

洪水流の抵抗と流れ構造に及ぼす高水敷樹木群配置の影響

Influence of Arrangement of Trees in Flood Plains on Flow Resistance and Structures

富永晃宏*, 長尾正志**, 劉建***, 鈴木徹也***

By Akihiro TOMINAGA, Masashi NAGAO, Jian LIU and Tetsuya SUZUKI

The resistance and flow structures are studied experimentally in compound open channel flows with trees on the flood plains. Compound roughness coefficient increases in proportion to the number of rows of trees, but the resistance is larger in the case of inside rows than the bank-side rows. The arrangement of inside rows of trees increases the velocity near the bank. The interaction between the flow in trees and ambient flow generates characteristic 3-D flow structures. The depth-averaged features are reasonably predicted by the numerical calculation of the transverse momentum transport equation.

Keywords: vegetation in flood plain, compound channel, flow resistance, flow structure

1. まえがき

河川高水敷の有効利用や生態系の保全のためには、洪水時の高水敷の植生や樹木の存在が高水敷の疎通能や低水路の流動へ及ぼす影響を的確に評価することが必要とされる。複断面水路については、低水路の高速流れと高水敷の低速流れとの運動量交換によって抵抗が増大し、これには2次流による運動量輸送効果も大きく寄与している¹⁾。この場合、高水敷水深 h の全水深 H に対する比が大きくなるにつれて横断方向の運動量輸送効果は減少していく。しかし、高水敷の粗度は低水路のそれに比べて大きいと考えられ、この場合には粗度による減速効果により水深比がある程度大きい場合でも大きな流速勾配が維持され、洪水時に h/H が0.5以上となるようなときでも大きな見かけのせん断応力が働く²⁾。さらに、高水敷に樹木群がある場合には、高水敷水深の増大とともに流水断面積に占める樹木群の割合が増大することから、高水敷流れと低水路流れの相互作用はますます増大することが予想される。福岡、藤田³⁾は河道内の樹木群の水利的影響を詳細に検討し、合成粗度係数は水深の増加とともに増大することや、水路中央におかれた樹木群はその幅が小さくても大きな抵抗を与えること、側壁近傍の樹木群は側壁近くの流速を増大させることなどを示し、河道内樹木の取扱いに関するガイドラインも提案されている⁴⁾。高水敷の樹木群を想定した研究もいくつかみられるが^{5), 6)}、本研究では、樹木群の配置が重要な設計項目となると考え、高水敷上に樹木群を設置し、その横断面内の設置幅と配列を変化させた実験を行い、流れの抵抗や局所流動に及ぼす影響を検討した。また、水深平均された運動方程式の数値計算からこれら樹木群の配列の影響を評価した。

* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科
(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

** 正会員 工博 名古屋工業大学教授

*** 学生会員 名古屋工業大学大学院

表-1 実験条件表

CASE	流量 Q(l/s)	低水路 水深 H(cm)	高水敷 水深 h(cm)	釘の配列	断面平均 流速 U _m (cm/s)	最大流速 U _{max} (cm/s)	エネルギー 勾配 I _e	Q _{fp} /Q
KN10	10.4	8.23	2.33	-	42.5	55.4	1.72E-3	0.349
OT10	10.4	8.46	2.56	外側2列	40.5	52.4	2.45E-3	0.337
MT10	10.4	8.49	2.59	中央2列	40.0	53.8	2.53E-3	0.325
KT10	10.4	8.58	2.78	内側2列	39.2	52.2	2.70E-3	0.372
OF10	10.4	8.52	2.62	外側4列	39.7	58.5	3.42E-3	0.265
KF10	10.4	8.61	2.71	内側4列	39.0	55.7	3.56E-3	0.321
KS10	10.4	8.65	2.85	6列	38.7	59.1	4.79E-3	0.269
KN18	18.7	9.55	3.65	-	54.0	65.1	1.98E-3	0.466
OT18	18.7	10.38	4.48	外側2列	50.3	65.5	3.57E-3	0.422
MT18	18.7	10.66	4.67	中央2列	48.9	64.2	3.65E-3	0.425
KT18	18.7	10.70	4.80	内側2列	47.9	59.5	3.67E-3	0.478
OF18	18.7	10.70	4.80	外側4列	47.9	69.5	5.80E-3	0.365
KF18	18.7	10.94	5.04	内側4列	46.2	65.0	5.38E-3	0.426
KS18	18.7	11.43	5.53	6列	43.3	66.9	7.12E-3	0.370

