

国総研技術速報 No.1： 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討（第 1 報）

国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部

1. 背景

中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震・津波対策に関する専門調査会」の報告で示された「設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物」の考え方を受け、「海岸における津波対策検討委員会」がとりまとめた「平成 23 年東北地方太平洋沖地震及び津波で被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方」において、海岸堤防等の構造上の工夫の方向性が示されています。その中では、設計対象の津波高を超える津波が来襲し、海岸堤防等の天端を越流することにより、海岸堤防が破壊、倒壊する場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造を、以下のいずれかの減災効果を目指した構造上の工夫が施されたものとしています。

- ・施設が破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くする
- ・施設が完全に流失した状態である全壊に至る可能性を少しでも減らす

そして、そのような構造上の工夫の方向性として、裏法尻部への保護工の設置による洗掘防止や、裏法被覆工等の部材厚の確保等による流失防止などが挙げられています。

東北地方太平洋沖地震の津波で被災した海岸堤防の復旧は、各県等において実施されることとなりますが、仙台湾南部海岸においては、国により実施される区間があります（東北地方整備局実施区間は約 30km）。それら一連の復旧において上記の構造上の工夫を施すため、その技術的手法に関するより具体的な知見が求められています。

このような背景のもと、国土技術政策総合研究所では、国土交通省水管理・国土保全局海岸室および同東北地方整備局と連携して、構造上の工夫および施工上の留意点の検討を、模型実験や解析等により行っています。

なお、以下で「本報」と言うときは、技術速報 No.1 を指します。

2. 本報の基本的性格

- 上述の、粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討は、被災した海岸堤防の復旧と並行して実施しています。復旧現場等への検討結果の迅速な浸透・共有化の重要性に鑑み、検討途上の段階においても発出する必要性が高く、現時点においても一定の信頼性を持つと判断できる技術情報を、速報として記すものです。
- 提供する技術情報は、海岸堤防の復旧における構造上の工夫に関わる現場での技術判断にとって有用となるという観点を中心に簡潔に記すこととしています。
- 引き続いて行われる検討に基づき、新たに得られた知見を後続の速報において逐次報告する予定です。その過程で、本報の内容が拡充あるいは精緻化され、また、一部修正される可能性があります。
- 本報で対象としているのは、通常の海岸堤防です。すなわち、盛土により築造された台形断面を基本とし、その表面（表法、天端、裏法）を被覆した三面張り構造というものです。なお、パラペット構造がついたものは対象にしていません。したがって、前提となる基本構造がこれと大きく異なる堤防や、必要な用地が大幅に増えるような堤防などは、対象とはしておりません。ただし、これ

らを構造上の工夫の検討から除外すべきとの意図を持つものではありません。

- 本報で報告する検討は、1. 背景 で述べた海岸堤防等の構造上の工夫の方向性にしたが、上記の通常の海岸堤防の構造に、1)裏法尻部への保護工の設置による洗掘への抵抗性の向上、2)裏法被覆工等の部材厚の確保等による流失への抵抗性の向上、を施したものを立脚点とし、技術的検討を通じて、さらなる改善の方向や技術的留意点を見出すというアプローチを基本にしています。
- 上記のように、本報は検討段階の報告であり、構造上の工夫について網羅的に検討したものではなく、予め一定の検討範囲を設定していることから、本報で言及していない工夫が効果を持たないという意図で記述を行っているものではありません。

本報の内容の活用にあたっては、以上に示す本報の基本的性格を十分理解いただくようお願いします。

3. 検討の範囲と方法

(1) 検討の範囲

本報においては、図-1 のように、台形断面の堤防の裏法尻の洗掘と裏法被覆工の安定性に着目し、対洗掘抵抗性と安定性向上のための工夫および留意点について検討した結果を述べています。

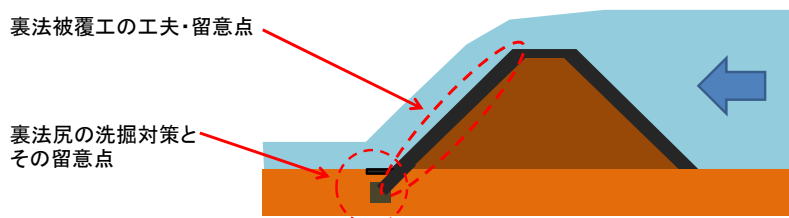


図-1 検討項目

(2) 検討の方法

本報に示す検討は、主として、水理模型実験により行っています。

模型実験は、国土技術政策総合研究所内にある以下の水路で行っています。構造物実験水路(写真-1)は、側面がガラス張りとなっているため洗掘や被覆工被災の過程を視覚的に確認できるとともに、現地で越流水深 10m に相当する高い津波を起こすことができます。一方、高落差実験水路(写真-2)は、実現象に近いスケールでの実験が可能です。前者は縮尺 1/25、流速の縮尺が 1/5、後者は縮尺 1/2、流速の縮尺が約 1/1.41 です。

