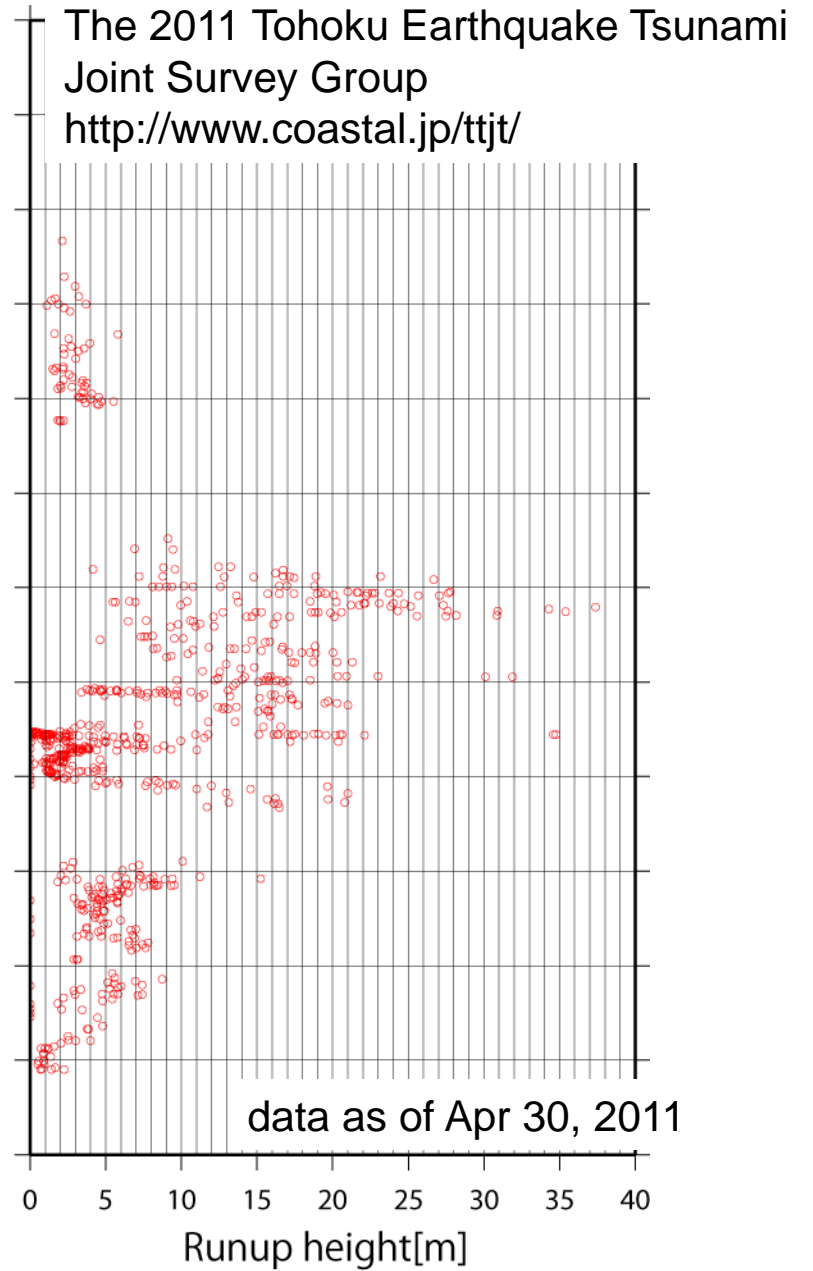
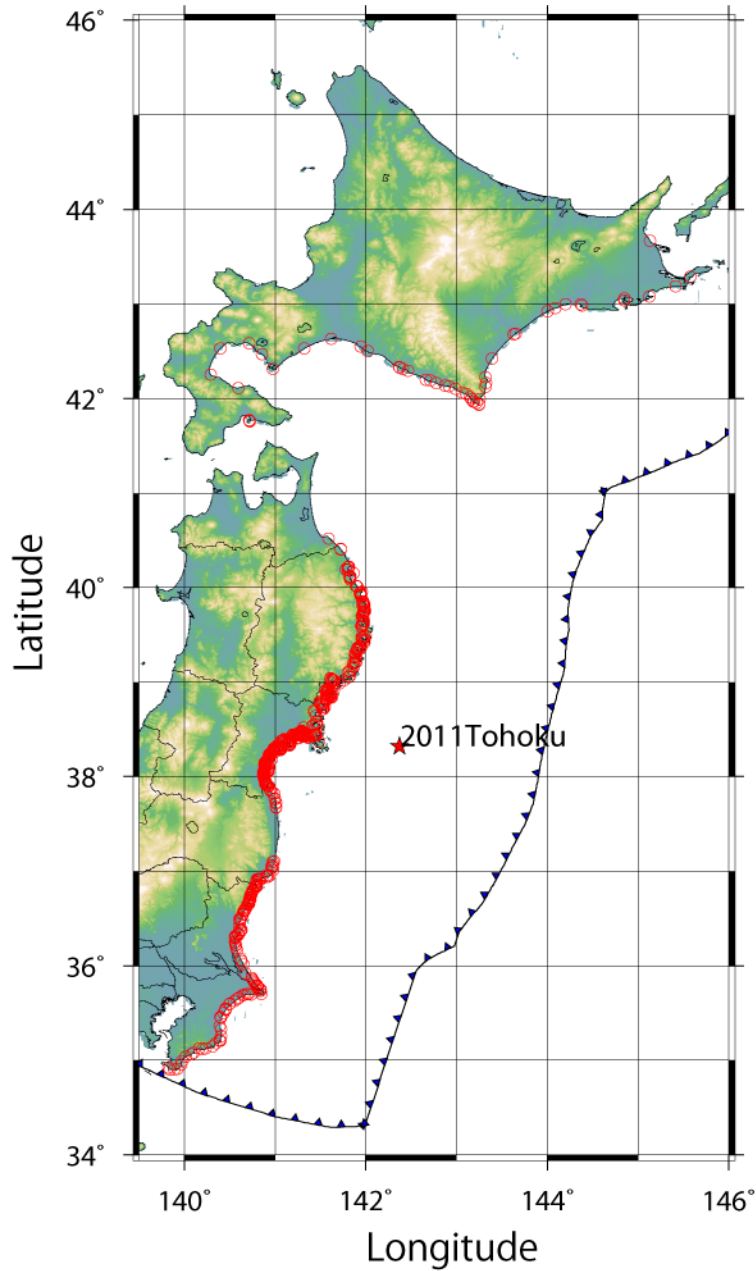


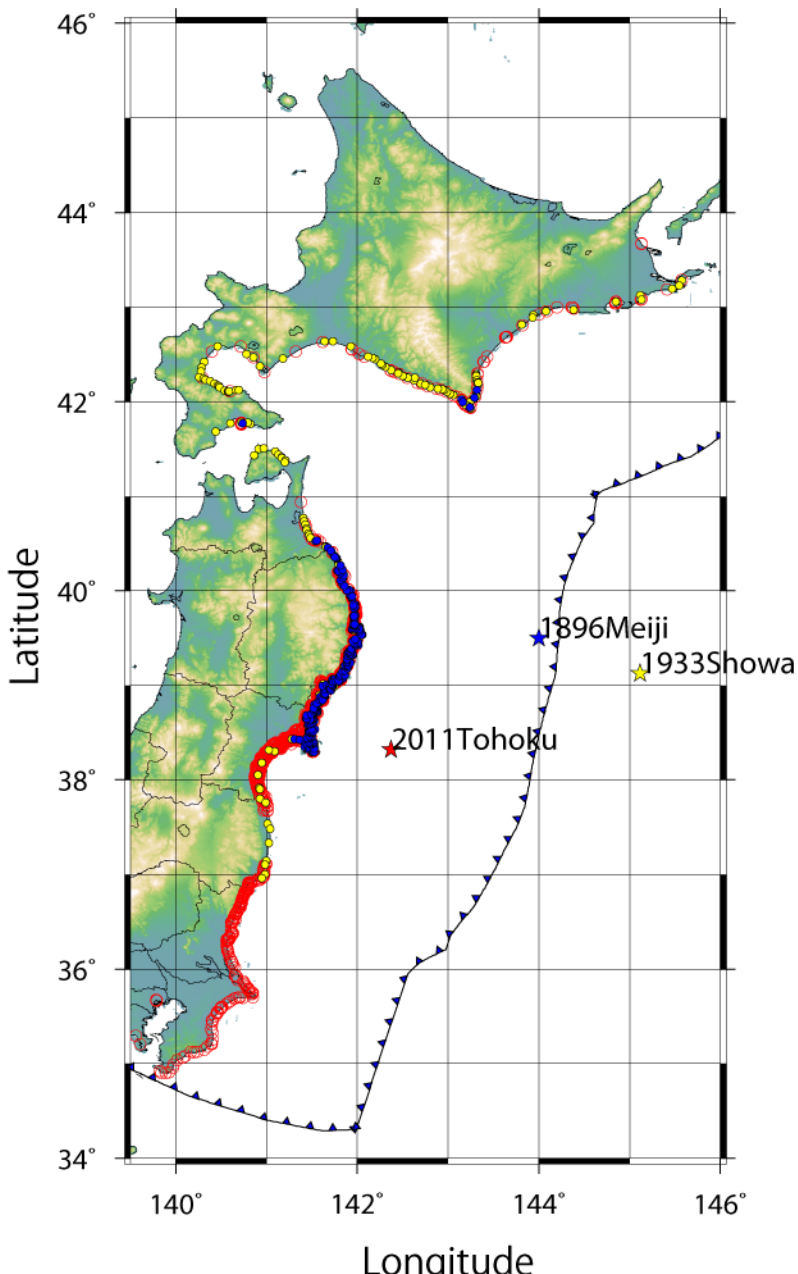
防波堤・防潮堤の被災メカニズムとその効果について

港湾空港技術研究所

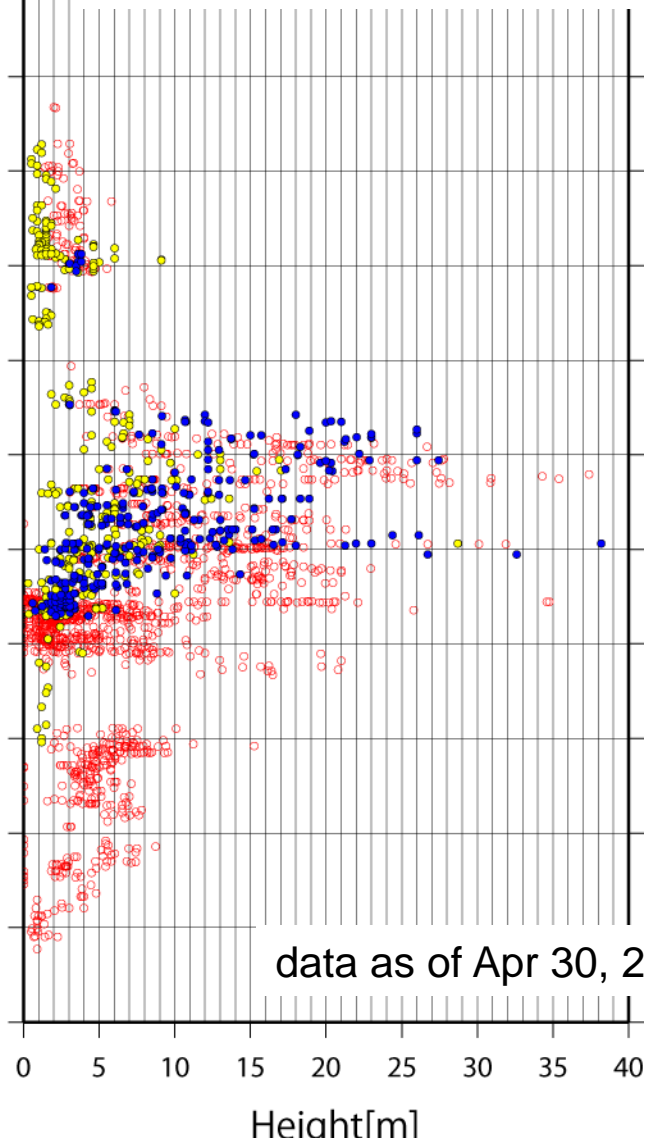
有川太郎



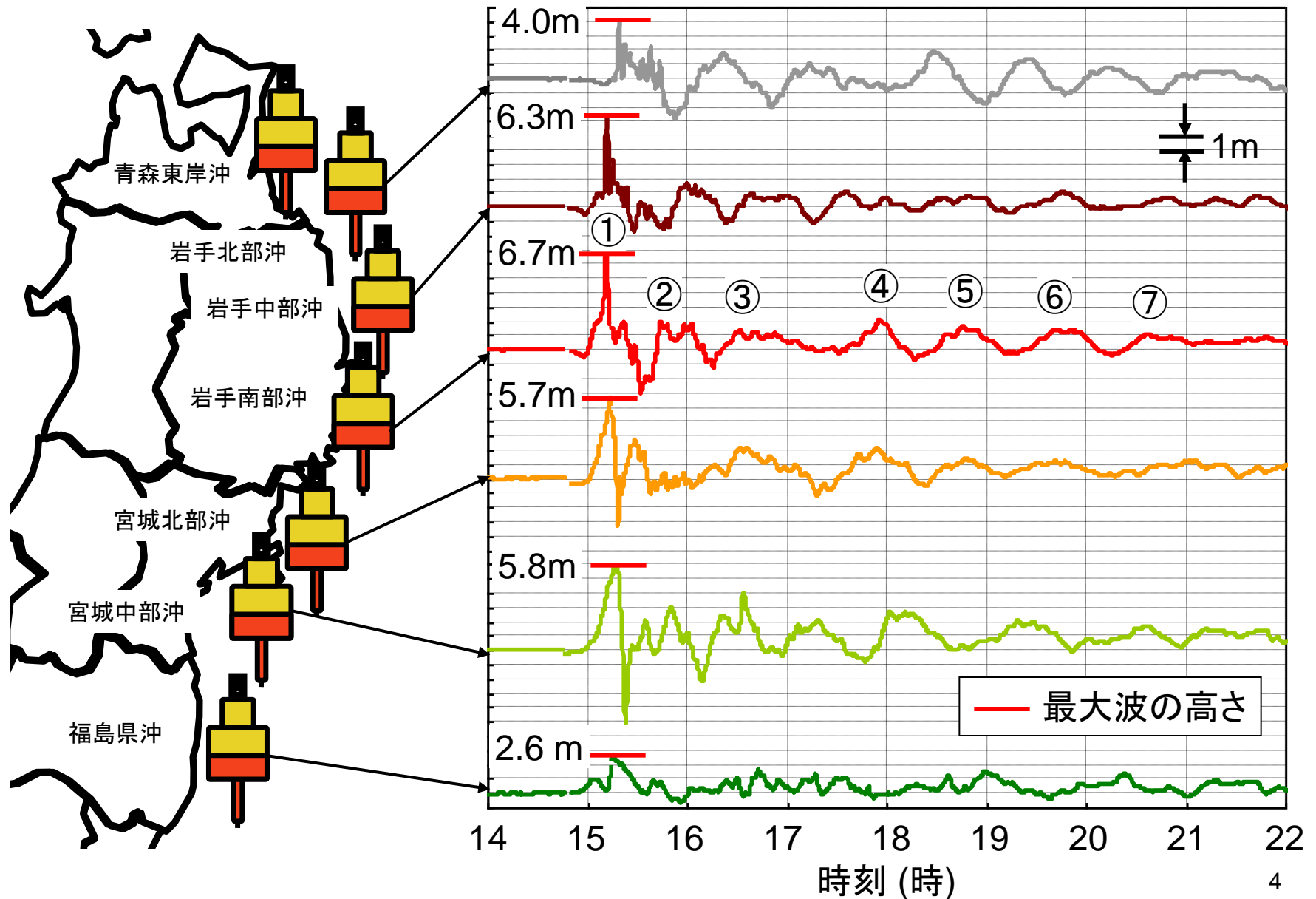
過去の津波との比較



The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami
Joint Survey Group
<http://www.coastal.jp/ttjt/>



GPS波浪計による観測値



碎波段波(岩手県久慈)

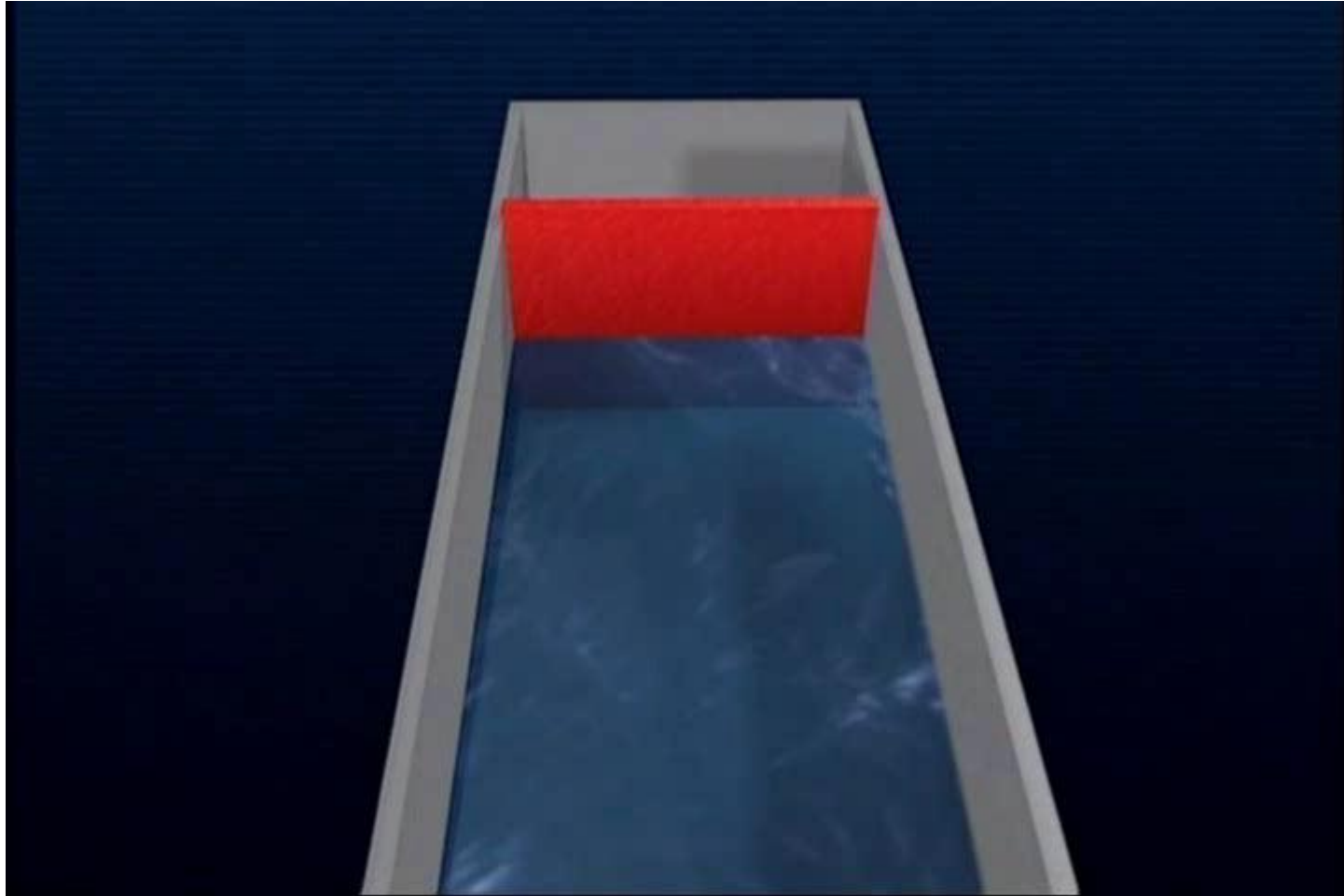


NHK Special TV program 07/May/2011
Taken by Resident





津波の作り方



コンクリート壁

壁厚 6.0cm

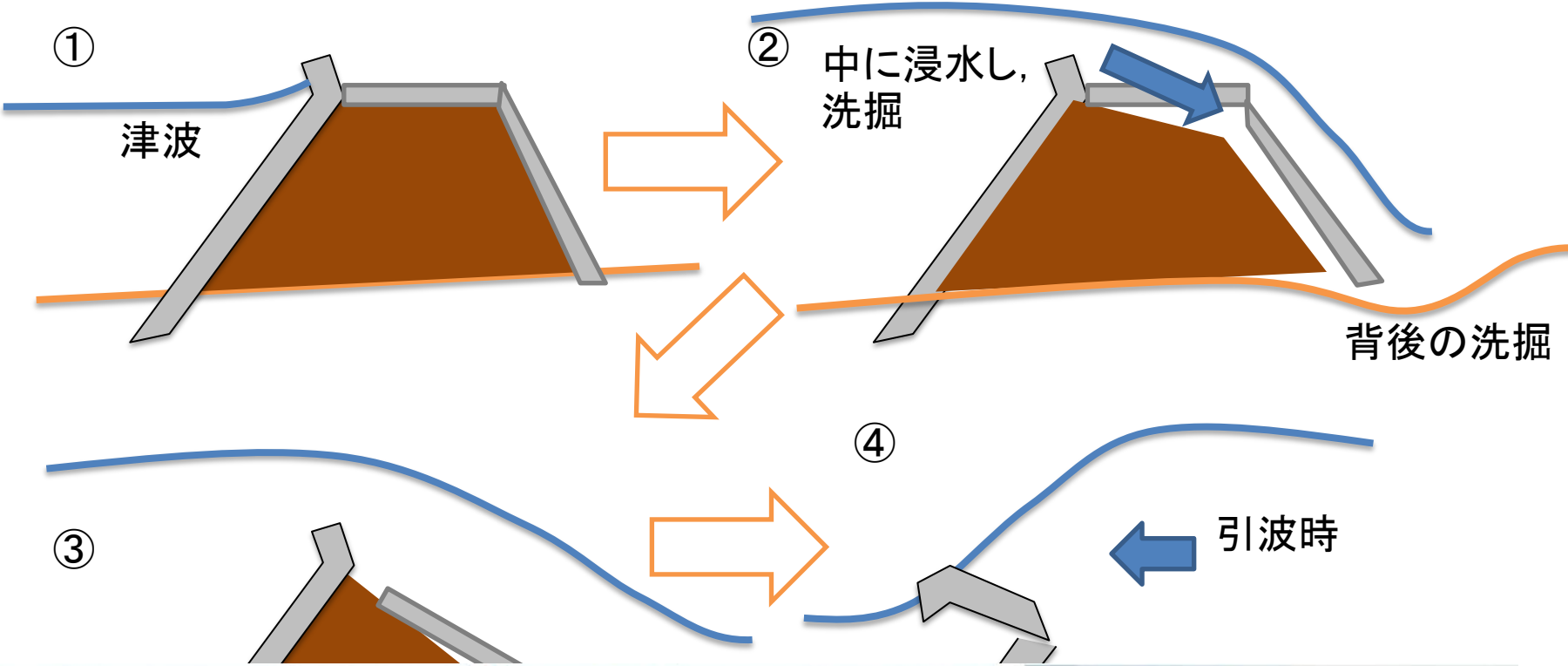


防潮堤被害(田老)



