

高水敷に浅い切り欠がある河道における局所的な水位上昇

Local Change in Water Level in a River with a Shallow Lack of Flood Plane

渡辺明英*・宇多高明**

By Akihide WATANABE and Takaaki UDA

In a river with a lack of flood plane so called wando, water level rises up locally during flood. It is important to predict this change in water level for preventing the flood disaster. By using the two-dimensional shallow-water-flow model, it is able to estimate the plane distribution of water level and flow pattern in a river with a wand and it is shown that the calculation results on the longitudinal distribution of water level agree with the model experimental those. It becomes clear that the change in water level occurs mainly due to the local change in cross sectional area and its value relates to the velocity and the length, width, depth of lack. The convenient evaluating method of the change in water-level due to a lack of flood plane is proposed.

Keywords: wando, water level, 2D shallow water analysis.

1. はじめに

高水敷にワンド状の水深の浅い切り欠があると、洪水時には局所的に水位が上昇する¹⁾。この水位上昇は局所的な河積の変化によって生じるものであり、切り欠を原因とする平面渦の発生等によるエネルギーロスの増分は小さいと考えられる。したがって、運動量の原理に基づいて、水位上昇量を把握することができると考えられる。しかしながら、切り欠による河積変化の影響は切り欠部以外の所にも及び、3次元的な急拡・急縮流れとなる。このような流れ場を、ここでは鉛直面内の剥離域について仮定し、平面2次元的に取り扱う。

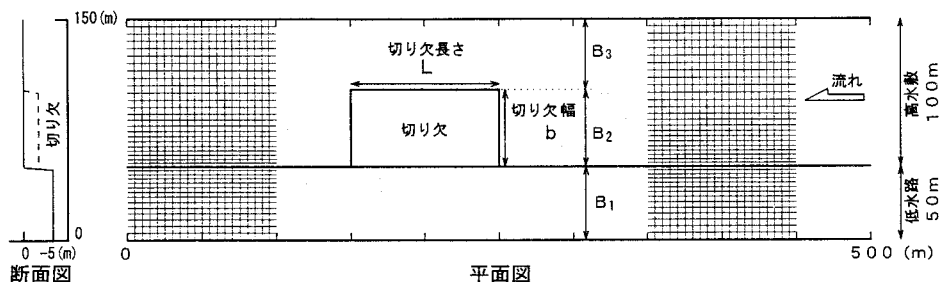
本文では、高水敷上の切り欠に起因して生じる水位上昇量を定量的に把握することを目的として、流れ場に平面2次元流解析を適用して、種々の条件下における切り欠に起因する水位上昇量を求め、これと実験結果¹⁾との比較を行い、これらの水位上昇量と各水理緒元との関係を明らかにする。本文では、高水敷を有する直線河道の一部を切り欠いた場合に生ずる水位上昇量を把握する方法について検討する。

2. 平面2次元解析方法

解析には、底面摩擦による乱れの効果を渦動粘性 ϵ_t として考慮した平面2次元の浅水流方程式(1)(2)と水深平均した連続式(3)を用いる。

* 正会員 工博 建設省土木研究所主任研究員 河川研究室 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

