

【参考資料Ⅱ】

港湾構造物の津波による被害レビューと
防波堤の耐津波設計を行う上での留意点

目 次

Ⅱ－１ 本資料の位置づけ	1
Ⅱ－２ 防波堤の津波による被害	2
2. 1 はじめに	2
2. 2 東北地方太平洋沖地震に伴う津波による防波堤の被害	3
2. 2. 1 八戸港北防波堤（ハネ部）	3
(1) 防波堤位置	3
(2) 被災状況	3
(3) 被災前後の断面図	4
(4) 推定される被災要因	4
(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項	4
2. 2. 2 八戸港北防波堤（中央部）	6
(1) 防波堤位置	6
(2) 被災状況	6
(3) 被災前後の断面図	7
(4) 推定される被災要因	8
(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項	9
2. 2. 3 釜石港湾口防波堤	10
(1) 防波堤位置	10
(2) 被災状況	10
(3) 被災前後の断面図	11
(4) 推定される被災要因	12
(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項	12
2. 2. 4 大船渡港湾口防波堤	14
(1) 防波堤位置	14
(2) 被災状況	14
(3) 被災前後の断面図	15
(4) 推定される被災要因	16
(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項	16
2. 2. 5 相馬港沖防波堤	17
(1) 防波堤位置	17
(2) 被災状況	17
(3) 被災前後の断面図	18
(4) 推定される被災要因	18
(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項	19

2. 2. 6 地震動による防波堤の変形と津波被害	20
(1) 各港の沈下状況	20
(2) 今次津波被害を踏まえた特記事項	20
2. 3 北海道南西沖地震に伴う津波による防波堤の被害	21
(1) 被災状況	21
(2) 被災要因	22
II-3 防波堤以外の港湾構造物の津波による被害	23
3. 1 はじめに	23
3. 2 日本海中部地震に伴う津波による埋立護岸の被害	23
(1) 被災状況	23
(2) 被災要因	25
II-4 防波堤の耐津波設計を行う上での留意点	26

Ⅱ－１ 本資料の位置づけ

本資料は、「防波堤の耐津波設計ガイドライン 3. 2 防波堤の性能照査」にあたって参考となる津波による港湾構造物の被災状況について、東北地方太平洋沖地震（2011年）に伴う津波による防波堤の被災状況、北海道南西沖地震（1994年）に伴う津波による防波堤の被災状況、及び日本海中部地震（1983年）に伴う津波による埋立護岸の被災状況についてとりまとめ、これらを整理した上で、今後の防波堤の耐津波設計を行う上で重要となる留意点をとりまとめたものである。

防波堤の性能照査を行う際は、本資料を参考としつつも、性能照査時点での最新の知見に基づき適切に対応する必要があることに留意されたい。

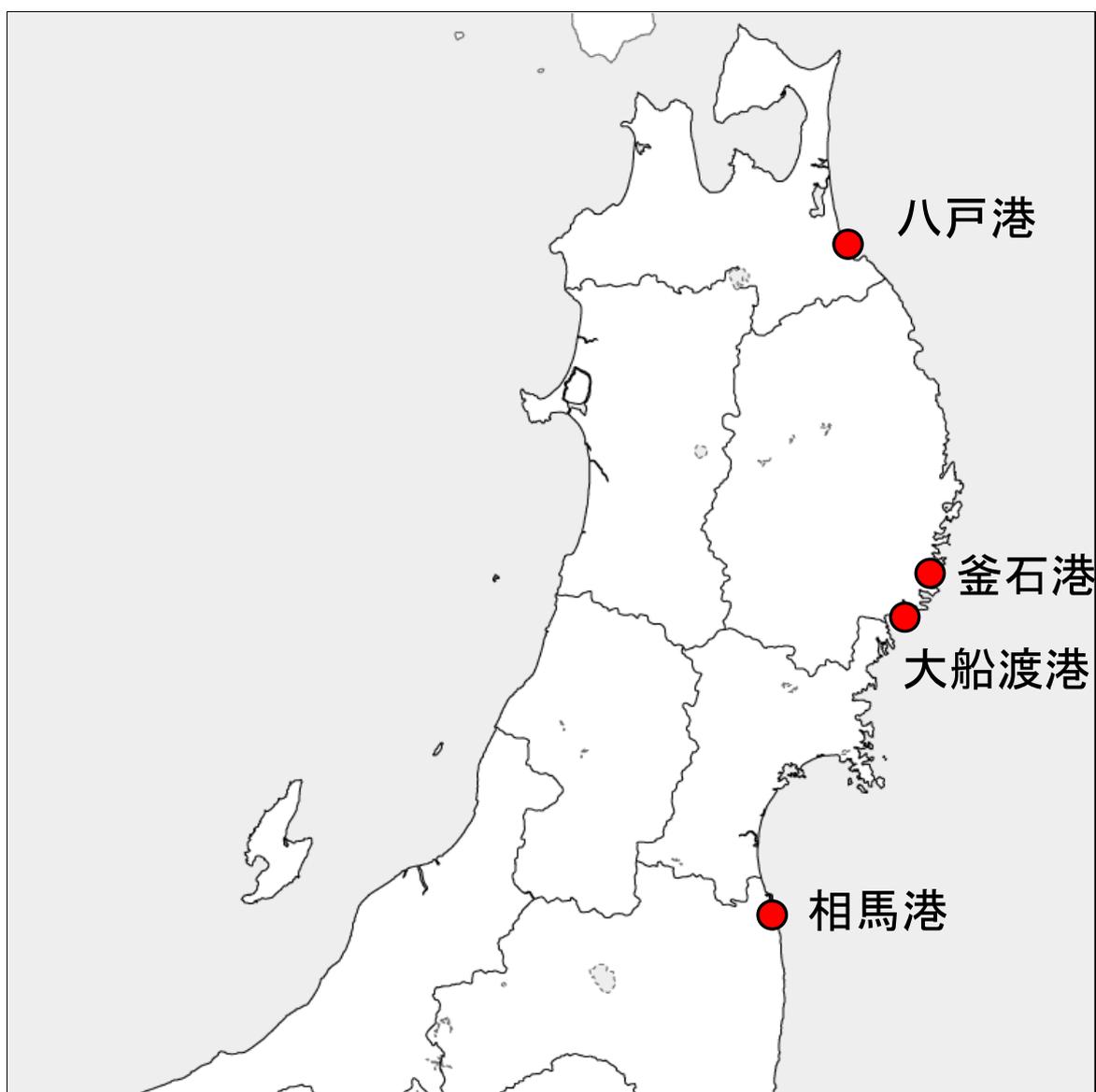
Ⅱ-2 防波堤の津波による被害

2. 1 はじめに

東北地方太平洋沖地震に伴う津波による防波堤の被災形態は、これまでの関係機関の調査・整理より、幾つかの要因（作用）が複合的に関連したことにより破壊に至るケースが見られた。