傾斜式

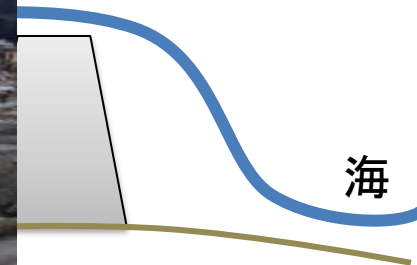
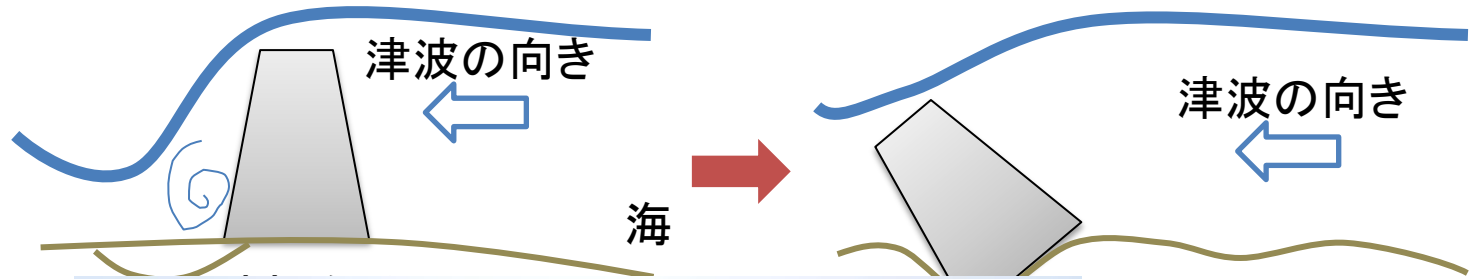
防潮堤





防潮堤

直立式

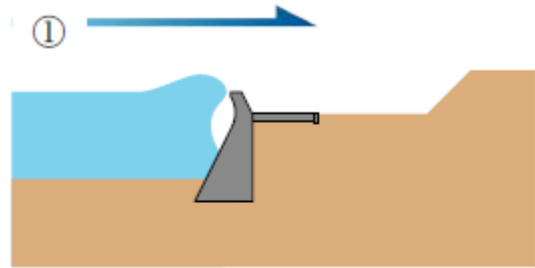


引波時

大槌町の防潮堤

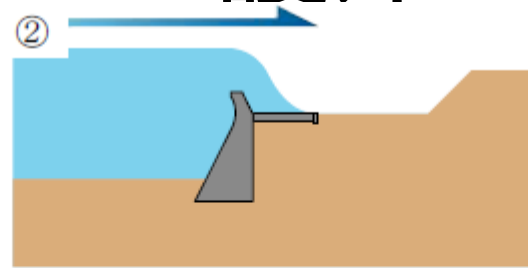
護岸

直立式



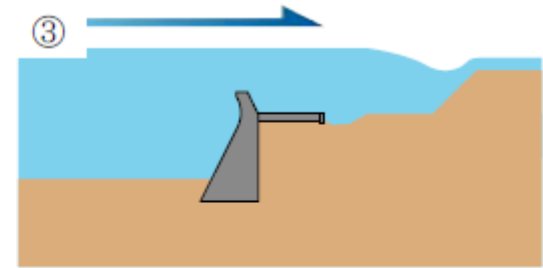
①

津波が到達（押し波）



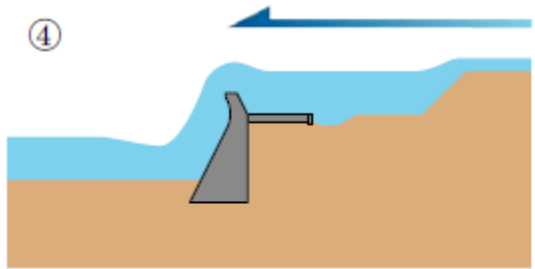
②

護岸天端を越流



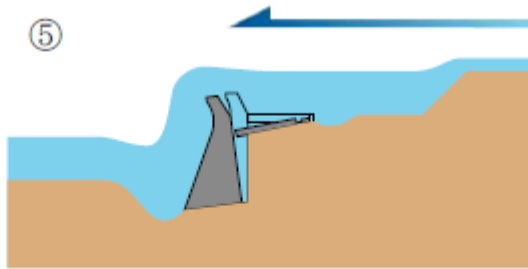
③

越流した津波が護岸背後へ達するが、本体は健全（背後地盤浸食の可能性はあり）



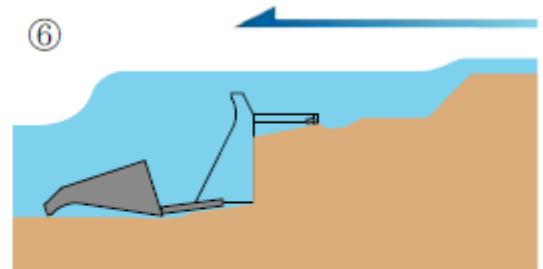
④

護岸背後に津波の引き波が到達



⑤

越流で堤脚部に洗掘が発生、引き波がパラペットを押し、護岸本体が転倒、天端工破損



⑥

護岸が倒壊、背後地盤も浸食



大槌町吉里吉里



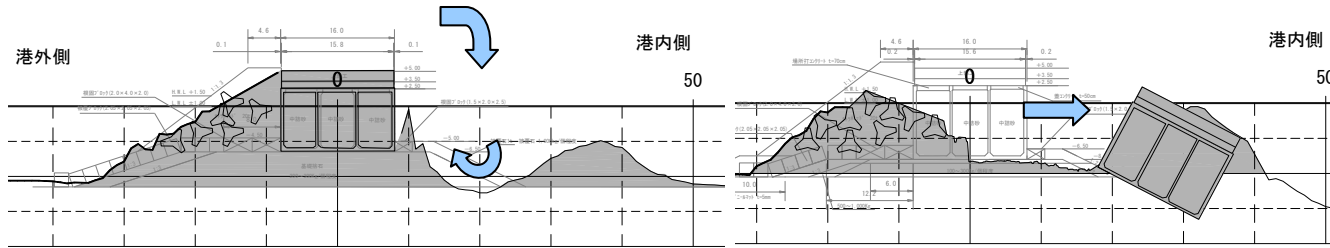
大槌町吉里吉里



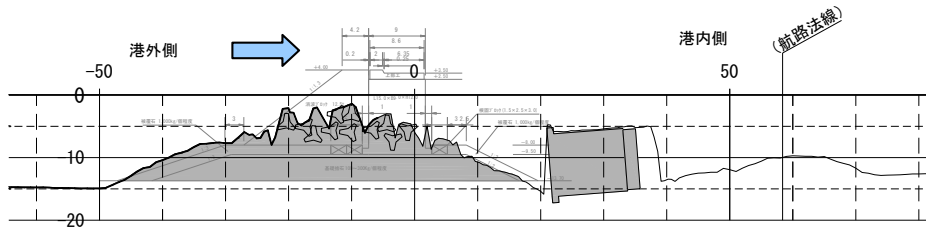
大槌町吉里吉里

防波堤

越流洗掘型



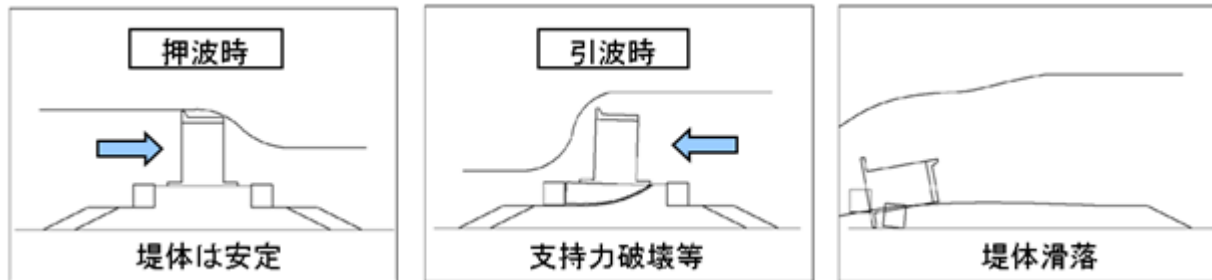
津波波力型(主に港内外の水位差による)



堤頭部洗掘型



引波水位差型



主な被災施設

八戸港八太郎防波堤
(中央部)

八戸港八太郎防波堤
(ハネ部)

釜石港湾口防波堤(北)

大船渡港湾口防波堤

相馬港沖防波堤

宮古港竜神崎防波堤

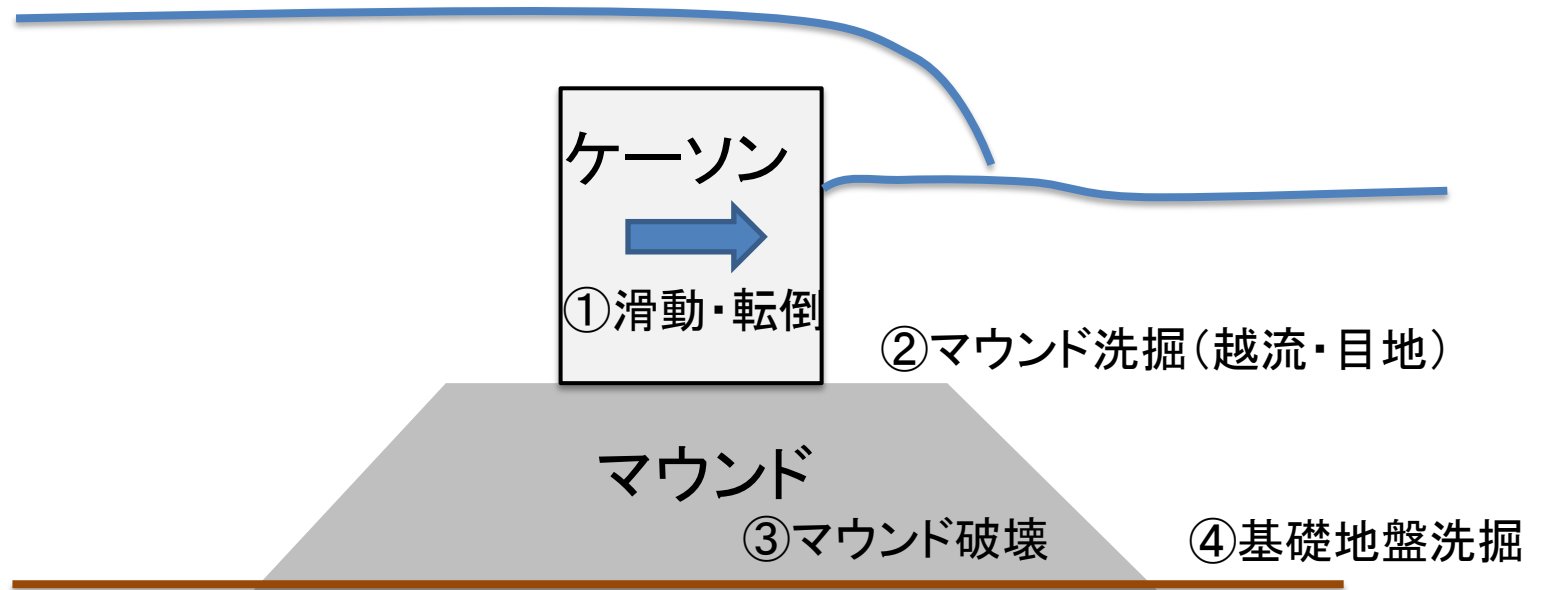
宮古港藤原防波堤

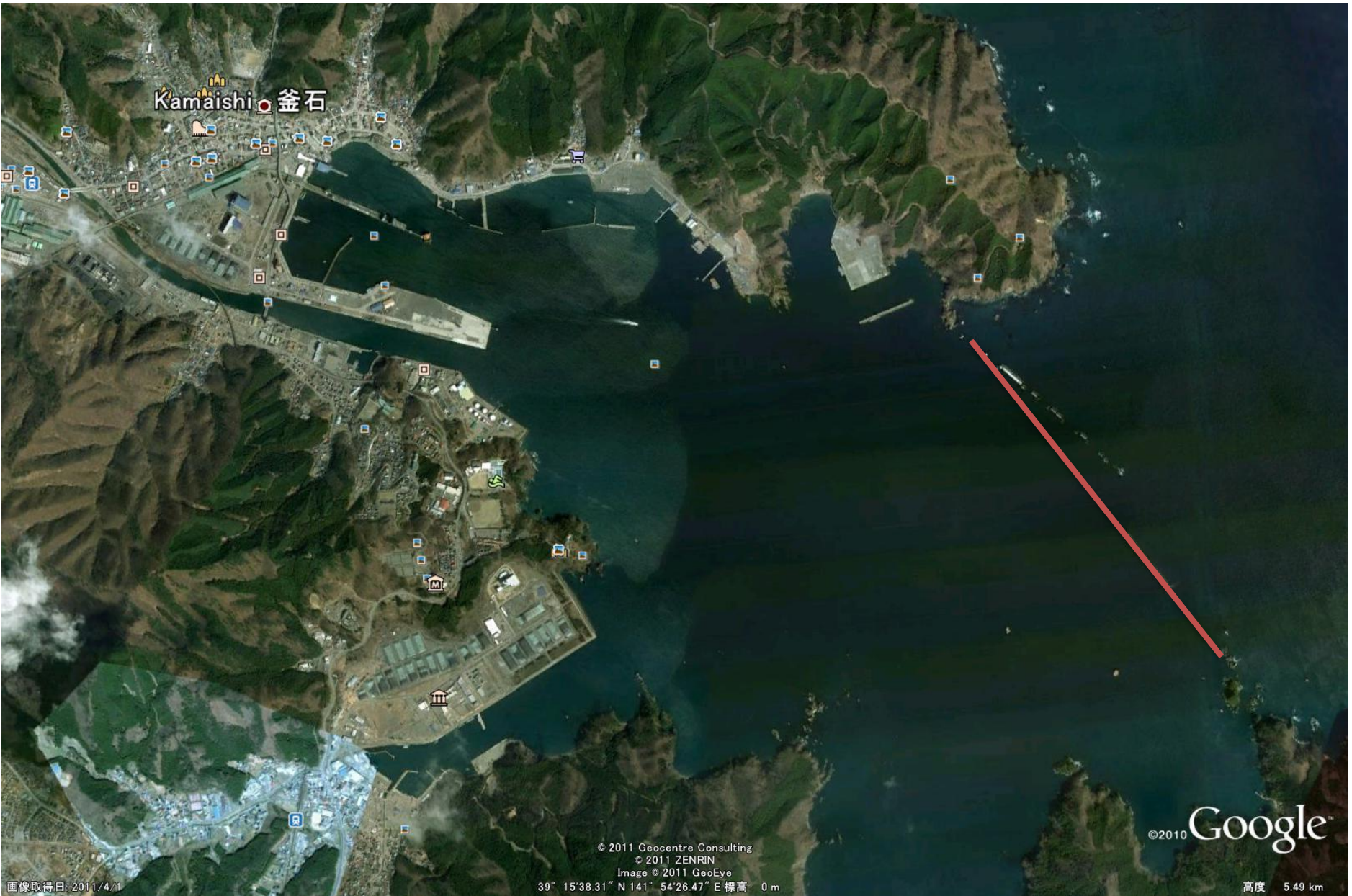
八戸港中央防波堤

八戸港第二中央防波堤

女川港防波堤

防波堤の津波による被災メカニズムについて





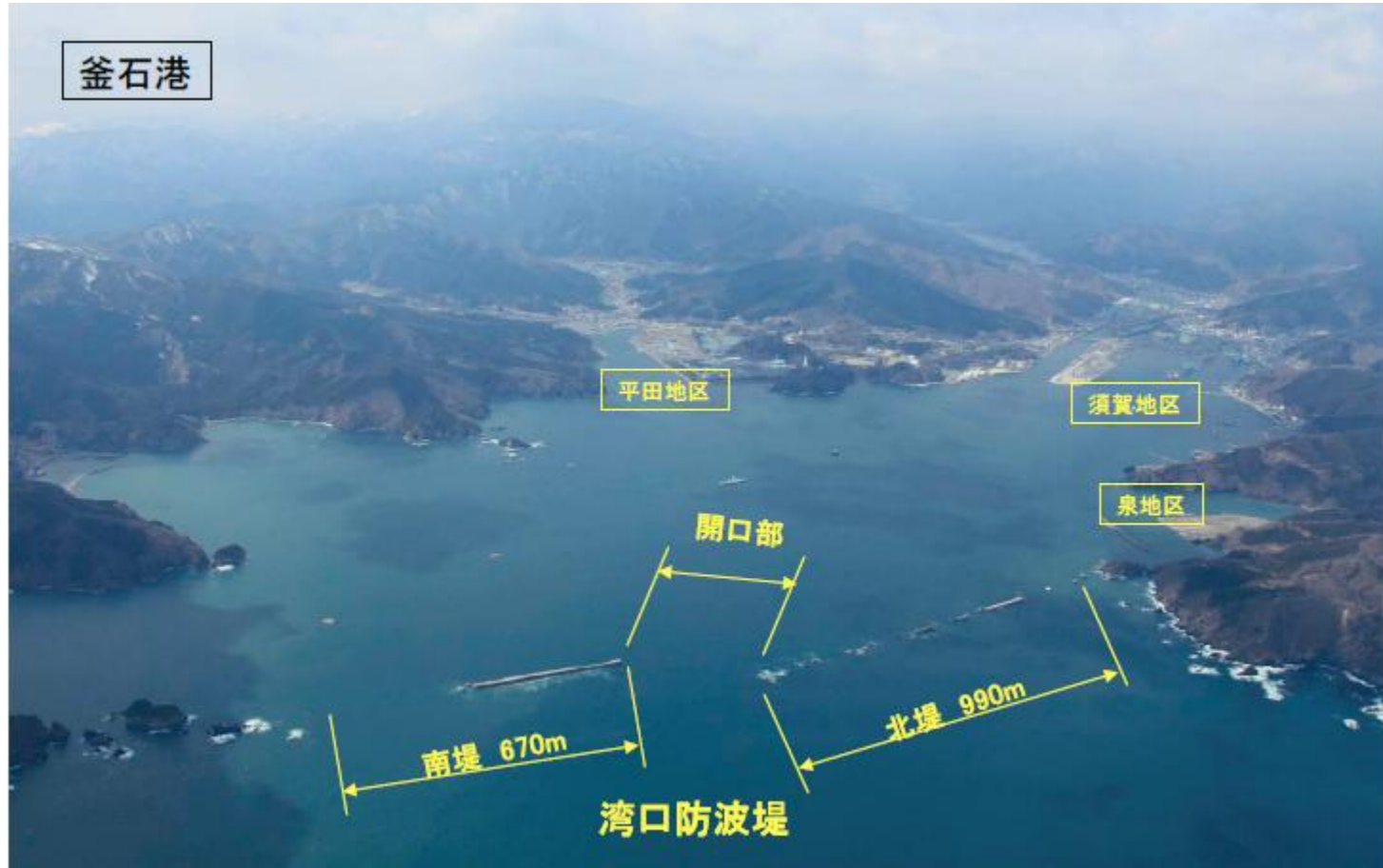
画像取得日: 2011/4/1

© 2011 Geocentre Consulting
© 2011 ZENRIN
Image © 2011 GeoEye
39° 15'38.31" N 141° 54'26.47" E 標高 0 m

©2010 Google™

高度 5.49 km

釜石湾口防波堤



防波堤被害

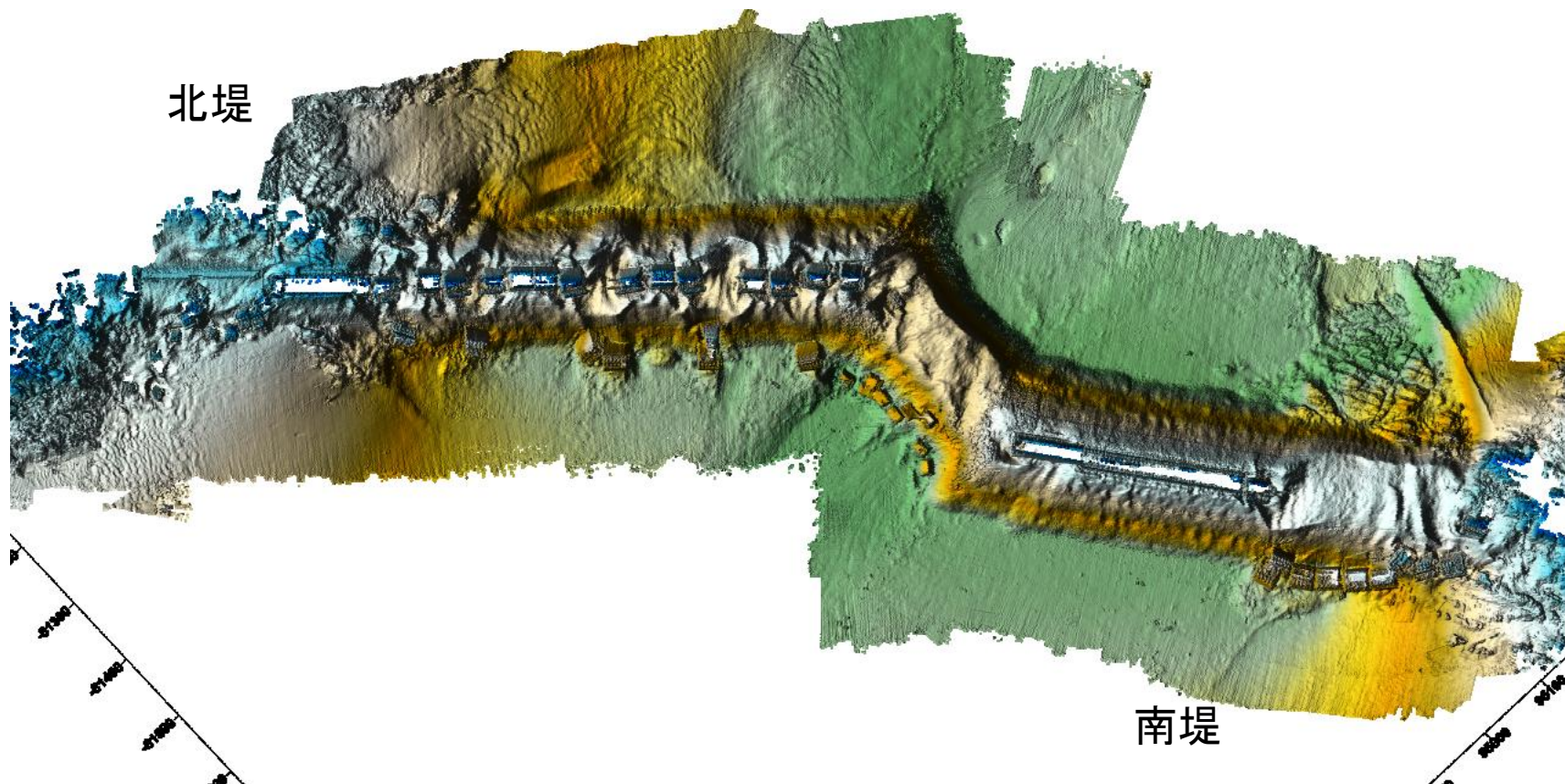
釜石湾口防波堤の被害
2011年3月18日撮影港空研



被災状況(ナローマルチビーム)

