

不等流水面形検討事例

1. 計算手法

- 水面形計算式は以下に示すとおり．この式は距離 Δx を隔てた上流側と下流側のエネルギー保存を意味する．
- 下式では，急勾配水路にも対応できるよう，水路床の勾配を含んだ式としている．
- 全地点で流量 Q および水位 h の関数としての断面通水特性は既知とする．
- 常流計算では，既知の下流端の水位を入力し，逐次上流側水位を収束計算により求めていく．
- 射流計算では，既知の上流端の水位を入力し，逐次下流側水位を収束計算により求めていく．

$$\left(\frac{Q_2^2}{2gA_2^2} + h_2 \cos \theta + z_2 \right) - \left(\frac{Q_1^2}{2gA_1^2} + h_1 \cos \theta + z_1 \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{n_1^2 Q_1^2}{R_1^{4/3} A_1^2} + \frac{n_2^2 Q_2^2}{R_2^{4/3} A_2^2} \right) \Delta x \quad (1)$$

Q_2 上流側流量	Q_1 下流側流量
h_2 上流側水深	h_1 下流側水深
z_2 上流側河床標高	z_1 下流側河床標高
A_2 上流側通水断面積	A_1 下流側通水断面積
R_2 上流側動水半径	R_1 下流側動水半径
Δx 断面間距離	n Manning 粗度係数
g 重力加速度	θ 水路床勾配

上式右边はエネルギー損失（摩擦損失水頭）を表す．一般に摩擦損失水頭 h_r および動水勾配 I は以下のとおり現される．

$$h_r = f' \frac{\Delta x v^2}{R} \frac{1}{2g} \quad I = \frac{h_r}{\Delta x} = f' \frac{1}{R} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

ここで，平均流速公式として Manning の式

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (3)$$

を用いれば，係数 f' は以下のとおり求まる．

$$f' = \frac{2gn^2}{R^{1/3}} \quad (4)$$

よって摩擦損失水頭 h_r は

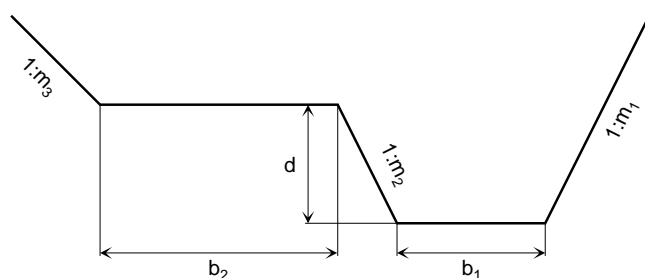
$$h_r = f' \frac{\Delta x v^2}{R} \frac{1}{2g} = \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \Delta x = \frac{n^2 Q^2}{R^{4/3} A^2} \Delta x \quad (5)$$

となる．ここに Q は流量， A は通水断面積である．上式において，距離 Δx 離れた 2 断面の平均的諸量を用いて摩擦損失水頭 h_r を評価するとすれば

$$h_r = \frac{1}{2} \left(\frac{n_1^2 Q_1^2}{R_1^{4/3} A_1^2} + \frac{n_2^2 Q_2^2}{R_2^{4/3} A_2^2} \right) \Delta x \quad (6)$$

となり，基本式右边を導ける．

2. 複合断面の断面通水特性計算



左図に示す複合断面の断面積 A 、潤辺 S および水面幅 T は以下のとおり、水深 h の関数として計算できる。

$$h \leq d$$

$$A = \{2b_1 + h(m_1 + m_2)\} \cdot h/2$$

$$S = b_1 + h \left(\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2} \right)$$

$$T = b_1 + h(m_1 + m_2)$$

$$d < h$$

$$A = A_0 + \{2b_b + (h - d)(m_1 + m_3)\} \cdot (h - d)/2$$

$$S = S_0 + b_2 + (h - d) \left(\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2} \right)$$

$$T = b_b + (h - d)(m_1 + m_3)$$

$$b_b = b_1 + d(m_1 + m_2) + b_2$$

$$A_0 = \{2b_1 + d(m_1 + m_2)\} \cdot d/2$$

$$S_0 = b_1 + d \left(\sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2} \right)$$

