

第4章 構造工夫の検討にあたっての留意事項

各項のタイトルに続けて、水理実験・解析による検討から得られた留意事項等の内容を表す見出しを【括弧書き】した。留意事項等の索引として活用されたい。

4.1 天端保護工

(1) ひさし形成による「引き延ばし効果」【構造検討諸元での効果確認】

ケースⅠ、Ⅱを代表例として、のり面侵食、ひさし形成そして決壊に至るまでの堤体侵食・崩壊過程等を観察した。以下にその過程を3段階に分けて説明する。

① ひさし形成と堤体侵食・崩落の進行抑制（写真-6,7 参照）

堤体模型ののり面（勾配 1:1.5）が越流水深 5cm の流れによって侵食・崩壊が生じ、のり肩まで進行する（写真-7a）参照。その際、基礎地盤の砂層が洗掘されると、それに隣接する堤体が崩壊する様子が見られた（0～15min）。この時点で侵食・崩壊を受けた堤体面は崖状にほぼ垂直に切り立った形状となった（15min）。

さらに通水を続けると、崖状を保ったままさらに堤体の崩壊が進む（写真-6a）、7b）参照。その進行に伴い天端保護工はひさしを形成するとともにその長さを増していく。形成の初期では、崖状崩壊面の脚部に洗掘が生じ、それにより堤体が崩壊する上記と同様の様子が見られた（写真-6a）：0～5min）。ある長さまでひさしが到達すると、越流水が崖状崩壊面から離れた位置に着水するようになるため、脚部の洗掘が抑制され、そのため崩壊の進行が遅くなった（写真-6a）：5～25min、7b）：0～15min）。例えばケースⅠの場合、初期段階では崖面下部での約 15cm の崩壊進行は 5 分程度であったが、その後は約 20 分を要している。

この状況はひさし形成による進行抑制効果を実験で再現したものと捉えられ、2.2(1)（図-4）に示したプロセス・機構を適用しうることが確認された。

②天端保護工の折損（写真-6b）、7b）参照）

越流水深を増加させると堤体侵食・崩壊の進行をある程度早めることができたが、ひさしが概ね 50cm を越える長さに到達した以降では、流れによる崖面脚部の洗掘がほとんど生じなくなり、進行が遅くなった。

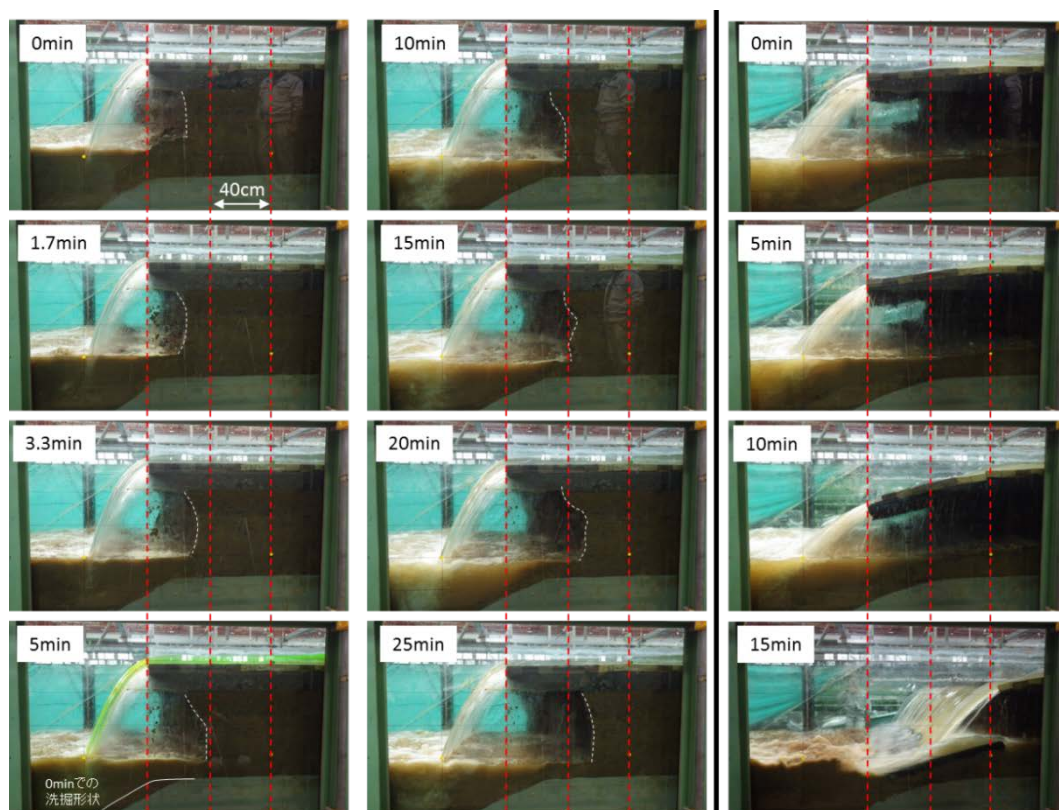
この状況に達した後は、これまでの流れによる洗掘を主要因とした崖面の崩壊に換わり、路盤材などを浸透してきた湧水が崖面を伝って滴り落ちていく際の流れによる侵食または崖面に湧水が浸透することによる安定性の喪失により、崩壊が徐々に進行するようになった。なお、この機構で崩壊した土塊は、越流水の落下による水面の揺動（波の作用）によって運搬されるため、崖下部に累

積して溜まっていくことがなかった。また、この状況下では、浸透流によって路盤材にパイピングなど損傷の発生は確認されなかった(路盤材については(3)で検討を加える)。

上記のように崖面崩落の主要因は水流から浸透流に換わったものの、天端保護工の折損にはどちらが主要因であっても本質的な機構、すなわち堤体の支えを失ってひさし状に伸びた保護工に、自重と保護工上の越流水の重さによって曲げモーメントが作用し、それが限界値を超えて折損することを調べるのに支障はないため、実験を継続した。

再生密粒度のケース I では越流水深約 15cm の通水時に約 96cm、改質 I 型のケース II では越流水深約 10cm の通水時に約 64cm のひさし長で折損した。なお、ひさし長は水路幅方向に一様でないため、ここでは幅方向の平均的な値を示した。

今回の実験範囲ではあるが、いずれのケースにおいても進行抑制効果が確認されており、アスファルトは効果発揮に十分なひさし長を確保する強度を有していたと考えられる(強度によるひさし形成の差異については(2)においてさらに検討を加えることとする)。

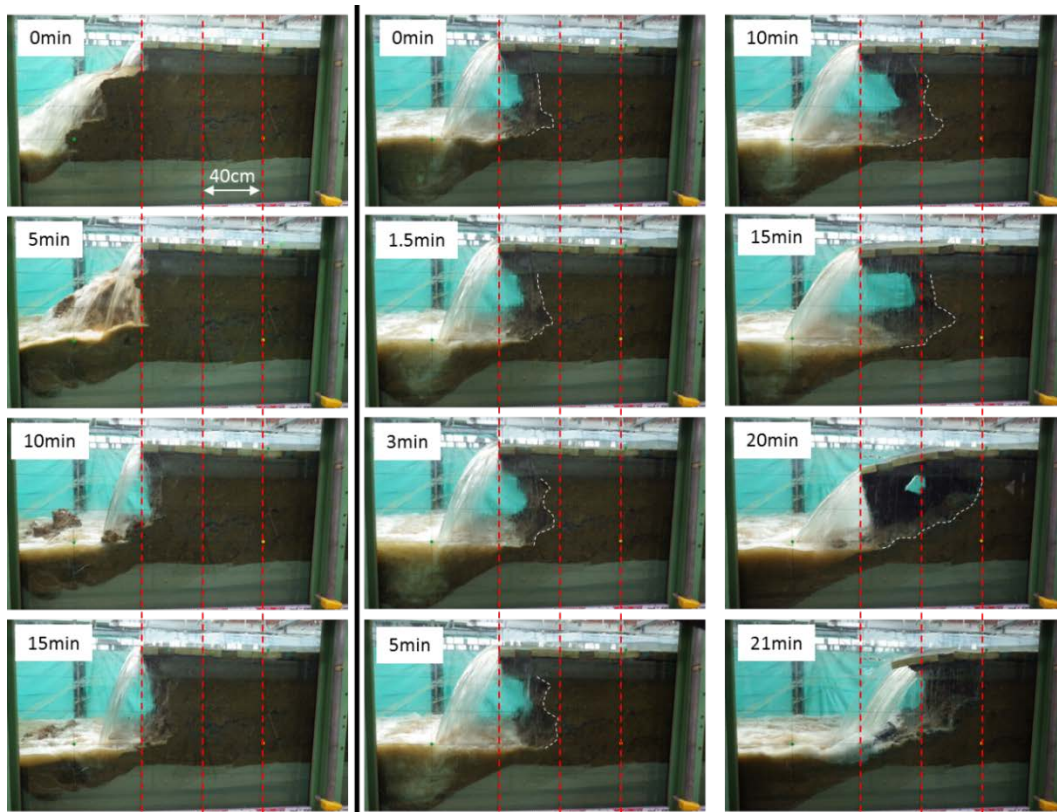


a) ひさし形成 (越流水深約 10cm)

b) アスファルト折損 (＼約 15cm)

