

透水性鋼矢板

技術資料

鋼管杭協会

透水性鋼矢板

技術資料

鋼管杭協会

目 次

1. はじめに	1
2. 透水性鋼矢板の概要	2
2.1 透水性鋼矢板とは	2
2.2 透水孔の配置	2
2.2.1 開孔率	2
2.2.2 開孔率と流量の関係	3
2.3 透水性鋼矢板の断面性能	4
2.3.1 応力度の照査	4
2.3.2 変位の照査	6
2.3.3 透水性鋼矢板の設計	7
2.4 施工について	7
3. 透水性鋼矢板の検討例	8
3.1 設計計算の流れ	8
3.2 検討例	9
【参考資料】	
1. 浸透流解析による透水性鋼矢板の通水性能の検討	13
1.1 検討条件	13
1.2 検討結果	14
2. 室内透水試験による透水性鋼矢板の通水性状に関する基礎検討	16
2.1 実験目的	16
2.2 実験概要	16
2.3 実験結果	18
2.4 通水性の評価方法に関する考察	19
2.5 二次元浸透流解析による透水実験のシミュレーション	21
3. まとめ	23

1. はじめに

鋼矢板護岸は、耐洗掘性や耐震性等の優れた力学的特性を有しています。また、仮締切工が不要で、渇水期における急速施工が可能などの特長を有しており、これまで都市河川を中心に「安心・安全」の川づくりに貢献してまいりました。

平成9年、これまでの河川整備の基本方針であった「治水、利水」の2つに加え、新たに「河川環境の整備と保全」を謳った改正河川法が公布されました。鋼管杭協会では、このような趣旨に基づき透水性鋼矢板の開発を実施しました。これは鋼矢板に透水孔を設けることにより、鋼矢板護岸の優れた特性を維持しつつ水域と陸域の水循環を自然に近い状態で保全し、護岸周辺の多様な生態系を保全することができます。



2. 透水性鋼矢板の概要

2.1 透水性鋼矢板とは

透水性鋼矢板工法は、既存の水循環を妨げることなく生態系や環境に配慮するため、透水層にあらかじめ透水孔を設けた鋼矢板（透水性鋼矢板）を用いて鋼矢板壁を形成する工法です。

透水性鋼矢板工法は、鋼矢板が透水層を遮断する場合において地下水環境や生態系の保全に効果を発揮します。透水性鋼矢板工法の主な構造形式は、図-1に示す通り護岸構造や沈下・液状化対策構造に用いられています。

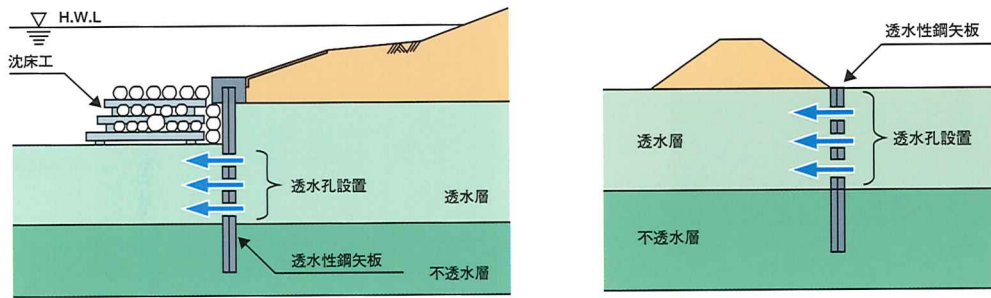


図-1 護岸構造（左図）、および沈下・液状化対策構造（右図）

各土層の透水係数は現場透水試験から求めるのが望ましい。粒径から推定する場合には、表-1に示すCreagerの方法等があります。

表-1 Creagerによる透水係数¹⁾

D_{20} (mm)	k (cm/s)	土質	D_{20} (mm)	k (cm/s)	土質
0.005	3.00×10^{-6}	粗粒粘土	0.18	6.85×10^{-3}	細砂
0.01	1.05×10^{-5}	細粒シルト	0.20	8.90×10^{-3}	〃
0.02	4.00×10^{-5}	粗粒シルト	0.25	1.40×10^{-2}	〃
0.03	8.50×10^{-5}	〃	0.30	2.20×10^{-2}	中砂
0.04	1.75×10^{-4}	〃	0.35	3.20×10^{-2}	〃
0.05	2.80×10^{-4}	〃	0.40	4.50×10^{-2}	〃
0.06	4.60×10^{-4}	微細砂	0.45	5.80×10^{-2}	〃
0.07	6.50×10^{-4}	〃	0.50	7.50×10^{-2}	〃
0.08	9.00×10^{-4}	〃	0.60	1.10×10^{-1}	粗粒砂
0.09	1.40×10^{-3}	〃	0.70	1.60×10^{-1}	〃
0.10	1.75×10^{-3}	〃	0.80	2.15×10^{-1}	〃
0.12	2.6×10^{-3}	細砂	0.90	2.80×10^{-1}	〃
0.14	3.8×10^{-3}	〃	1.00	3.60×10^{-1}	〃
0.16	3.1×10^{-3}	〃	2.00	1.8	細礫

2.2 透水孔の配置

透水孔の配置は、透水対象とする土層部に設置します。

但し、護岸構造において護岸部に透水孔を設けると、背後の土砂が吸出される恐れがあるので、原則として設計河床面以下に透水孔を設置します。やむを得ず護岸部に透水孔を設置する場合は開孔部に吸出し防止シート等を取り付ける必要があります。また、透水孔の設置位置は将来の浚深さ、洗掘深さ、パイピングの発生等を考慮して決定する必要があります。

以下の検討においては、参考資料の実験結果より開孔部の配置が縮流影響の少ない全鋼矢板透水孔を配置するものとする。

2.2.1 開孔率

開孔率とは、(1)式に示すように鋼矢板壁の投影面積に対する開孔面積の比率で定義します。

$$\alpha = \frac{A_d}{A} \times 100 (\%) \quad (1)$$

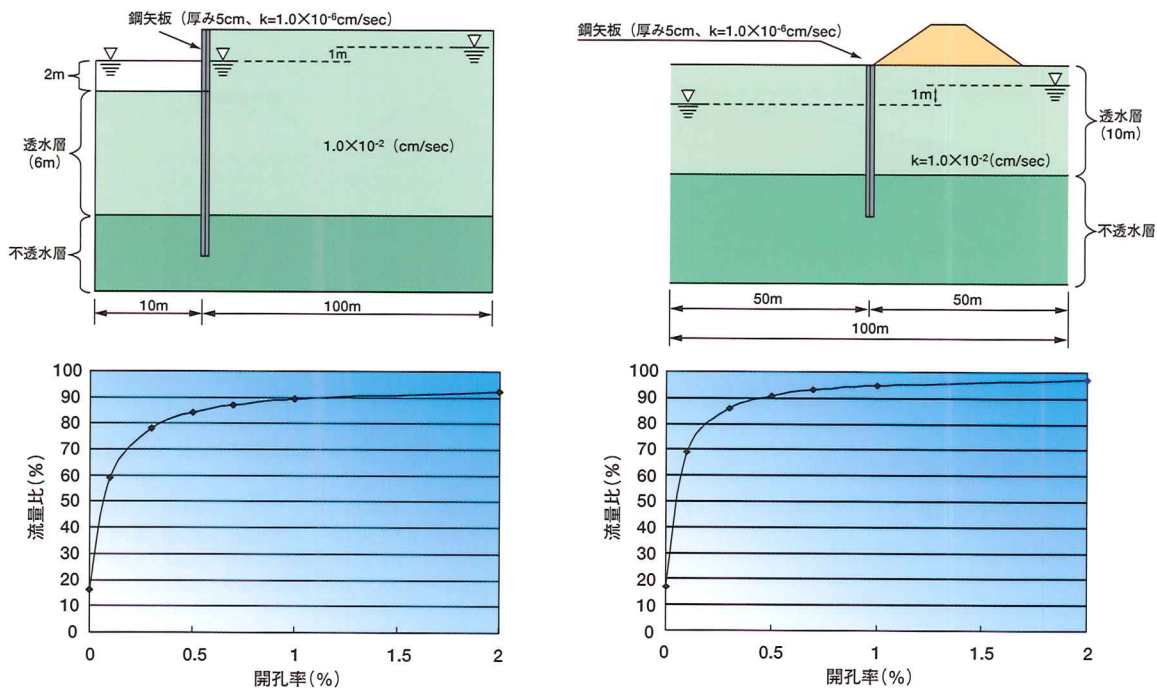
ここで、 A_d : 開孔面積 (mm²)

A : 対象とする透水層における鋼矢板壁の投影面積 (mm²)

¹⁾ 地盤工学会；地盤工学ハンドブック、平成11年3月

2.2.2 開孔率と流量の関係

地下水流において、開孔率による流量への影響を調べるために二次元浸透流解析を実施しました。図一2に解析モデルと解析結果を示します。これによると、開孔率が0.4%までは開孔率の増加に応じて流量比も急増しますが、0.5%を超えると流量比の増加割合は鈍化する傾向があります。開孔率が0.5%とすれば80%の流量を確保でき、さらに開孔率を1.0%にすると90%程度の流量が確保できるという結果が得られました。

