

4. 庄川の伏没機構について

4.1 飽和・不飽和モデルの構築

(1) モデルの概要

解析モデルは岡山大学西垣誠教授グループが開発した2次元飽和・不飽和浸透流解析プログラム UNSAF2D(UNsaturated-Saturated Analysis program by Finite element method)を用いる。この解析プログラムは1970年代後半に開発されたものだが、その後土質学会、地下水学会、農業土木学会、地盤工学学会などを通じて配布され、広く使われている。

飽和・不飽和浸透流を表す支配方程式は以下の通りである。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_r \left(K_{xx}^s \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{xy}^s \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{xz}^s \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_r \left(K_{yx}^s \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{yy}^s \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{yz}^s \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_r \left(K_{zx}^s \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_{zy}^s \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_{zz}^s \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \right) - q = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、xyz は直交座標、 ψ は圧力水頭、 K^s は飽和透水係数(地盤依存)、 K_r は相対透水係数(飽和度依存)、 q は単位体積当たりのシンク/ソース流量、 $c(\phi)$ は比水分容量 $d\theta/d\phi \equiv c(\phi)$ 、 S_s 比貯留係数、 t は時間である。 $\beta=0$ のとき不飽和領域； $\beta=1$ のとき飽和領域。

(2) 対象断面

解析の対象とする断面は河道内の井戸を設置した地点を前提として、地形データおよび周辺地下水データが比較的豊富である地点として下記の3断面を選定した。

- 雄神橋付近 (KP23.3)
- 太田橋付近 (KP20.0)
- 高速道路橋 (庄川橋) 付近 (KP16.6)

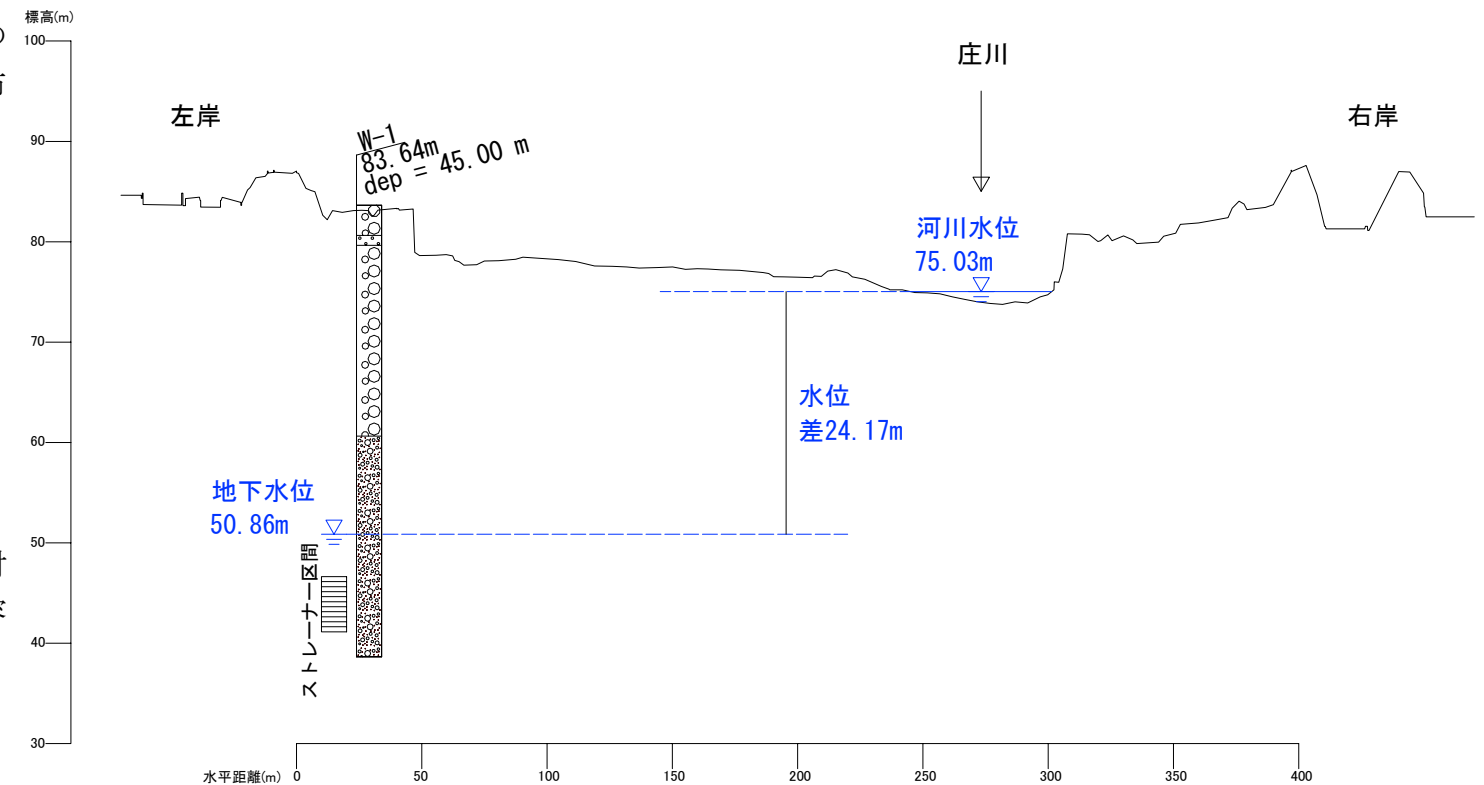


図 4.1-1 W-1 地点(雄神橋下流地点, K. P. 23.2)

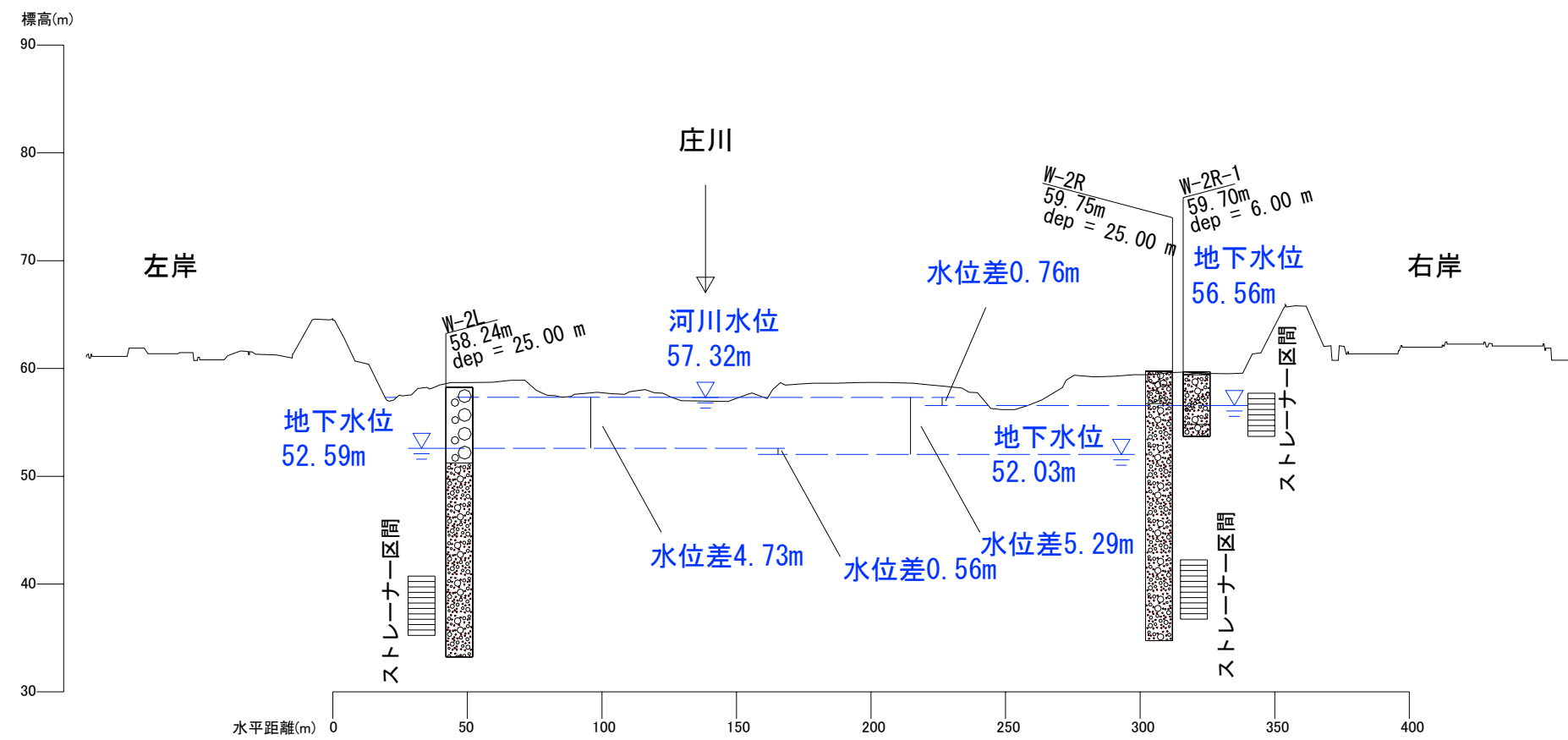


图 4.1-2 W-2 地点(太田橋上流地点, K. P. 20.0)

