

# 港湾・空港における津波・地震対策技術



平成24年10月  
東北地方整備局  
仙台港湾空港技術調査事務所





東日本大震災から1年7ヶ月が過ぎました。  
猛威を振るった自然との対峙を経て、私たち港湾・  
空港技術者は、全力で復旧工事にも取り組んできました。

港の復旧は、未だ道半ばですが、復旧への時間は  
限られています。

今出来ることを考え、出来る事を進めています。決  
して立ち止まることなく、地域の復興を願い港湾の復  
旧を進めています。



# 捉える 津波発生！ GPS 波浪計での観測データ

## 沖合を走る津波の姿

### 1. 釜石沖で捉えた津波波形

釜石沖約 20 km で観測された津波の峰の高さは、第 1 波 (図中①の部分) が突出して高く、第 2～7 (図中②～⑦の部分) で徐々に低くなった。更に第 1 波を詳しく見ると、初めの 6 分間で 2 m 上昇し、更に続く 4 分間で 4 m 以上も急激に上昇した。

周期は第 1～3 波で不規則であるが、第 4～7 波では、50 分程度の周期の繰り返しとなり、これは沖合から来襲した津波が沿岸域を移動する波に変わったものと考えられる。

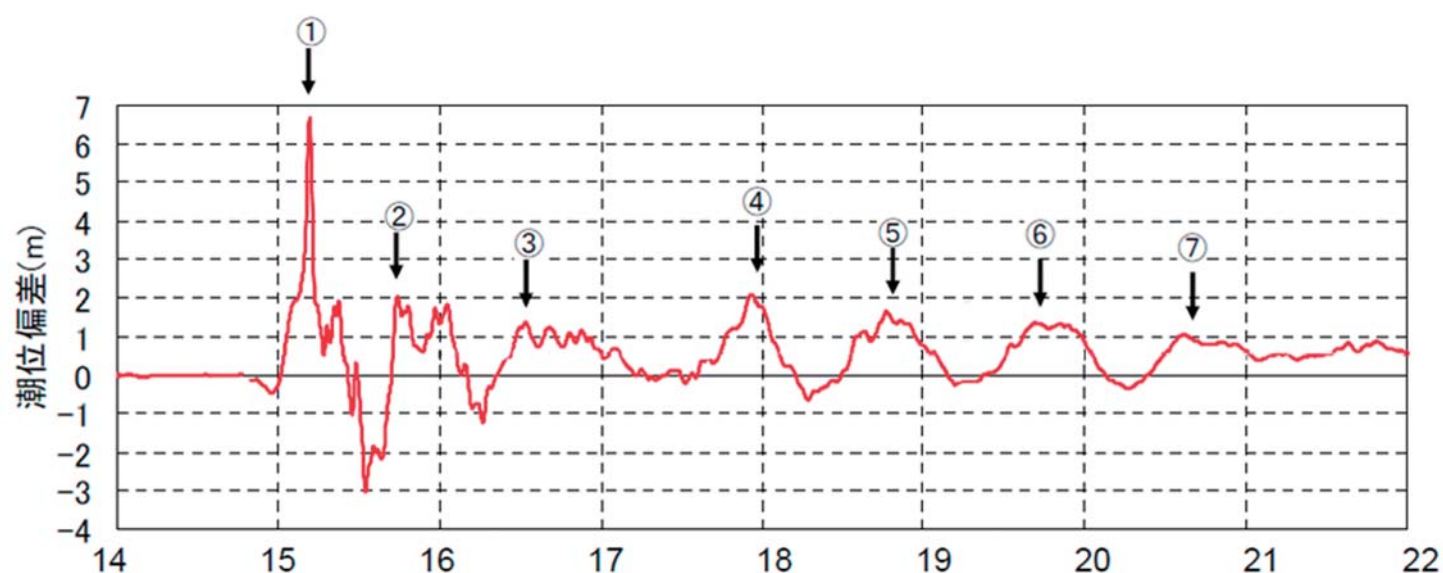


図-1 岩手南部沖 GPS 波浪計で捉えた津波の初期の波形

### 2. 東北沿岸沖に来襲した津波の波形

東北沿岸の 6 基の GPS 波浪計は、14 時 46 分の地震発生に伴う津波波形を面的に捉えた。

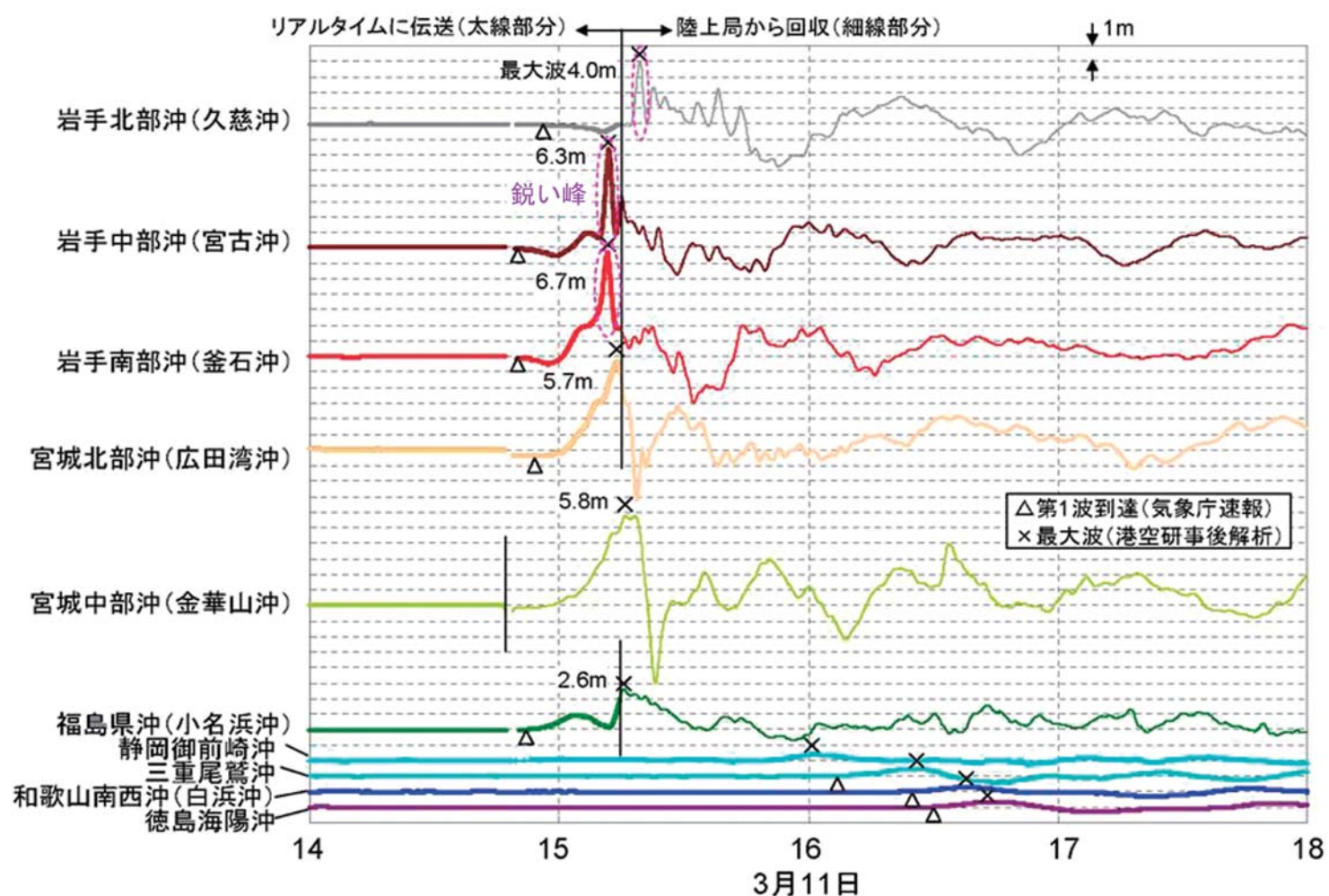


図-2 GPS 波浪計による観測波形 (3 / 11 の 18 : 00 迄表示)