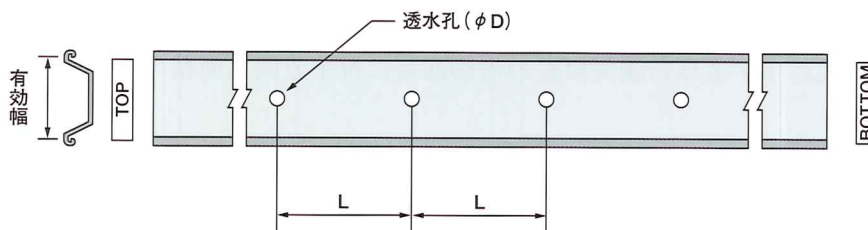


図一2 浸透流解析による解析モデル(上図)と解析結果(下図)

図一3に透水孔の配置例を示します。この場合、開孔率は孔径 D と長手方向の孔間隔 L により決まります。ここでは孔間隔 L を1mに固定し、鋼矢板壁の投影面積あたりの開孔率 α が0.5%以上となるように透水孔を配置した例を表一2に示します。

表一2 透水孔の配置例

有効幅(mm)	孔径 D (mm)	孔間隔 L (mm)	開孔率 α (%)
600	65	1000	0.55
500	60	1000	0.57



図一3 透水孔の配置

2.3 透水性鋼矢板の断面性能

透水性鋼矢板を用いて設計する場合、図-4に示すように断面欠損を考慮する必要があります。設計において断面係数および断面二次モーメントの低減を考慮する必要があります。

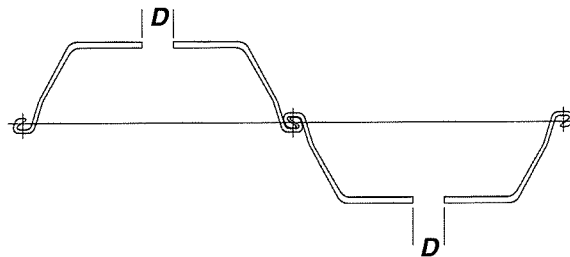


図-4 透水孔がある部分の断面

2.3.1 応力度の照査

最大曲げモーメントは必ずしも透水孔位置で生じるとは限りませんが、安全側となる断面欠損を考慮した断面係数を用いて(2)式により応力度照査をします。

$$\sigma = \frac{|M_{max}|}{Z'} \quad (2)$$

ここで、 σ : 応力度 (N/mm²)

M_{max} : 最大曲げモーメント (N・mm/m)

Z' : 欠損断面の断面係数 (mm³/m)

図-5は開孔ピッチを1mに固定し、透水孔を10mm～100mmまで変化させたときの断面係数の低減率を示します。このように、透水孔が大きくなるにつれて開孔率が大きくなるため、断面欠損も大きくなります。

欠損断面の断面係数は(3)式によって求めます。

$$Z' = Z - Z_D \quad (3)$$

ここで、 Z : 鋼矢板の断面係数 (mm³/m)

Z_D : 欠損断面係数 (mm³/m)

欠損断面係数は(4)式によって求めます。

$$Z_D = \frac{\frac{D \cdot t^3}{12} + D \cdot t \times \left(h - \frac{t}{2}\right)^2}{B \cdot h} \quad (4)$$

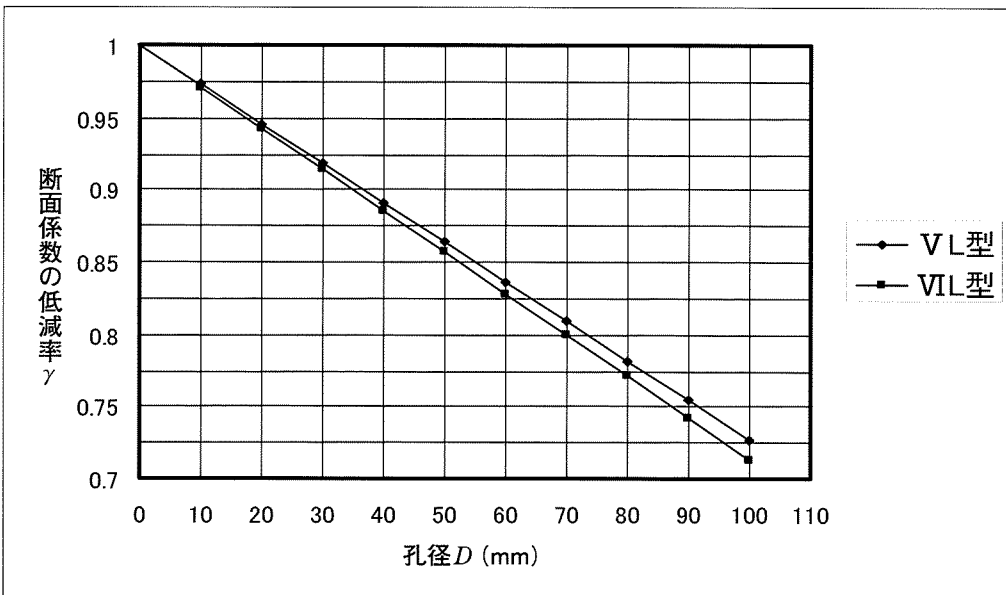
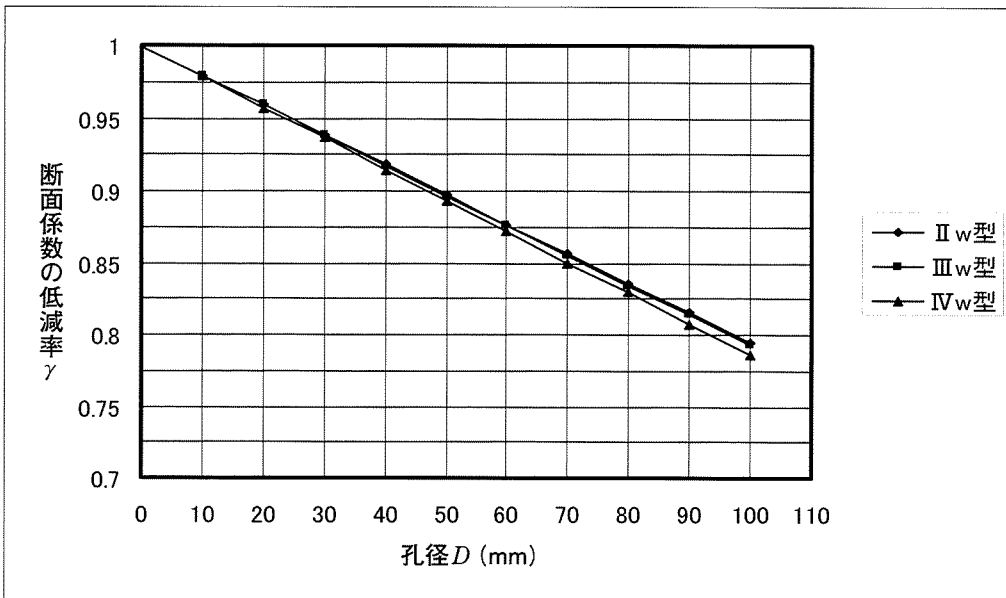
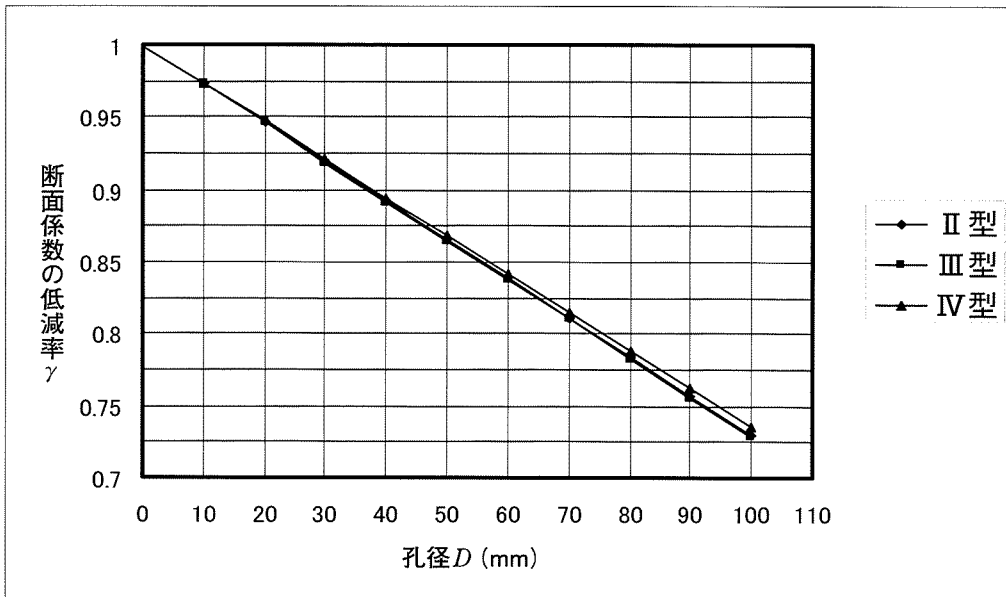
ここで、 D : 孔径 (mm)

t : 鋼矢板のウェブ厚さ (mm)

h : 鋼矢板の有効高さ (mm)

B : 鋼矢板の有効幅 (m)