本章では、東北地方整備局、港湾分科会防災部会、関係機関等でまとめられた防波堤（八戸港、釜石港、大船渡港、相馬港）の被災状況と被災要因について整理した。

さらに、東北地方太平洋沖地震以外で防波堤が被災した事例として、北海道南西沖地震に伴う津波による防波堤の被災に関する情報を整理した。

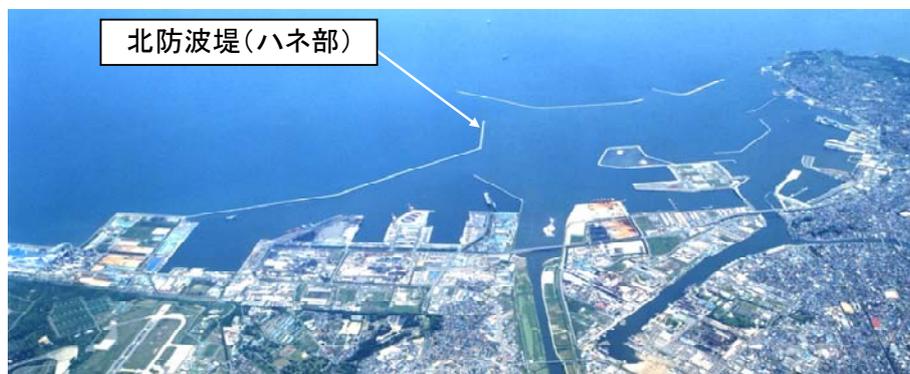


図Ⅱ-2.1 東北地方太平洋沖地震によって被災した防波堤の被災状況と被災要因を整理した港湾

2. 2 東北地方太平洋沖地震に伴う津波による防波堤の被害

2. 2. 1 八戸港北防波堤（ハネ部）

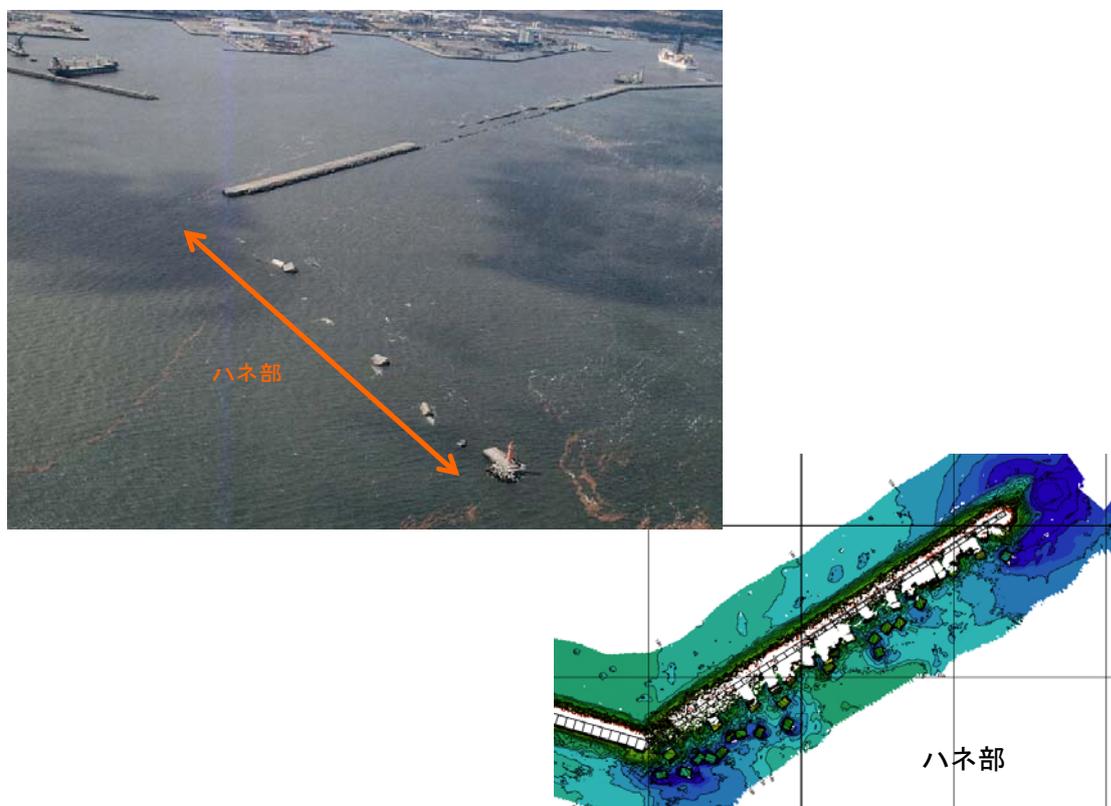
(1) 防波堤位置



図Ⅱ-2.2 八戸港北防波堤におけるハネ部の位置

(2) 被災状況

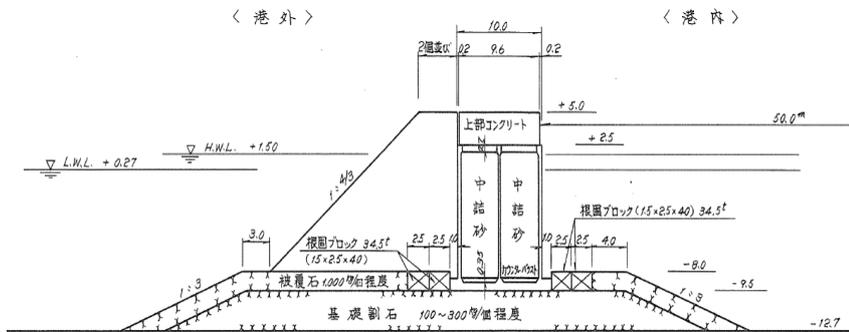
- ・北防波堤（ハネ部）においては直立部（44 函）が倒壊し、防波堤全延長約 700 m において被災した（図Ⅱ-2.3 左図）。また、倒壊した直立部は最大で 90 m 移動し、航路まで飛ばされたものもあった。
- ・消波ブロック・基礎マウンドは散乱した。
- ・堤頭部付近においては、海底地盤が局所的に大きく洗掘されていた（図Ⅱ-2.3 右図）。



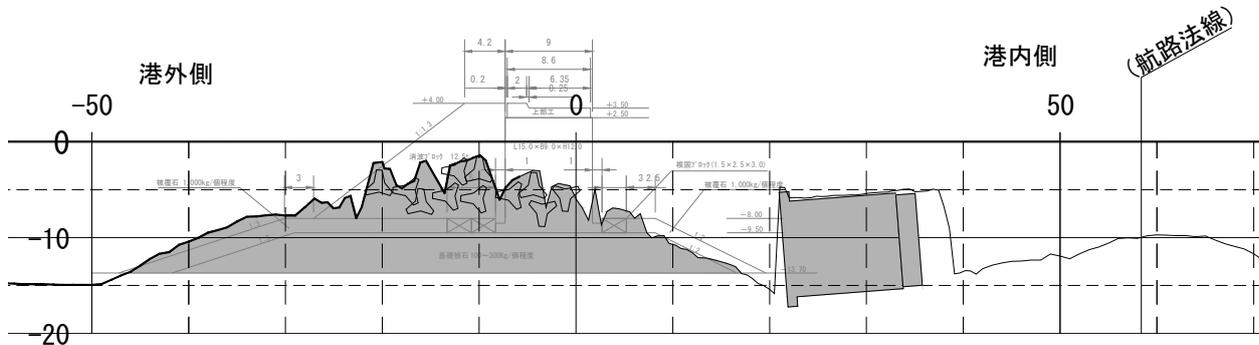
図Ⅱ-2.3 八戸港北防波堤（ハネ部）被災後の外観（左）と深浅図（右）

(3) 被災前後の断面図

【被災前】



【被災後】



図Ⅱ-2.4 八戸港北防波堤（ハネ部）の被災前後の断面

(4) 推定される被災要因

直接的な津波波力により直立部が滑動したと推定される。

(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項

a) 津波の特性

八戸港では第一波の後に、さらに大きい第二波（16:25頃）が来襲している。震央から遠く離れた港湾であったこと等の地理的な影響がこの原因であった可能性がある。

b) 防波堤の配置（防波堤に対する津波の入射角）

今次津波は、北防波堤（ハネ部）法線直角方向に近い角度で来襲してきたため、中央部と比べて安定性が低かった可能性がある。

c) 防波堤の配置（堤頭部・開口部・隅角部）

北防波堤の堤頭部は開口部に位置するため、津波の流れが速く、海底地盤が大きく洗掘を受けた可能性がある。

隅角部についても同様に湾内の狭隘部であることから、流速が速くなり、洗掘が生じたものと考えられる。

d) 消波工の影響

堤頭部は消波ブロックが直立部を取り囲むように据え付けられていた。北防波堤（ハネ部）の中で現況を保っているのは堤頭部だけであり、ケーソン背面の消波ブロックが受働抵抗の役割を担い結果的に被災を免れた可能性がある。

2. 2. 2 八戸港北防波堤（中央部）

(1) 防波堤位置



図Ⅱ-2.5 八戸港北防波堤における中央部の位置

(2) 被災状況

- ・北防波堤（中央部）の約 50%に相当する、延長約 750 m で直立部（ケーソン 60 函）が倒壊している。
- ・11 工区にはケーソンが全 43 函設置されていたが、そのうち 15 函が大きく移動した。
- ・倒壊した直立部は傾斜したものが多い。
- ・直立部が比較的健全な箇所でも、直立部背面の基礎マウンドの洗掘など、防波堤の安定性能が大きく損なわれている。
- ・倒壊した直立部背面では局所的に大きな洗掘が生じている。



図Ⅱ-2.6(a) 八戸港北防波堤に來襲する津波



図Ⅱ-2.6(b) 八戸港北防波堤（中央部）の被災状況。北防波堤中央部 11 工区から 15 工区までの被災状況外観（左）と側面から見た被災状況（右）

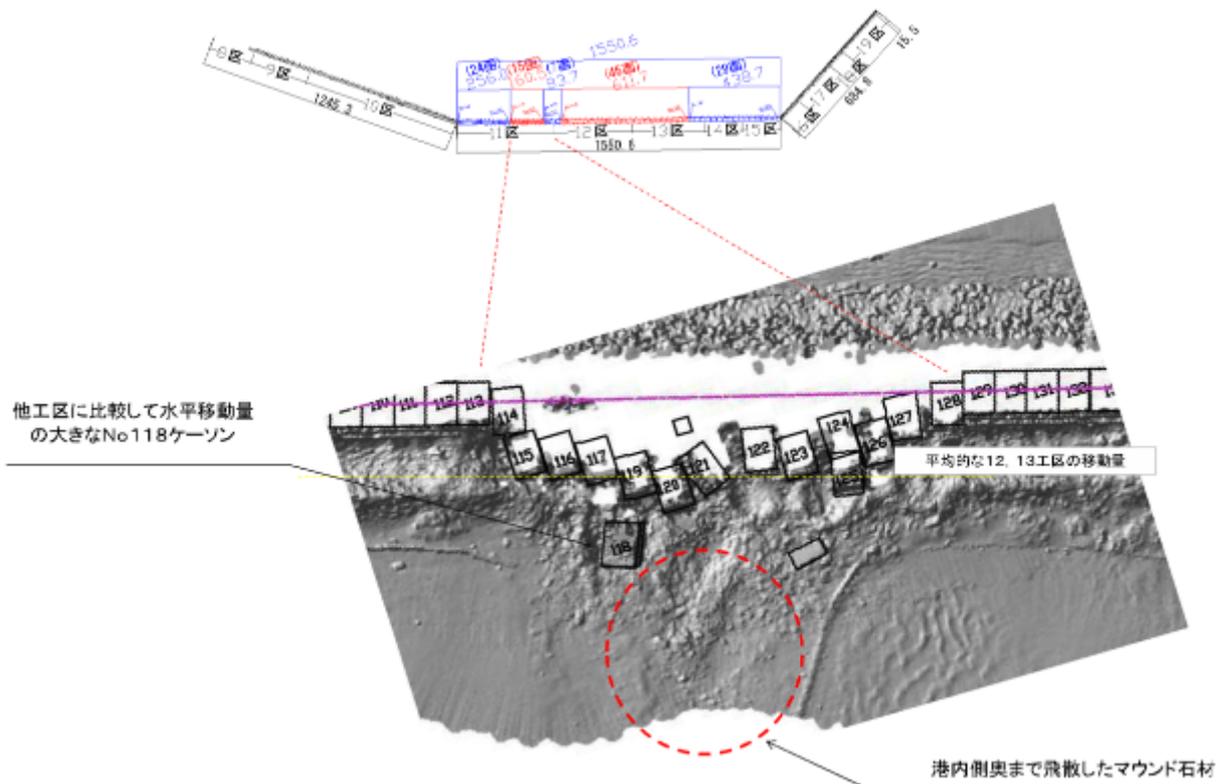
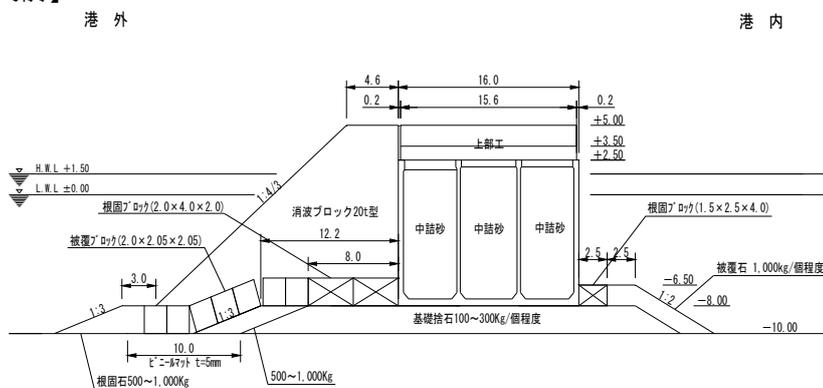


