

植物等による河川堤防の法面保護に関する調査・研究

1. はじめに
2. 芝により保護された土砂層上の流れの評価
3. 芝により保護された土塊が破壊に到るメカニズムに関する一考察
4. 補強材としてのジオテキスタイルシートが植生で被われた法面の
耐浸食性能に及ぼす影響について
5. 河川の横断面形状変化に伴う壁面せん断力分布への影響について
6. おわりに

早稲田大学 理工学部 関根正人

1. はじめに

近年、河川をとりまく水辺空間の環境整備が叫ばれている。こうした中、これまでの治水一辺倒の川づくりの問題点が指摘され、技術的な進歩による治水安全度の向上とも相まって、「多自然型」あるいは「自然に優しい」川づくりを目指す気運が高まり、一部にはこのような考え方に基づく行政的な措置が講じられ始めている。ところで、自然に優しい川づくりとはいかなるものを指すのであろうか。コンクリートで固められていた護岸を剥げばよいというわけではなく、当然のことながら治水安全度は現状を維持しなければならない。言い換えれば、環境あるいは景観のみの議論で川づくりができるわけではないのである。そこで必要となるのは新たな技術の開発ということになる。本研究では、河川堤防をコンクリートブロックに代わって「芝などの植物」で被い、河川環境および景観の向上をはかることを念頭に置き、このように保護した堤防法面が流水の浸食に対して十分な強度を有するようにするためにはどのような対策を講じるべきであるかについて検討した。

主な検討事項は以下の通りである。

1. 芝により保護された土砂層上近傍の流れを理解する。
2. 芝に保護された土塊が破壊に到るメカニズムについて一考察を加える。
3. 芝などの植生で被われた土砂層の強度向上のためには、どのような補強方法が可能であるかを探る。
4. 堤防法面に作用する壁面せん断力そのものを低下させるためにはどのような横断面形状であればよいのか、という問い合わせるために、簡便な壁面せん断力の評価方法を開発する。

平成5年度には、まず研究全般にわたっての文献調査を行い、その上で上記1に関する実験的検討を行った。ここでは、法面を芝で保護した場合に生じる破壊のメカニズムを明らかにするための準備として、矩形断面閉管路の底面に芝で被われた土層を設置し、その上の流れを電磁流速計により、土層表面における圧力変動を圧力センサーによって計測している。これにより、芝面近傍の流速場の特性ならびに河床面における圧力の時間変動特性などが明らかになった。この成果については第2章において説明している。

平成6年度には、まず、前年度の実験を継続し、補足的な実験を行った。さらに、芝などの植生で保護された法面が破壊に到るメカニズムを明らかにする目的で、毛根層（ここでは、層内の土砂と合わせてこの層を「マット層」と呼ぶ）を含めた芝の層の上下面近傍の流れおよび圧力の詳細な測定を行っている。ここでは、浸透流の影響に着目し、たとえば、上下面における圧力差の時間変動を測定したことなどが特徴である。さらに、現地における報告にもある通り、芝面の管理が十分で、弱点となる点がない場合には、かなりの流速に対してまで芝面が破壊に到ることはないと考え方もあり、たとえば「もぐら穴」等が弱点となっている可能性があるとされる¹⁾。そこで、ここではこの点に注目し、もぐら穴を模した穴をマット層を貫くようにあけ、この穴の存在が芝面近傍の流れ場に与える影響を定量的に調べている。その成果は第3章にまとめられている。さらに、河川堤防を植生により保護する際に重要となる「河道壁面上のせん断力」を評価する簡易モデルを開発した。そして、モデルの妥当性の検証を行った後、これを用いたいくつかの数値計算による検討を行っている。そのひとつとして「小段」の水理学的意義についての検討も含まれている。こ

れについては第5章にまとめられている。

平成7年度には、前年度検討したような「もぐら穴」があかないようにすることと、芝による耐浸食性を向上させるために、芝の毛根層の下方に補強材料（ここではジオテキスタイルシートを使用する）を敷設することを考えた。一般に、芝の毛根層が破壊の原因になる引張力に抵抗することで耐浸食性を発揮すると考えられていることから、ここでは特にシートに芝の根が貫通するか、するならばどの程度の引っ張り強度の増加が期待できるかに焦点を合わせて、系統的な実験を行っている。その成果については、第4章で説明する。

本調査研究の成果の一部は、既に土木学会論文集あるいは同学会年次学術講演会において発表済みである。

2. 芝により保護された土砂層上の流れの評価

2. 1 序論

従来の護岸堤防を廃してより自然に近い河岸に戻そうとすると、たとえば堤防を植物で被うことにしたらどうだろうか、という考えがすぐに浮かんでくる。この考え方は環境や景観といった観点から当然の如く生じ、望ましいとされることはいうまでもない。しかし、近年の検討から、植物の毛根層にはかなりの耐浸食性が期待できることが明らかになり、技術的にも実施に移される可能性のある方法として注目を集めている。たとえば、先に引用した北川・宇多らによる現地実験によれば、十分養生し、管理の行き届いた芝面である限り、洪水時に生じる規模の高速の流れに対して抵抗することができ、その結果、堤防法面が浸食を受けることはない、との報告がなされている。この報告によれば、「もぐら穴」のような弱点箇所の存在こそが問題であると指摘されている。本章では、洪水時に生じる規模の流れの中で、芝面近傍の流れに関する流速ならびに圧力変動の計測を行い、芝面近傍の流況を理解することを目指して行った検討の結果について説明する。なお、上述のもぐら穴の効果については別途モデル実験を通して検討を行っており、次章においてその結果を説明する。

2. 2 実験的検討の概要

実験は写真2・1および図2・1に示すような矩形断面管水路において行った。水路の概要は、全長9m、幅30m、高さ30mであり、その詳細は図2・1に示されている。水路中ほどの1.5mにわたる区間にはテストセクションが設けられており（写真2・1（b））、その底面には「約3ヶ月養生した芝」で表面を被った土塊が供試体として設置されている。供試体は写真2・1（c）に示したモールドの中に入れられている。実験時の芝の草丈は、およそ30～50mm程度であった。この区間の前後の水路床には礫が張りつけられており、テストセクションに到るまでに底面からの境界層が十分に発達するよう配慮した。実験では、

この芝面の耐浸食性を調べるために第一歩として、芝の揺動の様子や土塊表面における土砂移動などについての観察を行うとともに、芝面上の流速測定と土塊表面における圧力変動の計測を行った。流速測定には直径 6 mm、長さ 16 mm の電磁流速計を、圧力測定には圧力センサーを、それぞれ用い、サンプリング周波数を 20Hz としてデータをサンプリングした上でこれを処理した。実験条件としては、流下方向への断面平均流速 U を変化させることとし、これを 0.5、1.0、1.5、1.8、2.0m/sec.とした場合の検討を行っている。

(a)



(b)



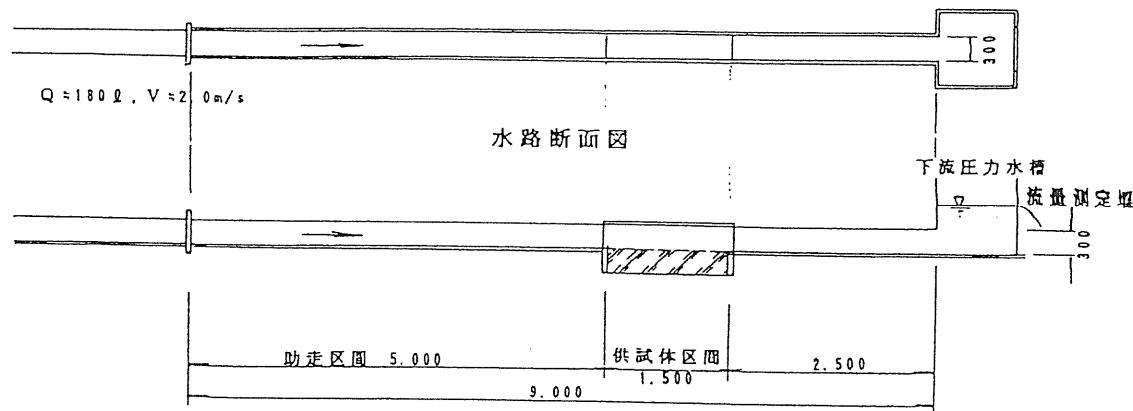
(c)



写真 2・1 実験水路の概要 :

(a) 全景, (b) 供試体設置区間, (c) 供試体モールド, 流れは右から左

水路平面・縦断図



供試体部縦断図

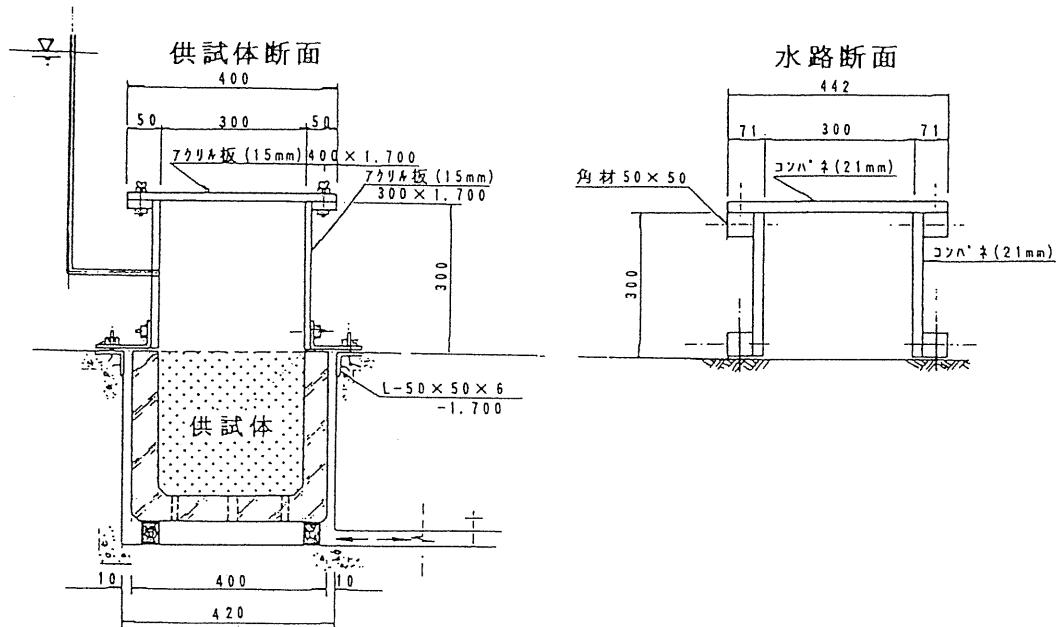
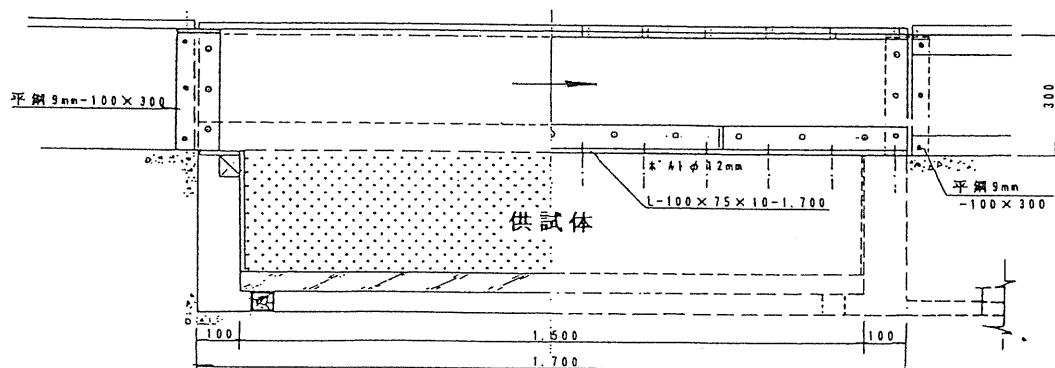