I_D : 欠損断面二次モーメント (mm⁴/m)



図一五 孔径と断面係数の低減率の関係

2.3.2 変位の照査

変位を照査する場合に必要な断面二次モーメントは全体の曲げ剛性で考える必要があります。図-6に示すように孔のある区間は断面欠損を考慮する必要がありますが、標準断面区間は断面欠損を考慮する必要がありません。よって、孔のある区間は剛性低下を考慮し、標準断面区間は剛性を100%考え、それを比例配分して全体の曲げ剛性を算出します。

鋼矢板の断面欠損を全断面均一として考えて、(5)式で表します。

$$\tilde{I} = \frac{(I - I_D) \times D + I \times (L - D)}{L} \quad (5)$$

- ここで、 \tilde{I} : 平均化した断面二次モーメント (mm⁴/m)
- I : 標準断面区間の断面二次モーメント (mm⁴/m)
- I_D : 欠損断面二次モーメント (mm⁴/m)
- L : 孔の間隔 (mm)

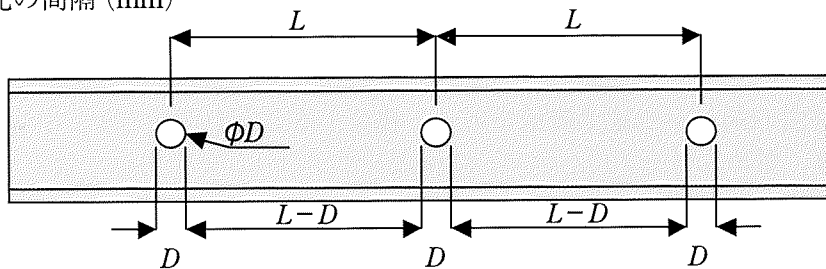


図-6 透水孔の配置

[変位照査方法の妥当性の確認]

(5)式のような考え方で変位照査を行うことの妥当性を確認するため、以下の計算を行いました。計算モデルは図-7に示す自立式鋼矢板構造の護岸で、設計基準は災害復旧工事の設計要領を用いました。鋼矢板はSP-Ⅲ_w型を用い、φ70の孔を1000mm間隔で設置しました。孔をあけた区間では鋼矢板の剛性は標準断面の85.5%に低下することになります。ここで、表-3に示す4ケースについて計算を行いました。表-3の結果より、透水性鋼矢板の剛性は(5)式により一様断面として取扱ってもよいことが確認されました。

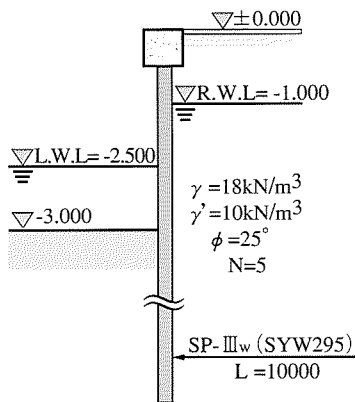


図-7 検討断面条件

表-3 検討結果

CASE	条件	頭部変位
CASE1	剛性の低下を考慮しない場合	47.9mm
CASE2	鋼矢板の剛性を一律に85.5%低下した場合	53.2mm
CASE3	孔のある区間とない区間で変断面計算した場合	48.3mm
CASE4	鋼矢板の剛性低下を一律に以下の式で計算した場合 $\tilde{I} = (0.855 \times 70 + 1.0 \times 930) / 1000 = 99.0(\%)$	48.4mm

2.3.3 透水性鋼矢板の設計

以上述べてきた透水性鋼矢板の設計計算方法をまとめると以下のようになります。

- 1) 決定された開孔径から開孔部の断面係数低下率を算定する。(図-5参照)
- 2) 開孔径、開孔ピッチより透水性鋼矢板の断面二次モーメントを(5)式で算定する。

$$\tilde{I} = \frac{(I - I_d) \times D + I \times (L - D)}{L}$$

- 3) 透水性鋼矢板の断面二次モーメントを用いて構造計算を行う。
- 4) 算定された変位を照査する。
- 5) 算定された最大曲げモーメントを用いて、(2)式で応力度を照査する。

$$\sigma = \frac{|M_{max}|}{Z'}$$

2.4 施工について

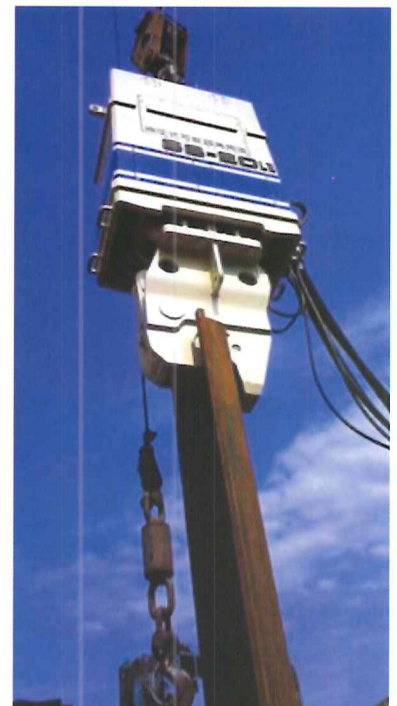
透水性鋼矢板は通常の鋼矢板の施工機械を用いて施工することが可能です。具体的には図-8に示すように油圧圧入機、電動式バイブロハンマ、油圧式バイブロハンマを用いて施工します。



油圧圧入機



電動式バイブロハンマ



油圧式バイブロハンマ

図-8 鋼矢板の代表的な施工方法

3. 透水性鋼矢板の検討例

3.1 設計計算の流れ

透水性鋼矢板の設計検討方法を図-9に示します。

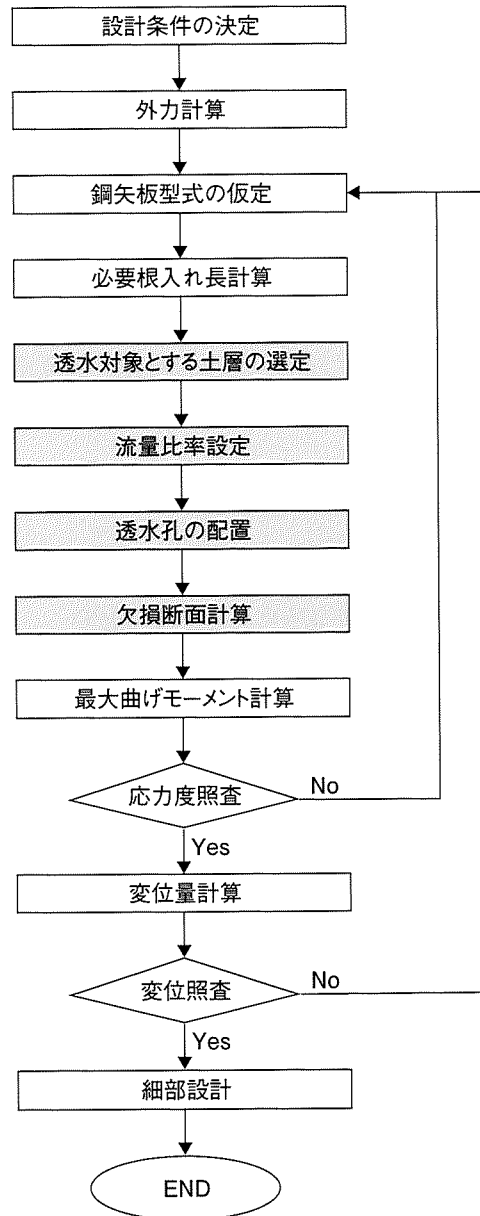


図-9 設計フロー

3.2 検討例

災害復旧工事の設計要領を用いて設計計算を行いました。

I. 設計条件

(1) 標高

天端高 ; C.H.= ±0.00m

設計河床 ; D.L.= -3.00m

残留水位 ; R.W.L. = -1.00m

低水位 ; L.W.L. = -2.00m

(2) 設計震度 ; $K_H = 0.10$ (空中)、 $K_H' = 0.20$ (水中)

(3) 上載荷重 ; $q = 10\text{kN/m}^2$ (常時)、 $q' = 5\text{kN/m}^2$ (地震時)

(4) 土質条件

① 背面土 (C.H. ~ D.L.)