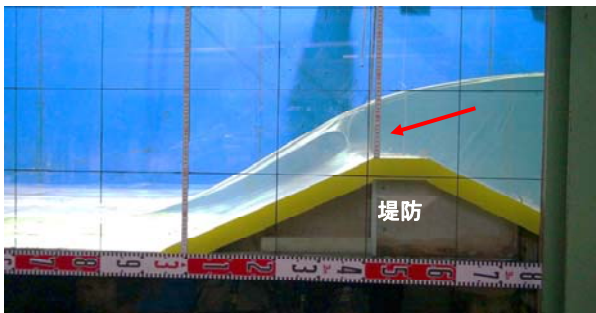


写真-1 構造物実験水路(縮尺 1/25)



写真-2 高落差実験水路(縮尺 1/2)

模型実験では、東北地方太平洋沖地震を対象とした仙台平野南部での津波浸水シミュレーションの結

果をふまえ、現地スケール換算での越流時間を 10 分とした水位波形を設定しています。その上で、最大越流水深を複数種類設定して実験を行っています。この水位波形の設定からもわかるように、津波の基本的性質上、堤防越水の継続時間は、洪水がもたらす河川堤防越水の継続時間と比較してかなり短いものになっています。

10 分という越流時間は、構造上の工夫を検討するための実験上の設定であり、本検討の目的に照らして必要な代表性を持つと判断していますが、実際にはこれより長い越流時間となることも考えられます。実験結果の解釈においては、越流時間が長くなれば堤防に対するダメージの度合いも変化してくる可能性を踏まえておく必要があります。

4. 越流に対し粘り強い構造の留意点

(1) 裏法および裏法尻での高流速

津波が堤防を越流する際には、裏法および裏法尻では速い流れが発生します。

図-2 は高さ 24cm（現地スケールで 6m）および高さ 36cm（現地スケールで 9m）の堤防模型について、裏法および裏法尻の各点で計測されたピーク時の水深と上流端での流量から流速（断面平均）を計算した結果です。裏法では 200cm/s 程度（現地スケールで 10m/s 程度）、裏法尻では 250～300cm/s（現地スケールで 12.5～15.0m/s）の流速となっています。

このような速い流れによる裏法尻での洗掘および被覆工の流失への対応を検討する必要があります。

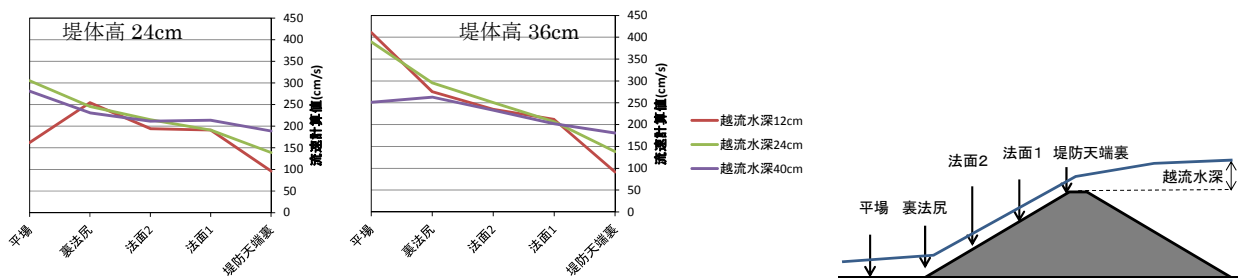


図-2 裏法および裏法尻での流速（裏法勾配 1:2）

(2) 裏法尻での洗掘と対策

図-3 は、高さ 36cm（現地スケールで 9m）の堤防模型の陸側での地形変化を、越流水深毎および裏法勾配毎に示しています。裏法尻の基礎工近傍 50cm（現地スケールで 12.5m）ぐらいまでの平均的な洗掘深は、越流水深とともに大きくなる傾向にあり、裏法勾配が 1:2 の場合、越流水深 8cm（現地スケールで 2m）では 7cm（現地スケールで 1.75m）、越流水深 24cm（現地スケールで 6m）では 12cm（現地スケールで 3m）でした。また、裏法勾配 1:2 より 1:3 の方が、洗掘範囲における最大洗掘深が小さいものの、洗掘範囲が広がる傾向が見られました。

