36 > 1.2 \text{ ----- OK}$$

故に、滑動に対して安全である。

3). 地盤反力の計算

地盤反力

$$q = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 \pm \frac{6 \cdot e}{B} \right)$$

$$= \frac{279.63}{9.00} \times \left(1 \pm \frac{6 \times 0.55}{9.00} \right) = \begin{cases} 42.46 \text{ kN/m}^2 \\ 19.68 \text{ kN/m}^2 \end{cases} \leq q_a = 441 \text{ kN/m}^2 \text{ ----- OK}$$

故に、支持力に対して安全である。

2. 取水工の安定計算(10)

【考察】

本例の計算結果一覧表を以下に示す。

			① 既設	② 腹付け後	許容値	備考
常時	転倒	偏心距離	0.53	0.68	B/6=1.50m	
		安全率	10.41	12.35	Fs=1.5	
	滑動	安全率	1.86	2.18	Fs=1.5	
	支持力	最大	32.98	41.47	qa=294kN/m ²	
最小		15.76	15.60			
地震時	転倒	偏心距離	0.47	0.55	B/3=3.00m	
		安全率	5.57	9.68	Fs=1.2	
	滑動	安全率	1.25	1.36	Fs=1.2	
	支持力	最大	35.33	42.46	qa=441kN/m ²	
最小		18.47	19.68			

本例の場合、転倒及び滑動に対する安全率は大きくなるため、既設床止め工の安全度は増加したといえる。一方、重量が増加した分地盤反力は大きくなるため、支持力に対しては安全率が減少したともいえる。

床止め工が設置される河川の支持地盤は概ね良好なため、通常、直接基礎の場合最低でも20t/m²(196kN/m²)程度はあると推測されるため、本例における地盤反力の増分は特に問題とはならないと思われる。ただし、既存の支持力が許容値ぎりぎりの設計であった場合などは何らかの対策が必要になる場合もあるため、要注意である。

<その他の留意点>

既設床止め工に腹付けする場合は、既設床止め工との一体化が必要である。一般に、あと施工アンカーを既設コンクリートに打設することが行われるが、概ねD16ctc500mm程度とすれば特に計算は必要ないと思われる。