上記により、断面積 A と潤辺 S が分かれば、任意の水深における動水半径は $R = A/S$ として求められる。なお水面幅 T は、限界水深算定時に用いるものである。限界水深 h_c は、以下を満足するよう定める。

$$\left(\frac{A^3}{T} \right)_{h=h_c} = \frac{Q^2}{g \cos \theta} \quad (7)$$

各断面に与えた諸元は以下のとおり。下表中 xx は常流不等流計算の計算開始点から上流側に向かった追加距離、EL は河床標高である。

代表断面諸元

xx	EL	b1	b2	d	m1	m2	m3
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)			
5.0	46.8	66.0	133.0	2.0	0.0	0.0	2.0
25.0	46.8	66.0	133.0	2.0	0.0	0.0	2.0
90.0	46.8	66.0	188.0	2.0	0.0	0.0	2.0
150.0	46.8	74.0	150.0	2.0	0.0	10.0	2.0
260.0	46.8	60.0	0.0	5.2	0.0	5.0	0.0
380.0	46.0	60.0	0.0	5.2	1.0	1.0	0.0
760.0	46.0	60.0	0.0	5.2	1.0	1.0	0.0

上表を見て分るとおり、この河川は上流 380m 地点から上流は下流側より河床標高が低くなっているのが特徴である。なお xx=0 の地点はコンクリート構造物であるため、断面通水特性は別途算定した。