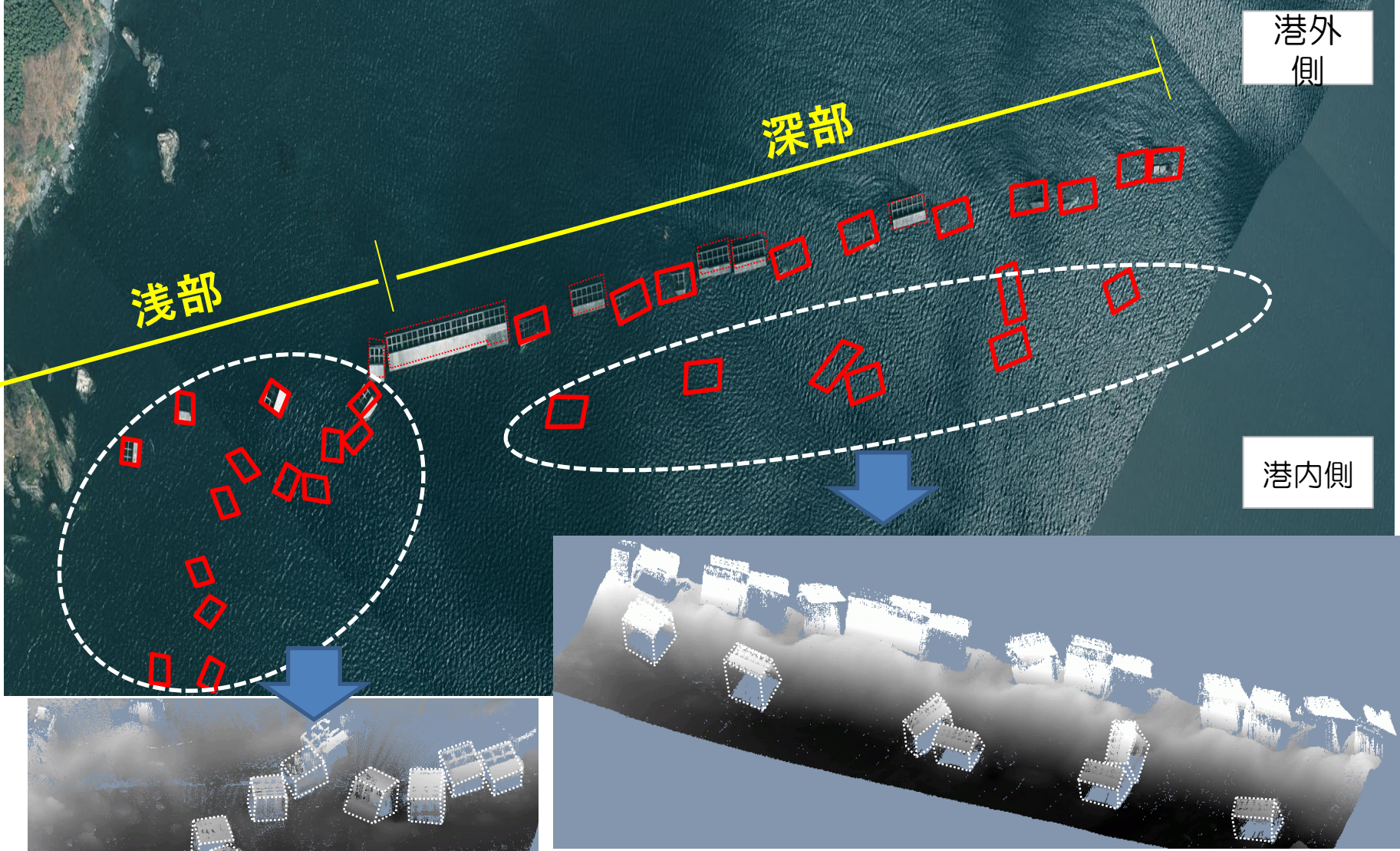
東北地整

2011年3月25日, スケール1/500



釜石港湾口防波堤 被災状況【北堤】

北堤では浅部がほぼ全壊(散乱)、深部がケーソン(堤体)の滑落と残存による歯抜けの状態となっている



港外側

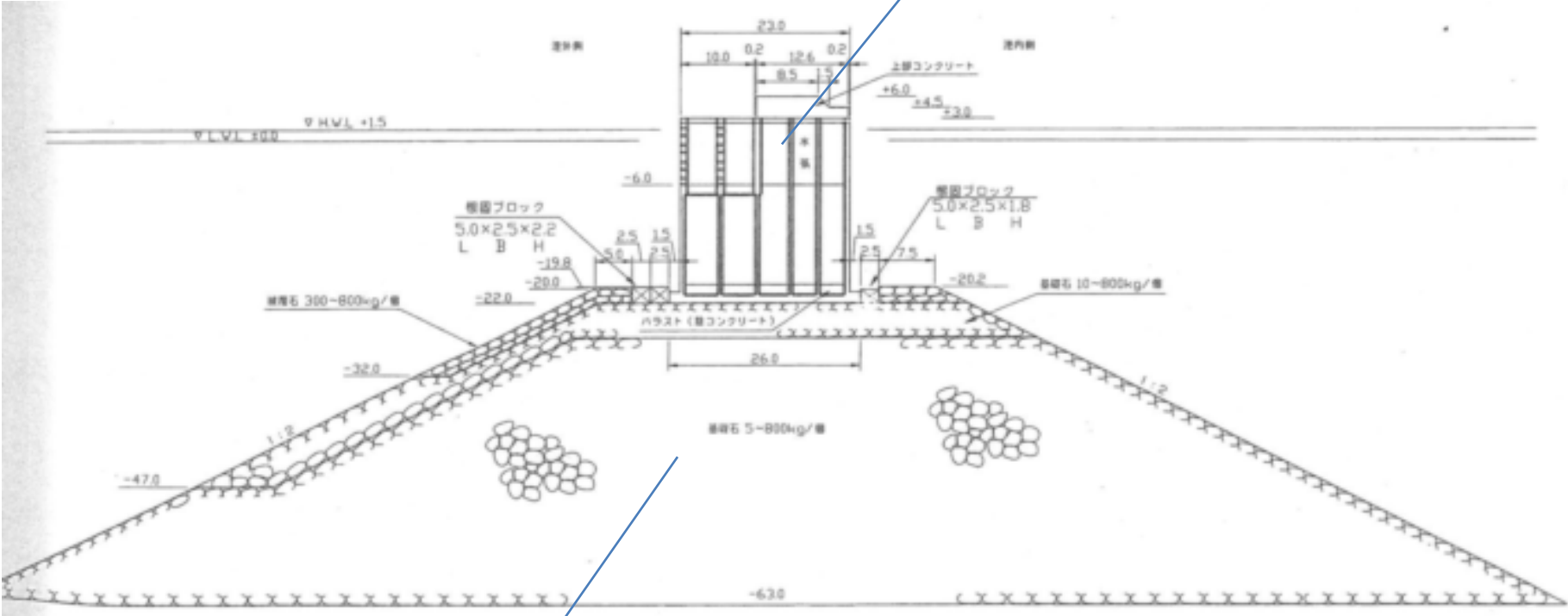
浅部

深部

港内側

東北地整

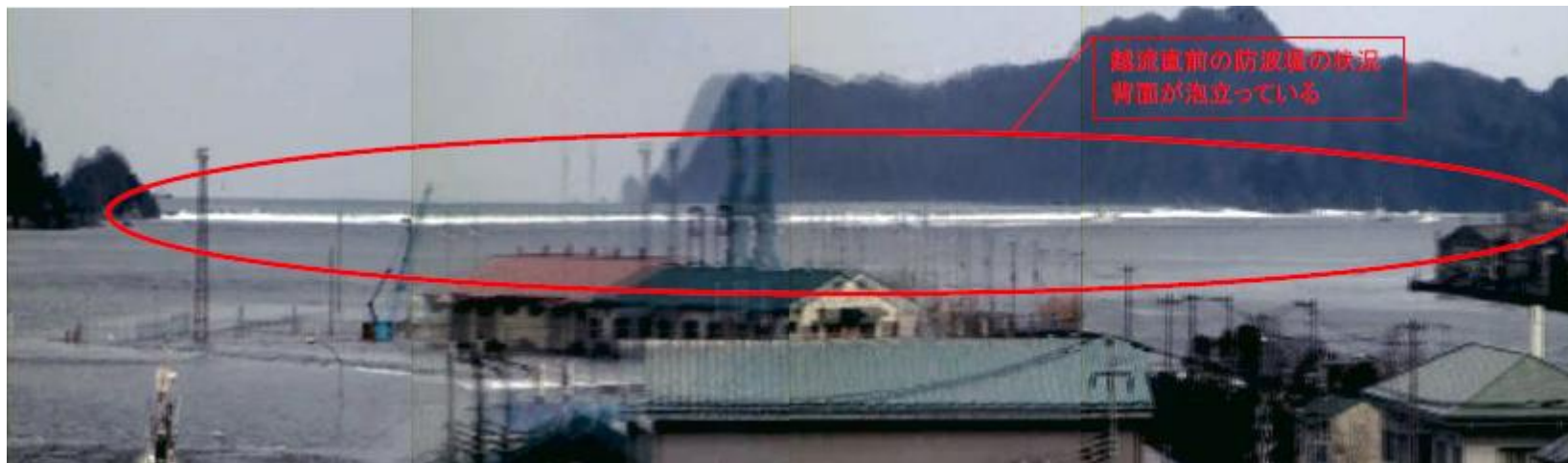
ケーソン(コンクリートの箱)



捨石(大きな石)

ビデオから

第1波押波時(15:18)

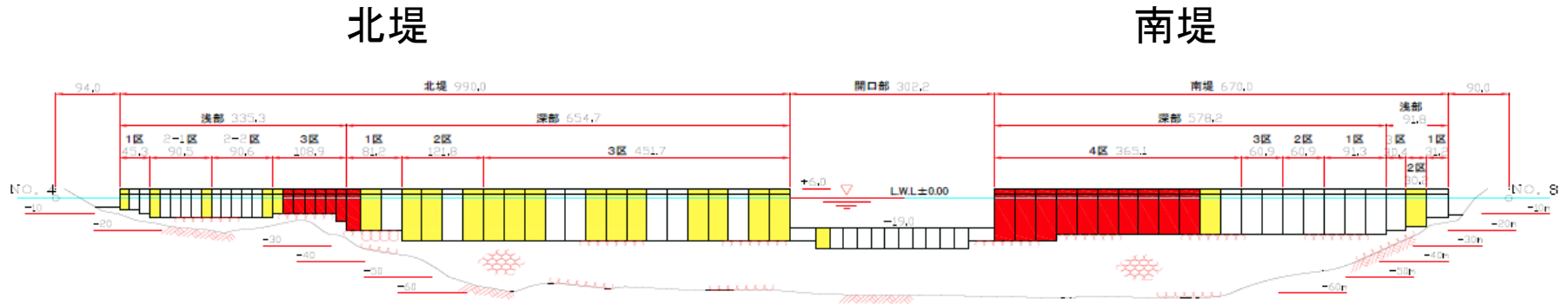


第1波引波時(15:28)



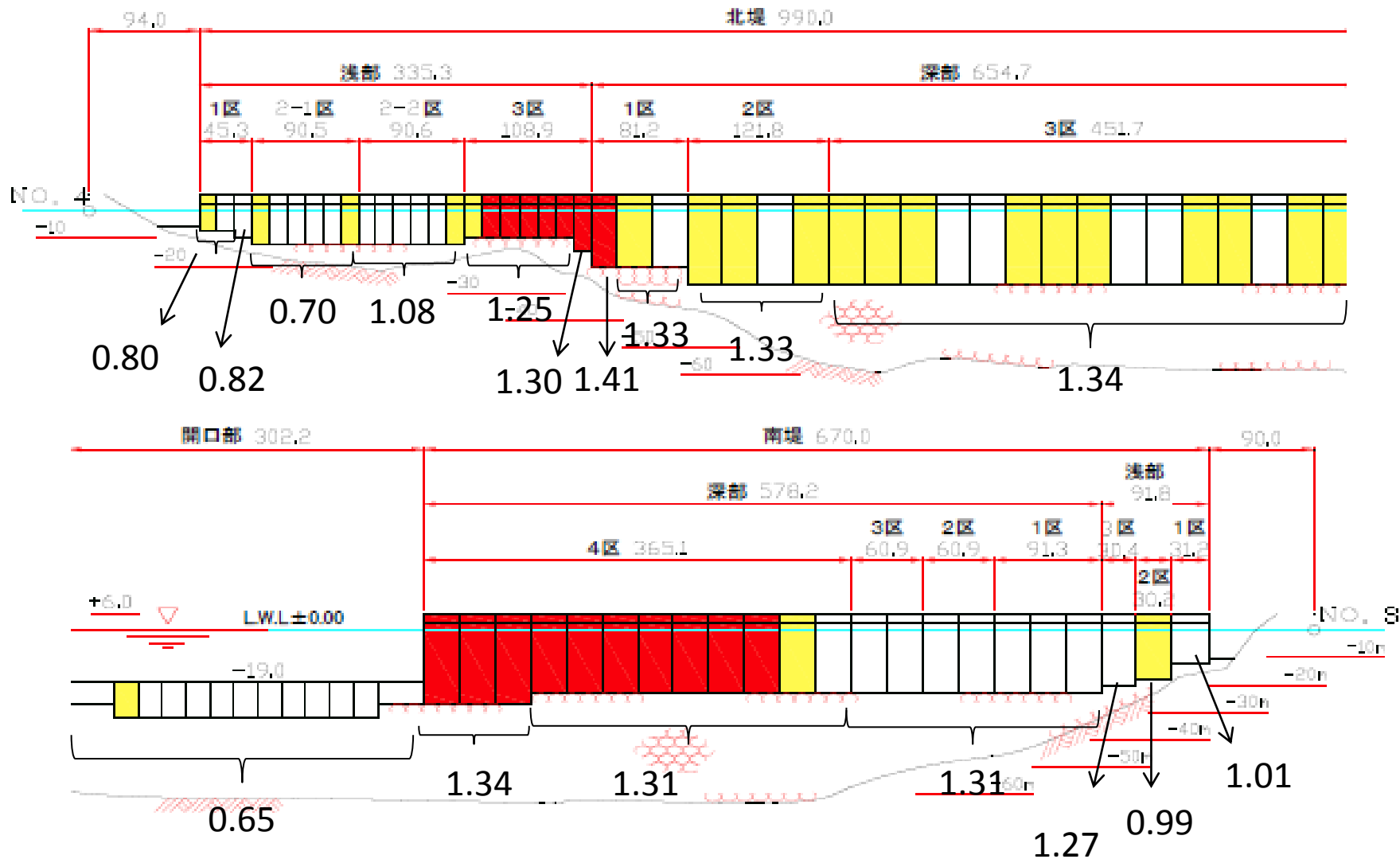
滑動の様子

東北地整



- 白色・・・滑動
- 黄色・・・傾斜
- 赤色・・・被災なし

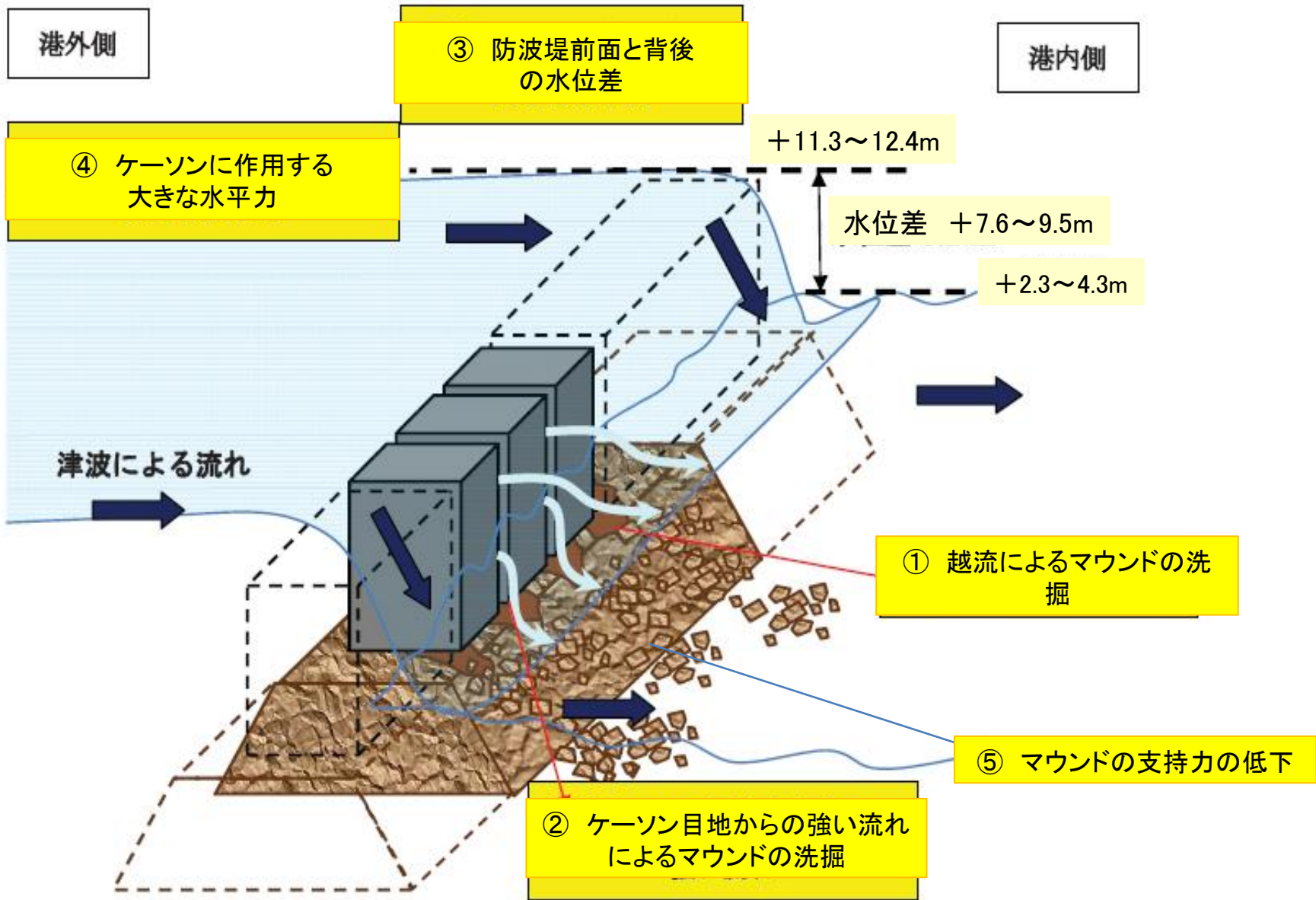
滑動安全率の検討



- ・4月1日のSTOCの計算結果を使用，堤内外水位差を8.27mとする条件で計算
- ・開口部は，流速10.5m/sで計算

釜石港湾口防波堤 考えられる被災原因

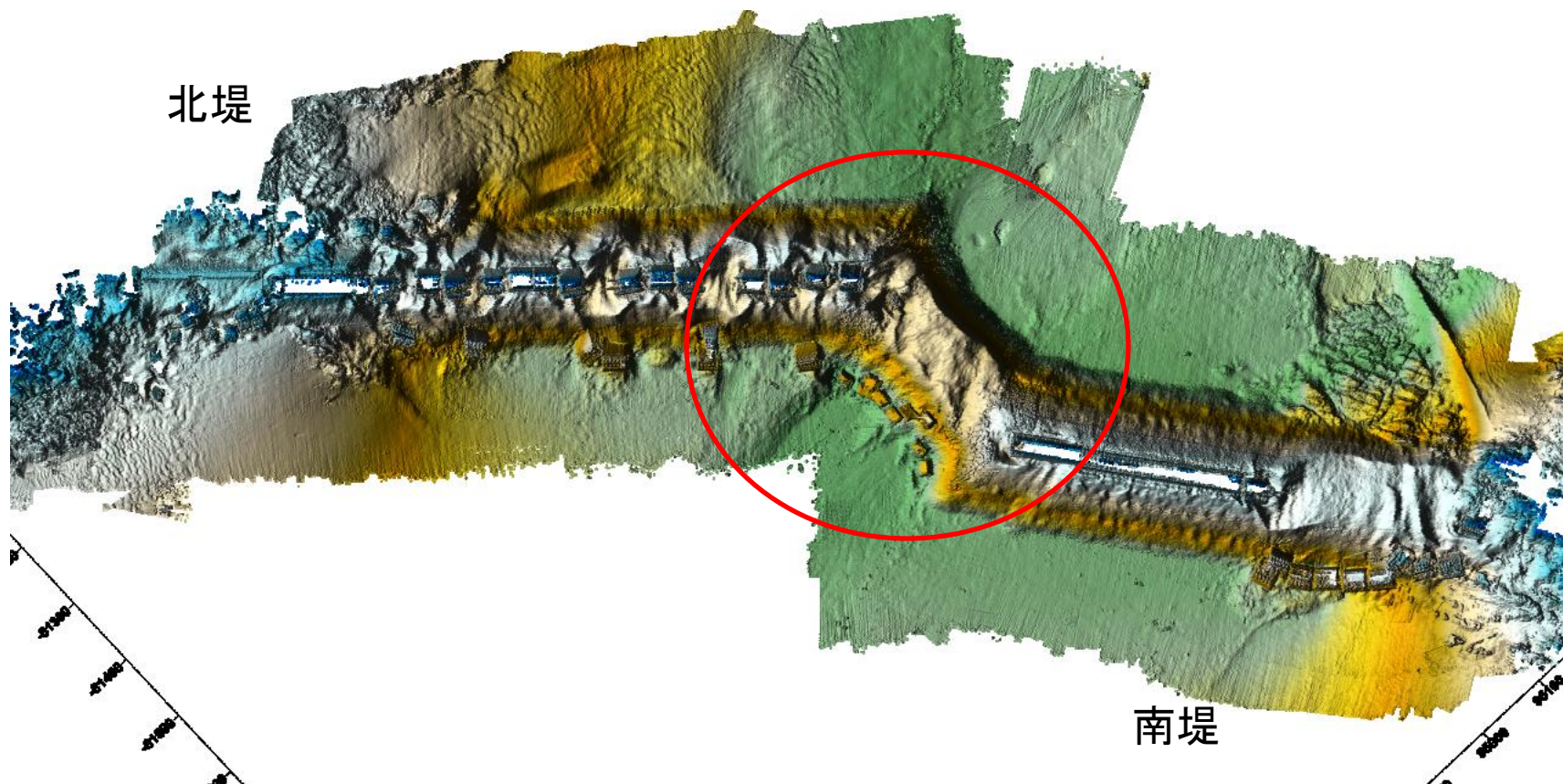
想定される被災要因は主に5つ。



被災状況(ナローマルチビーム)