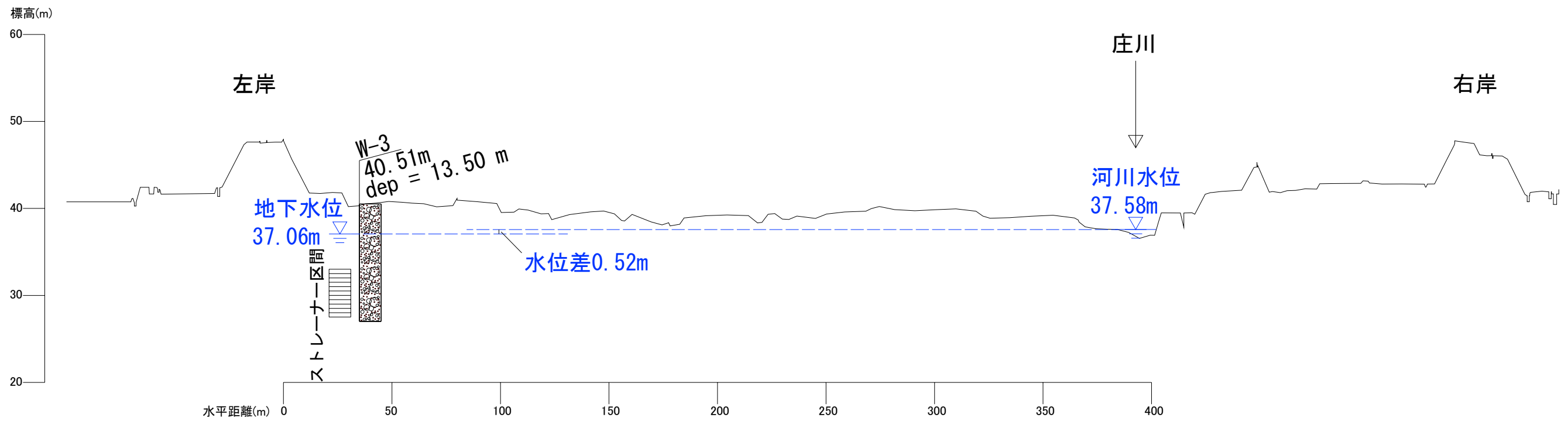


图 4.1-3 W-3 地点(高速道路橋下流地点, K. P. 16.6)

4.2 飽和・不飽和浸透モデルの検証

(1) モデルの作成方針

選定した格段面について下記の諸元を整理してそれぞれの解析モデルを下記の方針に従って作成した（図 4.2-1）。また、モデルは堤外地に設置した観測井の水位を対象として精度検証した。以下に各断面について詳述した。

- 横断地形
- 堤内地の地下水位（この水位で左右岸とも水圧（水位）固定境界を設定する）
- 不圧帯水層の底面を No Flow 境界として設定する。
- 初期地下水位（差右岸に設定した水圧固定の水位を内挿して設定する）
- 河川水位を実測値を用いて水位固定境界として設定する。
- 地質構造および各層の飽和透水係数はモデルパラメータとして同定対象とする。

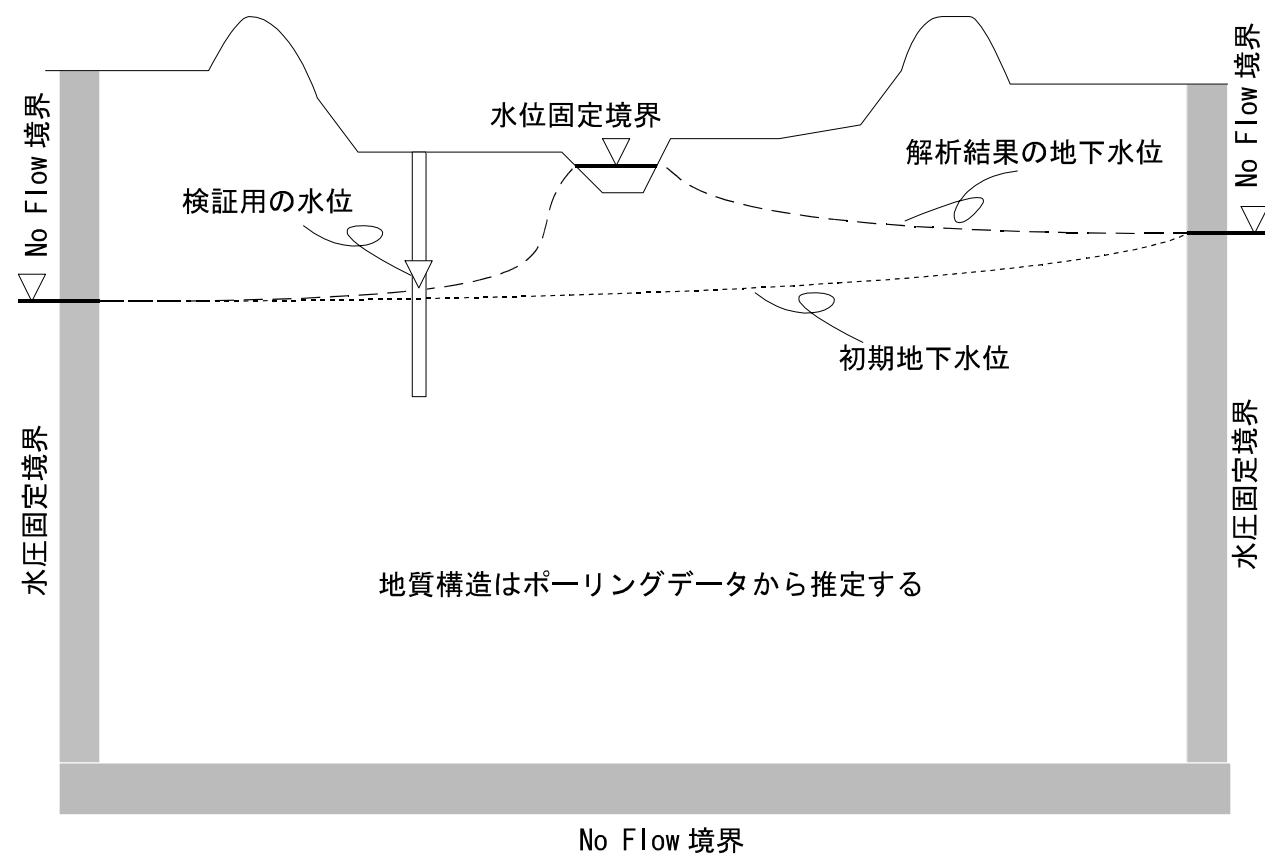


図 4.2-1 解析モデルの設定イメージ

(2) 雄神橋付近

イ) モデルの作成

当該断面は庄川本川の扇頂部に当たる。堤外地に設置した観測井 (W-1) の観測結果から、地下水深度は深く、河川水位よりも約 24m 下回っている。一方、一斉則水結果から当該断面付近の地下水位を求めると 72m 前後であり、堤外地の水位観測と大きく異なり河川水位に近い。このような事実から、TP+50m と TP+70m の間に難透水層があり、地下水位を 2 分していることが想定され、また、W-1 地点のボーリング柱状図からもこの間に層序の変化が認められる。そこで、TP+60m の深度に厚さ 2m の難透水層を設置することとした。また、堤防及びその基礎部分はその周辺よりも透水係数を小さく設定した。

表 4.2-1 検証材料 (KP23.2 断面モデル)

検証材料	値	備考
W-1 水位	TP+50.86m 2002 年 10 月 測定値	W-1 は堤外地にあり、その水位は河川水位よりも遙かに低い。ストレナ深度は約 TP+43m である。 2002 年 10 月頃の当該観測井の水位はほぼ安定しており、その後、降雨などにより水位の上昇がある。

表 4.2-2 解析モデルの設定内容 (KP23.2 断面モデル)

