

### 3. 構造上の工夫の考え方と要点

#### 3. 1 総説

津波の越流に対して堤防が粘り強く効果を発揮するための構造上の工夫の考え方や要点を紹介する。

2. 2. 1に示したように、津波による被災過程においては、複数の被災形態が複合的に発生することも多いと考えられることから、粘り強い構造の検討においては、特定の対策工法のみ限定せず、複数工法の組み合わせを検討することが望ましいとされている。これは、特定の部位を強化しても、堤防全体が壊れにくくなるとは限らないことを示唆している。

三面張り堤防でも、表法被覆工や裏法被覆工がコンクリートブロック張式とコンクリート被覆式では、津波越流時の浸透や被覆工下面の圧力上昇の状況が異なる。コンクリートブロック張式では、津波越流時にブロック間の隙間から水が浸入するとともに、ブロックの下にある裏込め工（フィルター層）が水みちになりやすいが、堤体への浸透により浸潤線が上昇しても、その隙間により被覆工下面の空気圧上昇が緩和される。一方、コンクリート被覆式では、津波越流時に法面からの水の浸入は起こりにくいが、堤体への浸透により浸潤線が上昇すると、被覆工下面の空気圧が上昇しやすい。

以上のことから、津波越流に対する三面張り堤防の構造上の工夫を検討する上での留意すべき現象を、コンクリートブロック張式およびコンクリート被覆式に共通するものと、それぞれに関するものに分類すると、表-3.1.1のように整理できる。これらをふまえて、3. 2以降に示す各部位の強化を検討する必要がある。

表-3.1.1 三面張り堤防の構造上の工夫を検討する上で特に留意すべき現象

共通する現象	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・裏法尻での洗掘による根留工の不安定化</li> <li>・高流速や法肩での圧力低下による被覆工や法肩の不安定化</li> <li>・津波波力による波返工の破損（波返工を設ける場合）</li> </ul>	
コンクリートブロック張式における現象	コンクリート被覆式における現象
<ul style="list-style-type: none"> <li>・高流速による堤体材料の吸い出し</li> <li>・裏込め工の水みち化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・被覆工下面の圧力上昇</li> </ul>

(1) コンクリートブロック張式およびコンクリート被覆式に共通する現象への対処

図-3.1.1 では、コンクリートブロック張式およびコンクリート被覆式に共通する破壊現象への対処を黒枠内に示しており、押し波時の現象に対するものを青字で、引き波時の現象に対するものを緑字で、押し波時、引き波時とも生じる現象に対するものを黒字で表記している。2. 2. 3に示したように、法面を流れ下った越流水による洗掘に対し、裏法尻および表法先における対応が必要となる。また、2. 2. 4および2. 2. 5に示したように、高流速や法肩での圧力低下に対し、裏法被覆工や法肩が不安定化しないような対応が必要となる。2. 2. 2に示したように、波返工がある場合には、津波波力により破損しないような対応が必要となる。

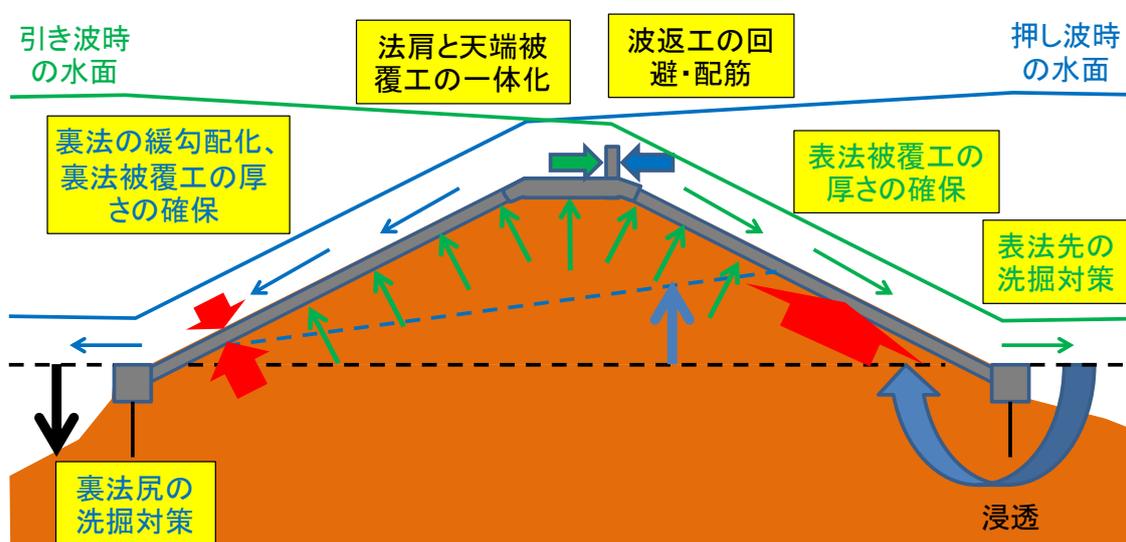


図-3.1.1 コンクリートブロック張式およびコンクリート被覆式に共通する現象への対処

(2) コンクリートブロック張式における現象への対処

図-3.1.2 では、コンクリートブロック張式における破壊現象への対処を黒枠内に示しており、押し波時の現象に対するものを青字で、引き波時の現象に対するものを緑字で、押し波時、引き波時とも生じる現象に対するものを黒字で表記している。2. 2. 6に示したように、コンクリートブロック張式の被覆工は、高流速による堤体材料（裏込め工の材料を含む）の吸い出しへの対応が必要となる。また、津波越流時にブロック間の隙間から裏込め工に水が浸入するとともに、表法先から浸透した水が裏込め工に浸入することで、裏込め工が水みちとなり、パイピングが生じる恐れへの対応が必要となる。

(3) コンクリート被覆式における現象への対処

図-3.1.3 では、コンクリート被覆式における破壊現象への対処を黒枠内に示している。コンクリート被覆式の被覆工は、津波越流時に法面からの水の浸入は起こりにくいですが、堤

体への浸透により被覆工下面の圧力上昇への対応が必要となる。また、コンクリートブロック張り式とは異なり、被覆工の下は裏込め工ではなく捨てコンクリートとすることが多いが、堤体と被覆工との間に隙間ができると、そこが水みちになる恐れがあることから、普段からの空洞化の監視が重要である。また、コンクリートブロック張り式より急勾配の法面にも適用することが多いが、透水性が高い基礎地盤の上に敷幅が狭い（法勾配が急である）堤体を設置すると、基礎地盤が水みちとなってパイピングが生じる恐れが皆無ではないので、基礎地盤の状況にも留意する必要がある。