写真-6 ひさし形成～アスファルト折損までの進行状況 (ケース I : 再生密粒度)

*) 白点線はガラス面際の崩壊面の形状を表す。また、0min は各流量(越流水深)の通水開始時点では必ずしもなく、進行状況の把握に適した任意時点とした。



a) のり面侵食・崩壊(越流水深約 5cm)

b) ひさし形状～アスファルト折損(// 約 10cm)

写真-7 ひさし形成～アスファルト折損までの進行状況(ケースⅡ:改質Ⅰ型)

*) 白点線はガラス面際の崩壊面の形状を表す。また、0min は各流量(越流水深)の通水開始時点では必ずしもなく、進行状況の把握に適した任意時点とした。

③天端が全幅にわたり決壊するに至るプロセスと機構(写真-8,9 参照)

ケースⅠ,Ⅱに共通してみられた決壊に至るプロセスは下記のとおりであった。

- ・ 上記のひさし折損の発生後、さらに通水を継続すると、再度堤体の崖状崩壊が進行し、ひさしが再形成されていく(写真最上段)。
- ・ ひさし長が大きくなってくると、ひさし部の沈下に伴い、アスファルトの上流端側が若干持ち上がる様子が確認された(写真最上段・中段)。通水を停止し、天端保護工表面の高さ変位の縦断分布を測定したところ、上流端周辺で 1cm 程度持ち上がっていた(図-10 参照)。なお、ケースⅠでは水路左岸～中央にかけて堤体幅が狭く(すなわち、ひさし長が大きくなったため、この範囲でひさし部が相対的に大きく沈下し、それをうけて堤体幅の大きい右岸側では広い範囲で 1cm を越えて持ち上がる状況になったと考えられる。
- ・ これに伴い、水路側壁に沿った浸透流の水の移動が明確に確認でき、湧出

する水量が増加した（写真最下段左）。また、路盤の持ち上がりに伴って発生したと考えられる路盤内でのクラックやアスファルトとの接合面での隙間が観察される箇所があった（写真中段）。これらが水量増加の一因とも考えられたが、水路側壁部での止水処理の不具合発生による漏水発生も散見され、こうした実験固有の理由も無視できない要因となっていると考えられる。今回の実験では、この段階において残存していた堤体幅は1.5m程度であった。

- ・湧出する水量の増加に伴い、それ以前に比べて崩壊進行が速まり、ひさし長が増加していく。あわせて徐々にではあるが、クラックや隙間が大きくなっていく。今回の実験では、この段階において残存していた堤体幅は、1～1.5m程度であった。
- ・堤体や路盤内に水みちが急激に形成され、そこから多量の漏水が発生する。その水流によって堤体・路盤が崩壊・流失し、決壊に至る（写真最下段）。
- ・上記のプロセスは、ひさし形成により天端欠損進行の抑制された状態に比べて、進行が速やかで決壊に至る時間が短縮されている。この観点において、保護工の持ち上がり発生は、天端保護工の「引き延ばし効果」を低下させるものと考えてよい。

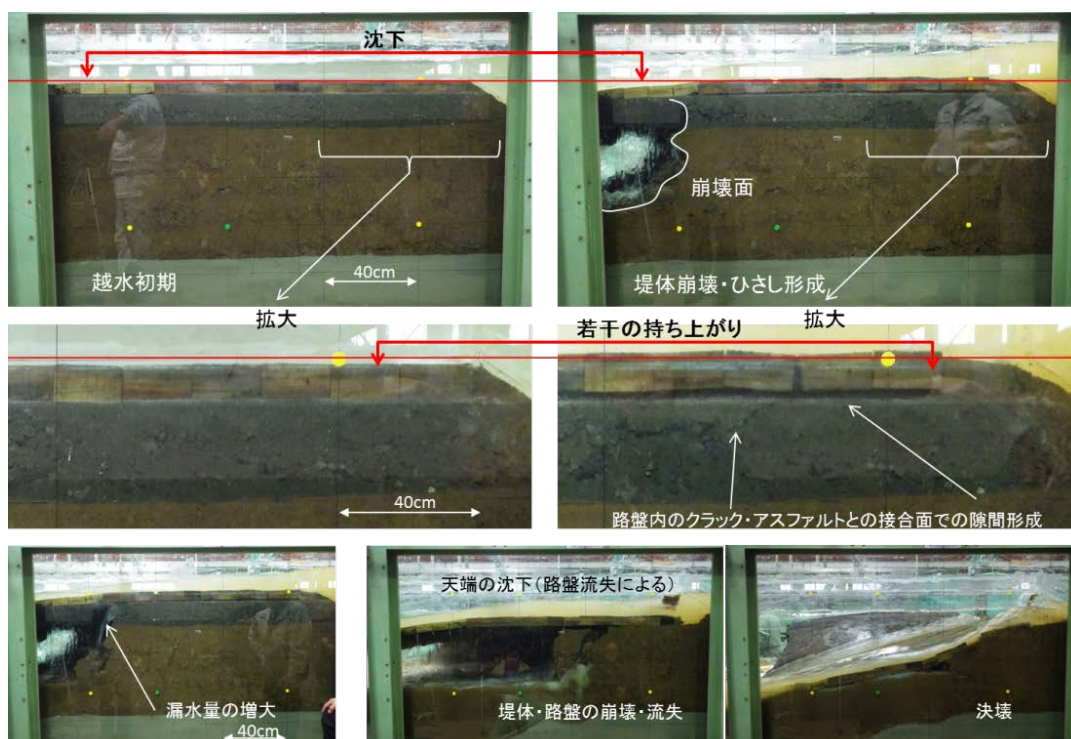


写真-8 ひさし形成から決壊に至るプロセス・機構（ケースⅠ：再生密粒度）

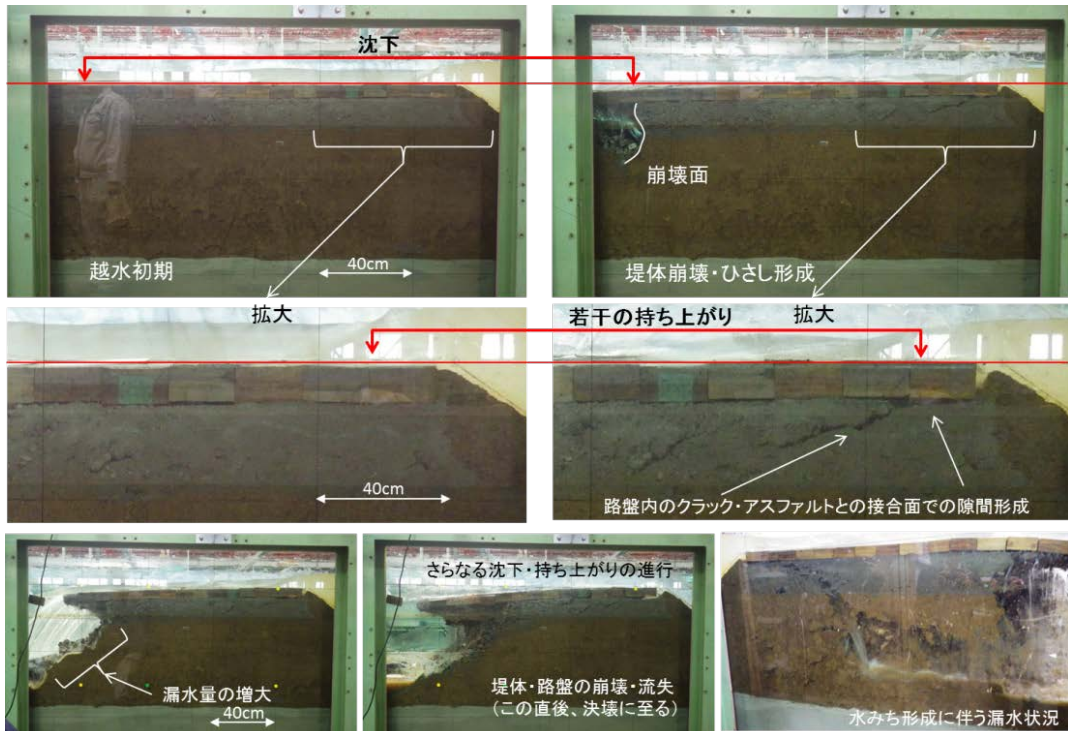
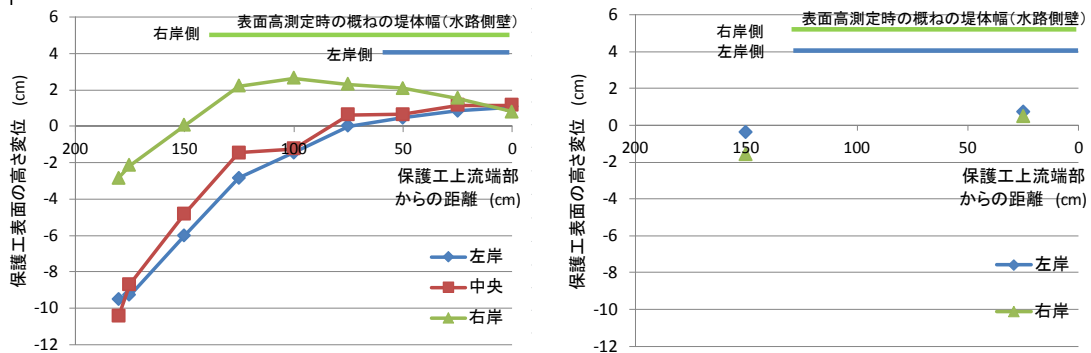