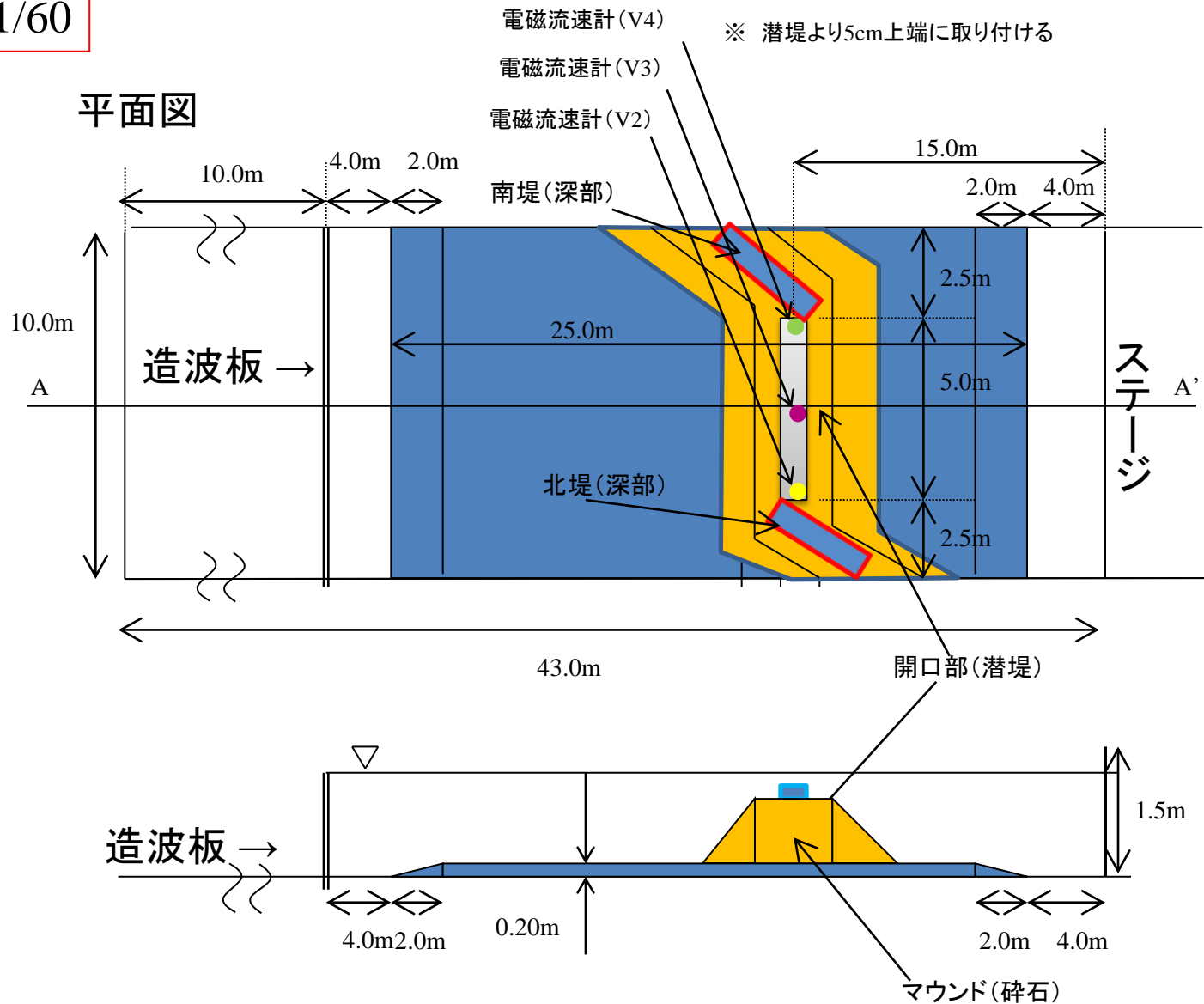
東北地整

2011年3月25日, スケール1/500



堤頭部の被災メカニズムの検討

縮尺1/60

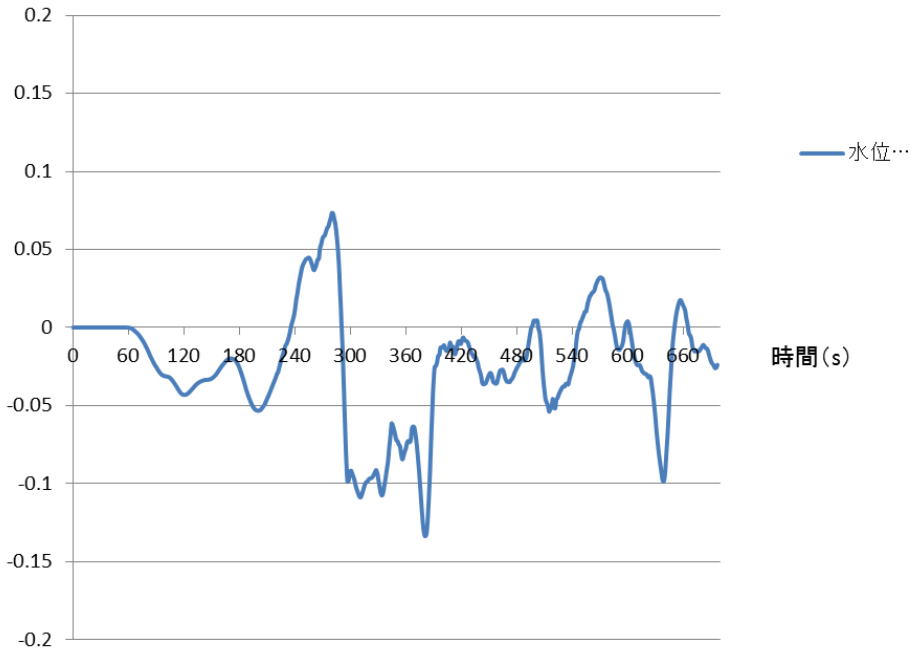




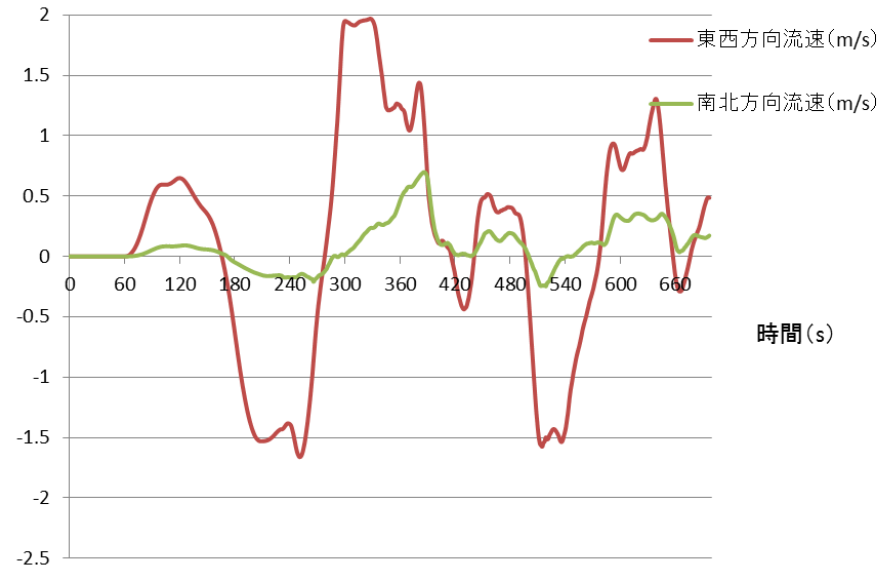
重量に関しては
鉛と砂袋で調整



津波の条件

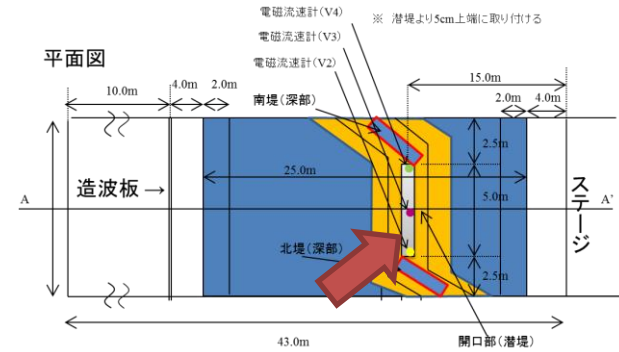
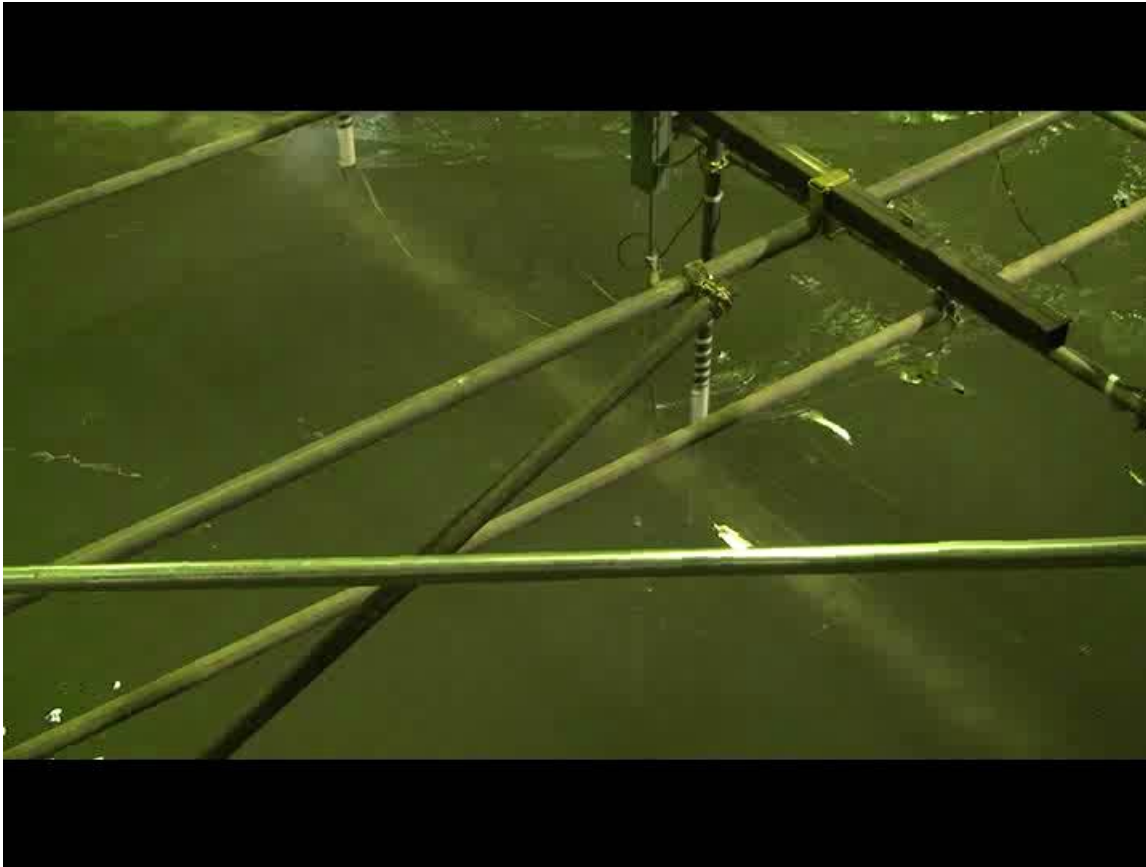


潜堤13(北堤堤頭部から156.25m(ほぼ中央))における水位の時系列分布(縮尺1/60)



潜堤13(北堤堤頭部から156.25m(ほぼ中央))における流速の時系列分布(縮尺1/60)

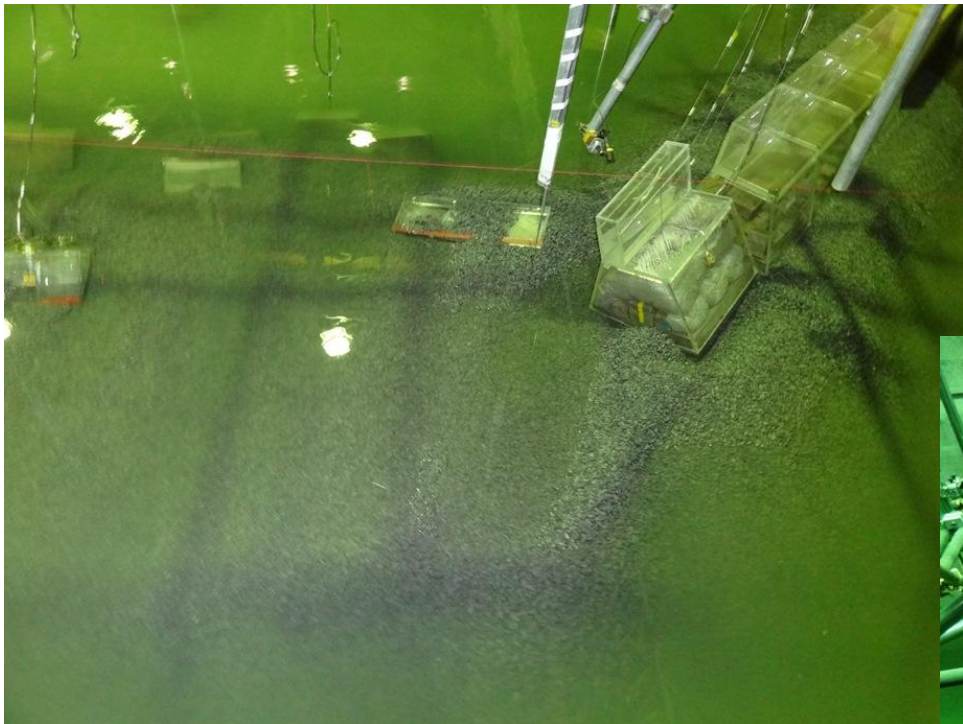
実験の様子①



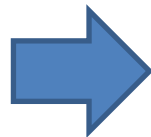
撮影場所

第1波押波相当の流れが作用しているときの様子

実験結果



北堤頭部の洗掘による傾倒状況（若干港内側か？）

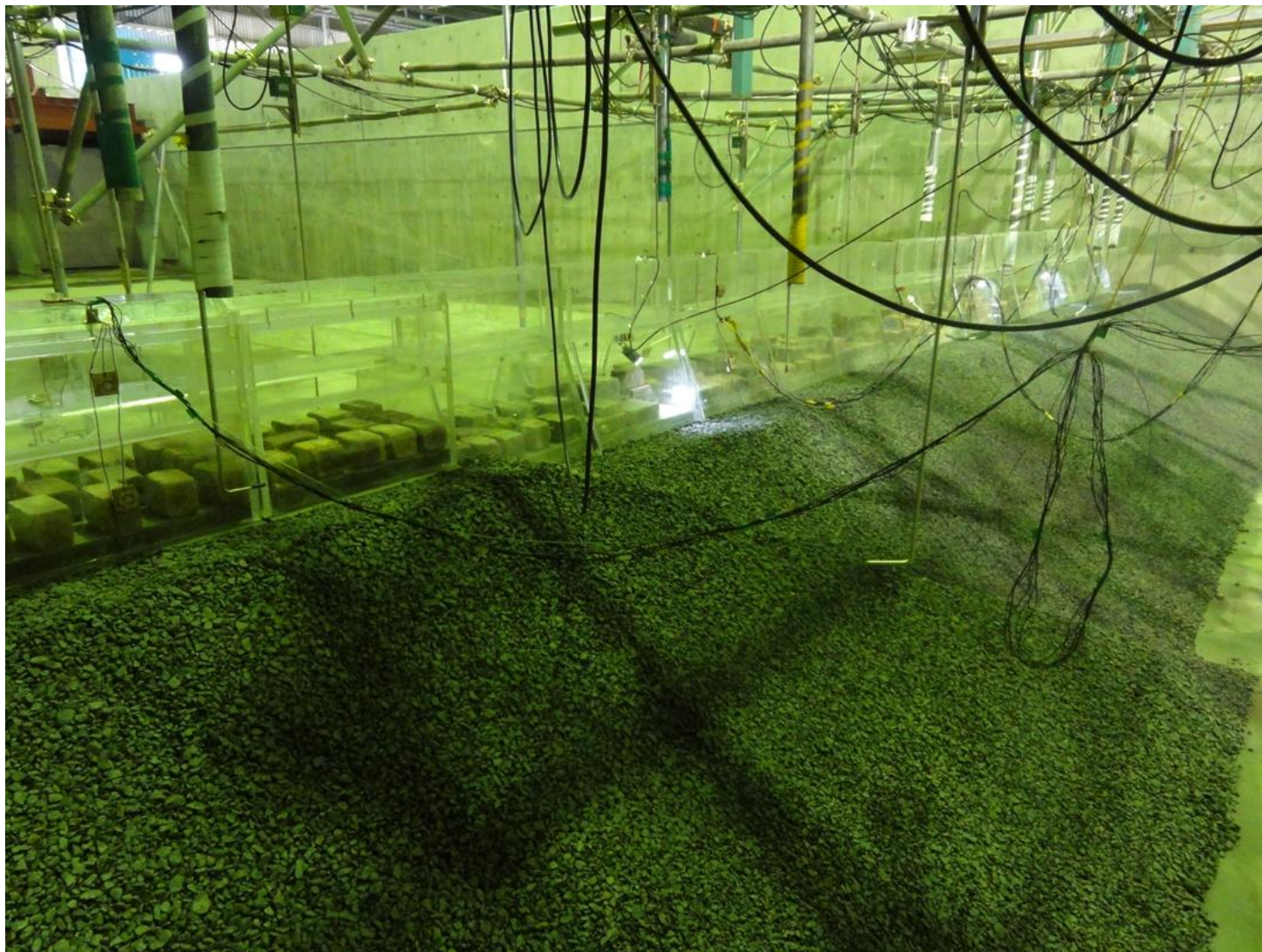


堤頭部については、洗掘が主な原因と考えられる。洗掘の引き金になったのは開口部の潜堤が流れたことである

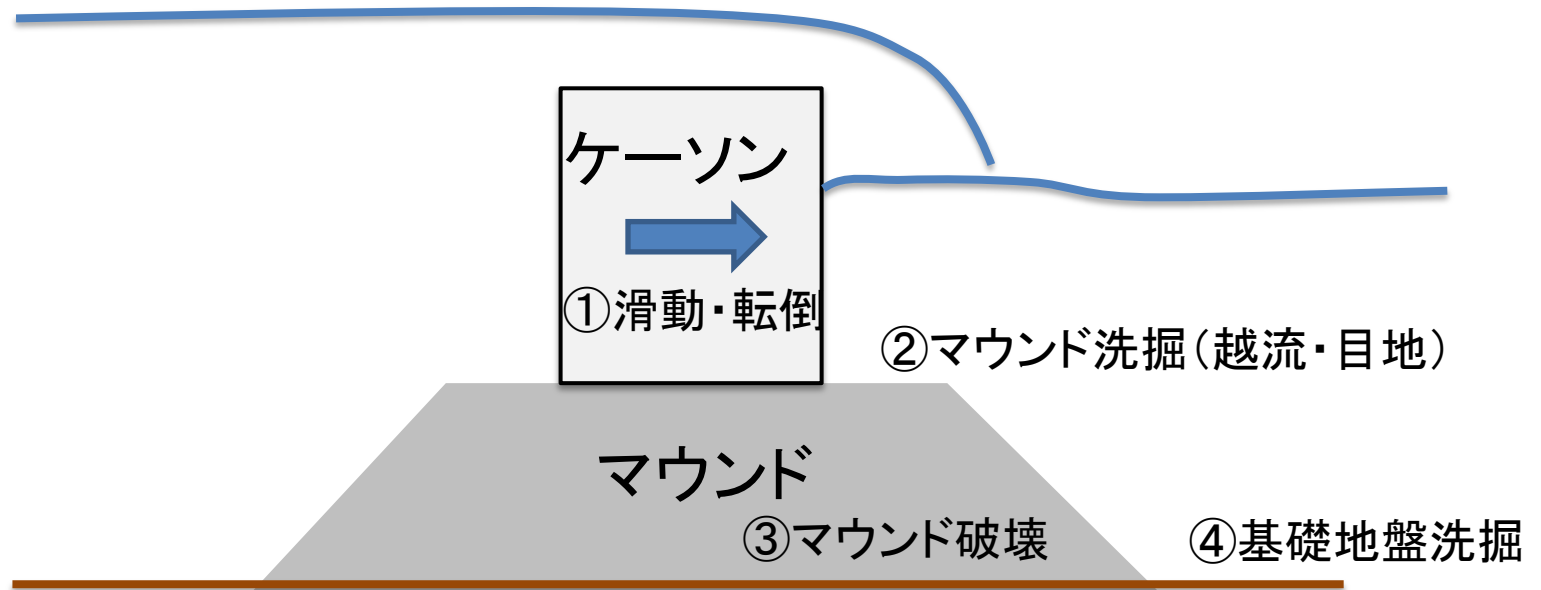


南堤頭部の洗掘による傾倒状況（隣の函も洗掘され傾倒）

堤幹部の実験



防波堤の津波による被災メカニズムについて

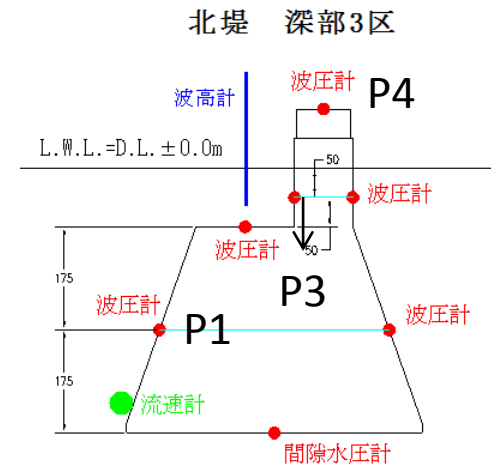
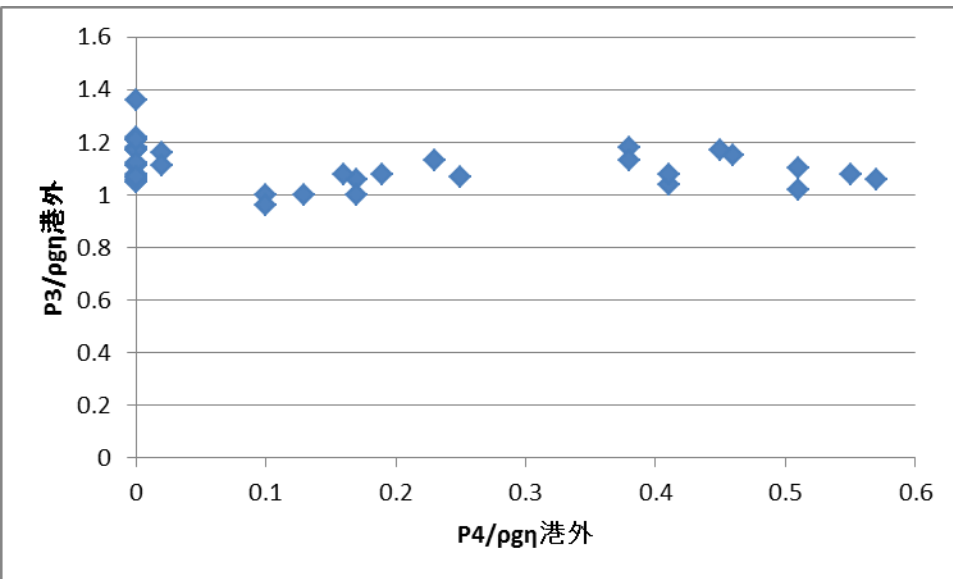
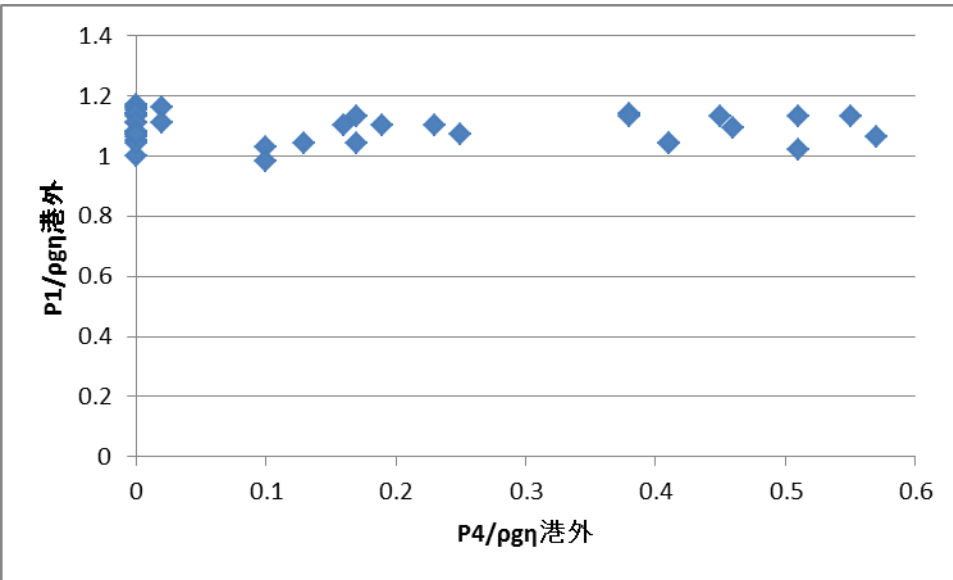