裏法尻の基礎工位置（縦断距離 0cm）での掘れ方は、堤体土の抜け出しの危険性を直接的に支配します。図-3 の結果によれば、越流水深 8cm（現地スケールで 2m）を上回る辺りから、この位置での越流後の地形高さが -3cm（現地で -75cm）を下回るようになります。基礎工位置で、これだけの洗掘が起これば、通常の構造の海岸堤防では、基礎工が安定を失い、また、裏法被覆工下の堤体土が次々と抜け出し、被覆工の全体的流失につながる非常に危険な状況になると考えられます（図-3 に示す実験においては、実験の都合上、そうした抜け出しが起こらないよう、鉛直壁を深く挿入しています）。裏法尻での

洗掘は、そのスケールや最大洗掘深もさることながら、裏法被覆工末端の基礎工のところ、基礎工が基盤を失い、堤体土抜け出しを引き起こす洗掘深になるかどうかが大変なポイントとなり、この実験結果からは、越流水深 8cm（現地スケールで 2m）辺りから、その危険性が顕著に増大すると言えます。

なお、越流による裏法尻での洗掘は、底質の粒径や越流の継続時間等によって変わりうることに注意が必要です。具体的に例示すると、次のようなことです。本実験（構造物実験水路）では、地盤の模型に粒径 0.3mm のほぼ均一の砂を使用しています。これは、現地に換算すると粒径 7.5mm の小礫に当たります。仮に現地の地盤が砂であったとすると、実験で用いた粒径が大きいという点で実験での洗掘がやや小さめにしている可能性がある、また、現地材料に粘着性があったとすると、粘着性がないという点で実験の方が洗掘が起こりやすくなっている可能性がある、というような考察を踏まえての解釈が必要になるということです。また、図-3 では越流後の地形を示していますが、越流が起こっている間、洗掘には周期性をもった変動を伴うことがあり、こうした時間変動の存在を加味した技術判断も必要に応じて検討すべきです。

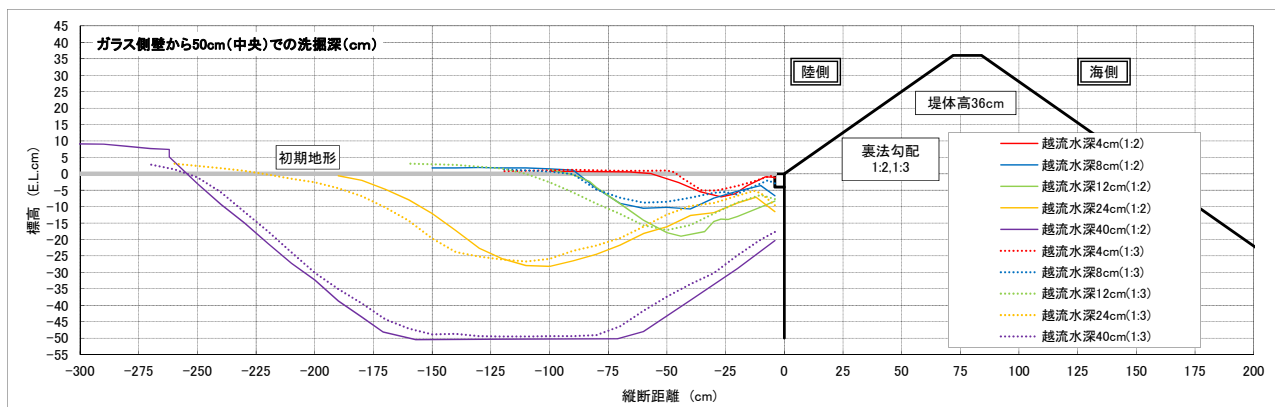


図-3 越流後の地形（堤体高 36cm）

裏法での洗掘に対処するためには、裏法尻を保護することにより、しっかり越流水を跳ねさせることが重要です。水を跳ねさせることにより裏法尻の洗掘を堤防本体からなるべく遠ざけることで、裏法尻での洗掘が堤防破壊につながるという上述のプロセスを遮断もしくは遅らせ、堤防全体の裏法尻洗掘に対する抵抗性を増し、堤防が被災するまでの時間を延ばすことができると考えられます。

図-4 は、高さ 36cm（現地スケールで 9m）の堤防模型において、水深 8cm（現地スケールで 2m）で越流した後の地形を示しています。裏法尻に保護工を置かないケース 1 では、裏法尻の基礎工の近くが大きく洗掘されています（写真-3）。一方、裏法尻に設置した保護工がほぼ原形を留めたケース 3 では、基礎工近傍の洗掘が保護工によって防止されました（写真-4）。