** 正会員 工博 建設省土木研究所 河川研究室長



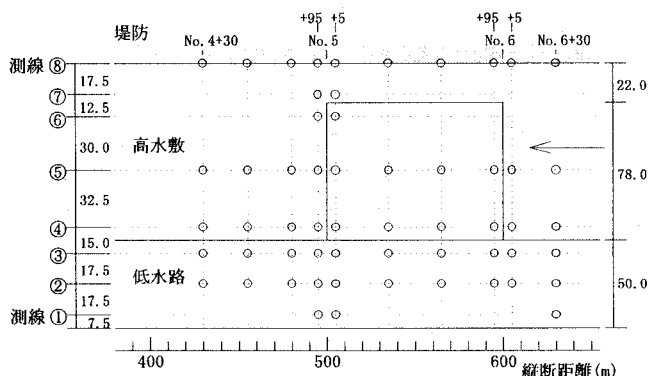
図－１ 解析に用いた水路の諸元（現地換算値）と分割格子

表－１ 水理条件（現地換算値）

流量 (m ³ /s)	水面勾配 I	高水敷水深 h (m)
1300 and 2900	1/1200	5 and 2

表－２ 切り欠形状（現地換算値）

切り欠深さ Δh (m)	2.5 and 2.0
切り欠幅 b (m)	26, 52 and 78
切り欠長さ L (m)	50, 100 and 200



図－２ 水位測定位置

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon_t \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon_t \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial u(h + \eta)}{\partial x} + \frac{\partial v(h + \eta)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\kappa u_* h}{6}, \quad u_* = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{\varphi}, \quad \tau_x = \frac{\rho u_* u}{\varphi}, \quad \tau_y = \frac{\rho u_* v}{\varphi}$$

ここで、 t ：時間、 x ：流下方向の座標軸、 y ：横断方向の座標軸、 u ： x 軸方向の流速、 v ： y 軸方向の流速、 η ：基準面からの水位、 h ：基準面からの水深、 τ_x ： x 方向の底面せん断力、 τ_y ： y 方向の底面せん断力、 κ ：カルマン定数(=0.4)、 u_* ：摩擦速度、 φ ：流速係数、 ρ ：水の密度であり、基準面は $\eta=0$ となる高さにとっている。

式(1)、(2)、(3)を差分近似で離散化し、ルンゲ・クッタ法で時間積分を行い、流れ場を求める。流速に対する境界条件は、側壁でスリップ条件・不透過条件を与え、上下流では、それぞれの流下方向の1階勾配、2階勾配を0とした。また、風上化には3次の風上差分となる風上粘性項を用いた。

解析に用いた水路の諸元と分割格子を図－1に示す。解析での水路長は500m（模型値10m）、水路幅は150m（模型値3m）である。鉛直段差 Δh による鉛直縦断面内の剥離域の長さは(8~12) Δh とした。数値解析に用いた水理条件と切り欠形状は、それぞれ表－1、表－2に示す通りである。表中の値は、現地換算値であり、水理模型の実スケールはこれらの値の1/50である。

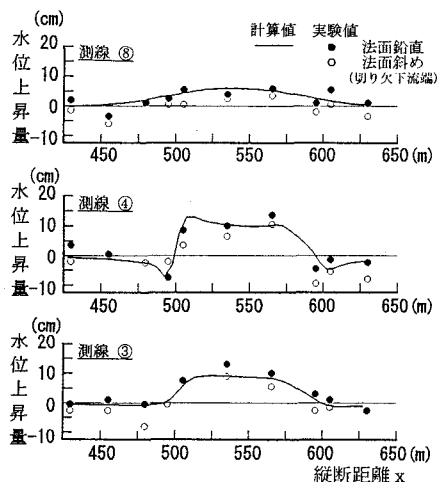


図-3 水位上昇量 ($L=100\text{m}$, $b=52\text{m}$, $h=5\text{m}$)

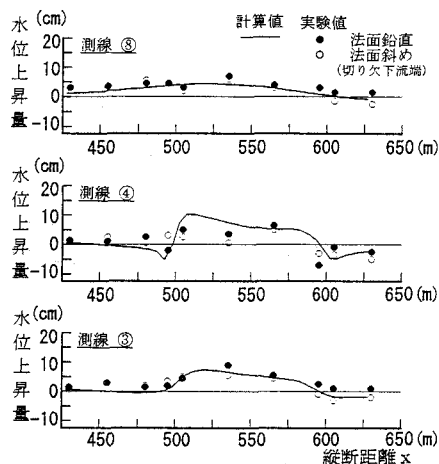


図-4 水位上昇量 ($L=100\text{m}$, $b=52\text{m}$, $h=2\text{m}$)