## GPS 波浪計の意義

国土交通省では、港湾整備等沿岸域の利用の基となる波浪の観測を行ってきました。GPS 波浪計は、GPS のキネマテック方式によりブイの位置を高さ方向に計測する装置で、概ね沖合 20km に設置し波浪観測を実施しています。

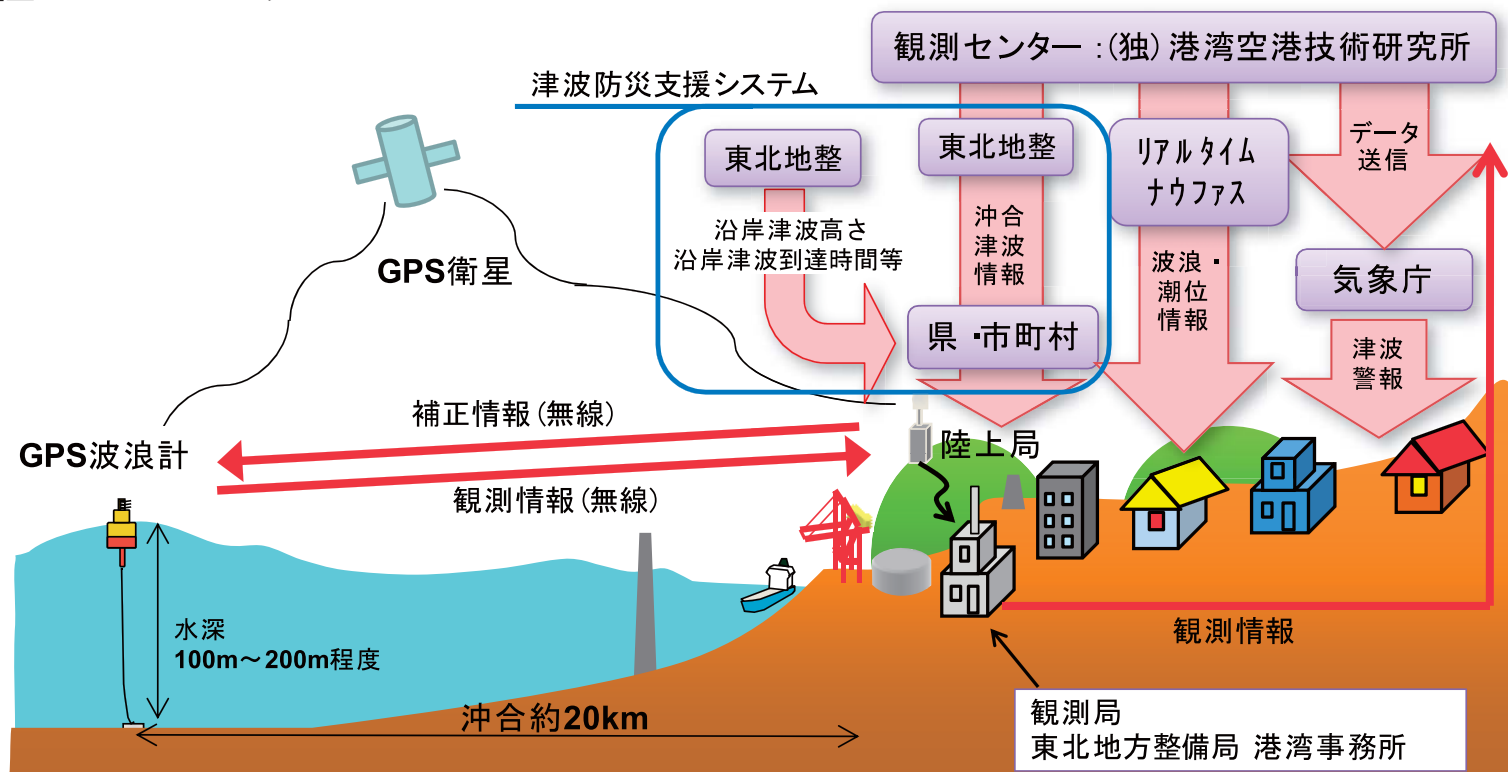
平成 19 年度から観測を始めた新しい装置で、東北は、度重なる津波被害に見舞われてきたことから、先駆的に整備を行ってきました。現在は、全国 15 基の GPS 波浪計が設置されています。

津波の観測では、津波の湾内到達の 10 分程度前の観測が可能で、気象庁など関係機関への配信により津波防災への迅速な対応に活用されています

「東日本大震災」では、「津波警報」から「大津波警報」への見直しに貢献しました。

## GPS 波浪計のデータの届くまで

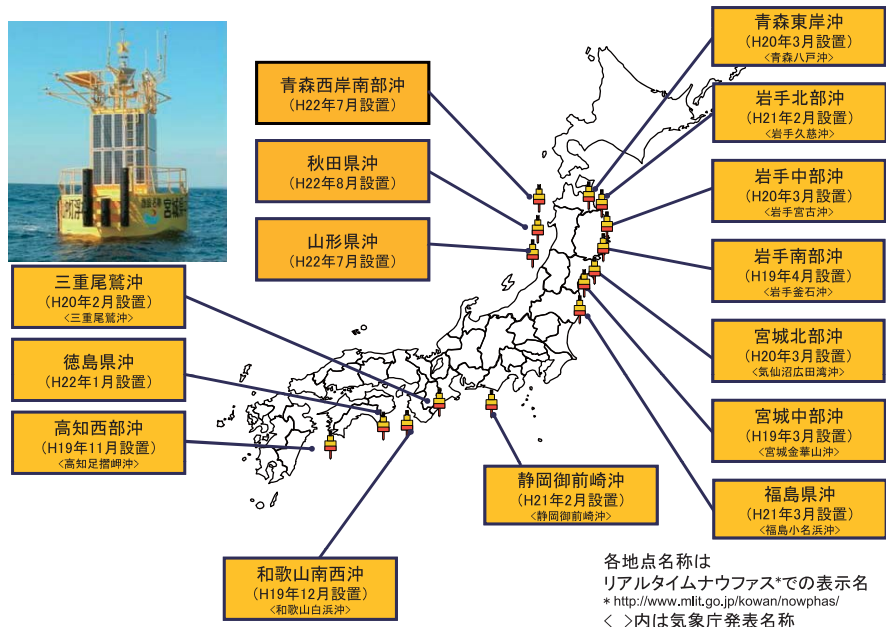
GPS 波浪計の観測データは、位置情報の精度を高めるための陸上局経由で利用者の方々へ配信されています。