設定項目	設定内容	備考
周辺地下水位	左岸 (浅層) : TP+72.47m 右岸 (浅層) : TP+71.69m 左岸 (深層) : TP+50.86m 右岸 (深層) : TP+50.86m	浅層については、一斉則水の観測井水位を適用した。当該地点近傍の観測井は、左岸に #32 (TP+72.47m)、右岸に #36 (TP+71.69m) がある。深層については、W-1 以外に参照すべきデータが無いので、その値を設定した。
河川水位	TP+75.03m	2002 年 10 月の測定値であり、検証対象とした堤外地の観測井 W-1 の水位と同時期に測られたものである。
モデル底面	標高 : TP+20m 不透水面とした。	当該地点の水理地質構造は、広域地下水モデルでは地表面から約 TP+72m までは第二層 (Ag1 層、沖積礫質土層) が分布しており、その下部 TP+40m 付近まで第五層 (Dg2 層、洪積礫質土層) が層序している。 このモデルでは底面を不透水層として設定するために、その影響が河川からの涵養量に影響を及ぼさないように、余裕をみて設定した。
FEM メッシュ		河床および地表部分は細くなるように設定した。地表では厚さ 0.2m とし、深度に従って徐々に厚くなる用に設定した。
河床堆積物 (河床材料)	$K_0=5.0 \times 10^0 \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。 TP+60m 以上の部分とした。	水分保持特性、水分伝達特性は文献 ¹ から礫質、砂質土の一般的な値を設定した。 飽和透水係数 (K_0) については、一般的な感覚から許容される範囲で、試行錯誤により求めた。
難透水層	$K_0=1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。	TP+60m ~ TP+56m の間に厚さ 4m の難透水層を水平に設置した。
帯水層材料	$K_0=5.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。 TP+60m 以下の部分とした。	水分保持特性、水分伝達特性は文献から礫質、砂質土の一般的な値を設定した。 流域モデルが設定している第三層に対応するものとして、同モデルと同様な値を設定した。
後背湿地性の部分	$K_0=1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。 堤防及び、その基礎部分で TP+60m 以上の範囲とした。	水分保持特性、水分伝達特性は文献から礫質、砂質土の一般的な値を設定した。 飽和透水係数 (K_0) については、一般的な感覚から許容される範囲で、試行錯誤により求めた。

¹ 建設省河川局治水課;河川堤防設計指針;平成 12 年 6 月

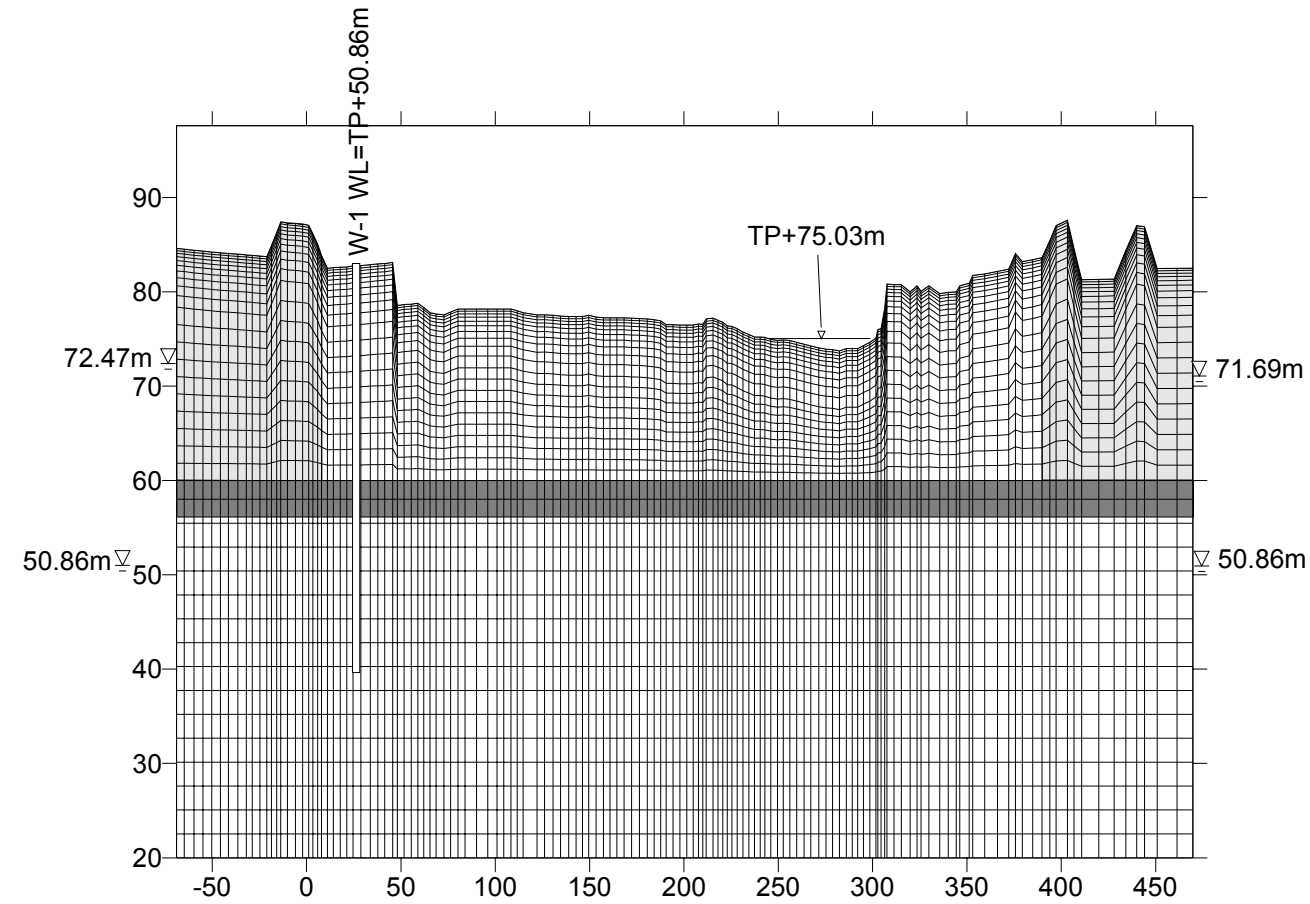


図 4.2-2 KP23.2 断面のモデル概念図（横軸：横断距離[m]、縦軸：標高[TP+m]、図中の薄いハッチ部分は后背湿地性の部分、濃いハッチ部分は難透水層として透水性を下げた範囲を示す。）

ロ) モデルの検証

モデルの検証結果は下表となった。

表 4.2-3 再現性の検証結果 (KP23.2 断面)