実験の様子



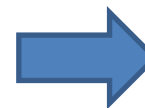
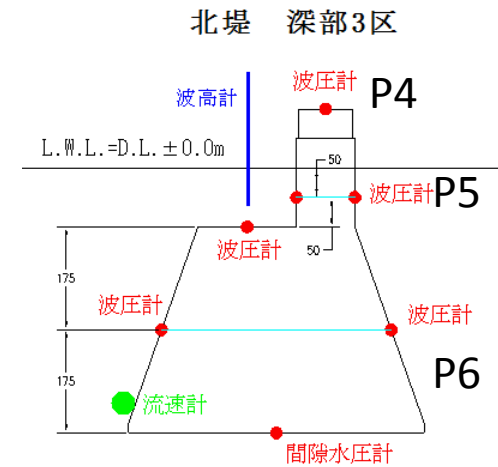
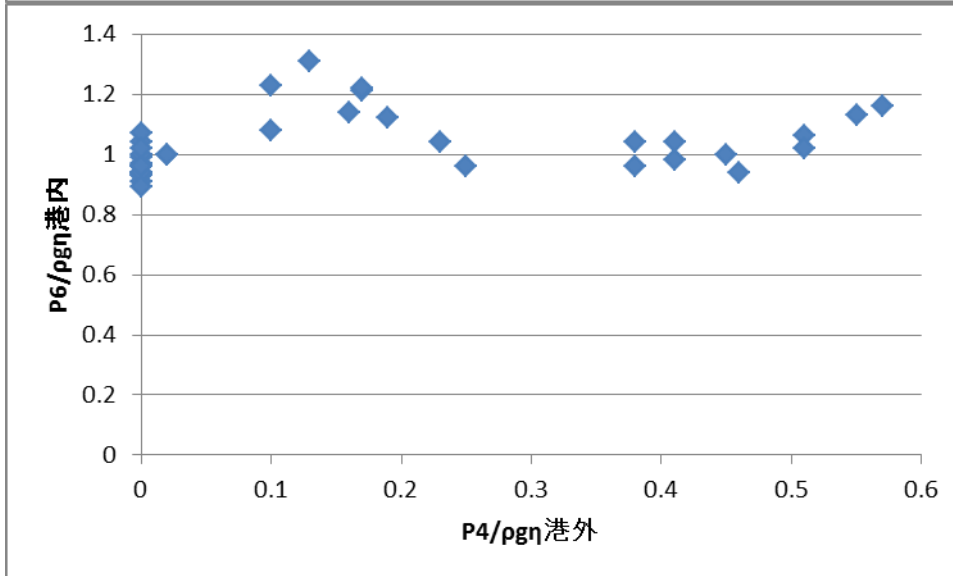
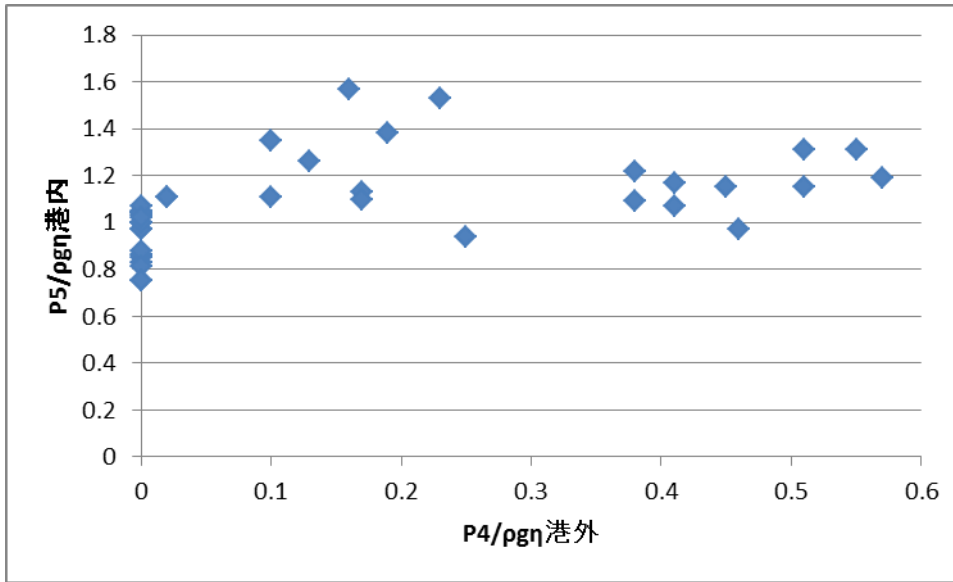
数秒で流されている

越流時の波圧について(前面)



港外側の波圧は、押波時には、平均的に、静水圧の1.05倍程度となっている

越流時の波圧について(背面)

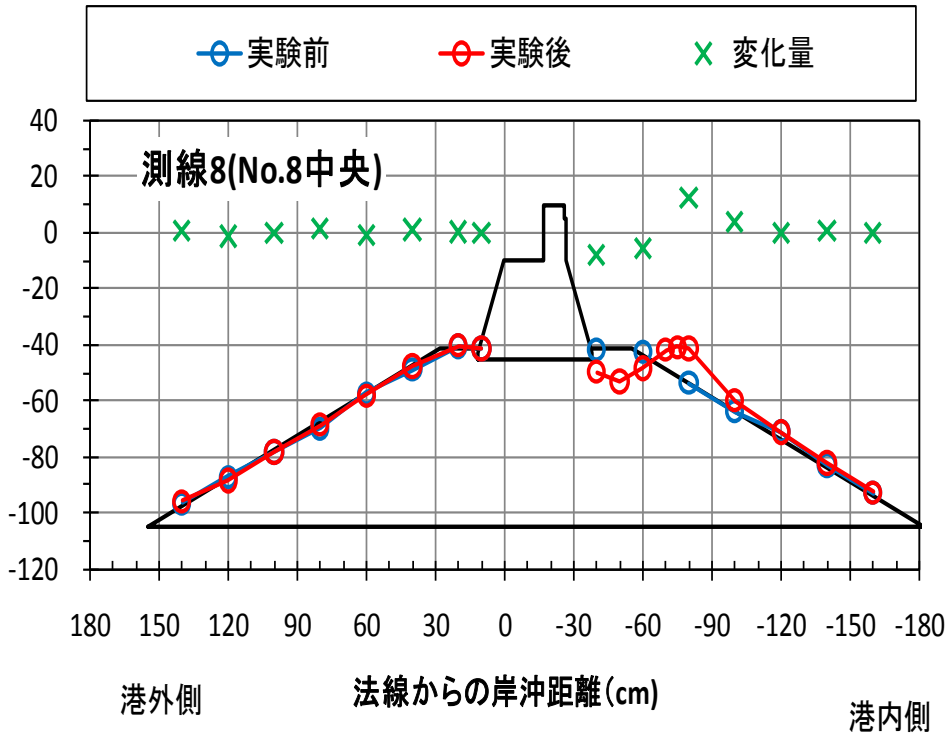
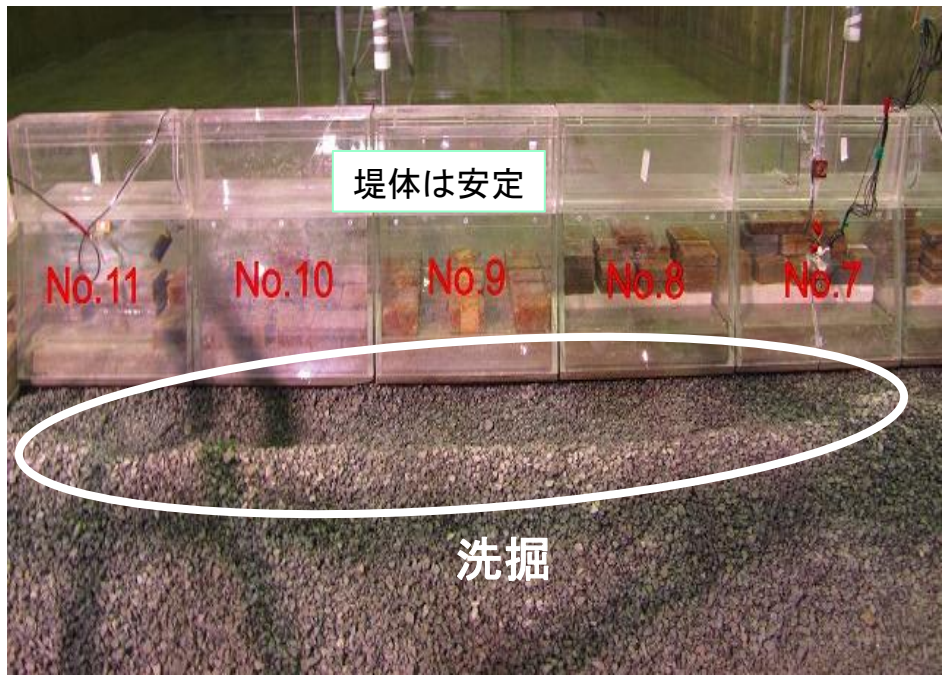


背面の水圧は、静水圧より減少することを意味している。越流の影響であると考えられる。約0.9倍程度

釜石港湾口防波堤 被災原因【越流洗掘】

①越流によるマウンドの洗掘

水理模型実験において越流洗掘は生じたもののケーソン(堤体)の滑動までは生じていない。

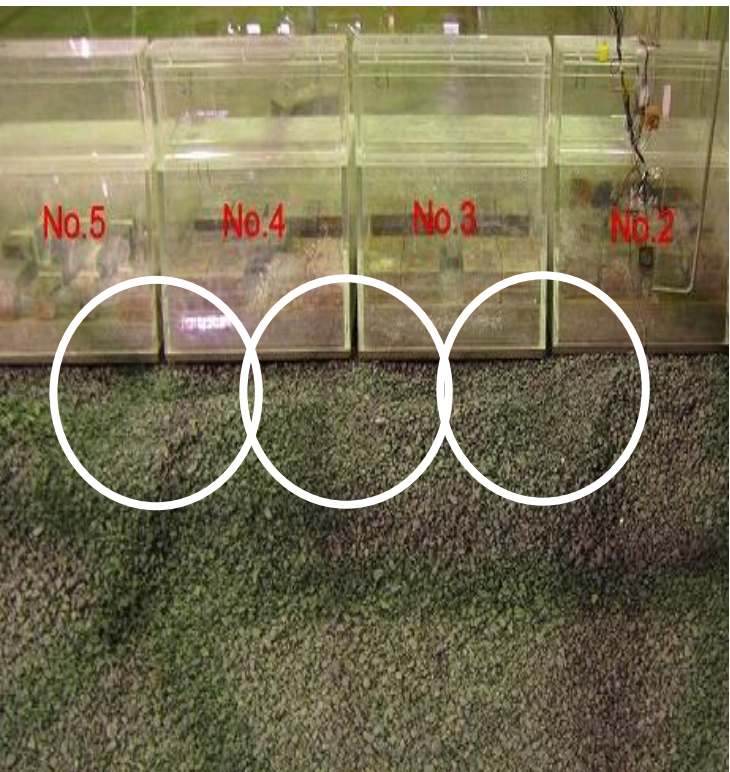


釜石港湾口防波堤 被災原因【目地洗掘】

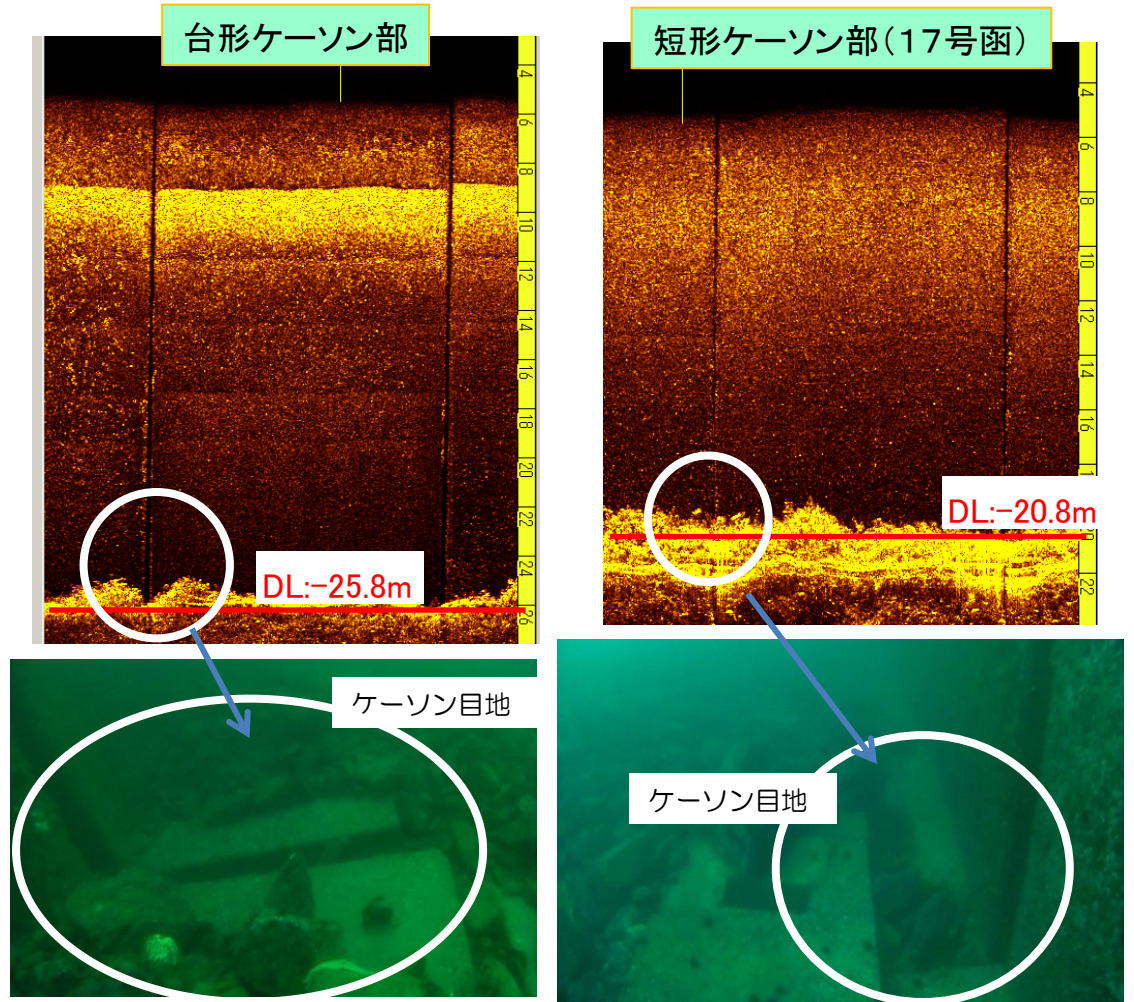
③ ケーソン目地からの強い流れによるマウンドの洗掘

水理模型実験において目地部の洗掘は越流の洗掘より小さく、現地潜水調査でも目地付近はあまり洗掘されていない。

【実験】



【現地調査結果】

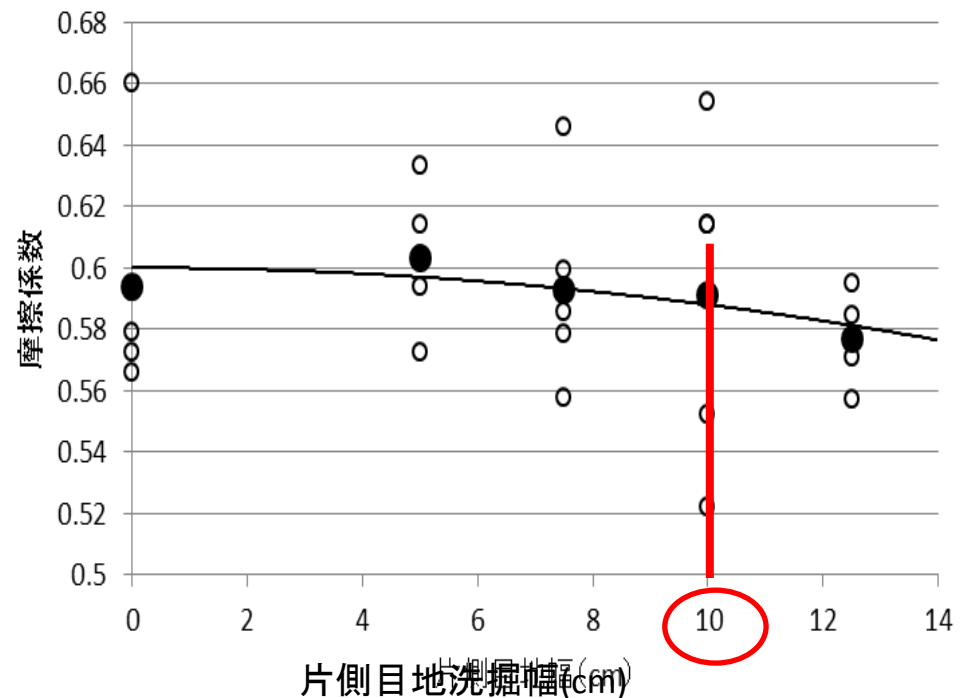


釜石港湾口防波堤 被災原因【目地洗掘】

②ケーソン目地からの強い流れによるマウンドの洗掘

滑動抵抗力確認実験結果

実験では目地洗掘が堤体幅の40%より大きくなったとき顕著に摩擦係数に変化が見られる



摩擦係数のばらつき

目地幅をすべて2.0cmとしたケース



重くしてあった端の2函を残して3函が滑動した。マウンド下まで落ちたケーソンから先に滑動した



青矢印で示した函が1~2cm程度滑動したが、そのほかは滑動していない

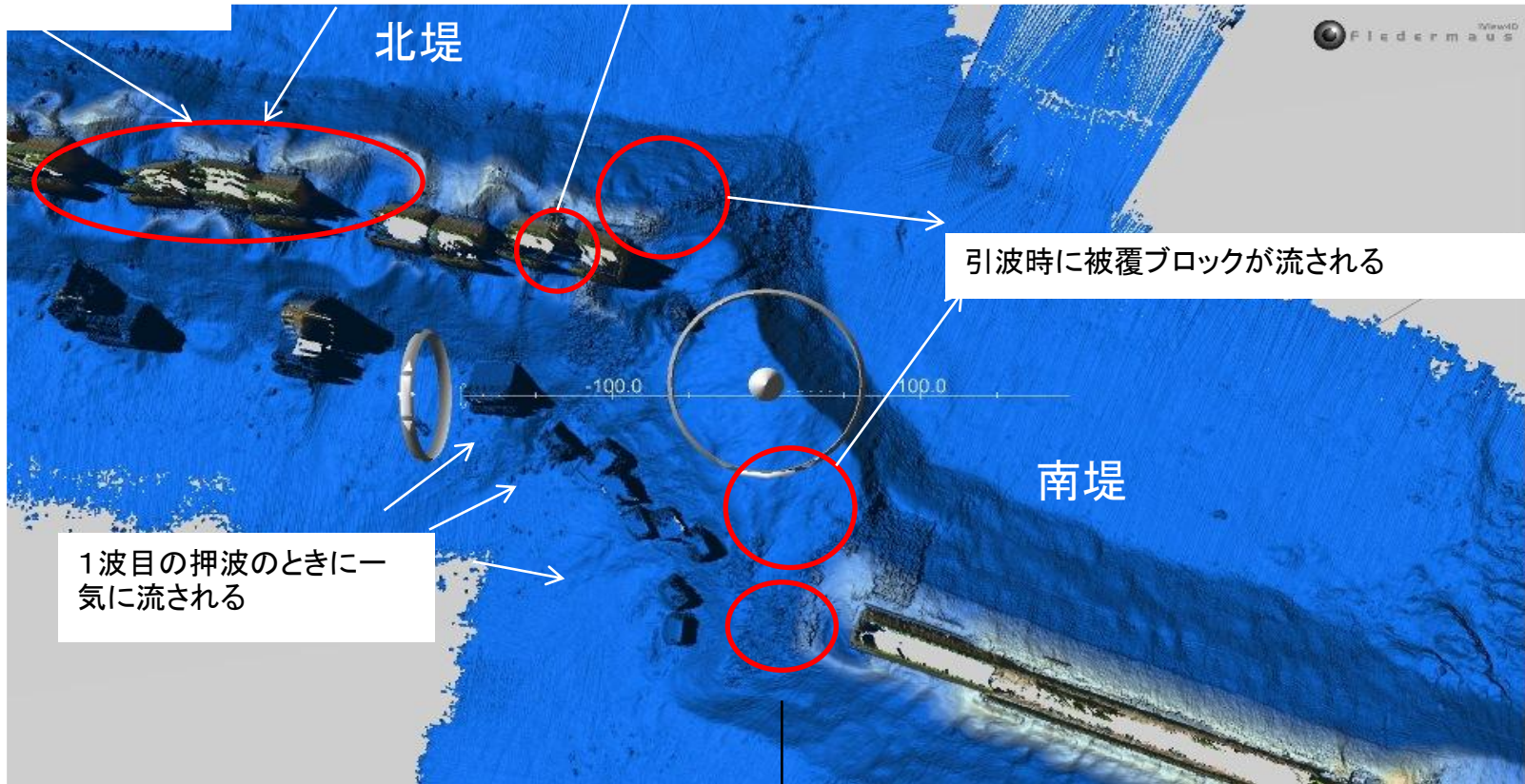
堤幹部の原因

- 要因としては、港外、港内の水位差が主である。
- 越流によって防波堤背面側が静水圧より10%程度小さくなったこと
- 目地部や越流による洗掘により、下部が不安定になったこと(引っ張り試験では数%程度摩擦係数を減少)
- 安全率が1.0付近であれば、それらの要因によりケーソンによって滑動の挙動にばらつきが生じること
- 今後支持力の低下を詳細に調べる

現地との比較

引波時に掘られ、どこかの時点でケーソンが傾く(2波目以降でもよいと考えられる。ぎりぎりのバランスではなかったかと)

1波目の押波のときに一気に流される



引波時に掘られるものの、ケーソンが傾くにいたらず



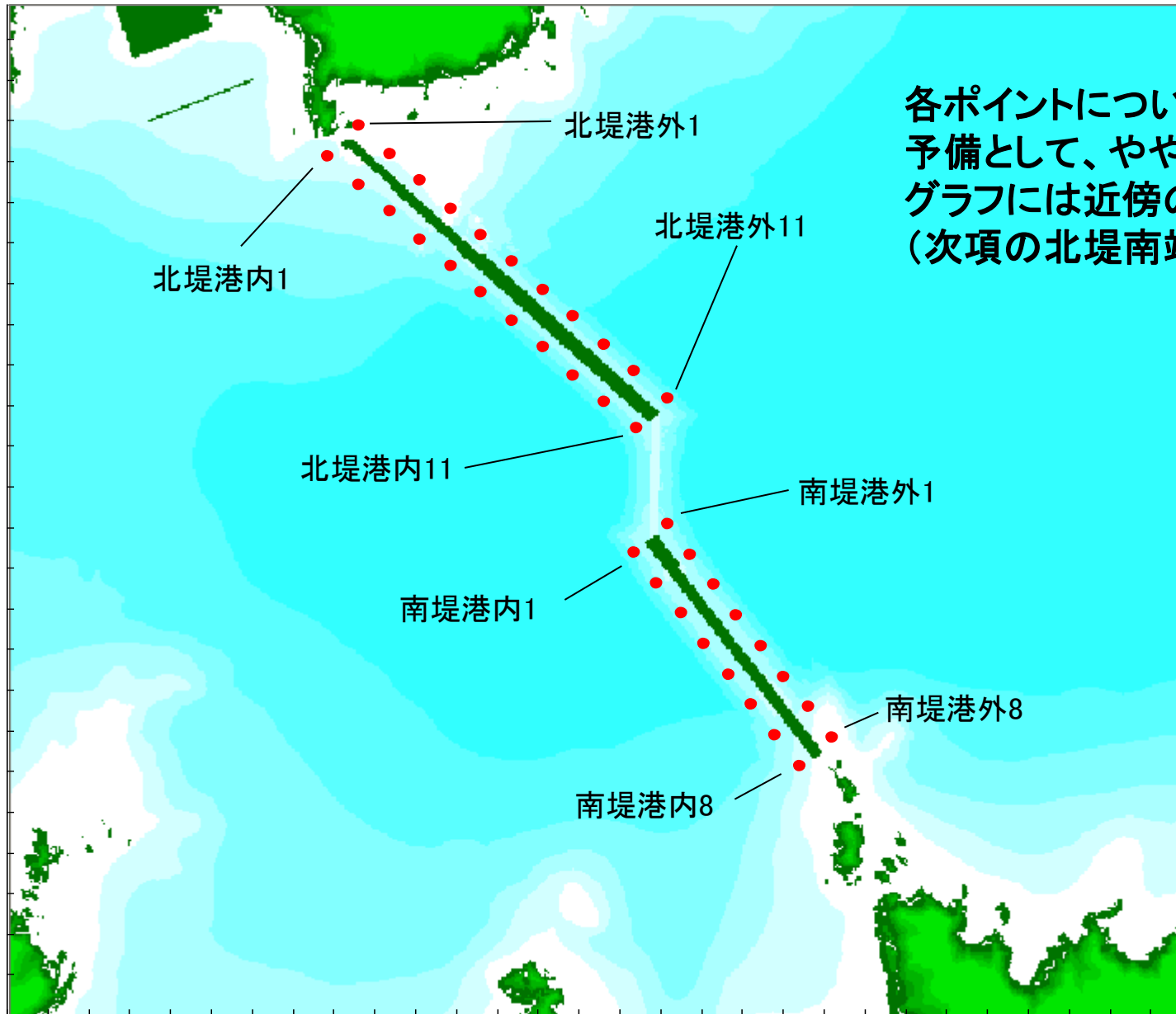
越流時の波力、洗掘の定量化をどうするか？

現地ビデオより



- 巡視船きたかみ津波の中の緊急出港
- 撮影日時 3月11日 15:44頃～約15分
撮影場所 釜石港港口
撮影者 巡視船きたかみ(釜石海上保安部所属)