図 II-2.6 (c) 八戸港北防波堤（中央部）の被災状況。北防波堤中央部（11工区）被災状況

(3) 被災前後の断面図

【被災前】



【被災後】

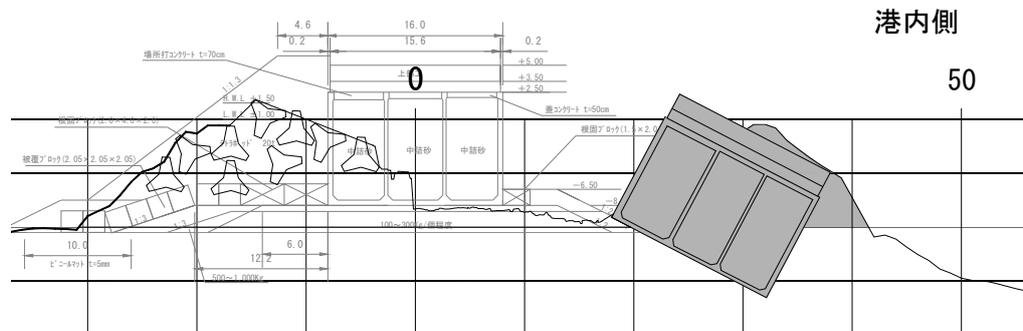
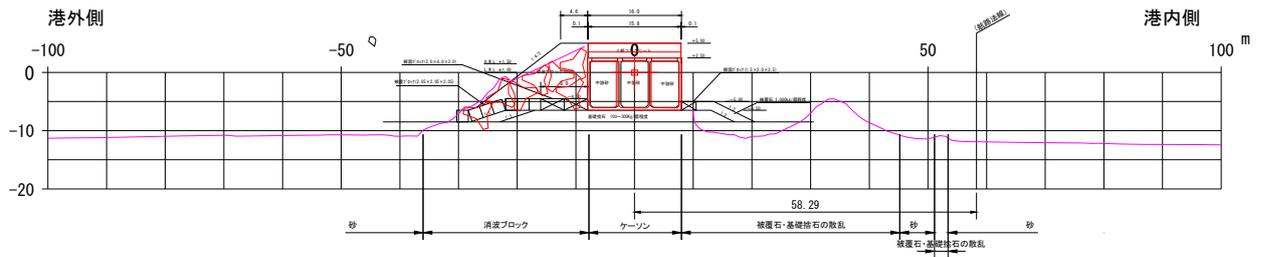
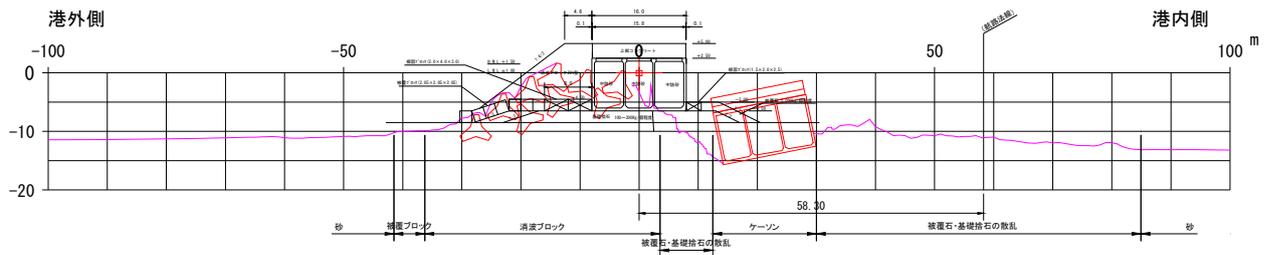


図 II-2.7 八戸港北防波堤（中央部）の被災前後の断面



(a) ケーソン No.110



(b) ケーソン No.116

図 II-2.8 八戸港北防波堤（中央部）11 工区の被災断面。ケーソン No.は図 II-2.6 を参照

(4) 推定される被災要因

防波堤の滑動抵抗力と等しくなる水平力を引き起こす津波水位を滑動限界津波水位とし（谷本式による算定）、実際の津波水位と比較すると安定性は確保されていた（図 II-2.9(a)）。

このことから、八戸港北防波堤の被災は、単純な滑動によるものではない可能性がある。

防波堤被災後の直立部転倒状況や海底面の洗掘状況より、上部工から越流した津波が背面マウンドを洗掘し、滑動または支持力の低下を引き起こしたことで直立部が倒壊した可能性が考えられる（図 II-2.9(b)）。

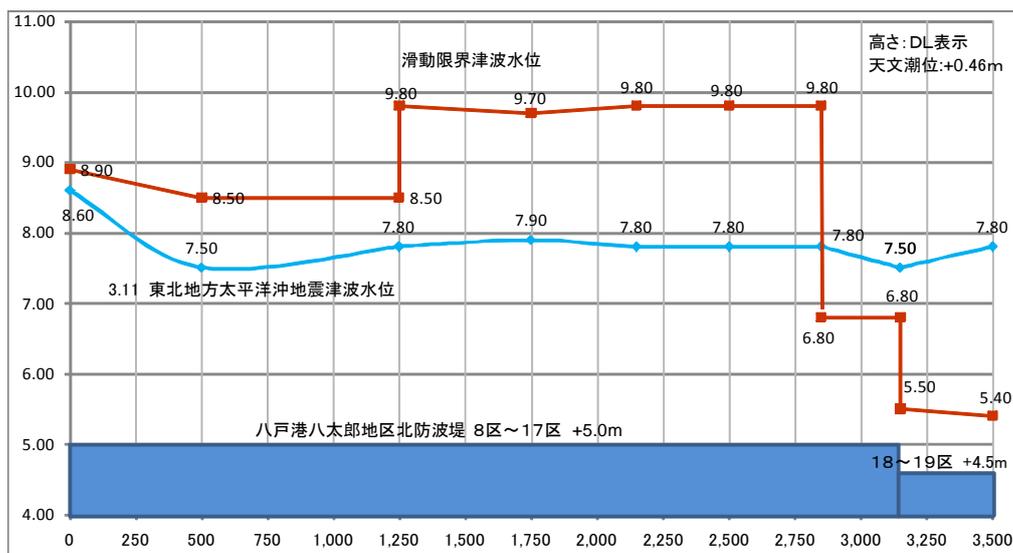


図 II-2.9(a) 八戸港北防波堤における滑動限界津波水位と津波水位との関係。中央部は 11 工区から 15 工区。

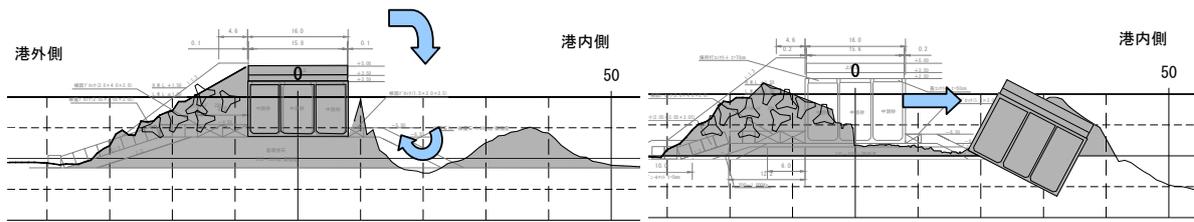


図 II-2.9 (b) 推定される八戸港北防波堤の被災メカニズム

(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項

a) 津波の特性

八戸港では第一波の後に、さらに大きい第二波（16:25 頃）が来襲している。震央から遠く離れた港湾であったこと等の地理的な影響がこの原因であった可能性がある。

b) 越流の影響

北防波堤（中央部）は、事後検証により、津波波力に対しては安定性が十分に確保された構造物であった可能性があるが、第二波の津波来襲の際に、上部工からの越流水塊により、背面の基礎マウンドが洗掘を受け、最終的に直立部が滑動または支持力不足により倒壊した。

c) 防波堤の設置水深

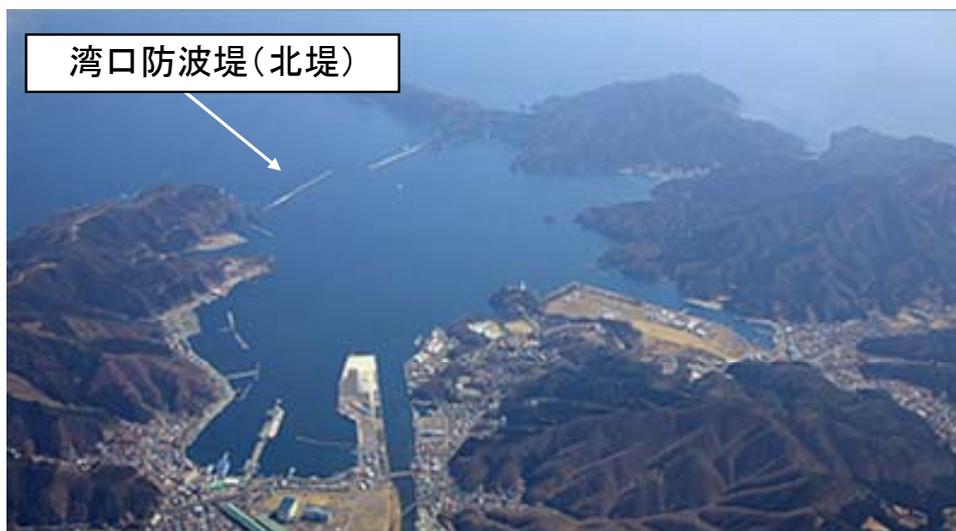
北防波堤（中央部）は、海底地盤が-10 m 程度と浅い海域に設置されており、また港内側の基礎マウンド法肩幅も小さい形状であったため、越流水塊が海底地盤面に直接作用して、洗掘が進行した可能性がある。