写真-9 ひさし形成から決壊に至るプロセス・機構（ケースⅡ：改質Ⅰ型）



a) ケースⅠ（再生密粒度）

b) ケースⅡ（改質Ⅰ型）

図-10 堤体幅の減少に伴い生じた天端保護工表面の高さ変位の縦断分布

以上の観察から、決壊に至る引き金は天端保護工の持ち上がりと考えられた。この持ち上がりの機構は、その発生状況から、ひさし部に作用する自重と水重を駆動力としたアスファルトの転動と推察された。

また、ひさし形成による「引き延ばし効果」に関して以下の留意事項等が挙げられる。

- 今回の実験範囲では、構造検討諸元の天端被覆工には、ひさし形成による天

端欠損の進行抑制効果が確認された。ただし、崩壊が進行し、天端幅が狭くなると、天端保護工の持ち上がりに伴う浸透破壊が顕在化し、ひさしが形成されているにもかかわらず早期に決壊に至った。

- ・ ひさし形成による抑制効果の発揮には、ある一定以上の天端幅であることを前提とすると考えられる(持ち上がりの機構と効果発揮に必要な天端幅については(4)においてさらに検討を加えることとする)。
- ・ その他の「引き延ばし効果」が十分に発揮される条件として、考えられる事項は以下のとおりである。
 - ・ 堤体が崩れた際に崖状の崩壊面を維持できる(円弧すべりが生じない、崩壊面を維持できる粘着力を有する、崩壊面(または堤高)の高さがある程度小さいなど)。
 - ・ 脚部洗掘(越流水の作用)が堤体の崩壊を起こす主要因である。なお副要因としては、路盤や堤体からの浸透水の湧出による崩壊面の侵食、堤内側氾濫水の水面変動(波打ち)による崩壊面の侵食・不安定化による崩壊が挙げられる。
 - ・ ひさしが十分に長くなり、脚部洗掘では崩壊がほとんど生じなくなった場合には、副要因である浸透などによって崩壊が徐々に進行することがある。
 - ・ 土質(小さな粘着力・高い透水性)や堤高(崩壊を起こす外力増)などの条件によっては、副要因が主要因と同等以上の作用をもたらさう。さらには、崩壊面が崖状を維持できなくなり、斜面となることも考えられる。これらの場合、ひさし状を保つことによる「引き延ばし効果」は、効果が小さいまたはないと想定される。

(2) 天端保護工上の水深とひさし形成【アスファルトの材質(強度)】

今回の水路実験においても、越流水深・堤高など限られた実験条件下の結果であるが、崩壊の進行抑制効果を示すひさしの形成が確認できた。そこで、ひさし保持強度試験から得られるアスファルトの曲げ強度を用いて、アスファルト上に一様水深で水重が作用した状況を想定し、水深と限界ひさし長の関係を算定することを試みた。

上記試験により得た曲げ強度と表面温度との関係を図-11に示す。なお、再生密粒度および改質Ⅰ型のアスファルト比重は、実測に基づいて2.46、2.32を用いた。温度の上昇に伴い曲げ強度が低下する傾向が見られた。

そこで、試験を行った温度の範囲において、天端保護工上の水深と限界ひさし長の関係を試算した結果を図-12に示す。同図には、実物水路実験でひさしが折損した長さをプロットした(横軸の水深として、折損前のひさし先端から75cm上

流側での水深測定値を用いた)。水路実験のひさし長は、実験時の水温と近いアスファルト表面温度での限界ひさし長と近い値となった。

(1)に述べたように、水路実験では崖面に水路横断方向の凹凸があり、そのためひさし長が一樣ではない。上記の比較はこの凹凸の影響を考慮していないため、厳密な意味での試算妥当性の検証としては不足するが、折損の生じうるひさし長を概略把握するには活用しうると考えてよいであろう。そうした見方に基づくと、図-12 に示した範囲では、水深 20cm(越流水深 30cm 程度に相当)に対して再生密粒度アスファルトで 50cm 程度のひさしが形成されると推定される。このひさし長は、今回の実験範囲では、天端崩壊の進行抑制効果を発揮すると思われる(1)②天端保護工の折損を参照)。

ただし、今回の試算は施工直後のアスファルトを対象としたものであるため、実際に現地で供用されることで経年的な強度の低下が認められた場合には、より小さい限界ひさし長となることに留意されたい。

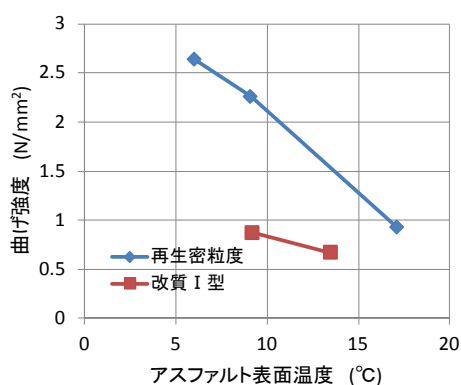


図-11 曲げ強度と温度の関係

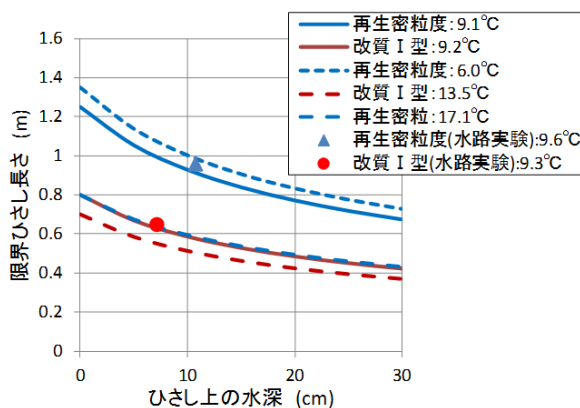


図-12 限界ひさし長とひさし上水深の関係

(3) 路盤材の浸透に対する挙動【路盤材料とのり肩での路盤端部処理】

(1)の水路実験結果で述べたように、のり肩の路盤端部が水の浸入口となって、路盤材内に浸透流が生じ、崖状の崩壊面において湧出する様子が確認された。また、アスファルトの転動による持ち上がりが生じる前までは、浸透によるパイピングなど損傷の発生は確認されなかった。今回の実験範囲(越流水深 25cm まで)では、構造検討諸元として示したように RC-40 を路盤材として用いて一般的なのり肩部の端部処理を施すことで、路盤が弱点箇所にはならないと考えられる。

(4) 天端保護工のひさし形成に対する安定性【天端保護工の設置幅】

今回の水路実験においては、崖状となった堤体面の位置が水路横断方向に必ず

しも一様でなく凹凸があり、アスファルトのひさし長（裏を返せば、残存する堤体幅）が一様ではない。実験において周囲に比べて崩壊の進んだ凹部に天端保護工が大きく傾いていく様子から、こうした非一様性、凹凸は少なからず転動に影響を与えていると推察される。そのため、今回の実験で明確な転動発生の目安を見いだすのは必ずしも容易ではない。ただし、目安としては、凹部となった箇所に残存する堤体幅が 1.5m 程度に達した以降にアスファルトの転動が発生していることが挙げられる。

上記の実験観察から得た目安の確信をさらに補強する目的で、凹凸のない一様な崩壊が生じる場合を想定し、アスファルトの転動に対する安定性について試算を行った。

試算の対象とした堤体形状・天端保護工の状態、および水圧などの作用状況を **図-13a**) に示す。アスファルト上の水深分布は不等流計算により得た。水深分布はひさし化した部分が水平の場合とたわんで勾配がついた場合とで顕著に異なるため（勾配がつくと水深が小さくなる）、これら両者について検討した（以下、これらケースをたわみなし・ありと呼ぶ）。

路盤内の浸透水によりアスファルトに上向きに作用する水圧分布は、浸透が定常に達した状態を想定し、**図-13a**) に示すように直線分布で与えた。上流端部の水圧は、越流水流が静水圧分布をとると仮定して、不等流計算で得た水位から路盤上面までの水深に等しいとして与えた。アスファルトについては、構造検討諸元と同一の厚さ 5cm と設定し、比重 2.4 として自重を計算した。