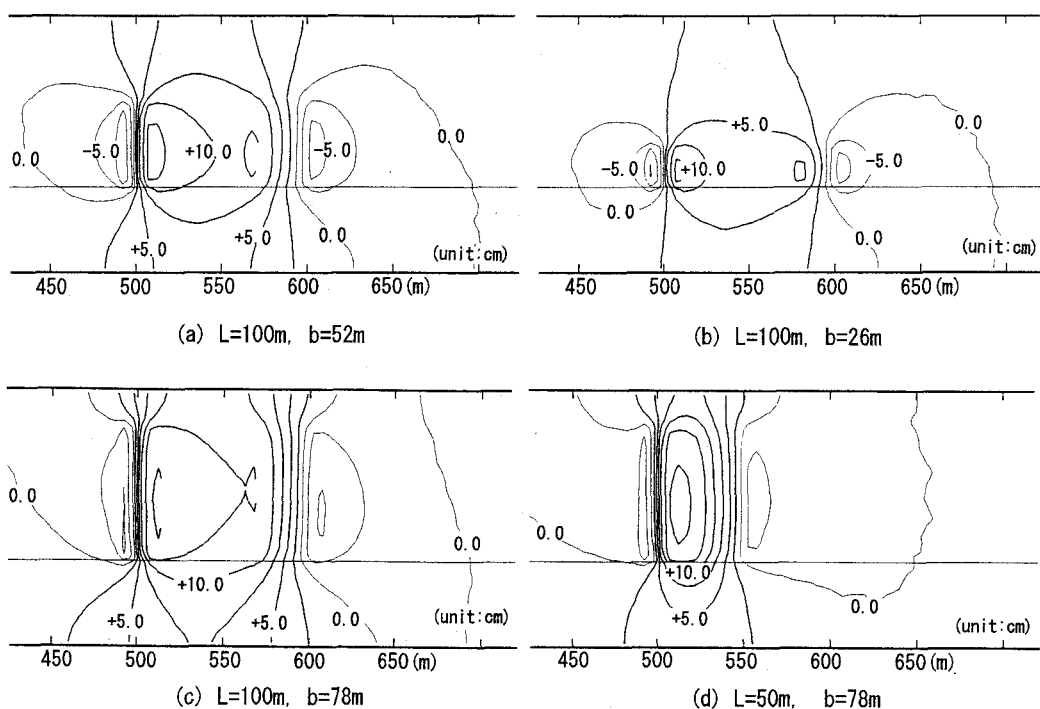


図-5 水位変動量のコンター

3. 数値解析結果

切り欠がある場合とない場合の実験¹⁾で得られた水位差から切り欠に起因する水位上昇量を求め、これと数値解析結果と比較して図-3, 4に示す。図-3, 4は図-2に示す各測線上での高水敷水深5m, 2mの場合の切り欠 ($L=100\text{m}$, $b=52\text{m}$)による水位上昇量を表している。これらの図から、浅水流方程式の数値解析結果は、実験で得られた水位上昇量を表現できていることが分かる。実験値と解析値に見られる多少の違いは、現象の時間変動に対する測定データのバラツキや解析における3次元現象の単純化等に起因しているものと考えられる。切り欠部における水位が大きく上昇しており、これに伴って低水路と堤防際においても水位が上昇している。この程度の大きさの切り欠の場合には、水位上昇は上下流にまで大きく及んでいない。

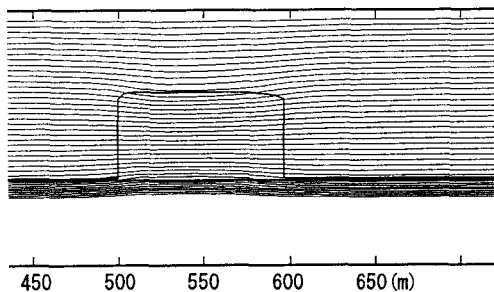


図-6 等流量線として求めた疑似流線

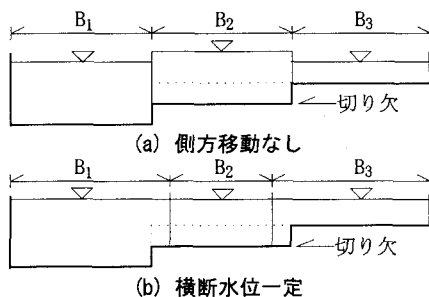


図-7 流れ場の仮定

図-5 (a)～(d)に、切り欠部の幅と長さが異なる場合の水位変動量の平面分布を示す。水位変動の大きさは切り欠形状によってそれぞれ異なっている。しかしながら、水位変化のパターンや水位変動の影響範囲は切り欠長さ・切り欠幅によって大きく異なっていない。広がり幅などは側壁等の境界の影響を受けているように見える。切り欠長さが同じ場合には、変動水位は切り欠幅の広い方が高くなっている。切り欠幅が同じ場合には、切り欠長さが異なっても切り欠部の最高変動水位は同程度であるが、堤防近傍や低水路における変動水位は、切り欠長さの長い方が高くなっている。これは、切り欠長さが長い方が水位が変動し易いためと考えられる。