d) 消波工の効果

北防波堤（中央部）では、消波工は残ったまま直立部の半分が倒壊しており、消波工による津波波力低減効果はないものと考えられる。

2. 2. 3 釜石港湾口防波堤

(1) 防波堤位置



図Ⅱ-2.10 釜石港湾口防波堤の外観

(2) 被災状況

直立部が港内側へ滑落・散乱する一方、残存しているケーソンもある。北堤では浅部がほぼ全壊（散乱）、深部では直立部の滑落と残存による歯抜けの状態となっている。



図Ⅱ-2.11 釜石港湾口防波堤における津波来襲時状況

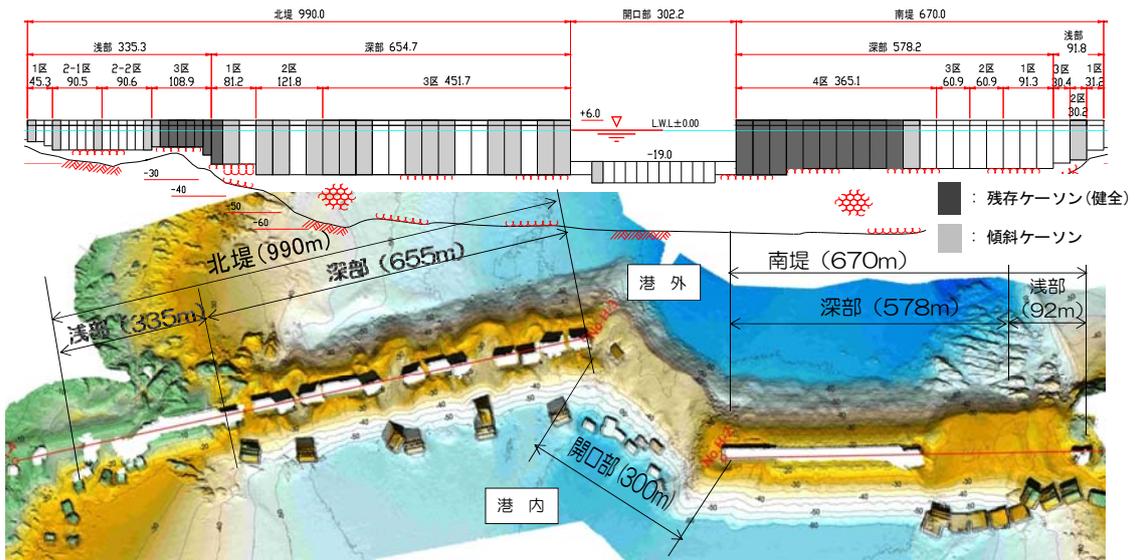
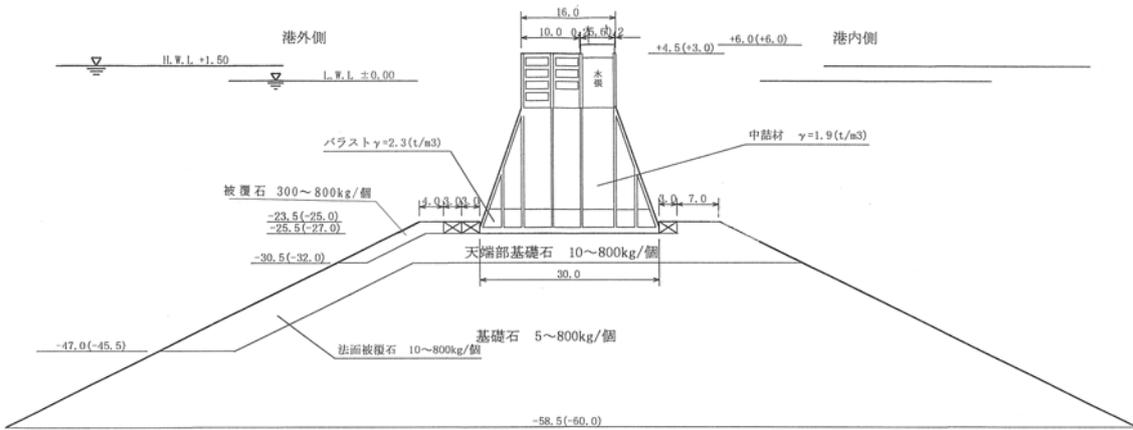


図 II-2.12 釜石港湾口防波堤の被災状況

(3) 被災前後の断面図

【被災前】



【被災後】

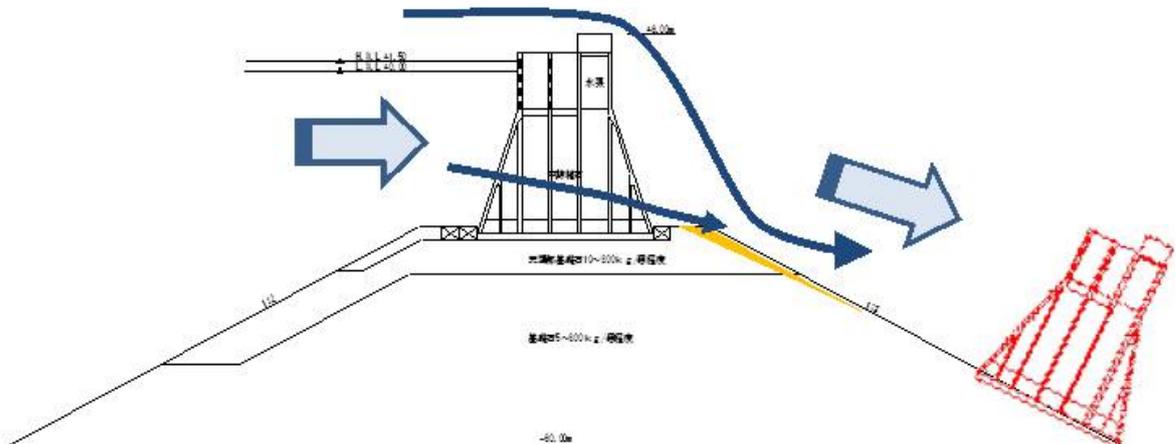
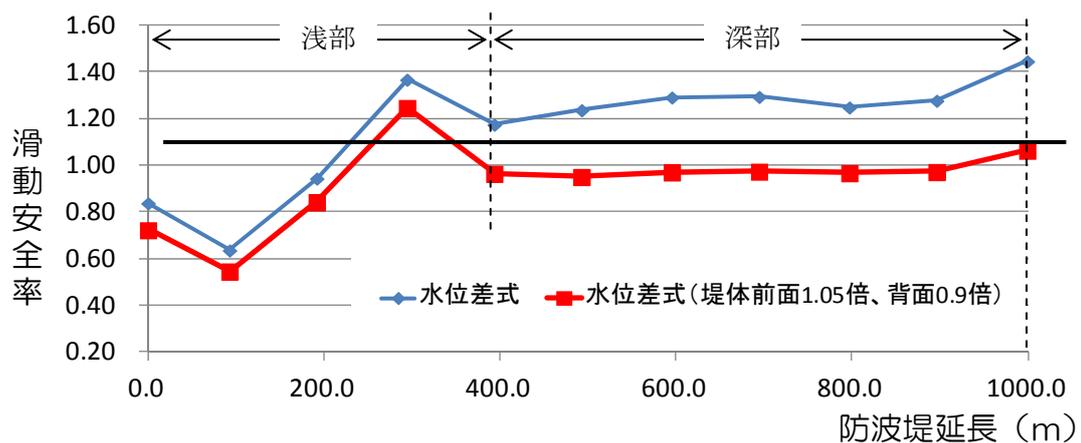


図 II-2.13 釜石港湾口防波堤の被災前後の断面

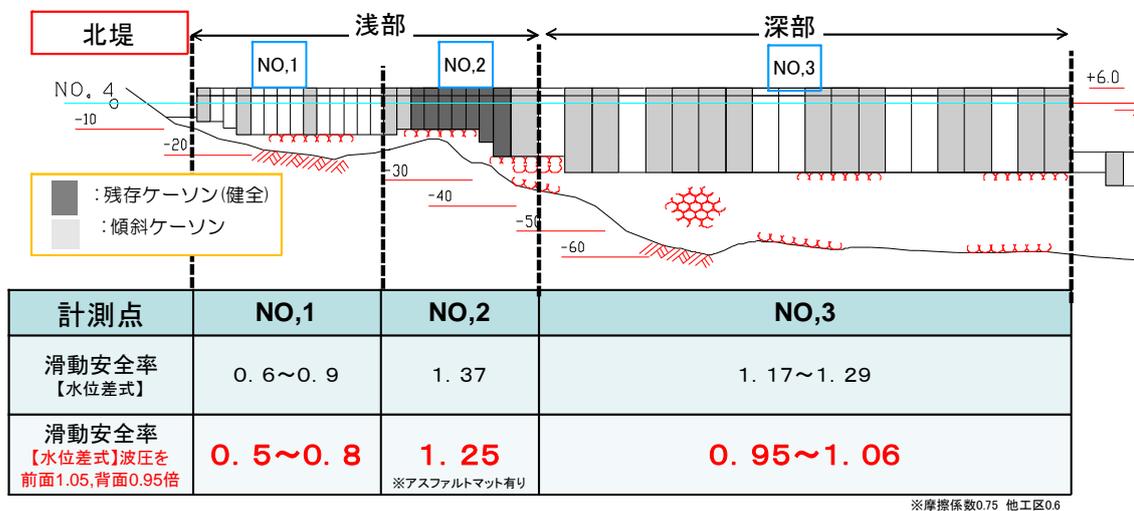
(4) 推定される被災要因

釜石港湾口防波堤浅部の直立部は今次津波に対して滑動安全率が低く (図Ⅱ-2.14)、はじめに直立部が滑動して、基礎マウンドから滑落した可能性が高い。その後引き続き来襲した津波により、深部の直立部も滑落したものと推察される。