内部摩擦角 ; $\phi = 30^\circ$

単位体積重量 ; $\gamma = 18\text{kN/m}^3$ (湿潤)、 $\gamma' = 10\text{kN/m}^3$ (水中)

② 河床地盤 (透水層 : -3.00m ~ -6.00m)

内部摩擦角 ; $\phi = 25^\circ$

単位体積重量 ; $\gamma' = 10\text{kN/m}^3$ (水中)

③ 河床地盤 (不透水層 : -6.00m 以深)

粘着力 ; $c = 30\text{kN/m}^2$

単位体積重量 ; $\gamma' = 9\text{kN/m}^3$ (水中)

(5) 水の単位体積重量 ; $\gamma_w = 9.8\text{kN/m}^3$

(6) 壁面摩擦角

砂質土地盤の壁面摩擦角は、以下の表のように与えられています。

	主働	受働
常時	+15°	-15°
地震時	+15°	0°

(7) 腐食代 ; 片面1mm、両面で2mm考慮するものとします。

(8) 継手効率 ; 応力計算をする場合、断面二次モーメント (I) に関する継手効率を 0.8 断面係数 (Z) に関する継手効率を 1.0

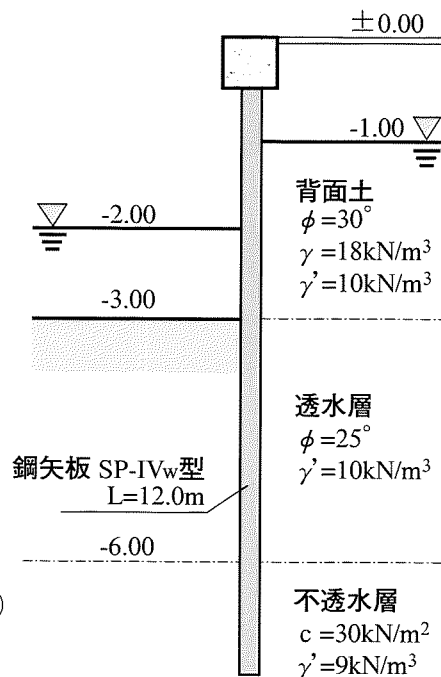
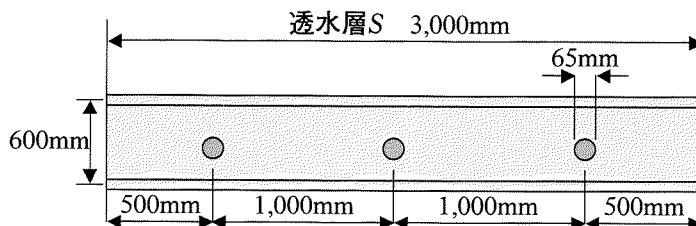
(9) 許容変位 ; 50mm (常時)、75mm (地震時)

II. 流量比率及び開孔率の設定

鋼矢板はSP-IV_w型を使用するものとします。図-2の浸透流解析の結果から、流量比率を80%以上確保するものとして透水層における開孔率 α を0.5%に設定します。検討例の透水層厚は3.00mであるので鋼矢板1枚に対し孔を1000mmピッチで3箇所設置するものとします。孔径 D は以下のように求まります。

$$\alpha = \frac{A_D}{A} \times 100 = \frac{3 \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot B \cdot S} \times 100 (\%)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot B \cdot S \cdot \alpha}{300 \cdot \pi}} = 61.8 (mm)$$



ここで、 A_D ：開孔面積 (mm²)

A ：対象とする透水層における鋼矢板壁の投影面積 (mm²)

D ：孔径 (mm)

B ：鋼矢板の有効幅 = 600 (mm)

S ：透水層厚 = 3,000 (mm)

よって、孔径は、 $D = 65\text{mm}$ とします。

Ⅲ. 透水性鋼矢板の断面性能

透水性鋼矢板は透水孔を設けているために断面性能の低減を考慮する必要があります。

(1) 断面係数の低減

まず (4) 式より欠損断面係数を算出します。

$$Z_D = \frac{\frac{D \cdot t^3}{12} + D \cdot t \times \left(h - \frac{t}{2}\right)^2}{B \cdot h} = 375,000 \text{ (mm}^3/\text{m)}$$

ここで、 t ：鋼矢板IV_w型のウェブ厚さ = 18.0 (mm)

h ：鋼矢板IV_w型の有効高さ = 210 (mm)

上記により算出された Z_D を(3)式に代入することにより断面欠損を考慮した断面係数を求めます。

$$Z' = Z - Z_D = 2,325,000 \text{ (mm}^3/\text{m)}$$

ここで、 Z ：鋼矢板の断面係数 = 2,700,000 (mm³/m)

よって、断面係数の低減率は、 $\gamma = \frac{Z'}{Z} = 0.861$ となります。

(2) 断面二次モーメントの低減

(5) 式によって平均化した断面二次モーメントを求めます。

$$\tilde{I} = \frac{(I - I_D) \times D + I(L - D)}{L} = 561,900,000 \text{ (mm}^4/\text{m)}$$

ここで、 I_D ：欠損断面二次モーメント (mm⁴/m)

L ：孔間隔 = 1,000 (mm)

よって、断面二次モーメントの低減率は、 $\gamma_I = \frac{\tilde{I}}{I} = 0.991$ となります。

以上をまとめると透水性鋼矢板の断面性能は、以下の表のようになります。

	継手効 率	断面積 (mm ² /m)	断面2次モーメント (mm ⁴ /m)	断面係数 (mm ³ /m)
腐食前		22550	561900000	2325000
腐食後		19250	494500000	2046000
根入れ計算時	1.00	—	561900000	—
断面力・変位計算時	0.80	—	395600000	—
応力度計算時	1.00	—	—	2046000

IV. 土圧強度及び残留水圧強度

土圧強度及び残留水圧強度は以下の表のようになります。また、仮想地盤面は主働土圧強度と残留水圧強度の和が受働土圧強度とつりあう深さとなります。

常時

層番号	標高 (m)	土層厚 (m)	主働土圧 強度 P _a (kN/m ²)	残留水圧 強度 P _w (kN/m ²)	主働側荷重 強度 (kN/m ²)	受働土圧 強度 (kN/m ²)
1	0.000	1.000	2.91		2.91	
	-1.000		8.15		8.15	
2	-1.000	1.000	8.15	0.00	8.15	
	-2.000		11.06	9.80	20.86	
3	-2.000	1.000	11.06	9.80	20.86	
	-3.000		13.98	9.80	23.78	
4	-3.000	3.000	16.84	9.80	26.64	0.00
	-6.000		27.36	9.80	37.16	111.70
5	-6.000	4.000	39.00	9.80	48.80	90.00
	-10.000		57.00	9.80	66.80	126.00

仮想地盤面 EL = -3.790m

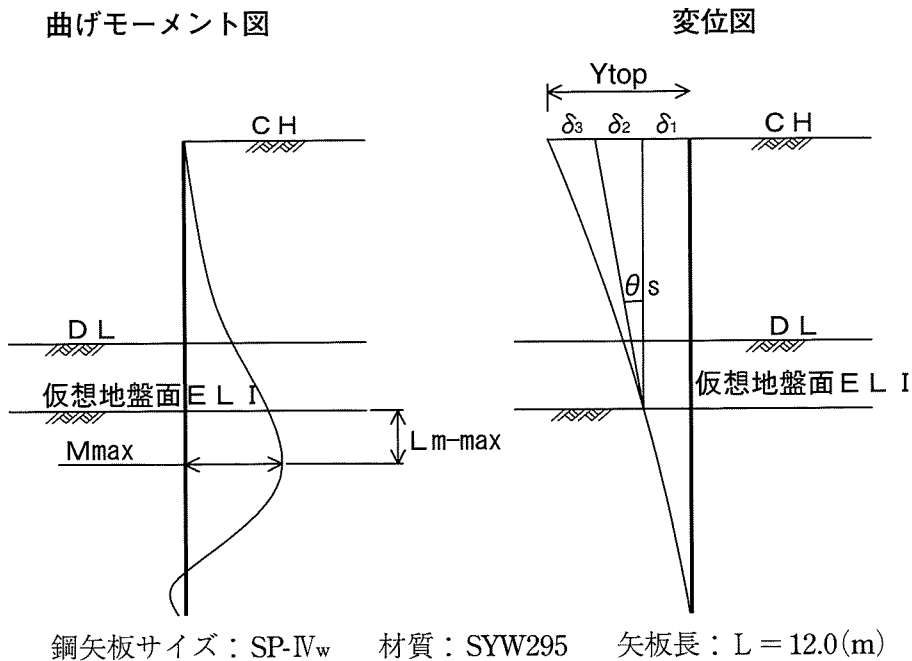
地震時

層番号	標高 (m)	土層厚 (m)	主働土圧 強度 P _a (kN/m ²)	P _a +P _{dw} (kN/m ²)	残留水圧 強度 P _w (kN/m ²)	主働側荷重 強度 (kN/m ²)	受働土圧 強度 (kN/m ²)
1	0.000	1.000	1.78	1.78		1.78	
	-1.000		8.17	8.17		8.17	
2	-1.000	1.000	8.17	8.17	0.00	8.17	
	-2.000		12.98	12.98	9.80	22.78	
3	-2.000	1.000	12.98	12.98	9.80	22.78	
	-3.000		18.78	18.78	9.80	28.58	
4	-3.000	3.000	22.37	22.37	9.80	32.17	0.00
	-6.000		37.98	37.98	9.80	47.78	63.58
5	-6.000	4.000	29.29	29.29	9.80	39.09	90.00
	-10.000		74.96	74.96	9.80	84.76	126.00

仮想地盤面 EL = -5.012m

V. 応力度・変位照査

Ⅲ. で計算した透水性鋼矢板の断面性能を用いて、応力・変位照査を行います。



応力度照査

	常時	地震時
Mmax (kN・m/m)	104.29	207.12
Lm-max (m)	0.860	0.688
断面係数 Z (mm ³)	2046000	2046000
$\sigma = M_{max} / Z$ (N/mm ²)	51.0	101.2
許容応力度 (N/mm ²)	180.0	270.0
判定	OK	OK