観測井	観測水位	計算水位	誤差 (計算水位- 観測水位)
W-1	TP+50.86m	TP+52.44m	+1.58m

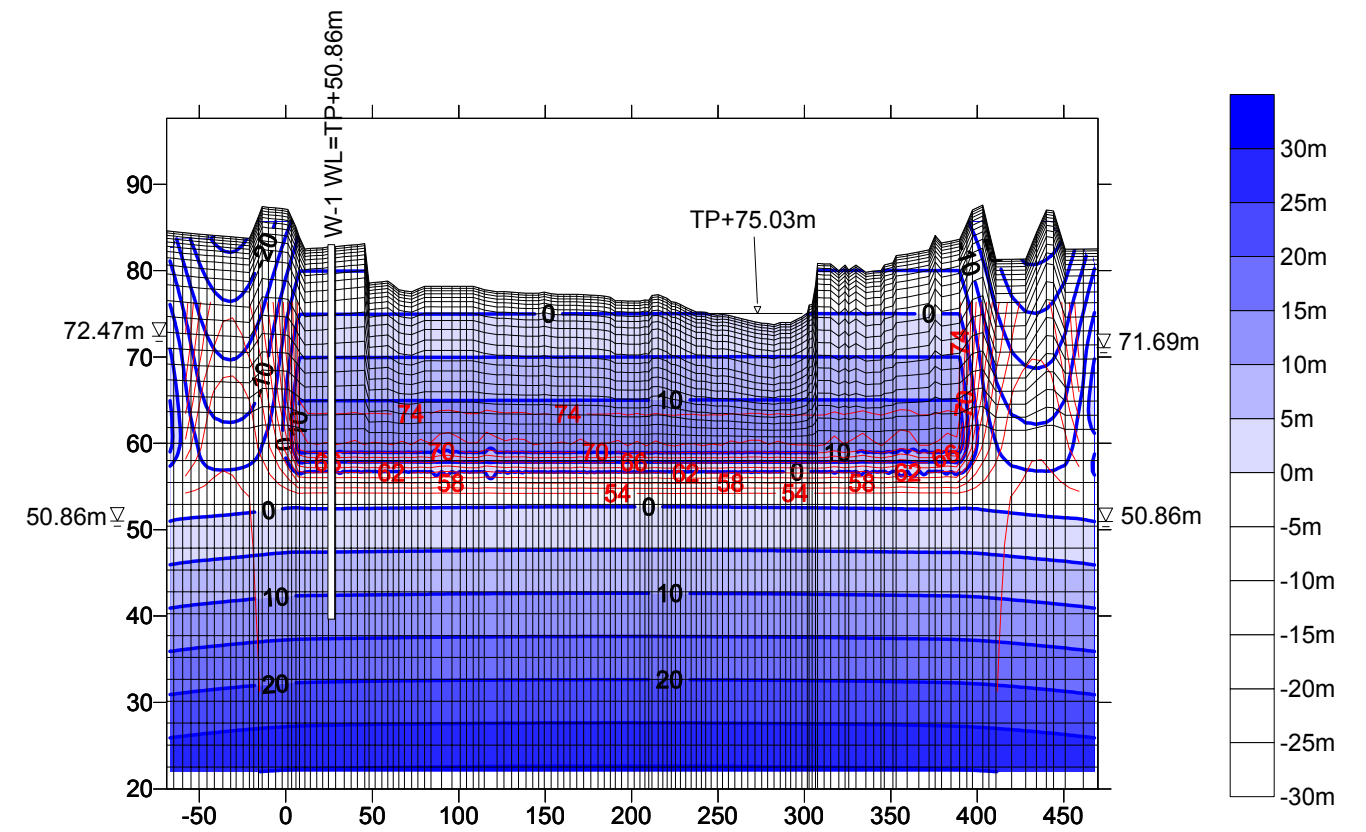


図 4.2-3 KP23.2 断面の解析結果（青線：水圧[m]、赤線：全水頭[m]）

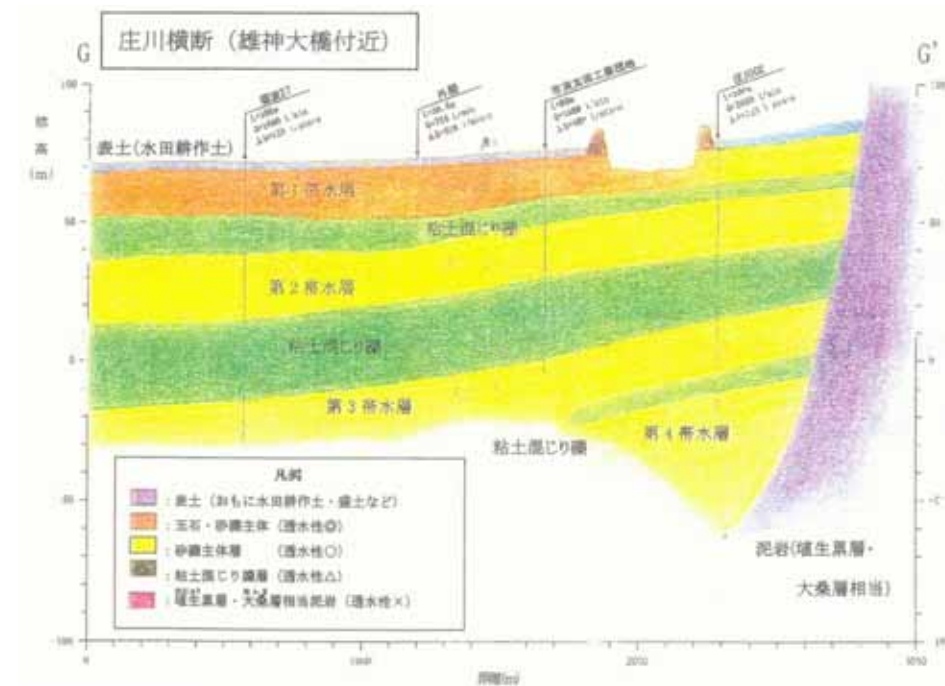


図 4.2-4 雄神大橋付近の水理地質断面図（利賀川工業用水道事業検討会資料、富山県企業局）

(3) 太田橋付近

イ) モデルの作成

当該断面は庄川本川の扇頂部より下ったところにあり、堤外地に3つの観測井(W-2L, W-2R, W-2R-1)を設けている。この内、ストレナ深度が浅いW-2R-1は河川水位とほぼ等しい水位を示すが、他の2つは河川水位よりも5m程低い水位を示している。これら2つの観測井のストレナ深度はTP+35m付近にあり、その深度から河床までの間に、水位差を生じさせる難透水層があると思われる。そこで、モデル設定に際してTP+50m～TP+48mの間に水平に難透水層を設定した。また、堤防とその基礎部分については、その周辺よりも透水係数を低く設定した。

表 4.2-4 検証材料 (KP20.0 断面モデル)

検証材料	値	備考
W-2L 水位	TP+52.59m 2002年10月測定値	W-2Lは堤外地にあり、その水位は河川水位よりも約5m低い。ストレナ深度は約TP+38mである。 2002年10月頃の当該観測井の水位はほぼ安定しており、その後、降雨などにより水位の上昇がある。
W-2R 水位	TP+52.03m 2002年10月測定値	W-2Rは堤外地にあり、その水位は河川水位よりも約5m低い。ストレナ深度は約TP+39mである。 2002年10月頃の当該観測井の水位はほぼ安定しており、その後、降雨などにより水位の上昇がある。
W-2R-1 水位	TP+56.56m 2002年10月測定値	W-2R-1は堤外地にあり、その水位は河川水位とほぼ等しい。ストレナ深度は約TP+55mである。 2002年10月頃の当該観測井の水位はほぼ安定しており、その後、降雨などにより水位の上昇がある。

表 4.2-5 解析モデルの設定内容 (KP20.0 断面モデル)

設定項目	設定内容	備考
周辺地下水位	左岸：TP+42.5m 右岸：TP+46.5m	一斉則水により作成した地下水位コンターにより設定した。 なお、当該地点近傍の観測井は、右岸に#123 (TP+52.36m)がある。
河川水位	TP+57.32m	2002年10月の測定値であり、検証対象とした堤外地の観測井W-2の水位と同時期に測られたものである。
モデル底面	標高：TP+10m 不透水面とした。	当該地点の水理地質構造は、広域地下水モデルでは地表面から約TP+49mまでは第二層(Ag1層、沖積礫質土層)が分布しており、その下部TP-70m付近まで第五層(Dg2層、洪積礫質土層)が層序している。 このモデルでは底面を不透水層として設定するために、その影響が河川からの涵養量に影響を及ぼさないように、余裕をみて設定した。
FEM メッシュ		河床および地表部分は細くなるように設定した。 地表では厚さ0.2mとし、深度に従って徐々に厚くなる用に設定した。
河床堆積物 (河床材料)	$K_0=5.0 \times 10^0 \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。 TP+50m以上の部分とした。	水分保持特性、水分伝達特性は文献 ² から礫質、砂質土の一般的な値を設定した。 飽和透水係数(K_0)については、一般的な感覚から許容される範囲で、試行錯誤により求めた。
難透水層	$K_0=5.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。	TP+50m～TP+48mの間に厚さ2mの難透水層を水平に設置した。
帯水層材料	$K_0=3.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。 TP+48m以下の部分とした。	水分保持特性、水分伝達特性は文献から礫質、砂質土の一般的な値を設定した。 流域モデルが設定している第五層に対応するものとして、同モデルと同様な値を設定した。
後背湿地性の部分	$K_0=5.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。 堤防及び、その基礎部分でTP+50m以上の範囲とした。	水分保持特性、水分伝達特性は文献から礫質、砂質土の一般的な値を設定した。 飽和透水係数(K_0)については、一般的な感覚から許容される範囲で、試行錯誤により求めた。