直立部の滑落の有無にはばらつきがあるが (図Ⅱ-2.12)、これは、摩擦係数のばらつき、鉛直方向の力のばらつき、洗掘状況のばらつき等によってもたらされたものと考えられる。



(a) 北堤 水位差式による滑動安全率



(b) 北堤 水位差式による滑動安全率

図Ⅱ-2.14 釜石港湾口防波堤における津波来襲時滑動安全率

(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項

a) 越流の影響 (直立部に作用する水平力)

釜石港湾口防波堤は津波が越流した後に滑落したことが推察されている。釜石港湾口防波堤をモデルとした水理実験においては、港外側の波圧が増加し、一方で港内側の波

圧は負圧になるまで低下することが確認されており、この港の内外での圧力差により防波堤が滑動したものと考えられる。

2. 2. 4 大船渡港湾口防波堤

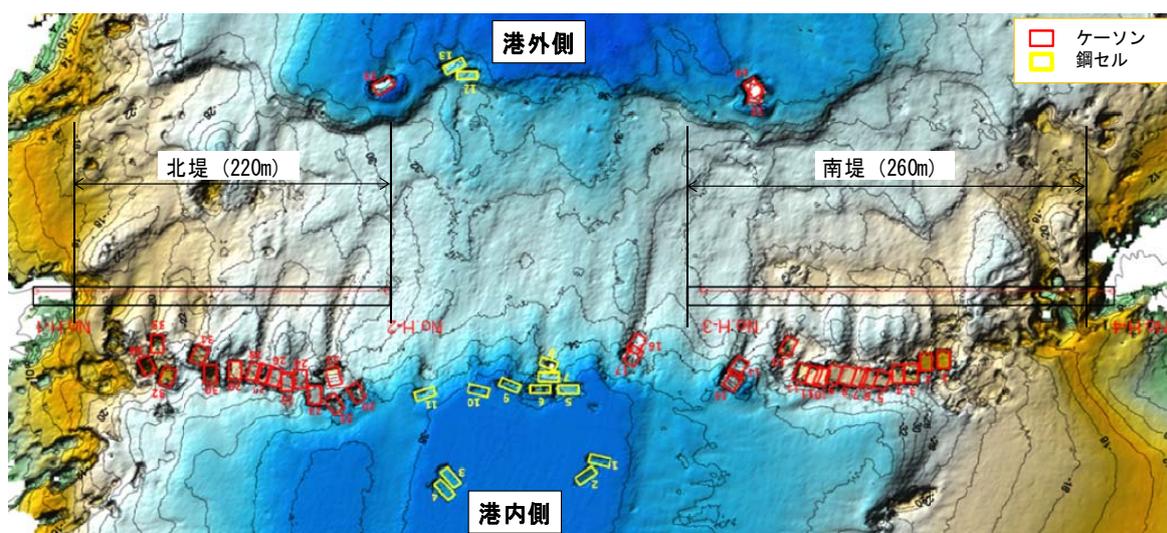
(1) 防波堤位置



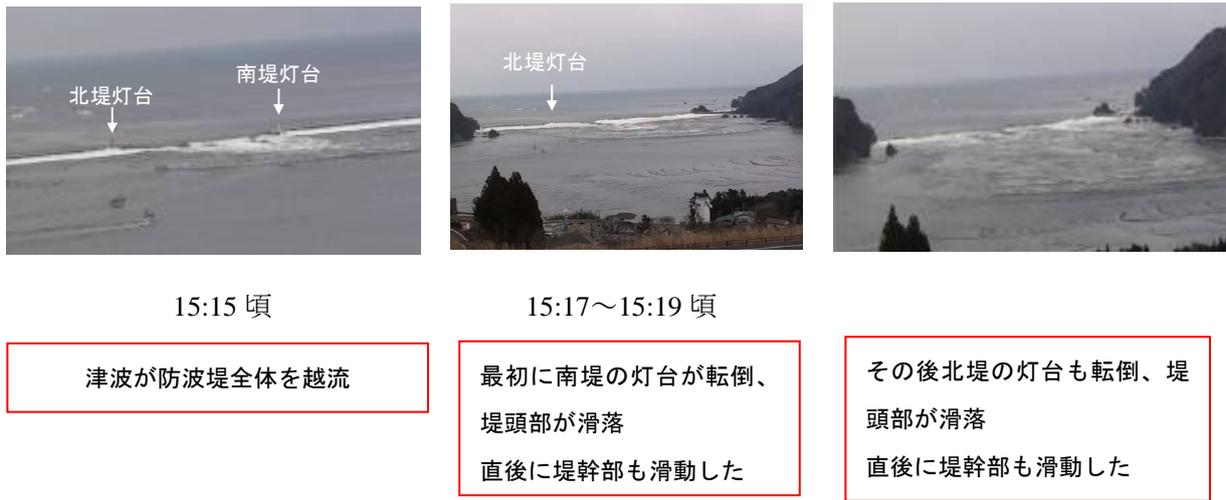
図Ⅱ-2.15 大船渡港湾口防波堤の外観

(2) 被災状況

取付部を除き、ほとんどの直立部が基礎マウンドから港内側へ滑落している。また基礎マウンドもほぼ全長に渡り、石材が流出し、天端高が5～10 m程度下がっている状態である。



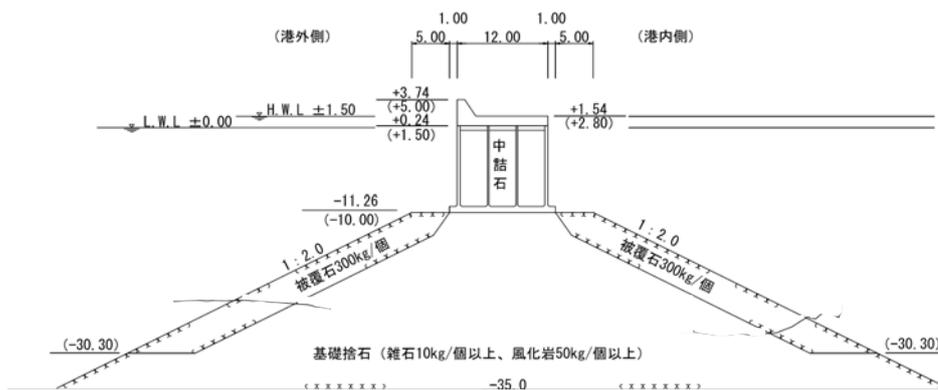
図Ⅱ-2.16 大船渡港湾口防波堤の被災状況



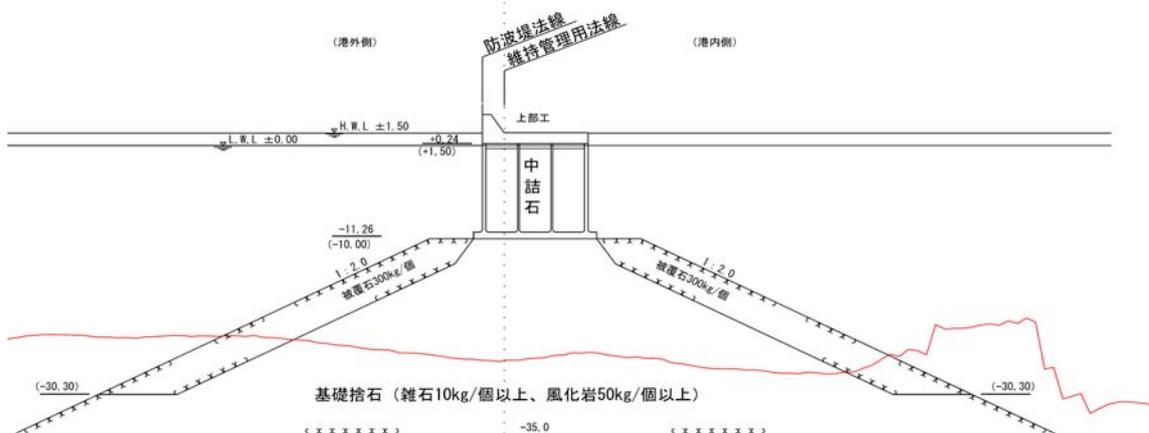
図Ⅱ-2.17 大船渡港湾口防波堤における津波来襲時状況

(3) 被災前後の断面図

【被災前】



【被災後】



図Ⅱ-2.18 大船渡港湾口防波堤の被災前後の断面

(4) 推定される被災要因

大船渡港湾口防波堤の滑動抵抗力と等しくなる水平力をもたらす水位を谷本式で算出し、滑動限界津波水位とすると、今次津波は滑動限界津波水位より6 m程度大きく、防波堤の被災は滑動によってもたらされた可能性が高い。