### GPS 波浪計観測データの流れ

#### GPS波浪計観測地点一覧(平成24年10月現在)

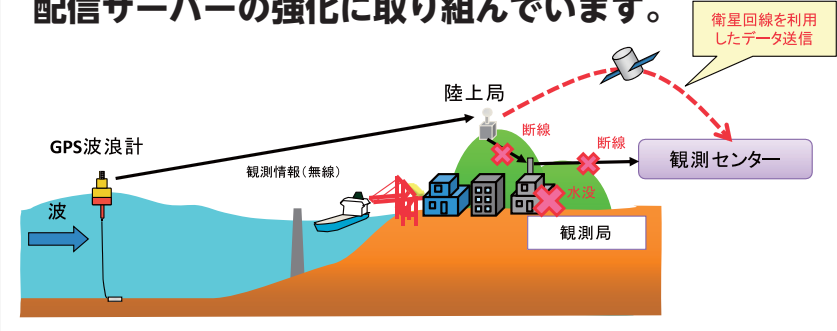
国土交通省



### 情報伝達の強化

沿岸部の通信ケーブルは津波で破壊されるなどしてデータの送信が途絶え、継続して十分な情報提供ができませんでした。

このため、通信回線の多重化や非常時の電源確保、配信サーバーの強化に取り組んでいます。





# 追う 最新技術で見た港の中の津波の動き

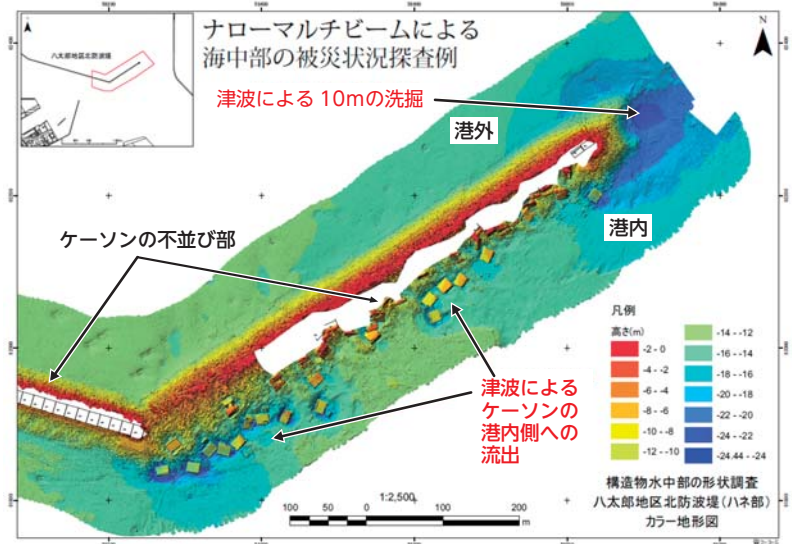
## 海の中を立体的に探査・計測

防波堤等の破壊をもたらした、港内の津波の痕跡を捉えるため、海中を立体的に探査・計測できるスワスと呼ばれる測定方法を、八戸～小名浜の重要港湾9港全てで実施しました。この結果、防波堤の流出状況、洗掘状況を把握でき、津波の破壊メカニズムに迫ることができました。

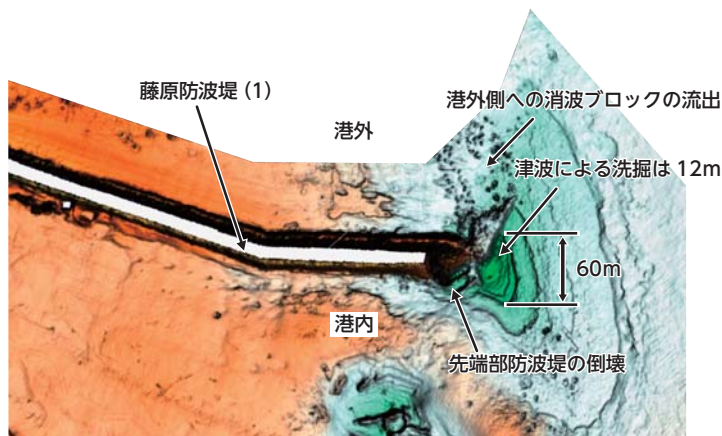
### 1. 八戸港八太郎地区北防波堤の倒壊・流出のマルチビームでの立体図化（鯨瞰図）

#### スワスとは

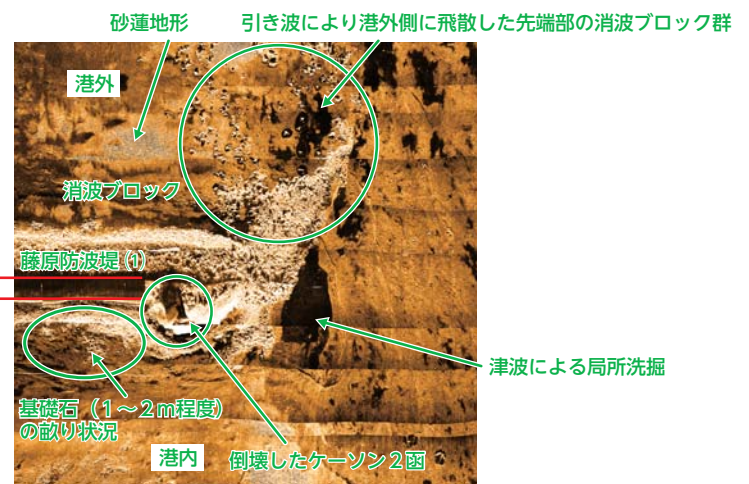
従来、海底の地形を知る主な方法は、1個の送受機から1本の音響ビームで行うシングルビーム測深であった。現在では、左右に扇状に幅を持って面的に海底地形を把握できるようになった。原理によって写真撮影の様に詳細形状把握できるサイドスキャンソナーと、X,Y,Zの測位ができるマルチビームに分かれるが、合わせてスワスと呼ばれる。



