

1. はじめに

近年，河道の多様性が河川生態環境に果たす役割の大きさが再認識され，山地河川や都市河川において瀬・淵構造の保全及び創出に関する検討が行われている．このような瀬・淵構造の保全・創出にあたっては，瀬と淵の相互的な流れ構造を把握し，維持機構を検討することが必要である．本研究では瀬・淵構造における，瀬と淵が相互的に創出する流れ特性に着目し，瀬・淵構造の保全や人工的な瀬・淵構造の創出の際に必要な基礎的知見を得るため，実験水路に瀬と淵を造成し流速計測を行い，実験的に淵の流れの3次元流れ構造と淵の維持機構について検討するとともに，複雑な河床変化により生じる水位変化と流れ構造について検討するため2次元数値計算により瀬・淵構造を有する河道の流れ構造について検討した．

2. 実験方法

実験水路は，全長 13m，幅 59.3cm，高さ 30cm の勾配可変型長方形断面開水路を用いた．実験水路に造成した実験瀬淵の概形と座標系を図 - 1 に示す．実験は淵内が平面である2次元淵と片側に斜面を持つ3次元淵の2ケースで行い，共に砂河床を掘り下げてセメントで固めることによって作成した．実験淵は共に幅 59.3cm，全長 100cm で淵頭と淵尻に全長 20cm，斜面勾配 1/5 の斜面を設け，3次元淵ではさらに右岸側に全長 40cm，斜面勾配を設けた．淵最深部の深さは2次元淵では 5cm，3次元淵では 4cm とした．瀬は幅 59.3cm，全長 30cm の区間に直径 3cm の円柱を x 方向に 6個 y 方向に 12個それぞれ 2cm の間隔を空けて配置し，淵の上流と下流の2箇所を設置した．本実験では固定床条件において，2次元淵では平水時と大規模出水時の2ケースの流量において，3次元淵で

は平水時・中小出水時・大規模出水時の3ケースの流量において3次元流速計測を行い，異なる流量における瀬淵構造を有する河道の流れ構造を比較し，瀬と淵の流れ構造について検討した．水理条件を表 - 1 に示す．3次元実験淵における流量 Q は各断面で流速分布を積分し平均することで求め，水深以外の値は x=-60cm での断面平均流速を用い算定した．流速計測には I 型及び L 型の2成分電磁流速計を用い，2度の計測により u, v, w の3

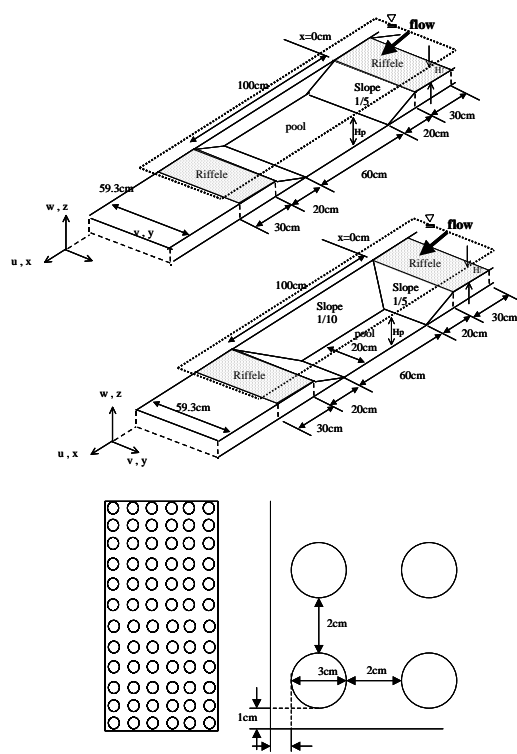


図 - 1 瀬と淵の概形と座標系

表 - 1 水理条件

Case	流量 Q	水深 H(cm)	平均流速 Um(cm/s)	レイノルズ数 Re	フルード数 Fr
TH	1.8	1.8	9.4	1692	0.224
TD	7.2	3.9	29.5	11505	0.477

Case	流量 Q	水深 H(cm)	平均流速 Um(cm/s)	レイノルズ数 Re	フルード数 Fr
SH	1.62	1.8	9.3	1674	0.221
ST	3.54	2.4	14.5	3480	0.299
SD	7.29	3.9	23.4	9126	0.379