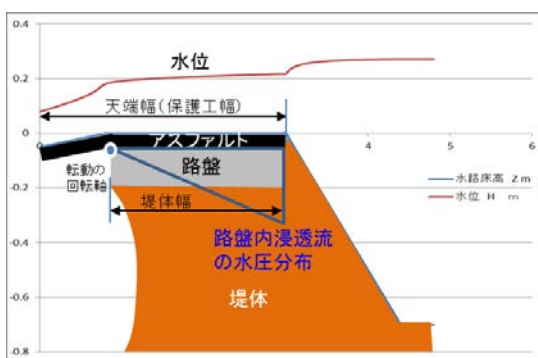
上記のようなアスファルト形状・力の作用状況のもと、崖面の位置を転動の軸として、ひさし側の転動の駆動モーメントとその逆側の抑制モーメントを算定し、その比を転動安全率として定義した。

転動安全率の計算は下記のとおり、ひさし長、越流水深、天端幅を変化させて行った。その結果を整理して、安全率が 1 を下回る天端幅（以下、転動限界天端幅とよぶ）と越流水深、ひさし長との関係を得る。

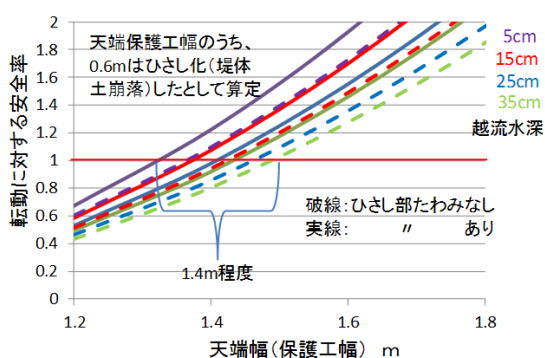
- ・ ひさし長：(2)の再生密粒度アスファルトの限界ひさし長の検討結果を参考に、0.6, 0.8, 1.0m の一定値として与えた。
- ・ 越流水深：5, 15, 25, 35cm
- ・ 天端幅：転動限界天端幅周辺で、20~30cm 刻みで段階的に増減させることで与えた。
- ・ 「たわみあり」でのひさしの傾きは 1/16 の一様勾配として与えた（実験を参考に、80cm のひさしとその先端で 5cm たわんだ状態を想定して設定した）。

以上の条件・手法で安全率を試算した結果を **図-13b) ~d)** に示す。

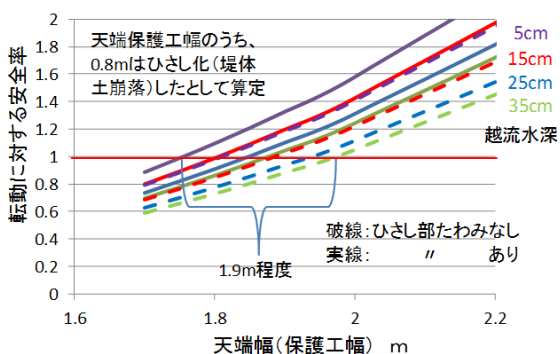
ひさし長の 20cm ずつの増加に伴い、転動限界天端幅は 40~50cm 増加するが、それに比較して、越流水深およびたわみありなしでは 20cm 程度の幅内の変化となった。したがって、今回の試算目的である転動の生じうる天端幅の目安を得ることを念頭に置くと、越流水深およびたわみありなしによる変化幅は均して、その幅の中央値を目安として用いられよう。今回の水路実験でアスファルトが折損した長さに近い計算条件であるひさし長 80, 100cm の試算結果では、転動限界天端幅が約 1.9m および 2.3m となった。この天端幅からひさし長を差し引いた値が、残存する堤体幅となりそれぞれ 1.1m, 1.3m となる。これら値は前述の実験観察から導いた目安と近い値となった。ただし、この試算は上記したような崖面の凹凸を考慮していないため、この比較は試算の妥当性検証という意味合いでなく、目安とする値が実験、試算という異なる 2 手法で概ね近い値をとったことの確認以上の意味合いはないことに留意されたい。



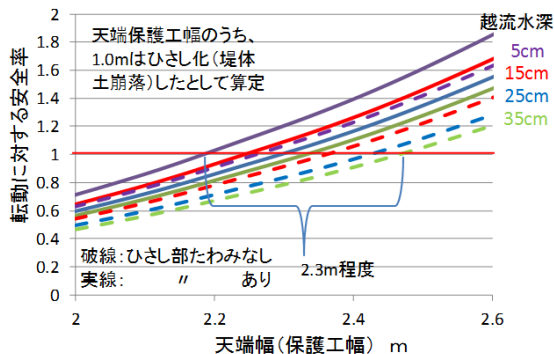
a) 検討対象とした天端保護工形状・水理条件



b) ひさし長 60cm



c) ひさし長 80cm



d) ひさし長 100cm

図-13 転動に対する安全率と天端幅の関係

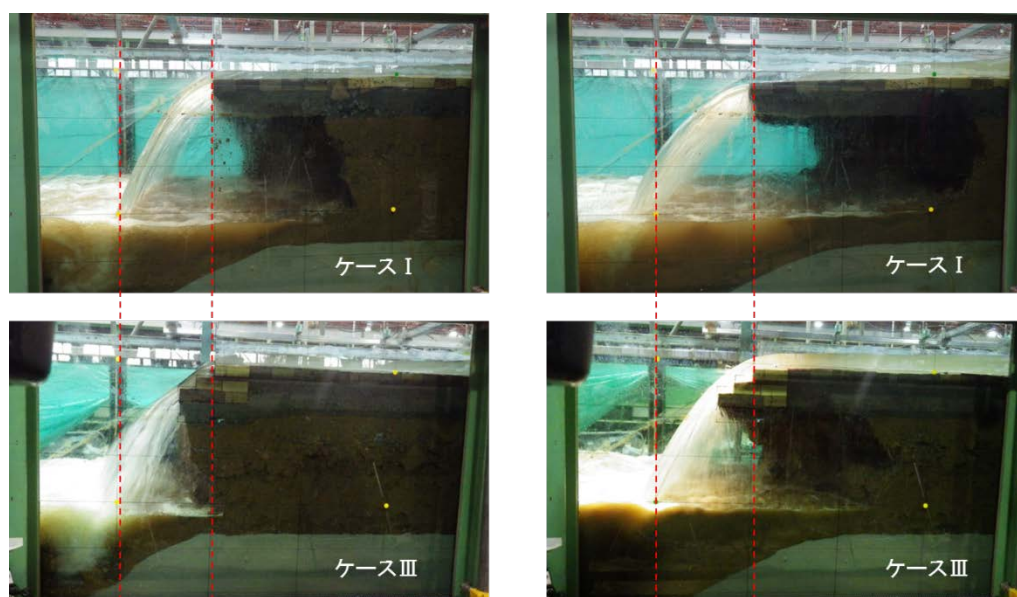
以上のような検討段階であるが、上記の目安を参考とすると、幅 2m 程度の天端幅に達すると、ひさし形成による「引き延ばし効果」が転動発生により減じられると捉えてよいであろう。この結果は、天端がもともと狭い堤防に天端保護工

を設置する場合には，保護工の設置幅を広げるなどの構造上の工夫を加えることが引き伸ばし効果を高める上で特に効果的であることを示唆している（工夫の一例については(5)参照）。

(5) 多層積みによるアスファルト敷設の効果【多層積みの活用の考え方】

ケースⅢはのり勾配 1:1.5 と急勾配の実験条件であった．この場合，多層積みの効果は下記の理由で限定的であった．すなわち，アスファルト端部から越流水が放出される際，多層積みにすることで延長したアスファルト部には水流がほとんどあたらず，そのため延長部は越流水が崖状面からより離れた位置に着水させるひさし長の増加に寄与しなかった（写真-10 参照）。

以上の結果から，多層積みの効果を高めるためには，延長部の端部から越流水が放出されるように各層の幅をより広くすることが必要と考えられる．すなわち，のり勾配が緩い堤防への適用において，効果を発揮すると推察される．



a) 越流水深 10cm

b) 越流水深 15cm

写真-10 多層積みの有無による着水地点の差異の比較（ケースⅠ，Ⅲの比較）

※下記アイデアは実験によって効果を確認していないが，原理的に考えて効果を向上させられると思われるのでここに付記しておく。

- ・ 構造：ケースⅢで堤内側に設けた「多層積みアスファルト」構造を，川側に設ける。
- ・ 期待する機能
 - ・ アスファルトの転動に対するカウンターウエイトの増加（転動しにくい構造）
 - ・ 路盤への浸透の抑制（路盤から湧出した水流による崖面の侵食・崩壊の抑制）
- ・ 有効性が特に高いと考えられる堤防：天端幅が狭い堤防．目安となる幅は，(4)で検討した転動安全率が1となる幅（約1.4～2.3m）

