

水際植生の土砂堆積機能を利用した 自然河岸形成工法の開発

A FIELD TEST OF THE RESTORATION OF A RICH-IN-NATURE RIPARIAN ZONE
BY ACTIVATING NATURAL FORMATIVE PROCESSES OF A FLOOD PLAIN

瀬崎智之・藤田光一¹・近藤和仁²・山内芳朗・栗田信博・松井幸一・内田正³

Tomoyuki SEZAKI, Koichi FUJITA, Kazuhito KONDO, Yoshiro YAMANOUCHI,
Nobuhiro KURITA, Koichi MATSUI and Tadashi UCHIDA

¹正会員 建設省土木研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 共和コンクリート工業株式会社 (〒112-0006 東京都文京区小日向4-6-19)

³正会員 建設省東北地方建設局 (〒980-8602 宮城県仙台市青葉区二日町9-15)

In the restoration method, mounds built slightly higher than a low water level in front of an existing revetment have primary roles by allowing dense vegetation to grow on them. And floods of a bank-full scale are expected to actively deposit fine sediment in the vegetation, forming a natural bank and flood plain. To materialize this idea of the method, a 200m reach in the lower Abukuma River was chosen for test construction of mounds. In the first 23 months after the construction completed in September, 1996, the expected processes of vegetation growth and fine sediment deposit on the mounds were observed, fine sediment deposit of which layers reached as thick as 5-10 cm. More than a hundred kinds of plants including 7 endangered ones were found. In the following two months (August-September, 1998), the site experienced an enormous flood lasting about 40 days. Although this impact apparently gave a negative influence on the formative processes by eroding vegetation and part of the mounds, it was judged that the interrupted processes would have a good chance of starting again in the coming summer.

Key Words : River bank formation, riparian vegetation, the Abukuma river, sediment transport,

1. はじめに

河川における水際部には、洪水時に堤防損傷・破壊につながるような河岸侵食を防ぐため、必要に応じて護岸などの構造物が設置されてきた。一方で、水際部は、土砂と水と植生の挙動によって、空間的にも時間的にも変化に富んだ河川固有のハビタットが形成される場として貴重である。近年、自然環境に対する認識の高まりから、洪水災害防止とのバランスをとりつつ、より「自然な河岸」を形成する技術が求められている。しかしながら、水際部を対象とした従来の河岸防御工法は、施工完了時にその河岸法線、横断形状、植物の種類といったランドスケープをほとんど決定してしまうため、河川が本来持つ時空間的な環境の変動性を必ずしも生かせないものになっている。そのような中で、新たな河岸防御工法の1つの試みとして、宇多、望月、藤田、藤井ら¹⁾は、「自然河岸」を「河川的作用によって堆積した土砂と植生から成る部分が大半を占める河岸」と定義した上で、河川が本来持つ河岸形成作用を最大限に利用して、既存の人

工河岸の前面に自然河岸に近い河岸を造る工法を、「自然河岸の形成工法」として提案している。この自然河岸形成工法は、人が手を加える部分を少なく簡便にして、自然自身の選択によって形成される部分を多くし、また、その完成像を時空間的に広く許容していることに大きな特徴がある。つまり、出水や水位変動によって空間的に複雑な環境が形成され、それが時間的に変動することを許容することで、より高度なレベルで自然環境を再現することが出来ると考えている。また、既存の護岸前面に形成された自然河岸には、大出水時に堤防本体の身代わりとなって侵食をうけるものの、中小の出水で自己復元をするという、「河岸の自己修復型バンパー」としての役割も同時に期待している。

そこで、この「自然河岸の形成工法」の実現可能性を検証し、実用化に向けた技術的知見を獲得することを目的として、平成8年夏季に阿武隈川下流域において試験施工を実施した。本研究では、まず、「自然河岸の形成工法」の考え方、設計方法について概略を示し、阿武隈川での試験施工の経緯を述べる。さらに、設置から2年