### 2. 宮古港藤原地区の防波堤（I）先端の洗掘、基礎石の飛散状況



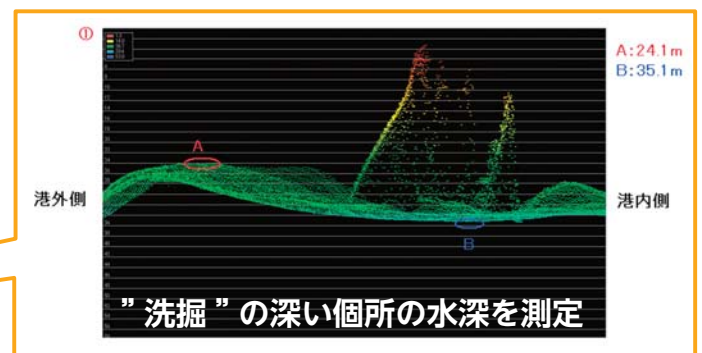
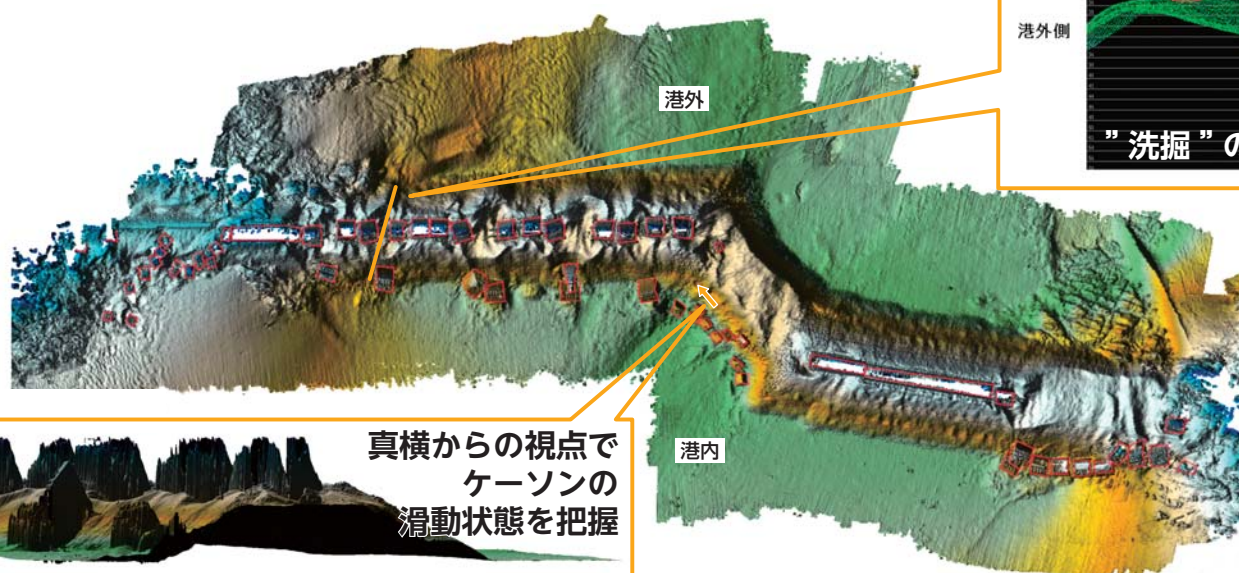
マルチビームでの立体測定



サイドスキャンソナーでの高解像度探査

### 3. 立体視で被災状況を追求

釜石湾港防波堤鯨瞰図





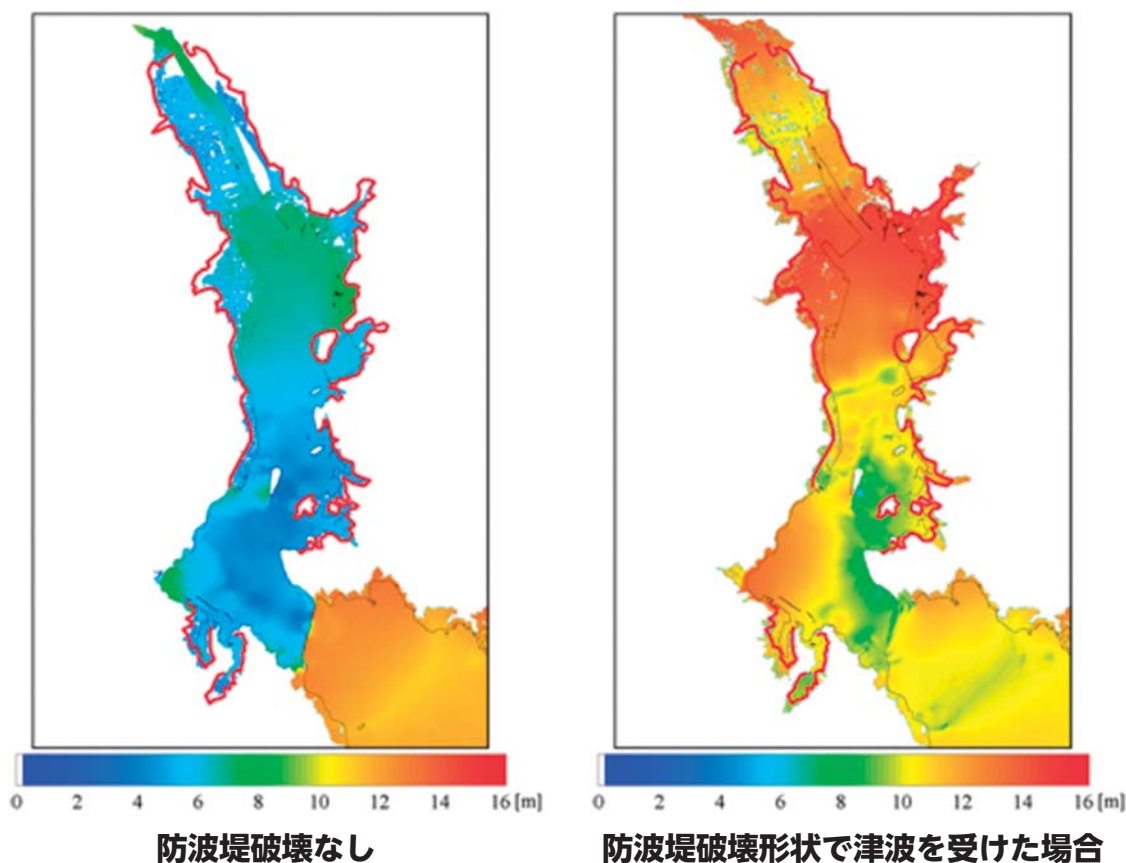
# 追う 最新技術で見た港の中の津波の動き

## 最新の数値シミュレーションで港内の津波と防護を知る

動的・三次元的な運動理論式を基本として、陸上の遡上、漂流物まで計算できる高潮津波シミュレータ STOC（港湾空港技術研究所が開発）で津波の港湾内での挙動、防波堤有り・なしでの防護効果の比較の検証を行うことができます。

シミュレーションに GPS 波浪計の観測値を反映することで、実際の海水位との合致が見られ精度の高い結果が得られました。計算防護効果の比較では、防波堤が津波で破壊しなかった場合と、最初から破壊した形で津波を受けた場合、そして実際の津波浸水区域の比較をします。