² 建設省河川局治水課;河川堤防設計指針;平成12年6月

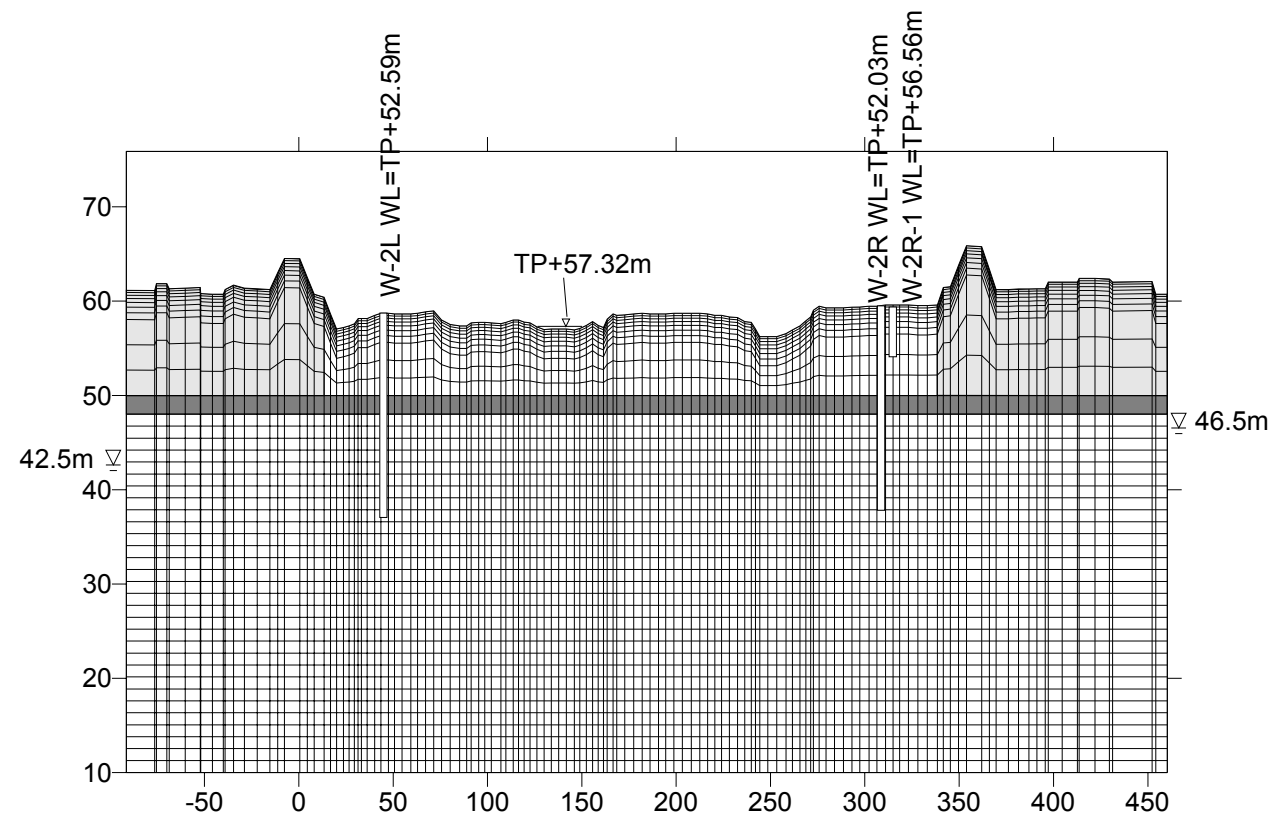


図 4.2-5 KP20.0 断面のモデル概念図（横軸：横断距離[m]、縦軸：標高[TP+m]、図中の薄いハッチ部分は后背湿地性の部分、濃いハッチ部分は難透水層として透水性を下げた範囲を示す。）

ロ) モデルの検証

モデルの検証結果は下表となった。

表 4.2-6 再現性の検証結果 (KP20.0 断面)

観測井	観測水位	計算水位	誤差 (計算水位-観測水位)
W-2L	TP+52.59m	TP+52.36m	-0.23m
W-2R	TP+52.03m	TP+52.65m	+0.62m
W-2R-1	TP+56.56m	TP+55.59m	-0.97m

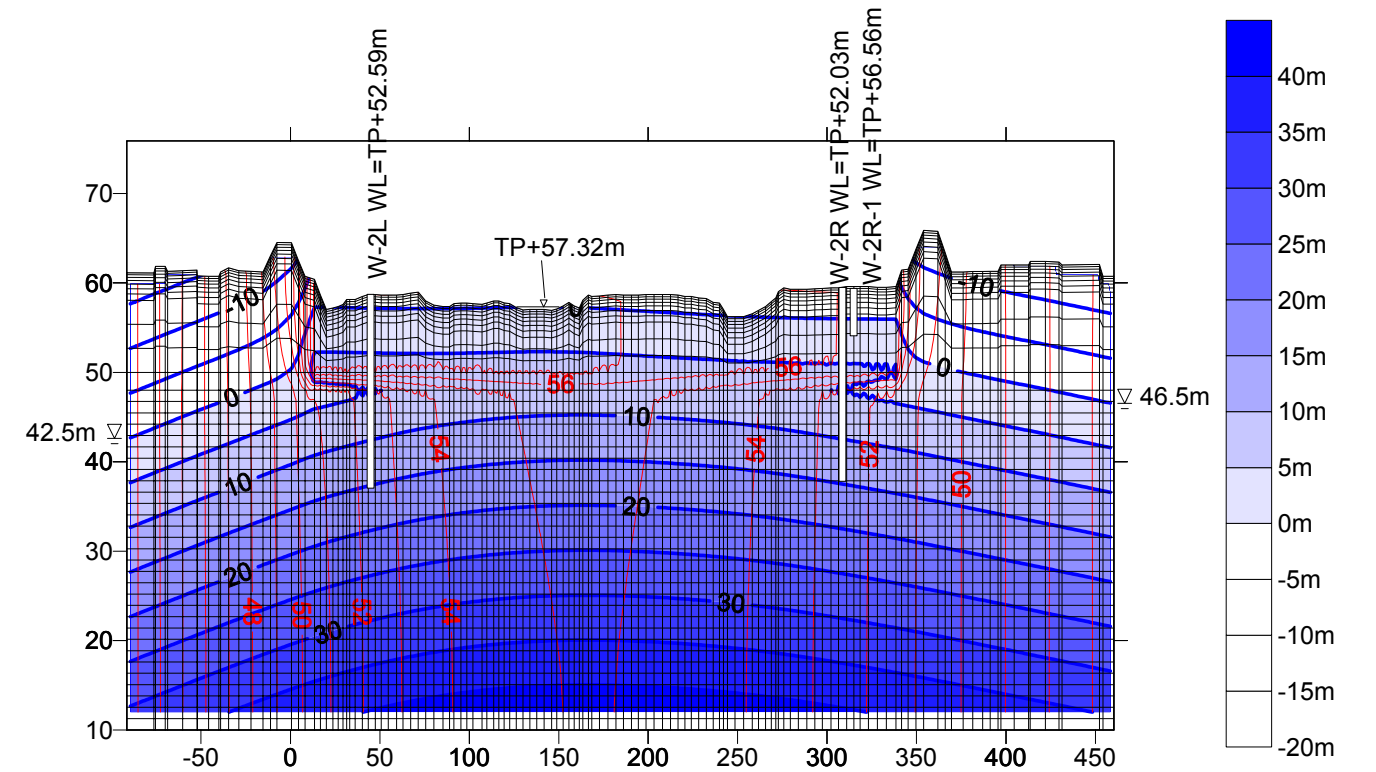


図 4.2-6 KP20.0 断面の解析結果（青線：水圧[m]、赤線：全水頭[m]）

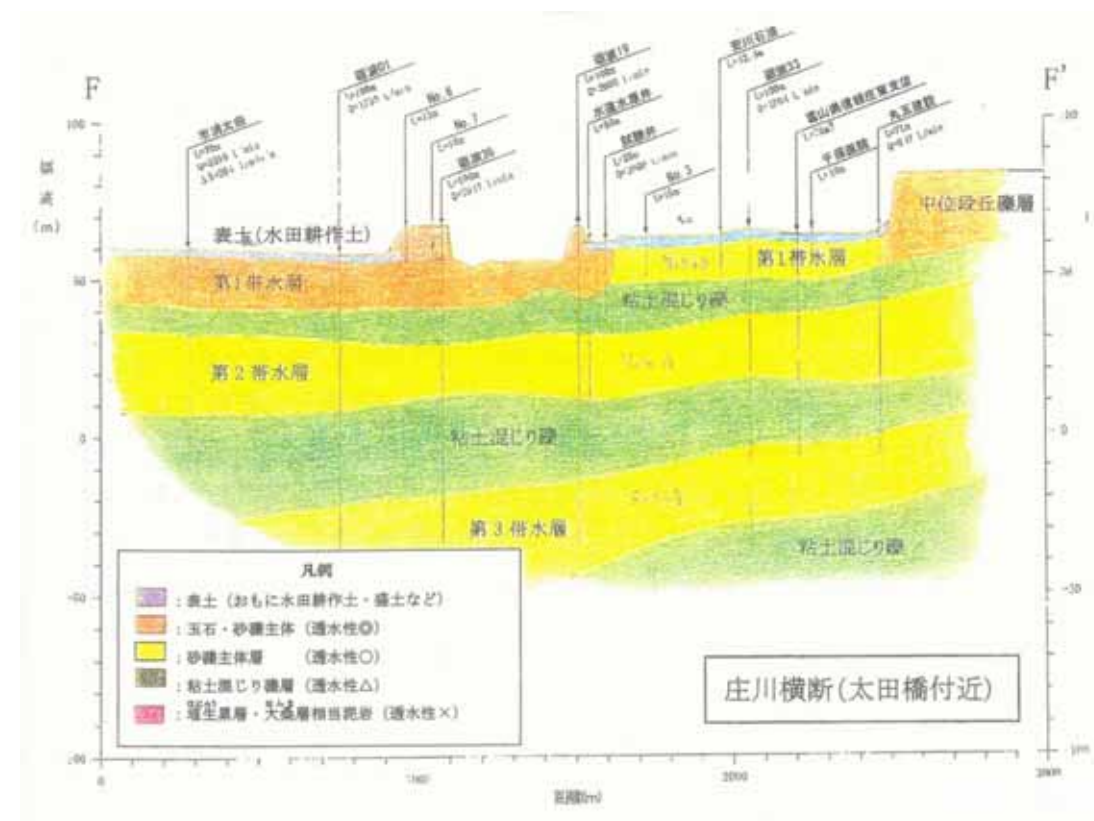


図 4.2-7 太田橋付近の水理地質断面図（利賀川工業用水道事業検討会資料、富山県企業局）

(4) 高速道路橋（庄川橋）付近

イ) モデルの作成

当該断面は庄川本川からの地下水涵養が認められる範囲の下流部にあたり、周辺地下水位と河川水位は近づいているが 5m 程度河川水位が高いこととなっている。一方、堤外地に設置した観測井（W-3）の水位は河川水位とほぼ等しく、堤外地と堤内地の間に 5m 程度の地下水位差があることが分かった。このような水位差を生じるために、両者（堤外地と堤内地）間に難透水層を設置した。このように水理地質構造を推定し、物性値については試行錯誤を繰り返して、解析モデルを作成した。