図2・1 実験水路の詳細

2.3 結果および考察

ここでは、時間平均流速 U を 1.5m/sec. としたケースに対する芝面上の流速測定の結果について説明する。図2・2(a)～(d)にその結果を示す。図中の z の原点は芝面にプローブが接触した位置を示す。まず、図2・2(a)には時間平均流速の流下方向ならびに鉛直方向成分の鉛直分布を示した。この図より、流下方向流速 U を表す曲線には $z=20\sim40(\text{mm})$ 付近に変曲点があることがわかる。実験時の観察から、この位置は流水中の芝の上端に相当することがわかっており、 z の原点からこの位置までの範囲（以下、これを植生層と呼ぶ）で、芝の揺動および倒伏が生じていることを確認している。この影響は図2・2(b)、(c)および(d)に示した乱れ強度およびレイノルズ応力の鉛直分布にも現れており、上記の位置付近でそれぞれ最大値をとることがわかる。これは、芝の草丈の範囲内では芝による遮蔽効果により乱れの生成が押さえられる一方で、その上端付近では芝の揺動によって大きな乱れが生成されるためである。このことは、芝などの植生で被われている場合には、芝が繁茂する土層表面からの土砂の移動や吸い出しが抑制されることを意味する。このように、堤体の安定にとって植生で被われていることの土砂水理学的効果は大きいといえる。

次に、図2・3には芝で被われた土層表面上の圧力の時間変動を測定した結果を時系列データとして示した。図の縦軸には圧力水頭をとっている。この図より、圧力は概ね 0.5sec 程度の周期で変動していることがわかる。この変動周期は、ビデオ解析の結果として得られた芝の揺動周期とほぼ一致する。このことより、土層表面上の圧力についても、植生層内の流速変動と同様に、植生の揺動と密接に関係していることが理解された。

また、ここで検討の対象とした流速の範囲（ $U=0.5\sim2.0\text{m/sec.}$ ）内では、芝面にいかなる変化が起こることはなかった。これは、ここで供試体として用いたような十分に養生した芝で被われている限り、十分な耐浸食性が期待できることを表している。

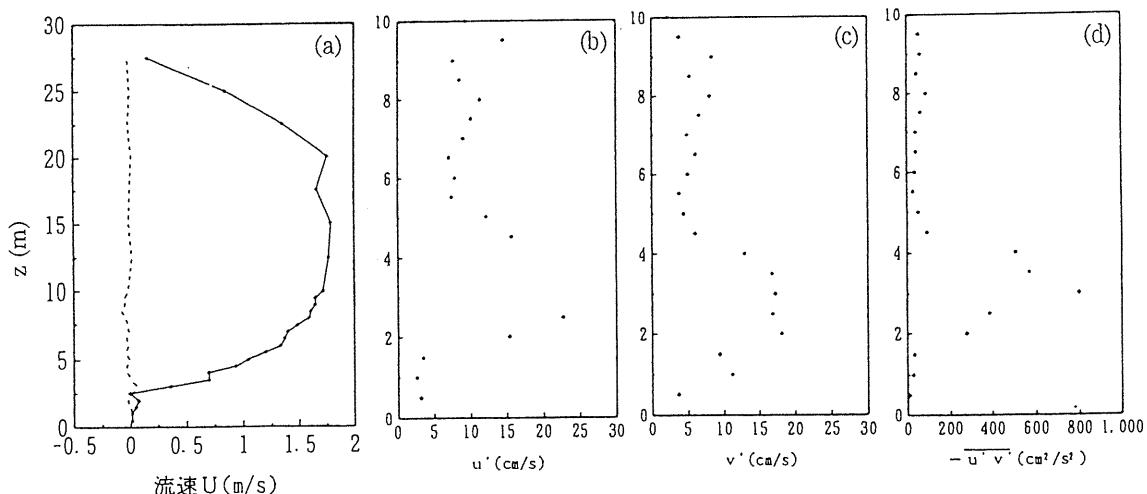


図2・2 流速測定結果：断面平均流速 1.5m/sec. , 芝高 3.5cm
 (a) 時間平均流速（実線が主流速、波線が鉛直方向流速），
 (b) および (c) 乱れ強度, (d) レイノルズ応力

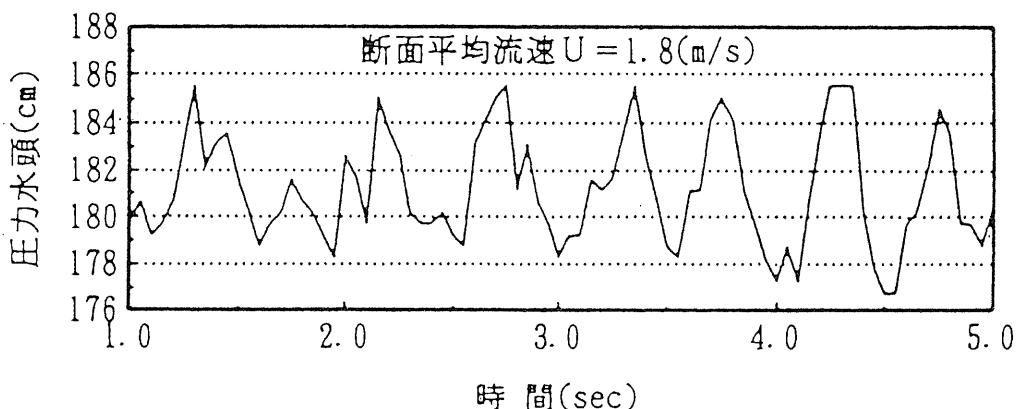


図 2・3 芝で被われた土層表面における圧力の時間変動

2.4 結論

ここで行った実験的検討により、芝面近傍の流れ場に及ぼす芝の揺動の影響が明らかになった。特に、芝面からの土砂の吸い出しに直接関係すると考えられる芝面上の圧力変動が芝の葉の揺動と強い相関関係にあり、両者の周期とほぼ一致することは興味深い事実である。

また、流速が 2m/sec.程度の流速に対しても芝面に顕著な浸食が生じることも土砂の吸い出しが生じることもなかった。この事実は、十分な養生を行った芝である限り、もぐら穴などの弱点さえなければ、堤体が破壊に到ることはないとする北川・宇多らの結論と一致するものである。

2.5 補遺

上記に説明した実験データに関して、後に、矩形断面閉水路の天井に当たる平板上の境界層の発達が十分ではないのではないかとの疑問が生じた。そこで、天井の平板に粗度をつけた上で流速の再測定を試みている。その結果を以下に参考資料として添付する。

ここでの検討は、新たに芝を養生する時間を節約するため、芝の代わりに敢えて人工材料であるヘチマロンを用いており、その下部には礫を敷き詰めてある。その結果を図 2・4～2・7 に示す。図の $z=0$ は、ヘチマロンの上面の位置を、 $z=-50$ (cm) は礫層の上面の位置をそれぞれ表している。

この再検討の結果として次のようなことが言えるのではないか。すなわち、2・3 で示した実験の場合の天井からの境界層の発達は必ずしも不十分というわけではない。また、底面近傍に関してはその影響をほとんど受けないと判断される、ということである。

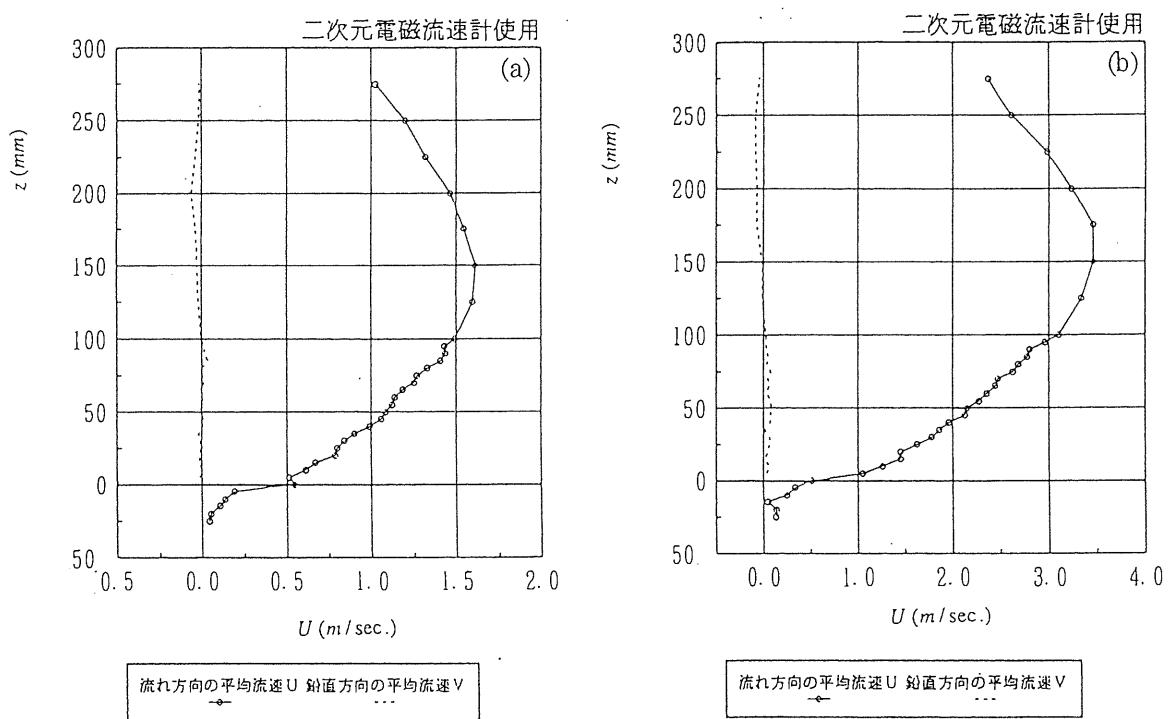


図2・4 時間平均流速分布（ヘチマロンを使用）：
断面平均流速 (a) 1.0m/sec. (b) 2.0m/sec.