図-6に横断積分した流量の値が一定となる位置を結んで求めた疑似流線を示す。切り欠のある箇所では流れが集中・発散し、堤防近傍での幅が広がっている。種々の条件に対して解析を行い、流れ場の状況を比較した結果、流れの基本形は切り欠の形状・大きさによって大きく変化することではなく、水位変動量の大きさが切り欠形状の違いにより異なっていると判断された。これらの水位変動量の違いは、主に切り欠部の水位上昇量と切り欠部・非切り欠部の幅で決まっている。

実験結果も含めて水位上昇等に平面渦等の影響が明確に現れていないのは、切り欠部に生じる死水域が切り欠に対して小さく切り欠部でも水が流れており、切り欠内部で流速が多少減ぜられて底面での摩擦抵抗が減少する等の影響が大きいかとと考えられる。逆に言えば、切り欠内部全域が死水域となるような場合には低速流体との混合が生じるため、切り欠は抵抗要素になると考えられる。

4. 切り欠による水位上昇量

水位変動が複雑になるのは、横断方向にも流れが変化し、流れの集中と発散が生じるからである。ここで、流れ場が低水路・高水敷切り欠有り部・高水敷切り欠なし部の大きく3つの流管に分けられると仮定する。さらに、極端な2つのケースとして、図-7 (a)に示す①側方へ流れが移動しない場合と図-7 (b)に示す②横断方向の水位差が生じない場合を考える。①は切り欠部で生じる可能最大の水位上昇量を表し、②は平衡な場合に生じる河岸での可能最大の水位上昇量を表すと考えられる。実際に生じる現象は、この2つの間に入ると考えられるので、水位上昇量をこの2つの状態から求める。用いる基本式は運動量の保存式と連続式である。流れによる底面の抵抗は河道全体的な平均水面勾配と釣り合っていると仮定する。すなわち、

$$Q_j = A_j u_j \quad (4)$$

$$\frac{1}{2g} \frac{\partial(Q_j / A_j)^2}{\partial x} + \frac{\partial \eta_j}{\partial x} \cong 0 \quad (5)$$

$$g \frac{\partial(z_j + h_j)}{\partial x} \cong -\frac{u_j^2}{\varphi_j^2 h_j} \quad (6)$$

が成立すると仮定する。高水敷に切り欠け有る場合には、各流管の水位変動量 $\Delta\eta$ は式(5)から

$$\frac{\Delta\eta_j}{h_j} = \frac{1}{2} Fr_j^2 \left\{ 1 - \left(\frac{A_j}{A_j + \Delta A_j} \right)^2 \right\}, \quad Fr_j^2 = \frac{u_j^2}{gh_j} \quad (7)$$

となる。ここで、 Q_j :各流管の流量、 A_j :各流管の断面積、 u_j :各流管の断面平均流速、 Δh :切り欠け部の掘削深さ、 Fr :切り欠け位置より上流でのフルード数である。①の場合には A を h に置き換える。②の場合には、 $\Delta\eta_j = \text{Const.}$ という条件の下で各流管における断面積の変化量 ΔA_j について解き、 $\Delta\eta$ を式(7)と同様な形で整理して近似的に表すと

$$\frac{\Delta\eta}{h_k} = \frac{1}{2} Fr_k^2 \left\{ 1 - \left(\frac{h_k}{h_k + \Delta h_k} \right)^2 \right\} / \left\{ 1 + \left(\frac{h_k}{h_k + \Delta h_k} \right)^3 \sum_{j \neq k} \frac{B_j}{B_k} \frac{Fr_k^2}{Fr_j^2} \right\} \quad (8)$$