が経過した現在までのモニタリングの結果から、自然河岸形成工法の実用性と今後の課題について検討を行った。

2. 自然河岸形成工法のコンセプト

自然河岸形成工法は、河岸や中州に自然に高水敷が形成された現地河川の現象をヒントにしている。このような現象数事例の状況を調査した結果、高水敷の自然形成が生じた地点では、①洪水時にウォッシュロード的挙動をする微細な土砂の供給量が少なくない地点であること、②高水敷が形成される前には、川幅拡大や河床低下などなんらかの原因で河川横断面内に低水路よりも少しだけ高いマウンドが形成されていること、③そのマウンド上に植生が繁茂していたこと、という共通の条件を持つことが明らかになった。詳細については文献1)を参照されたい。自然河岸形成工法は、上述①の河道特性を持つ河川区間の水際に、きっかけとして植生が繁茂するような人工的なマウンド（以下、初期マウンド）を設置してやることで、河川本来の作用による高水敷形成のプロセスにのせることをねらった工法である。既存のコンクリート護岸前面に比較的簡便な構造物とマウンドを設置することで、護岸の保護と水際環境の創造を図る。以下に10年くらいの達成期間を想定した完成までのシナリオを示す（図-1参照）。

◆過程(1):初期マウンドの設置：自然河岸を造りたい範囲に、平水位よりも少しだけ高いマウンドを設置する。

◆過程(2):マウンド上の植生繁茂：植生がマウンド一面を覆うようになる。

◆過程(3):土砂堆積・河岸形成：新しい河岸・高水敷は、植物による流速低減効果によって、通常ではほとんど堆積しないウォッシュロード的土砂が堆積する。適度な規模の出水を繰り返し受けることにより、新しい河岸・高水敷が成長する。

◆過程(4):新河岸の安定化：新しい河岸・高水敷は、ある程度発達すると成長速度が鈍り、安定形状へと近づく。大きな出水を受けると法面が侵食を受けることがあるが、その面積は新しい河岸に比較して小さく、またその後堆積し元の河岸形状に戻ることが期待される。