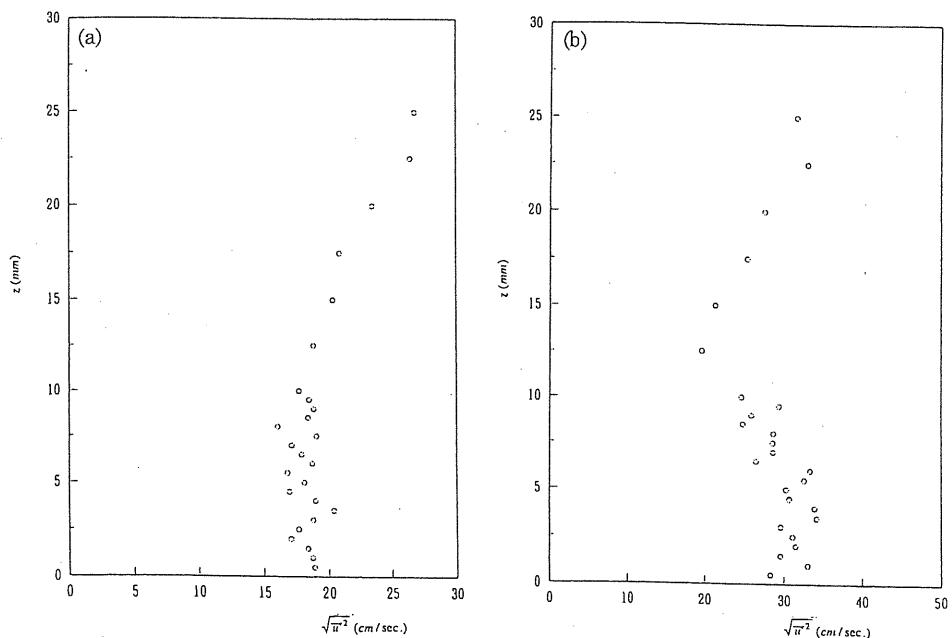


図2・5 乱れ強度分布（ヘチマロンを使用）： $\sqrt{\bar{u}'^2}$
断面平均流速 (a) 1.0m/sec. (b) 2.0m/sec.

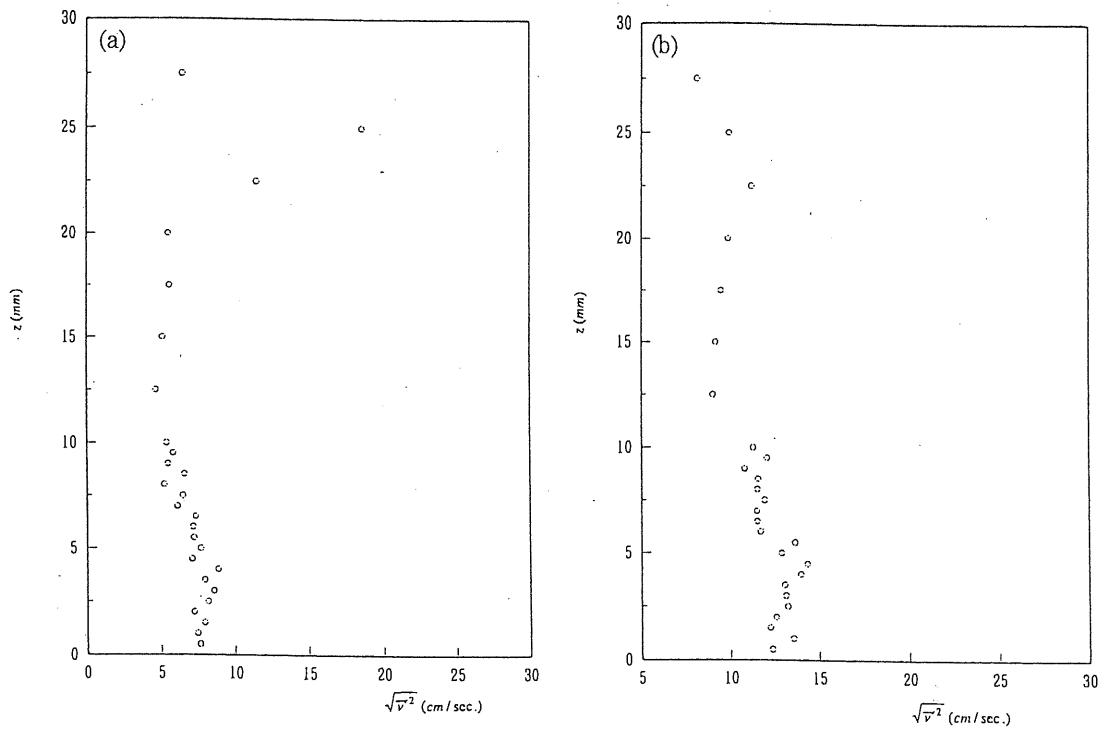


図2・6 乱れ強度分布（ヘチマロンを使用）： $\sqrt{v'^2}$
断面平均流速 (a) 1.0m/sec. (b) 2.0m/sec.

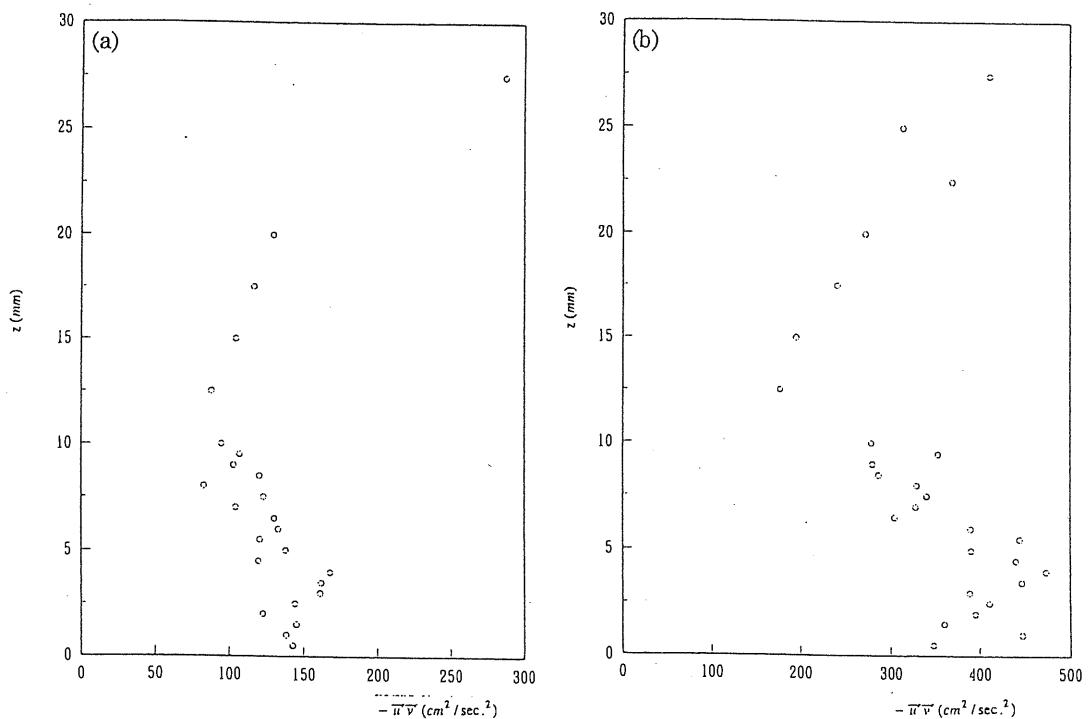


図2・7 レイノルズ応力分布（ヘチマロンを使用）： $-u'v'$
断面平均流速 (a) 1.0m/sec. (b) 2.0m/sec.