4.2 のり尻補強工

越流水深を段階的に変えて、洗掘形状を測定するとともに通水時の流況観察を実施した。全ケースの結果は巻末<参考資料>図・写真集に示す。以下では、それら結果から適宜引用して、留意事項等について解説する。

4.2.1 平場なし

(1) のり尻補強工の「引き延ばし効果」【構造検討諸元での効果確認】

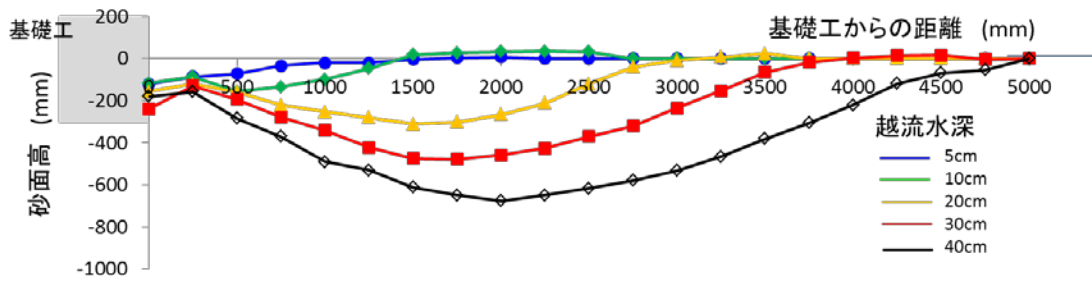
のり尻補強工の代表例として矩形実大ケースを取り上げ、対策なしと洗掘形状を比較した結果を図-14に示す。越流水深5cm、10cmでは、のり尻（基礎工）近傍の最大洗掘深の大きさと洗掘形状に大きな差異は認められないが、越流水深が20cmを越えると明確な差異が生じる。のり尻（基礎工）近傍では、補強工ありでは洗掘の進行が抑制され、基礎工根入れ深さ以下の洗掘深となったが、対策なしではそれを越える洗掘が生じ、かつ越流水深の増加に伴って洗掘深が大きくなっている。洗掘形状については、最大洗掘深の位置に着目すると、補強工ありでは基礎工から1.5～2mほど離れているのに対して、対策なしではそれより近い1m以下となっている。

また、写真-11に示す補強工のり尻周辺での流況には、基礎工上面で水はねが生じ、基礎工から離れた位置で跳水状の水面の盛り上がりが生じている様子が見られる。この位置を同じく写真-11に示した洗掘状況と対比すると、深い洗掘が生じている位置と概ね重なっている。この観察から、水はねが基礎工近傍の洗掘抑制に深く関わっていることが示唆される（これについては(2)でさらに検討を加える）。

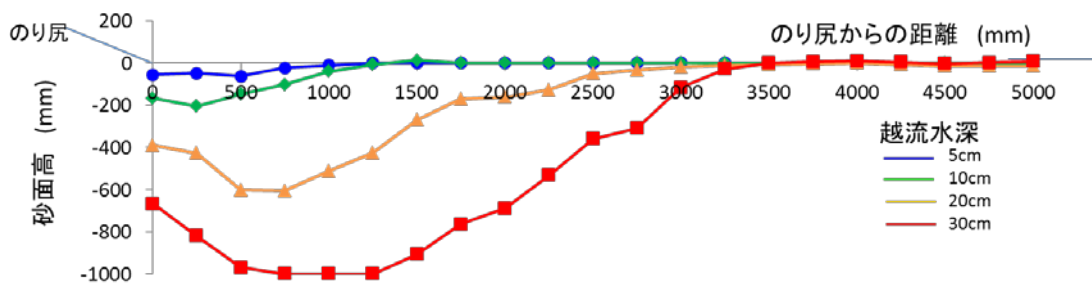
矩形実大ケースでは、基礎工は実際の施工を模してコンクリート製のものを砂面下に埋設したが、図-14a)に示したとおり根固工近傍の洗掘深が根入れ深さより小さく、のり覆工・基礎工とも変状が見られず、安定性を保っていた。対策なしのケースでは、実験では堤体をモルタルで覆ったため崩壊が生じなかったが、その洗掘深の大きさから土堤であれば崩壊が生じていたと推察するのは妥当であろう。

さらに越流水深を50cmに上げて通水を行ったところ、のり覆工が滑り落ちるように変位し、その後めくれ上がって流失した。通水を停止したところ、基礎工が沈下し、周囲が大きく洗掘されていた（写真-11参照）。

以上の状況は、のり尻補強工による洗掘抑制効果を実験で再現したものと捉えられ、2.2(2)（図-5a)）に示したプロセス・機構を適用しうることが確認された。



a) のり尻補強工（矩形実物）



b) 対策なし

図-14 のり尻補強工（矩形実物）と対策なしの洗掘形状の比較



写真-11 のり尻補強工：実物矩形での越流*・洗掘*・破壊状況（*：越流水深 30cm）

(2) 基礎工・のり覆工により発揮される洗掘抑制効果の特徴【基礎工の諸元】

基礎工の有無およびのり面粗度を系統的に変化させた縮尺模型実験の各ケースの比較より、基礎工の水はね・のり覆工の流速低減のそれぞれがもたらす洗掘抑制効果の大きさの把握を試みた。図-15 に比較対象としたケースと洗掘形状を示すとともに、比較の組み合わせとのり尻際洗掘深を指標として洗掘抑制効果の相対的な大きさを表した。以下にそれぞれの比較から得られる要点を整理した。

◆比較①：のり面粗度の効果

のり面粗度が異なる対策なし・平板（基礎工なし）の実験より、粗度の大きい対策なしの洗掘深が小さくなる結果を得た。のり面（のり覆工）の表面粗度による流速低減により洗掘深が低減される。（ただし、(3)に後述するように粗度要素を高くすると洗掘深が大きくなる副作用が確認された。）

◆比較②：基礎工の効果

基礎工の有無が異なる平板（基礎工あり・なし）の実験より、基礎工ありの洗掘深が小さくなる結果を得た。水はね（地表から高流速域を離す）により洗掘深が低減される。対策なしのケースより大きな低減となったこと、および上記した副作用も考慮すると、のり面粗度より基礎工水はねのほうが効果大と考えてよい。

◆比較③：のり尻補強の効果

基礎工による水はね・のり面粗度による流速低下の両機能を発揮するのり尻補強の代表実験ケース棒形模型（25mm）は、対策なしはもちろん、平板（基礎工あり）の実験より洗掘深が小さくなる結果を得た。基礎工の水はねの効果に流速を低減するのり面粗度の効果を加えることで、洗掘抑制効果を高めることができる。

以上の比較結果に加え、のり尻での洗掘が拡大してのり面へ侵食が進行する（中間段階に移行する）洗掘深が（基礎工あり）>（対策なし）である^{*}ことも考慮すると、構造検討諸元の基礎工で一定の洗掘抑制効果が得られると考えてよい。

^{*} 対策なしは植生の流出が生じる洗掘深に相当し、概ね 10cm 程度である（根の侵入深さを超えると植生が流失）。それに対して、のり尻補強工では基礎工の安定性が損なわれる深さに相当し、構造検討諸元の場合には概ね 30cm である（(1)の実大水路実験のように基礎工は根入れ深さ以下では安定を保つとの考えに基づく）。