表 4.2-7 検証材料（KP16.6 断面モデル）

検証材料	値	備考
W-3 水位	TP+37.06m 2002 年 10 月測定値	W-3 は堤外地にあり、その水位は河川水位とほぼ等しく、それよりも僅かに低い値である。このことから、堤外地（河川空間内）では地下水位は河川水位に連動して動いていると考えられる。 2002 年 10 月頃の当該観測井の水位はほぼ安定しており、その後、降雨などにより水位の上昇がある。

表 4.2-8 解析モデルの設定内容（KP23.2 断面モデル）

設定項目	設定内容	備考
周辺地下水位	左岸：TP+30.05m 右岸：TP+31.00m	一斉則水結果から作成した地下水位コンター図から求めた。 なお、当該地点近傍の観測井は、左岸に#52（TP+25.09m）、右岸に#131（TP+30.84m）がある。
河川水位	TP+37.58m	2002 年 10 月の測定値であり、検証対象とした堤外地の観測井 W-3 の水位と同時期に測られたものである。
モデル底面	標高：TP-10m 不透水面とした。	当該地点の水理地質構造は、広域地下水モデルでは地表面から約 TP+13m までは第二層（Ag1 層、沖積礫質土層）が分布しており、その下部 TP-30m 付近まで第三層（Dg1 層、洪積礫質土層）が層序している。 このモデルでは底面を不透水層として設定するために、その影響が河川からの涵養量に影響を及ぼさないように、余裕をみて、第 2 層底面から更に深い位置にモデル底面を設定した。
FEM メッシュ		河床および地表部分は細かくなるように設定した。 地表では厚さ 0.2m とし、深度に従って徐々に厚くなる用に設定した。
河床堆積物（河床材料）	$K_0=5.0 \times 10^0 \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。 TP+25m 以上の部分とした。	水分保持特性、水分伝達特性は文献 ³ から礫質、砂質土の一般的な値を設定した。 飽和透水係数（ K_0 ）については、一般的な感覚から許容される範囲で、試行錯誤により求めた。
帯水層材料	$K_0=3.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。 TP+25m 以下の部分とした。	水分保持特性、水分伝達特性は文献から礫質、砂質土の一般的な値を設定した。 流域モデルが設定している第二層に対応するものとして、同モデルと同様な値を設定した。
後背湿地性の部分	$K_0=1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 礫質、砂質土。 堤防及び、その基礎部分で TP+25m 以上の範囲とした。	水分保持特性、水分伝達特性は文献から礫質、砂質土の一般的な値を設定した。 飽和透水係数（ K_0 ）については、一般的な感覚から許容される範囲で、試行錯誤により求めた。

³ 建設省河川局治水課；河川堤防設計指針；平成12年6月

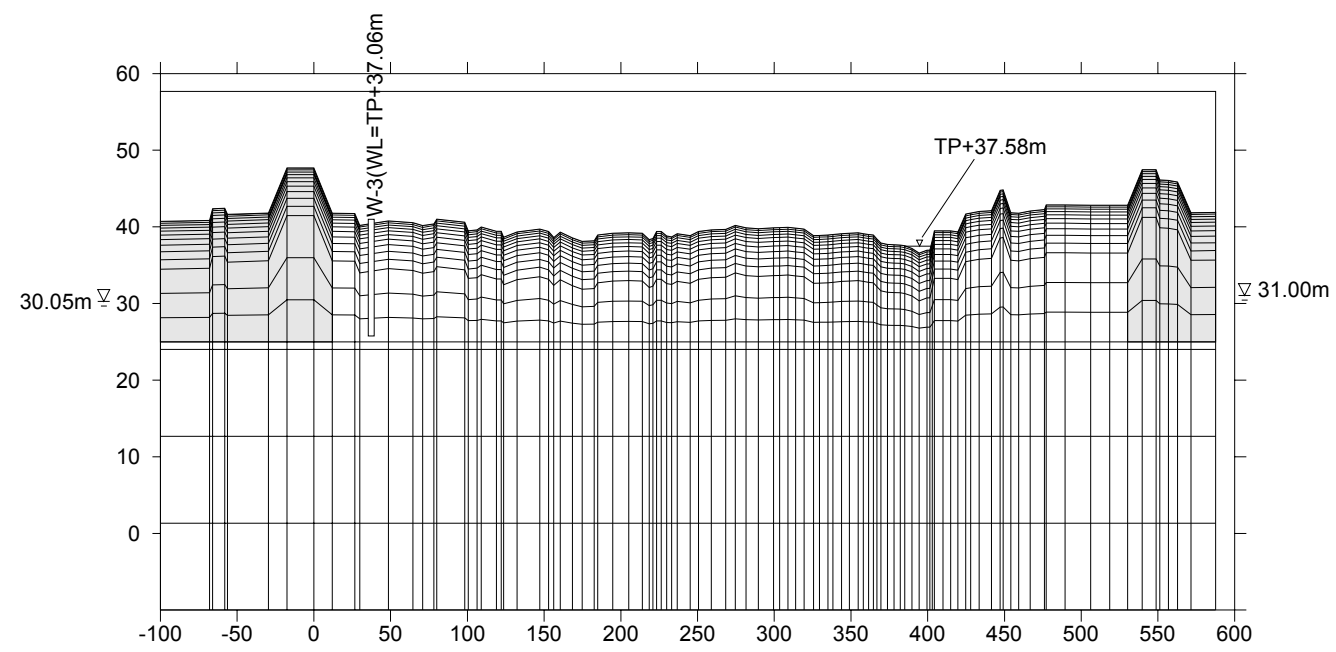


図 4.2-8 KP16.6 断面のモデル概念図（横軸：横断距離[m]、縦軸：標高[TP+m]、図中のハッチ部分は後背湿地性の部分として透水性を下げた範囲を示す。）

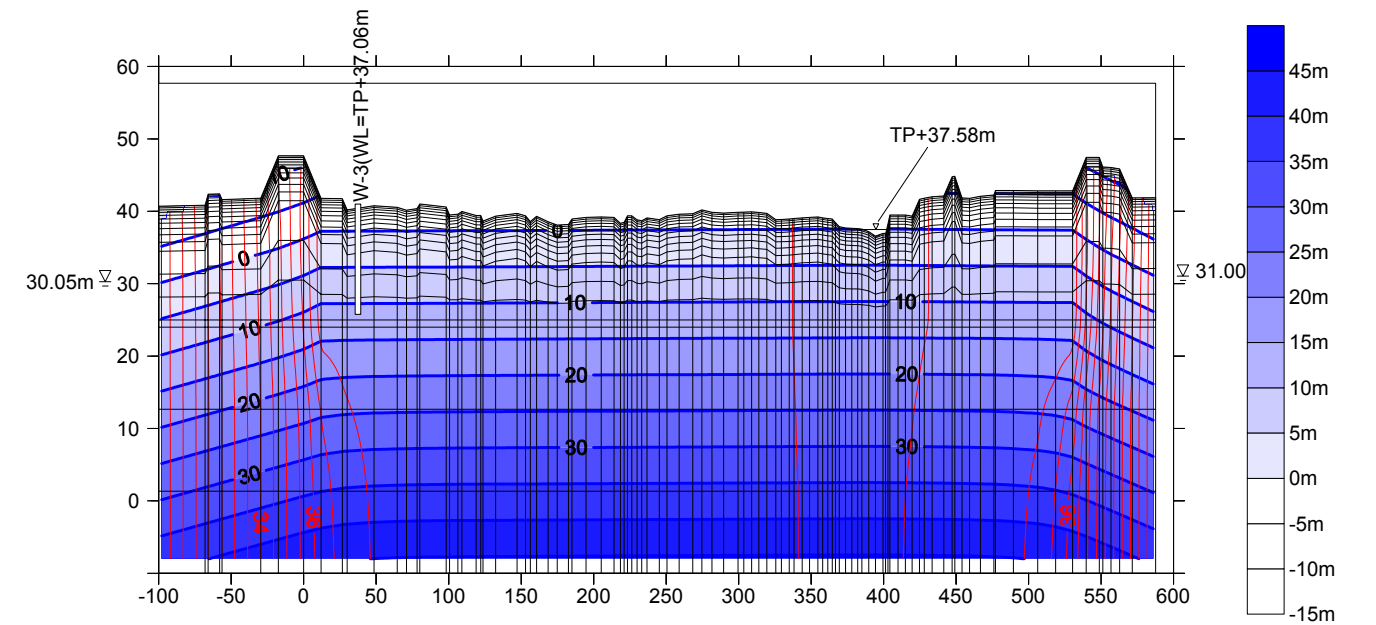


図 4.2-9 KP16.6 断面の解析結果（青線：水圧[m]、赤線：全水頭[m]）

ロ) モデルの検証

モデルの検証結果は下表となった。

表 4.2-9 再現性の検証結果 (KP16.6 断面)