3. 芝により保護された土塊が破壊に到るメカニズムに関する一考察

3. 1 序論

芝により保護された法面が破壊に到るメカニズムを考えるために、第2章では芝面近傍における流れ場について調べた。しかし、実験に用いたような手入れが行き届き、弱点のない芝面が破壊に到ることはないと結論に到った。それでは、芝により保護された土塊が破壊に到る原因はなんであろうか。第1章で引用した北川・宇多らの検討によれば、芝面を貫いて開けられた「もぐら穴」が破壊の原因となる可能性を示唆している。この「もぐら穴」は芝面にとって弱点であることはいうまでもないが、具体的にどのような影響を及ぼすのかについては未だ明らかではない。本章では、この点に焦点を絞ってモデル実験を行い、一考察を加えた結果を説明する。ここでは、次のような推論を試みた。すなわち、

(1) ここで問題とする破壊が生じる際には、芝の毛根と土壤からなる層（すなわち「芝のマット層」とそれより下方によく見られる礫層との境において顕著な浸透流が起こり、その境界面における圧力とマット層上面における圧力との差が瞬間に大きくなり、結果として大きな上向きの揚力が作用する。

(2) 「もぐら穴」の存在によって、マット層を通しての運動量の交換が活発となり、層をはさんだ上面・下面における圧力差が増大する。これは、平均値において問題となることはないが、瞬間に異常に大きな値が生じる可能性があり、これが破壊の原因ではないか。

以上のような推論の上に立ち、マット層近傍の流れおよび圧力の場の特性が「もぐら穴」の存在によりどのように変化するのかに注目して以下に示すような実験的検討を行った。

3. 2 実験的検討の概要

実験は、2本の別々の水路を使って行われた。ひとつは第2章で説明した矩形断面管水路であり、もう一つは次に説明する矩形断面開水路である。ここでの説明は、この開水路実験の結果を用いて行うこととする。

ここで用いる開水路は、全長 10m、幅 40 cm、高さ 60 cm の可変勾配型のものであり、その底面には厚さ 7.5 cm にわたって直径 15 mm のガラス玉が敷き詰められており、これにより礫層を模した透水層を設けた。さらに、その上面にマット層を模して厚さ 7.3 mm の不織布（芝の葉に相当する人工纖維をその上面につけてある）を張り、芝のマット層を模擬した。実験は、このマット層上に水を流し、透水層内の浸透流速とマット層上方の表面流速を同一鉛直断面内で計測するとともに、この測定点における圧力を同時計測した。浸透層内の圧力ならびに流速の計測には、銅管を使って製作した静圧管と動圧管によることにし、これらを十分検定した上で使用した。マット層上方の流水中の圧力測定にも同様の静圧管を用いている。圧力の計測には微差圧計（バイリーダイン社製）を使用することとした。また、表面流速の測定は、直径 2 mm のプロペラ流速計（篠塚製作所製）によることとした。

測定は、水路上流端から 7mの位置にとったテストセクションにおいて行った。その詳細は次の通りである。

●まず、「もぐら穴」を模した穴がない状態で、マット層をはさんだ鉛直面内の流速ならびに圧力の分布を測定した。圧力については、特に「マット層の上下面における圧力差の時間変動」に注目しながら流れ場の理解につとめた。

●次に、マット層に「もぐら穴」を模した穴を開けた状態での計測を行った。この穴は、流下方向に1mの距離をおいて水路中心軸上に2つ開けられており、その直径を 4.5 cmとした。ここでの測定は、それぞれの穴の中心を通る鉛直軸上で上記と同様の項目について行った。なお、上記のテストセクションはこの2つの穴の中央に位置する。

ここでは総流量を変えることで数ケースの実験を行っているが、ここで説明に用いる実験条件は表3・1に示されている。

表3・1 実験条件

case	全流量 $Q(l/sec.)$	表面流量 $Q_{surf.}(l/sec.)$	浸透流量 $Q_{sub.}(l/sec.)$	水路床勾配	備考
S1	17.34	16.33	1.01	1 / 800	もぐら穴なし
S2	17.34	16.04	1.30	1 / 800	もぐら穴あり

3. 3 結果および考察

図3・1～3・3に主な実験結果を示している。また、この検討により明らかになった事項は以下にまとめられている。

- (1) 圧力の鉛直分布は図3・1に示すようになり、ほぼ静水圧分布となっている。しかし、マット層の付近に着目すると、マット層の下面（透水層の上面）付近では静水圧よりもわずかに大きな値となっていることがわかる。
- (2) マット層の上下面における圧力の差（差圧）の時間変動を微差圧計を用いて測定したところ、図3・2のような時系列データが得られた。ここでは、マット層の下面における圧力から上面における圧力を差し引いたものを差圧として示しており、この値が位置の差に等しいとき、圧力分布が静水圧分布に従っていることを表す。時系列データを基に圧力の変動特性について整理した結果が表3・2である。図3・2の時系列データより、マット層の上下面に作用する圧力差は 10sec.程度の周期で変動しており、瞬間に非常に大きな値をとることは容易に予想できる。このことは、洪水時のように流速がかなり大きな場においては、芝のマット層を上下面にかなりの圧力差が生じることを意味する。さらに、「もぐら穴（マット層を貫いて開けられた穴）」がある場合（図3・2（b））には、

これがない場合（同図（a））に比べて、平均値だけではなく標準偏差まで大きな圧力の変動となっていることがわかる。しかも、もぐら穴がない場合に比べて、瞬間にかなり大きな正の値をとることに注意を要する。

表3・2 不織布の上下面に作用する圧力差の時間変動特性

case	水深	布の上下面の 差圧の平均値	変動周期	周波数
	$h (cm)$	$p / \rho g (cm)$	$T (\text{sec.})$	$f (\text{Hz})$
S1	6.75	0.065	11.0	0.09
S2	7.19	0.156	6.52	0.15

(3) もぐら穴が鉛直面内の流速分布に及ぼす影響について検討した結果が図3・3である。図3・3では、2つのもぐら穴を通る鉛直面内の流速分布と、その中間にとったテストセクションにおける分布とをあわせて示している。なお、テストセクションにおける表面流の流速分布については、これが対数分布則に従うことを確かめている。図3・3より、上流側のもぐら穴の真上では、表面流速が増大し、下流側のもぐら穴の真上では逆にわずかながら減少していることがわかる。このことは、上流側の穴では表面流側から浸透流側への、下流側の穴では逆の方向への流れが生じ、運動量交換が行われていることを表している。このように、もぐら穴の存在により、マット層の上方の流れと下方の浸透流との間の相互交換が促進され、これが（2）に示した異常な圧力差を生み出す原因となっている。

3. 4 結論

本章では、マット層を貫くように開けられた「もぐら穴」がマット層の安定に及ぼす影響について、流速ならびに圧力の測定結果を基に説明した。もぐら穴が流下方向に2つ開けられている場合を想定した実験から、上流側の穴を通して表面流側からの吸い込みが、下流側の穴を通して浸透流側からの吐き出しがそれぞれ生じることが、各々の穴の上方の流速分布から示唆された。また、ここで想定したようにマット層の下方に浸透流が生じる場合には、マット層を持ち上げる向きの揚圧力が平均的に作用することになるが、その値はもぐら穴がある場合にはない場合に比べて大きなものとなる。さらに、瞬間に現れる極大値はもぐら穴の存在によりかなり大きなものとなる恐れがあり、このことは、もし、流速がさらに増大し、圧力の変動周期がマット層の固有振動周期と一致して共振するようなことがあれば、マット層を破壊に到らせる可能性が十分あることを意味するものと考える。

ただし、もぐら穴がある場合に、どのようなメカニズムで圧力変動が上記のようになるのか、といった本質的な点についてまで踏み込むことはできなかった。これについては今後更なる検討を行う必要がある。

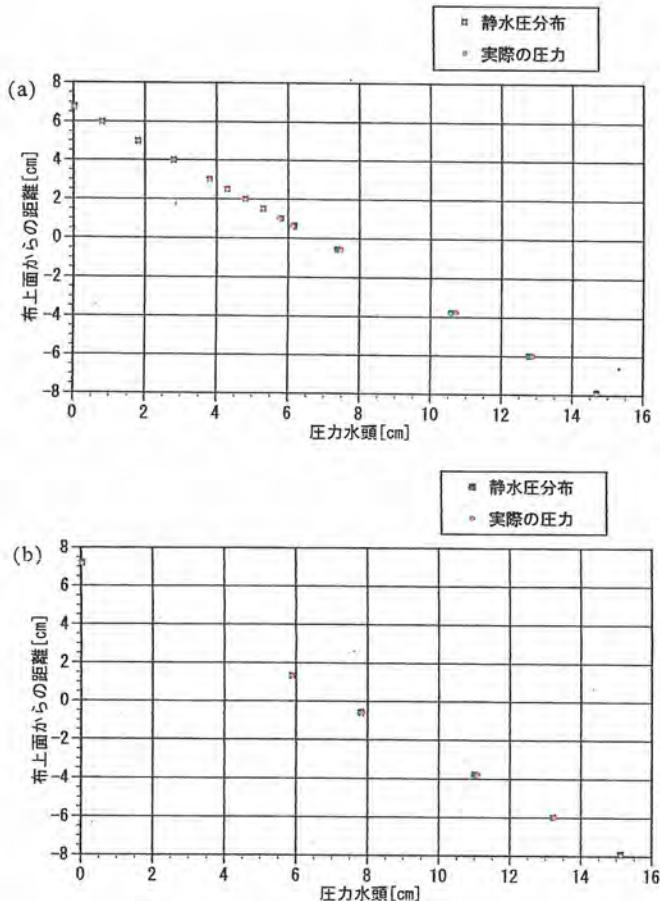


図3・1 マット層をはさんだ鉛直面内の圧力分布
(a) case S1 (もぐら穴なし),
(b) case S2 (もぐら穴あり)

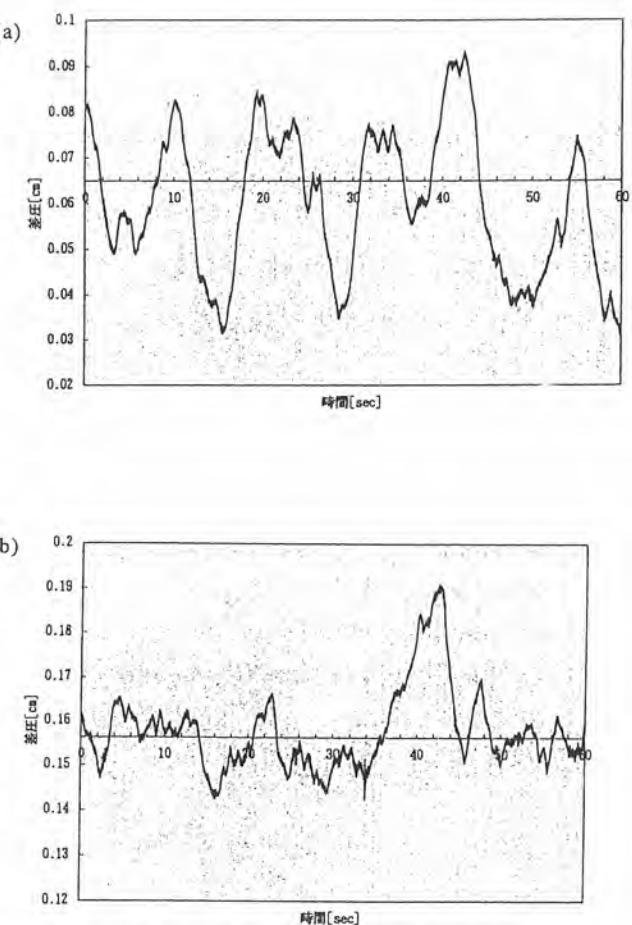


図3・2 マット層上下面の圧力差の時間変動
(a) case S1 (もぐら穴なし),
(b) case S2 (もぐら穴あり)