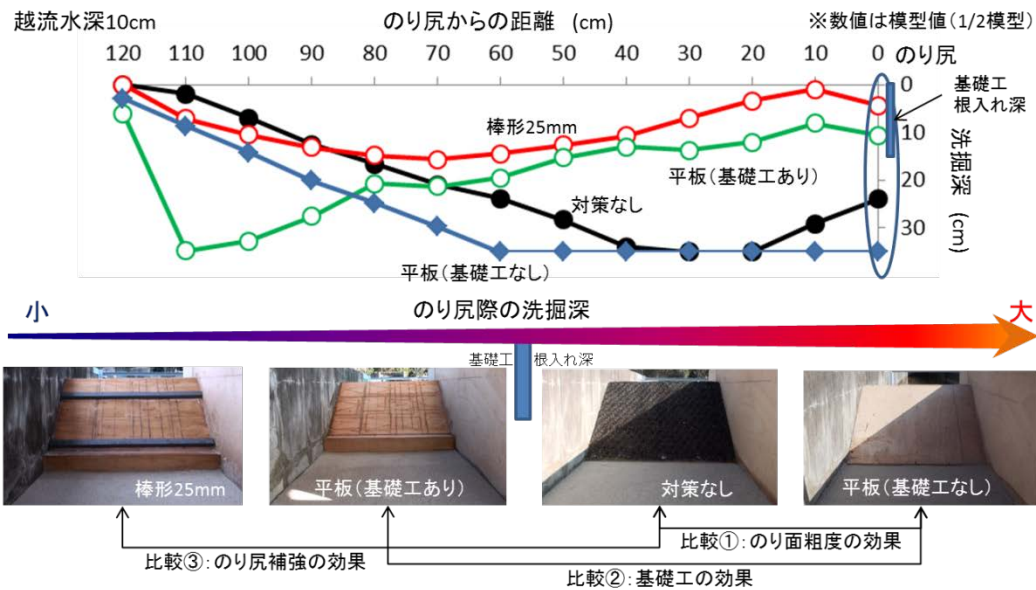


図-15 基礎工の有無・のり面粗度の大きさにより変化する洗掘深の比較

(3) 粗度要素高さによる洗掘抑制効果の差異【のり覆工粗度による副作用を抑える基本的考え方】

同一の粗度形状・配置において粗度要素の高さを段階的に変化させた縮尺模型実験より、図-16 に示すように粗度高さが大きくなるに伴って洗掘深が大きくなる結果を得た(矩形模型, 棒形模型)。特に両ケースの最大高さでの洗掘深は、平板(基礎工あり)のケース(図-15 参照)に比較して洗掘深がより大きくなっている。この結果は、のり覆工の流速低減効果を狙い、粗度を大きくする意図で粗度高さを大きくしていくと、むしろ洗掘抑制効果が減じることを示唆する。一方、粗度要素の高さを極端に低くして滑面に近づけることは、最大高さのケースのように粗度高さを大きくしすぎる場合ほどに洗掘低減効果を減じることには繋がらないと考えられる。

したがって、粗度高さをある一定値以下(粗度の形状や平面配置などにより異なる値をとる)の範囲に抑えることは、相対的に高い洗掘低減効果を得られるのり覆工粗度を絞り込むことに有効と考えられる。

なお、粗度高さによって流速低減効果が異なるのは、図-16 に概説したように粗度要素上の流況により基礎工の水はねの生じ方に差異が生じることに関連している。これについては(4)において検討結果を詳述する。

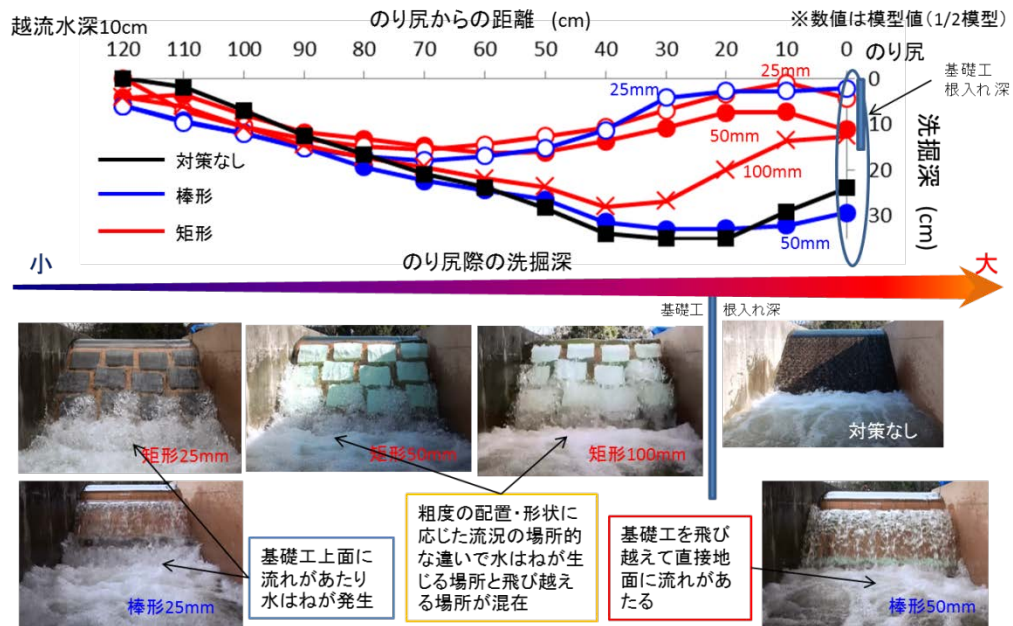


図-16 粗度高さによる洗掘形状の変化とのり尻際洗掘深の比較

◆今回の実験ケースから洗掘抑制効果をランク分けする試み

実験ケース（ブロックの粗度状況，粗度要素の高さ）によって，洗掘抑制効果にすくなからず差異が認められた．効果の大小を分ける要因を明確にすることを目的として，下記のとおりランク分けすることを試みた．

- ・ 「ランク分けⅠ」は，「引き延ばし効果」を有すると見なせるケースか否かを分けるものである．
 - 効果あり：「対策なし」に比べて洗掘深が低減される．
 - 効果なし：「対策なし」に比べて洗掘深がより大きくなる．
- ・ 「ランク分けⅡ」は，上記目的を鑑みて，越流水深 20cm における洗掘深の大きさにより大・小にランク分けすることとした．
 - 効果大：基礎工の根入れ深さ（30cm）程度以下
 - 効果小：基礎工の根入れ深さ程度 or それ以上

ここで，洗掘を引き起こす外力条件を越流水深 20cm と設定したのは，2.3(2)で述べた構造検討上の要件の一つ「のり尻補強はのり面植生の耐侵食力と同等程度の流速（越流水深）まで効果を発揮すれば良い」を踏まえて，その越流水深の目安として既往文献³⁾を参考に設定したものである．すなわち，年2回程度の草刈りを行っている堤防植生の耐侵食力を水深平均流速で 2m/s とおき，この流速が生じる越流水深がのり勾配 1:2 の場合，20cm 程度に

相当するという試算に基づいて設定した。

なお、ランク分けⅠで効果ありに該当するケースであれば、のり尻補強による効果は得られることを改めて付記しておく。ランク分けの結果を表-5に示す。

表-5 効果の有無・大小の区分結果（表中の値は実スケール値）

粗度状況	粗度高さ	Ⅰ：効果の有無	Ⅱ：効果の大小
棒形（模型）	50mm	○	大
	100mm	×	—
菱形（模型） 疎配置	80mm	○	小
	120mm	○	小
矩形（模型）	50mm	○	大
	100mm	○	大
	200mm	○	小
階段（模型）	300mm	○	小
菱形（実物） 密配置	80mm	○	大
矩形（実物）	100mm	○	大

(4) 基礎工の水はね効果の発揮に関わるのり覆工（ブロック）上の流況【ブロックの粗度要素の配置と高さ】

のり覆工上の水流が基礎工上面にすべて当たるか部分的であるかといった流況の差異が、基礎工の水はねによる洗掘防止効果の大きさを変えうる一因と考えられた。のり覆工上の流況は今回の実験範囲では、後述の2パターンに分類できた。

以下では、流況と水はねに関する観察結果からブロック上の流況とブロック諸元（主に粗度要素の高さ・配置）の関わり、それに表-5に整理した洗掘抑制効果に関する実験結果を併せて、水はね効果に与えるブロック諸元の影響について、パターン別に考察を加えた結果を整理して示す。

◆パターンⅠ：越流水が粗度要素により跳ね上げられる流況となるブロック
今回の実験の範囲では、下記のブロックが該当した。

- 1) 粗度要素が比較的疎に千鳥配置されているブロック（菱形模型・実物、矩形実物）

2) 粗度要素が横断方向に棒状に連結（または狭い隙間を挟んで、横方向に一直列に配置）された粗度が上下方向に間を空けて疎に配置されているブロック（棒形模型・実物）

これらのブロックに共通するのは、のり面上下方向に配置された粗度要素間が比較的離れており（今回実験の範囲では目安として 50cm 程度）、その間が平滑面であること、である。そのため、この粗度要素間を流下する間に越流水の流速は増加する。高流速に達した射流が粗度要素側面に達すると、粗度要素に乗り上げ、流向を上向きに変えられて粗度頂部で剥離し、空中に放出されることで跳ね上げが生じると考えられる。放出角度がより上方を向いて跳ね上げられた高流速の流れは、そのまま基礎工を飛び越える、または基礎工上に着水するが部分的となるため、基礎工による水はねが生じにくくなる。

放出角度がどの程度上方に向くのかは、基礎工の水はねと同様に、粗度要素の側面が水衝部となって流向を変える働きの大きさに依存する。その働きは側面の長さ、すなわち粗度要素の高さが水深に比べてより大きくなるほど、大きくなると考えられる。菱形ブロック・棒形ブロックの実験ケースにおいて粗度要素の高さが大きいブロックほど跳ね上げが大きくなり、基礎工の水はねによる洗掘抑制効果が小さくなったのは上記が一因であると推察される。

◆パターンⅡ：粗度要素が水没して、粗度要素頂部上を越流水が流下していく流況となるブロック

今回の実験では、粗度要素が比較的密に配置されたブロック（矩形模型）がこの流況に該当した。

パターンⅠとは逆に要素間の距離が小さめであり、粗度頂部で流れが剥離するが跳ね上がりには至らず、粗度要素群の頂部上や間を沿うように流下する。この場合、粗度要素が高くなると、要素頂部上を流下してきた越流水の全部または多くがのり尻において基礎工上面に当たらずに放出されるため、基礎工による水はねが生じにくくなる。