表 - 2 3次元淵平面部内への流入流量比較

Case	Q(lit/s)	Qp(lit/s)	Qp/Q
SH	1.566517	0.615306	0.392592
ST	3.427507	1.369409	0.399153
SD	7.227352	3.065636	0.424188

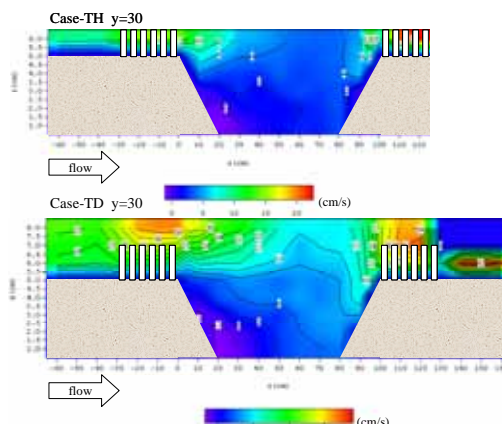


図 - 2 2次元淵主流速縦断コンター

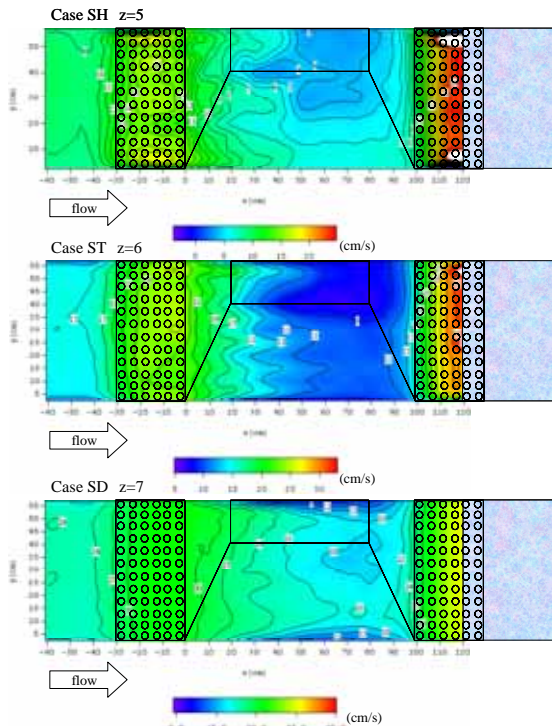


図 - 3 3次元淵主流速平面コンター

成分を計測した。淵上流端を  $x=0\text{cm}$  とし、座標系は水路中央線に沿う方向を  $x$  軸、これに直角な水平方向を  $y$  軸、鉛直方向を  $z$  軸とした。

### 3. 実験結果と考察

3次元淵内  $y=40\text{cm} \sim 59.3\text{cm}$  の淵平面部に流入する流量を  $Q_p$  とし、淵平面部への流入流量の比較を行った。その結果を表 - 2 に示す。淵平面部への流入流量割合  $Q_p/Q$  を比較すると、淵平面部への流入流量割合は Case-SD が最も大きく、流量の大きなケースになるほど割合は増加していく。このことから、流量の大きいケースほど平面部に流れが集まっていることがわかる。図 - 2 に2次元淵の Case-TH,TD における主流速縦断コンターを示す。どちらのケースでも流速は瀬部で加速され、淵で減速されるという一般的特性を示す。また  $x=50\text{cm}$  までの淵上流部では表面に瀬の影響と思われる高い流速が見られ、底面部では逆流を伴う減速域が発生する。流量の増加に伴い表面部の流速は高くなり、流下方向に大きく張り出している。 $x=50\text{cm}$  からの淵下流部では表面の流速が下がり、底面の流速が上がっており、表面と底面の流速差が少なくなっている。このことから、2次元淵では段落ち流れのような剥離を伴う流れが発生していると思われる。図 - 3 に3次元淵の各ケースにおける  $z=5,6,7\text{cm}$  の表面部主流速平面コンターを示す。 $x=120\text{cm}$  よりも下流では跳水により水深が低下していたため、計測を省いてある。全てのケースで流速は瀬部で加速され、淵で減速されるという一般的特性を示す。淵上流部では2次元淵と同様に高い流速が見られ、この高速域は流量の増加に伴い流下方向への張り出しが大きくなる。また、この高速域において Case-SH,ST では  $y=40\text{cm}$  を、Case-SD で