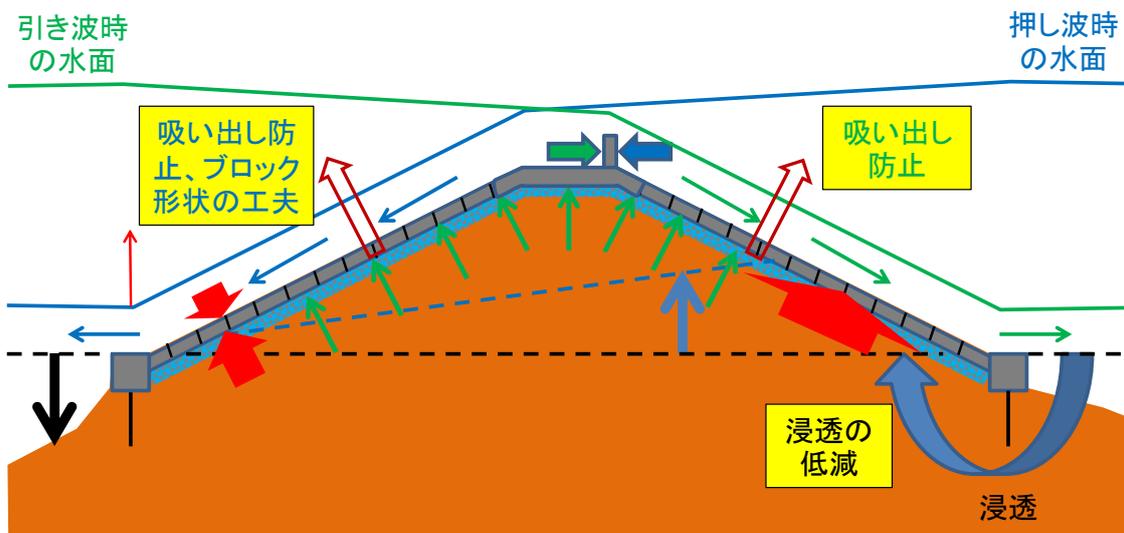


図-3.1.2 コンクリートブロック張り式における現象への対処

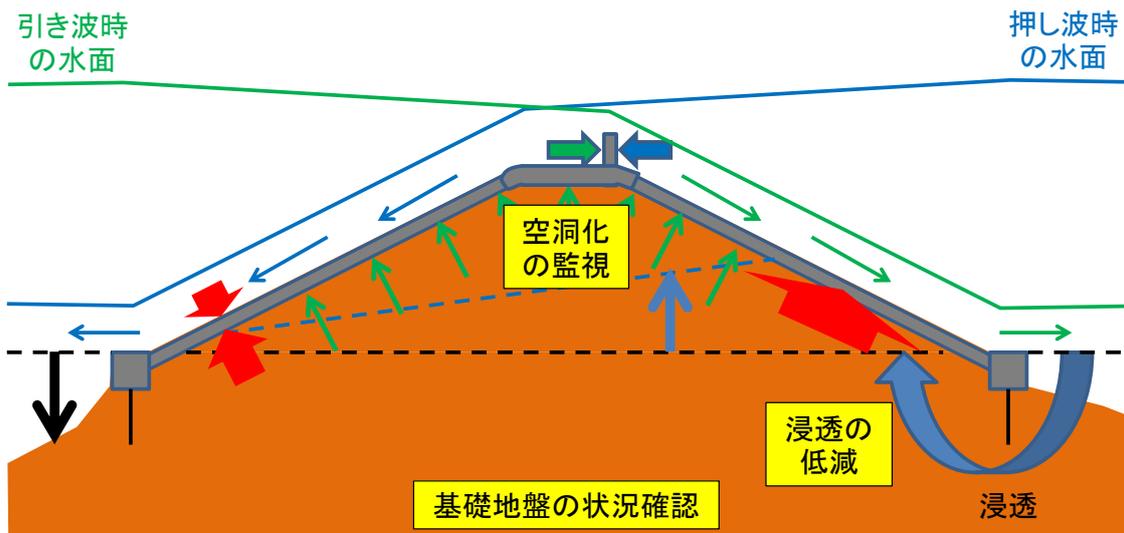


図-3.1.3 コンクリート被覆式における現象への対処

### 3. 2 裏法尻の洗掘対策

#### (1) 考え方

2. 1. 4で述べた裏法尻の洗掘に対しては、その洗掘を軽減する構造、あるいは洗掘が生じても壊れにくい構造とすることが考えられる。

裏法尻の洗掘を軽減する構造として、2. 1. 4で述べたように裏法勾配を緩くするとともに、裏法尻を被覆して洗掘から保護することが考えられる。裏法尻の被覆方法は、地盤改良、舗装などが考えられる。

洗掘が生じても壊れにくい構造としては、根留工を大きくしてその自重により流失しにくくさせることのほか、地盤に打ち込んだ矢板と根留工を一体化し、洗掘が生じても矢板によって自立させることが考えられる。

以上のような構造について、以下で説明する。

#### (2) 裏法尻を被覆して洗掘を軽減する構造上の工夫

裏法尻の洗掘はその範囲を全て被覆することで軽減できるが、2. 1. 4で示したようにその洗掘の範囲は広いことから、その全てを被覆することは現実的ではない。また、被覆した部分には流体力などが作用することから、被覆部分が流されないようにしなければならない。以上のことをふまえ、裏法尻被覆の範囲と工法について説明する。

##### 1) 裏法尻被覆の範囲

2. 1. 4で示したように、越流による裏法尻での圧力上昇範囲の一定割合を保護することで、根留工際の洗掘深を軽減できる。その構造上の工夫を検証するために行った縮尺1/2の水理模型実験の結果を以下に示す。

実験は、長さ45 m、幅1 m、高さ4 mの水路で行った。図-3.2.1および図-3.2.2のように、現地スケールでの堤防模型の比高、裏法勾配、天端幅などを設定し、堤防の盛土部分と堤防陸側の平坦床は砂（中央粒径0.25 mm）を厚さ30cm毎に締固めて作成した。各ケースの条件を表-3.2.1に、実験前の堤防模型および平坦床の状況を写真-3.2.1に示す。また、根留工周辺の地盤改良は津波堆積土（仙台市若林区井土地区、細粒分含有率50%のシルト）とセメントを配合して養生したものであり、宇多ら（1997）に示された方法で測定したその引っ張り破壊応力は $5.9 \text{ N/cm}^2$ であった。水路はポンプで給水できるようになっており、現地スケールで最大越流水深が2 m、越流継続時間が10分となるように水位を時間的に変化させた（図-3.2.3）。なお、電波流速計で測定した裏法尻での表面流速の最大値は約9 m/sである。なお、実験に際しては、移動床内の洗掘の進行や被覆ブロックが移動した時点を把握するため、堤防陸側の移動床内および裏法被覆工のブロック内に加速度センサーを埋め込んだ。

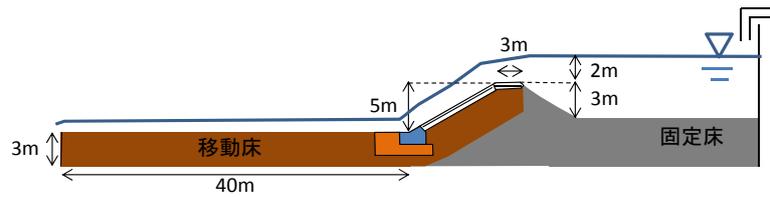


図-3.2.1 大規模実験の模型断面図（縦断方向、寸法は現地換算値）

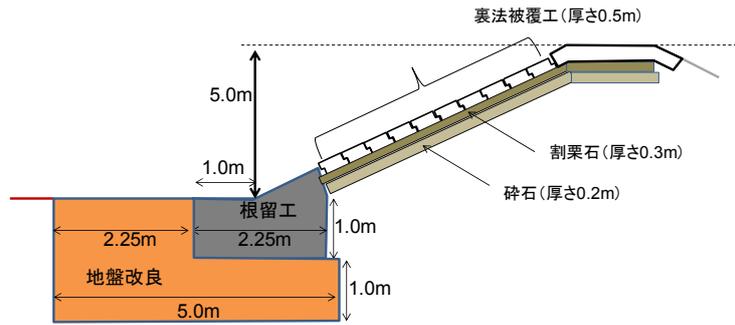


図-3.2.2 裏法尻の保護と裏法被覆工の工夫（寸法は現地換算値）



写真-3.2.1 越流前の堤防模型および平坦床

表-3.2.1 裏法尻の保護と裏法被覆工の工夫に関する大規模実験の条件設定

ケース	地盤改良	最大越流水深 (現地換算値)
1	無し	2 m
2	有り	2 m

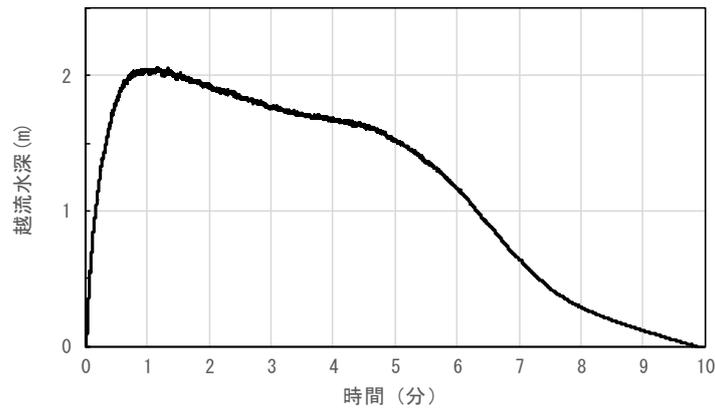


図-3.2.3 ケース 2 の越流水深の経時変化 (寸法は現地換算値)

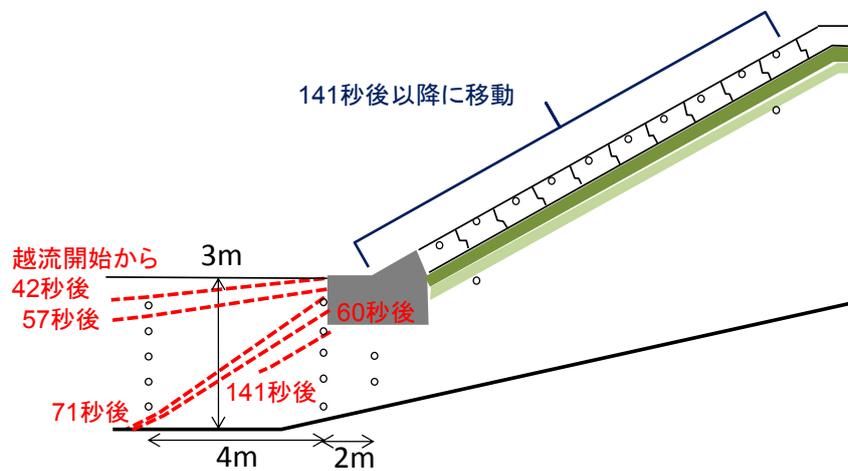


図-3.2.4 裏法尻での洗掘の進行過程 (ケース 1、寸法・時間は現地換算値)