変位照査

	常時	地震時
護岸天端高 CH (m)	0.000	
設計地盤面 DL (m)	-3.000	
仮想地盤面標高 ELI (m)	-3.790	-5.012
θ_s (rad)	0.003975	0.007515
δ_1 (mm)	6.2	11.0
δ_2 (mm)	15.1	37.7
δ_3 (mm)	3.2	12.3
$Y_{top} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ (mm)	24.4	60.9
許容変位量 (mm)	50.0	75.0
判定	OK	OK

【参考資料】

1. 浸透流解析による透水性鋼矢板の通水性能の検討

透水性鋼矢板の通水性能を調べるために、有限要素法による2次元浸透流解析を実施しました。

1.1 検討条件

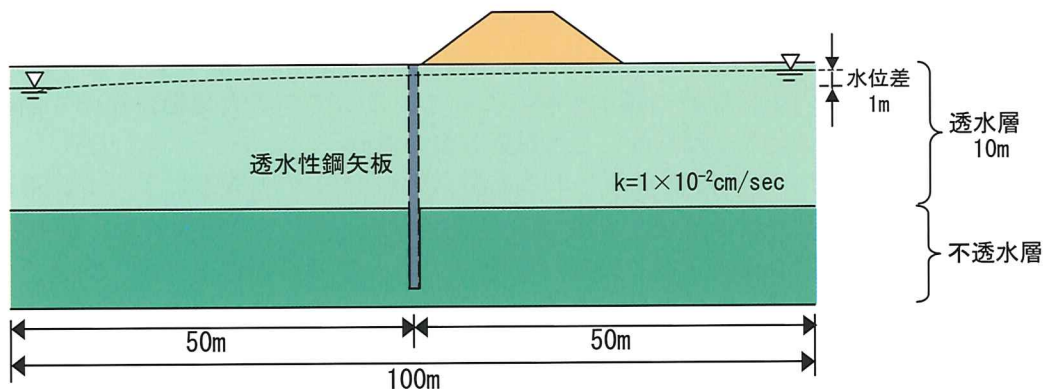
解析対象断面を図1.1に、解析ケースを表1.1に示します。図1.1(a)は深さ10m、長さ100mの透水層の中央に透水性鋼矢板が設置されたモデルで、左右端の水頭差が1.0mの条件、図1.1(b)は透水層の長さ、左右端での水頭差をそれぞれ図1.1(a)の半分の50m、0.5mとしたモデルです。透水層の透水係数は $k = 1.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ とし、その下部は不透水層としました。表1.1に示すとおり、解析対象断面、鋼矢板の型式(板厚 t)を組み合わせた10断面について、開孔率を種々変化させて定常条件での解析を実施しました。開孔率 α (%)は式(1.1)のように定義し、開孔部が鋼矢板の深さ方向に1mピッチで設置されているものとして、開孔部の大きさを変化させることにより開孔率の調整を行いました。開孔部には周辺と同じ土が充填される条件を仮定しています。なお、鋼矢板の透水係数(開孔率0%時の値)は、いずれの解析でも $k = 1.0 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ (厚さ10cm換算の値)としました。

$$\alpha = \frac{A_D}{A} \times 100(\%) \quad (1.1)$$

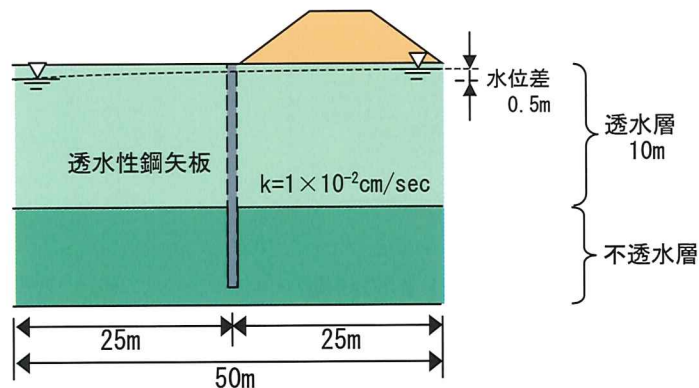
ここで、 A_D ：開孔面積の総和、 A ：鋼矢板の投影面積

表1.1 解析ケース

ケース	解析対象断面			鋼矢板の条件		
	断面種類	モデルの長さ(m)	両端の水頭差(m)	型式	板厚(mm)	開孔率(%)
1	図1.1(a)	100m	1.0	IIIw	13.4	100,10.0,5.0,2.0,1.0, 0.7,0.5,0.3,0.2,0.1
2				IVw	18.0	
3				VL	24.3	
4				—	50.0	
5				—	100.0	
6	図1.1(b)	50m	0.5	IIIw	13.4	100,10.0,5.0,2.0,1.0, 0.7,0.5,0.3,0.2,0.1
7				IVw	18.0	
8				VL	24.3	
9				—	50.0	
10				—	100.0	



(a) 解析対象範囲 100m



(b) 解析対象範囲 50m

図 1.1 解析断面

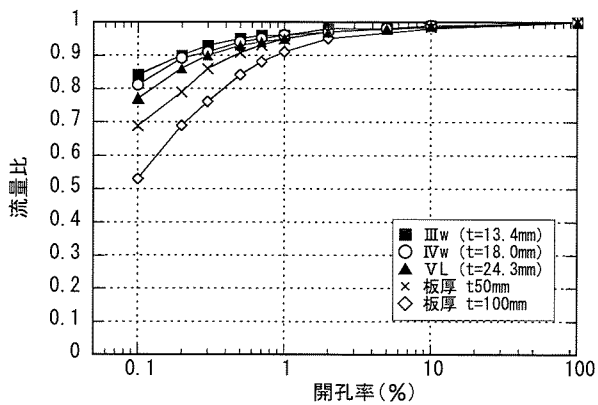
1.2 検討結果

透水性鋼矢板の存在が透水流量に及ぼす影響を、流量比と開孔率の関係で整理して図 1.2 に示します。流量比とは、鋼矢板がない場合の流量を 1.0 として、各条件下での流量を比で表した値です。また、鋼矢板前背面で生じる水位差に着目し、これと開孔率の関係を整理して図 1.3 に示します。これらの図から、以下のことがわかります。

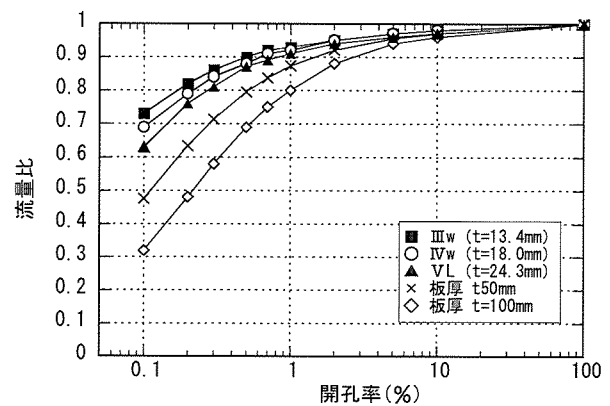
- (1) 図 1.2 の流量比で見ると、開孔率が 0.1% ~ 1% の範囲では開孔率の増加に応じて流量比も増大しますが、1.0% を超えると流量比の増加割合は鈍化する傾向があります。
- (2) 解析対象断面や鋼矢板の種類により結果に違いが見られますが、今回の解析条件では、およそ 0.1% ~ 1.0% 程度の開孔率で鋼矢板がない場合の 80 ~ 90% 程度の流量が確保されているのがわかります。
- (3) 図 1.3 の鋼矢板前背面の水位差で見ても、図 1.2 の流量比の場合と同様の傾向が見られ、いずれの解析断面でも開孔率が 1.0% 程度では水位差が数 cm と非常に小さく、0.1% 程度で 10 ~ 20cm 程度という結果になっています。
- (4) 図 1.2、図 1.3 のいずれにおいても鋼矢板の型式 (板厚) によって結果が変化し、板厚が大きくなるほど流量が小さく、水位差が大きくなる傾向が見られます。これは、後に示す室内透水実験およ

びそのシミュレーションでも確認された傾向です。

- (5) また、図1.2の流量比と開孔率の関係は解析断面（モデルの長さ＝浸透距離）によっても異なり、モデルの長さが短いほど開孔率の低下による流量比の低下が大きくなっています。このことは、後に示すモデル長の小さな室内透水実験において、ここでの実大規模に比べて開孔率の低下に対する流量比の低下が大きく現れることと対応しています。
- (6) 上記(5)に示したように、解析対象とする範囲（浸透距離）の大きさによって結果が変化していることから、局所的な流れや現象が急激な非定常流れを対象とする場合には、図1.2や図1.3に比べて透水性鋼矢板の開孔率が流量に及ぼす影響が大きくなる可能性があり、別途、条件に応じた検討が必要であると考えられます。

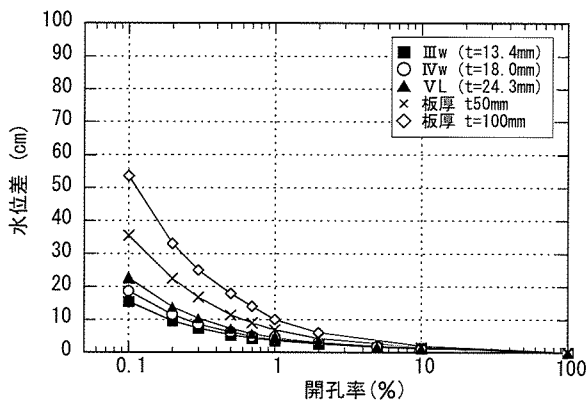


(a) モデル長さ 100m (図1.1(a)の断面)