こうした流況が顕在化するかは、粗度要素群の頂部に接するようにのり面と平行に引いた直線と基礎工上面との交点の位置が一つの目安となり得ると考えられる。この平行線を粗度頂部上を流下してきた越流水の流向を近似的に表したものと見立てて、交点の位置から基礎工端部までの範囲がこの越流水に対する水衝たりの生じる範囲と見なせよう。

粗度要素が高くなると、交点の位置は基礎工ののり覆工との接合部から離れていき、端部に近づいていくので、水衝範囲は短くなっていく。さらに高くなると、基礎工上面とは交わらなくなり、水衝範囲が形成されない結果と

なる。のり面上の水深に比較して水衝範囲が小さくなるほど、基礎工による水はねが生じにくくなると推察される。矩形ブロックの実験ケースにおいて粗度要素の高さが高いブロックほど基礎工の水はねによる洗掘抑制効果が小さくなったのは上記が一因であると推察される。

なお、模型実験で用いた菱形模型とよく似た粗度形状である実大実験の菱形実物のブロックは、菱形模型に比較して密な千鳥配置となっており、流況は基本的にはパターンⅠであるが、越流流量（水深）が大きくなるとパターンⅡに近づいた。この例のように、パターンはブロックに固有のものでなく、越流量（越流水深）など水理量によっても変わりうるものであることに留意されたい。

今回の実験範囲では、表5に示した基礎工の洗掘抑制効果と粗度要素高さの対応は、パターンごとに以下のように区分された。限られた粗度要素の形状、配置など諸元の実験結果から区分したものであることに留意された上で、ブロックの選定において参考とされたい。

- ・パターンⅠ-1) (菱形ブロック実験より)
 模型実験の疎配置では高さ 8cm, 12cm ともに効果小
 実大実験の密配置では高さ 8cm で効果大
- ・パターンⅠ-2) (棒形ブロック実験より)
 高さ 5cm は効果大 (10cm は効果なし)
- ・パターンⅡ (矩形ブロック実験より)
 高さ 5cm, 10cm は効果大 (20cm は効果小)

なお、上記区分は構造検討諸元の基礎工のもとで得られたものである。構造検討諸元より大きな幅の基礎工を用いることは、基礎工上面の水はね効果を高める上で有効であるので、上記参考の粗度要素高さより大きいブロックの場合でも高い水はね効果を得ることが原理的には可能である。後述する4章2節2項平場ありは、これにあてはまる（構造検討諸元では1.5m幅としている）。

(5) のり覆工（ブロック）の流水に対する安定性【ブロックの重量】

実大水路実験では、ブロックは空積みとした。越流実験時の観察によると、のり尻近傍のブロック間目地から水が湧出する状況が確認された。今回の実験で用いた堤体はモルタルで被覆されており不透水であることを考慮すると、ブロック上流側で目地から流入し、ブロック背後の砕石層内を流下した越流水が湧出したものと推定される。こうしたブロック上面背面間の水のやりとりがある状況下で

実験を行ったが、ブロックに転動・抜け上がりなどが生じずに安定した状態を保った。

なお、実験に用いたブロックは、粗度要素の高さ 8cm または 10cm と粗度の大きめの菱形・矩形ブロックは 300kg/m^2 程度、高さ 5cm の粗度の小さめの棒形ブロックは 200kg/m^2 程度であった（後述の表-6 に示す平場ありの実験結果）。いずれも流況はパターンⅠであるが、流量大となるとパターンⅡとの中間的な流況となった。跳ね上げが生じる流況では、粗度要素頂部より下流では流れが剥離して空中に放出されている。流れがブロックから離れてその下側（ブロック側）に大気が入り込んでいる状態では、ブロック表面に作用する圧力は大気圧程度と推察される。この場合、ブロック上面の水流による揚力はさほど大きくなく、ブロック背後の碎石層と目地内が水で満たされていることによる浮力の作用が主体であると推察される。流況がパターンⅠであったことは、のり勾配 1:1.5 という急勾配面上に設置されたブロック上を高流速の越流水が流下するといった比較的厳しめの外力作用状況下でも、上記したブロック重量で安定性を保てた要因の一つと考えられる。

パターンⅡでは、その流況から原理的に考えて、ブロックの粗度の大きさによってはパターンⅠより大きな揚力が作用する場合があります。したがって、今回の実験範囲からは、パターンⅡでも安定性を保てるかは判断できない。この流況に対しては、護岸の力学設計で用いられる抗力係数・揚力係数による流体力の推定方法を適用しうる（ただし係数の値については流況に応じた調整が必要）ので、必要に応じてブロック重量と抗力・揚力の比較による安定性の検討を行うのがよい。

(6) のり尻近傍に堤脚水路が設置されている場合の洗掘状況【基礎工～堤脚水路間の侵食防止のための追加的措置の必要性について】

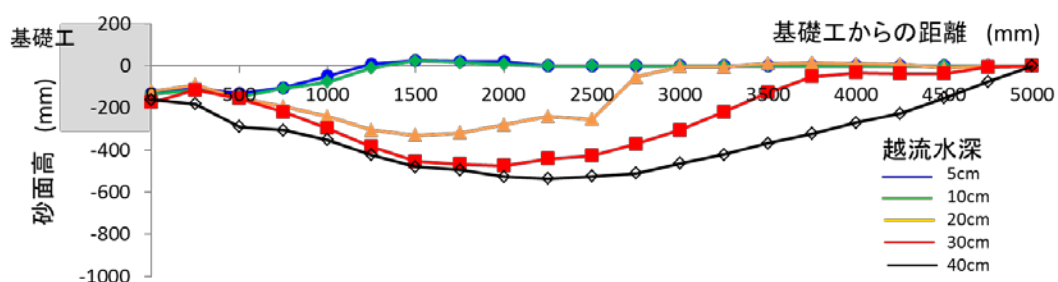
「2H ルール」⁶⁾に基づいてのり尻から距離を置いて堤脚水路が設置された場合を想定し、実大実験を行った。この堤脚水路の位置は、堤脚水路なしの実大水路実験において、越流水深 20cm, 30cm の通水後に深く洗掘された範囲と概ね重なっている。この範囲では、図-5a) に示したイメージのように基礎工で水はねされた高速の流れが水面側にとどまらず、底面側にも十分に広がって流下してくる流況に変わりつつある区間と推察される（写真-11 参照）。こうした範囲に堤脚水路が設けられることは、水はねされた高流速が水路側壁に当たり、強い循環流が形成されやすい条件であると考えられたため、実大実験で堤脚水路の影響を把握する代表的条件として選定している。

越流水深 5cm, 10cm では、基礎工近傍での洗掘形状は堤脚水路ありとなしでおおむね一致する結果となった（図-17 参照）。洗掘を受けた範囲が堤脚水路側壁の

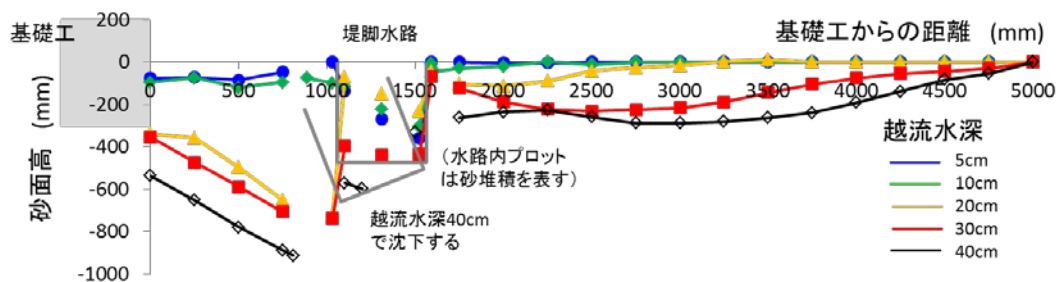
位置にほとんど掛からないため、堤脚水路側壁が地中から洗い出されて露出した箇所は限定的であった。このため、堤脚水路の影響が小さかったと考えられる。

越流水深 20cm, 30cm では、堤脚水路周辺で洗掘が進行したため、側壁が大きく露出するとともに、堤脚水路なしに比較して基礎工近傍の洗掘深が増加する結果となった。その洗掘の大きさは、対策なし（図-14b）参照）に相当する程度となった。堤脚水路から基礎工に向かって洗掘深が小さくなる洗掘形状となっていることから、この範囲には流れの一部が水衝部となる側壁に沿って下降し、さらに底面に沿って基礎工に向かう循環流が形成されたと推察される（写真-12 参照）。これに基づくと、堤脚水路の設置に伴う洗掘増大の抑制・防止のためには、水路側壁の洗い出し・露出を軽減することが効果的と考えられる（例えば、基礎工から堤脚水路間に侵食防止のための被覆工を設置するなど）。