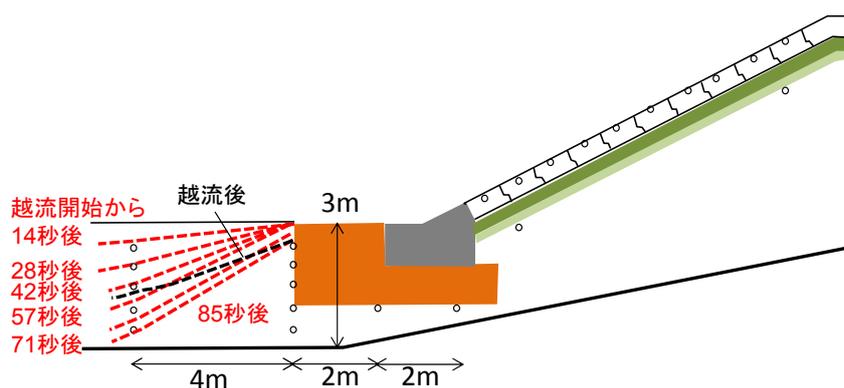


図-3.2.5 裏法尻での洗掘の進行過程 (ケース 2、寸法・時間は現地換算値)

図-3.2.4 および図-3.2.5 は、加速度センサーから推定された、裏法尻での洗掘の進行状況を示している。図中の白丸は加速度センサーの設置位置であり、根留工または地盤改良部分のすぐ陸側および 4 m 陸側において 50 cm 間隔で鉛直方向に配置するとともに、裏法

の被覆ブロック内のほか、根留工や裏法被覆工の下部にも設置している。越流開始直後は裏法および堤防陸側において射流となっていたが、下流側で生じた跳水の位置が堤防に向かって移動し、越流開始から 57 秒後（現地換算値）には裏法尻に達した。

図-3.2.4 のように、地盤改良を施さなかったケース 1 では、越流開始から 42 秒後（現地換算値）まで根留工から陸側 4 m の範囲で洗掘深は 0.5 m 未満であったが、越流開始から 71 秒後（現地換算値）までに根留工の陸側 4 m の加速度センサーが全て流失した後、越流開始から 140 秒後（現地換算値）に根留工が洗掘によって露出したのを引き金に、その 1 秒後（現地換算値）に裏法中央のブロックが流失し、その後に根留工と全てのブロックが流失した。

一方、地盤改良を施したケース 2 では、図-3.2.5 のように、越流開始から 85 秒後（現地換算値）までの間に地盤改良部分の陸側 4 m での洗掘が進行したが、地盤改良部分の陸側端部では洗掘深は 50 cm に達せず、裏法被覆工および根留工に変状はなかった。両ケースの比較から、根留工の陸側に地盤改良を施すことで根留工直近での洗掘が低減され、根留工および裏法被覆工が被災する可能性を減じたと考えられる。

写真-3.2.2 と写真-3.2.3 はケース 1 とケース 2 における越流終了後の裏法尻の状況を、図-3.2.6 は越流終了後の堤防および背後地盤の断面形を示している。地盤改良を施さなかったケース 1 では、裏法被覆工に続いて堤体土も流失したため、裏法が大きくえぐられた形状となっている。また、流失した裏法被覆工が縦断距離 10 m 付近に留まったため、その陸側の洗掘が生じていない。一方、地盤改良を施したケース 2 では、裏法被覆工、根留工、地盤改良部分が原形を留め、地盤改良部分の下面が露出するほどの洗掘は生じなかった。ただし、地盤改良部分から陸側 20 m 以上の範囲が洗掘されていた。



写真-3.2.2 越流終了後における裏法尻の状況（ケース 1）



写真-3.2.3 越流終了後における裏法尻の状況（ケース 2）

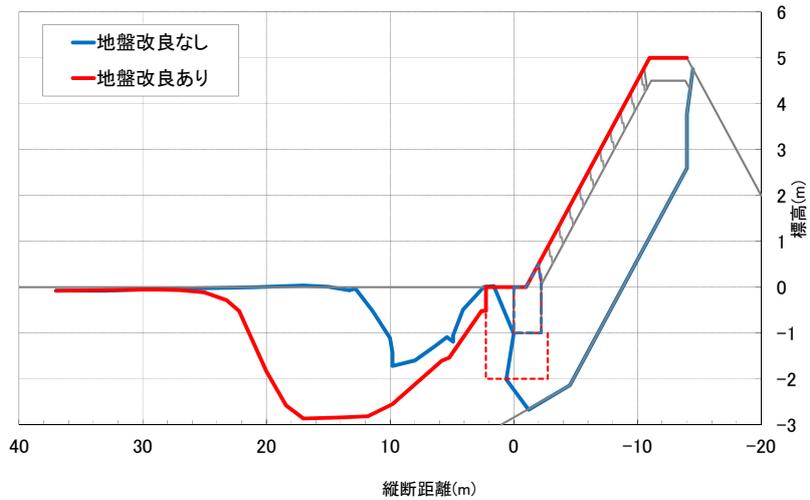


図-3.2.6 越流終了後の断面形

図-3.2.7は、図-2.1.3.1に示した越流水深2mでの水位およびピエゾ水頭について裏法尻周辺を拡大するとともに、図-3.2.1で示した裏法尻の保護の範囲を示している。ピエゾ水頭等の分布は比高6mのものであるが、5mの場合と大きな違いはないとして考察を進める。裏法尻において圧力が上昇している範囲（幅約2m）は、根留工面の平場（幅1m）より長く、根留工上面と地盤改良上面を合わせた長さ（3.25m）より短い。これを図-3.2.4および図-3.2.5に示した地盤改良付加の有無による洗掘状況の違いと対比すると、圧力上昇範囲の半分程度しか保護しない根留工の幅は洗掘に対して不十分である一方、圧力上昇範囲を超えて保護する地盤改良の幅は洗掘深を軽減する上で十分であったと考えられる。現地スケールの粒径が小さい場合には圧力上昇範囲全体の保護が基本になると考えられる。

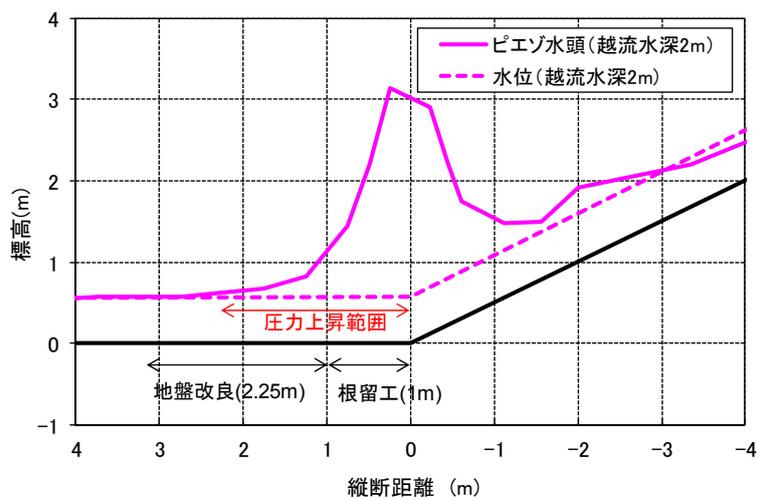
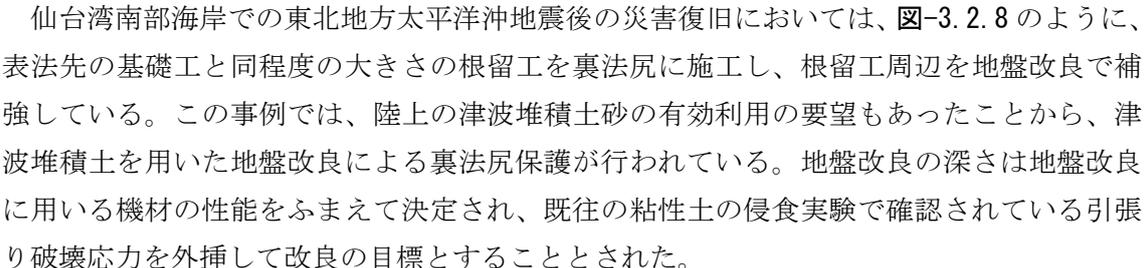
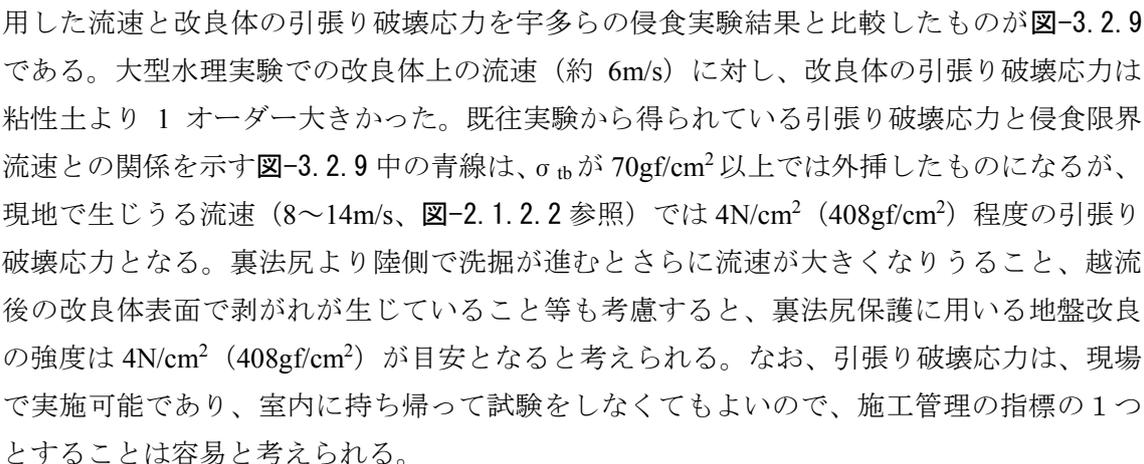
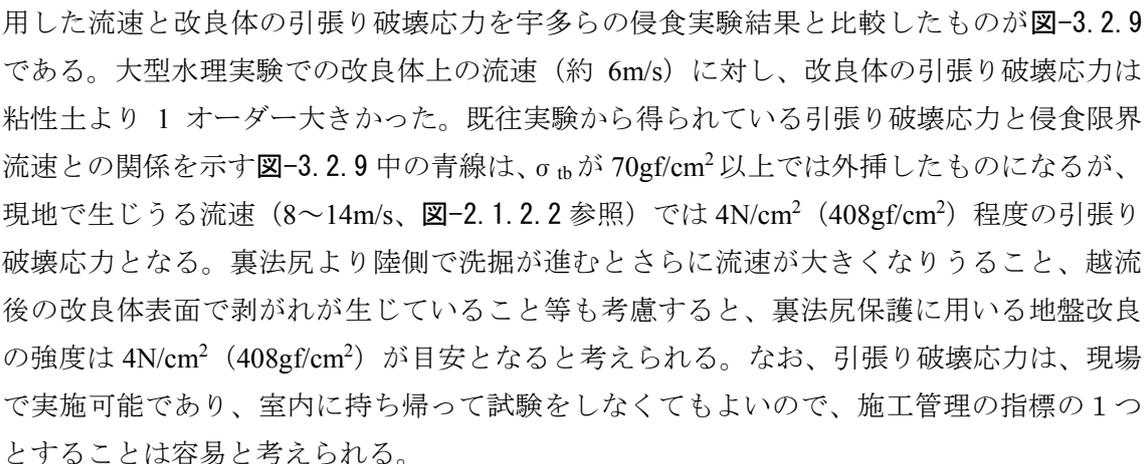