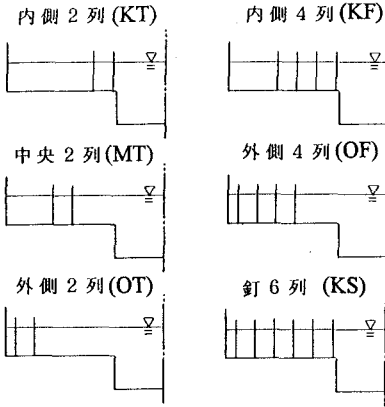


図-1 樹木群配列

2. 実験方法

実験は幅60cm, 長さ13mの勾配可変型開水路で行った。水路両岸に幅20.5cm, 高さD=5.9cmの木製の高水敷を設置し, 対称複断面とした。樹木群模型として直径3.5mm, 長さ8cmの釘を用い, 横断方向に3.6cm間隔で, 2列, 4列および6列(高水敷全幅に対応)の3通りの樹木群幅を設定し, 横断方向の設置場所を図-1に

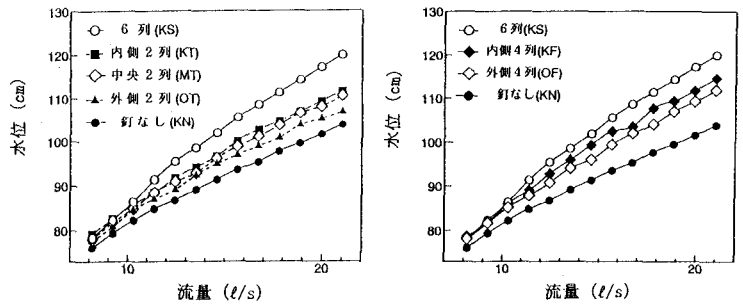


図-2 水位・流量曲線

示すように与えた。流下方向には7.2cm間隔として, 上流から4mから9mの5m区間に両高水敷に対称に設置し, 流速計測断面は上流より7mの位置に設定した。今回は樹木群の配列のみに着目しようとしたため, 樹木群密度はこの1通りとした。実験条件を表-1に示す。流量は電磁流量計とインバータモータによって制御し, まずそれぞれの樹木群の配置について, 水位・流量関係を計測した。流速計測に関しては流量を約10ℓ/sと18ℓ/sの2通りとした。水路勾配は滑面で等流となるようにS=0.001と固定しているため, 樹木群のある流れでは等流とならず, 不等流において流速計測を行っていることになる。これは流れを等流にするためには, 水路勾配をかなり急にしなければならず, この方が現実的であると判断したからである。流速はピトー静圧管と差圧トランスデューサーを用いて, サンプルング周波数100Hzで41秒間計測した。流下方向の水面形はデジタルポイントゲージで計測した。

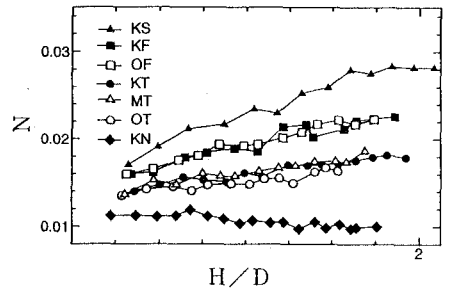


図-3 合成粗度係数

3. 抵抗特性

図-2に樹木列が2列および4列で配列を変えた場合の流速計測位置における水位・流量曲線の変化を示す。図には樹木がない場合と6列の場合の曲線も示している。基本的に樹木列数の増大とともに水位が増し, 抵抗が増大していることを示しているが, 同じ列数でもその配列によって水位上昇量が異なる。すなわち, 2列の場合は高水敷の外側が最も小さく, 中央, 内側の順に大きくなるが, 後者の2つの配列では大きな差はない。4列の場合にもやはり内側の配列の方が外側より大きくなる。したがって, 樹木群が低水路寄りにある場合はその両側に強いせん断層が形成され, 運動量交換による抵抗が増大したものと考えられる。次に, 樹木列設置区間の水面

形からエネルギー勾配を算出し、福岡・藤田と同様の方法⁷⁾で合成粗度係数 N を計算した。この N の相対水深 H/D に対する変化を図-3に示す。樹木群がある場合は、若干のばらつきがあるが、水深の増加とともにほぼ直線的に増大し、その傾きはほぼ樹木の列数に比例している。合成粗度係数 N によると水位・流量曲線にみられた2列および4列の樹木群の配列による違いは、2列の外側配列が特に小さいほかは明確でなくなった。これは、樹木群の設置区間が限られていることや、水面変動による水面勾配の誤差等によって不明確になったものと考えられる。