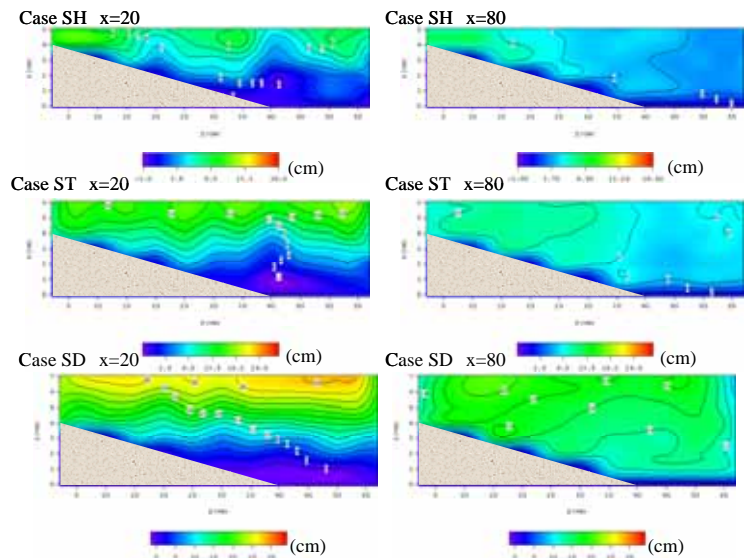


図 - 4 3次元淵主流速横断面コンター

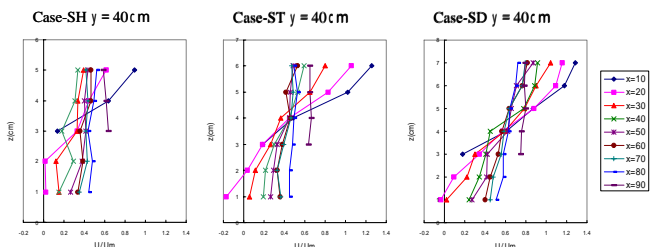


図 - 5 主流速鉛直分布  $u/U_m$

は  $y=30\text{cm}$  を境界として2つの流心が存在している。淵下流部ではどのケースでも右岸斜面部よりも平面部が低い流速を持ち、それぞれにおいてほぼ一般的な流速分布を示す。下流斜面では流速が加速されている様子が見られる。また、Case-SD の両岸壁面部において  $x=80\text{cm}$  を頂点とした凸型の減速域が発生している。

次に図 - 4 に3次元淵の各ケースの  $x=20,80\text{cm}$  における主流速横断面コンターを示す。各ケース共に  $x=20\text{cm}$  において右岸斜面と上流斜面及び平面部の合流部である  $y=40\text{cm}$  底面部に減速域が発生しており、Case-ST,SD では逆流の発生も見られる。この減速域は流量の増加に伴い発生規模が大きくなる。また  $y=40\text{cm}$  での減速域が顕著に見られる Case-SH,ST では、減速域の両側に流心が見られ、 $y=30\text{cm}$  で減速域の発達が見られる Case-SD では、 $y=30\text{cm}$  の両側に流心の発生が確認できる。淵下流部である  $x=80\text{cm}$  では、全ケースで鉛直方向にほぼ一般的な流速を持ち、淵上流である  $x=20\text{cm}$  と比べて表面流速は低下し、底面流速は増加している。また、Case-SD の両岸壁面部では2次元的な緩速域の発生が確認できる。図 - 5 に3次元淵の  $y=40\text{cm}$  における主流速鉛直分布  $u/U_m$  を示す。主流速は各ケースの  $x=-60\text{cm}$  の断面平均流速によって無次元化されている。全てのケースにおいて淵上流部では右上がりの傾きが大きく、表面部では流下に伴い流速が低下し、底面部では逆に加速している。また