図-3.2.7 裏法尻での圧力上昇範囲と根留工および地盤改良の被覆範囲の比較

## 2) 地盤改良による裏法尻保護

仙台湾南部海岸での東北地方太平洋沖地震後の災害復旧においては、のように、表法先の基礎工と同程度の大きさの根留工を裏法尻に施工し、根留工周辺を地盤改良で補強している。この事例では、陸上の津波堆積土砂の有効利用の要望もあったことから、津波堆積土を用いた地盤改良による裏法尻保護が行われている。地盤改良の深さは地盤改良に用いる機材の性能をふまえて決定され、既往の粘性土の侵食実験で確認されている引張り破壊応力を外挿して改良の目標とすることとされた。

3. 2 (2) 1) で説明したケース 2 の実験では、改良体の表面の一部が高速流により引き剥がされていた。その状況は粘性土が高速流により引き剥がされていく機構に類似していると考えられることから、粘性土の侵食実験の結果を用いて改良体の強度について考察する。既往の高流速による粘性土の侵食実験 (宇多ら、1997) では、侵食限界流速の 2 乗と引張り破壊応力に比例関係が認められる。そこで、3. 2 (2) 1) で説明したケース 2 の実験後の改良体を対象に引張り破壊応力を計測したところ、その値は  $5.9\text{N/cm}^2$  ( $600\text{gf/cm}^2$ ) であった。大型水理実験を実物大の高流速侵食実験とみなして、改良体に作用した流速と改良体の引張り破壊応力を宇多らの侵食実験結果と比較したものが である。大型水理実験での改良体上の流速 (約  $6\text{m/s}$ ) に対し、改良体の引張り破壊応力は粘性土より 1 オーダー大きかった。既往実験から得られている引張り破壊応力と侵食限界流速との関係を示す 中の青線は、 $\sigma_{tb}$  が  $70\text{gf/cm}^2$  以上では外挿したものになるが、現地で生じうる流速 ( $8\sim 14\text{m/s}$ 、参照) では  $4\text{N/cm}^2$  ( $408\text{gf/cm}^2$ ) 程度の引張り破壊応力となる。裏法尻より陸側で洗掘が進むとさらに流速が大きくなりうること、越流後の改良体表面で剥がれが生じていること等も考慮すると、裏法尻保護に用いる地盤改良の強度は  $4\text{N/cm}^2$  ( $408\text{gf/cm}^2$ ) が目安となると考えられる。なお、引張り破壊応力は、現場で実施可能であり、室内に持ち帰って試験をしなくてもよいので、施工管理の指標の 1 つとすることは容易と考えられる。



### 3) 裏法尻を舗装することによる洗掘対策

2章のコラムで紹介した東日本大震災で越流が生じた海岸堤防の多重ロジスティック回帰分析結果から、海岸堤防の全壊率に対して関係が深いのは越流水深に次いで裏法尻被覆幅である。この分析対象となった現地の裏法尻被覆は、チリ津波対策時に設置された堤防の裏法尻水叩き（多くが幅 2~3m 程度）と裏法尻が舗装道路だった事例である。海岸堤防の裏法尻に舗装道路があることは結果として2)の地盤改良と同様、越流水の流向を水平に変える裏法尻保護の役割を果たす。ここで注意が必要なのは、アスファルト舗装であれば何でもよいということではない点である。

写真-3.2.4は、津波が遡上した陸地の簡易舗装箇所ではしばしば見られた損傷事例である。アスファルト舗装の下面に圧力が伝わると、その圧力によってアスファルト舗装は浮き上がりやすくなる。また、写真-3.2.5は、縮尺 1/2 の水理模型実験において、裏法尻に設けたアスファルト舗装（アスファルト：厚さ 5cm、路盤：厚さ 15cm）に長さ 100cm、幅 20cm の切り込みを 2 箇所設け、津波越流を生じさせる前後の裏法尻を示している。越流が始まると、まずアスファルト舗装の切り込み部分が流失し、その後にアスファルト舗装が破断した。以上のことから、管理用通路によく用いられる簡易舗装は薄いため亀裂が入りやすく、裏法尻保護の効果は期待できない。



写真-3.2.4 簡易舗装の損傷事例

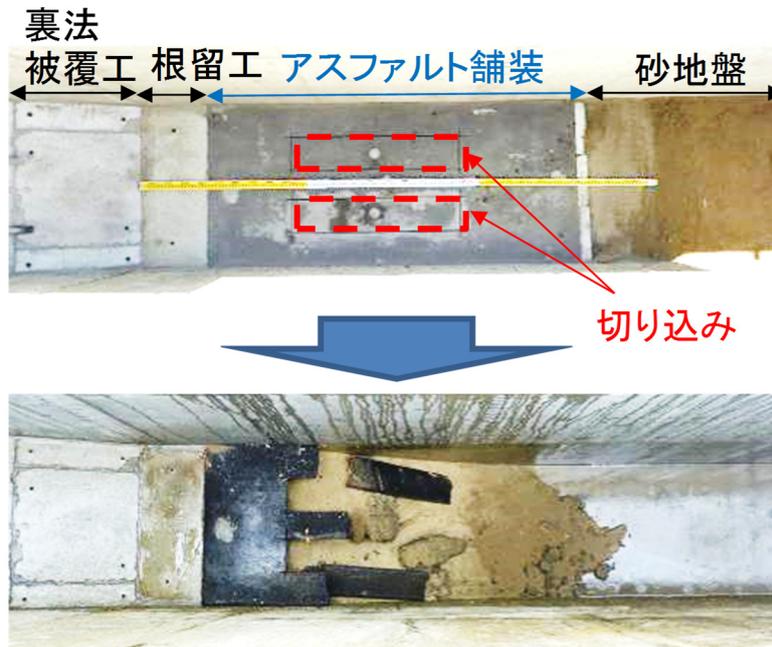


写真-3.2.5 損傷のあるアスファルト舗装の流失（縮尺 1/2 の水理模型実験）

### （3）洗掘に対する根留工の安定性を向上させる工夫

裏法尻に越流水の流向を水平に変える保護工を施工できる用地を確保できない場合には、根留工の下に矢板を取り付けた複合構造を採用することが考えられる。

根留工と矢板を一体化する構造の効果に関して、縮尺 1/2 の水理模型実験の結果を紹介する。(2) 1) で紹介した実験と同じ水路に、高さ 2.5m、天端幅 1.5m、法勾配 1:2 の堤防模型を設置した。堤防の構造は、盛土（中央粒径 0.25mm）の表法、天端、裏法の上に厚さ 25cm のコンクリート板を載せたものである（図-3.2.10）。なお、被覆コンクリートの設置前に盛土の表面を厚さ 5cm の捨てコンクリートを施し、水路の側壁と被覆工との間は被覆工が水路に接触せずに移動できるように 3cm の隙間を設け、その部分を砂で埋めている。また、天端被覆工の中心に直径 5cm の空気孔を設け、碎石（RC-20）を詰めた。越流時間は 7 分（現地換算で 10 分）、最大越流水深は 1m（現地換算で 2m）とした。長さ 2m の矢板が無いケースでは、越流開始から 43 秒後に根留工が流失した後、裏法被覆工が裏法尻の洗掘箇所に移動した（図-3.2.11）。一方、長さ 2m の矢板が有るケースでは、根留工際において根留工の厚さ以上に洗掘が進んだが、根留工および裏法被覆工は移動しなかった。