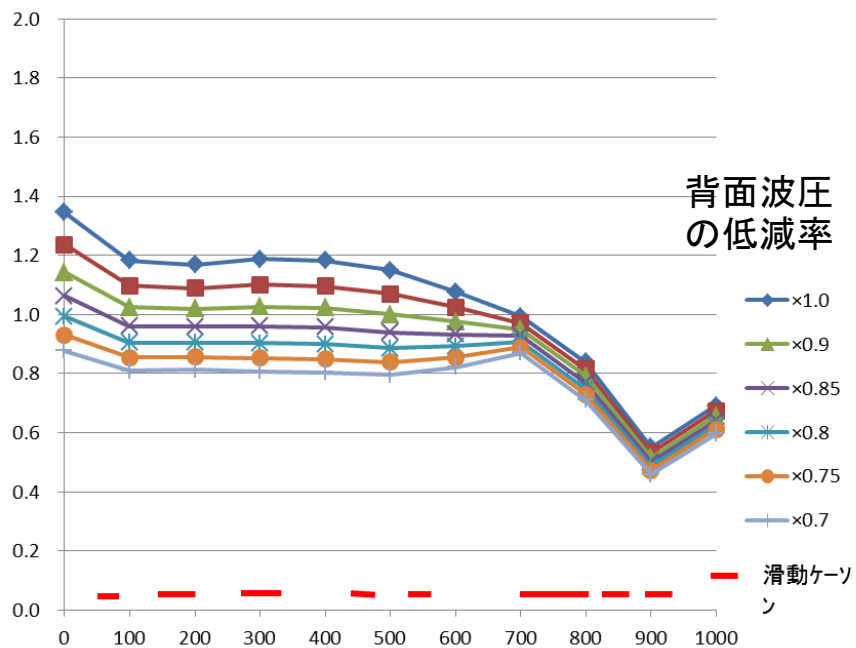
湾口防波堤近傍の出力位置



各ポイントについて防波堤近傍の出力位置を予備として、やや遠方の点の2種類をグラフには近傍の点を使用
(次項の北堤南端の点の位置を)

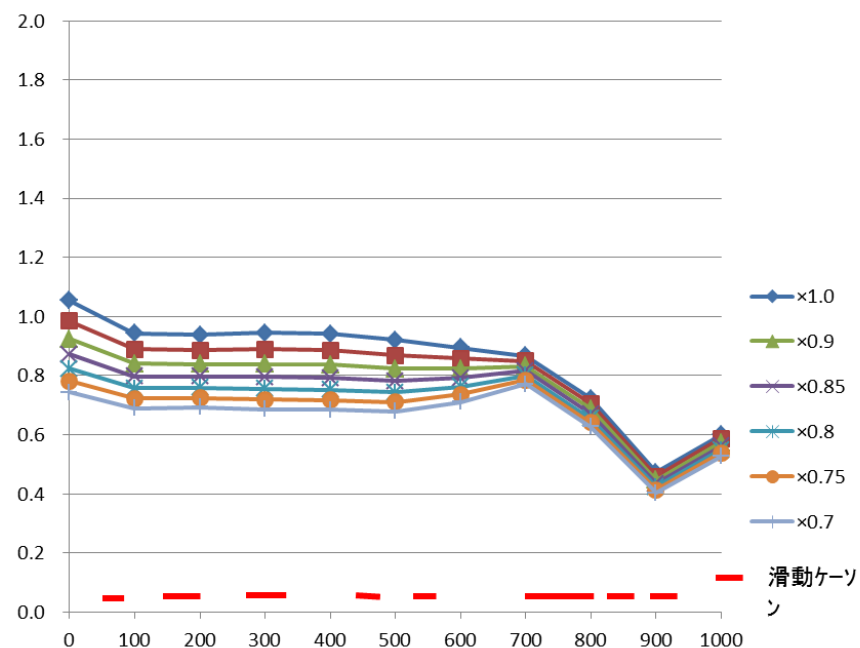
数値計算による滑動安全率の検討・北堤 (波圧低減・増大を考慮した場合)

滑動安全率



堤頭部

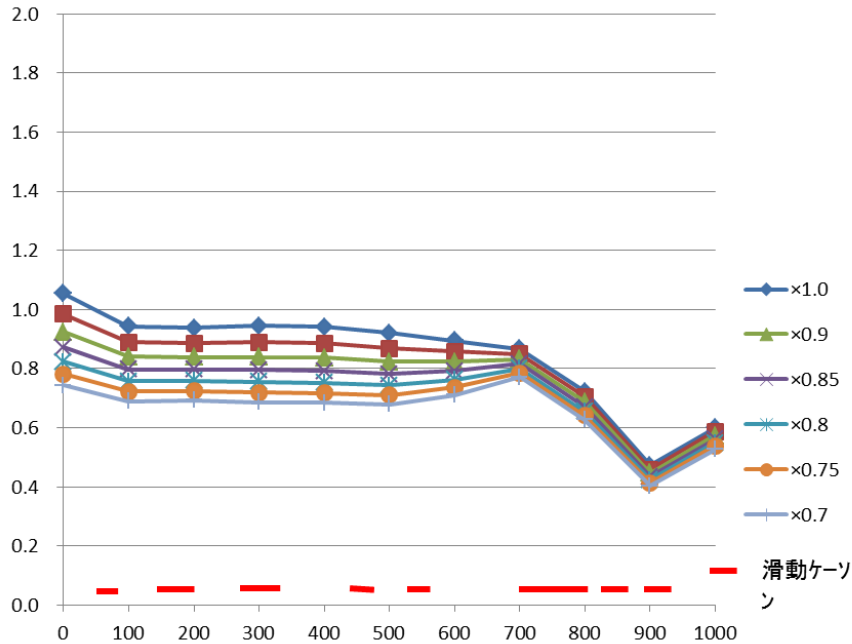
前面の波圧 = 水位から静水圧



前面の波圧 = 水位から静水圧 × 1.1倍

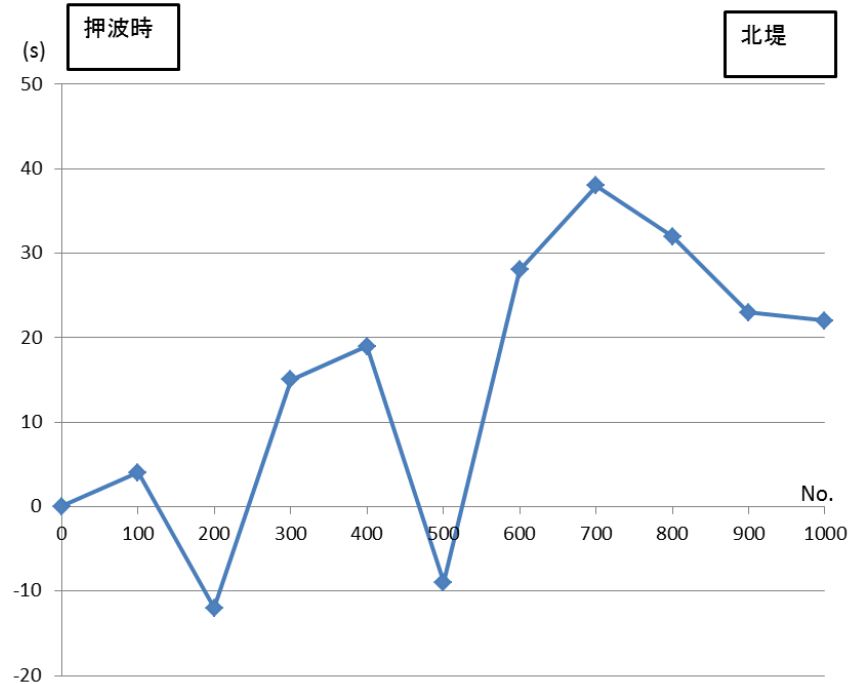
発生時間差(北堤)

滑動安全率



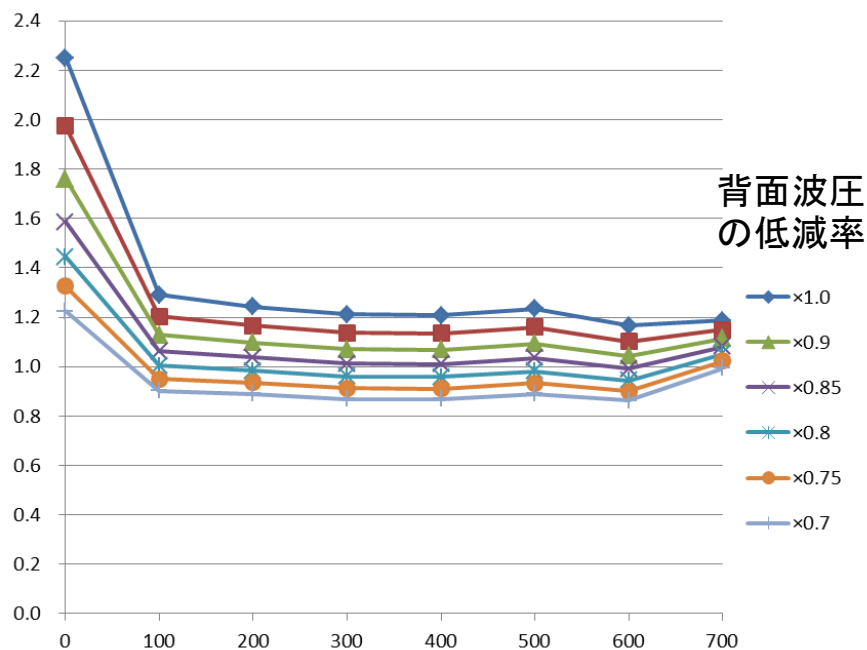
堤頭部

前面の波圧 = 水位から静水圧 × 1.1倍



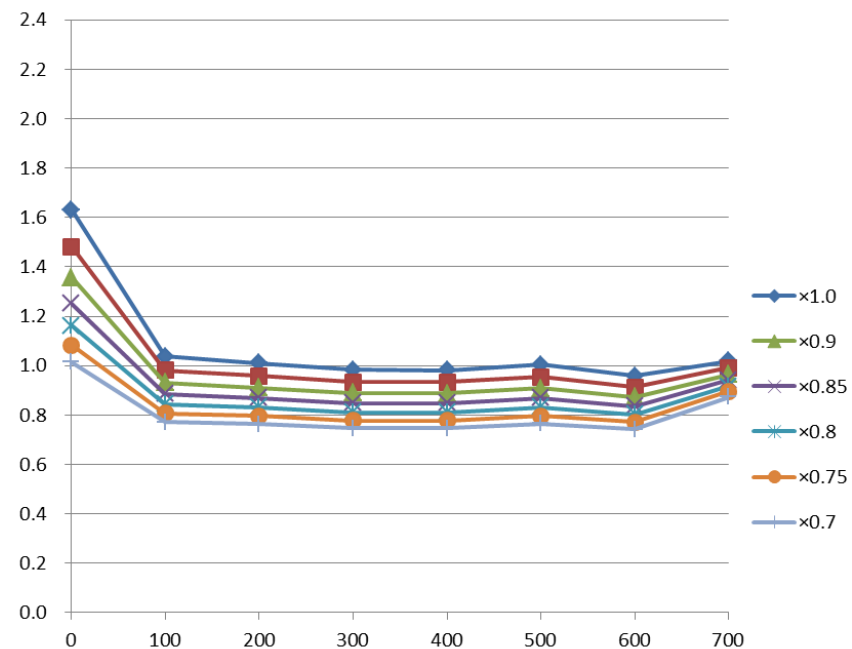
数値計算による滑動安全率の検討・南堤 (波圧低減・増大を考慮した場合)

滑動安全率



堤頭部

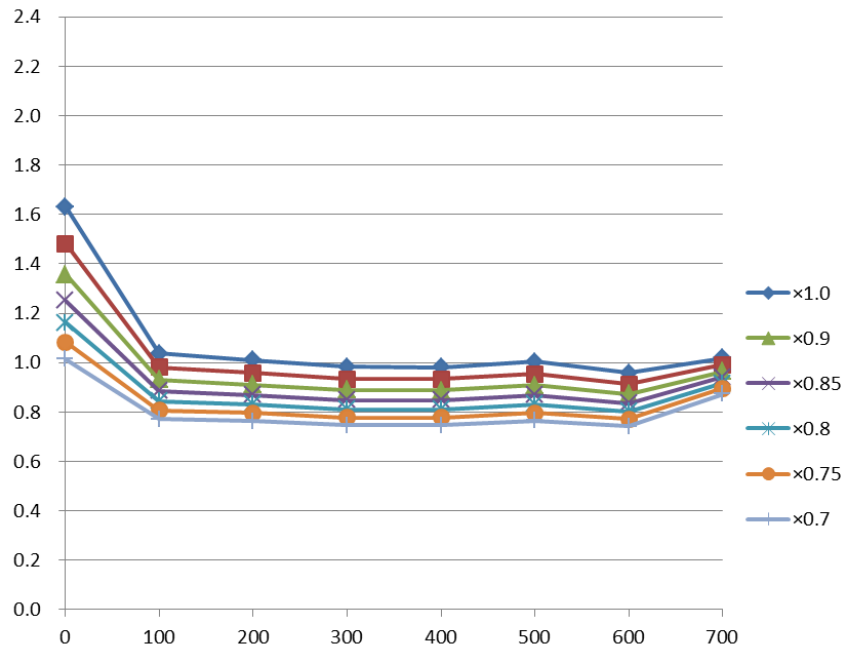
前面の波圧 = 水位から静水圧



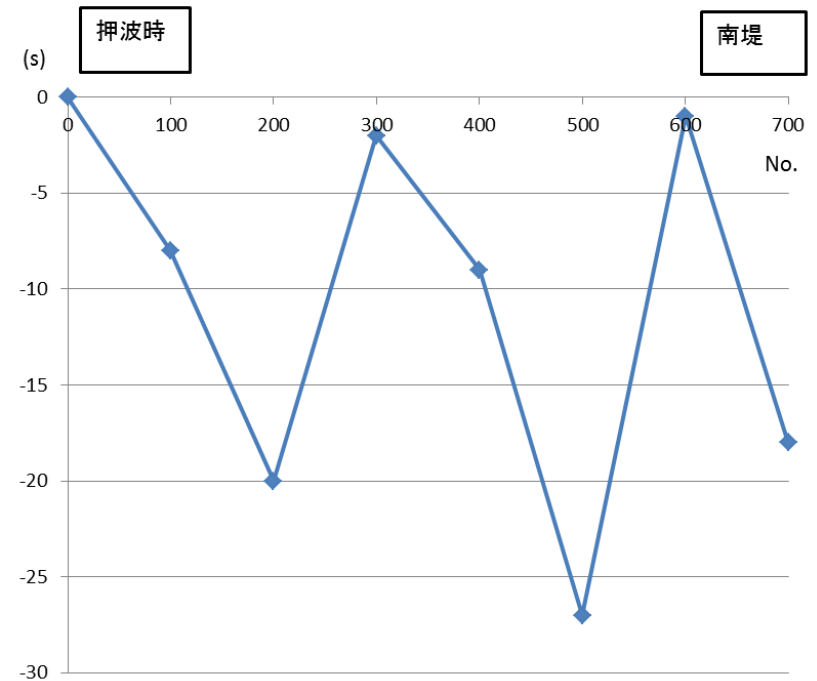
前面の波圧 = 水位から静水圧 × 1.1倍

発生時間差(南堤)

滑動安全率



堤頭部



前面の波圧 = 水位から静水圧 × 1.1倍

発生時間差と水圧の増減を
考慮すれば滑動の説明がつく
可能性が高い

今後の防波堤・防潮堤の設計

釜石湾内の被害



隣の家で2名(30代)
隣の隣の家で2名(60代)
逃げる途中に3名程度

田老町での被害



海上自衛隊撮影



| | 居住者 | 死者 | 行方不明者 | 割合 |
|-------------------|------|----|-------|------|
| A地区(二重堤に守られている地域) | 1610 | 63 | 9 | 4.5% |
| B地区 | 566 | 19 | 36 | 9.7% |
| C地区 | 278 | 12 | 5 | 6.1% |

気仙沼・杉之下高台



ビルの転倒(女川)



避難の実態

- 海外事例と比較をすると逃げ遅れた人の共通事項として
 - 避難困難者（お年寄り，病人）
 - 避難困難者をかかえる人
 - 過去の経験により過小評価した人
- 加えて，日本では，
 - 防護効果を過信
 - 警報の情報伝達の困難さ
 - ハザードマップの難しさ

階層型連携シミュレーションの構築

準3次元モデル(多層レベルモデル)