観測井	観測水位	計算水位	誤差 (計算水位- 観測水位)
W-3	TP+37.06 m	TP+37.26 m	0.20 m

4.3 地下水涵養量の定量化

(1) 河川伏没量の評価

作成したモデルを用いて、2002年10月時点における各断面の涵養量を算定すると表4.3-1のようである。また、この結果を線形補間して河道区間毎の河川伏没量を求めると表4.3-2となった。

同河道区間内の伏没量については、同時流量観測を実施して別途求めている。その結果と比較すると全区間合計では約1m³/sの誤差があるが、同時流量観測の結果には相当なばらつきがあり、流量観測に関する測定誤差が大きく見込まれることから、両者の差は誤差範囲であるといえる。

表 4.3-1 解析結果から求めた河川伏没量

	河川伏没量 (2002年10月時点) 縦断方向単位長さ当たり [m ³ /s/m]
雄神橋付近 (KP23.3)	6.12 × 10 ⁻⁴
太田橋付近 (KP20.0)	1.25 × 10 ⁻³
高速道路橋 (庄川橋) 付近 KP16.6	1.00 × 10 ⁻³

注) 解析に用いた河川水位は雄神橋地点流量約8.5m³/sに相当する。

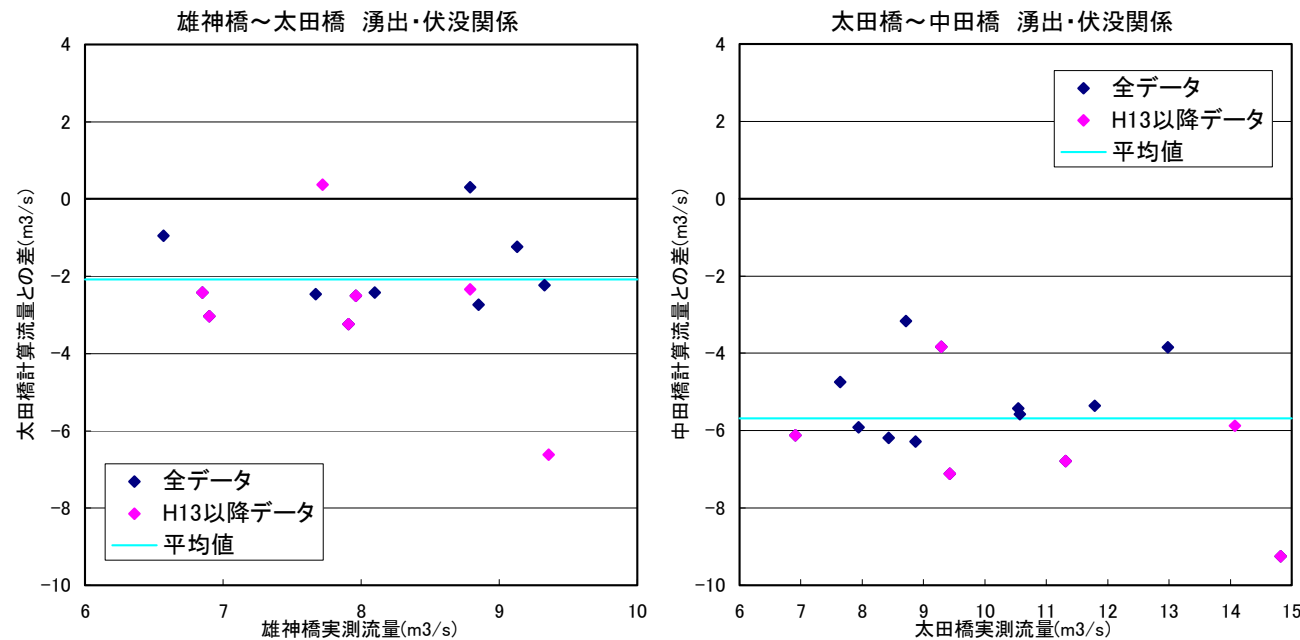


図 4.3-1 同時流量観測結果から導いた伏没量の根拠 (全観測事例の平均値を探った)

表 4.3-2 同時流観検討と解析結果の比較

区間	同時流観検討結果から導いた伏没量	不飽和浸透解析結果	備考
雄神橋～太田橋	2.08 m ³ /s	1.68 m ³ /s	断面間は線形補間して区間流量とした。中田橋地点において伏没量がゼロであるとして線形補間した。
太田橋～中田橋	5.68 m ³ /s	5.10 m ³ /s	
全区間合計	7.77 m ³ /s	6.78 m ³ /s	

注) 雄神橋～太田橋 (1800m)、太田橋～高速道路橋(3200m)、高速道路橋～中田橋(3000m)として算出。

(2) 水位上昇に伴う伏没量の変化

イ) 検討ケース

河川水位が2002年10月時点の水位(船戸橋8.5m³/s)に加え、流量が船戸橋で21m³/s、80m³/sの場合の涵養量を算定した。検討ケースの水位と流量を下表に示す。

表 4.3-3 解析結果から求めた河川伏没量の水位による変化

	河川伏没量 (縦断方向単位長さあたり [m ³ /s/m])		
	2002年10月時点	水位30cm上昇時	水位1m上昇時
雄神橋付近 (KP23.3)	0.000612 (B=29.65m)	0.000622(2%増加) (B=38.44m)	0.000641(5%増加) (B=65.9m)
太田橋付近 (KP20.0)	0.00125 (B=34.99m)	0.00148(18%増加) (B=61.78m)	0.00171(37%増加) (B=111.74m)
高速道路橋 (庄川橋) 付近 (KP16.6)	0.00100 (B=18.27m)	0.00105(5%増加) (B=32.98m)	0.00116(16%増加) (B=56.86m)
全区間	6.78 m ³ /s	7.51 m ³ /s(11%増加)	8.45 m ³ /s(25%増加)
雄神橋地点の流量 (参考)	約 8.5 m ³ /s	約 21 m ³ /s	約 80 m ³ /s

注) 雄神橋～太田橋 (1800m)、太田橋～高速道路橋(3200m)、高速道路橋～中田橋(3000m)として算出。

ロ) 検討結果

水深が30cm上昇した場合においても、伏没量の増加は約1割であり、水位変動が涵養量に与える影響は少ないと考えられる。また、実測値から推定する伏没量はバラツキが多いものの、流量規模による変化は見出せない。