以上のように、根留工の下に矢板を取り付けることで、地盤改良と同様に、洗掘に安定性を向上させることができる。

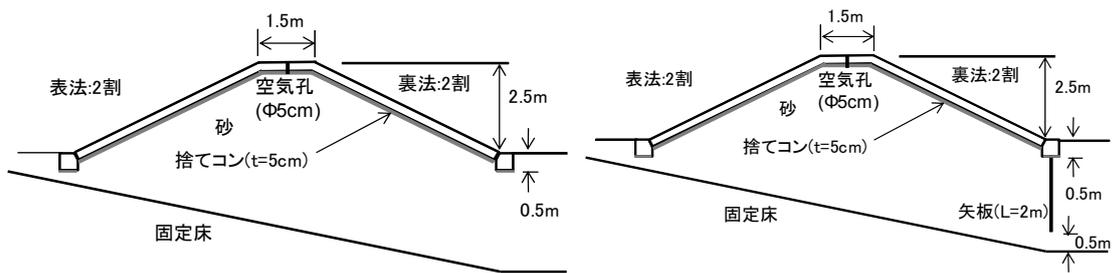


図-3.2.10 比較する堤防形状 (左：矢板無し、右：矢板有り)

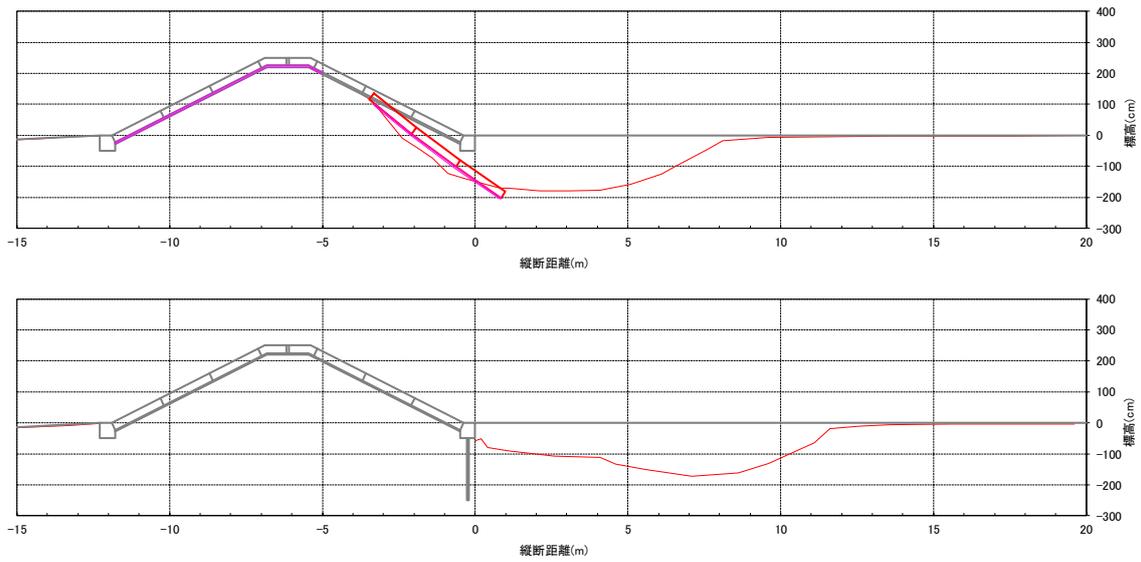


図-3.2.11 越流後の地形及び堤防形状 (上：矢板無し、下：矢板有り)  
(黒線：越流前、赤線：越流後)

### 3. 3 裏法被覆工

#### (1) 考え方

裏法被覆工は、設計高潮位以下の潮位および設計波以下の波浪による越波で裏法が侵食されないように堤体を被覆するものである。このため、表法被覆工が厚さ 50cm 程度確保されているのが一般的であるのに対し、裏法被覆工の厚さは 10~20cm 程度であることが多い。

裏法被覆工の構造は、コンクリートブロック張式、コンクリート被覆式、コンクリート法枠式に大別される。コンクリートブロック張式は水密性・気密性が小さい一方、長期間にわたる堤体土の締め固まり・地震動による変形・基礎地盤の圧密沈下により堤体土が変形してもブロックが追随するので、変状を発見しやすい。コンクリート被覆式は、水密性・機密性が高く、一体性・剛性も高いので、長期間にわたる堤体土の締め固まりや地震動による変形・基礎地盤の圧密沈下により堤体土が変形しても被覆工に変状が現れない場合が多い。法枠式は、法枠内が空張であればコンクリートブロック張式に近い性質を持ち、コンクリート張であればコンクリート被覆式に近い性質をもつ。

裏法被覆工は、津波越流時には、高流速が堤体土に直接作用して侵食・洗掘することを防止する役割を持つ。その役割を果たすためには、裏法被覆工が流失しないようにしなくてはならない。その方法の一つは、裏法被覆工の厚さを増すことであり、東北地方太平洋沖地震の災害復旧では表法被覆工と同じ 50cm が確保された。そのほか、裏法被覆工の構造に応じて、以下のような構造上の工夫が考えられる。

#### (2) コンクリートブロック張式

コンクリートブロック張式では、「流体力の増大をもたらす不陸を生じさせないこと」、「吸出しを抑制すること」、「浸透水によるブロック下面の水圧上昇を抑制すること」が重要である。

##### 1) 流体力の増大をもたらす不陸を生じさせないこと

長期間にわたり堤体土が一切変形しないようにすることは現実的ではないので、ブロックに多少の不陸が発生することは想定する必要がある。ここで重要なのは、-3.3.1 左に示すような高流速下でブロック端部に流体力が作用する状態ではなく、-3.3.1 右に示すように不陸が発生しても端部に流体力が作用しにくい状態にすることである。そこで、不陸が生じても流体力がまともに作用する面ができないように、-3.3.1 右のとおり両端に切り欠きを設けたブロックを噛み合わせることが有効である。

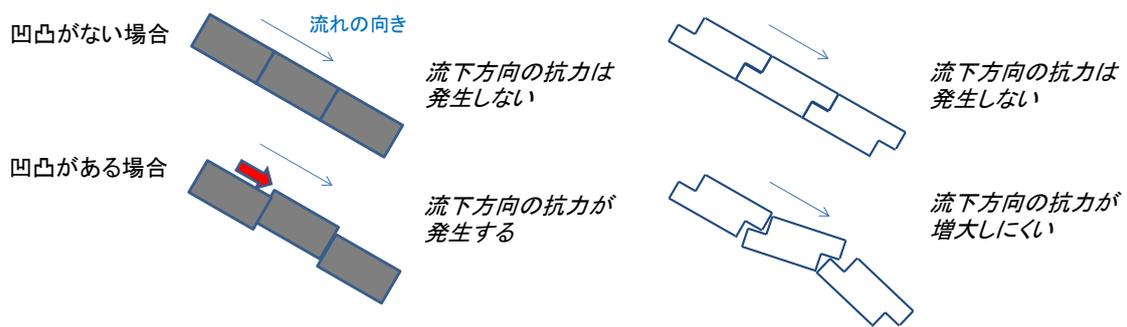


図-3.3.1 流体力が発生する不陸（左）と発生しない不陸（右）

## 2) 吸出しを抑制すること

2. 2. 6で説明したように、津波越流時の高流速によって被覆ブロックの穴やブロック間の隙間から裏込材や堤体土が吸い出される恐れがあり、特に圧力低下が生じている法肩部が吸い出されやすい。また、被覆工上の水位が急激に低下すると、被覆工下に残留した水圧で被覆工が持ち上げられ、吸出しが発生する恐れがある。ブロック張式とする場合には吸出し対策が必要である。

一つの方法としては、図-3.3.2のように、被覆ブロックの下に2重のフィルター層を設けることが有効である。この場合、2. 1. 5に示したブロック下の水圧上昇が起こらないよう、表法にフィルター層が必要な場合は、フィルター層が海側から堤体内に連続しないように注意しなければならない。ブロックに穴空き構造のものを用いる場合には、ブロック下面の水圧が上昇しにくくなる利点を有するが、2. 2. 6で示した穴からのフィルター材の吸い出しが起こらないようブロックの穴の大きさに留意する必要がある。