4. 平均流速分布特性

図-4に流量が18 l のケースの主流速コンターを示す。比較のために $U=50\text{cm/s}$ の等値線を太線で示している。それぞれの樹木群配列の特徴を以下に述べる。

(a) 6列樹木群 (KS18) 高水敷上の流速は低水路流速の影響を受けずほぼ一様となる領域が存在する。この高水敷上の抵抗の増大により水深がかなり大きくなり、また低水路内の流速が樹木群がない場合よりも大きく、高速流が壁面近くまで入り込んでいる。低水路高水敷の境界領域では流速差が著しく強いせん断層が形成されている。

(b) 高水敷外側2列樹木群 (OT18) 高水敷側壁近傍の減速により高水敷中央付近にかけて横断方向せん断層が形成され、これに伴い低水路内流速が若干減速されるが、低水路内の構造は樹木群がない場合と大差ない。等流速線の形状から、高水敷エッジでの斜昇流¹⁾の影響は認められるが、その角度はやや低水路側水面近くに入り込んだ形になっている。

(c) 高水敷中央2列樹木群 (MT18) 樹木群両側にほぼ対称なせん断層が形成される。低水路の高水敷高さより下の領域では外側2列のものとはほぼ同じだが、水面側ではこれより多少減速されている。低水路・高水敷境界領域での等値線の突出はより低水路側に寝た形となり、水面側では等値線が高水敷側に大きく傾斜し、これは低水路から高水敷に運動量が輸送されていることを示しているものと考えられる。

(d) 高水敷内側2列樹木群 (KT18) この場合樹木群内の流速が周辺からの運動量の入り込みにより他のケースより速くなっており、また両側の横断方向速度勾配も比較的緩やかになっている。低水路内の流速はこのケースが最も低速となり、特に低水路水面近傍での減速が著しい。特に注目すべき点は樹木群と高水敷側壁で挟まれた領域が非常に高速となることであり、最大流速はこの水面近傍に現れる。結局樹木群による減速分がこの領域の加速につながり、低水路内は樹木群の低速流との運動量交換により減速されたものと考えられる。

(e) 高水敷外側4列樹木群 (OF18) このケースの低水路側の流れ構造は高水敷中央2列の場合と類似しているが、低水路内の流速は最も高速となっている。高水敷エッジからの等値線の突出がほぼ水平に低水路側に向かっており、水面近傍では低水路から高水敷に突出している。特に樹木群の低水路側境界付近の領域では等値線

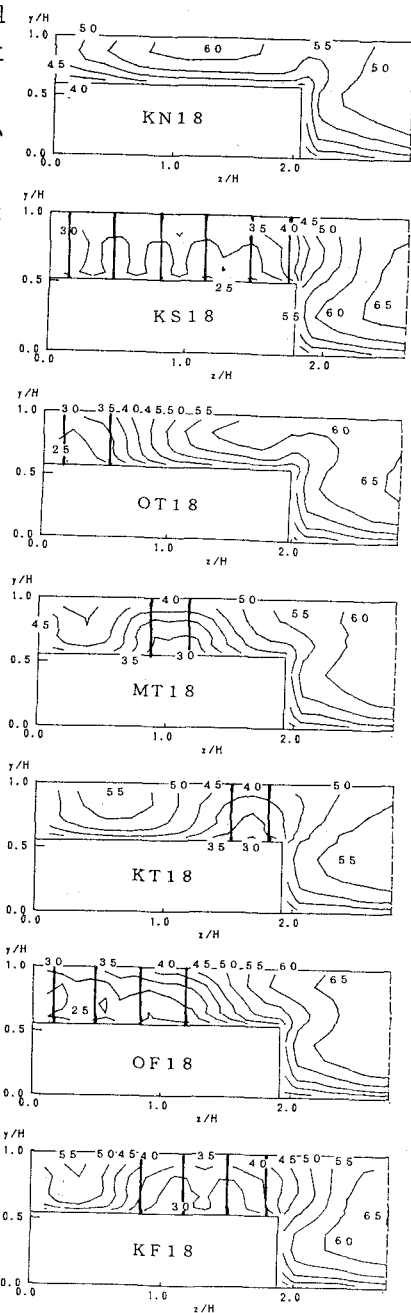


図-4 主流速コンター

が大きく樹木群内側に向かって傾斜し水面から高速流が流れ込んでいることを示すものとして注目される。

(f)高水敷内側4列樹木群 (KF18) このケースの低水路側の流れ構造が6列樹木群のものと同様に類似している。また、高水敷中央2列の場合と同様な両側のせん断層が形成されているが、高水敷側壁側に比較的大きな流速が現れている。