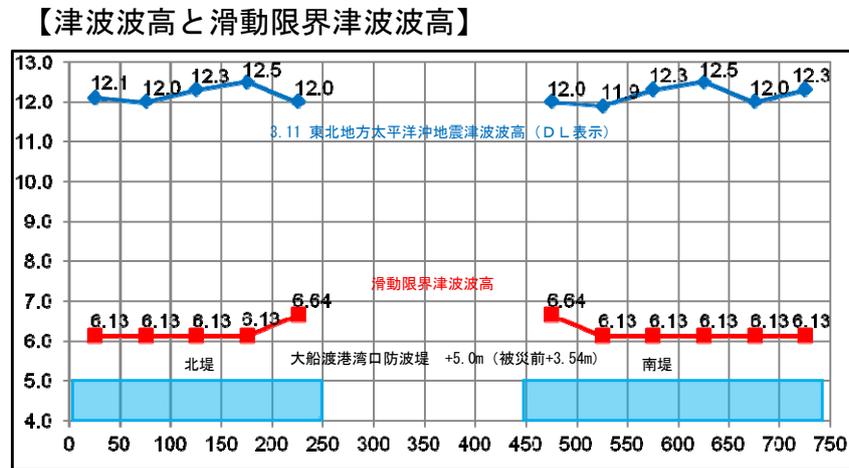


図 II-2.19 大船渡港湾口防波堤における滑動限界津波水位と津波水位との関係

(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項

a) 越流の影響（直立部に作用する水平力）

津波が防波堤を越流後、直立部が滑落しているため、港内外の水位差による津波外力を主要因として被災した可能性がある。直立部だけでなく、基礎マウンドも防波堤全延長にわたり大きく流失していることが本施設に特徴的な被災形態であり、復旧の際は、基礎マウンドからの構築となる。

2. 2. 5 相馬港沖防波堤

(1) 防波堤位置

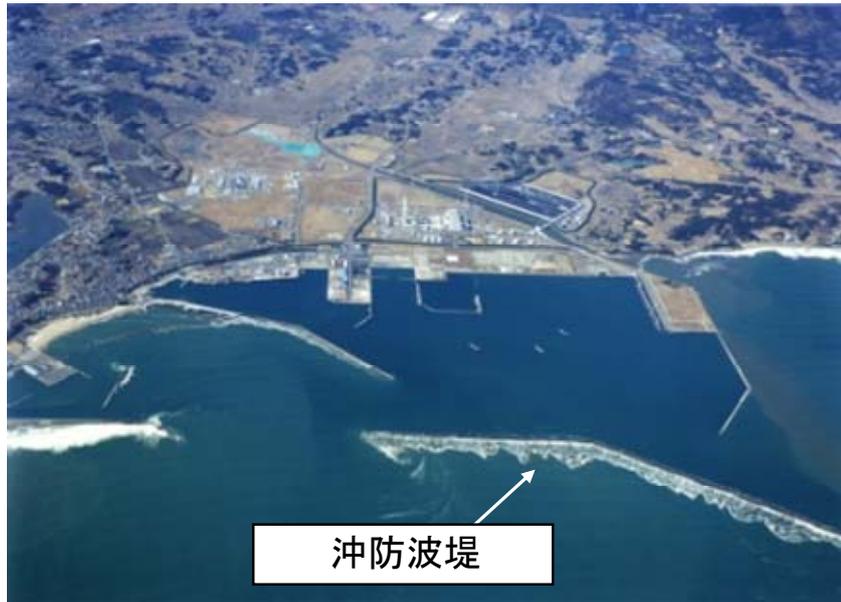


図 II-2.20 相馬港沖防波堤の外観

(2) 被災状況

- ・ 沖防波堤の延長 2,700 m のほぼ全域にわたり、直立部の滑動が生じた。
- ・ 一部の直立部では上部工がケーソンから滑落した。
- ・ 直立部が大きく移動した堤体の開口部では、強い流速が発生したことが要因と見られる、局所的な洗掘が発生している。ただし、堤頭部の被災はなかった。

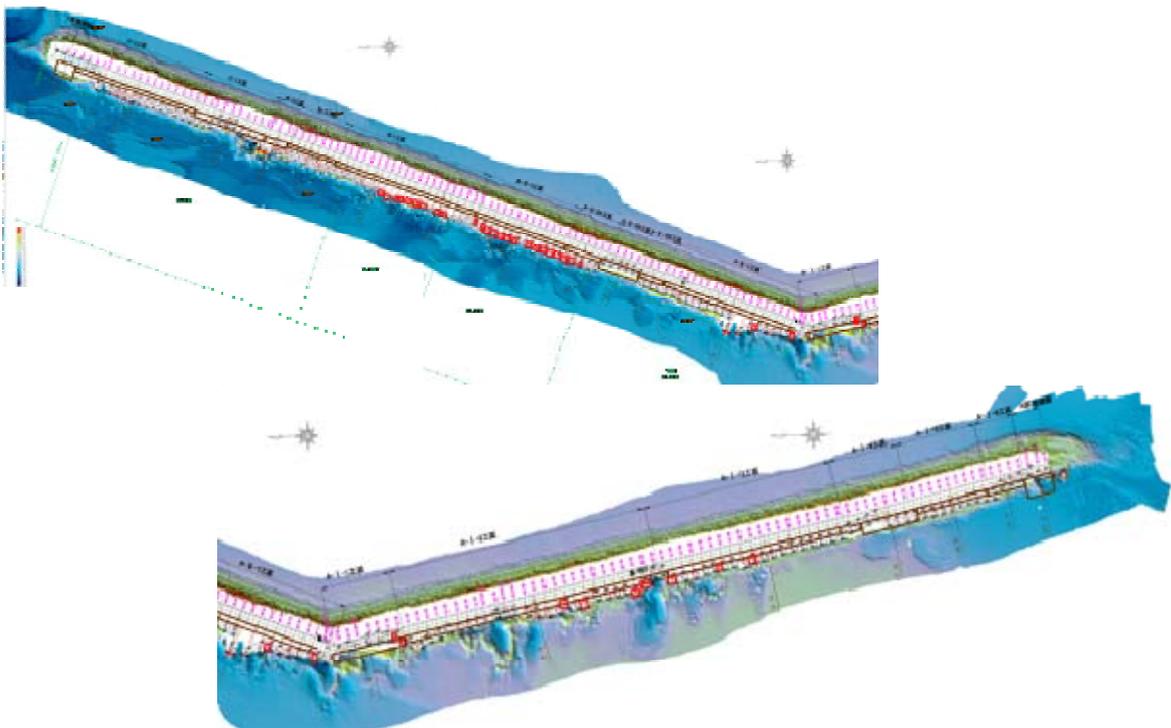
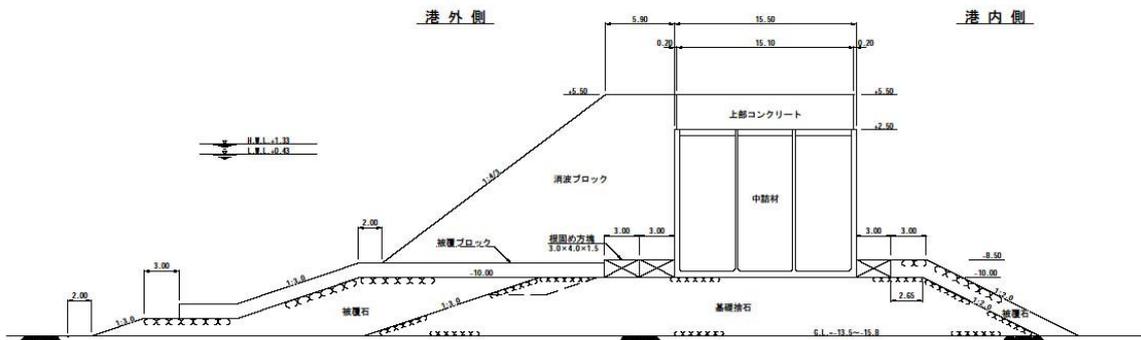