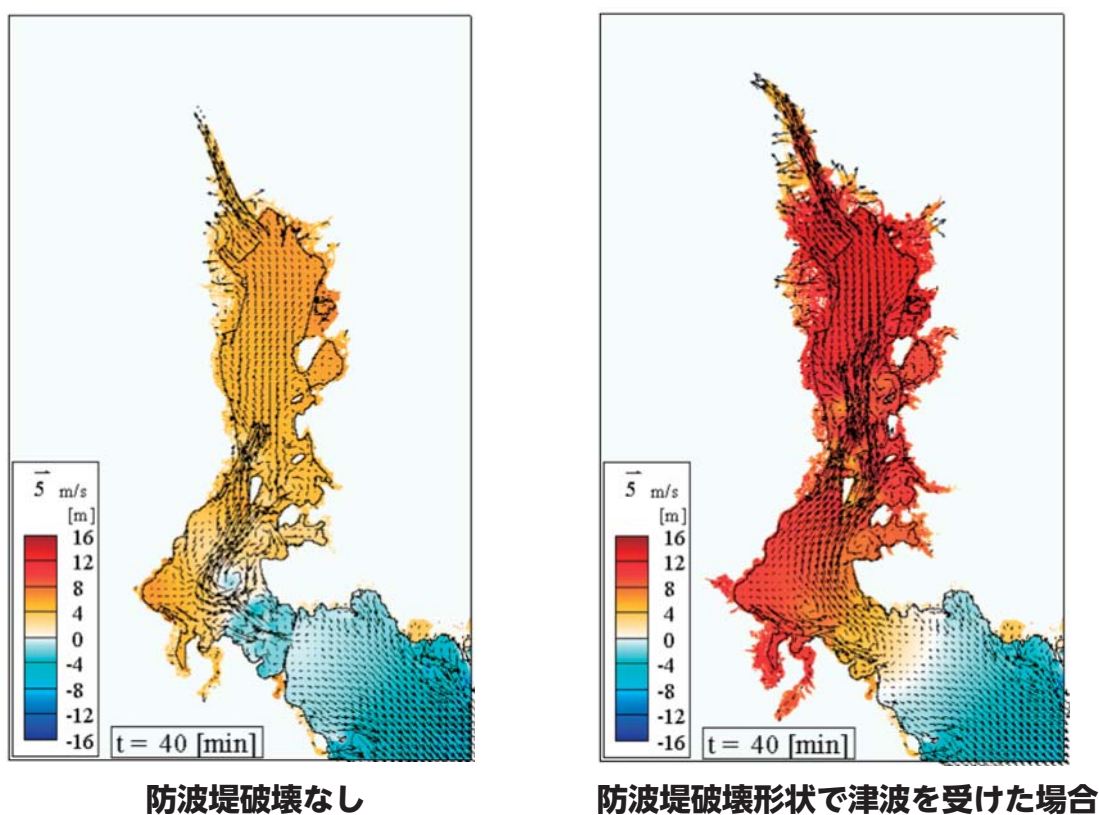
### 1. 大船渡港の最大津波高の分布に見る防波堤の防護効果



撮影されていた画像から津波の第1波ピーク時付近まで防波堤は、保っていたことがわかっています。

防波堤の有無により浸水深さ2m以上の浸水面積280haは破壊時554haとなり、湾奥の港湾背後地において最大浸水は7mから14mに倍増します。また赤枠の実際の浸水区域に比べて破壊時の浸水区域は、河川の遡上域で広がっています。このことから、防波堤が津波によって破壊を受けるまでの間にも、津波の軽減に寄与したことがわかります。

### 2. 大船渡港の津波の流速の計算結果に見る防波堤の防護効果



大船渡港での津波ピークに近い地震発生から40分後の港湾内の流速[→の長さ]をみると、湾奥の河川から街にあふれ出る状況が判別できます。

防波堤有りでは、遡上した津波のほとんどは河川に沿って遡上しており、あふれ出た津波の速度は3m/s程度ですが、破壊時では河川からあふれる量が増え、あふれ出た津波の速度も7m/s程度とかなり速くなっていることがわかります。流速の比較においても、津波の被害軽減に寄与していたと考えられます。

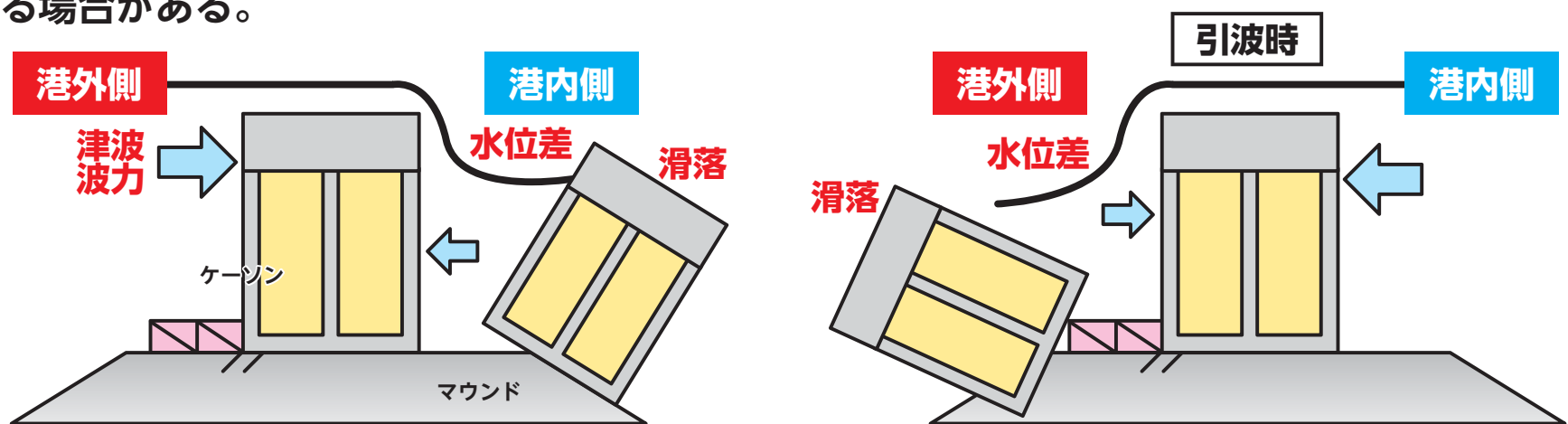
# 探る 津波による防波堤の破壊メカニズム

## 破壊パターンの分類

海底の立体画像、津波シミュレーター、被災状況の動画解析、水中部の詳細調査から防波堤破壊の主な3要因が見いだされ、単独或いは複合で作用し破壊したと考えられます。

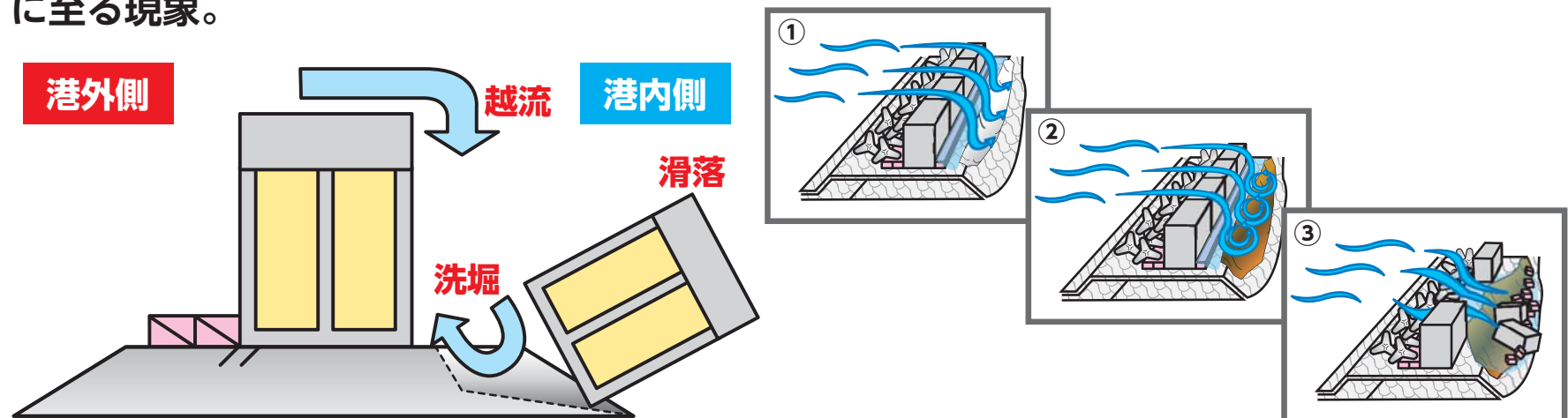
### 1. 津波波力型

設計を越える津波波力の大きさによる滑動。防波堤を越流する津波では浮力の増加による摩擦力の低下と港内で発生する水位差により津波波力が大きくなる。また、港外に飛散する防波堤ケーソンが見受けられ、引き波時の津波波力でのマウンド破壊・滑動が発生する場合があります。