全体を通してみると、複断面水路に特徴的な2次流による運動量輸送は、高水敷の内側に樹木群がある場合はほとんど認められなくなるが、外側寄りには高水敷エッジからの低水路側への輸送が水平に近づく傾向にある。さらに樹木群内の等値線はΩ型の形状を示し、水面側に高速流の入り込みが認められる主流速の鉛直分布の1例を示すと図-5のようであり、樹木群内では高水敷上水深の半水深から水面にかけて急加速していることがわかる。本研究では2次流の計測は行われておらず2次流構造は不明であるが、このことは水面近くで樹木群内への高速流体の輸送が活発であることを意味し、強い2次流の存在が示唆されるものである。

次に、水深平均流速 U_m の横断分布について検討する。まず流量による違いについては、18ℓ/sでは樹木群がない領域の流速の10ℓ/sのときの値からの増加率が樹木群内のそれに比べて大きくなり、結果的に境界部の横断方向速度勾配が大きくなる。しかし、この点を除けばほぼ相似な分布とみなせるので、ここでは10ℓ/sの結果について図-6に示す。いずれも高水敷上では樹木群領域で減速した凹型の分布形状を示す。境界のせん断領域においては、低水路の高速流の影響を受ける領域では横断勾配が大きくなるが、それ以外の領域ではほぼ同程度の横断勾配を示している。また、高水敷上の樹木群の配列によっては樹木がない場合の流速よりも大きくなる部分が現れる点が注目すべきである。ここで、表-1に示している高水敷の流量 Q_p と全流量 Q の比 Q_p/Q について検討する。2列樹木群の場合内側では樹木群なしの値よりも大きくなり、外側、中央の順に小さくなるが、高水敷流量は依然比較的大きな割合を占めている。4列の場合も内側では高水敷流量があまり減少しないが、外側ではかなり減少し、6列の場合と同程度にまでなる点が注目される。