本工法を適応するに当たって、このようなシナリオを辿るための立地条件には、以下の項目が考えられる。

①河道特性としての条件

条件1：セグメント2-1か2-2である。

条件2：年間の水位変動が大きい。目安として平均年最大流量時水深が平水時水深の2倍以上。

条件3：自然堤防帯の材料に細砂・シルトが含まれる。

②河道の平面形としての条件

条件4：明らかな水衝部でない。

条件5：洪水流下能力に余裕がある。

③流域特性の条件

条件6:洪水時にウォッシュロード的挙動をとる微細

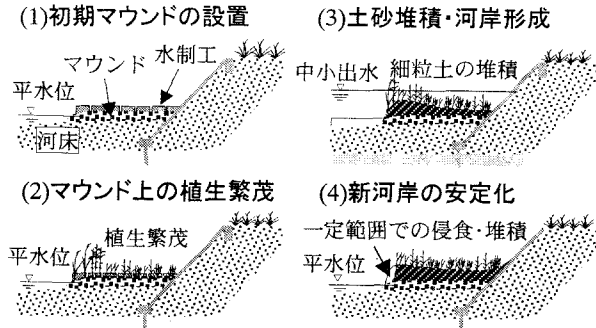


図-1 自然河岸形成のシナリオ

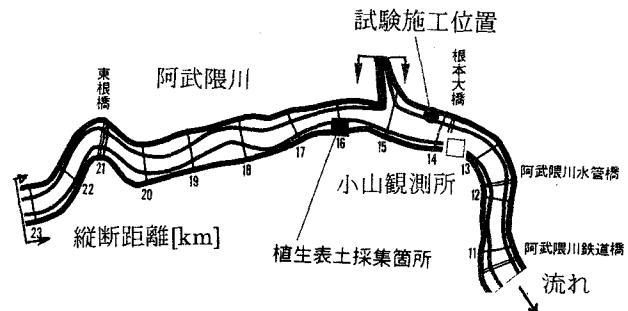


図-2 試験施工区間周辺の河道平面形状

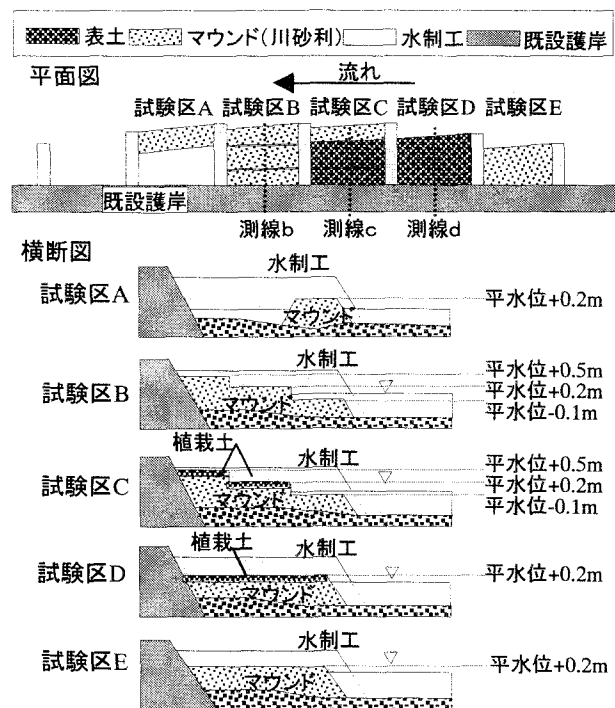


図-3 試験施工の概要

な粒径の土砂供給量が多い。

3. 阿武隈川における自然河岸形成工法の試験適用

(1) 候補地の選定

試験対象とした、阿武隈川14.0m地点周辺の平面図を示す（図-2）。対象地区は、河床勾配約1/1,800、河床材料の平均粒径 $d_{60}=0.87\text{mm}$ で、セグメント2-2（自然堤防帯）に属する（条件1,2）。平面図で示すように、試験施工地周辺は、ほぼ直線河道であり、平均的に見て川幅

は約 440m で、後述する水制・マウンド等の構造物を河岸に設置した場合にも疎通能力上特に問題が発生する地点ではない(条件 4, 5)。400m 下流にある小山水位観測所での年最大流量時水深と平時水深(5 力年平均)の比は 7.6 であり、水位変動の比較的大きな水域である(条件 3)。

以上から、13.9km 地点～14.2km 地点左岸に、図-3 に示すような、5 種類の水制型マウンドを既存のコンクリート護岸前面に縦断方向に並設した。

(2) 初期マウンドの設計

本初期マウンドの設計に際しては、◆過程(1)～(4)を経る中で、低水路満杯程度の洪水の侵食に耐えることを目標として、以下の諸元を決定した。

a) マウンドの幅・高さ

マウンドの幅は、形成させたい新河岸・高水敷の幅とする。本試験施工では、疎通能力に支障がないことを確認して、マウンドの横断方向の幅を 30m とした。マウンドの高さを決定するために、小山観測所の水位データを元に位況図を作成した。小山観測所を含む当該水域の水面勾配は、平均低水位資料から 1/10,000 であることが分かっており、小山観測所(13.6km 地点)の平水位 T.P. 4.01m から試験施工中央部に位置する試験区 C(14.0km 地点)の平水位を T.P. 4.05m と推定した。ここで、平水位とマウンド高との設定基準については、定量的な知見がまだ十分得られていない。マウンド高さは、冠水頻度や低水路との掃流力差を規定してマウンド上に供給される土砂の量・質を変えるだけでなく、地下水位からの比高を変えるため、微細土砂の堆積に支配的な影響を与える植物の繁茂密度、植物種を規定する非常に重要な要素である。植物の繁茂状況や、供給土砂の質を机上で予測することは難しいため、今回の試験施工では、図-3 に示すように試験区 A, D, E のマウンド高を平水位平水位+0.2m(T.P. 4.25m)に設定し、試験区 B, C では、横断方向に 10m づつ、平水位+0.5m(T.P. 4.55m)、平水位+0.2m、平水位-0.1m(T.P. 3.95m)の 3 種類の高さのマウンドを階段状に設置した。[以降、それぞれを+0.5m マウンド、+0.2m マウンド、-0.1m マウンドと表す]

b) 水制の設計

植生が繁茂したマウンドには耐侵食強度の増加が期待できるが、植生が繁茂しない平水位以下の部分については、侵食を防止する構造物が必要である。その方式として、水制でマウンドを挟む水制方式と平水位以下に護岸を設置するテラス方式が考えられる¹⁾。本施工では、水制方式を採択した。水制方式マウンドを採択した場合、水制天端高、水制設置間隔、水制長、マウンド材料の諸元を、想定破壊外力(今回は低水路満杯時の掃流力)を元に設計する。低水路満杯時にマウンド天端に働く無次元掃流力は、次式(1)で表される。