図 II-2.21 相馬港沖防波堤の被災状況

(3) 被災前後の断面図

【被災前】



【被災後】

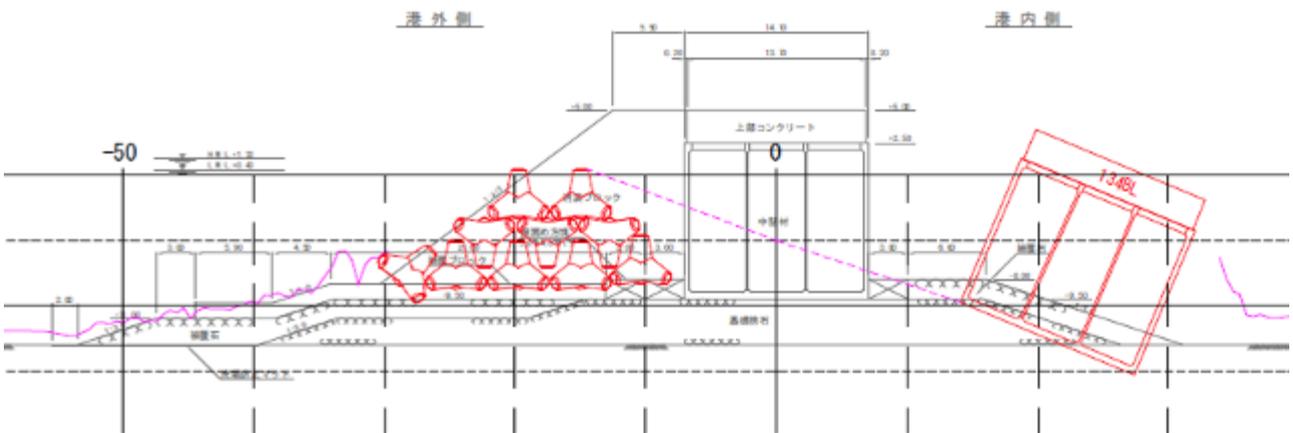


図 II-2.22 相馬港沖防波堤の被災前後の断面

(4) 推定される被災要因

相馬港沖防波堤では、津波高が滑動限界津波高を超えており、津波波力により直立部が滑動したものと推察される。

【津波波高と滑動限界津波高】

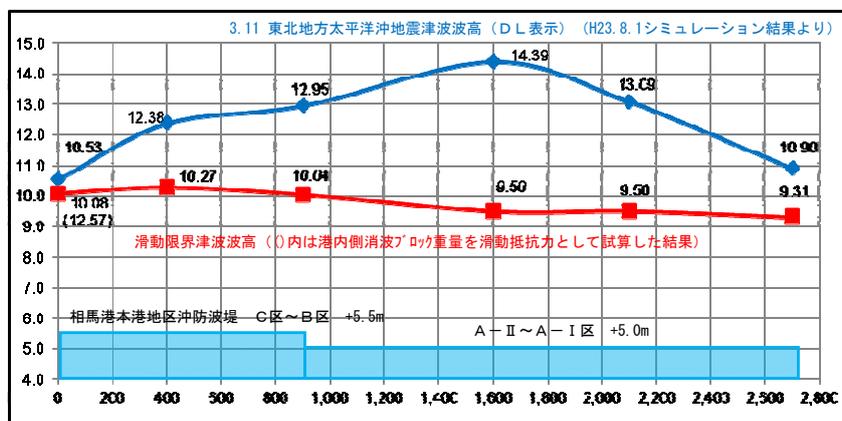


図 II-2.23 相馬港沖防波堤における滑動限界津波水位と津波水位との関係

(5) 今次津波被害を踏まえた特記事項

a) 防波堤の配置（堤頭部）

沖防波堤の堤頭部では津波の流れが必然的に速くなるため、海底地盤が大きく洗掘を受けた可能性がある。

b) 消波工の効果（消波工の波力低減効果）

堤頭部は消波工が直立部を取り囲むように据え付けられている。そのため、直立部背面の消波ブロックが受働抵抗の役割を担い、結果的に被災を免れた可能性がある。

2. 2. 6 地震動による防波堤の変形と津波被害

今次地震による防波堤被害の多くは、津波波力による堤体の滑動、転倒といった被害が多く見られたが、先行する地震動による影響とみられる被害（主に堤体の沈下）も少なからず確認されている。

(1) 各港の沈下状況

以下に各港の防波堤の沈下状況について整理を行った。

表Ⅱ-2.1 各港における防波堤の沈下状況

港湾	地震動による沈下の可能性のある施設数(カッコ内は資料収集した全施設数)	津波に起因しないと考えられる沈下量 (cm)	地殻変動沈降量 (cm)	沈下量－地殻沈降量 (cm)	気象庁震度階	津波高 (m)
八戸港	0 (1)	0	0	0	5弱	6.2
久慈港	0 (2)	0 - 15	12	0		8.5
宮古港	11 (13)	50 - 115	53	0 - 60	5弱	8.5
釜石港	1 (1)	90	70	約20	6弱	8.1
石巻港	1 (1)	最大: 250 平均: 170程度	71	最大: 180 平均: 100程度	6弱	5
仙台塩釜港 仙台地区	4 (4)	平均 75 - 95	28	平均 50 - 70	6強	8
相馬港	1 (2)	50 - 80	30	20 - 50	6強	9.3以上
小名浜港	2 (2)	30 - 110	40	0 - 70	6弱	3.3以上
茨城港常陸 那珂港区	2 (3)	最大: 140 平均: 70程度	22	最大: 120 平均: 50程度	6弱	5.1
鹿島港	0 (3)	0	12		5強 15:15茨城県沖 で6弱	6.8

(2) 今次津波被害を踏まえた特記事項

a) 地殻変動および海底地盤の沈下

石巻港、釜石港付近で最大の沈下量（約 10 cm～70 cm 程度）

b) 地殻変動以外の要因による防波堤の沈下

仙台塩釜港～相馬港～常陸那珂港の比較的地震動の加速度が大きい沿岸部で沈下が顕著（沈下なし～最大 1.8 m 程度）

2. 3 北海道南西沖地震に伴う津波による防波堤の被害

高山(1994) 1-17) を基に、北海道南西沖地震に伴う津波による港湾施設の被災状況と被災要因の特徴を以下に示す。

(1) 被災状況

1993年7月12日に発生した北海道南西沖地震により巨大津波が発生し、地震発生から5分で北海道奥尻島に襲撃して奥尻港、江差港、青苗漁港および神威脇漁港で港湾・海岸構造物が被災した。最も大きい被害は奥尻港の防波堤と護岸である。

奥尻港は島東部のやや北寄りに位置し、ほぼ北側から襲撃した津波によって防波堤(北)、防波堤(東外)と防波堤(東B)堤頭部(開口部)が被災している。以下に奥尻港の被災状況および被災の特徴を示す。

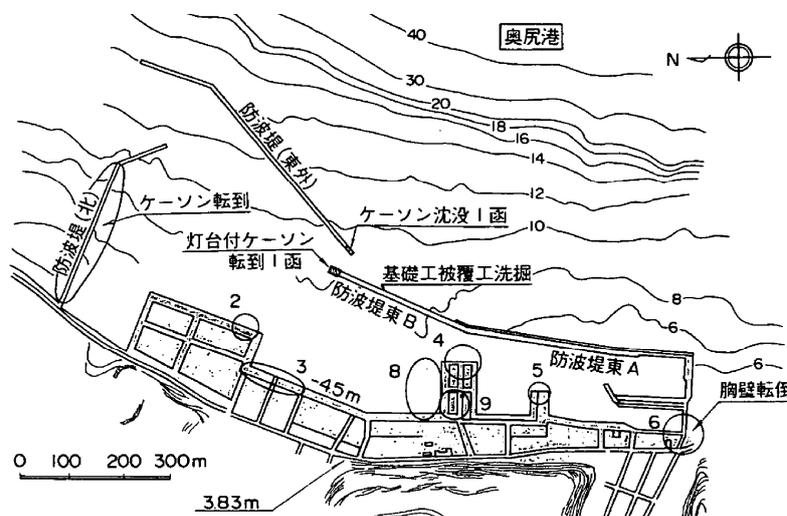


図 II-2.24 奥尻港被災状況位置図

a) 防波堤(北)について

防波堤(北)は図 II-2.25 に示すように直立部が港内側へ移動、あるいは転倒している。また、基礎マウンドの港内側は大きく洗掘されており、港内側の1列の根固方塊と被覆ブロックが大きく散乱している状態である。

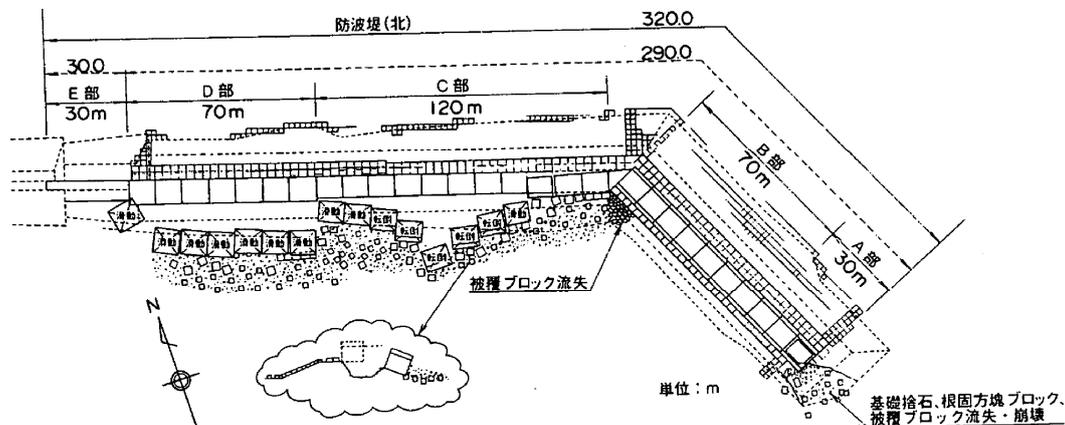


図 II-2.25 奥尻港防波堤(北)被災状況

b) 防波堤（東）および防波堤（東外）について

防波堤（東）は、沖側の防波堤（東外）と陸側の防波堤（東 B）、（東 A）から形成されており、防波堤（東外）と（東 B）の間に船通しのため開口部が設けられていた。防波堤（東外）と（東 B）はそれぞれの堤頭部のマウンドが洗掘され、開口部の 1 函ずつが沈下・転倒していた。（図 II-2.26、図 II-2.27 参照）

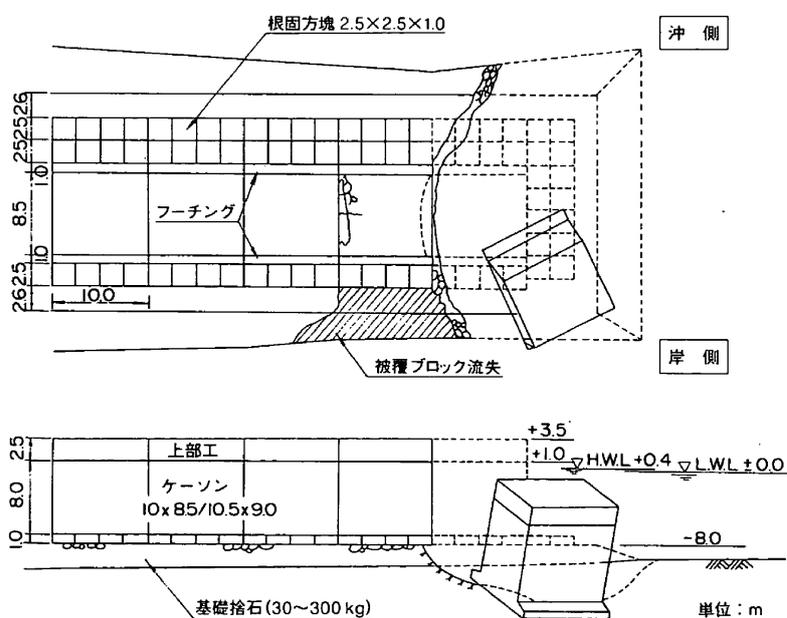


図 II-2.26 奥尻港防波堤（東外）の基礎マウンド洗掘と直立部沈下

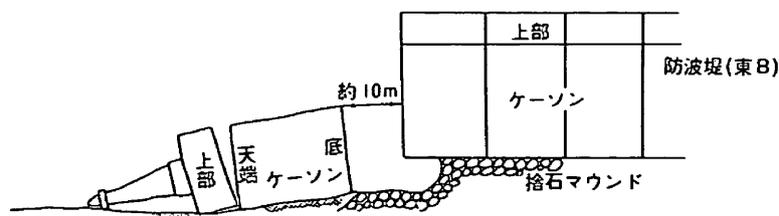


図 II-2.27 奥尻港防波堤（東 B）被災

(2) 被災要因

防波堤（北）については、津波波力によりケーソンが港内側へ滑動した。また、港内側の根固方塊、被覆ブロック、基礎捨石が洗掘されていた。これは防波堤を越流した流れによるものか、ケーソン滑動後に流入した強い流れによるものであると考えられる。