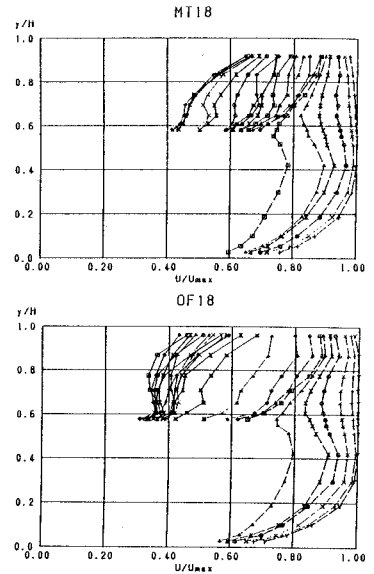


図-5 主流速鉛直分布

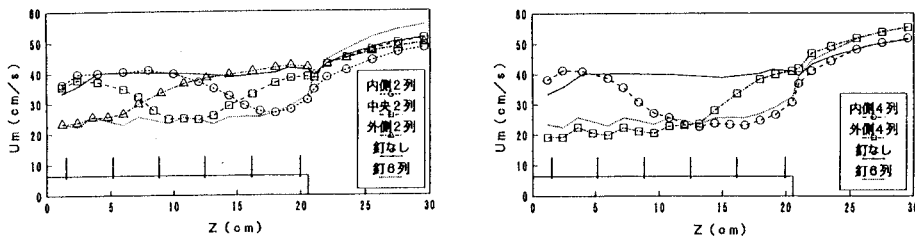


図-6 水深平均流速の横断分布

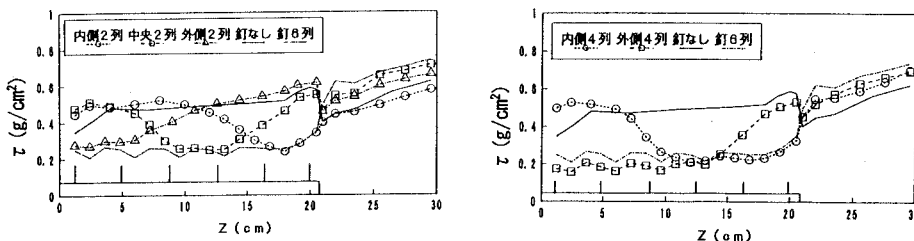


図-7 底面せん断応力の横断分布

底面せん断応力分布は底面近傍の対数則分布から求められた。樹木群内では流速分布が対数則とはかなり異なったものとなるが、この場合は壁に最も近い点での流速を用いて算定した。底面せん断応力分布を図-7に示す。分布形は水深平均流速の分布と同様ではあるが、より底面近くの流速が反映されている。樹木群がある場合、低水路内のせん断応力は内側2列の場合を除いてかなり増大している。高水敷上では、樹木群のない領域でせん断応力の増大が顕著で、樹木群なしの場合の値を上回る箇所がある。特に内側に樹木群をおいた場合の高水敷側壁近傍の増大は大きくこのような配列においては十分な注意が必要である。

5. 横断方向運動量輸送の数値計算

樹木群が存在する場合の流れの解析法としては、池田ら⁸⁾の解析的な方法や、福岡ら⁹⁾の断面分割的な方法がある。また、2次元モデルとしては、渡辺、清水の研究¹⁰⁾や大規模渦構造をモデル化した福岡らの研究¹¹⁾がある。福岡ら⁹⁾の方法は複断面水路にも適用でき、断面をせん断層で区切られるいくつかの小断面に分けて、この小断面内の平均流速と周辺境界のせん断応力を考慮するものである。しかし、分割が粗いことと、抵抗係数を境界の種類によって変えている点が問題となる。この方法は不等流計算に取り込むことを前提としているため、簡略化はやむをえないものと思われるが、ここではより一般的な解析法と実験結果の説明を行うことを目指して、水深平均されたレイノルズ方程式を渦動粘性モデルを用いて数値計算する方法を採用した。定常な等流の流れ方向のレイノルズ方程式を河床から水面まで積分すると、河床高さ、粗度、樹木による形状抵抗が横断方向に変化する流れの基礎方程式が得られる。

$$\frac{d}{dz}(E_{xz}h)\frac{d\bar{U}}{dz} + ghI_e + -U_*^2 - D - A_w = 0 \quad (1)$$

ここに、 E_{xz} は水深平均横断方向渦動粘性係数、 \bar{U} は水深平均流速、 h は水深、 I_e はエネルギー勾配、 U_* は摩擦速度、 A_w は二次流による移流輸送項、 D は樹木形状抵抗であり、流下方向乱れ垂直応力の拡散項は無視している。 I_e は次式で表され、不等流の効果が含まれる。

$$I_e = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\bar{U}^2}{2g} + z + h\right) \quad (2)$$

また摩擦速度は、マニング式から次式で表される。

$$U_*^2 = gn^2\bar{U}^2/h^{1/3} \quad (3)$$

これらを \bar{U} について、コントロールボリューム法によって離散化する。側壁の境界条件として、水深平均流速の対数則の成立を仮定した。渦動粘性係数 E_{xz} は底面せん断と横断方向拡散に依存する部分(第1項)に加えて、大規模水平渦による水平混合の効果を加味した部分(第2項)を取り入れて表現した。

$$E_{xz} = \lambda_0 U_* h + \lambda_1 h^2 \left| \frac{d\bar{U}}{dz} \right| \quad (4)$$

と表し、式中の定数は、従来の研究成果を考慮しながら実験値に一致するように、 $\lambda_0 = 0.40$ 、 $\lambda_1 = 0.01$ と全ケースに一定値を与えた。ここで第1項の係数は粗面の複断面開水路流れに適用した $\lambda_0 = 0.14$ ⁸⁾よりかなり大きな値であり、池田らの示した値0.23よりも大きい。樹木群の場合横断方向混合がかなり活発になったためと考えられる。第2項の長さスケールは本来横断方向スケールであるべきであるが、ここではこのスケールも水深に支配されるとして水深 h を用いている。結果的に第2項はほとんど計算結果に寄与していない。また、側壁近傍では放物線分布によって減衰させている。樹木群の形状抵抗については、釘1本あたりに働く抗力を考慮してコントロールボリュームに働く力のつり合いから、単位面積あたりの抗力 D を次式で与える。

$$D = (1/2)\rho C_D \beta dh\bar{U}^2 \quad (5)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 d は釘の直径、 C_D は抗力係数、 β は密度パラメータである。マニングの粗度係数については、全ケースに平均的に最も一致するように定め、 A_w はとりあえず無視することとした。境界条件としては側壁で対数則を仮定し、低水路側壁の抵抗も考慮している。