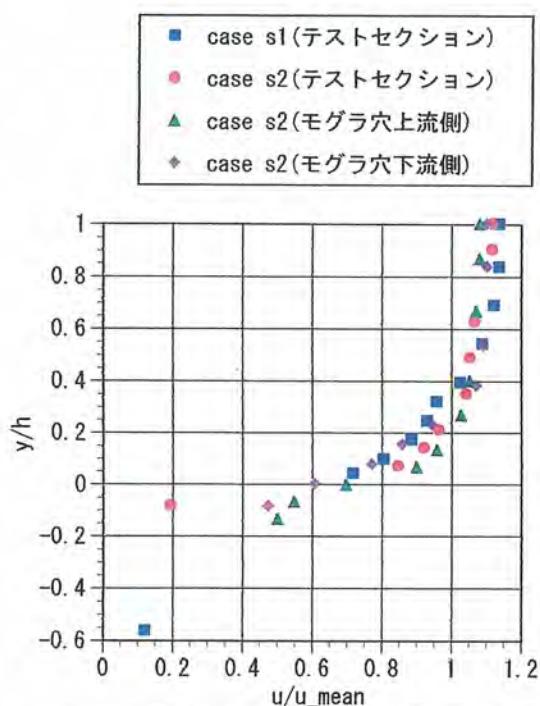


図3・3 マット層をはさんだ鉛直面内の主流速分布：
図の横軸は断面平均流速で、縦軸は水深でそれぞれ除して無次元化した。
もぐら穴はテストセクションをはさんで流下方向に2つ開けられており、
図中のそれぞれの測定結果は各点を通る鉛直断面内の分布を表す。

4. 補強材としてのジオテキスタイルシートが植生で被われた法面の耐浸食性能に及ぼす影響について

4. 1 序論

前章までの検討から、芝などの植生によって堤防法面を被った場合には、植生の養生さえ留意して管理すれば、かなりの流速をもった流れに対してまで堤体を浸食から守ることができること、さらには芝面が破壊に到る原因がもぐら穴のような弱点箇所にあるのではないかということ、などが説明された。これらの議論を踏まえ、本章では、もぐら穴のような弱点が生じることを未然に防止し、しかも、芝面の耐浸食性を高める補強方法について考える。まず最初に、もぐら穴が開かないようにするにはどうすればよいのであろうか。すぐに思い浮かぶ簡単な対策は、もぐらを堤防法面近くに近づけさせないことであろう。これについては、もぐらの生態についての更なる知識を必要とする問題であり、早計に結論の出せる問題ではないが、ひとつの場合として、もぐらが嫌うような臭いを発するようなシートを堤防法面下に敷設することが考えられるのではないだろうか。次に、芝面の耐浸食性を向上させるためには、どのような方法が考えられるのであろうか。芝面が耐浸食性を発揮するのは、芝面に生じる引張力に対してその毛根層が十分な抵抗力をもつからであるといわれている。そこで、この毛根層の引張強度を増大させるための対策を講じることを考える。ここでは、芝のマット層の下方にある距離においてジオテキスタイルシートを、芝の根が貫通するよう留意して敷設することを考えた。

このような考え方から、以下に示す2点についての実験的検討を行っており、本章ではこの結果について説明する。

- 第一に、芝のマット層の下方にジオテキスタイルシートを敷設した場合に芝の根がシートを貫通することがあるか、また、植生の生長を考える上で法面からどの程度の距離を置いて敷設すべきか、といった点について調べる。
- シートの敷設によって植生で被われた土層の引張強度がどの程度増加するか、について定量的に把握する。

4. 2 実験的検討の概要

実験の概要是写真4・1に示されている。写真4・1の上段に示されているような長さ200cm、幅50cm、深さ30cmの鋼製のバット内に、江戸崎堤体土と呼ばれる山砂を詰め、その上部に野芝あるいは茅のマット層を植えつけた。各供試体の半分の面積に相当する領域には予めジオテキスタイルシートを敷設し、その上に砂を詰めた上に植生層を配置している（同写真（その1）下段参照）。このようにして準備したもののうち、植生が十分に生育した状態のもの（同写真（その2））を供試体として以下の測定を行った。養生には研究期間の制約から3ヶ月程度とした。この養生期間中にはその生育状況の観察が続けられ、あわせて次節

で示すような写真が撮影されている。

実験条件は表4・1にまとめられている。CASE 1は補強材のない芝のみの場合の実験である。また、CASE 2および3は芝の毛根層の下に厚さ5mmのジオテキスタイルシート（日本バイリーン株式会社製）を敷き、その土層表面からシートまでの距離（土かぶり）をそれぞれ3cmおよび6cmとした実験を表す。ここでは植生の毛根層のもつ引張強度を調べるために、写真4・2ならびに図4・1に示されるような引張試験装置を新たに開発した。この試験機の発案ならびに製作は、パシフィック・コンサルタンツ（株）筑波実験所の佐々木博明氏によって新たになされ、従来の建設省の土木研究所の引張試験機に比べて、性能が格段に向上しているようである。引張試験は、写真4・4に示すような10cm times 10cmの区域をひとつの単位として行い、その植生の毛根層の下部における引張強度が測定できるように設定されている。ここでは、毛利層がもつ引張りに対する耐力の時間変化を調べるために、時間を追って供試体をゆっくりと引き上げ、任意の時間の変位に対する荷重を測定した。変位ならびに荷重のデータはAD変換の後、直ちにパーソナルコンピューターに送られるようになっており、そのデータは後に統計処理された。

表4・1 実験条件

《野 芝》				
実験ケース	ジオテキスタイル 設 定	土被り厚 (cm)	養生期間	引張り装置
CASE1-1	な し	3. 0	約3ヶ月	埋込タイプ使用
1-2				
1-3				
CASE2-1	あ り	3. 0	約2ヶ月	埋込タイプ使用
2-2				
2-3				
CASE3-1	あ り	6. 0	約3ヶ月	埋込タイプ使用
3-2				
3-3				

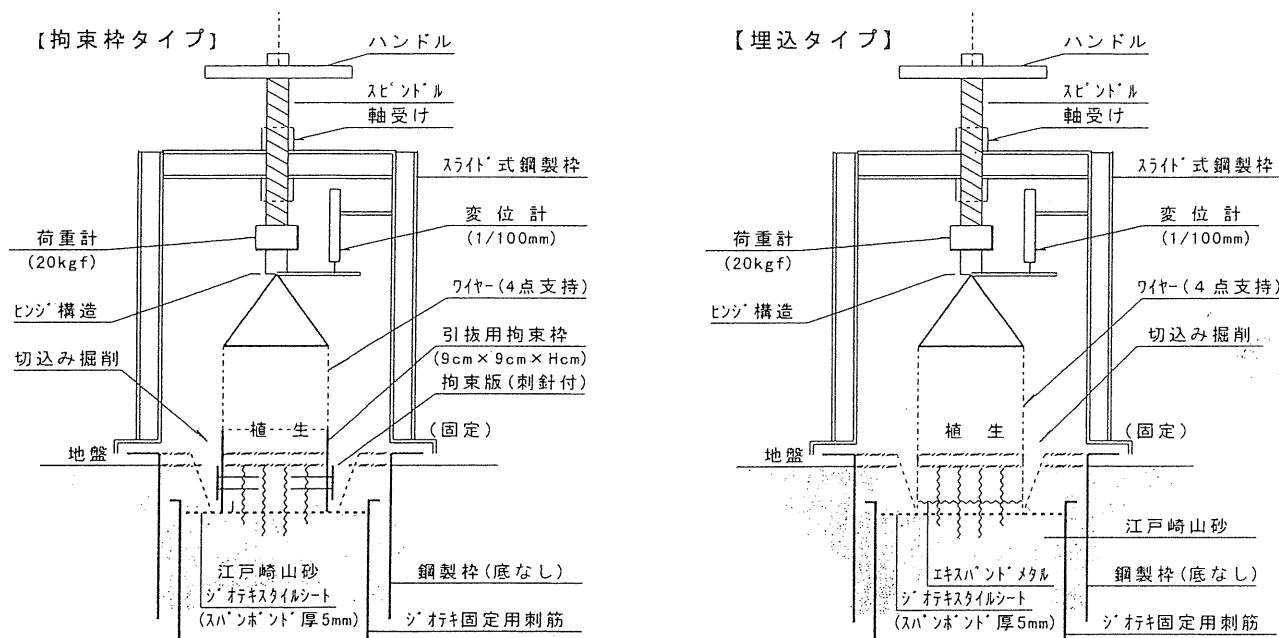


図4・1(a)
引張試験装置（ひずみ制御式）：埋め込みタイプ

図4・1(b)
引張試験装置（ひずみ制御式）：拘束枠タイプ

4. 3 結果および考察

4. 3. 1 植生の根のシートへの貫通状況

野芝の場合の養生期間中の発育状況を端的に示す写真を写真4・3に示す。写真の中央に見えるバットの手前半分の区域の表層下にはジオテキスタイルシートが敷設されている。このように、芝の毛根層とシートとの距離が十分ではない場合には、養生開始後まもなく、芝が枯れてしまうことも見られた。これは、ひとつには使用したシート自体が防水加工されており、シート下方からの水の吸い上げが妨げられていたことが原因と考えられる。この点については、今後、材質的な改良がなされることを期待したい。また、芝の生育への影響は、土かぶりが小さい場合ほど顕著に現れていた。これは、養生期間が夏場に当たっていたこととも関係するが、土かぶりが小さい場合には地表面下に水を保つ層が薄く、蒸発散の影響を顕著に受けるためである。いずれにしても、植生の生育にはシートの防水性が妨げとなることは確かである。

また、「芝の根がシートを貫いて下方へ伸びることがあり得るか」という基本的な点については、写真4・5および4・6に示される通り、問題なく生育することが確認された。なお、シートを貫通した根の量については後述する表4・2に示されており、これと引張強度との相関性は強い。