$$\tau_* = \frac{H_m I}{s d_{60}} \left\| \left[1.50 \log_{10} \frac{D}{h} - 1.91 \right] + \left\{ 5.75 + 0.12 \left(\frac{D}{h_g} \right)^{0.8} \right\} \log_{10} \frac{H_m}{h_g} \right\| \left(5.5 + 5.75 \log_{10} \frac{H_m}{2d_{60}} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、各パラメータは、 H_m :低水路満杯時のマウンド上での水深(=4.6m)、 I :水面勾配(ここでは近似的に河床勾配を用いる=1/1800)、 s :マウンドの構成材料の水中比重(=1.65)、 d_{60} :マウンドの構成材料の 60%粒径、 D :水制の配置間隔、 h_g :水制の天端高とマウンドの天端高との差、をそれぞれ表す。目安として設計条件を $\tau_* < 0.05$ とする。今回は、それぞれの諸元を、マウンド材料の平均粒径: $d_{60}=5.5\text{mm}$ 水制の設置間隔: $D=40\text{m}$ 、水制天端高とマウンド天端高の差: $h_g=0.6\text{m}$ と設定した結果、 $\tau_*=0.053$ となった。また、水制間の河岸形状は、非越流型水制の場合、水制頂部から次の水制頂部まで最大幅で約 $\Delta Y=0.11D$ 水制基部側に食い込んだ円弧を描くことが知られている²⁾。このことを参考に、幅 30m のマウンドを側方侵食から守るためには、水制長を 40m に設定することが妥当であると考えた。

c) 植栽土の敷設

マウンド上の植生繁茂を促進するために、植物の種や根茎が含まれた土砂をマウンド材料の上に敷設することもある。それらの有効性を検討するために、図-2 に示す当該区域近隣の河岸から、表土を採取して、試験区 C, D のマウンド上にもみ敷設した。当該区域近隣の表土を用いたのは、当該河川区間に生息しない植物を持ち込まないためである。

4. 追跡調査の方法と概要

(1) 試験施工の概要

以上で提示した自然河岸形成工法概念と設計方法の妥当性を、試験施工後の追跡現地調査によって検討する。以下では、形状が全く違う試験区 A、上流端の影響を強く受けた試験区 E を除く試験区 B～D についての調査結果について述べる。追跡調査は、施工終了直後(平成 8 年 9 月)、1 年経過後(平成 9 年 7 月)、2 年経過後(平成 10 年 7 月)、大規模な出水後(平成 10 月)の計 4 回実施した。調査内容は、試験区全体を対象とした植生相・植物種・被覆度の調査と、各試験区中央に設けた横断測線 b～d(図-3)上での優占種と立地環境(標高・表層土堆積厚)の項目からなる。ここで測定した表層土堆積厚とは、出水後に元々のマウンド材料上に堆積した細砂やシルトから成る微細な土砂の堆積層の厚さを指し、マウンドに敷設した植栽土とも簡単に区別ができる。

(2) 施工後の水位変動

施工直後から第 4 回調査までの水位変化を図-4 に示す。施工から平成 10 年 7 月までは、日平均水位がマウ

ンド高より1~2m 程度高い中小規模の出水が数回発生しているが、平成10年8~10月にかけて最大水位時に設計時想定水位8.7mを大きく上回り、マウンド上で水位1.5m以上の日が1ヶ月以上も続く大規模な出水が発生した。この出水での日平均水位のピーク11.3mを式(1)に代入すると $\tau_s=0.11$ となり、マウンド侵食が始まる条件を大きく上回っている。そこで、調査結果を検討するにあたっては、工法・設計法の的確な評価を行うために、2時期に分けて河岸の変化を観察した。想定した範囲の水位変動が生じた第3回調査までの期間(平成8年9月1日~平成10年7月15日)を期間Aとし、河岸形成シナリオの達成状況を検討した。一方で、設計時の想定以上の出水によって冠水した第4回調査までの期間B(平成10年7月16日~10月15日)については、形成初期段階で大規模な出水を受けた場合に、河岸形成過程にどのようなインパクトが与えられるのかという点に着目して、調査結果を検討した。

期間A、Bそれぞれの水位ヒストグラムを図-5に示す。期間Aでは、全日数673日中、-0.1mマウンドが、約2/3の期間、+0.2mマウンドは44日(6.5%)、+0.5mマウンドは21日(3.1%)の期間冠水していた。期間Bでは、92日の期間の中で、想定した低水路満杯水位以上の日平均水位を持つ日が9日存在し、元々のマウンド材料が動くに十分な掃流力がマウンド天端に働いたものと考えられる。また、+0.5mマウンドで50日間、+0.2mで64日間という非常に長い期間冠水することになった。