各層では静水圧を仮定

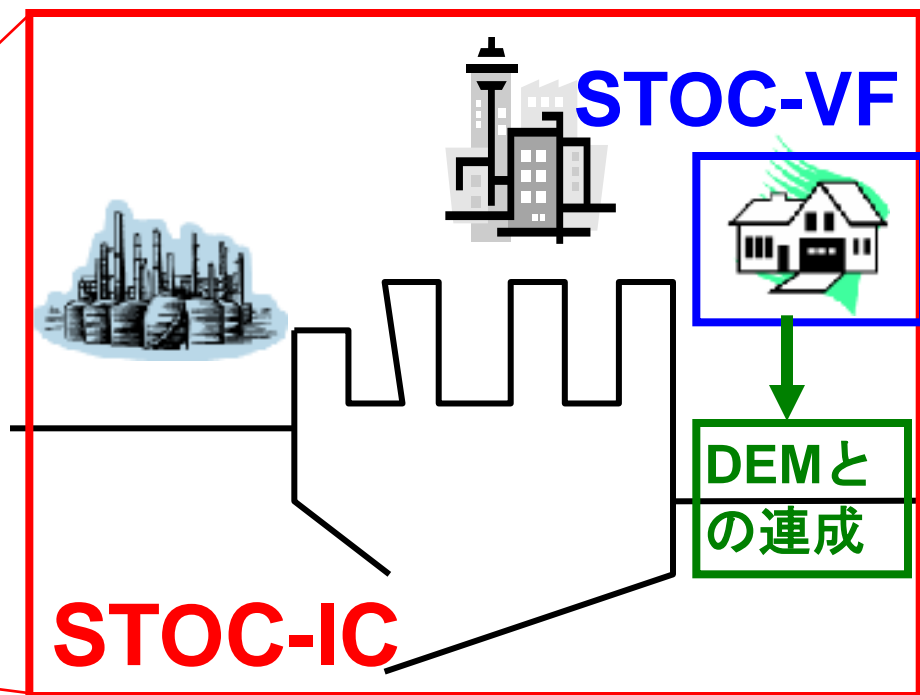
計算負荷: 軽



3次元モデル

水表面をVOF法により推定

計算負荷: 重



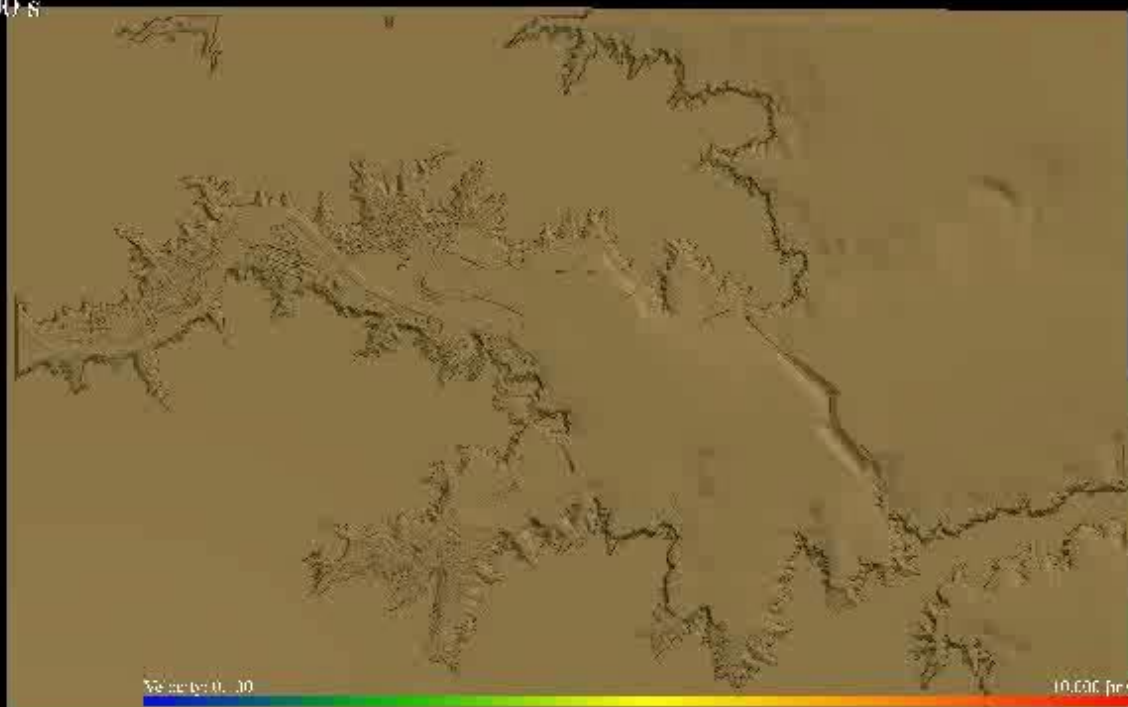
3次元モデル

水表面を鉛直方向に積分した連続式から算出

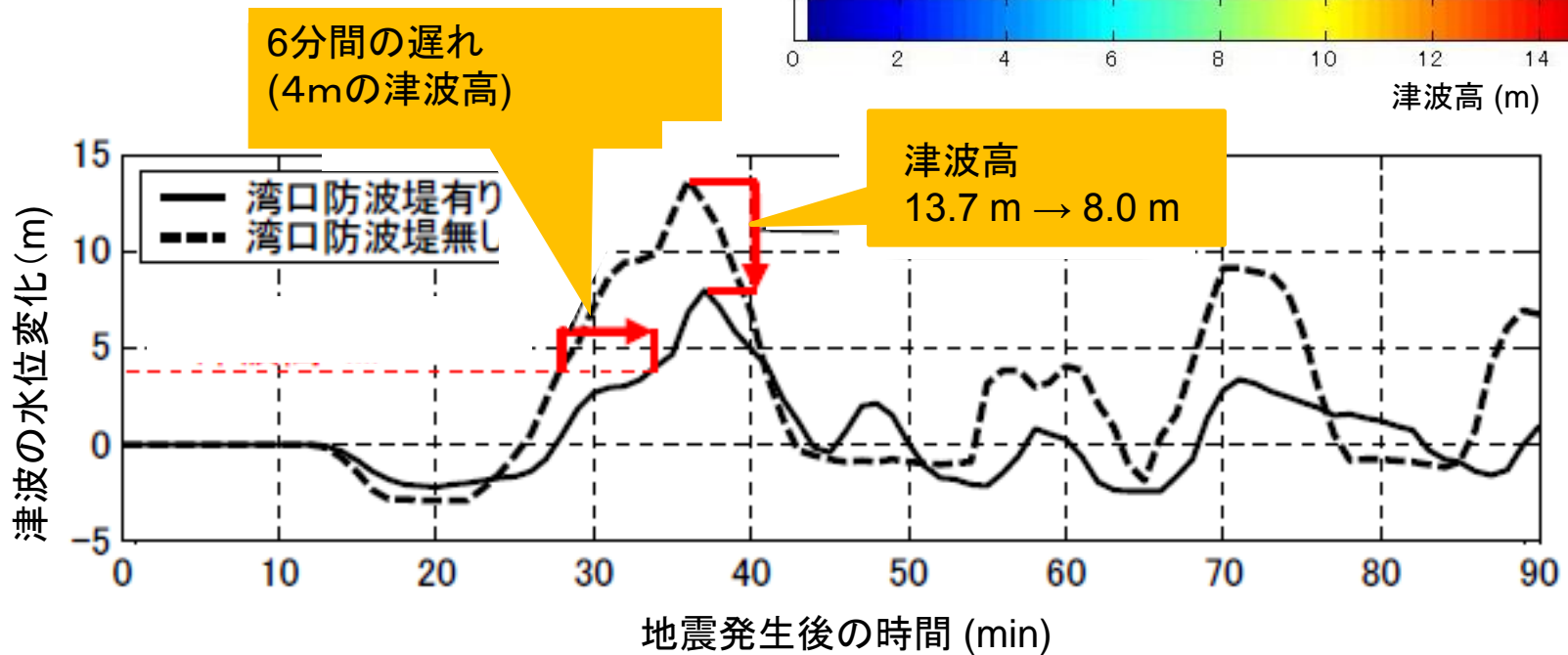
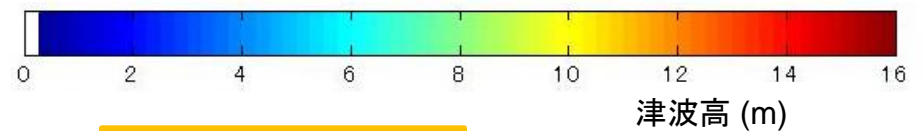
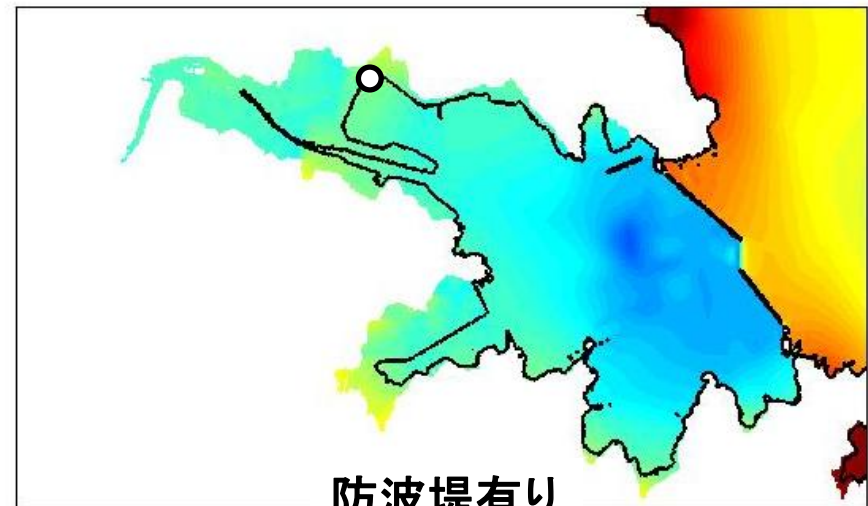
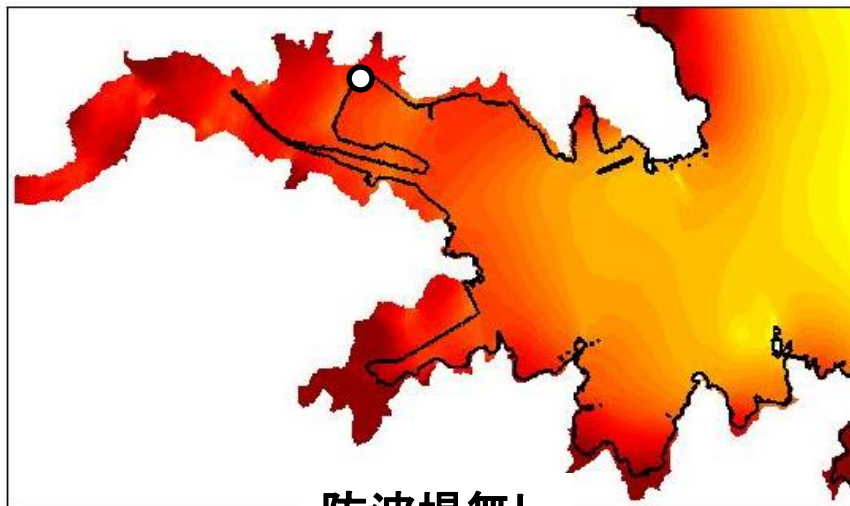
計算負荷: 中



0.00 s



湾口防波堤の津波低減効果



釜石港湾口防波堤の減災効果

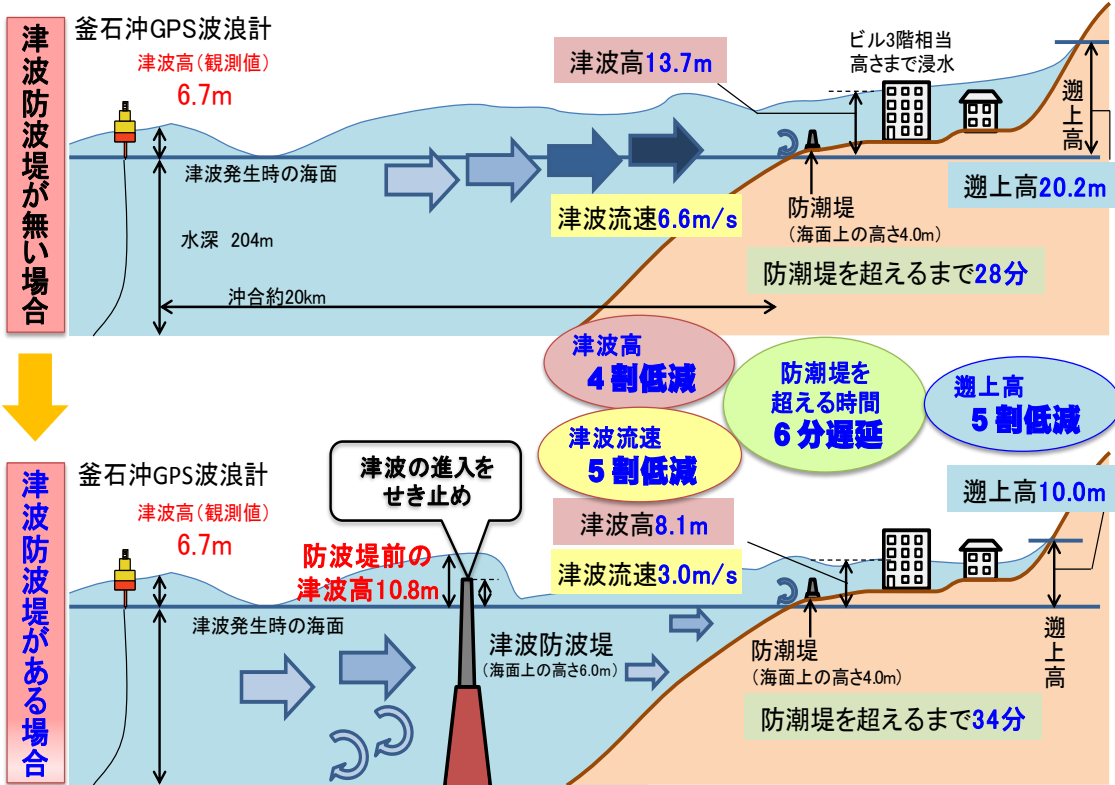
<津波防波堤の効果>

防波堤で湾の入口を絞り、湾内への海水の流入を絞る



- ①津波高を低減
- ②港内の水位上昇を遅延 (避難時間確保)
- ③流速を弱め破壊力を低減

<防波堤有／無を計算で比較>



<津波の襲来状況> 国交省釜石港湾事務所撮影



地震発生26分後：津波第1波がケーソン目地から流入



地震発生31分後：津波第1波が北堤を越流 (斜下図)



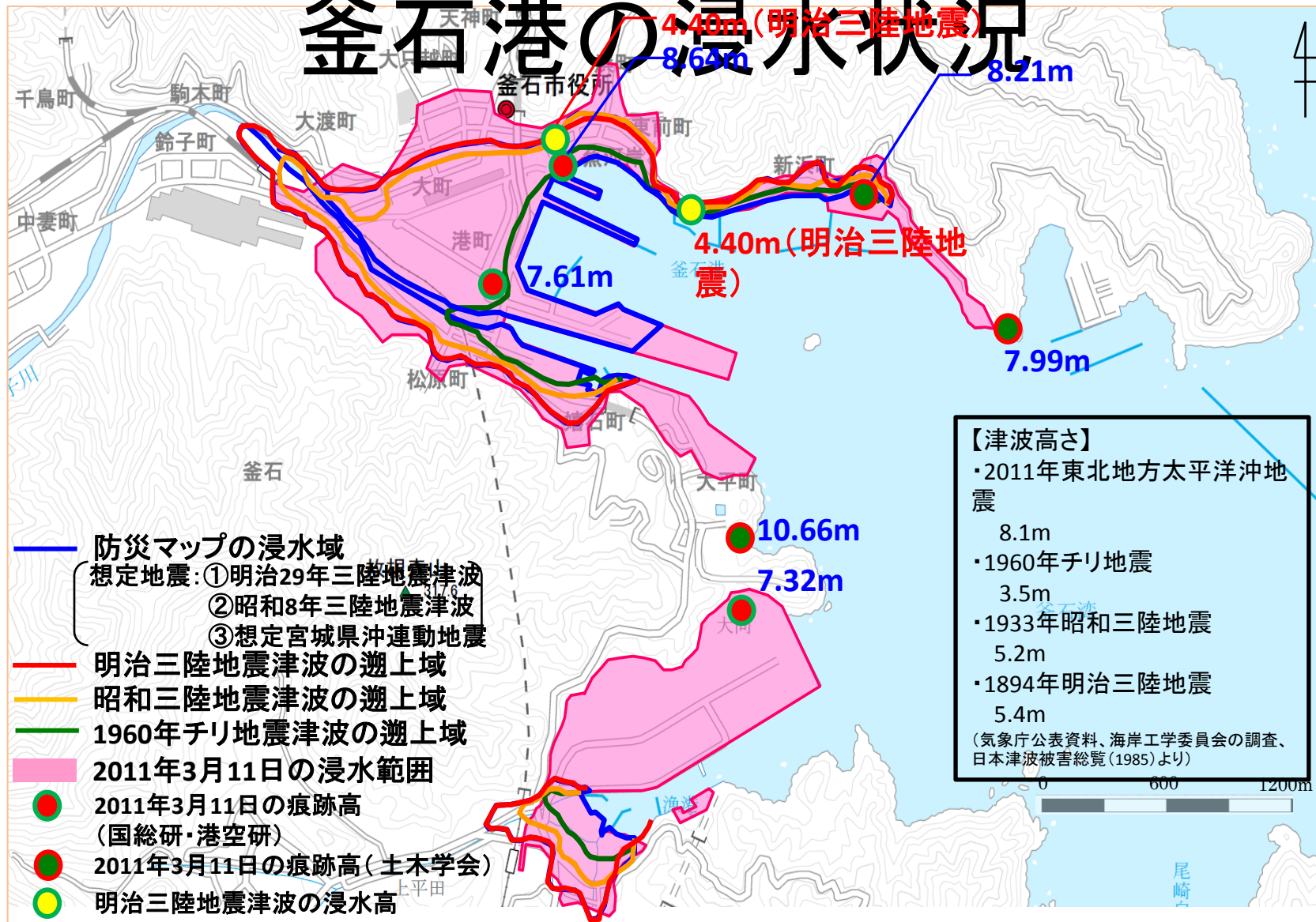
地震発生34分後：津波第1波が防潮堤を越流



地震発生46分後：津波第1波が引き一部欠けた北堤

※ 津波防波堤がある場合の津波高さ(8.1m)は現地津波痕跡高、防潮堤を越えるまでの時間(34分)は現地事務所での計測値。それ以外はシミュレーション結果による。

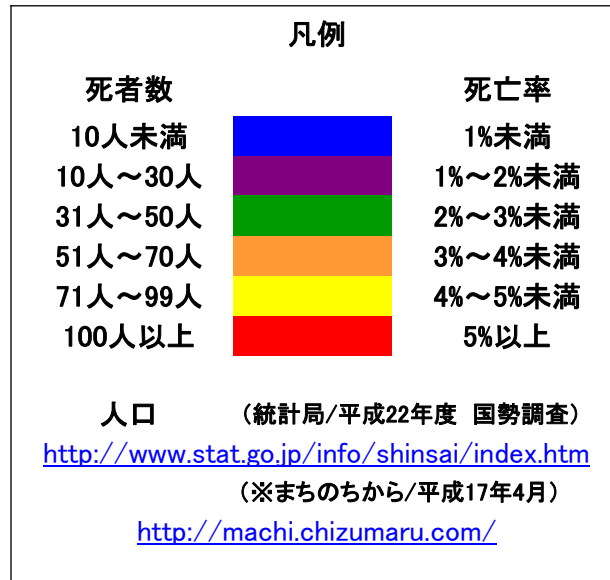
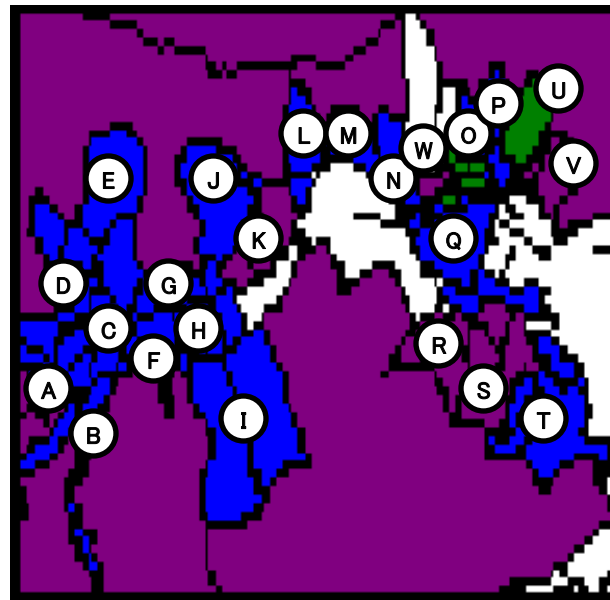
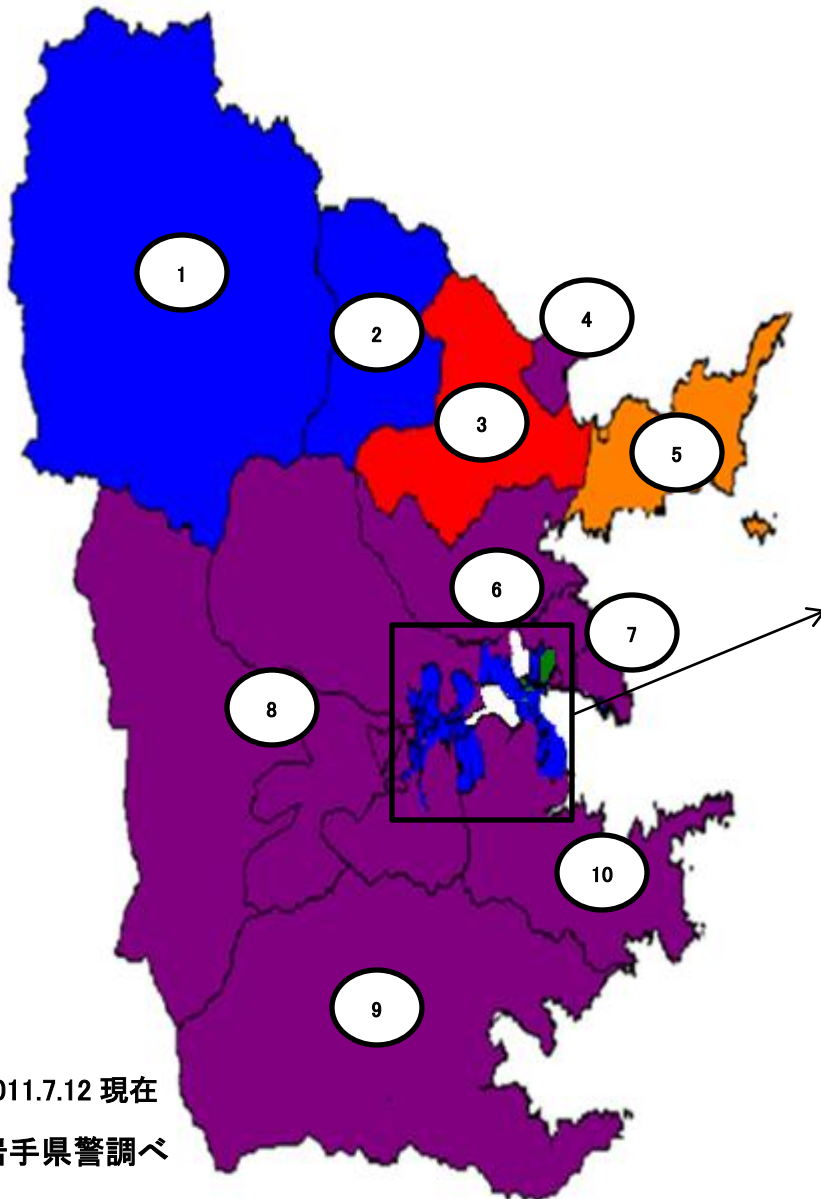
釜石港の浸水状況



※浸水域は、釜石市防災マップ、国土地理院浸水範囲概況図(2011年東北地方太平洋沖地震津波)をもとに作成
 ※2011年の痕跡高のうち、国総研・港空研は国土交通省国土政策総合研究所、(独)港湾空港技術研究所の現地調査結果(T.P.基準換算)である。
 ※2011年の痕跡高のうち、土木学会は『東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ』の現地調査結果(T.P.基準換算)である。
 ※明治三陸地震津波による浸水高は、内務省土木試験所報告の数値。

岩手県釜石市

死者数

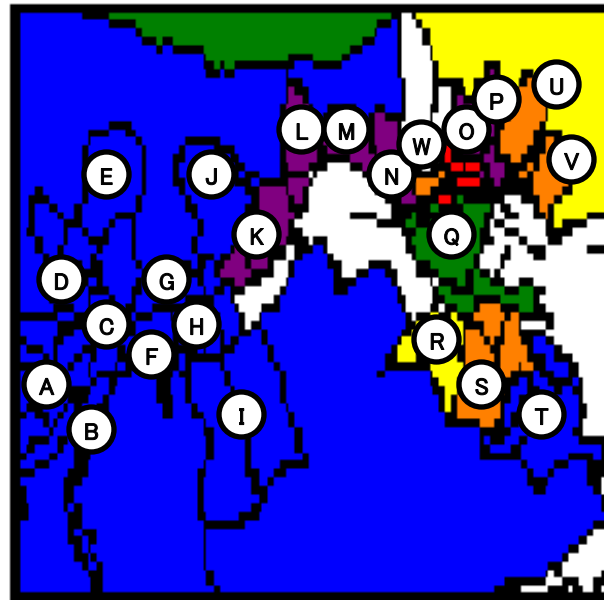
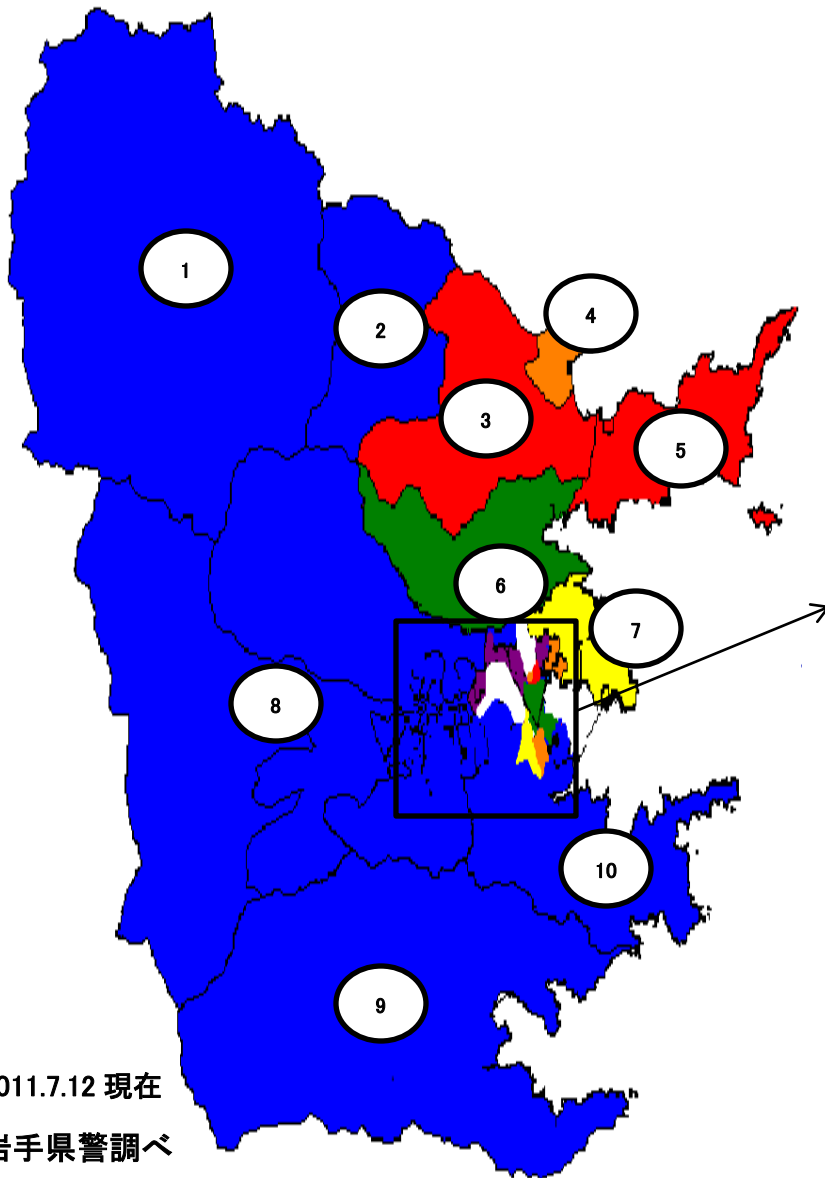


| 市町村名 | 死者数 | 人口 | 死亡率 |
|----------|------|---------|------|
| 1: 横野町 | 2人 | 466人 | 0.4% |
| 2: 栗林町 | 3人 | 735人 | 0.4% |
| 3: 鶯住居町 | 279人 | 3,618人 | 7.7% |
| 4: 片岸町 | 30人 | 862人 | 3.5% |
| 5: 箱崎町 | 70人 | 1,274人 | 5.5% |
| 6: 両石町 | 18人 | 636人 | 2.8% |
| 7: 新浜町 | 10人 | ※235人 | 4.3% |
| 8: 甲子町 | 13人 | 6,904人 | 0.2% |
| 9: 唐丹町 | 15人 | 2,003人 | 0.7% |
| 10: 大字平田 | 21人 | 3,751人 | 0.6% |
| A: 野田町 | 11人 | 2,779人 | 0.4% |
| B: 定内町 | 5人 | 1,645人 | 0.3% |
| C: 小佐野町 | 2人 | 1,277人 | 0.2% |
| D: 桜木町 | 1人 | ※250人 | 0.4% |
| E: 小川町 | 6人 | 1,689人 | 0.4% |
| F: 礼ヶ口町 | 1人 | 137人 | 0.7% |
| G: 住吉町 | 1人 | ※148人 | 0.7% |
| H: 上中島町 | 1人 | ※1,124人 | 0.1% |
| I: 源太沢町 | 2人 | 613人 | 0.3% |
| J: 八雲町 | 1人 | 320人 | 0.3% |
| K: 中妻町 | 12人 | 1,233人 | 1.0% |
| L: 千鳥町 | 4人 | ※309人 | 1.3% |
| M: 駒木町 | 2人 | ※133人 | 1.5% |
| N: 大渡町 | 9人 | 687人 | 1.3% |
| O: 只越町 | 40人 | 680人 | 5.9% |
| P: 天神町 | 3人 | 266人 | 1.1% |
| Q: 港町 | 3人 | ※123人 | 2.4% |
| R: 松原町 | 23人 | ※513人 | 4.5% |
| S: 糠石町 | 29人 | 838人 | 3.5% |
| T: 大平町 | 5人 | 799人 | 0.6% |
| U: 浜町 | 35人 | 913人 | 3.8% |
| V: 東前町 | 14人 | 374人 | 3.7% |
| W: 大町 | 20人 | ※543人 | 3.7% |