よって、庄川の伏没量は平常時の流量変化に対しては一定と推定した。

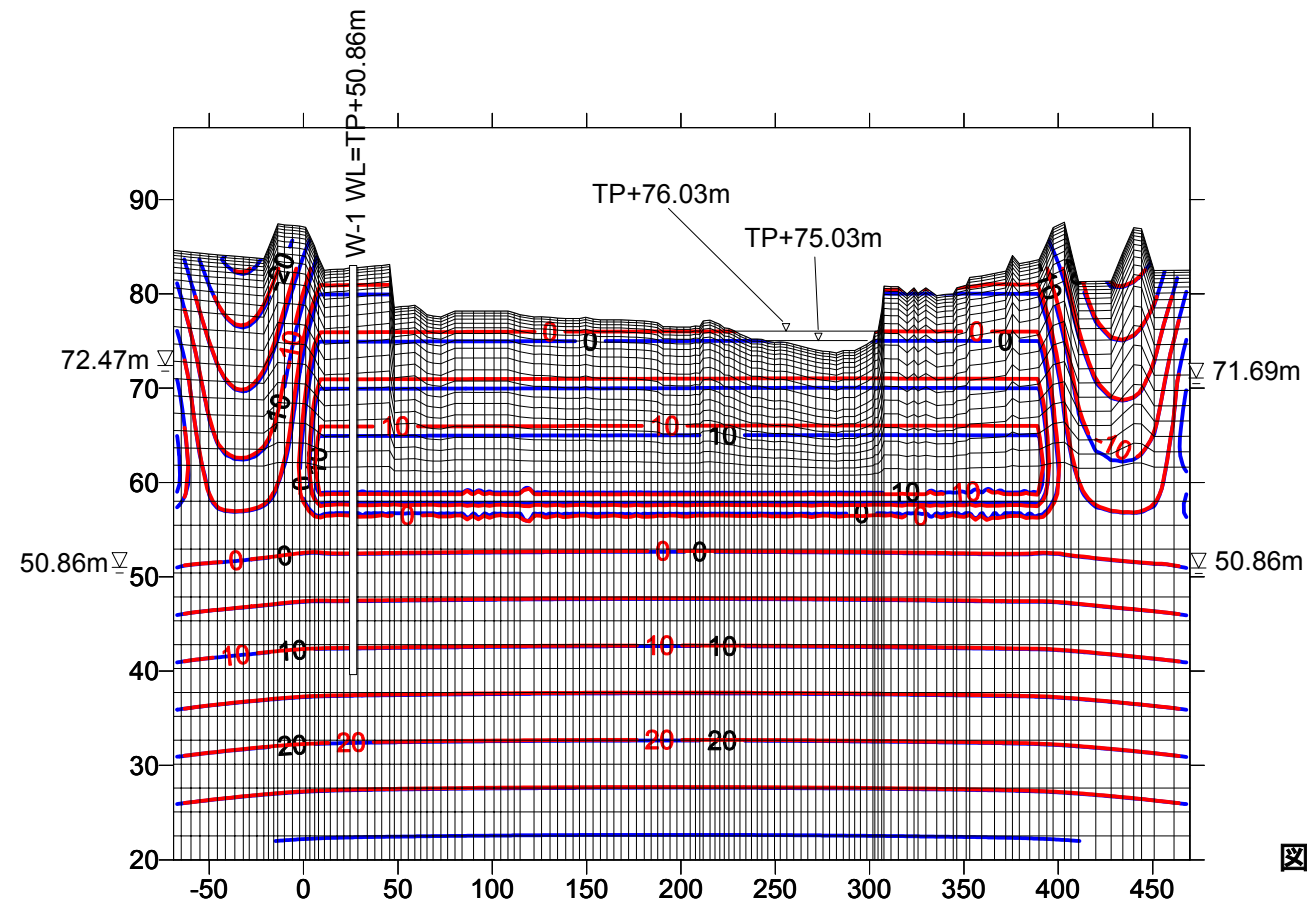


図 4.3-2 KP23.2 断面における河川水位の上昇による水圧の変化（赤線：2002/10 時点の解析結果、青線：水位を 1m 上昇させた場合のシミュレーション結果）

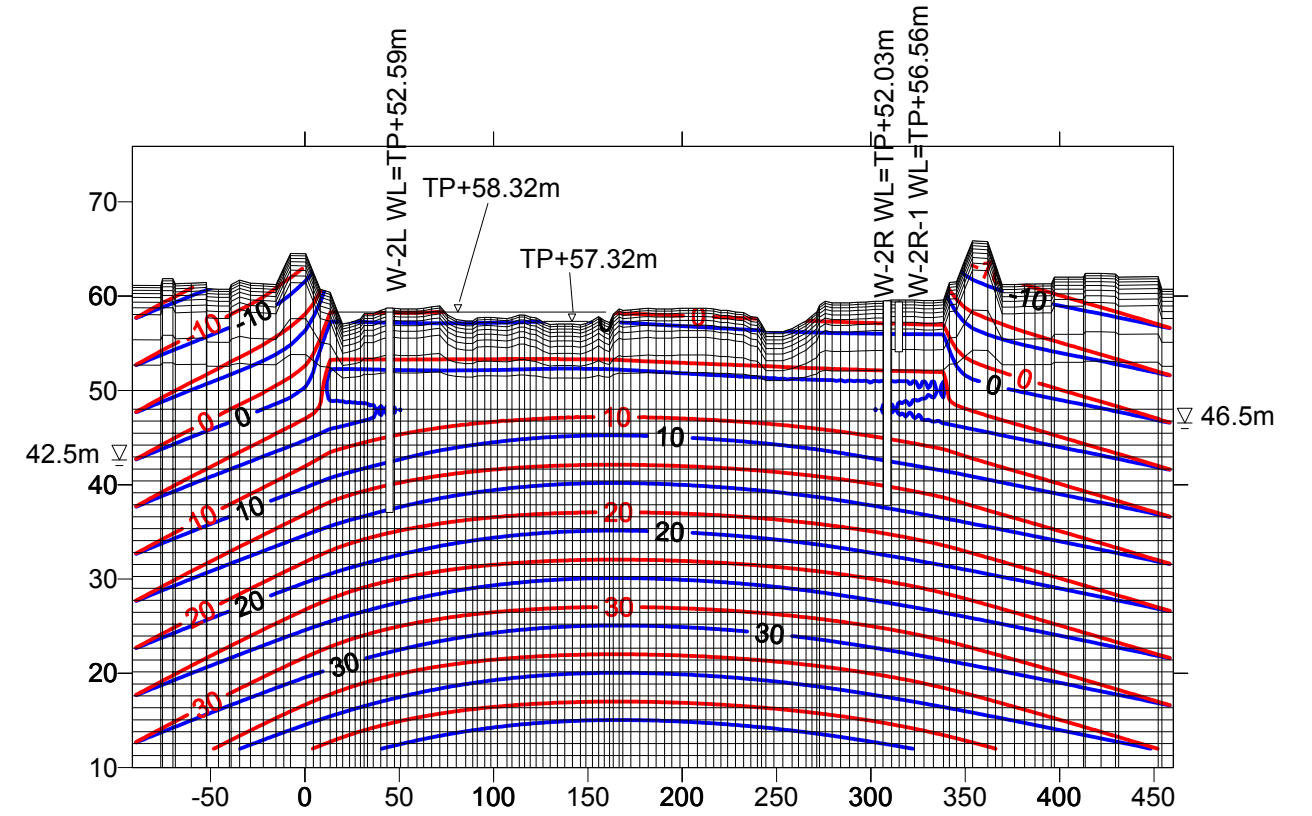


図 4.3-3 KP20.0 断面における河川水位の上昇による水圧の変化（赤線：2002/10 時点の解析結果、青線：水位を 1m 上昇させた場合のシミュレーション結果）

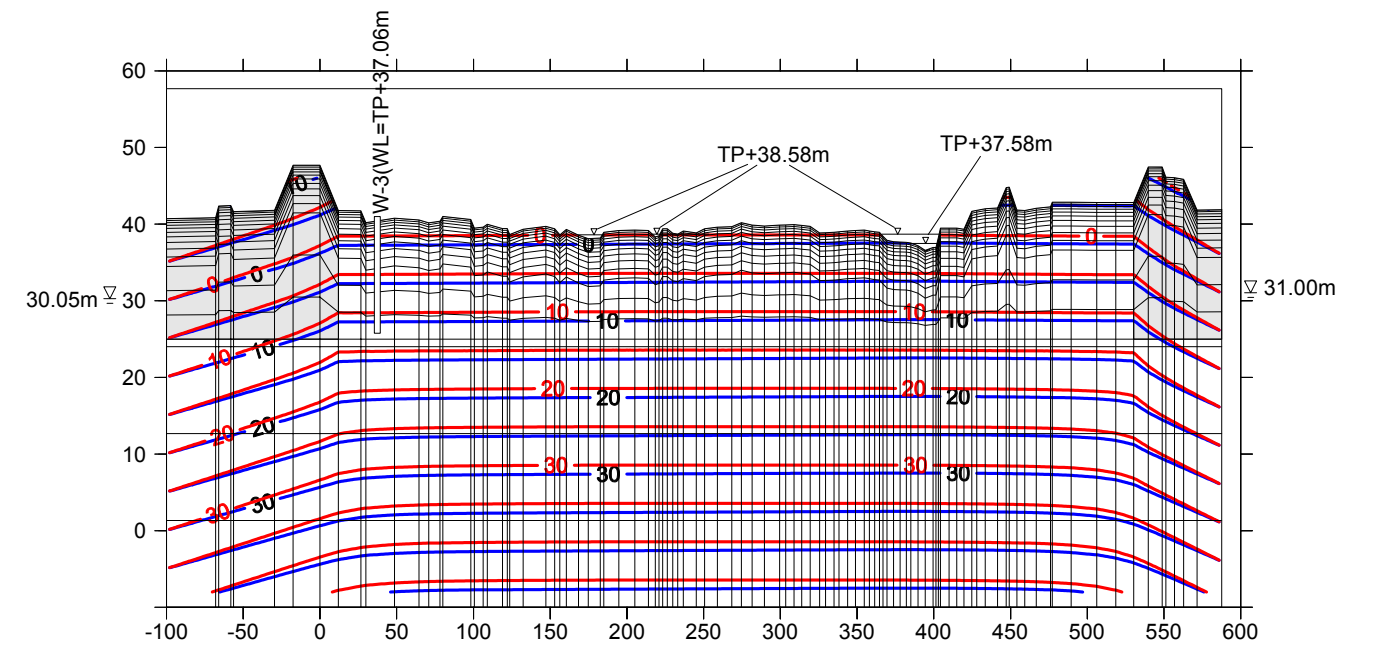


図 4.3-4 KP16.6 断面における河川水位の上昇による水圧の変化（赤線：2002/10 時点の解析結果、青線：水位を 1m 上昇させた場合のシミュレーション結果）