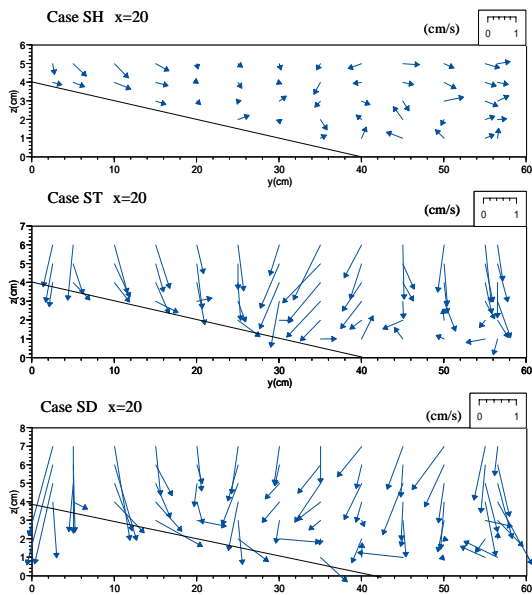


図 - 6 3次元淵2次流ベクトル

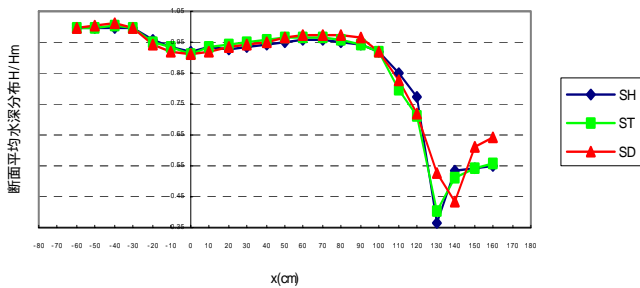


図 - 7 3次元淵断面平均水位縦断分布

Case-ST,SD では  $x=20\text{cm}$  において逆流の発生も確認できる。また流量の増加に伴い、全体的に右上がりの傾きが大きくなっている。下流斜面部である  $x=90\text{cm}$  はこれに当てはまらず、底面の流速が高くなっている。これらの結果より、淵内上部における右岸斜面と上流斜面および平面部の合流点において、剥離を伴う流れが発生していると思われる。また剥離の発生地点を境に瀨によって加速された流れが2つの流心に分かれ、淵下流部ではこれらの流れが拡散して底面流速が増加していると考えられる。図 - 6 に3次元淵の  $x=20\text{cm}$  における2次流ベクトル( $v,w$ )を示す。Case-SH,ST では剥離渦の発生する  $y=40\text{cm}$  底面において上昇流の発生が見られる。Case-SD では表面の下降流に比べ上昇流は小さくなるが、 $y=30\text{cm}$  から  $40\text{cm}$  の広い範囲にかけて上昇流が見られる。またどのケースにおいても上昇流の両側に下降流の収束する箇所が見られ、これは主流速横断面コンターで見られた流心の発生位置と一致する。このことから、淵内で見られる流心は剥離渦による2次流によって発生したものと考えられる。またCase-ST,SD における兩岸壁面部は強い下降流が発生している。

瀨淵構造を有する河道の水位変動を検討するため、図 - 7 に3次元淵のそれぞれのケースで  $x=-60\text{cm}$  における水位  $H_m$  で無次元化し断面平均した水位縦断分布  $H/H_m$