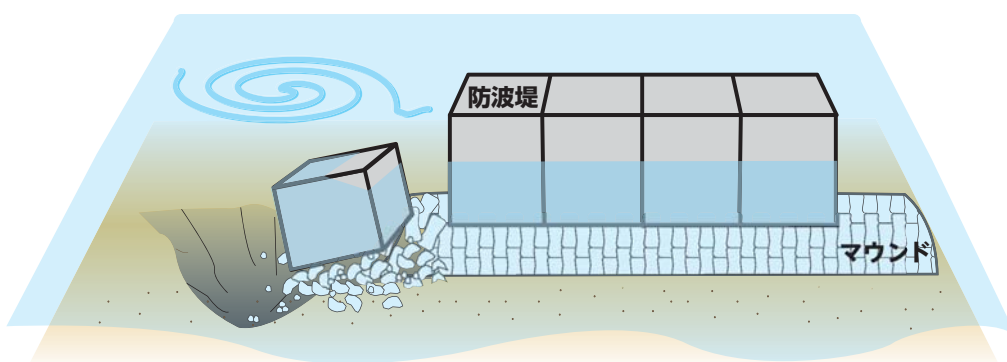
### 2. 越流洗掘型（断面で発生する滝壺のような現象）

津波の水位が防波堤を飲み込むような高さになると、越流した津波が港内側へ滝のように流れ込み、マウンドを構成する基礎石の洗掘がケーソン直下まで進み、ケーソンの倒壊に至る現象。



### 3. 堤頭部洗掘型（平面に発生する津波の流れによる洗掘）

港の防波堤の先端部や狭くなる個所では、津波の流速が速くなったり渦が発生する場合があります。この流速により、マウンドが洗掘されケーソンが倒壊する。



#### 防波堤先端渦の例

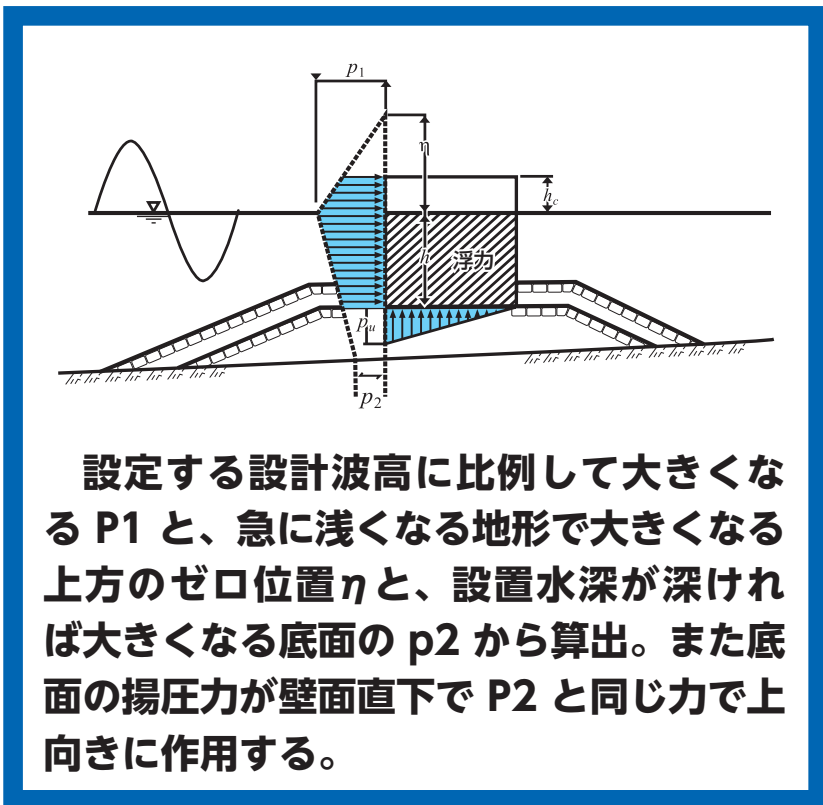


2010.2.28 千利地震津波。50cmの津波高さで宮古港電神崎防波堤で発生した渦



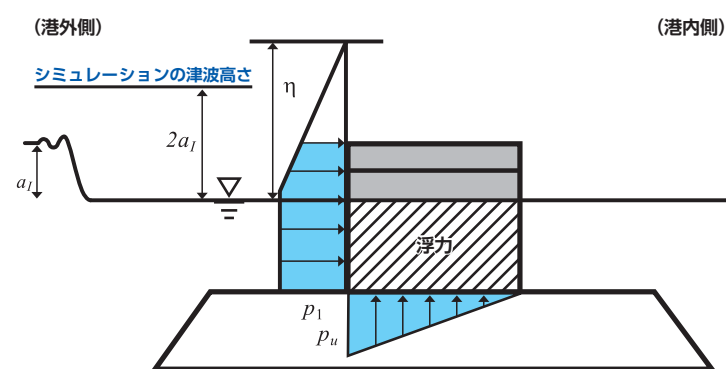
### 防波堤に作用する波浪（通常の波）と津波での波力の違い

防波堤の破壊は、流れによるもののほか、津波の力が設計を上回ったことによるものがありました。波浪（通常の波）と津波の波力のどちらが大きいかは防波堤の設置位置により異なります。通常の波浪の波力の考え方と比較することにより、津波の波力の特徴を見てみます。



#### 1. 従来の津波波力（谷本式）

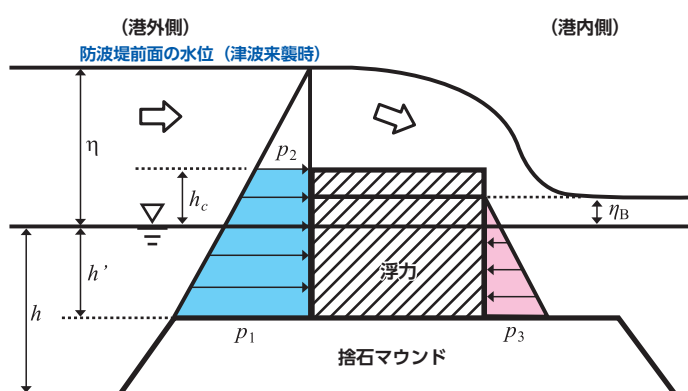
静水圧で算出。 $P_1$  は、津波の高さに海水の単体重量  $\times 2.2$  が底面まで一定に（港内からの水圧の差引き）作用し、上方の  $\eta$  を  $a_1 \times 3$  として算出。 $P_u$  は底面の揚圧力壁面直下で  $P_1$  と同じ力で上向きに作用する。現時点では、段波、越流状態を除く津波に適用。