なお、仙台湾南部海岸の裏法被覆工で穴がないブロックを採用しているのは、津波越流時に生じる10m/s級の流れでは穴からのフィルター材の流失を防ぐのは困難と判断したためである。さらに、津波越流時に上昇した水圧・空気圧が抜けるように、ブロック間の隙間には練りの処理を行わず、一定の通気性を確保している。これらに関して、ブロックに穴があると、ブロックの上下面の圧力差が生じにくくなりブロックがめくれにくくなる一方、フィルター材が礫サイズでも吸い出される可能性が十分にあることから、フィルター材の動き・吸い出しを許すような穴を設けず、ブロック下面からの圧力を逃がす通気性・通水性を確保することが求められる（加藤ら、2014）。

フィルター層設置以外の吸出し対策としては、ブロックの下に薄い捨てコンクリートを打つことも有効である。この場合、津波越流時には堤体への浸透により捨てコンクリート下の空気圧上昇が懸念されるので、3. 4で述べる空気抜き穴の設置が必要になる。

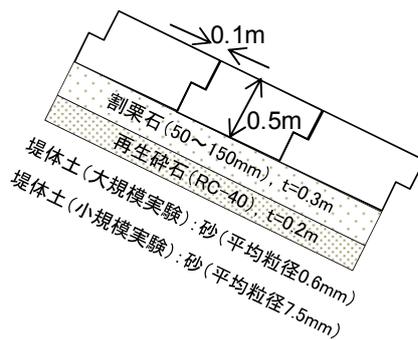


図-3.3.2 ブロック張式におけるフィルター層の例

### 3) ブロック下面の圧力上昇を抑制すること

ブロックの下をフィルター層とした場合には、被覆工下面の圧力上昇に注意しなければならない。裏法被覆工に穴あきブロックを用いると、被覆工下面の圧力上昇は回避されるが、前述のように吸い出しが問題となる。このため、図-3.3.2のように穴のないブロックを採用して吸い出しを抑制する一方、ブロック間の隙間には練りの処理を行わないことで水圧・空気圧を逃がすことが有効である。

なお、ブロック下面のフィルター層における水圧は流入してくる水量が排水量を上回ることによって上昇するので、表法側で流入を抑制することも有効と考えられる。3.5に示すように表法被覆工の構造に留意するとともに、表法被覆工に穴あきブロック及びフィルター層を設ける場合には表法での浸透によるフィルター層の圧力上昇が天端被覆工や裏法被覆工の下面に伝わらないよう、フィルター層を縁切りすることが望ましい。また、天端被覆工と裏法被覆工との間の隙間からの流入にも留意する。

#### (3) コンクリート被覆式

コンクリート被覆式は、水密性・気密性や一体性・剛性が高いため、流体力が作用する不陸や吸い出しが生じにくい。しかし、水密性・気密性が高いことから、津波越流時の浸透により被覆工下面の圧力が上昇しやすい。このため、ブロック張式よりも被覆工下面に水が入りにくくする工夫が求められる。その方法としては、捨てコンクリートの打設が有効であり、フィルター層の設置は避けるべきである。

空気圧に対する配慮は、3.4(3)を参照されたい。

### 3. 4 天端被覆工

#### (1) 考え方

天端被覆工は、裏法被覆工と同様に、設計高潮位以下の潮位および設計波以下の波浪による越波で侵食されないように堤体を被覆するものである。天端被覆工の厚さ、構造、津波越流時の役割は裏法被覆工と同様である。津波越流時の役割を果たすための方法の一つは、天端被覆工の厚さを増すことであり、東北地方太平洋沖地震の災害復旧では表法被覆工と同じ 50cm が確保された。そのほか、以下のような構造上の工夫が考えられる。

#### (2) 法肩の構造

2. 2. 5 で述べたように、裏法肩では津波越流時に圧力が低下するため、裏法肩を独立した被覆構造にすると不安定化する恐れがある。このため、裏法肩を独立した構造にせず、**図-3.4.1** のように表法被覆工の上部及び裏法被覆工の上部と天端被覆工を一体化した構造が望ましい。

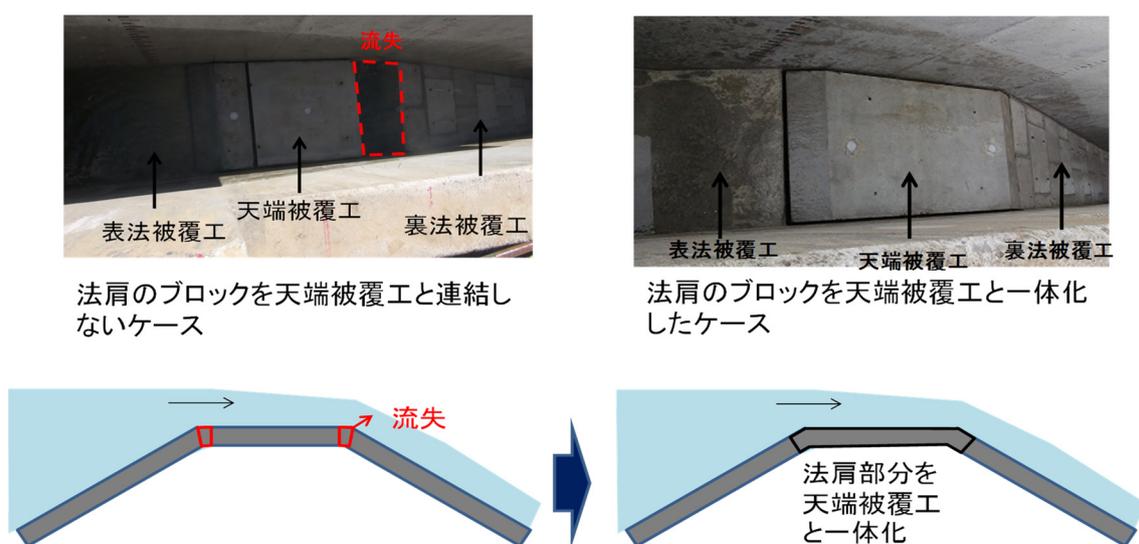


図-3.4.1 天端被覆工と法肩帯工の一体化

#### (3) 空気孔の設置

2. 1. 5 で述べたように、津波越流時には被覆工下面に作用する圧力が上昇する恐れがある。また、経年的な堤体の沈下等により堤体と天端被覆工との間に空洞が生じると、津波越流時にパイピングを引き起こすような水みちになる恐れや、天端被覆工が陥没する恐れがある。

これらに対して、空気抜きと点検孔を兼ねた穴を天端被覆工に設けることが考えられる。仙台湾南部海岸の堤防の天端被覆工には、直径 10cm の点検穴兼空気抜き穴が沿岸方向 2m

毎に1カ所設けられている（写真-3.4.1）。なお、越流水の過剰な流入を抑制するため、点検穴兼空気抜き穴には砕石（RC-40）が詰められている。



写真-3.4.1 天端被覆工に設けられた点検穴兼空気抜き穴（仙台湾南部海岸）

### 3. 5 表法被覆工

#### (1) 考え方

表法被覆工は、波浪の作用から堤体土を保護し、また堤体や波返工と一体となって高潮、波浪、津波の侵入を防止する機能を有する。表法被覆工の厚さはこれまでの実績から 50cm とすることが多い。表法の勾配によって波のうちあげ高や越波流量が変わることから、設計波及び設計潮位に対する所要の目的達成性能を確保するように表法の勾配は設定される。その際、海浜の利用状況なども考慮することになっている。

傾斜型の表法被覆工には、コンクリートブロック張り式やコンクリート被覆式などがある。コンクリートブロック張り式は、従来、軟弱地盤などで不同沈下の恐れがある場合、屈とう性を確保するために用いられてきた。表法面からの浸透水や堤体からの浸出水に対するフィルターとしての機能を確保するため、ブロックの下には裏込め工を敷設する。裏込め工は厚さ 50cm 以上とすることが多く、栗石や砕石などが使用される。

2章のコラムのように、東日本大震災で津波越流が生じた海岸堤防の多重ロジスティック回帰分析結果では、堤防の全壊率は表法勾配が緩い方が小さかった。このことから、表法勾配を緩くすることが構造上の工夫の1つになりうる。ただし、砂浜幅が十分でない海岸に緩勾配の堤防を施工すると、貴重な砂浜がコンクリートで被覆されることになるとともに、風波等が越波しやすくなったり、表法先からの吸い出し等による堤防の被災が生じやすくなったりすることに留意する必要がある。

#### (2) 構造上の工夫

波返工と一体構造になっているコンクリート被覆式(図-3.5.1)および重力式(図-3.5.2)の表法被覆工については、津波波力による破壊等が生じないように、打ち継ぎ目等に十分に配筋を施す必要がある。また、波返工の必要性についても再検討する必要がある。