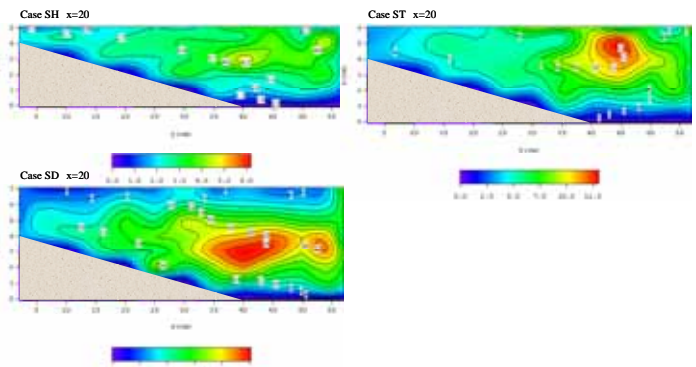


図 - 8 3次元淵乱れエネルギーコンター

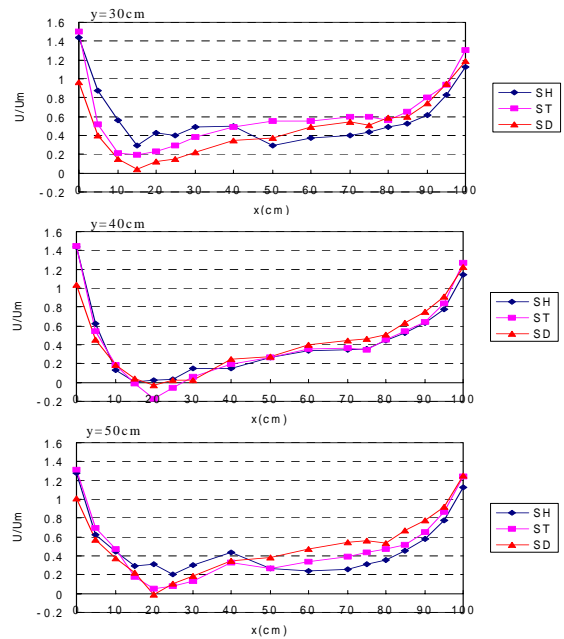


図 - 9 3次元淵底面流速分布

を示す。水位は同一点において水深計測を行い、下流端のレベルを0とした上で勾配を加えたものを水位とした。上流瀨部、下流瀨部において水位の低下が見られ、下流瀨部の後方では跳水が発生しているため大幅な水位の低下が起こっている。淵内部を見ると、瀨部の影響で淵頭では水位が低下しているが、流下に伴い河床が低下すると水深が増加するという河床形状と水面形の半位相の性質により水位が上昇し、 $x=70\text{cm}$  を頂点とした凸型の水位分布になっており、 $x=50\text{cm}$  に凸型の頂点が発生していた瀨を設置しない場合よりも頂点が下流に移動している。それぞれの水位変動を比較すると、上流瀨部ではCase-SDが、淵上流ではCase-STが、淵下流ではCase-SDが最も水位変動が大きくなっている。これはCase-SHに比べ両者のフルード数が大きいからだと思われる。またこの流量の増加に伴う水位変動の上昇および凸型の頂点の移動は、主流速コンターにおいて流量の増加に伴い発生した凸型の緩速域の拡大及び頂点の移動と一致し、これにより淵の実験で発生する壁面部の凸型緩速域は水位変動がもたらしたのだと考えられる。下流瀨部及び跳水の発生地点ではCase-SHが最も大きな変動を示すが、これは

下流瀬部において流量が低い場合、瀬の出口で落ち込みのような流れになっていたことと、限界水深が最も低いことが原因と思われる。

淵の維持機構について検討するため、図 - 8 に各ケース  $x=20\text{cm}$  における乱れエネルギーカウンター  $k$  を示す。全てのケースで剥離渦が発生する  $y=40\text{cm}$  の上部に高い乱れエネルギーがみられる。また、流量の増加に伴い乱れエネルギーは増加しており、出水時には落ち込み部において淵頭で大きな巻き上げが起こると考えられる。次に図 - 9 にそれぞれのケースにおける  $x=-60\text{cm}$  の断面平均流速で無次元化された 3 次元淵の各ケースの  $y=30,40,50\text{cm}$  における底面から  $1\text{cm}$  での底面流速分布  $U/U_m$  を示す。全てのケースにおいて淵下流で底面流速の増加がみられ、また各ケースを比較すると、流量の増加に伴い淵平面部の流速勾配が大きくなっている。このことから、淵の維持機構として重要と思われる淵頭での巻き上げと、底面流速の増加による掃流力の増加が今回の実験においても良好に起こっていると思われる。

#### 4. 2 次元数値計算結果

本研究では 3 次元淵の複雑な河床変化とそれに伴う流れ構造と水位変化の再現を行うため、水位変動の計算が可能な 2 次元での数値計算を試みた。本研究における数値解析には水深平均の二次開水路浅水方程式を支配方程式として、これを数値計算によって解くものとする。基礎方程式を表すと以下ようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (3)$$