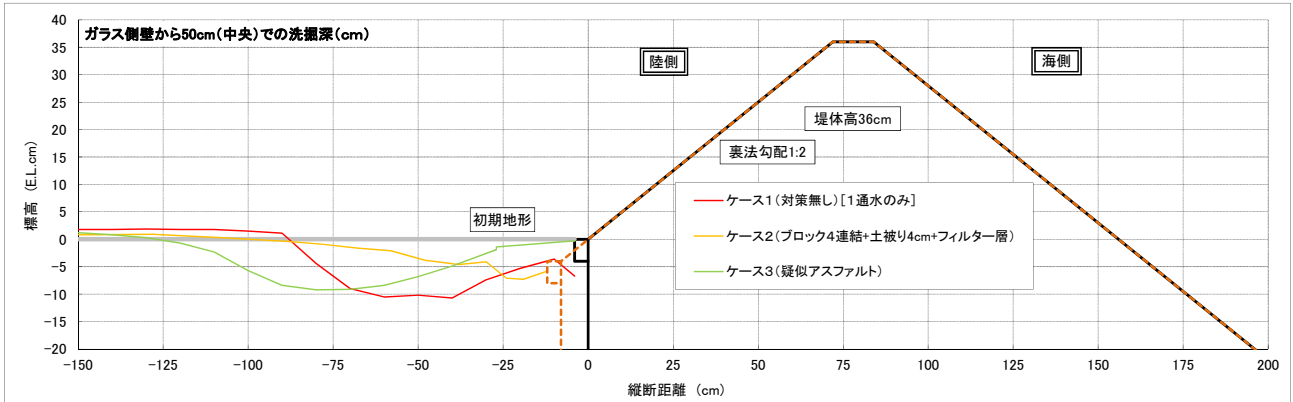


図-4 越流後の地形（越流水深 8cm，堤体高 36cm）
（破線：ケース 2 の基礎工）



写真-3 越流後の地形（ケース 1）



写真-4 越流後の地形（ケース 3）

裏法尻で越流水を跳ねさせるため、図-5 のような構造が考えられます。

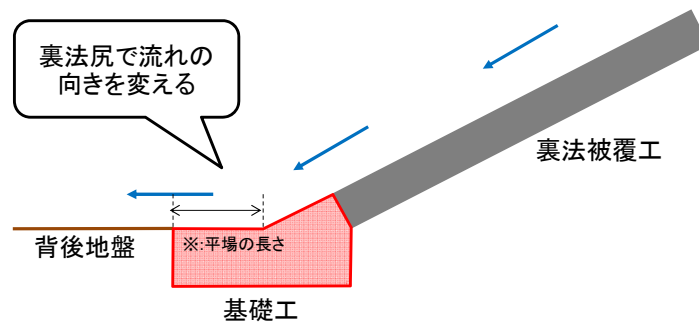


図-5 裏法尻の工夫案

この構造を検討する上で重要と考えられるポイントは以下です。

- 裏法を流下してきた越流水の流向を、地盤に突っ込まない向き（水平方向など）に完全に変わることが、洗掘影響を遠ざける上で重要であること。水脈厚さに対して平場の長さ（図-5 参照）が相対的に短いと、流向の変え方が不完全になること。
- 高流速に加えて、流向を変えるための圧力が生じ、この構造体には非常に大きな流体力が作用すること。これによる構造体の変形や構造体全体の不安定化が起こると、期待していた効果が大幅に損

なわれること。構造体が置かれた地盤に、こうした流体力が伝播・集中しての変形や吸い出しによる変形が生じ、その影響が構造体に及ぶ場合も同様であること。

- 上記の大きな流体力による吸い出し等を防ぐという観点からは、構造体を水密性の高い材料から造ることが有利であること。ただし、この場合、構造体を取り巻く周辺地盤の水圧分布状況によっては、浮力だけでなく、別途、揚圧力に対する構造体の安定性を確認すべきこと。一方、透過性の高い部材でこの構造体を作る場合、上記の揚圧力は相対的に受けにくくなるが、吸い出し防止策や構造体として強度の確保に留意すべきこと。※このことに関連する事項を（４）と（５）で述べていますので、合わせて参照ください。
- 越流水を跳ねても構造体末端（図-5 では左端）での洗掘が起こりうる。この洗掘が構造体下の地盤の侵食につながりにくい状況を作り出す工夫が、この構造体の効果の現実性を増すこと。

ここで、揚圧力と揚力の定義を説明しておきます。

- ・揚力：物体周囲の流れが直接的に引き起こす物体周りの圧力分布が原因で生じる、物体を持ち上げようとする力
- ・揚圧力：物体が置かれた地盤内の地下水の水圧や、物体と地盤の隙間にある水の圧力、物体下面からの空気の圧力などに代表される、物体周囲の流れによるものではない物体周りの圧力分布が原因となって生じる、物体を持ち上げようとする力。なお、浮力分は除く。