実際の計算では算定した断面通水特性を内挿し、計算開始点 xx=0 より計算終了点 xx=760 まで、5m ピッチで断面を設定している。

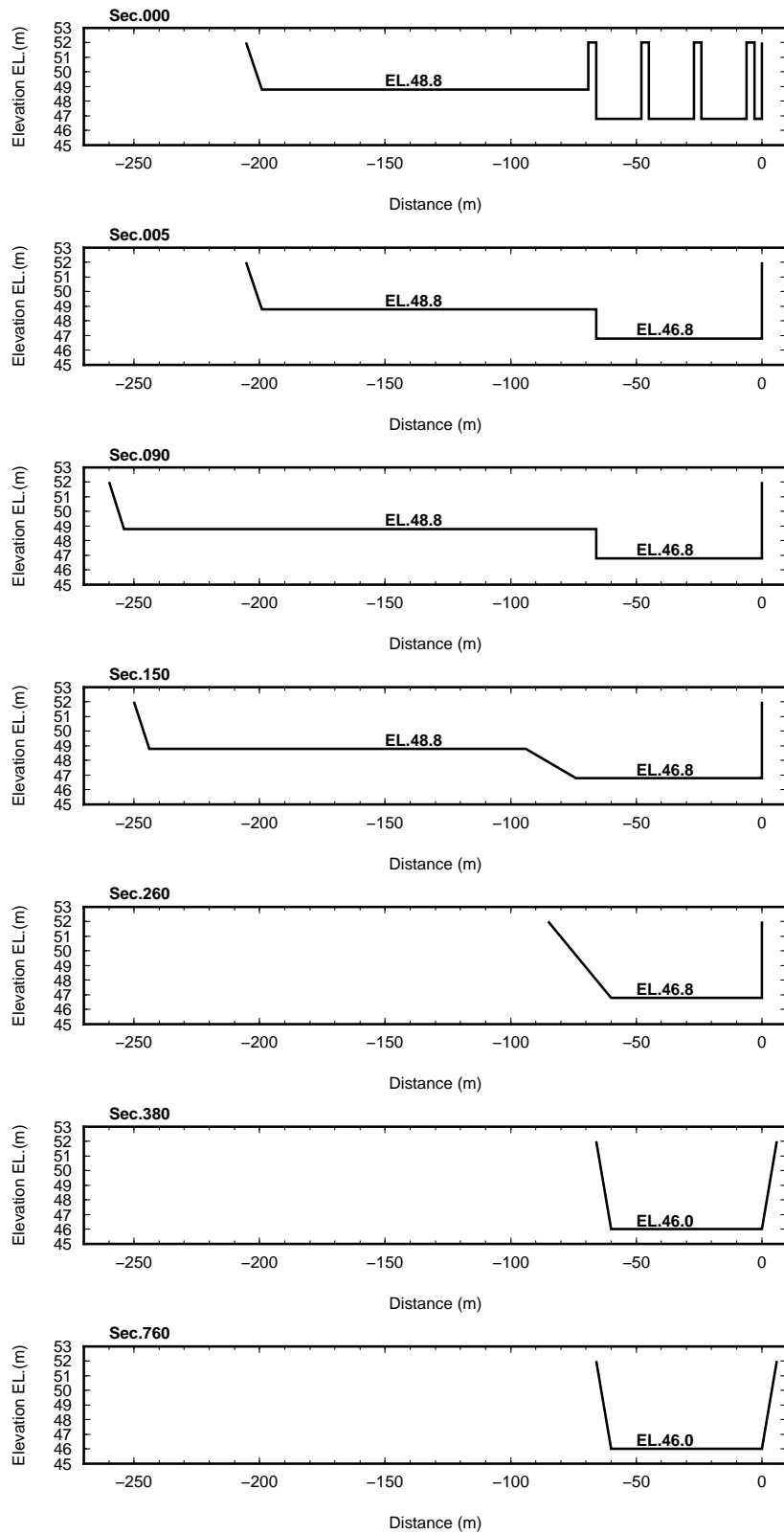


図 1 計算に用いた代表断面形状

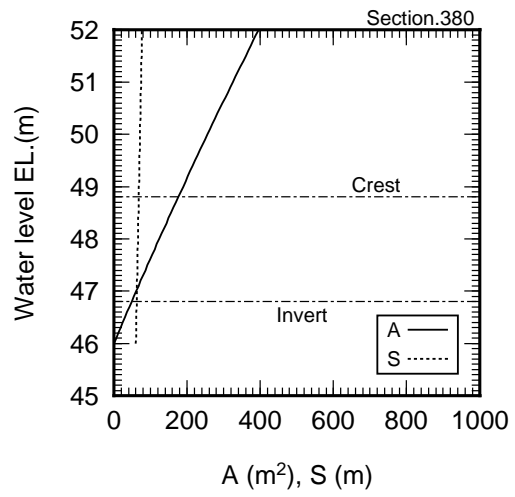
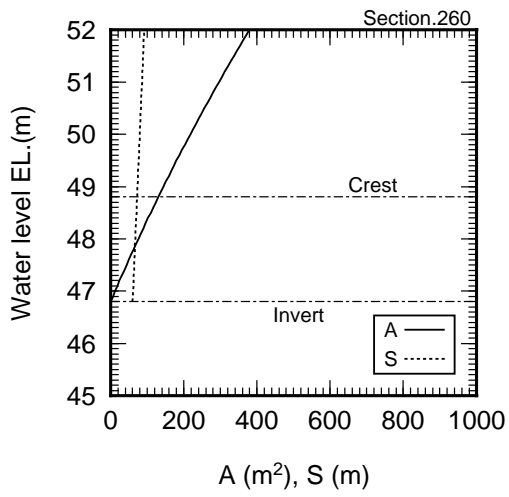
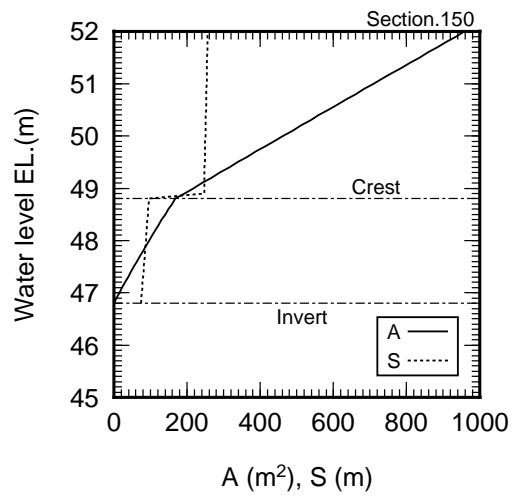
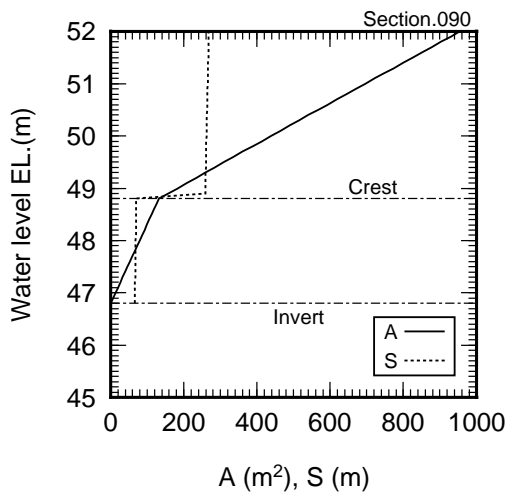
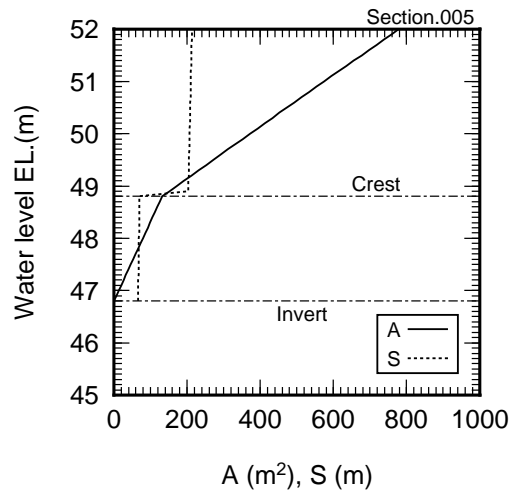
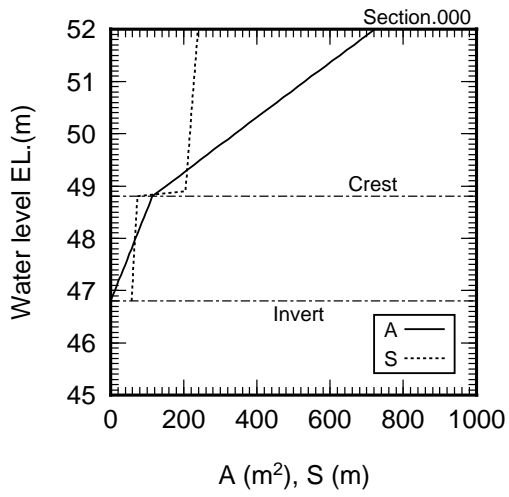
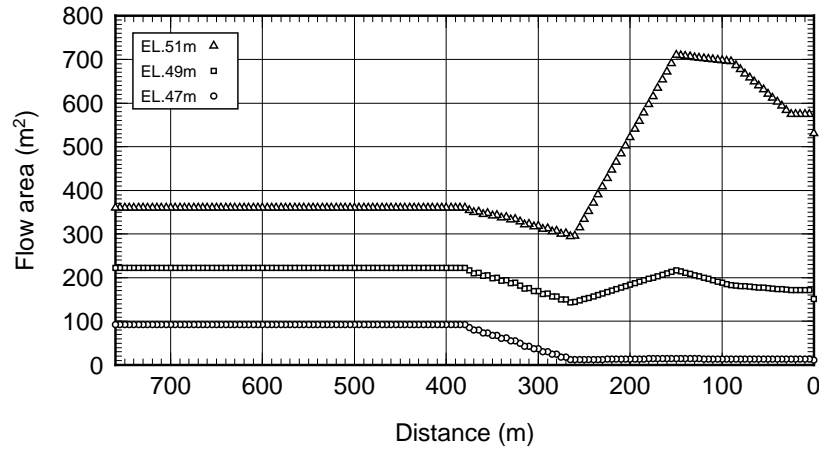