#### 3. 越流状態の津波波力

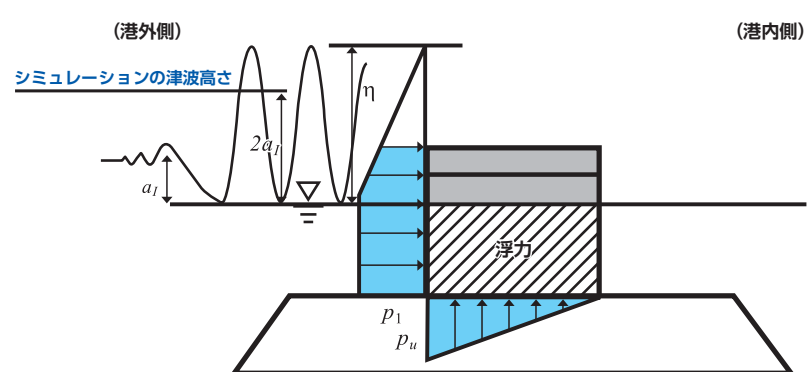
（静水圧差による算定式）

東日本大震災で明らかになった現象。越流が発生すると港外と港内の水位差が大きくなる。水理模型実験による結果により、現時点では、前面では 1.05 倍、背面では 0.9 倍した静水圧を用いて算出する。浮力は全断面に作用するが、揚圧力は働かない。



#### 2. 段波状態の津波波力（修正谷本式）

海底が緩やかに浅くなる地形では、津波が複数の波に分裂する。この場合の衝撃段波波力が極めて大きな値となる。1983 年の日本海中部沖地震津波の現象をもとに対応。谷本式の  $P_1$  の係数 2.2 を 3.0 に置き換えた。



釜石湾口防波堤を例に、通常の波浪、従前の津波、東日本大震災の津波での力の違いを、安全率（滑動）の比較で示します。

波力の違いは、実際には条件によって、かなり異なります。

	波 浪	明治、昭和津波	東日本大震災
安全率	1.3	1.8	1.0
外力条件	波高 13m、周期 13 秒	津波高 5.6m	津波高 12.4m



# 挑む 巨大地震・津波への挑戦

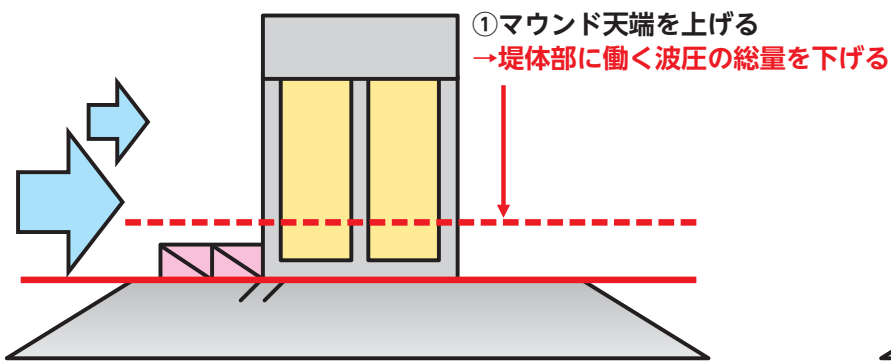
## 粘り強い防波堤へ挑む

破壊した防波堤であっても津波低減効果がありました。更に低減効果を増すため、設計を越えた津波でも破壊しにくい工夫の数々から実用化を進め「粘り強い」構造をめざします。また、復旧に長い期間がかかる防波堤が粘り強い構造をもつことにより、復興期の静穏度確保にも寄与します。