したがって、一般に、揚力、揚圧力、浮力の総和が、水や空気の圧力による物体を持ち上げようとする力になる。

（３）流れの中に置かれた構造物の不陸による構造物の不安定化とその対策

図-6のように、裏法被覆工に凹凸が生じると、流れによる力を受けることとなります。このような力をまともに受ける面ができると、越流により作用する力が大きくなるほど、そのことによる被覆工不安定化の度合いが大きくなります。すなわち、こうした面の出現は、不安定化する閾値を下げ、被覆工に関する粘り強さ発揮にとって不利になります。したがってこうした面、つまり、不陸を作らないことが重要です。また、図-7のように、不陸ができて逆段差になれば流体力をまともに受けません、このことは構造上の工夫の1つのポイントになりえます。

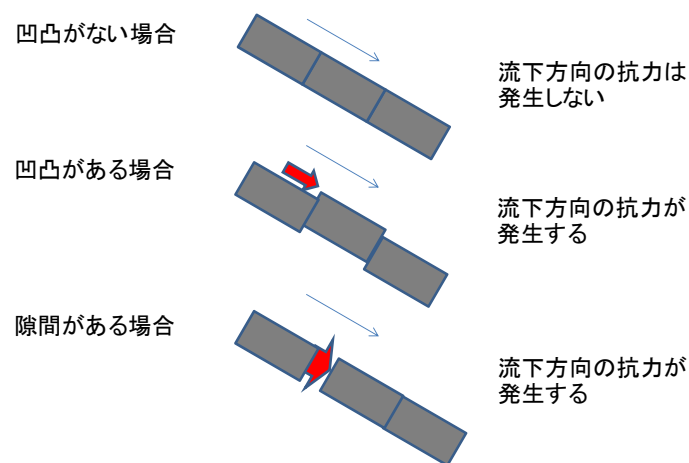


図-6 不陸による抗力の発生

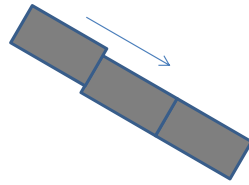


図-7 逆段差の例

裏法被覆工の不陸が生じる原因としては、裏法被覆工の下にある土砂の吸い出し、地震動、圧密等の経年変化が考えられます。

土砂の吸い出しについては、写真-5のように、模型実験においても確認されています。このケースでは、裏法被覆工は流失に至りました。

海岸保全施設の技術上の基準・同解説では、ブロック張りの裏法被覆工の裏込めは表法被覆工（裏込めの厚さ 50cm 以上）に準ずるとされています。裏法被覆工の下にフィルター層を設けることで、吸い出しをある程度抑制できるものと考えられます。



写真-5 吸い出しによって局所的に沈下した裏法被覆工（フィルター層無し）

このように吸い出しを抑制する対策は重要ですが、それだけで、広大な裏法被覆面において不陸の存在を越流発生時に最小限におさえこむ状況を達成するのは難しい可能性があります。したがって、必要に応じて、被覆工が設置された堤体等が多少の変形を起こしても、不陸が起きにくい、あるいは少なくとも、不陸が起こっても図-6に示すような流れをまともに受ける面を露出させるタイプではなく、図-7のようなタイプに限定されるような被覆工構造を工夫するという方策をさらに重ねていくことも考えられます。その工夫の一例として、図-8のように上端と下端に切り欠けを設けたブロックをかみ合わせることで、下のブロックが上のブロックより突出しにくくすることが考えられます。

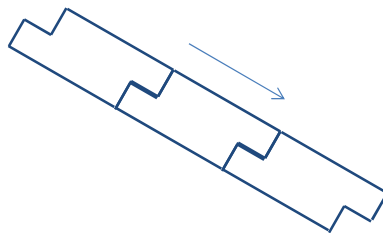


図-8 ブロック形状の工夫の一例案

最後に、被覆工の粗度について述べておきます。越水を受けた時の天端から裏法にかけては、(1)に示したように、海岸堤防の被覆工や河川護岸について通常想定しているよりもはるかに大きな流速が作用することになります。こうした状況下で上記の通常想定している波や流水の外力では問題が生じない程度の粗度要素が表面に存在すると、それが原因となって大きな流体力が被覆工に作用し、被覆工の安定性を損なうことにつながる恐れがあります。すなわち、通常の波や流水の外力を想定している限り有効であった粗度が、大きな越水という通常とは異なる状況においては、作用する流速が大きすぎて、粘り強さ発揮にとってかえって不利な条件として作用する可能性が考えられます。

他方、こうした粗度要素は、越流水を減勢する効果を持ち、それが(2)で取り上げた裏法尻での洗掘の緩和につながることも考えられます。ただし、こうした洗掘緩和効果を期待することの前提は、粗度要素の存在が被覆工の明瞭な不安定化を招かないことであり、この前提条件の確保の見通しが不十分のまま減勢効果を期待することには課題を伴います。