図2 計算に用いた断面通水特性の例

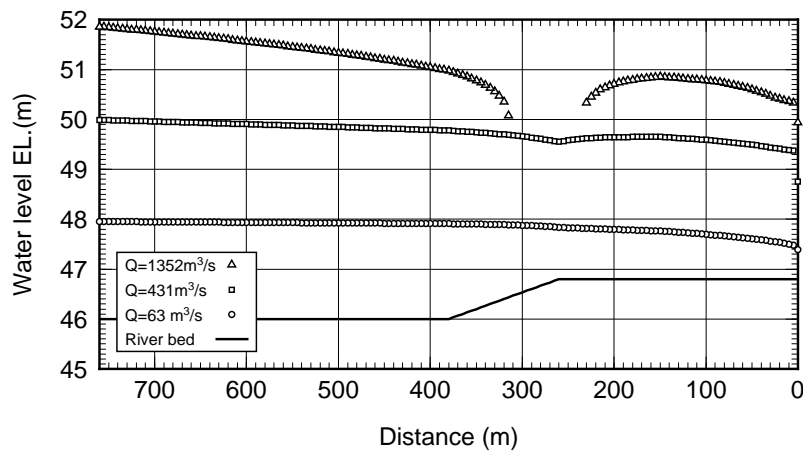
3. 解析結果

3.1 解析結果図

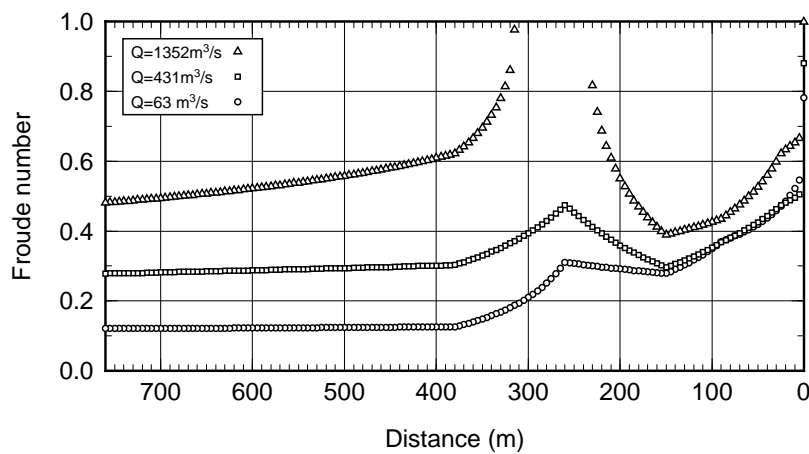
粗度係数は、コンクリート部を $n = 0.013$ ，自然河道部を $n = 0.03$ としている．河床勾配は，上流から下流にかけて水平もしくは逆勾配なので，常流計算を適用する．