これをコントロールボリューム法で離散化し、圧力解法には SIMPLE 法を用い、移流拡散の解析にはハイブリッド法を用いた。図 - 10 に各ケース斜面と平面の合流部である  $y=40\text{cm}$  の水深平均流速  $\bar{u}$  (実験値(exp), 計算値(cal)) を示す。Case-SH は上流瀬部で良好な再現性が見られるが、流量の増加に伴い実験値よりも計算値が低くなっていく。またそれに伴い、上流瀬部の流速も計算値が実験値を下回る結果となり、瀬部での流速の再現性に問題が残る。また剥離渦の発生地点では逆に Case-SH, ST において計算値が実験値を上回る結果となっており、2 次流の再現が必要であると思われる。淵下流部の流速上昇に関してはおおむね良好な結果となったが、下流瀬部の流速は上流瀬部と同様に計算値が実験値を大きく下回る結果となった。図 - 11 に各ケース  $y=40\text{cm}$  の水位縦断分布 (実験値(exp), 計算値(cal)) を示す。各ケース共に瀬部の水位低下などの概形は再現されているが計算値

が実験値を上回る結果となり、流量の増加に伴い実験値との差異が大きくなる。下流端での水位は再現されているが、跳水での水位低下において大幅な差が出ており、跳水時の再現性を高めることで、計算の再現性を高めることができると思われる。また実験結果で見られた凸型の水位上昇が計算結果では再現されなかった。

#### 5. おわりに

本研究では瀬淵構造を持つ河道の流れ特性に着目し、実験と数値計算により瀬と淵の流れ構造と維持機構について検討した。瀬を設置したことにより瀬部での流速が増加し、瀬部後方の淵内にも高い速度を持つ流れが流入するようになった。またこれにより淵内部の落ち込み部において剥離渦の存在が顕著となり、表面流速と底面流速の差が大きくなったことから拡散が起こる様子が観測された。本研究の結果として予想される瀬淵構造をもつ河道の流れ構造は、瀬によって加速が起こり、淵の河床形状から剥離渦が発生し、剥離渦による 2 次流で流心の形成が起こり、流心の補償流として水位変動により兩岸に緩速域があらわれ、淵下流で流心が拡散し、底面流速の増加により掃流力が増加し、再び瀬によって加速が起こる、という順序で起こっていると考えられる。また今後の課題として本研究の結果から、淵の維持機構を高める方法として、剥離渦の発生地点をコントロールすることにより流心を壁面にぶつけ、洗掘機能を高める方法や、河床を段階的に増加させることで緩速域の発生を抑制し、壁面での洗掘を促す方法などが考えられる。

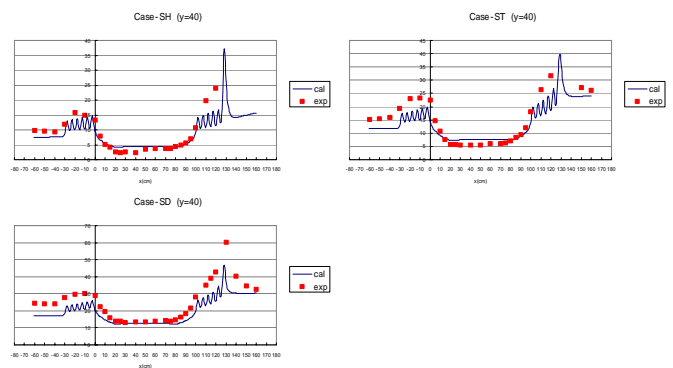


図 - 10 水深平均流速  $\bar{u}$  (cm/s)

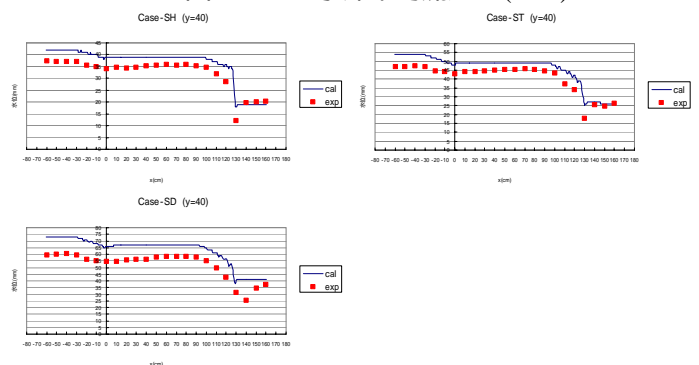


図 - 11 水位縦断分布