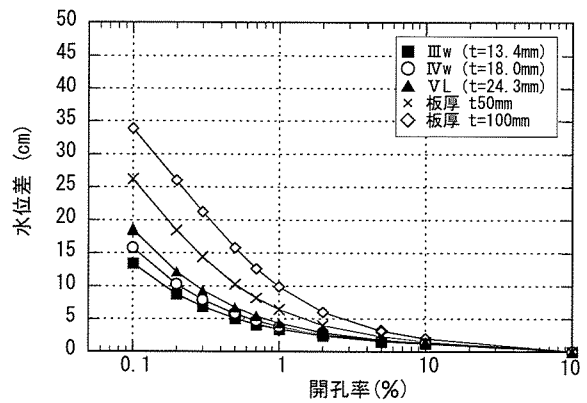


(b) モデル長さ 50m (図1.1(b)の断面)

図1.2 開孔率と流量比の関係



(a) モデル長さ 100m (図1.1(a)の断面)



(b) モデル長さ 50m (図1.1(b)の断面)

図1.3 開孔率と鋼矢板前背面の水位差の関係

2. 室内透水試験による透水性鋼矢板の通水性状に関する基礎検討

2.1 実験目的

透水性鋼矢板のような開孔部を有する壁体を通過する間隙水の流れにおいては、開孔面積（開孔率）が小さいと流れに対する抵抗が大きくなり、また、同じ開孔率でも開孔部の配置が離散的であるほど流れに対する抵抗が大きくなると考えられます。そこで、開孔率と開孔部の配置に加え、鋼矢板の板厚も各種変化させ、透水性鋼矢板の通水性状について実験的な検討を行いました。

2.2 実験概要

実験装置と主な計測位置を図2.1に、実験ケースを表2.1に示します。図2.1の試験装置は、長さ2800×奥行き695×高さ900mmの土槽内に作成した長さ2400×高さ560mmの水平地盤の左右端に約160mmの水頭差を与えたものであり、その中央付近に透水性鋼矢板模型（以下、開孔板と称します）を鉛直に建て込んだ装置です。左右両端面にはステンレスメッシュを貼付した樹脂性格子材を用い、全面を透水境界としています。地盤は7号ケイ砂 ($U_c = 1.59$ 、 $D_{50} = 0.18\text{mm}$)を用い、相対密度が約90%になるように締め固めて作成しており、その透水係数は約 $1.3 \times 10^2 \text{cm/sec}$ （水温15℃換算）です。以上の試験装置を用いて、表2.1に示すとおり、開孔板の種類を変化させて、4シリーズ、計21ケースの試験を実施しました。各試験シリーズの概要は以下のとおりです。

- (1) シリーズ1は、図2.2(a)のタイプAの開孔板（板厚3mm）で開孔率を変化させたシリーズで、開孔率の調整は孔の配置を固定して孔径を変化させることによって行っています。
- (2) シリーズ2は、図2.2(b)のタイプBの開孔板（板厚3mm）で開孔率とスリットピッチを変化させたシリーズで、所定の開孔率になるようにスリット幅を設定し、ピッチは土槽側壁の非排水境界での対称性を考慮して図2.2(b)の配置をピッチ35cm、中央に1スリットの配置をピッチ70cmとしています。
- (3) シリーズ3は、シリーズ1同様にタイプAの開孔板を用いていますが、板厚が11.5mmあるいは23mmとシリーズ1よりも大きくなっています。
- (4) シリーズ4は、図2.2(c)に示すタイプC（690×550mmの面中央に1孔）で、板厚が11.5mmあるいは23mmの開孔板を用いています。

いずれの実験においても、水頭差を与えた後に流れが定常的になるのを待って、地盤内の水頭分布と土槽から排出される流量を計測しました。

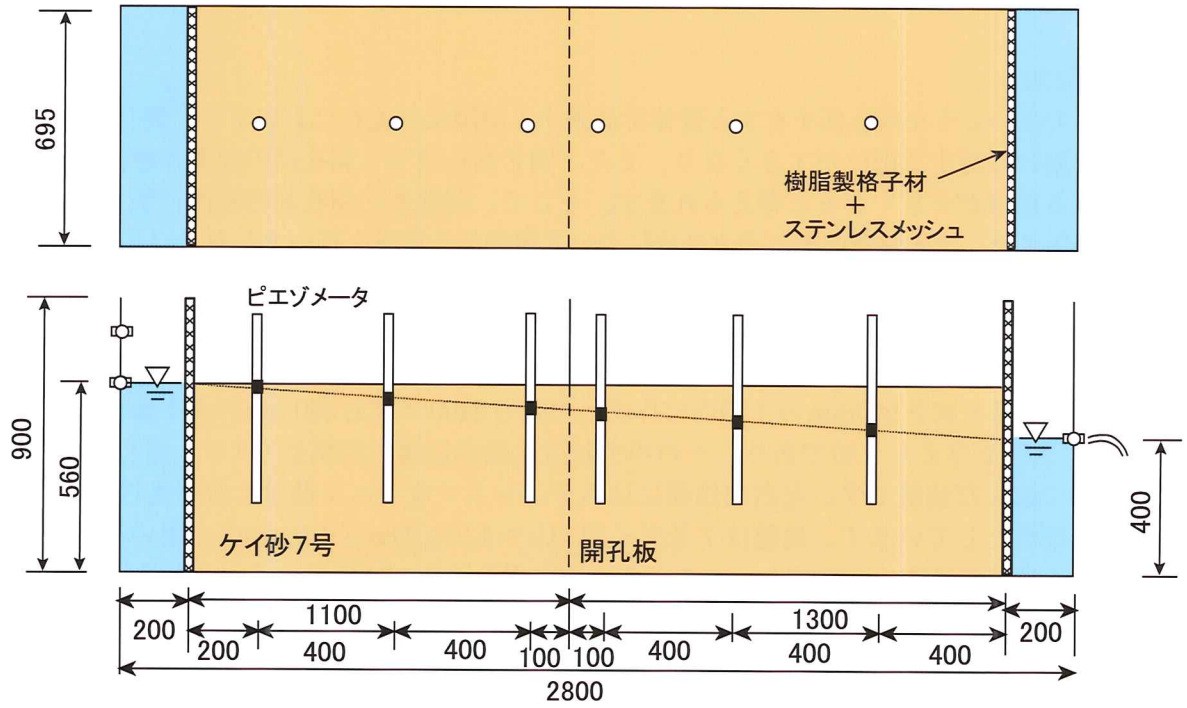


図2.1 実験装置と主な計測位置

表2.1 実験ケース

シリーズ	No.	開孔板の条件				備考
		開孔率 (%)	タイプ	板厚 (mm)	スリットピッチ (cm)	
1	1-0	100	—	—	/	開孔板なし
	1-1	9.9	A	3		
	1-2	5.0				
	1-3	0.95				
	1-4	0.50				
2	2-1	5.0	B	3	35	
	2-2	5.0			70	
	2-3	1.1			35	
	2-4	1.0			70	
	2-5	0.48			35	
	2-6	0.68			70	
	3	3-0			100	—
3-1		5.0	A	11.5		
3-2		0.93				
3-3		0.48				
3-4		4.9				
3-5		0.92	23			
3-6		0.48				
4	4-0	100	—	—	/	開孔板なし
	4-1	0.64	C	11.5		
	4-2	0.63		23		

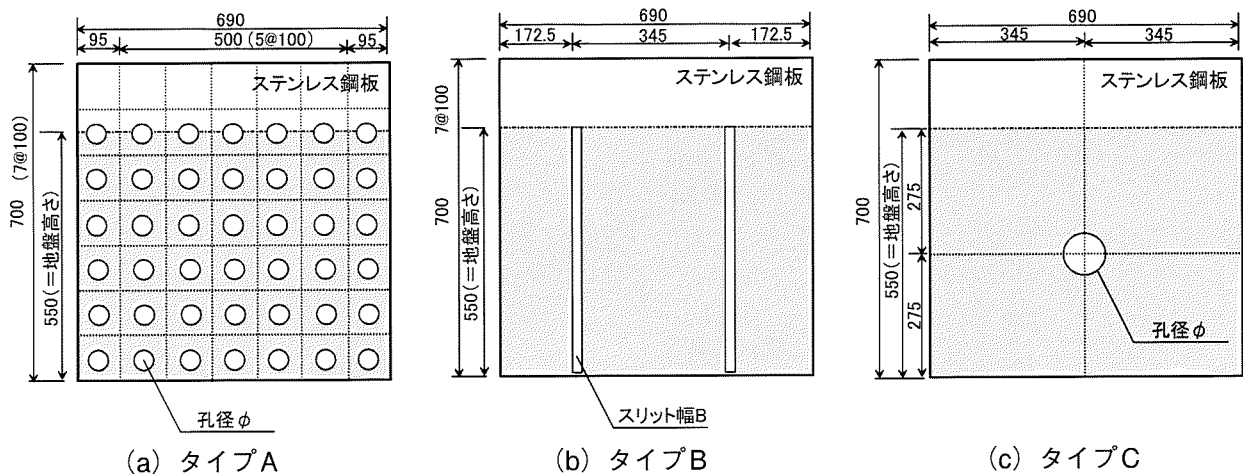


図2.2 試験に用いた開孔板

2.3 実験結果

実験シリーズ1において計測された開孔板の開孔率による地盤内の水頭分布の変化を図2.3に、また実験シリーズ1～4における開孔率による透水流量の変化を図2.4に示します。図2.4の縦軸は各ケースの計測流量を地盤のみのケースの流量で除した流量比で表示しています。これらの結果から、次のことが確認された。