図-8に2列樹木群の3通りの配置の水深平均流速の計算結果を示す。樹木群内部の流速はだいたいにおいて一致しており、形状抵抗の評価は妥当であったといえる。また、樹木群の位置の変化による全体の流速分布の変化がよく再現されている。しかし、低水路及び高水敷肩付近にかけての計算値が過大となり、高水敷側壁側が過小となる傾向が認められた。これらの原因としては、樹木群内部や低水路における3次元的流れ構造の影響によるマニング式の適用性の問題があるものと考えられる。図-9に特徴的なケースの底面せん断応力分布を示す。樹木群内部で計算値が小さくなるが、接合部や横断分布の傾向はうまく再現されている。特にこのケースでは、樹木群と堤防あるいは低水路に挟まれた領域のせん断応力が、樹木群なしの値より大きくなるという注目すべき特徴を予測している⁴⁾。

6. あとがき

種々の配列の高水敷樹木群を有する複断面開水路の抵抗と平均流速分布特性を実験的に検討し、樹木群の洪水流に及ぼす影響を明らかにした。樹木群密度が同じでもその設置場所の違いにより、抵抗および平均流速分布構造が変化した。特に、樹木群が低水路側に近い方が抵抗が大きくなり、この場合は高水敷側壁側に通常より高速な流れが発生する点が指摘された。また、樹木群内の流速分布は水面近くが加速された特異な分布をしており、2次流構造の変化が示唆されたが、この点については今後検討する必要がある。さらに、横断方向運動量輸送式の数値計算により、普遍的な渦動粘性係数を用いて、このような樹木群を有する複断面流れの予測がある程度可能であることが示された。渦動粘性係数については他の比較的大きな規模の実験ケースとの比較を行い検討する必要がある。なお本研究は、河川環境管理財団の補助を受けて行われたことを記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 富永晃宏・江崎一博・小葉竹重機, 土木学会論文集, 第417号/II-13, pp.129-138, 1990
- 2) 富永晃宏, 水工学論文集, 第37巻, pp.587-592, 1993
- 3) 福岡捷二・藤田光一, 土木研究所報告, 第180号, pp.129-192, 1990
- 4) 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案), リバーフロントセンター編集, 山海道, 1994
- 5) 佐野良久・野崎一郎・濱谷拓・中井正則・管和利: 水工学論文集, 第35巻, pp.483-488, 1991
- 6) Pasche, E. and Rouve, G.: J. of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.111, No.9, pp.1262-1278, 1985
- 7) 福岡捷二・藤田光一, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp.63-72, 1989
- 8) 池田駿介・泉典洋, 土木学会論文集, No.434 /II-16, pp.47-55, 1991
- 9) 福岡捷二・藤田光一・新井田浩, 土木学会論文集, No.447/II-19, pp.17-24, 1992
- 10) 渡邊康玄・清水康行, 第42回応用力学連合講演会講演予稿集, pp.127-130, 1993
- 11) 福岡捷二・渡辺明英・津森貴行, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.41-50, 1994

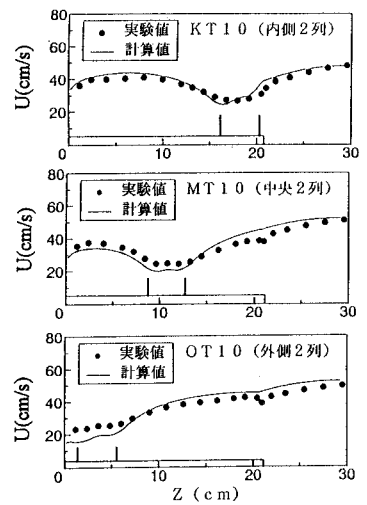


図-8 水深平均流速の計算値

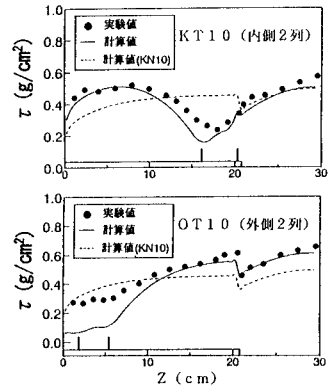


図-9 底面せん断応力の計算値