本報においては、粗度要素に作用する(1)で述べたような高流速による流体力がもたらす被覆工の不安定化を解決する方法が現時点で簡単には得られないと判断し(その工夫の意義を否定するものではありません)、そうした中では中途半端な粗度付けには有意なメリットを期待できないと考え、基本的には、高流速を受けた際の不安定化につながるような粗度付けは行わないことをアドバイスします。

なお被覆工表面については、景観デザインの観点から種々の工夫を行うべきという要請があり、これは、粘り強さ確保とは別の意味で重要です。その工夫を行う際には、粗度がもたらしうる上述のデメリットにも留意し、同じ景観上のアクセントでも高流速による流体力をまともには受けない形状とするなど、粘り強さと良好な景観の両面が並び立つような方法を見出すというスタンスが大事です。

(4) 揚圧力への対応の必要性

津波が襲来して、海側の水位が上昇すると、その水位上昇に連動して堤体下の浸潤面が上昇を始めます。元の浸潤面が地盤内で高かった場合などには、浸潤面が比較的早く堤体下部に達することになります(図-9 参照)。たとえば吸い出し防止などの理由から、被覆工を不透過・不透気構造にしていたとすると、その被覆工と浸潤面とに囲まれたところに空気が残留し、一方、浸潤面は海側の津波水位に応じて、ある速度で上昇しようとするので、たとえ浸潤面自体は低くても、封入された空気の圧力が上昇します。空気圧は、浸潤面上昇を止めるだけの圧力となり、それは、図-9 に示す堤体下部からの水圧の平均に匹敵するものになり、被覆工にとって危険なレベルの揚圧力が作用する状況になり得ます。

このようなことが原因となる被覆工の不安定化が起こらないように、空気圧を有害なレベルまで上げずに浸潤面上昇に伴う排気を許すような透過・透気性を被覆工に持たせるという検討と工夫が重要になってきます。

完全な遮水・遮気機能を持つ被覆工というのは、必ずしも一般的ではないかもしれませんが、たとえば、コンクリート平張りのように、一般に用いられる構造に属するものの中でも比較的透過・透気性が低くなる構造もあり、そうした工法の採用を検討する際には、透気性を被覆工に持たせることの検討を、その必要性の有無も含め意識的に行い、検討の抜けが生じないようにすることが重要です。

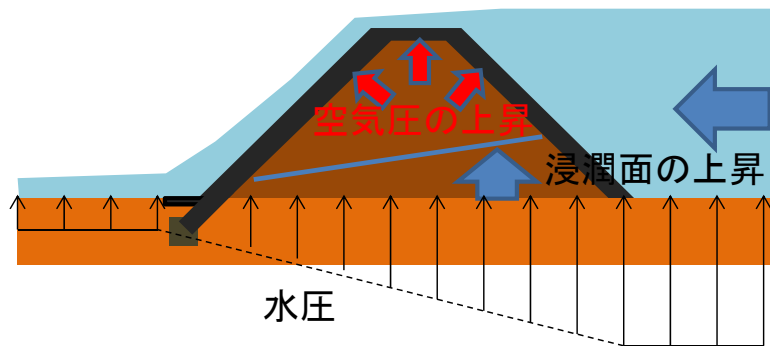


図-9 空気による揚圧力

また、写真-6 のように、裏法尻の保護工に水密性材料を用いる場合、跳水によって保護工の直上よりその陸側の方が水位が高くなり、陸側の水圧が保護工と地盤との隙間に伝わり、これによって生じた、保護工上下面の浮力を超過した水圧差が揚圧力として作用することで、保護工が流失する場合があります。このような揚圧力に対する考慮も必要です。



写真-6 跳水に伴う水位差による揚圧力

(5) 浸透水に対する堤防裏法尻での対応

短期間の水位上昇とは言え、堤体や基盤の土質条件によっては、図-10のように、津波の越流水位が堤防天端まで降下した時点において（高水位を経験した直後）、裏法尻付近の浸潤線が高くなって、浸透水が裏法尻付近から浸出する状況が起こりえます。このような状況になると、この付近が泥状になり、裏法被覆工が被災することも考えられます。たとえば、構造物実験水路での実験を示した写真-7では、図-11のように越流が終了する前に、裏法尻付近において吸い出しが発生しています。こうした現象が起こる可能性を踏まえ、浸潤線の上昇を低減する構造とするなどの対策の検討を行うことが必要です。

また、(2)で述べた基礎工が水密性を持ち、規模が大きくなる場合、さらには、裏法尻での洗掘の影響を受けにくくするための基礎工周りの土の改良等が浸透性を低くする場合、上記の事象が強調される可能性があります（いわゆる行き止まり地盤的な状況）。1つの目的のための工夫が他の面から見て負の効果をもたらすことにならないよう、バランスのとれた機能発揮となるためのチェックを心がけることが大切です。