引き波時における表法被覆工の不安定化のメカニズムは3.3で述べた裏法被覆工に関するものと同様である。しかし、裏法被覆工とは異なり、表法被覆工は普段から水圧や波浪が作用することが多く、それらに対する所要の安全性を確実に確保しなければならない。よって、設計潮位および設計波に対する構造の安定性を確保した上で、裏法被覆工に対する構造上の工夫を適用できるかどうか検討する必要がある。なお、2.2.1、2.2.7で述べたように、被覆工の下にフィルター層を表法先から裏法尻まで連続して設けると、そこが津波越流時に水みちとなって被覆工下の圧力上昇やパイピングを生じさせる恐れがあることから、表法被覆工の下にフィルター層を設ける場合には天端被覆工との間で縁を切る必要がある。

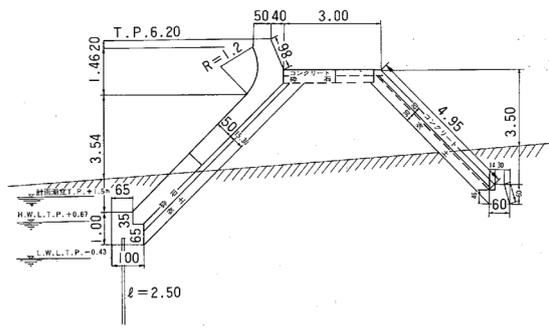


図-3.5.1 コンクリート被覆式表法被覆工の例

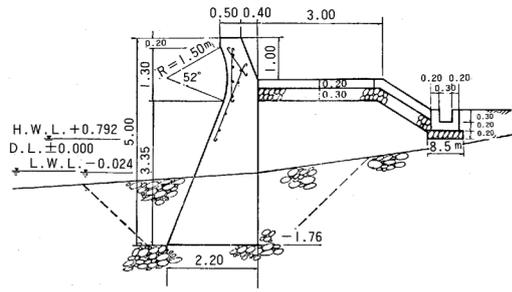


図-3.5.2 重力式表法被覆工の例

### 3. 6 表法先の洗掘対策

#### (1) 考え方

2. 1. 4で述べた裏法尻での洗掘と同様に、引き波時の越流により表法先が洗掘され、基礎工が流失する恐れがある。

表法先には、波浪による洗掘を防止して表法被覆工や基礎工を防護することを目的とした根固工や、波のうちあげ高や越波流量の低減を目的とした消波工が設置されることがある。また、止水効果を高めるため、あるいは洗掘に対抗するため、基礎工の下に矢板を打つことがある。これらは設計対象の潮位や波浪に対する所要の効果を発揮するためのものであるが、津波越流時の堤防の粘り強さにも寄与する可能性がある。

表法先の洗掘に対する構造上の工夫を以下で説明する。

#### (2) 構造上の工夫

引き波時における基礎工の不安定化のメカニズムは、3. 2で述べた根留工に関するものと同様である。しかし、根留工とは異なり、基礎工は普段から水圧や波浪が作用することが多く、それらに対する所要の安全性を確実に確保した上で、津波越流時に粘り強さを発揮しなければならない。

表法先に設置される消波工に用いる異形ブロックは空隙率が大きく、表法先の洗掘を低減する効果が小さい。また、根固工に用いる程度の異形ブロックでは引き波時の高流速に対して質量が不足する。図-3.6.1のように、消波工の異形ブロックの下に吸い出し防止工（アスファルトマット）を敷設することで、表法先での洗掘を低減できる可能性がある（写真-3.6.1）。ただし、異形ブロックを載せた吸い出し防止工自体が津波の越流によって浮き上がる（写真-3.6.2）と、表法先と吸い出し防止工との隙間から吸い出しが生じて洗掘が進行するので、津波の越流に対する異形ブロックや吸い出し防止工の安定性が十分かどうか確認しなければならない。

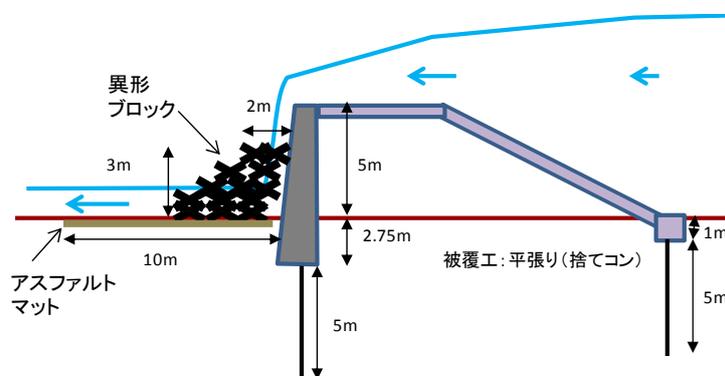


図-3.6.1 引き波による表法先の洗掘に関する実験の模型断面（寸法は現地換算値）

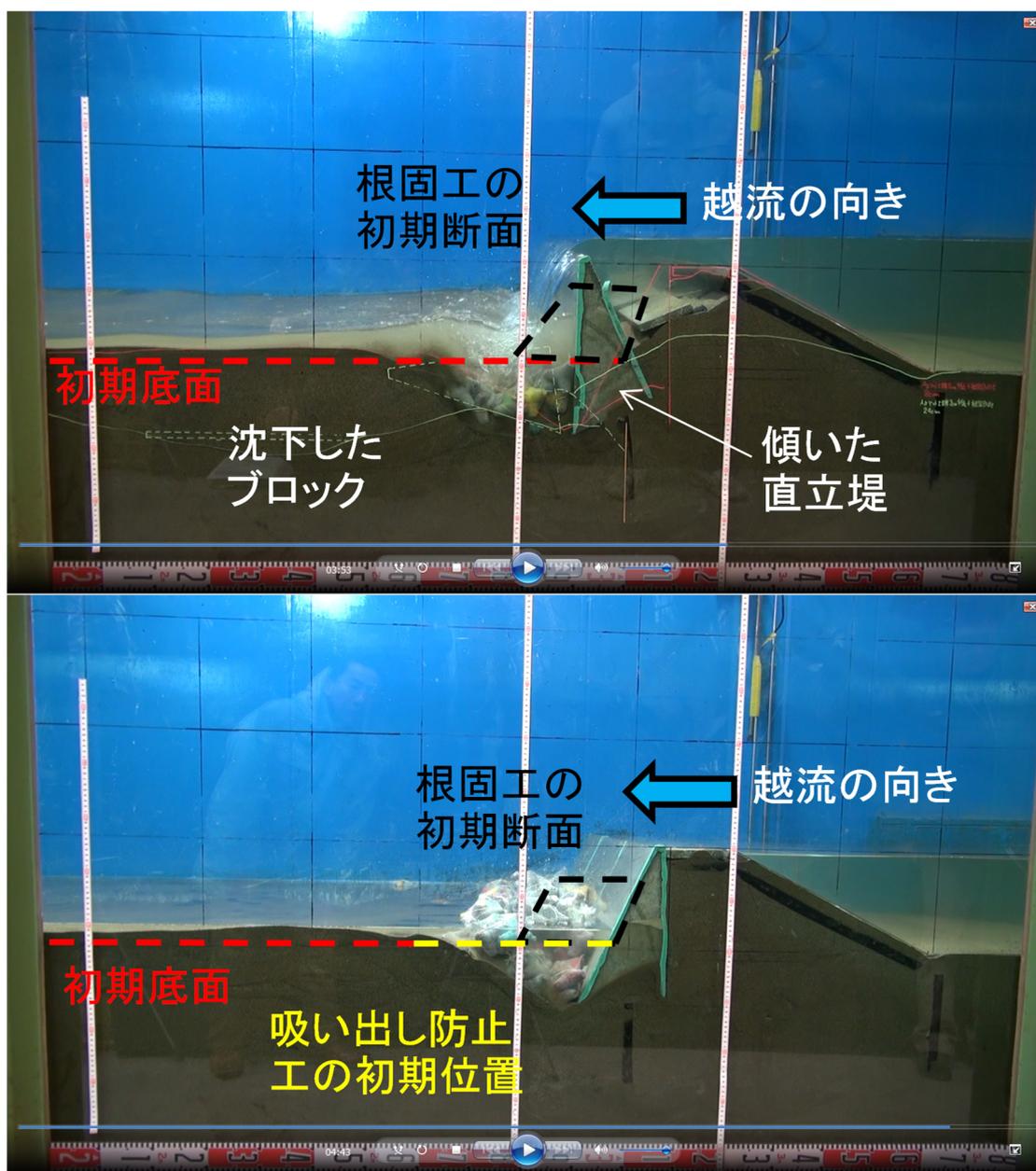


写真-3. 6. 1 引き波による表法先の洗掘

(上：吸い出し防止工無し、下：吸い出し防止工有り)

(縮尺 1/25 の水理模型実験にて 2t 相当のブロックを連結、吸い出し防止工：厚さ 50cm (現地換算値) のアスファルトマット、最大越流水深 2m (現地換算値))