表4・2 実験結果

実験ケース	ロードセル計測 ピーク読値 P (kgf)	総体重量 (芝+土等) (kgf)	引張り力 ピーク値 P MAX (kgf)	引張り力 ピーカー値平均 P AVG (kgf)	引張り容量(体積)		シートを貫通した根の数(本)				密度 (本/cm ²)
					面 積 (cm ²)	深 さ (cm)	Φ 0.1mm ～0.2mm	Φ 0.3mm ～0.4mm	Φ 0.5mm～ 合 計		
CASE1-1	3.70	0.45	3.25	6.81	100	3.0	-	-	-	-	-
1-2	8.12	0.64	7.48				-	-	-	-	-
1-3	10.20	0.50	9.70				-	-	-	-	-
CASE2-1	3.80	0.50	3.30	6.27	100	3.0	20	2	0	22	0.22
2-2	10.50	0.53	9.97				27	8	3	38	0.38
2-3	6.13	0.60	5.53				18	5	4	27	0.27
CASE3-1	13.60	0.97	12.63	17.76	100	6.0	4	29	2	35	0.35
3-2	17.50	1.03	16.47				7	21	5	33	0.33
3-3	25.30	1.13	24.17				32	15	7	54	0.54

4. 3. 2 シートの補強効果

表4・2および図4・2(a)～(c)には、野芝に対して行われた引張試験の結果を示している。順にCASE 1から3に対応している。この結果より次のことが理解される。

- 同一バット内の同一の条件下であっても、測定結果にはかなりのばらつきが見られる。これは、植物のような非工業製品を用いる場合にはやむを得ないことであり、細心の注意を払ったとしても品質を均一にすることは容易でないことを意味している。
- CASE 1とCASE 3とでは、芝の生育状況が同一とみなせることから、両者を比較すると、シートを貫通した根の本数あるいはその密度が高いほど、引っ張り力の最大値（図4・2に現れる曲線のいわば降伏値をあらわす）が増大することがわかる。両者の差は、根がシートを貫通したことにより加わった付加的な力であり、この分だけ植生で被われた土層の耐浸食性能が向上するものと予想される。
- CASE 2の場合には芝の毛根層と芝との距離が近く、CASE 3に比べて生育状況が悪く、写真4・3に示したように一部枯れてしまうこともあった。そのため、再度植えつけをするなどしたため、養生期間が2カ月と他より1カ月短かった。そのため、この結果とCASE 1との比較からシートの補強効果を判断することは適切ではない。それよりはむしろ、この結果は、シートの敷設に際してはその土かぶり厚さについて注意する必要があることを如実に示すものであると考えている。

4. 4 結論

ここで説明した実験的検討から、植物の十分な生育を許し、かつ根がシートを貫通できるように留意してシートを設置すれば、植物により保護された堤体の耐浸食性を向上させることが可能であるとの結論が得られた。特に、容易に予想できることではあるが、シートを貫通した根の量が多いほど引張強度が増大する結果となることは興味深い。ただし、実用化に向けて、シートの材質上の問題の改善と、敷設位置に関する注意となることも明らかになった。

なお、この養生期間は晩春から夏にかけての比較的日射が強い時期であったため、生育環境としては厳しい状況にあったこと、ならびに十分に根が伸びるだけの時間がとれなかつたこと、などの理由により、シートの補強効果はより抑えられた形で評価されているものと考えている。この点については今後引き続き検討を行い、別の機会に報告することにしたい。