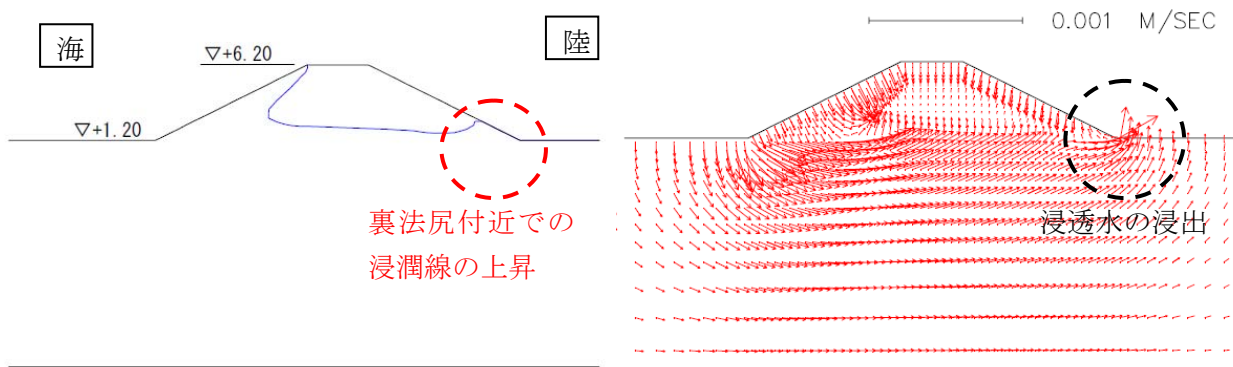


図-10 浸透流計算で得られた越流終了直後の浸潤線および浸透流ベクトル
 (堤体高 5m, 越流水深 8m, 越流継続時間 7分, 透水係数: 堤体土 0.01cm/s, 基礎地盤 0.1cm/s)

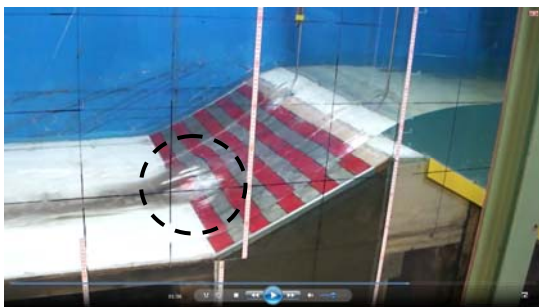


写真-7 残留水位による裏法尻からの吸い出し

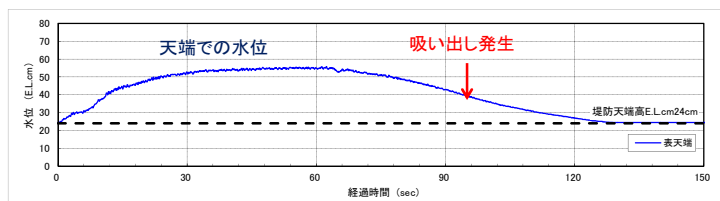


図-11 吸い出しが発生した際の天端での水位

(6) 負圧への対応

津波が堤防を越流するときには、天端被覆工と裏法被覆工との接合部にあたる裏法肩付近で、越流水脈による静圧を大きく下回り、さらに負圧(大気圧を下回る圧力)までが発生することがありますので、対策が必要です(図-12)。

写真-8と9は、高落差実験水路において高さ3m(現地スケールで6m)の堤防模型を水深1m(現地スケールで2m)で越流する条件で、法肩のブロックを天端被覆工と連結しないケースと、法肩のブロックを天端被覆工と一体化したケースについて、それぞれ越流後の状況を示しています。天端被覆工と連結しなかったケースでは、赤破線枠にあった裏法肩のブロックが流失しました。一方、天端被覆工と一体化したケースでは、天端被覆工は流失しませんでした。裏法肩の負圧対策の一つとして、図-13のように裏法肩と天端を一体化した構造が考えられます。

このような方法が有効となる理由と条件は次のようです。図-12からわかるように、静水圧を大きく下回り、さらに負圧となるのは、裏法肩を中心とする一定範囲です。こうした負圧の範囲にブロックの1単位が対応してしまう状況ですと、それ単独で負圧という不安定化条件に対抗することになり、安定化を図る上で明らかに不利になります。そうではなくて、周辺との連続、あるいは、ブロック単位の拡大などによって、負圧でない領域も合わせたブロック単位とすれば、全体として不安定化条件が緩和されます。このように、水理的に不安定になりやすい特性を持つ場所が局在する場合には、そこで構造体を完結させずに、周囲まで広げて、安定上有利となる条件を作り出すことがポイントとなります。逆に言うと、負圧の範囲が越流水の増大とともに拡大すれば、一体的構造とすべき範囲がどんどん広がり、被覆工構造の簡易修正というレベルを超えてしまうかもしれません。ここに、この改善法の限界も存在することになります。