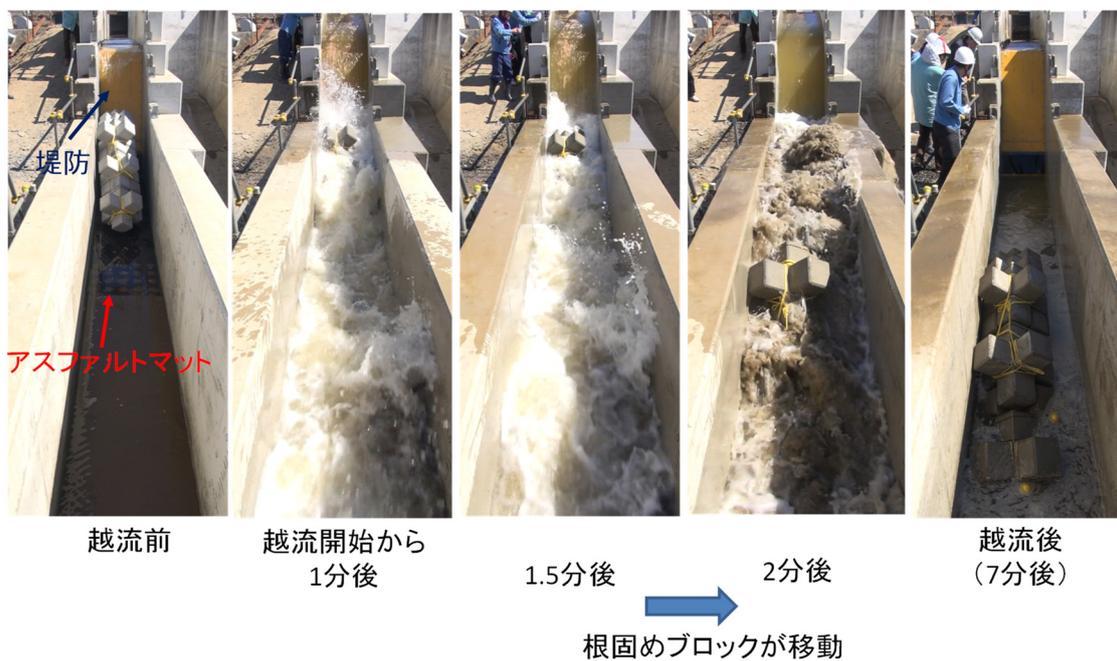


写真-3.6.2 引き波による異形ブロック及び吸い出し防止工の移動  
 (縮尺 1/2 の水理模型実験にて 2t 相当のブロックを連結、吸い出し防止工：厚さ 50cm (現地換算値) のアスファルトマット、最大越流水深 2m (現地換算値))

### 3. 7 樹林

#### (1) 考え方

平成 26 年の海岸法改正により、津波、高潮等により海水が当該施設を越えて侵入した場合にこれによる被害を軽減するため、堤防または胸壁と一体的に設置された樹林は海岸保全施設に含まれることになった。「海岸保全施設の技術上の基準を定める省令」においては、設計津波を超える津波等の作用に対して堤防の損傷等を軽減する機能が確保されるよう、樹種並びに盛土の幅及び厚さを定めるものとされている。

堤防と一体的に設置された樹林及び盛土は、津波、高潮等により海水が堤防を越えて侵入した場合の被害を軽減する役割を担う。その役割としては、樹林により越流、越波を減勢すること、盛土が堤防の裏法被覆工等を覆うことによって越流等による流体力が直接作用するまでの時間を稼ぐこと、越流等による盛土の侵食を樹林の根により遅らせることなどが考えられる。加藤ら（2017）は、全国 7 海岸の樹林等の根を調査し、その根量密度が比較的高く、一定の耐侵食性を有する層が地表から 10cm までの範囲にある箇所が多いことを確認している。

#### (2) 留意点

盛土上の樹林が生育し、津波に対して根返りせずに盛土の侵食を軽減するためには、一定の厚さの盛土が必要である。津波による根返りを防止する観点から盛土による生育基盤を造成する場合、クロマツ植栽地の有効土層は 1.5m 以上確保することが望ましいとされている（独立行政法人森林総合研究所、2015）。また、国土交通省都市局公園緑地・景観課の「東日本大震災からの復興に係る公園緑地整備に関する技術的指針」では、垂直根の発達のため、最低でも地下水位より上に 1.5m、特に津波被害の軽減を期待する場合は地下水位より 2.0m 程度の厚さの植栽基盤を確保することが望ましいとされている。

平成 27 年度に施工された仙台湾南部海岸の緑の防潮堤では、堤防陸側の樹林の盛土は堤防天端と同程度の天端幅、厚さ 3m、法勾配 4 割となっている（図-3.7.1）。また、裏法被覆工と盛土が接する面ですべりが生じないように、浸透した雨水が盛土外に排出されるようにドレーン工が盛土下部に設けられている。

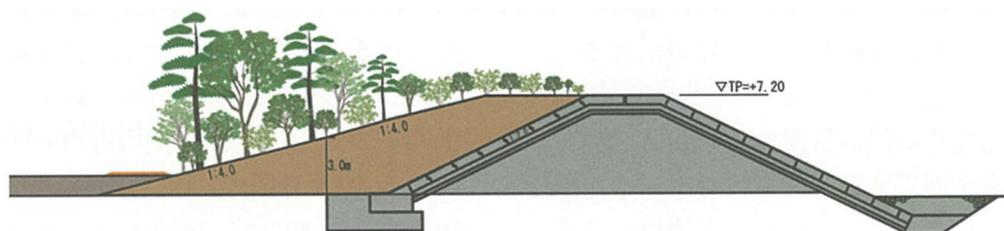


図-3.7.1 仙台湾南部海岸の緑の防潮堤の断面図

コラム 堤体の材料

堤体の盛土材料は、「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」では、原則として多少シルト・粘土を含む砂質又は砂礫質のものをを用い、適当な含水量の状態、各層、全面にわたり均等に締固めを行うものとされている。

堤体は海岸堤防の主体となるものであり、波力、地震力、浸透などの作用に対して所要の安全性を確保する必要がある。粘り強い構造の検討にあたっては、設計対象の地震動に対する所要の安全性を確保した上で、津波越流時における堤体への作用を考慮する必要がある。

2. 1. 5で示したように、津波越流時には浸透により浸潤線が上昇し、被覆工下面の圧力が上昇する恐れがある。これに対して、盛土材料や締固めにより、堤体の透水性を小さくすることが望ましいと考えられる。なお、2. 1. 2で示した津波越流時の高流速に対しては、堤体は被覆工により保護する必要がある。

図-3.8.1は、細粒分含有率と締固め度、透水係数の関係を調べた試験結果である。図から、細粒分が比較的高い砂質土Ⅱや粘性土では、締固め度を上げることにより、透水係数を小さくできることがわかる。以上より、堤体土の品質確保のためには、適切な材料の選定と締固め度を確保する施工管理が有効であることがわかる。

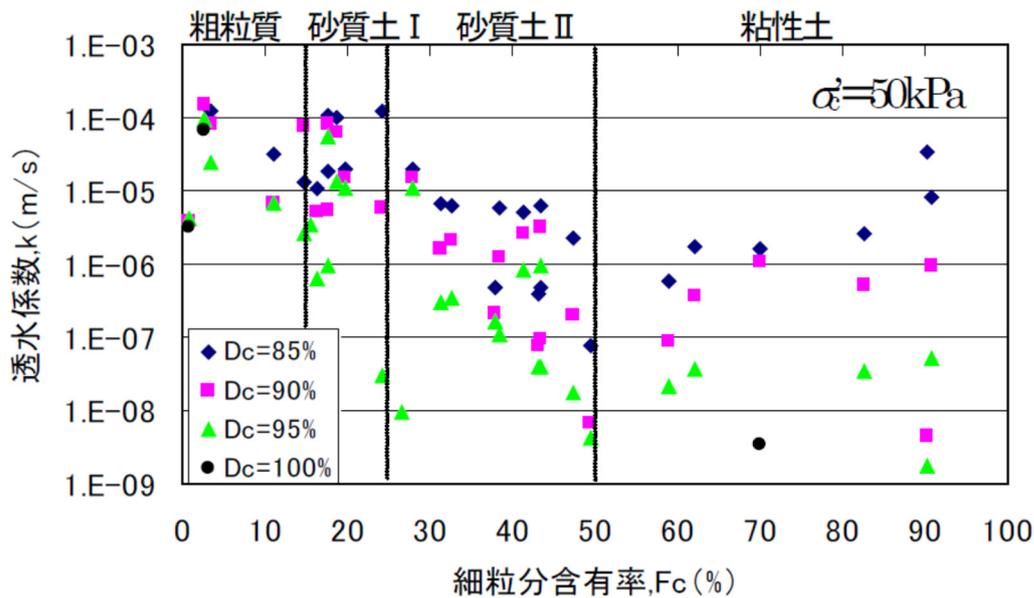


図-3.8.1 締固め度(Dc)、細粒分含有率、透水係数の関係 (土木研究所、2011)