5. 追跡調査結果

(1) 期間A

施工直後には裸地であったマウンドにも、施工から1年経過した平成9年の夏季には、多種の植物が繁茂することになった。試験区内A~Eで確認された植物種の総数は、阿武隈川下流全域での生息種の1/4にあたる107種にのぼる。このなかにはタコノアシ、カワヂシャといったレッドデータブック、レッドリストに記載されている絶滅が危惧されている植物7種が+0.2mマウンド上で生息していることも確認された。

次に平面的な植物の分布を見るために、平成9年7月の植生の種類と植被率を示す(図-6)。これを見ると、-0.1mマウンドに植生が繁茂していないのに対し、平水位以上のマウンドには、ほぼ全面に、なんらかの植生が繁茂していることが分かる。マウンド高に着目すると、+0.5mマウンド(試験区B、C基部側約10mの区間)上の植被率が高い傾向にあり、マウンドの段差を境界にして植生の種類が変わっているところも多く見られる。また、植栽土を敷設したマウンド(試験区C、D)では、敷設しなかったマウンドと比較して、植被率が高く、植生の種類も違っていた。

次に、微地形と植生の変化を詳細に検討するために、

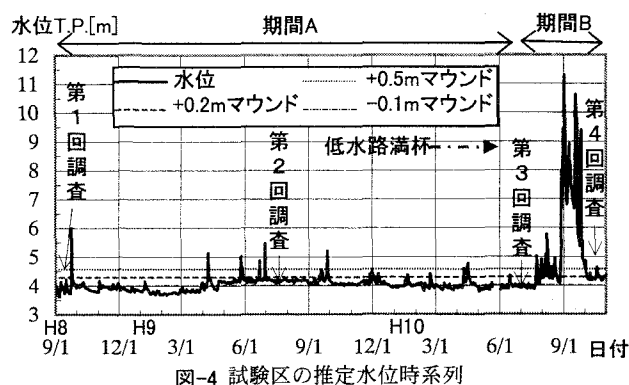


図-4 試験区の推定水位時系列

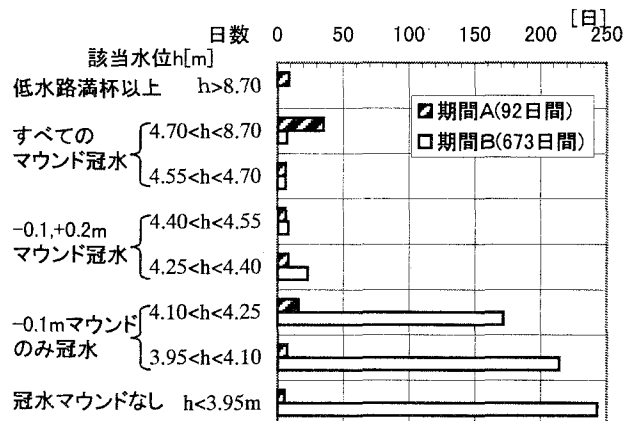


図-5 試験区の日平均水位分布

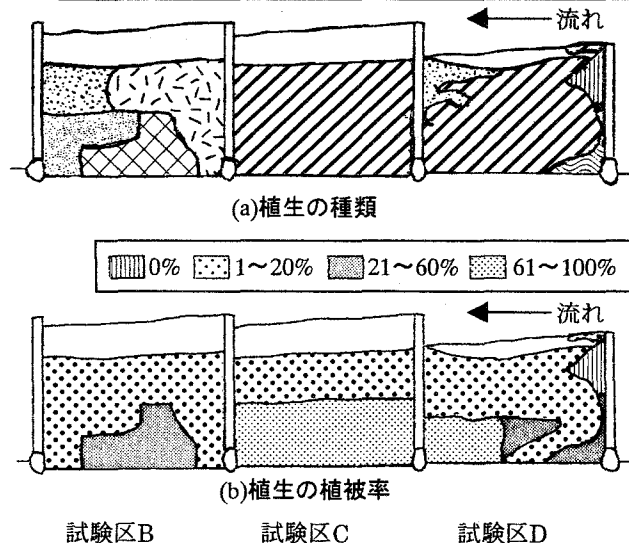
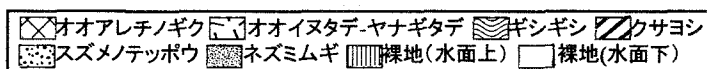


図-6 試験区B~Dにおける植生の種類と植被率(平成9年7月)