が得られる。ここで、 k :高水敷に切り欠けのある流管の番号、 B_j :各流管の幅である。しかし、短い距離では②の状態まで到達できないと考えられる。したがって、水位上昇量を求めるためには、各流管の断面積の変化を明らかにする必要がある。各流管の横断方向への広がり幅 ΔB_j が求めるべき未知量であり、これは B_j/B_k 、 x/h 等によって変化する量となっている。以上より、水位変動量は一般的には

$$\frac{\Delta\eta}{h_k} = \frac{1}{2} Fr_k^2 \left\{ 1 - \left(\frac{h_k}{h_k + \Delta h_k} \right)^2 \right\} \text{func.} \left[\left(\frac{h_k}{h_k + \Delta h_k} \right), \frac{B_j}{B_k}, \frac{Fr_k^2}{Fr_j^2}, \frac{x}{h}, \frac{y}{h}, \text{etc.} \right] \quad (9)$$

の形式で表される。河岸近傍での水位上昇量を補正する無次元量は $\{h/(h+\Delta h)\}$ 、 $B_{j\max}/h$ 、 L/h である。ここで、 L は切り欠けの長さである。

直接的に水位変動量を決める無次元量は、 $\Delta A_j/A_j$ 、 $\Delta B_j/B_j$ 等である。ここでは、流れの断面積の変化と水位上昇量の関係、すなわち式(7)について検証する。図-6に示した様な擬似流線から3分割した擬似流管の幅の変化量を読み取って断面積の変化を求め、種々の条件に対する断面積の変化率と水位変動量の関係を図-8に示す。低水路部では②測線、切り欠け部では④測線または⑤測線、切り欠けなし部では⑧測線を選び、数値解析の水位変動量には、治水安全上問題となる堤防際の⑧測線で最高水位となる縦断距離におけるそれぞれの測線での値を用いた。現象の単純化、各代表値の選び方やデータの読み取り等に起因する若干のズレが存在するが、図-8から切り欠けによる水位上昇量は基本的に式(7)で表すことが可能である。しかしながら、水位上昇量を決める流れの断面積の変化量、すなわち擬似流管の横断幅の変化量を、種々の条件に対して、一般的に陽な形で表すことは難しい。

水位変動量は、切り欠け部では[①の横断方向に移動せず、水深のみが変化すると仮定した式(7)~②の式(8)]の間の値、高水敷堤防近傍では[①の①~②の式(8)]の間の値になると考えられる。ここでは、切り欠け長さに対して水位変動量がこれらの式とどのような関係になっているかを明らかにする。図-9に切り欠け長さと水位変動量の関係を示す。図は、切り欠け幅と切り欠け長さを変えた場合の水位変動量と式(8)の比を示している。プロットは、先と同様に解析結果から堤防近傍で最も水位が高くなる横断面での水位を表している。これより、高水敷堤防近傍・低水路内における水位は、切り欠け長さが長くなるとともに上昇し、切り欠け部における水位は逆に低下している。