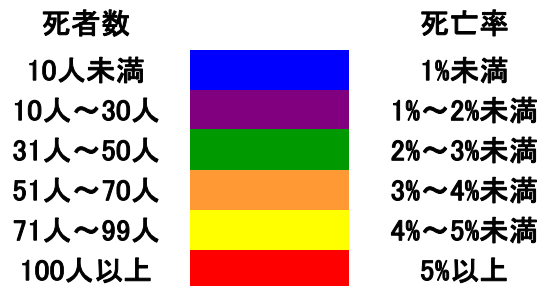
2011.7.12 現在
 岩手県警調べ

岩手県釜石市

死亡率



凡例



人口 (統計局/平成22年度 国勢調査)

<http://www.stat.go.jp/info/shinsai/index.htm>

(※まちのちから/平成17年4月)

<http://machi.chizumaru.com/>

| 市町村名 | 死者数 | 人口 | 死亡率 |
|----------|------|---------|------|
| 1: 横野町 | 2人 | 466人 | 0.4% |
| 2: 栗林町 | 3人 | 735人 | 0.4% |
| 3: 鶯住居町 | 279人 | 3,618人 | 7.7% |
| 4: 片岸町 | 30人 | 862人 | 3.5% |
| 5: 箱崎町 | 70人 | 1,274人 | 5.5% |
| 6: 両石町 | 18人 | 636人 | 2.8% |
| 7: 新浜町 | 10人 | ※235人 | 4.3% |
| 8: 甲子町 | 13人 | 6,904人 | 0.2% |
| 9: 唐丹町 | 15人 | 2,003人 | 0.7% |
| 10: 大字平田 | 21人 | 3,751人 | 0.6% |
| A: 野田町 | 11人 | 2,779人 | 0.4% |
| B: 定内町 | 5人 | 1,645人 | 0.3% |
| C: 小佐野町 | 2人 | 1,277人 | 0.2% |
| D: 桜木町 | 1人 | ※250人 | 0.4% |
| E: 小川町 | 6人 | 1,689人 | 0.4% |
| F: 礼ヶ口町 | 1人 | 137人 | 0.7% |
| G: 住吉町 | 1人 | ※148人 | 0.7% |
| H: 上中島町 | 1人 | ※1,124人 | 0.1% |
| I: 源太沢町 | 2人 | 613人 | 0.3% |
| J: 八雲町 | 1人 | 320人 | 0.3% |
| K: 中妻町 | 12人 | 1,233人 | 1.0% |
| L: 千鳥町 | 4人 | ※309人 | 1.3% |
| M: 駒木町 | 2人 | ※133人 | 1.5% |
| N: 大渡町 | 9人 | 687人 | 1.3% |
| O: 只越町 | 40人 | 680人 | 5.9% |
| P: 天神町 | 3人 | 266人 | 1.1% |
| Q: 港町 | 3人 | ※123人 | 2.4% |
| R: 松原町 | 23人 | ※513人 | 4.5% |
| S: 糠石町 | 29人 | 838人 | 3.5% |
| T: 大平町 | 5人 | 799人 | 0.6% |
| U: 浜町 | 35人 | 913人 | 3.8% |
| V: 東前町 | 14人 | 374人 | 3.7% |
| W: 大町 | 20人 | ※543人 | 3.7% |

2011.7.12 現在

岩手県警調べ

対策

最悪のシナリオを想定して、土地利用計画や避難計画を策定する

壊れ方を予測できる技術を磨き、粘り強い構造物を建造する

想定外でも被害を最小化できるまちづくり

設計の方針

| 津波レベルの名称 | 定義 | 防護目標 | 計画・設計 |
|-----------------|-----------------------------------|---|--|
| 津波防護レベル (L1) | 数十年～百数十年に1回の頻度で発生すると考えられる津波 | <ul style="list-style-type: none">・人命を守る・財産を守る・経済活動の継続・発災直後に必要な沿岸部の機能の継続 | 堤内地の浸水を防止するよう計画・設計 |
| 津波減災レベル (L2) | 津波防護レベルをはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波 | <ul style="list-style-type: none">・人命を守る・経済的損失の軽減・大きな二次災害の防止・早期復旧 | 堤内地の浸水を許すが、破壊・倒壊をしにくくし、被害が拡大しないよう計画・設計 |

粘り強い構造

《防波堤に作用する津波波力、波浪波力の比較(釜石港湾口防波堤北堤深部の例)》

想定津波高(明治39年三陸大津波)

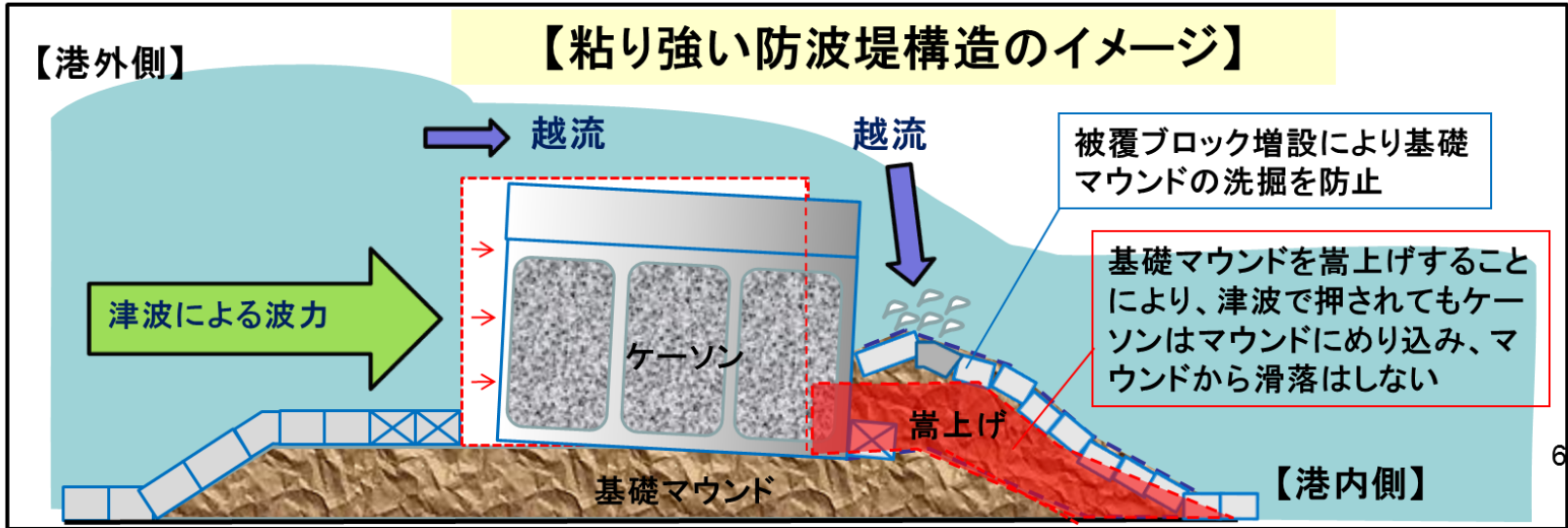
TP+4.8m
(水平波力: 1,135kN/m)

設計波浪高(断面はこれで決定)

$H_{max}=13.3m$ 、 $H_{1/3}=7.4m$
(水平波力: 2,373kN/m)

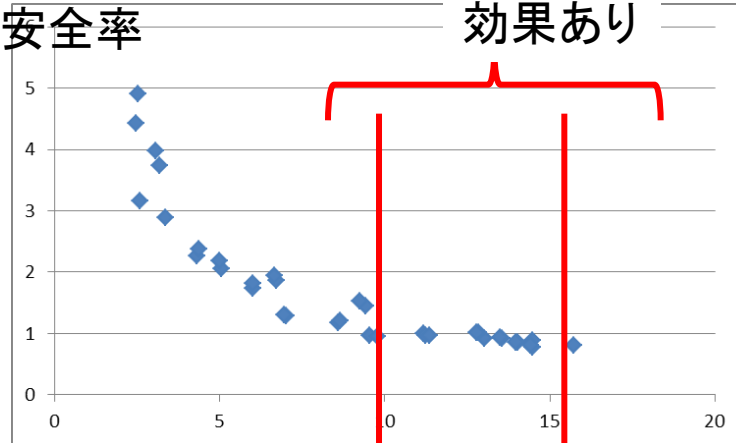
今回の津波高(シミュレーション)

TP+10.8m
(水平波力: 2,481kN/m)



6

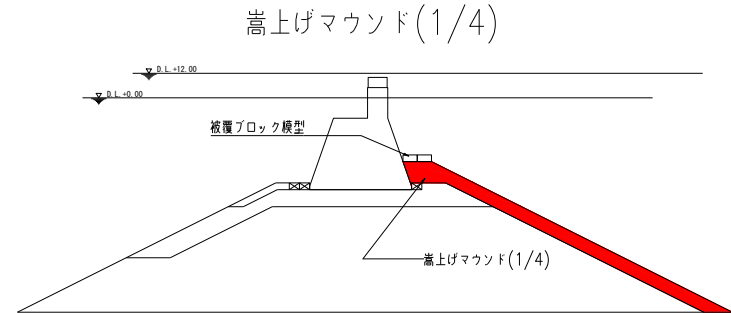
滑動安全率



水位差(m)現地換算

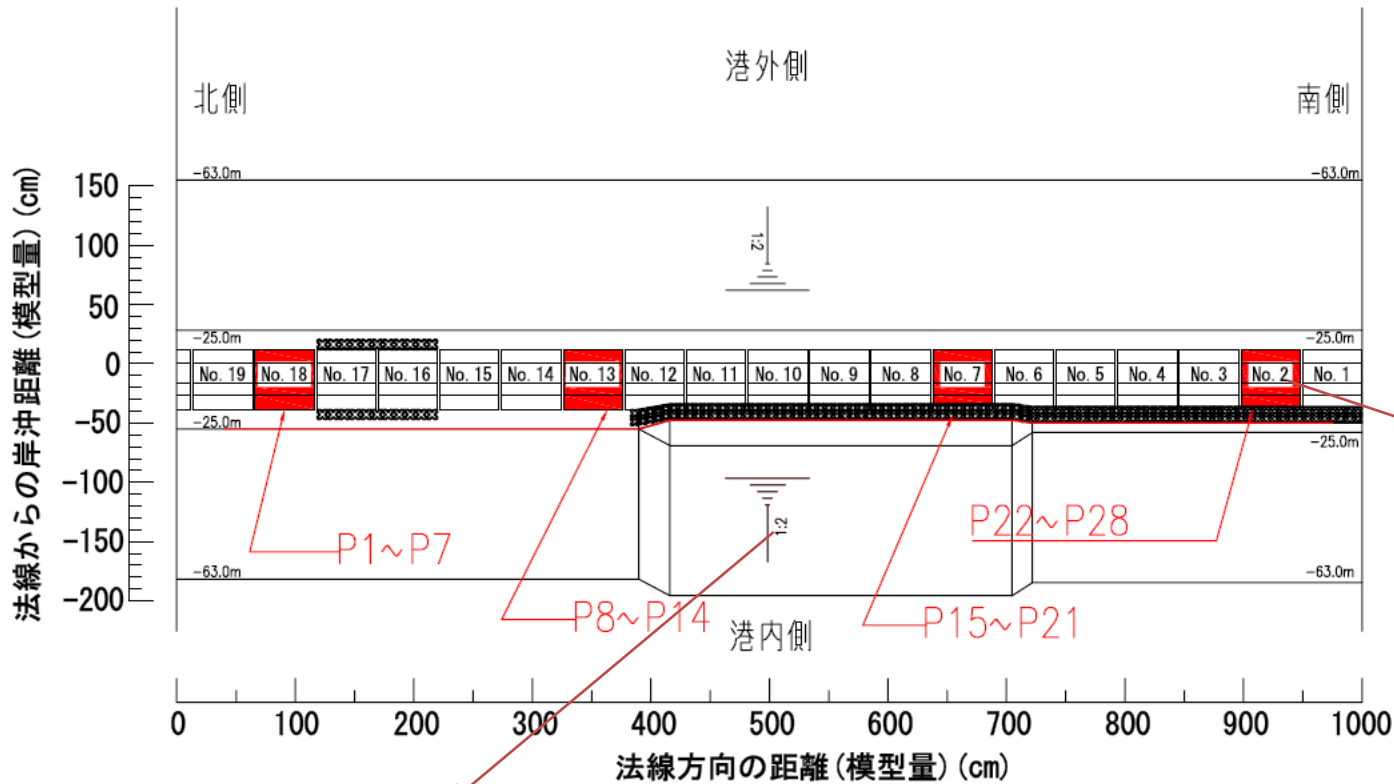
実験では、

腹付け高さをケーソン高さの1/4としたケース



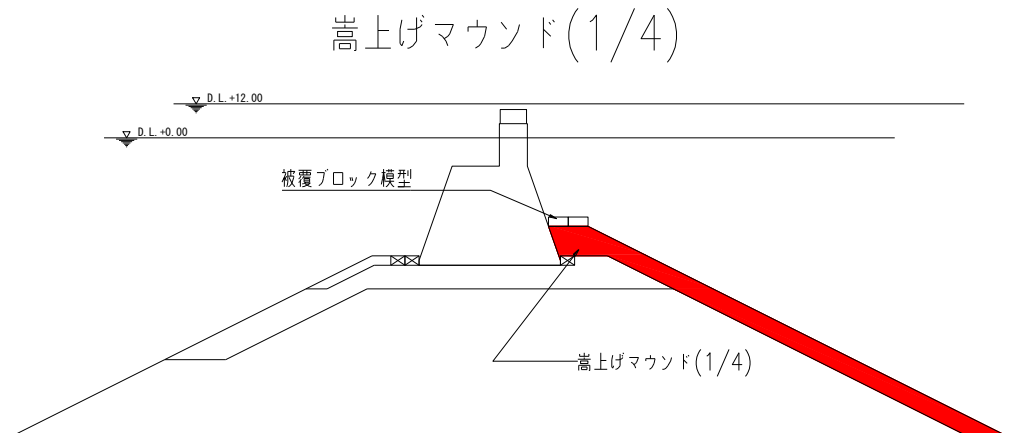
→ 背後の越流洗掘が課題

粘り強さに関する実験案

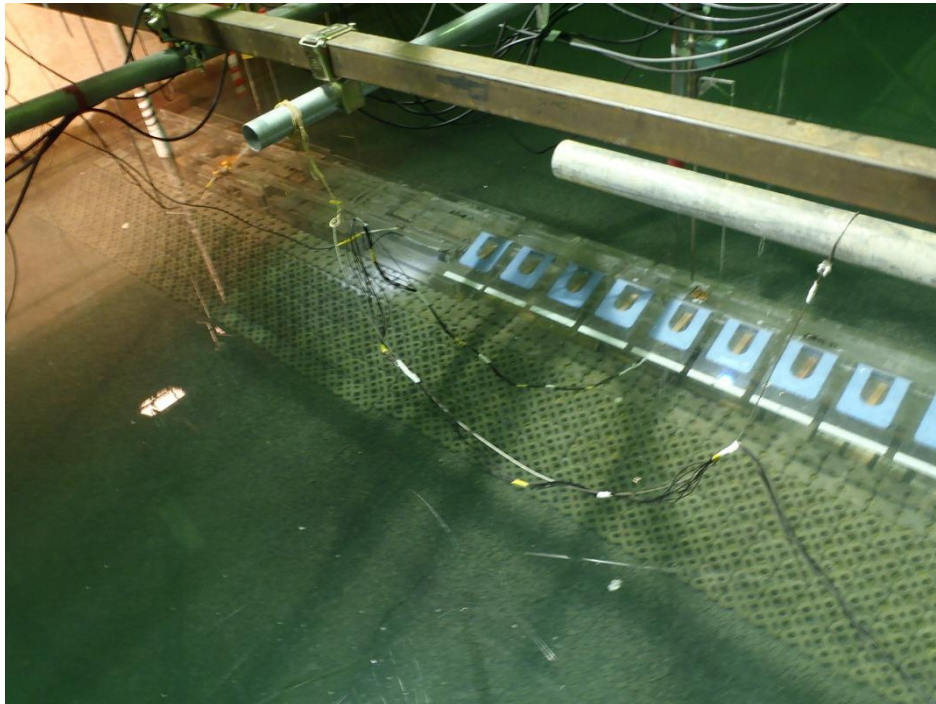
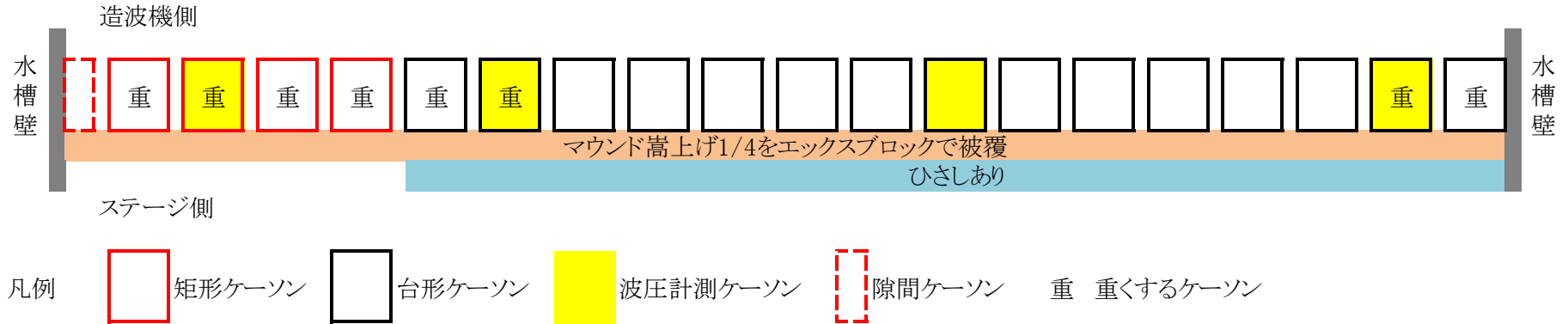


腹付け高さを
ケーソン高さの
1/8としたケース

腹付け高さを
ケーソン高さの
1/4としたケース

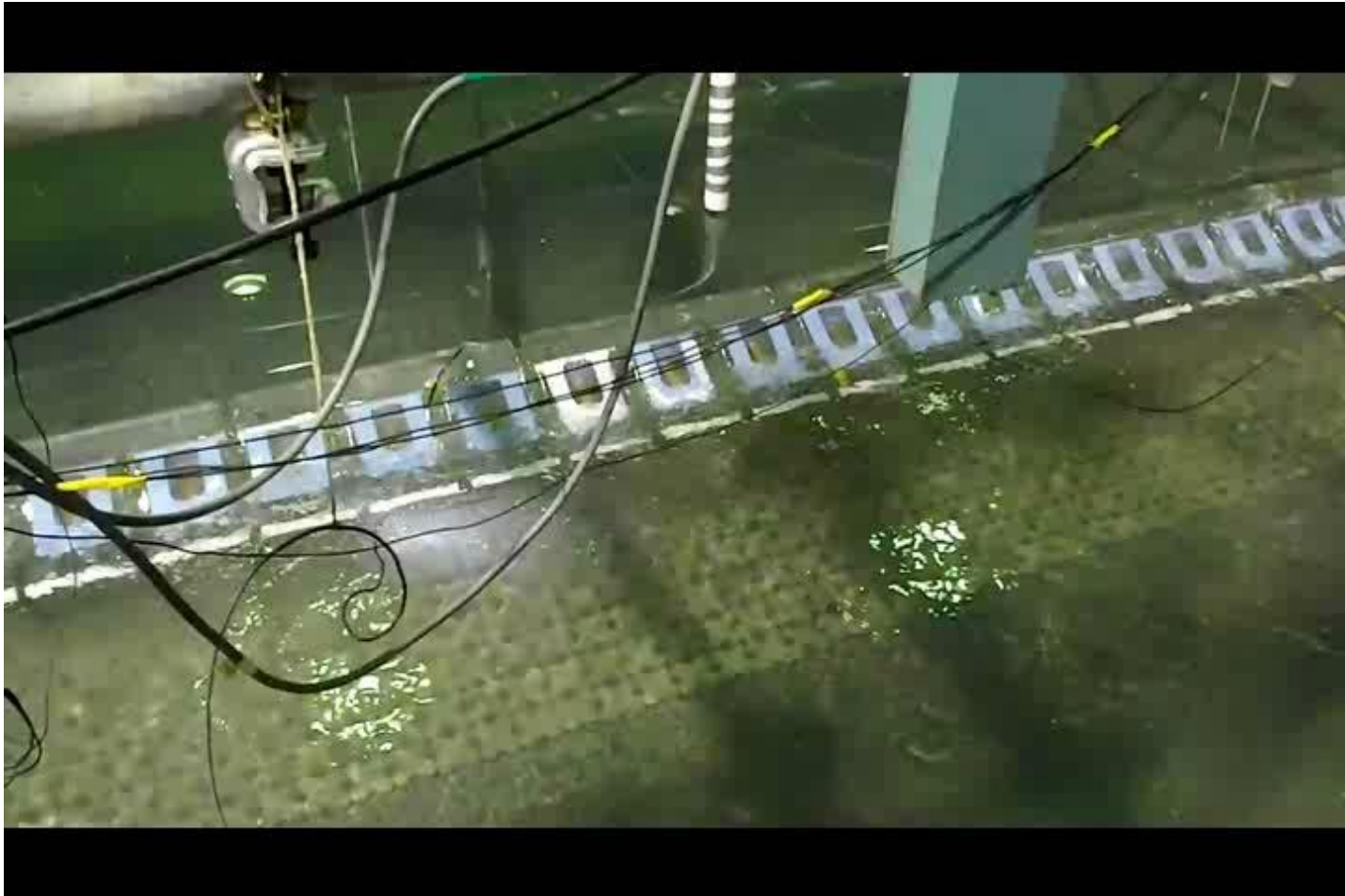


越流対策を施してみた実験



ひさしをつけることで越流の位置を変える

実験の様子



滑動安全率が1.0の状態

理想的なまち