なお、越流水深 20cm, 30cm の場合であっても、堤脚水路の設置位置が越流水深 5cm, 10cm の実験結果のように堤脚水路なしで洗掘を受けた範囲外となるまで基礎工から離れていれば、上記のような大きな洗掘に至ることはないと考えられる。



a) 堤脚水路なし



b) 堤脚水路あり

図-17 堤脚水路の有無による洗掘形状の比較（菱形実物）

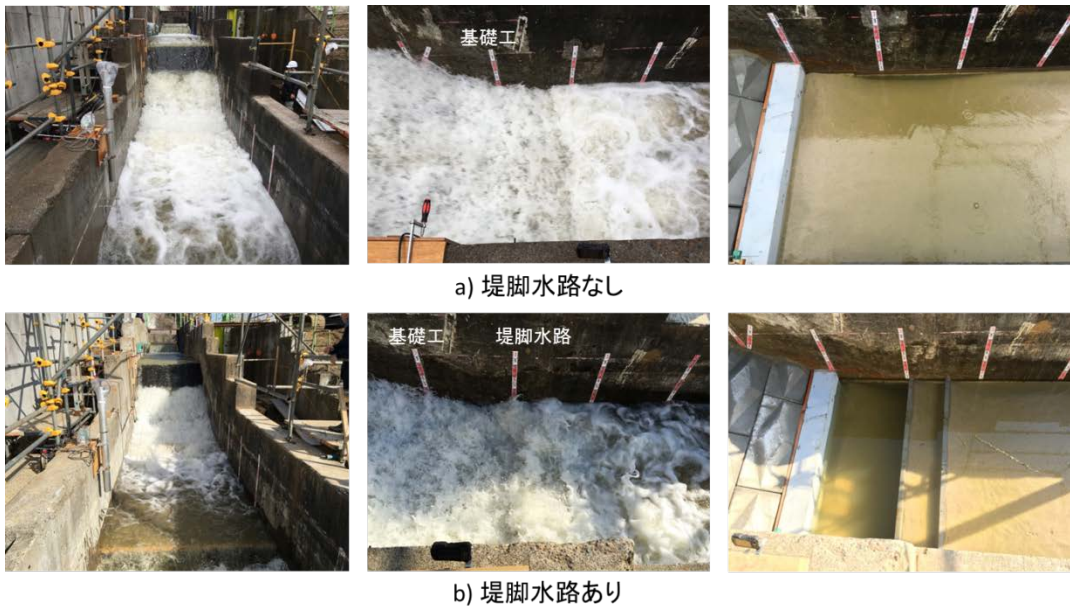


写真-12 堤脚水路の有無によるのり尻周辺の流況・洗掘状況の比較（越流水深 20cm）

4.2.2 平場あり

(1) 平場ブロックの「引き延ばし効果」【構造検討諸元での効果確認】

越流水深を段階的に変えて、洗掘形状を測定するとともに通水時の流況観察を実施した。越流水深 30cm までは、平場なし（矩形・菱形実物：図-14a），17a）参照）に比較して、洗掘深が小さくなった（図-18 参照）。基礎工に比べて幅広い平場ブロックが水たたきとして機能することで、より高い洗掘抑制効果が得られたと推察される（写真-13 参照）。また、平場ブロックが越流水深の増加に伴い徐々に沈下しているが、これは実験の観察よりブロック下面から土砂が吸い出されて流失したためと考えられる。

越流水深 40cm の通水中に平場ブロックが流送され、洗掘が大きく進行した。補強工としては機能していない状態と判断される。

4.2.1(3)で行ったランク分け（表-5）を上記の実験結果に当てはめると、表-6 に示すように区分される。

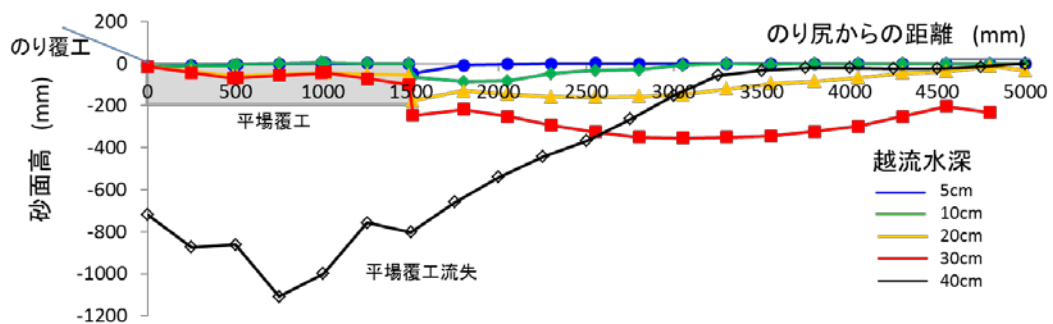


図-18 のり尻補強工（棒形実物）の洗掘形状



写真-13 平場ありののり尻周辺の流況・洗掘状況（越流水深 30cm）

表-6 平場ありの効果の有無・大小の区分結果（表中の値は実スケール値）

粗度状況	粗度高さ	I：効果の有無	II：効果の大小
棒形（実物）	50mm	○	大

(2) 平場覆工（ブロック）の安定性【平場ブロック下面の吸い出し防止】

のり面から平場に一体的に接続ブロックを敷設する場合、ブロック接合部の位置をのり尻に合わせて接続ブロックを折り曲げるのが一般的である。そのため、今回の実験では折り曲げた部分において隙間が開いた。隙間を簡易的に木材でふさいだが、のり覆工（ブロック）背後からの排水を考慮して、完全に止水しなかった。

吸い出しによって平場ブロック下面に空隙が生じた。空隙内を直接計測できなかったが、のり尻際の平場ブロック下にあらかじめ埋め込んでおいた球体マーカー（隙間より大きい）が、通水中に流送されてきたことから、空隙はのり尻まで繋がっていたと推察される。

一方、のり尻部は、のり面を流下してきた高流速の水衝部となる位置であり、周囲に比べて水圧が大きくなる。こうした水理条件と上記の吸い出し状況を合わせると、水衝部に位置するブロック隙間に高い水圧が作用したことが、ブロック下面の吸い出し、空隙形成を助長したことが懸念される。

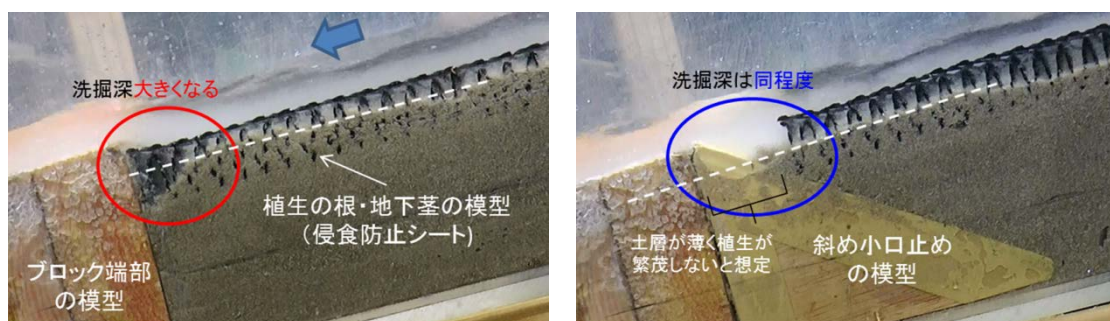
そのため、のり尻に位置する接続ブロック折り曲げ部においてモルタルを充填するなど、ブロック間の隙間を塞ぐ止水を確実に行うことが、のり尻補強の効果を高める上で有効と考えられる。

4.3 のり覆工（ブロック）と堤体のり面の接合部が侵食弱点箇所となり得ることへの対策【斜め小口止めの効果】

「接合部が侵食弱点箇所となる」とは、ブロックの影響を受けない端部より上流に離れた範囲でのり面侵食の深さに比較して、ブロック端部近傍ではより深く侵食される状況となることと解釈できる。この見方を写真-14 に示す実験結果に当てはめると、端部より離れた範囲では多孔質シートの厚さ半分程度の侵食深であるが、これに比較して端部近傍では斜め小口止めの対策なしケースはシート下面に達するまでより深く侵食されている一方、対策ありケースは深くなった様子は明確に認められずほぼ同程度となった。

以上の結果は、その実験条件から定性的な検討にとどまるが、斜め小口止めを設けることで、2.3(3)で述べた端部における種々の状況下においても、弱点箇所となることを抑制するある一定の効果を期待してよいであろう。

なお、実際の施工にあたっては、降雨浸透による斜め小口上の堤体の欠損への対処として、斜め小口面は水平ではなく、堤体側に雨水が入るように（ブロック背後の碎石層から排水されるように）堤体側に若干の角度をつけておくことが望ましい。



a) 対策なし

b) 対策あり

写真-14 斜め小口止めによる対策の有無による洗掘状況の比較