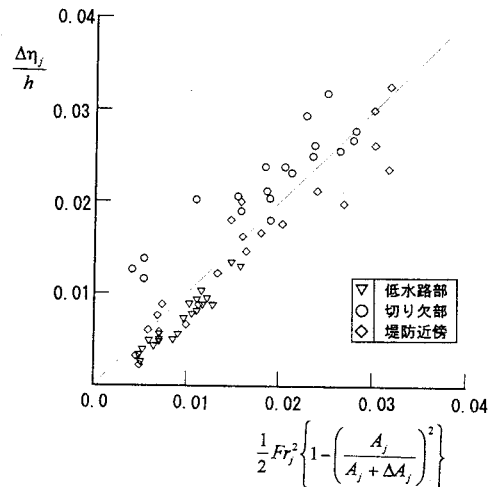


図-8 断面積の変化と水位上昇量の関係

それぞれの値は切り欠長さが長くなると式(8)で表される値に近くなっており、低水路や堤防近傍では切り欠部に比べ、多少小さい。そのため、水位は横断的には必ずしも一定となっていない。堤防近傍では切り欠が堤防から離れている方が水位上昇量が小さくなっている。これは、切り欠と堤防が離れていた方が水位変動を伝えるのに縦断距離を有するためであると考えられる。切り欠幅の違いが低水路流れに与える影響は、高水敷上の流れよりも小さい。したがって、低水路幅が切り欠幅などに比べて大きい場合には式(9)をそのまま適用するのではなく、低水路幅を低水路への影響幅などに置き換える必要があると思われる。この幅は、低水路水深の10倍程度を目安とすれば良いと考えられる。水位上昇量は、比較的短い切り欠長さで安定し、 $L/h = 20 \sim 30$ 程度の長さでほぼ変化しなくなっているようである。

基本的な水位上昇量はFr数や切り欠幅・切り欠長さによって直接表されることが明らかになった。したがって、水位上昇量に比べて高水敷上の水深が大きい場合には、水位上昇の影響が直接及び範囲の大きさは、Fr数や粗度等にあまり依存せず、水深に比例する量で表し得ると考えられる。

種々の条件に対し、図-5に示した様な水位コンターを作成し、水位変動の影響範囲を求めた。その結果、流下方向の広がり長さは水深の16~20倍、横断方向には8~10倍程度であった。

擬似流線の変動状況から判断して、流れの変動が堤防に直接作用しないようにするためには、堤防と切り欠部は高水敷水深と切り欠部水深の平均水深の少なくとも4~5倍程度以上離れた方が良いと思われる。また、堤防近傍での水位上昇量を抑えるためには、水深の10倍以上離れた方が良い。

5. おわりに

高水敷にある浅い切り欠がある場合には、断面積の局所的な変化に起因した水位上昇が局所的に生じている。切り欠の幅や深さに対する基本的な水位上昇量は運動量の原理から求められた式(8)を用いて表すことができる。各条件の下で切り欠長さに対する水位上昇量の相対的な変化は、図-9を用いて推定できると考えられる。

参考文献

- 1) 木下誠也・福岡捷二・水野高志:低水路に面した高水敷形状が流れに及ぼす影響の実験的研究, 水工学論文集 Vol. 39, 1995.

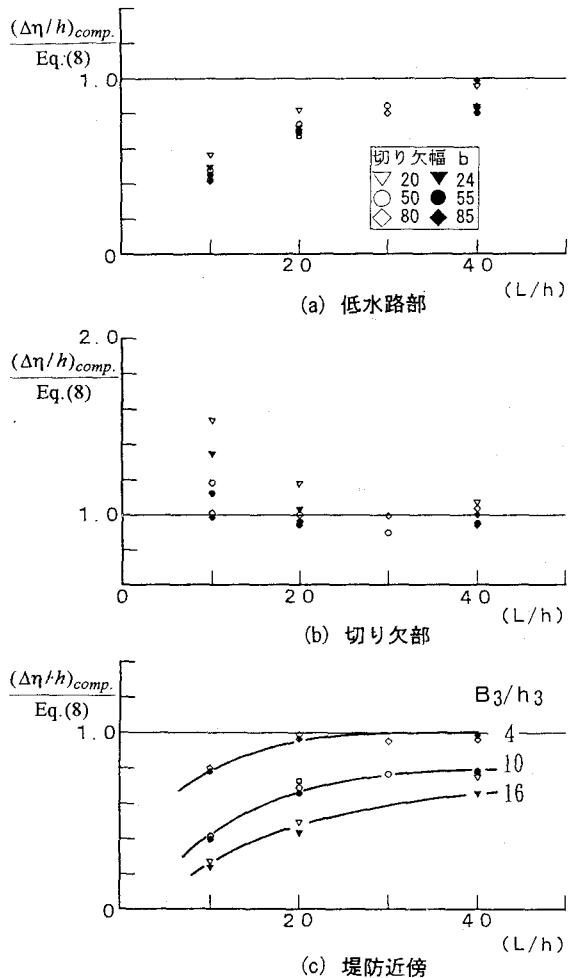


図-9 切り欠形状に対する水位上昇量と式(8)の関係