平成9年7月と平成10年7月の時点での、測線b-d上の横断形状、表層土堆積厚、植生を図-7で示す。まず、横断形状を見ると、測線b~dすべてにおいて、平成8年施工時から平成9年にかけてマウンド段の肩が均されてスロープ状に形状を変えた後、平成10年7月にかけては、横断図上ではっきりと分かるような河岸高の上昇はまだ生じていなかった。しかし、詳細に見ると、表層土は着実に堆積しており、平均的な堆積厚の分布を見ると、上流側の測線ほど表層土堆積厚が大きくなる縦断的

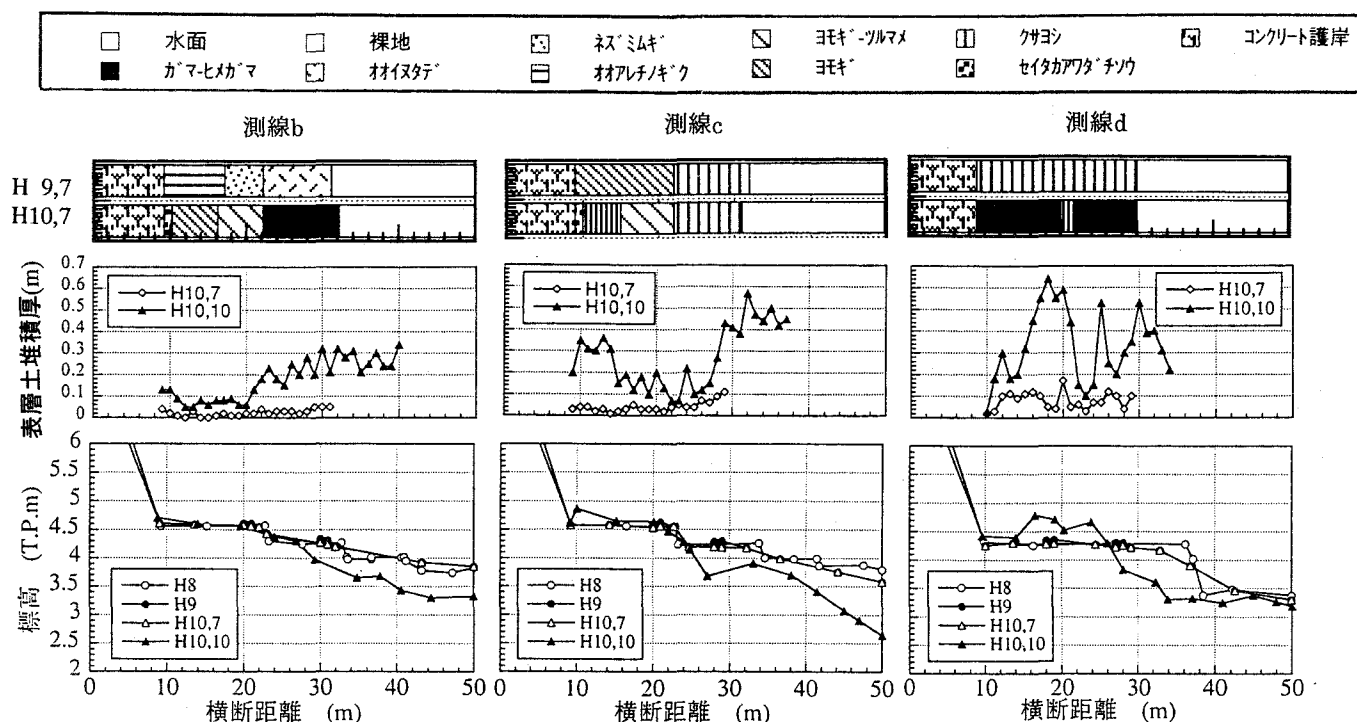


図-7 横断測線上での横断形状・表層土堆積厚・優占植物種の変化

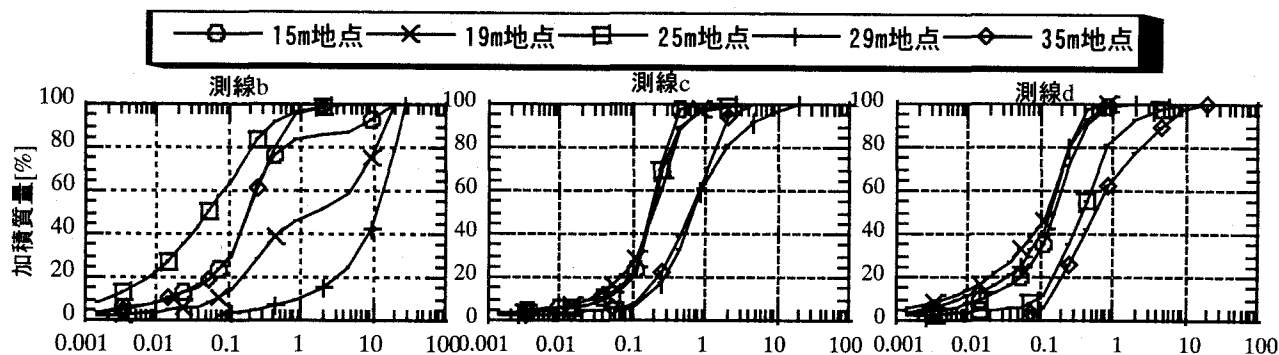


図-9 測線上の表層土砂の粒度分布

傾向と、平水位水際部側に若干厚く堆積しているという横断的傾向が確認できる。また、+0.2m マウンドと+0.5m マウンドとで堆積厚に明確な差はみられなかった。

植生はマウンドごとに異なる遷移過程を辿っている。平成9年の時点では、植栽土を敷設しなかった測線bに、荒れ地によく繁茂が見られるオオアレチノギク、ネズミムギ、オイヌタデといった植生がみられたのに対し、植栽土を敷設した測線c、d上には、+0.5m マウンド上にヨモギ、+0.2m マウンド上にクサヨシの植生が全面的に形成され、初期の立地条件ごとに明確な棲み分けがなされたことが分かる。これが平成10年になると、同じ初期条件のマウンド上にも複数の種類の植生がパッチ状に形成され、また植生の種類も測線cの+0.2m マウンドを除いて全面的に変わってしまった。

施工から1~2年の期間Aは、マウンド施工直後であるため、初期の変遷状況にあると考えられるが、同じ初期条件のマウンドにパッチ状の植生が形成されるに至ったことから、植生の変化に、部分的に生じた立地条件の