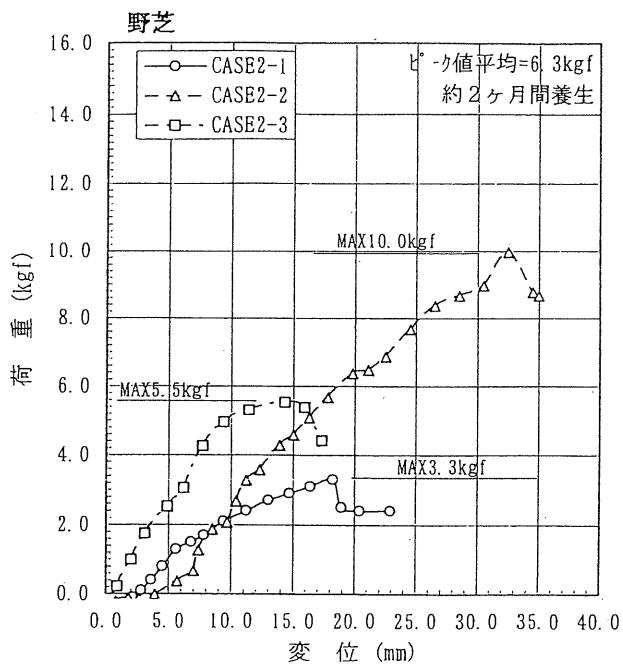


図4・2 引張試験結果(a)：荷重と変位との関係
ジオテキスタイルシートなし、土被り厚さ 3cm

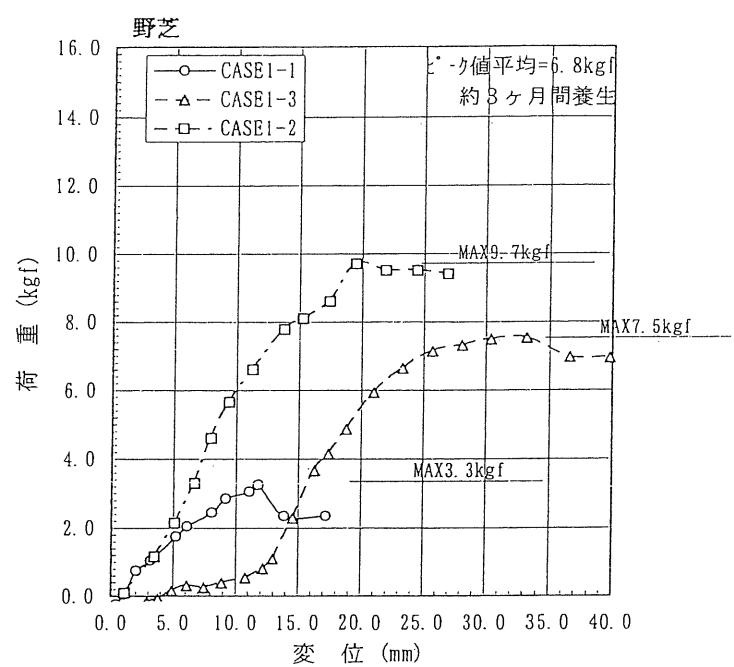


図4・2 引張試験結果(b)：荷重と変位との関係
ジオテキスタイルシートあり、土被り厚さ 3cm

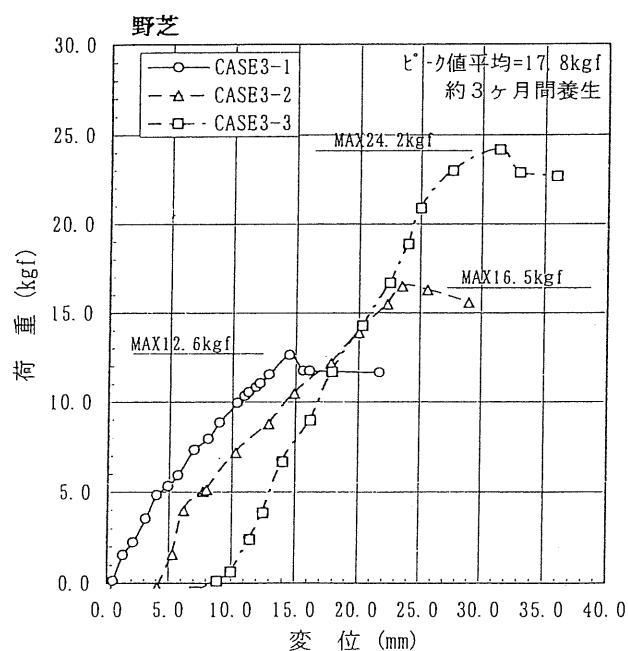


図4・2 引張試験結果(c)：荷重と変位との関係
ジオテキスタイルシートあり、土被り厚さ 6cm



写真4・1 供試体の製作（その1）
上段：植生の植えつけ前、下段：植えつけ中、
奥に見えるのがジオテキスタイルシート



写真4・1 供試体の製作（その2）
植えつけ完了時



写真4・2 引張試験装置



写真4・3 芝の生育状況



写真4・4 引張試験の概略（その1）：
上段：試験開始、下段：試験終了
ただし、この写真はジオテキスタイルシートを
敷設しない場合のものである。



写真4・4 引張試験の概略（その2）：
試験後のマット層の断面
ただし、この写真はジオテキスタイルシートを
敷設しない場合のものである。

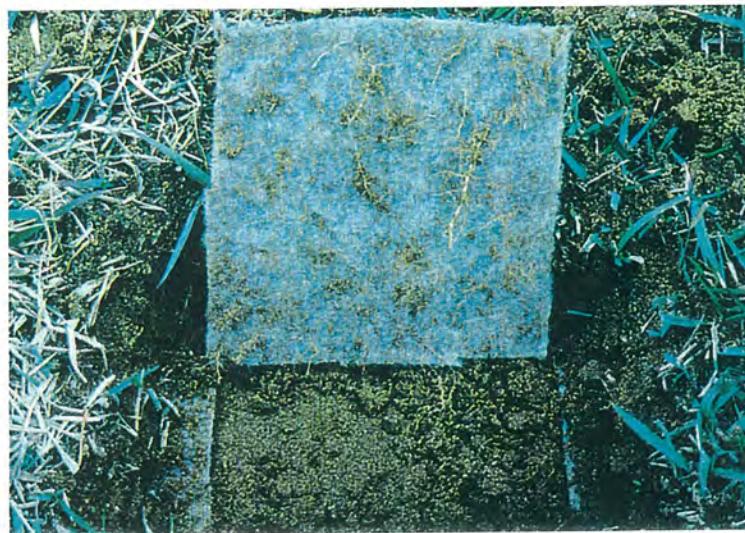


写真4・5 芝の根の貫通状況

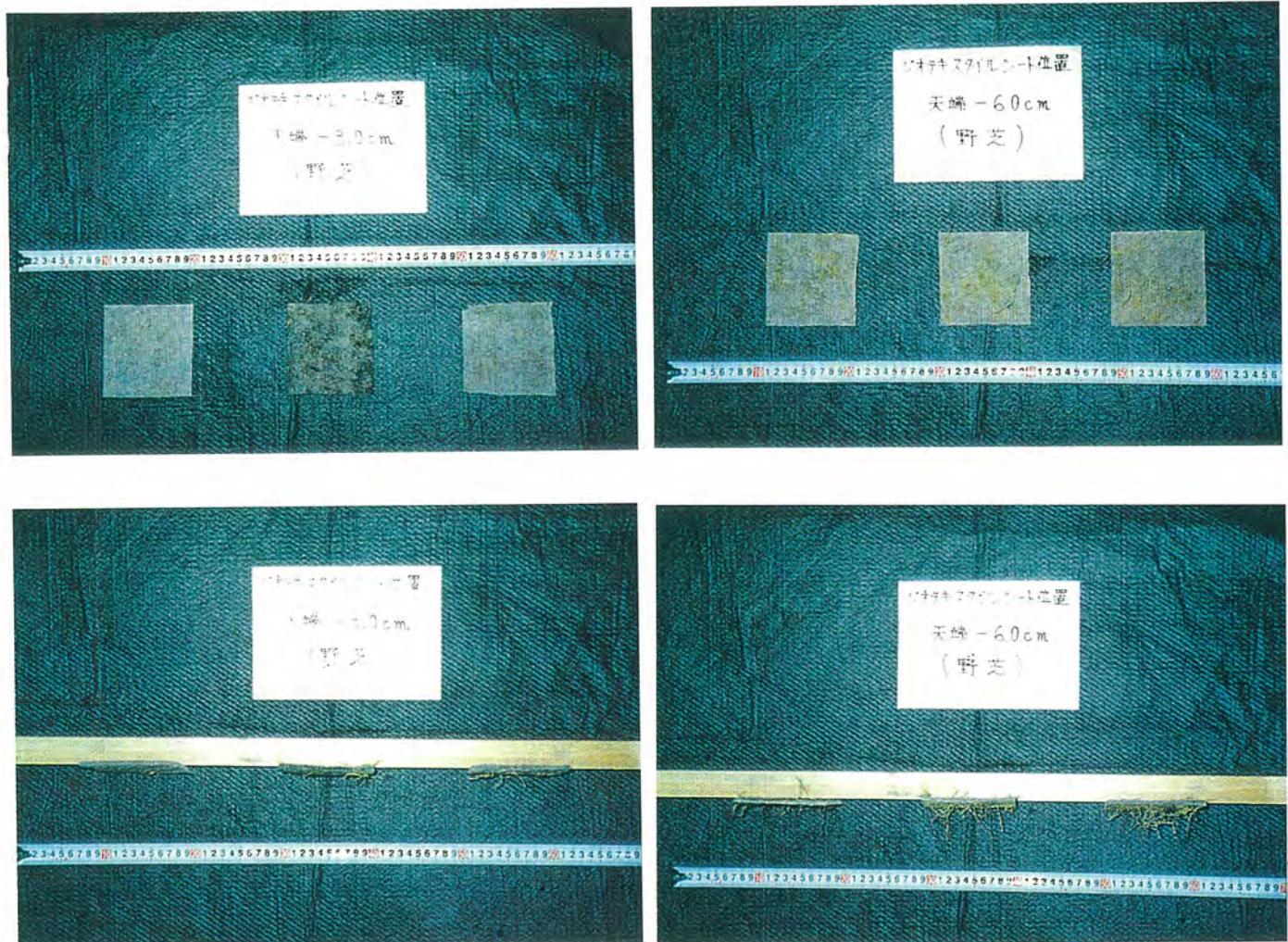


写真4・6(a) シートを貫通した芝の根の状況
ジオテキスタイルシートあり、土被り厚さ 3cm
上段が平面図、下段が鉛直面図、
各々左からCASE 2-1, 2-2, 2-3

写真4・6(b) シートを貫通した芝の根の状況
ジオテキスタイルシートあり、土被り厚さ 6cm
上段が平面図、下段が鉛直面図、
各々左からCASE 3-1, 3-2, 3-3

5. 河川の横断面形状変化に伴う壁面せん断力分布への影響について

5. 1 序論

近年、過度に人工的な護岸をするのではなく、たとえば芝などの植生で堤体を被い、あわせて法面の緩傾斜化を進めることで、住民に親しみやすい水辺環境を創造することが望まれている。このためには、前章までに説明してきたような堤体を芝などの植物で保護した場合の耐浸食性に関わる研究に加えて、堤防の緩傾斜化に伴って堤体に作用する壁面せん断力がどのように変化するかを明らかにしておく必要がある。そのためには、任意の横断面形状をもつ河道の壁面せん断力分布を簡易に予測する方法を開発することが求められる。そこで、本章では、新たに開発した計算方法と、それに基づき次の2点について検討した結果について説明する。すなわち、(1) 堤防の表法面を緩傾斜化したこと、(2) 従来より設置してきた小段を排除したことにより壁面せん断力の分布がどのように変化するか、という点が本章のテーマである。

5. 2 解析の概要

本論では、できるだけ簡易な解析により壁面せん断力を予測することを目的とし、式(5. 1)に示す浅水流方程式に基づく解析を行う。ここでは、平衡状態に達している断面における流れを解析の対象とし、流路曲率および断面形状に起因して生じる二次流の影響を無視する。

$$g i_o - \frac{\tau}{\rho \cos \omega} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial h u}{\partial y} \right] = 0 \quad (5. 1)$$

$$Q = \int_{-B}^B h u dy \quad (5. 2)$$

ここに、 Q は流量、 ω は河道法面の横断方向傾斜角、 i_o は河道の縦断方向勾配、 ν_t は乱流拡散係数である。壁面におけるせん断力 τ は、抵抗係数 C_f との関係で $\tau = \rho C_f u^2$ で表され、抵抗係数をたとえば0.01程度とすれば、式(5. 1)を水深平均の主流速 u について解くことで、壁面せん断力も同時に算出されることになる。

ここでは、堤防法面の緩傾斜化と、従来より施工してきた小段を廃した場合の堤体に作用する壁面せん断力の比較を行う。なお、河道幾何形状における対称性を考慮し、ここでは河道の半断面について検討する。

なお、本章で示した解析方法は、複断面河道にとどまらず、任意の河道横断面形状に対して適用可能であり、これを直線河道の拡幅過程の解析にも適用し、成果を挙げている²⁾。また、ここで説明する簡易方法の開発と平行して、より厳密な三次元計算法についても検討している。その詳細は別論文³⁾を参照されたい。

5. 3 結果および考察

5. 3. 1 解析モデルの検証

ここで提案した解析モデルの妥当性を検証するためには、複断面さらには小段を有するような横断面形をもつ水路の結果との比較を行うことが望ましいのはいうまでもない。しかし、文献検索の結果、既発表論文の中に実験条件および結果に関して、必要となるすべてのデータを公表したものは著者の知る限り見当たらない。そこで、ここでは、敢えて Ghosh によって台形断面水路を用いて行った実験結果との比較を行なうこととした。比較の結果の一例を図 5・1 に示す。図中の○印は様々な方法により求められた実験データを表し、曲線は計算結果を表す。ここで、三次元計算結果とは本報告書の最後に添付した既発表論文中に記載されている数値計算の結果を表わす。同図より、ここで開発した簡易予測モデルは、より厳密な取り扱いに近い三次元モデルと同程度の予測精度をもち、実測値と比較的よく一致することがわかる。このことは Ghosh の他の実験データとの比較からも確認されている。

5. 3. 2 壁面せん断力

図 5・2 では、堤防法面の緩傾斜化に伴い生じる壁面せん断力分布に及ぼす影響について調べている。堤防の法面と高水敷とが接する位置付近でせん断力が小さくなるが、全般的に堤防法面上では、法面の緩傾斜化に伴い壁面せん断力は低下することがわかる。一方、低水路側では、逆に流速が増大し、せん断力が大きくなる。流速特性としては、河積・径深ともに減少し、断面内平均流速が増大することがわかった。一つの指標として Manning の粗度係数 n を算出すると、図 5・2 の 3 ケースの場合には、値が 0.0334、0.0329、0.0324 とわずかながら低下しており、緩傾斜化に伴い、流れの抵抗が減少することを意味している。なお、堤防の緩傾斜化に伴い、水位が上昇するという問題が生じるが、図 5・2 の例の場合には、5 cm および 10 cm 程度に過ぎない。

次に、図 5・3 では、実スケールの河道を対象にして、小段の水理学的な影響を調べたものである。また、図 5・4 は、堤防付近に注目して描いた拡大図である。これらの図より次のことがわかる。

- (1) 高水敷上および低水路上に関する限り、堤防法面の緩傾斜化ならびに小段の有無が壁面せん断力へ与える影響は軽微である。
- (2) 堤防法面上では、法面の緩傾斜化に伴い、壁面せん断力が低下する。
- (3) 緩傾斜化に伴い水位が上昇することになるが、本ケースの場合では数 cm 程度の差に過ぎない。
- (4) Manning の粗度係数 n を算出すると、この場合には 0.042 となり、3 ケースともにほとんど差は見られない。
- (5) 小段がある場合には、その部分に比較的大きな壁面せん断力が作用しているが、この点を除けば小段の影響は軽微であり、緩傾斜化に伴って、堤体に作用する壁面せん断力は低下し、図 5・2 の結果と一致する。したがって、小段を廃しても河道各部に治水上問題となる影響は現れず、法面を緩傾斜化することにより、かえって堤体を浸食から守る結果となることがわかる。

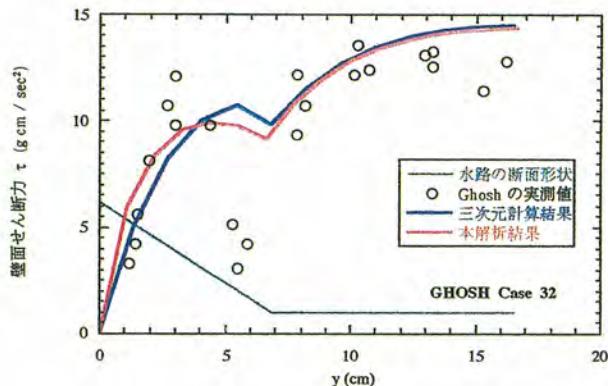


図 5・1 簡易計算法の妥当性の検証：
Ghosh (1970) の実測結果との比較

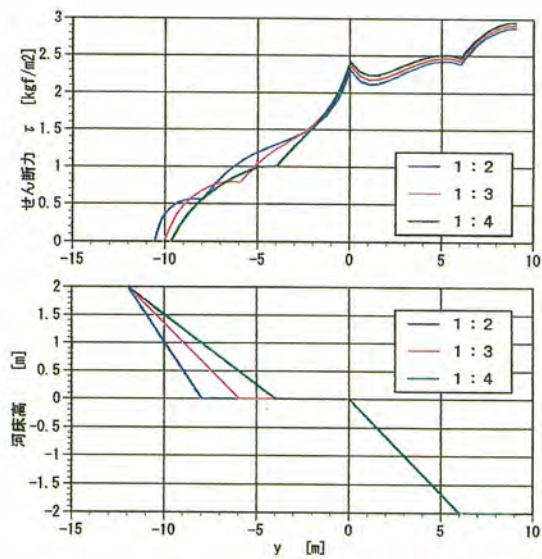


図 5・2 堤防法面の緩傾斜化に伴う
壁面せん断力分布の変化：
流量 $Q=100(\text{m}^3/\text{sec})$ 、
河床の縦断勾配 $i_0 = 1/1,000$
図中の比は堤防法面の傾斜を表す。