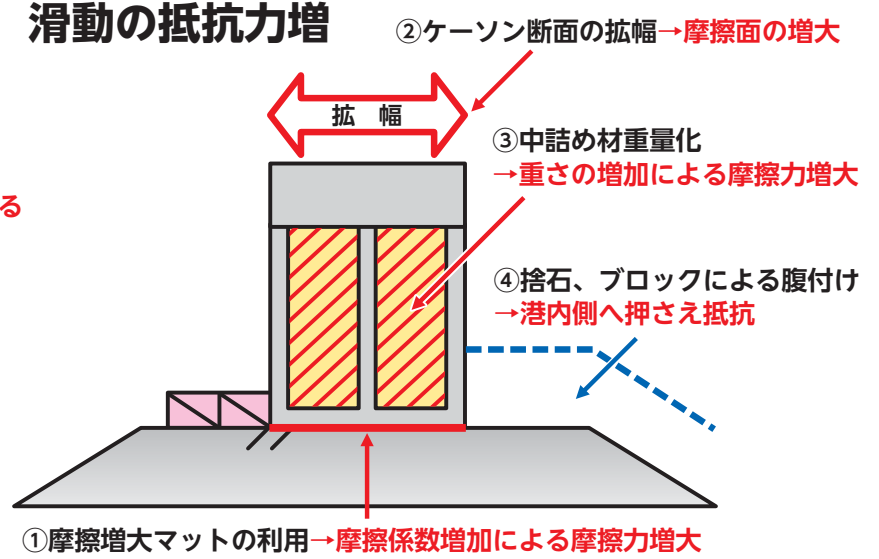


越流対策の水槽模型実験

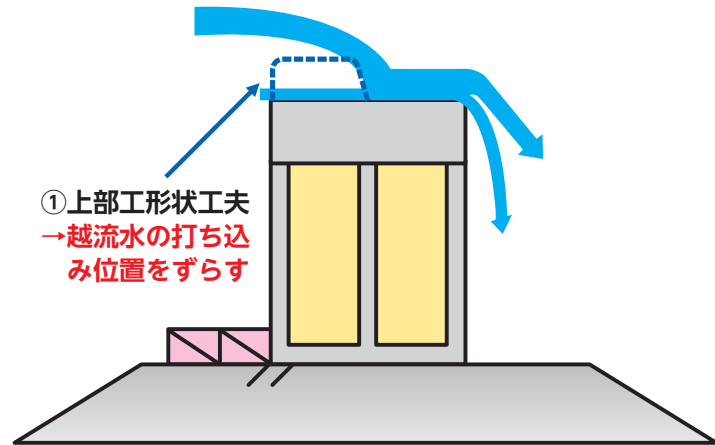
### 1. 津波波力型破壊への工夫 作用する水位差を低減



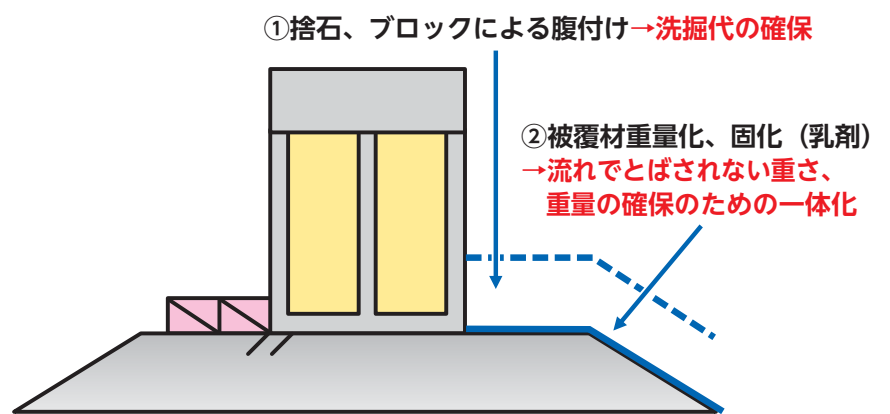
### 滑動の抵抗力増



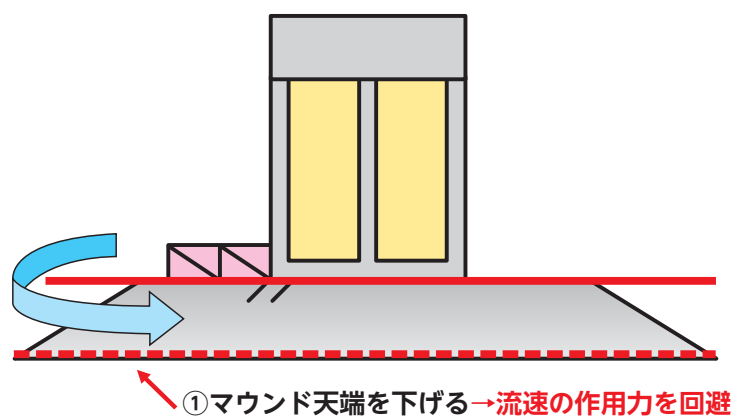
### 2. 越流洗掘型破壊への工夫 越流の洗掘作用の低減



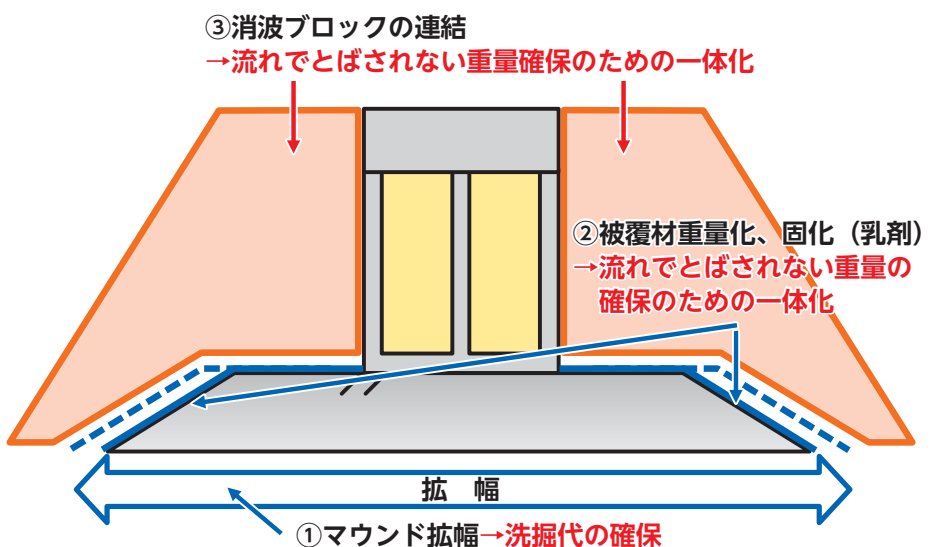
### 洗掘の倒壊への防護



### 3. 堤頭部洗掘型破壊への工夫 津波流速の回避



### 洗掘の倒壊への防護策



「東北港湾における津波・震災技術検討委員会」より



# 活かす 進む震災ガレキの再利用

## 震災ガレキの港湾復旧工事への利用

震災ガレキの処分は、時間と経費がかかります。一方、工事では資材の不足が問題となっています。港湾工事でも復興資材としての再利用を積極的に進めています。

### 1. 津波堆積土砂の活用



津波堆積土砂 2次ふるい分け後の土砂

八戸港では、八戸市内の津波堆積土砂約 2.4 万 m<sup>3</sup>のうち、約 1.8 万 m<sup>3</sup>を復旧する防波堤の中詰め材に使用しています。津波堆積土砂のふるい分けを八戸市が行い、他の材料と混ぜて重量を重くしての中詰め施工を港湾の復旧工事で行います。



1次ふるい分けのゴミ



2次ふるい分けのゴミなど

### 2. 港湾の復旧工事で発生するコンクリート殻の再利用



スーパーヘビー級グラブバケットによる破碎（八戸港）

港で倒壊した古い防波堤の撤去に伴って、コンクリート殻が発生しますが、小割後に鉄筋と分別し、新たに復旧する防波堤の中詰め材として利用しています。



45 t 級碎岩棒による破碎（八戸港）



破碎殻の陸上仮置（相馬港）



2次破碎・分別（釜石港）



最終破碎（宮古港）



新規の防波堤への中詰め（宮古港）

港湾の復旧工事では発生するコンクリート殻を中詰め材に活用し震災ガレキの処分量を抑えています。更に今、新たなコンクリート殻を活用する技術を募集し、実用化に向けた試験施工を実施することとしています。



# 備える 緊急物資受入れの第一歩。液状化対策

地震後の緊急物資輸送、救命活動を受け入れる空港と港湾には、緊急物資輸送に支障がない程度に施設の変形をとどめる必要があります。

そのためには、地盤の液状化を防止することが有効であり、液状化対策により不同沈下や岸壁の損傷を押さえることができます。空港や港湾では、必要な施設の液状化対策を進めています。

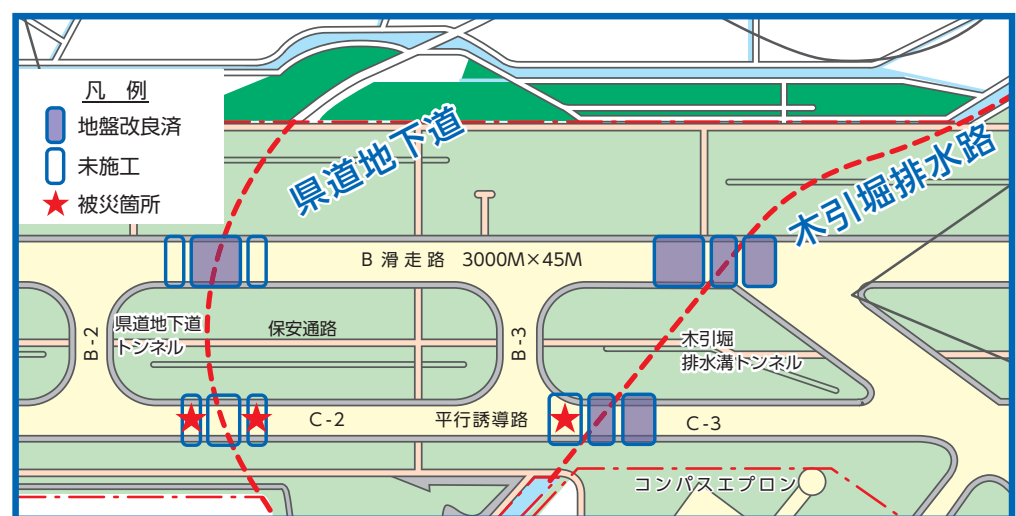
## 1. 空港での液状化対策

仙台空港は、大規模災害時における緊急輸送・復旧支援拠点空港と航空ネットワークとして重要な全国 13 空港の一つとして位置づけられています。

そのため、液状化が予想される個所について順次対策工を施工しています。地震時には対策工未実施の誘導路に液状化による浮上がりや沈下が発生しましたが、対策工済みの個所での被害は見られませんでした。

対策未施工の区域と被災個所を右図に示します。

仙台空港では、地下構造物との境界部分が液状化による沈下の発生しやすい個所となります。



液状化対策未施工（誘導路）沈下あり



液状化対策施工（滑走路）被害なし

## 2. 港湾での液状化対策

港湾では、大規模地震が発災した際に、発災直後から緊急物資等の輸送や、経済活動の確保を目的に、液状化対策により耐震性を強化した耐震強化岸壁の工事を進めています。東北地方では 11 の岸壁で液状化対策が済み、現在は 3 の岸壁で対策工の施工を進めているところです。