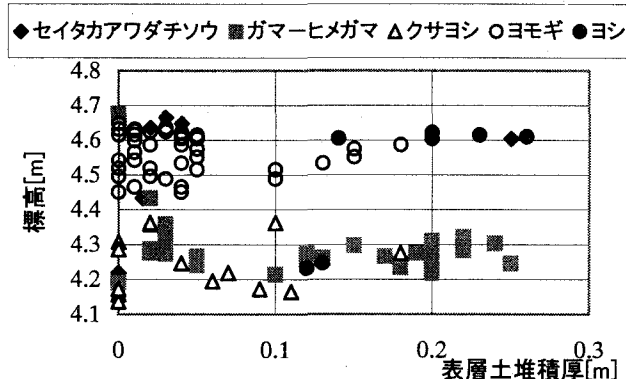


図-8 各植生群落種の生息立地環境(平成10年7月)

変化が影響を与えているのではないかと考え、植生相と標高、表層土堆積厚との関係を検討することにする。図-8は、平成10年7月に測線b~d上に繁茂していた植生相を立地条件(標高・表層土堆積厚)によって分類したものである。これを見ると、クサヨシ、ヨモギ、といった分布範囲を縮小させた植生が、表層土堆積厚の小さい

立地条件である図中左側に多くプロットされているのに対し、平成 10 年になって新たに植生を形成したヨシは表層土層厚が 0.1m 以上の部分に分布している。これは、測線上で確認された表層土の堆積が、優占植物種の変遷を促した可能性を示唆するものである。

以上、時期 A は、マウンド上を植生が覆い、表層土の堆積がはじまった◆過程(2)～(3)にあったと考えられる。

(2) 期間 B

すべてのマウンドが 1 ヶ月以上冠水した出水後の調査では、B、C で広く密生していたヨモギが姿を消し、セイタカアワダチソウ、ガマなど、多くの植物が枯れてしまっていた。群落として残存が確認されたのは、ヨシ、コヌカグサ、特定ができなかったイネ科の一種であり、これらはいずれもイネ科に分類される。特に、特定が出来なかったイネ科の植物は、水位低下後に発芽したと思われる、群落高が 20～30cm 程度、1m² あたり 300～500 本と非常に密生度の高い群落を、試験区 B、C、D 内の広い範囲で形成していた。イネ科の植物は、一般に出水時の破壊に耐える強い根茎を持ち、また、分断された地下茎からも発芽することが知られている。このように、大規模な出水によって、環境特性に適応した植物群落が、河岸に選択的に生息していく過程が観察された。