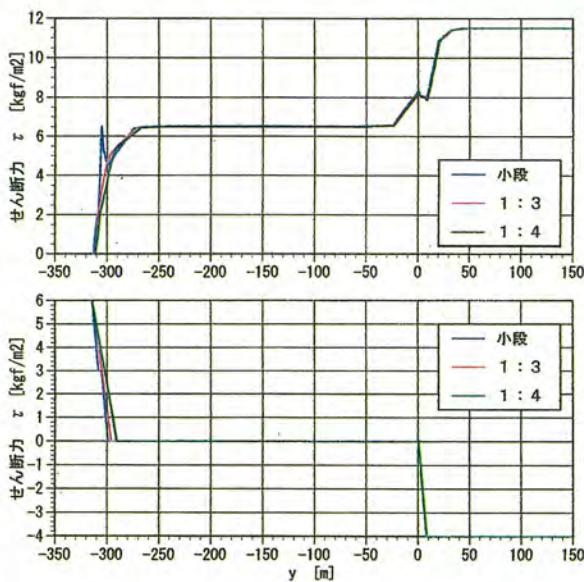


図 5・3 堤防法面の緩傾斜化ならびに
小段の有無の影響評価：
流量 $Q=17,000(\text{m}^3/\text{sec.})$ 、河床の縦断勾配 $i_0 = 1/800$
水位は順に 5.20m、5.21m、5.23m

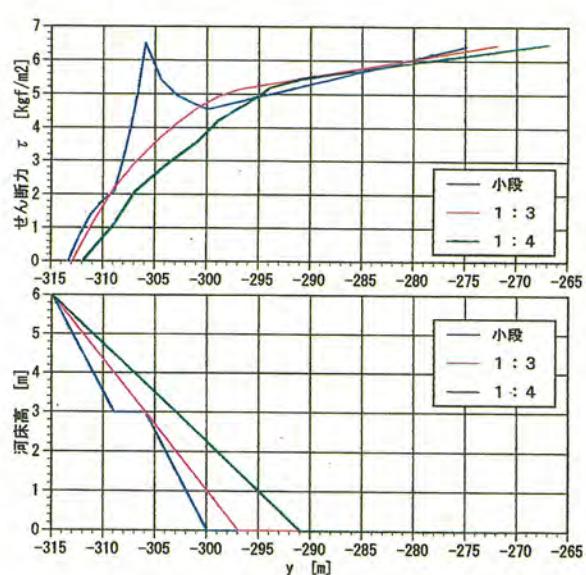


図 5・4 堤防法面の緩傾斜化ならびに
小段の有無の影響評価：
側岸部の拡大図

5. 4 結論

本論では、従来より河川堤防の表法面に設けられてきた小段の水理学的意義を調べるとともに、これを廃し、緩傾斜の堤体とした場合に、壁面に作用するせん断力がどのように変化するかを検討した。

この研究により得られた結論は以下の通りである。

- (1) 流れを浅水流近似した簡易的な計算法により、断面の幾何学的な形状の変化に伴う壁面せん断力の変化について検討した。
- (2) 堤防法面を緩傾斜化することにより、法面に作用するせん断力を低下させることができることが明らかになった。なお、低水路内では、逆に壁面せん断力が若干増加するとともに、水位がわずかに上昇する。水位に関しては、中小の河川を除いて、堤防間の幅が大きいため、一般にこの水位上昇が治水上問題となることはないと考える。
- (3) 堤防小段を廃しても堤体の安定上問題は生じない。

6. おわりに

本研究では、芝を主な検討の対象として、植物で堤防法面を保護することにより期待できる法面の耐浸食性に焦点を当てて系統的な実験を行った。本研究によって明らかになった、あるいは確認された事項を列挙すると次のようになる。

- 芝で被われた土層近傍の流れ場は、植生による遮蔽ならびにその揺動の影響を極めて強く受ける。これは、土層表面の圧力変動についても例外ではなく、植物の茎および葉による遮蔽効果により、ここからの土砂の吸い出しが抑制される。
- 十分養生し、手入れの行き届いた芝で被われている場合には、洪水時に経験する程度の高速の流れに対しても破壊に到ることはない、との従来の指摘を再確認することができた。
- 破壊に到る原因ともいわれている「もぐら穴」の水理学的效果を調べるために、モデル実験を行った。その結果、もぐら穴を通しての水の湧き出し・吸い込みが生じ、マット層を介しての水の交換が活発となることが予想された。さらに、もぐら穴の存在により、マット層を持ち上げる向きの揚圧力が瞬間に異常に大きくなることが観察され、流速がさらに増大し、圧力の変動周期がマット層の固有振動周期と一致して共振するようなことがあれば、マット層を破壊に到らせる可能性が十分あることを見出した。

- 植物により被われた土層が浸食に対して高い耐力をもつことになるのは、主にその毛根層によるとされ、このような法面の破壊が主に引張破壊であると考えられることから、この耐浸食性を向上させるためには、毛根層の引張強度を増大させるような補強をすればよい。そのために、本研究では、ジオテキスタイルシートのようなシートを毛根層の下部に敷設することを考えた。そして、根がシートを貫通して生長を続けることを実際に確かめた上で、この通根により引張強度が増大することを確認した。ただし、シートの敷設に当たっては、植物の生育を妨げることのないように配慮しなければならないことを明らかにした。
- 河川環境を整備するための対策として、ここで検討した植物による法面保護に加えて、「堤防の緩傾斜化」と呼ばれるものがあるが、この緩傾斜化によって法面浸食の原因となる壁面せん断力の分布がどのように変わるかについて検討した。ここでは、できるだけ簡易的な壁面せん断力算定法の開発を目指すとともに、この方法を用いた数値解析により、堤防法面の緩傾斜化により、堤防法面に作用するせん断力が低下することを明らかにした。さらに、従来より設置を義務づけられている「小段」の水理学的意義についての検討を行い、これを廃しても何ら問題が生じないことを確認した。さらに、高次の数値解析モデルの開発も行っており、その発表論文を添付した。

調査研究の題名にも示されている通り、当初は芝以外の植生を対象とした検討も行う予定であり、現実に一部の研究では茅まで含めて検討を行っている。しかし、研究を遂行するにつれて、これまでに十分に理解されていない箇所が予想した以上に多いことを認識させられ、また、自然材料であるため、その養生をはじめとした生育を待つ時間が予想以上に必要であった。そのため、研究の対象を芝以外にまで広げる時間的余裕がなく、そうするよりはむしろ芝を対象にしたより深い検討を行う方が与えられた時間を有効に使えるのではないかと判断するに至った。従って、今後、茅などの他の植物を対象とした実験を続けていければ、と考えているものの、上記のような理由から、本研究では芝を対象にした検討が大半を占めることになった。この点につきご容赦願いたい。

最期に、本報告書のとりまとめに当たり、いずれのテーマについても、残念ながら断片的で、実証性に乏しいものとなった感が強い。もう一步踏み込んだ検討ができればかなり面白い成果となつたのではないか、と思っている。この理由についてはいろいろ考えられるが、それについては敢えて触れずにおく。今後は、これを研究の出発点として、期間にとらわれることなくじっくりと研究を深めていき、河川環境の整備に向けて微力ながらお役に立てるよう努力することで本研究助成に報いたいと考えている。本研究で対象してきた問題に触れ、これについて考える貴重な機会を頂戴したことに対して、ここに深く感謝申し上げたい。

謝辞：本研究の遂行に当たり、吉川秀夫 河川環境管理財団総合研究所所長には終始ご助言を賜った。また、齊藤正勝 河川環境管理財団常務理事には、事務手続き上、随所にご支援戴いた。ここに記して謝意を表します。また、本研究で行った実験のうちの多くはパシフィック・コンサルタンツ（株）筑波実験所で行ったものである。同実験所の浜口憲一郎氏ならびに佐々木博明氏には、実験水路の製作、装置の考案・試作に関して、わずかな研究費の中で最大限のご協力を戴いた。ここに感謝申し上げたい。最後に、同社水工部

の藤堂正樹氏には本研究全般にわたってご協力戴いた。本研究を完了することができたのは同氏の尽力によるところ大であり、ここに改めて御礼申し上げたい。さらに、早稲田大学において行われた実験ならびにすべてのデータの解析には、同大学河川工学研究室の大学院生ならびに4年生の協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 北川 明, 宇多高明ら : 一関遊水池における越流小堤の耐浸食力に関する現地実験, 水工学論文集, pp.489-494, 1995.
- 2) 安達 達, 関根正人 : 直線河道の拡幅過程に関する研究, 第48回年次学術講演会概要集, 502-503, 1993.
- 3) 関根正人 : 側岸浸食機構を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.533/II-34, 51-59, 1996.

発表論文リスト

本研究に関わる発表論文は以下に示す通りである。

- 1) 関根正人, 藤堂正樹, 浜口憲一郎 : 芝による河川堤防の法面保護に関する基礎的研究, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, pp. 216-217, 1995
- 2) 関根正人, 金子 淳, 安原 達 : 小段を有する複断面河道の壁面せん断力に関する研究, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, pp. 356-357, 1995
- 3) 関根正人 : 側岸浸食機構を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.533/II-34, 51-59, 1996
- 4) 吉川秀夫, 関根正人 : 堤防の緩傾斜化に伴う法面せん断力分布の変化に関する研究, 河川環境管理財団河川環境総合研究所報告, 第2号, pp. 189-195, 1996