- (1) 開孔板の前背面で水頭差が生じており、間隙水の流れに対する抵抗が生じている。開孔率が小さいほど水頭差が大きく、流れに対する抵抗が大きい。
- (2) また、開孔率の低下にともない流量も小さくなり、このことから開孔率の低下にともなって流れに対する抵抗が大きくなる傾向が認められます。
- (3) 図2.4のシリーズ1と2の比較、および、シリーズ3と4の比較から、同じ開孔率でも開孔部の配置が粗であるほど流れに対する抵抗が大きい。
- (4) シリーズ1と3の比較から開孔板の板厚が結果に影響を及ぼし、板厚の大きい方が流れに対する抵抗が大きい。これは、開孔板部で間隙水の流れに縮流が生じ、板厚が大きくなると縮流区間が長くなるためと考えられます。

以上のように、開孔板の通水性は開孔率に応じて変化しますが、その他に開孔部の配置や板厚の影響も受けている。

なお、図2.4に示した開孔率と流量比の関係は、開孔部の配置や板厚だけでなく、実験時の開孔板前後の地盤の長さ(全浸透距離)によって変化します。図2.4の関係は図2.1の実験条件に対する結果であり、条件が異なるとこの関係も異なったものとなります。一般に、全体の浸透距離が小さい室内試験では、開孔率の減少に伴う流量比の低下が顕著に出る傾向があり、このことは、先の1.の実大規模での浸透流解析結果の図1.2(a)と(b)の比較、あるいは、これらと図2.4を比較することにより確認できます。

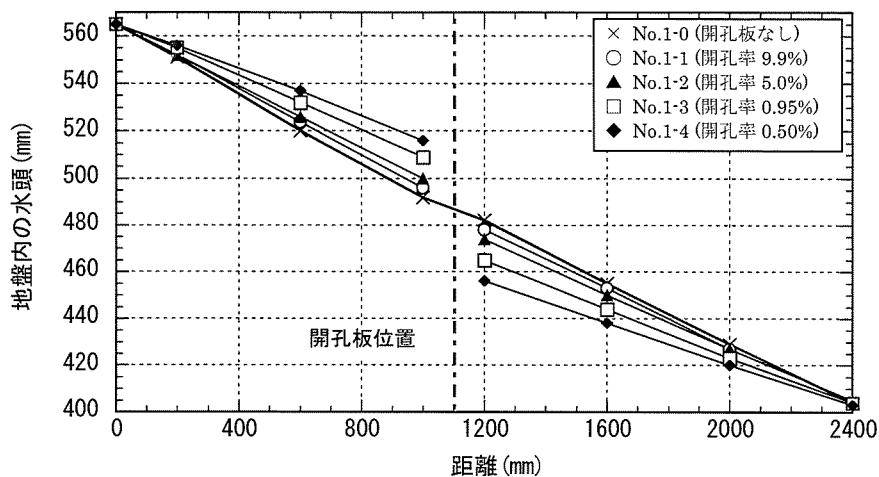


図2.3 地盤内の水頭分布 (実験シリーズ1)

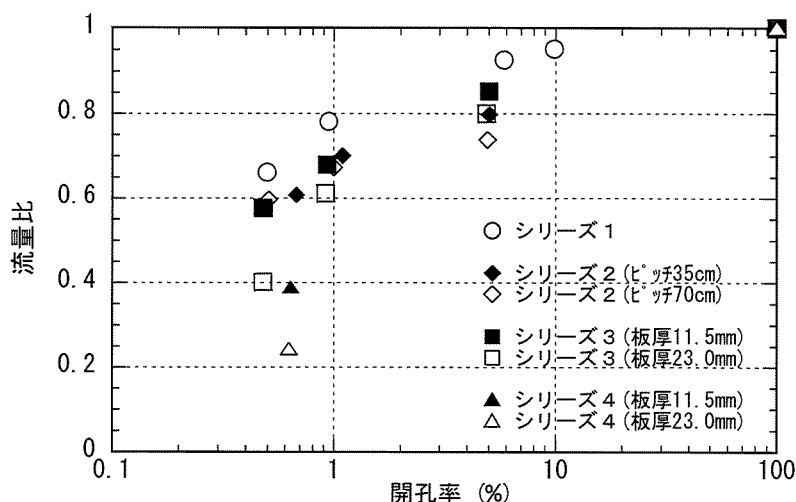


図2.4 開孔率と流量比の関係

2.4 通水性の評価方法に関する考察

まず単純に開孔板を同じ厚さの地盤とみなし、模型地盤全体を多層系地盤と見立ててダルシー則を適用して、計測流量が合致するように各ケースの開孔板の透水係数 k_t (開孔板の板厚と同厚の地盤と扱った場合の透水係数)を逆算しました。次に、この開孔板の透水係数 k_t と砂の透水係数 k_s の比をとり、この透水係数比 (k_t/k_s) と開孔率の関係を調べると図2.5のようになります。なお、図中の直線は、開孔率が α (%) のとき、地盤と開孔板の透水係数比も α (%) = $\alpha/100$ であることを示し、開孔板部での流れの抵抗 (水頭損失) が孔部通過時の縮流で説明できる場合の関係を示しています。すなわち、孔部に周辺と同じ砂が詰まっていれば、断面積が α (%) に縮小するため、孔部通過時の流速が $100/\alpha$ 倍になって、この区間の動水勾配 (水頭損失) も $100/\alpha$ 倍になります。このことを断面積が不変として、見かけ上、透水係数を周辺の砂の $\alpha/100$ に低減することにより表現したときの関係です。図2.5から、次のことがわかります。

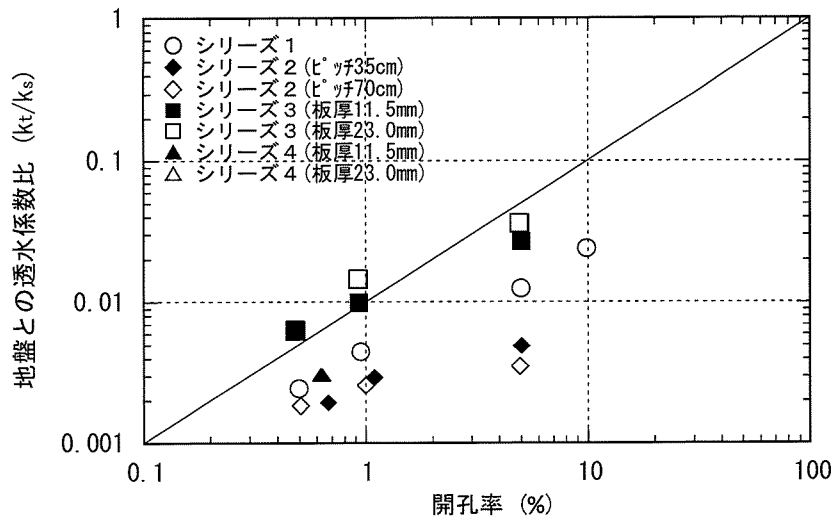


図2.5 開孔率と透水係数比の関係

- (1) 地盤と開孔板の透水係数比 (k_t/k_s) と開孔率の間には、実験条件ごとに相関関係が見られます。ただし、その関係は開孔率だけでなく、開孔板の板厚や開孔部の配置の影響も受けています。すなわち、同じ開孔部配置でも板厚の異なるシリーズ1とシリーズ3では関係が異なり、板厚の大きいシリーズ3は図中の直線近傍にプロットされているのに対し、板厚の小さいシリーズ1の結果は直線よりも下方にプロットされています。また、同じ開孔板板厚でも開孔部が密配置のシリーズ1と疎な配置のシリーズ2では関係が異なり、シリーズ2の方が同じ開孔率でも透水係数比が小さく、図中の直線から離れる傾向があります。
- (2) 開孔部を通過する時の縮流は開孔板近傍の地盤も含めて生じることから、実験データは開孔板自身での縮流のみを考慮した図2.5の直線よりも下方にプロットされる傾向にあり、その下方への移動量が開孔板の板厚や開孔部の配置などによって変化するものと考えられます。すなわち、開孔率・開孔部配置が同じであれば板厚が大きくなるほど開孔板自身を通過する時の水頭損失が支配的になって図2.5中の直線に近い結果を示すと考えられ、また、開孔部の配置が疎になるほど、開孔板近傍地盤での影響範囲が拡大し、図2.5中の直線よりも透水係数比が下方にプロットされる傾向が強くなると考えられます。
- (3) 任意の条件の開孔板に対する透水係数比 (k_t/k_s) が予測できれば、透水性鋼矢板の通水性を透水係数 k_t で表現することが可能になり、間隙水の流れに及ぼす影響評価が容易になると考えられます。透水係数比 (k_t/k_s) は開孔率と相関があり、その関係は図2.5中の直線をベースに板厚や開孔部配置に応じて下方へ移動すると考えられますが、現状では任意の開孔板に対して透水係数比 (k_t/k_s) を定量的に特定する手法は確立されていません。ただし、今回の実験シリーズ4では板厚 ($t = 11.5, 23.0$)、開孔部配置 (1孔の受け持ち面積が幅 $690 \times$ 高 550mm) を鋼矢板 $\Pi_w \sim V_L$ 型 (板厚 $t = 10.3 \sim 24.3\text{mm}$ 、鋼矢板幅 600mm) と比較的近い条件に設定しており、この実験結果が透水性鋼矢板の透水係数比 (k_t/k_s) の一つの目安を与えるのではないかと推測されます。