次に、図-7 中に示す平成 10 年 10 月の横断形状に着目する。測線 b～d すべてにおいて、流心側の標高が著しく低下したが、想定を大きく越える外力がマウンド天端に働いたにも関わらず、水制基部側のマウンドでは標高が上昇している。ここで、同時期の表層土堆積厚を見ても、平水位以上で標高が増大している部分、侵食をうけて平水位以下になった水際部分に 30cm 以上の多量の堆積が見られた。出水後のマウンド表層材料の粒度分布を図-9 に示す。これを見ると、各測線状の表層を構成する材料は大別して、3 つの粒径集団に分けることが出来る。1 つ目は、0.3～1.0mm の粒径であり、これは測線 c-29m、35m、測線 d-25m、35m といった平水位以下の地点の表層材料のほとんどを占める。 $d_{50}=0.8\sim0.9$ 程度であることから、試験区周辺の河床材料であると考えられる。2 つ目は、3.0mm～20mm 程度の砂利成分であり、測線 b-19m、29m の表層に多く含まれている。粒径から判断して、マウンド構成材料を採取したものと推測される。3 つ目は 0.1mm～0.3mm 粒径の細砂であり、測線 b-35m、測線 c-15m、19m、25m、測線 d-15m、19m、29m といった表層土が厚く堆積した地点で、極めて高い割合で含まれていた。今回の出水で、河床材料よりも細かい微細な土砂が上流から供給されたものと考えられる。出水後も残存していた植生が非常に少なかった点、マウンドが深く侵食された水際部にも多く堆積していた点を考慮すると、これら微細土砂の堆積に、◆過程(2)で想定したような植物が寄与した分は少なかったものと考えられ、水制やマウンドの影響が強かったものと考えられる。

6. おわりに

本試験施工の結果、以下に示す知見が得られた。

■マウンドの高さについて

-0.1m、+0.2m、+0.5m の 3 種類の高さのマウンドを設置した結果、-0.1m マウンドに植物群落は形成されず、また植生が繁茂した+0.2m と+0.5m のマウンドでも、植生群落、植被率に明確な差異が生じた。しかしながら、想定する洪水が発生した 2 年間に堆積した表層土の厚さには、有意な差が見られなかった。マウンド高を平水位以上に設定することは明らかになったが、平水位からの標高差について具体的な数字を示すためには、さらなる知見の蓄積が必要である。

■植栽土の有効性について

本試験施工において、植栽土の有無が、施工直後の植生の被覆度・種類に差を与えた。しかしながら、施工後 2 年の時点で、植栽土を敷設しなかったマウンド上にも一面に植生が繁茂し、植栽土を敷設したマウンドでも植物種の遷移が生じてしまったことから、本試験施工の結果を見る限り、植栽土の敷設は省くことが出来ると言えそうである。

■貴重な水際空間の整備

本試験施工では、予想以上に多くの植物種の生存が確認され、また絶滅が危ぶまれる種の植物も生存する環境が形成された。冒頭で述べたように、本工法の特徴が時間的な変動を持った河岸を形成することであることから、河岸形成の速度を速めたり、出水による破壊を小さくしようとするだけでなく、多様な植物が繁茂する平水位近くのマウンドを創造する工法の開発にも研究の価値があると考えられる。

■今後の調査

平成 10 年 10 月の時点で、陸上マウンドのほぼ全面に土砂堆積能力が高いと考えられるイネ科の植物が密生し、次回の出水時には、かなりの土砂が堆積することが期待できる状況である。期間 B の出水による大きなインパクトが、河岸の形成を後退させたのか、前進させたのか、今後も調査を続け、検討していきたい。

謝辞：本試験施工の調査にあたっては、河川研究室研究員であった塚原隆夫氏（現、国土庁水資源計画課係長、当時河川研究室研究員）、同部外研究員であった渡辺敏氏（現、(株)ウエスコ）によって繰り返し検討が行われた。記して謝意を表す。

参考文献：

- 1) 宇多高明、望月達也、藤田光一、平林桂、佐々木克也、服部敦、藤井政人、深谷渉、平館治：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動、土木研究所資料、第 3489 号、pp. 445-503、1997
- 2) 山本晃一：日本の水制、山海堂、PP. 228、1996

(1999. 4. 26 受付)