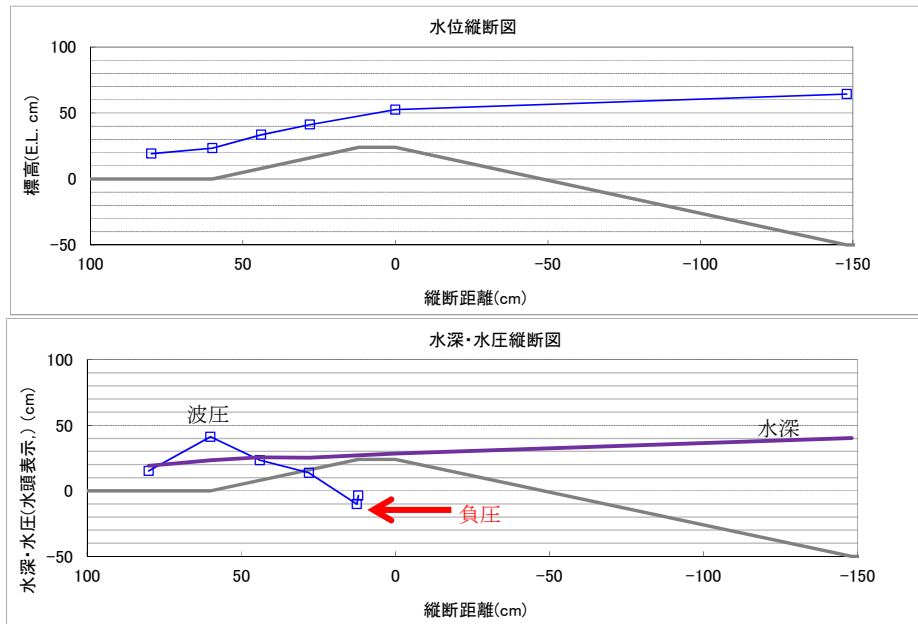


図-12 模型実験における水位・水圧の岸沖方向分布(堤体高24cm, 越流水深40cm)

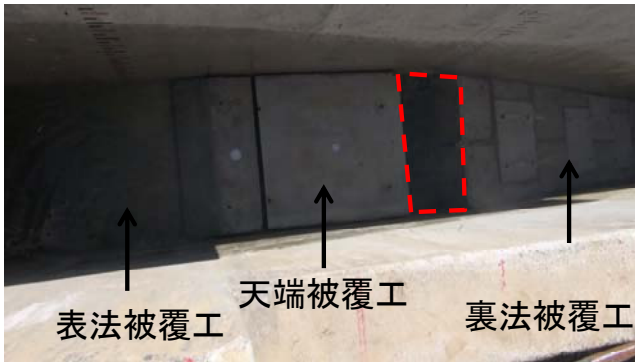


写真-8 法肩のブロックを天端被覆工と連結しないケース（高落差実験水路）



写真-9 法肩ブロックを天端被覆工と一体化したケース（高落差実験水路）

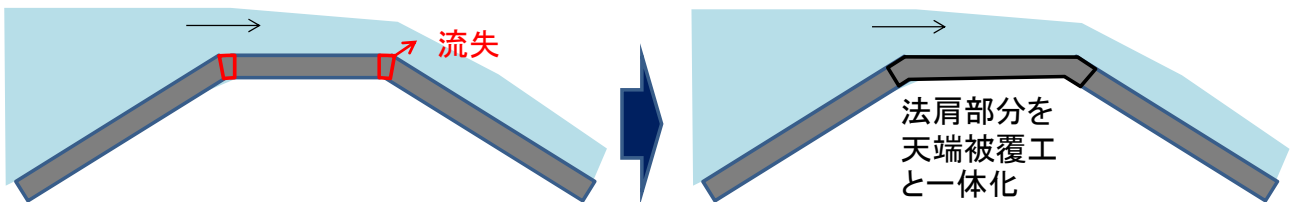


図-13 負圧に対する法肩部分の工夫案

5. 今後の予定

2. で述べたように、引き続き検討を進め、得られた知見を随時報告してまいります。

6. 問い合わせについて

本報についての技術的な事項については、下記の窓口まで遠慮なくお問い合わせください。

国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室
〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地 TEL: 029-864-3163

以上

【引用文献】

中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告，2011. (<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinihon/houkoku.pdf>)
 海岸における津波対策検討委員会：平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方，2011. (http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kaigantsunamitaisaku/kangaekata/kangaekata111116.pdf)