(4) そこで、開孔率が実験シリーズ4と同じ0.64%のⅢw型 ($t=13.4\text{mm}$)の透水性鋼矢板を考え、その透水係数比が図2.5より $k_t/k_s = 0.002$ ($k_t = 0.002 \cdot k_s$) であると仮定して、図1.1の解析断面に対する実大の解析を実施してみました。ここでの解析では開孔部はモデル化せず、透水性鋼矢板を厚さ $t=13.4\text{mm}$ 、透水係数 k_t の一様な壁体として扱っています。解析結果を開孔部をモデル化した場合の解析結果である図1.2の上にプロットした図を図2.6に示しています。これらの図から、開孔部をモデル化した解析結果に比べて透水性鋼矢板の抵抗をやや大きめに評価している傾向がありますが、上記の k_t 値による簡易な計算でも流量や鋼矢板前背面の水位差を概ね評価できていることがわかります。

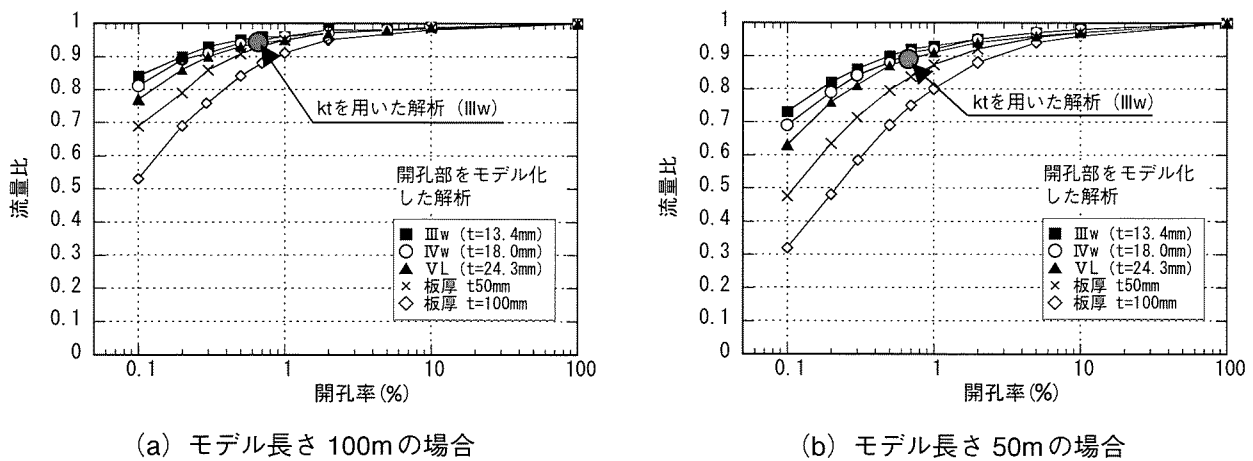


図2.6 開孔率と流量比の関係

2.5 二次元浸透流解析による透水実験のシミュレーション

上記の実験結果に基づく考察内容の検証と、前記1.で示した実大規模での浸透流解析を実施するにあたっての解析手法の妥当性確認を目的に室内透水試験のシミュレーションを実施しました。

(1) 解析内容

表2.1の実験のうち、シリーズ1と3を対象に二次元の定常浸透流解析を実施しました。解析は図2.1の鉛直断面を解析断面とし、奥行き方向に離散的な孔部は中心位置が実験と同じで奥行き方向に連続な水平のスリットに置換し、開孔率が等しくなるようにスリット幅を調整しています。地盤の透水係数は $1.3 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ としました。また、不飽和領域の浸透特性は Van Genuchten の式に従うと仮定し、そのパラメータ値には間隙率が7号ケイ砂とほぼ同等な細砂に対する代表的な値を与えました。

(2) 解析結果

解析結果を実験結果と合せて図2.7、図2.8に示しています。図2.7は開孔率と流量比の関係を、図2.8は開孔率と透水係数比 (k_t/k_s) の関係を示しています。解析においても実験結果と定性的に同様な結果が得られていることがわかります。開孔板近傍の流れを2次元モデルで近似していることなどから、定量的には若干の差が見られますが、解析により実験を概ね再現できていると考えられます。以上のことから、解析においても、先の2.3、2.4で述べた実験結果の定性的な考察内容が確認され、また、一般的な二次元の定常浸透流解析によって開孔板の存在が間隙水の流れに及ぼす影響をある程度の精度でシミュレーションできることがわかりました。

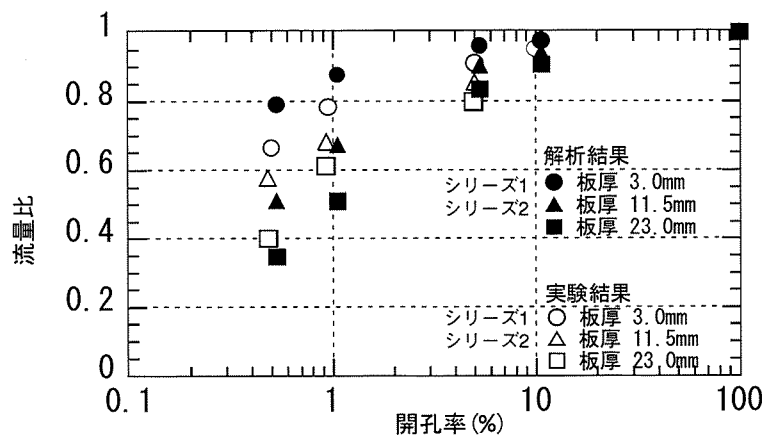


図2.7 開孔率と流量比の関係

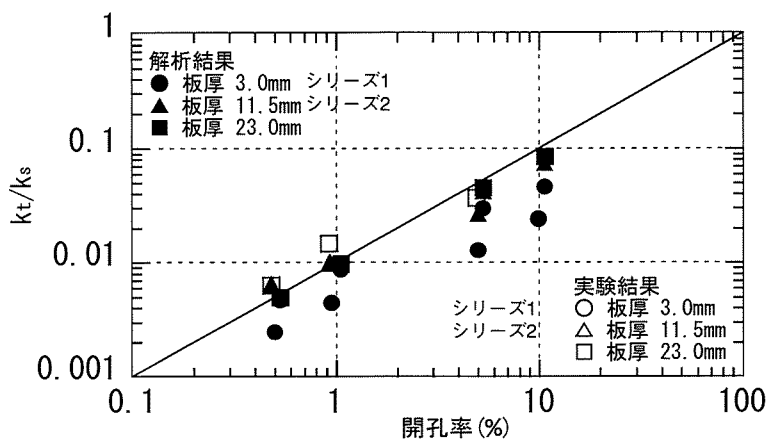


図2.8 開孔率と透水係数比の関係

3. まとめ

透水性鋼矢板の通水性状を把握することを目的に、浸透流解析および室内透水試験による検討を行い、以下の結果が得られました。

- (1) 実大規模での解析により、透水性鋼矢板の通水性状は解析断面や鋼矢板の板厚・開孔部配置などにより変化するものの、定常条件下では0.1%～1%程度の開孔率で鋼矢板がない場合の80～90%程度の流量が確保され、鋼矢板前背面の水位差も数cm～20cm程度の比較的小さい値になるという結果が得られました。
- (2) 室内試験および解析結果から、開孔率が低下するほど、また同じ開孔率でも開孔部の配置が疎なほど、さらには開孔率・開孔部配置が同じでも鋼矢板の板厚が大きいほど、流れに対する抵抗が大きくなることが確認されました。
- (3) また、解析や実験で対象とするモデル（浸透距離の大きさ）によって、同じ開孔率・開孔部配置の透水性鋼矢板でも流量に及ぼす影響が変化することが確認されました。一般に浸透距離が小さい室内実験では開孔率の低下による流量の低下が顕著に現れる傾向があり、また実大規模でも局所的な流れや非定常流などで結果に影響を及ぼす領域が限定的な条件では、開孔率の変化に対する流量の変化が敏感になる可能性があり、条件に応じた検討が必要と考えられます。
- (4) 透水性鋼矢板の透水係数を k_t とすると、これと周辺地盤の透水係数 k_s の比(k_t/k_s)と開孔率との間により相関があり、透水性鋼矢板の通水性をこの透水係数比(k_t/k_s)によって表現できる可能性が確認されました。

透水性鋼矢板 技術資料

平成16年 9月 1日 初 版

発 行 鋼管杭協会 鋼矢板技術委員会

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10
鉄鋼会館6階
TEL: 03-3669-2437
FAX: 03-3669-1685