(1) 距離程と通水断面積の関係 (標高別)



(2) 距離程と水面標高の関係 (流量別)



(3) 距離程とフルード数の関係 (流量別)

図3 解析結果図

3.2 解析結果の解釈

- 図 3 (1) に、参考のため、標高別の各箇所を通水断面積を示している。距離程 260m 付近は下流側と比べ水面幅が小さくなっているところである。更に上流側は河床標高が下がるため通水断面積が高まるが、流量が大きくなるにつれ、この付近が最も通水断面積が小さくなることが読み取れる。
- 図 3 (2) に解析により得られた水面標高を示す。本地点の年平均流量は $60\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、流量 $63\text{m}^3/\text{s}$ のケースでは比較的滑らかな水面形が得られている。流量が大きくなるに従い、距離程 260m 付近に不連続な箇所が認められるようになり、流量 $1352\text{m}^3/\text{s}$ のケースでは水面形が急速に低下し計算が収束していない。
- 図 3 (3) にフルード数を示しているが流量 $1352\text{m}^3/\text{s}$ のケースでは下流からの距離程 310m 付近でフルード数が急激に上昇しているのが分かる。したがって、この解析では距離程度 310m 付近が限界水深となり距離程 230m 付近までの間で斜流と跳水が発生しているものと推定される。
- この事例の解析ケースでが断面は極力単純化しているが、いくつかの実測データがあるため、それらと計算した水面標高の違いを確認した。図 4 に流量が等しいと考えられる 2 地点における水位標高と流量の実測値を、計算により推定されたものに重ねてプロットしてみた。両者で差異はみられるものの、大きな乖離はないと評価できると考える。

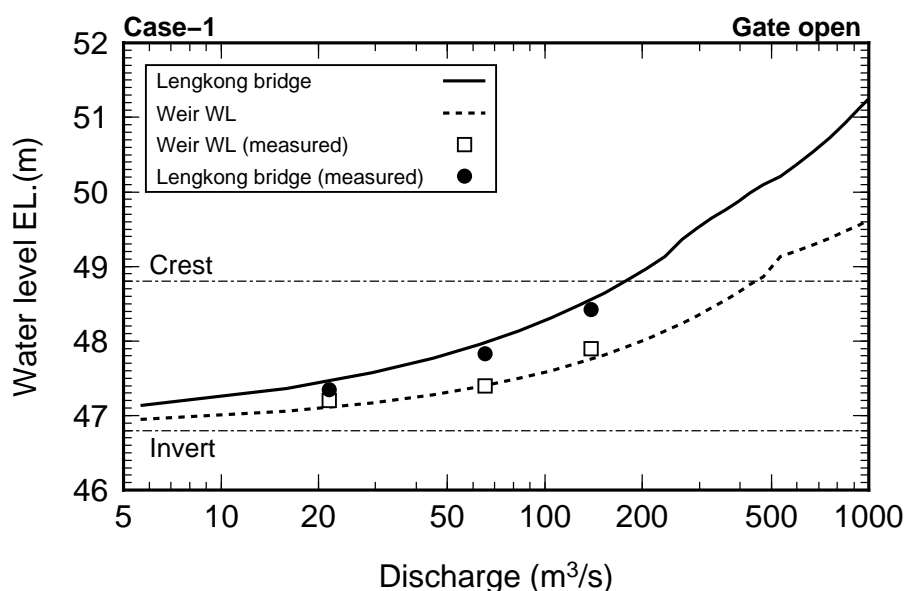


図 4 水面形解析結果と実測値の比較

(参考) 実測データ

流量 (m^3/s)	21.6	65.4	139	河床標高
上流地点水位 (平均水深)	EL.47.34 (1.38m)	EL.47.83 (1.74m)	EL.48.42 (2.33m)	EL.46.0
下流地点水位 (平均水深)	EL.47.20 (0.40m)	EL.47.40 (0.60m)	EL.47.90 (1.10m)	EL.46.8