防波堤（東外）と（東 B）の開口部においては、港内側と港外側に大きな水位差が生じたことにより強い流れが生じ、マウンド先端部が洗掘されて支持力を失ったことによりケーソンが転倒したのと考えられる。また、防波堤（東外）の先端部については港外側、港内側の 2 方向の洗掘が確認できることから押し波時と引き波時にそれぞれ強い流れが生じていた可能性がある。

II-3 防波堤以外の港湾構造物の津波による被害

3.1 はじめに

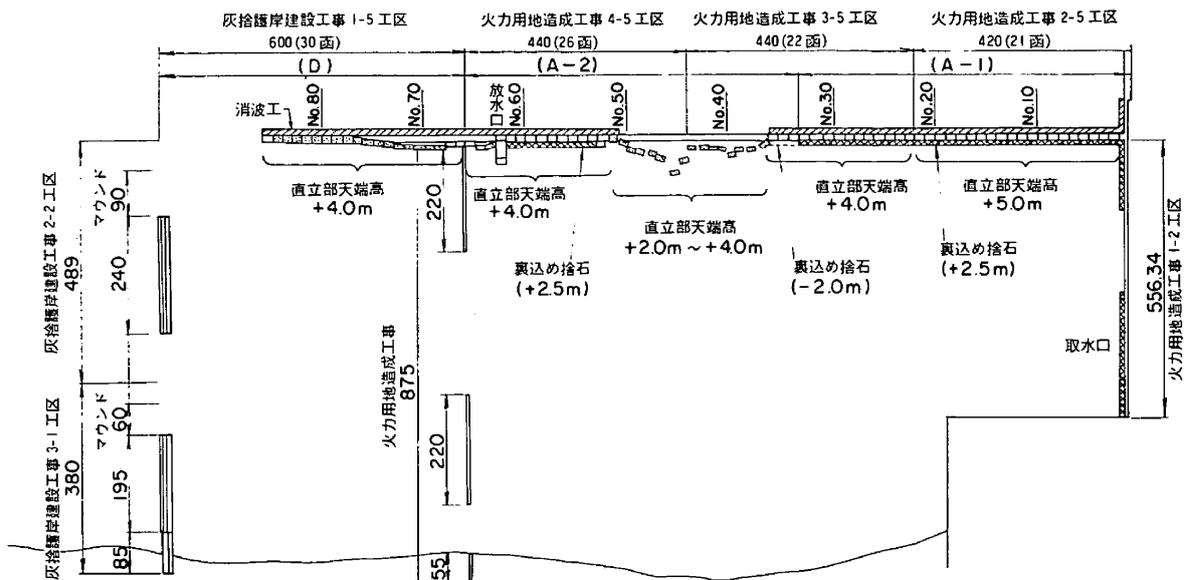
本章では、日本海中部地震に伴う津波によって被災した埋立護岸についてもその被災状況と被災要因について整理した。

3.2 日本海中部地震に伴う津波による埋立護岸の被害

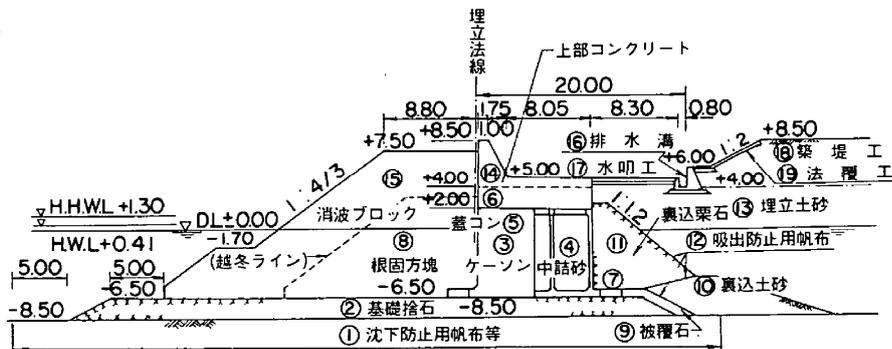
谷本(1983)¹⁻¹⁶⁾を基に日本海中部地震における港湾施設の被災状況と被災要因の特徴を以下に示す。

(1) 被災状況

1983年5月26日に発生した日本海中部地震津波により、能代火力発電所用地として建設中であった埋立護岸が被災した。被災状態を図II-3.1に示す。ここで、護岸の完成標準断面は図II-3.2に示すとおりである。以下に被災状況および被災の特徴を示す。



図II-3.1 能代港工業用地造成護岸の被災状況位置図



図II-3.2 護岸標準断面(A-2)

a) 無被災区間について

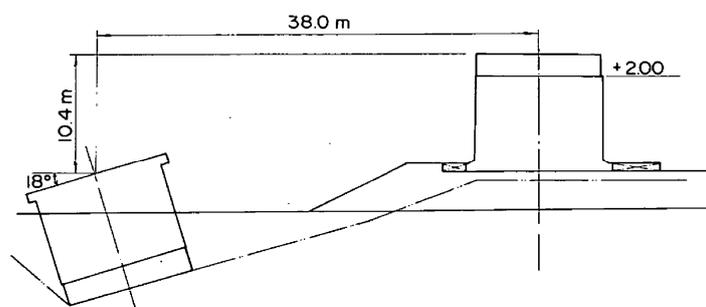
無被災区間は図Ⅱ-3.1のA-1区間の基部側からNo.35までとNo.52～放水口区間までである。この無被災区間の断面の整備状態は以下に示すとおりである。

- A-1区間の基部側～No.21までは+5.0 mまで上部工が打設されており、前面の消波工も同高さまで整備されている。
- No.22～No.35までは+4.0 mまで上部工が打設されており、前面の消波工も同高さまで整備されている。
- No.52～放水口(No.62)区間については、+4.0 mまで上部工が打設され、消波工も整備されていた。
- 直立部背面の裏込石についてはNo.32までは+2.5 mまで、No.35までは-2.0 mまで施工されていた。No.52～放水口区間については+2.5 mまで施工されていた。

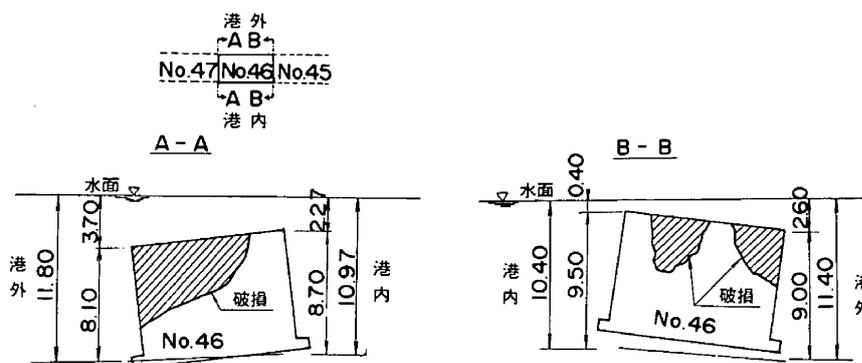
b) 被災区間について

被災を受けた区間はNo.36～No.51区間とNo.63～No.85区間であった。特にNo.36～No.50区間が被害の大きかった区間である。

- No.36～No.50区間は消波工と裏込石は未施工で、中詰砂を投入し、蓋コンクリートを施工しただけの状態のものから、上部工を+4.0 mまで打設した状態のものが混在していた。
- No.36～No.50区間の被災状況は直立部が設置位置から堤内へ移動し、転倒している状態であった。図Ⅱ-3.3はNo.39号函の被災状況を示したものであり、堤内へ38 mも移動し転倒している。図Ⅱ-3.4はこの区間で最も大きく移動したものを示しており、約74 m堤内側へ流されている。大きく移動したケーソンは側壁が破損しているものも多い。

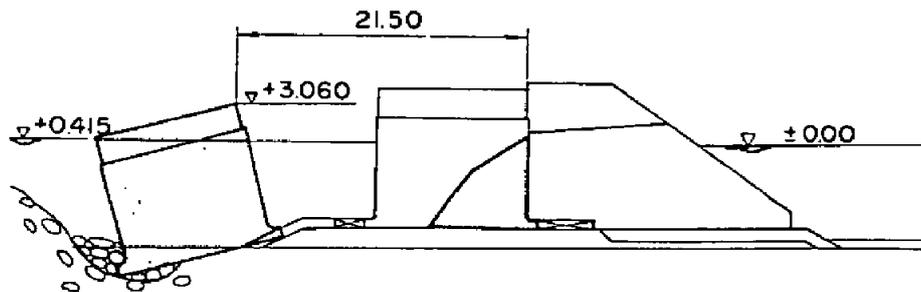


図Ⅱ-3.3 直立部被災状況(ケーソン NO.39)

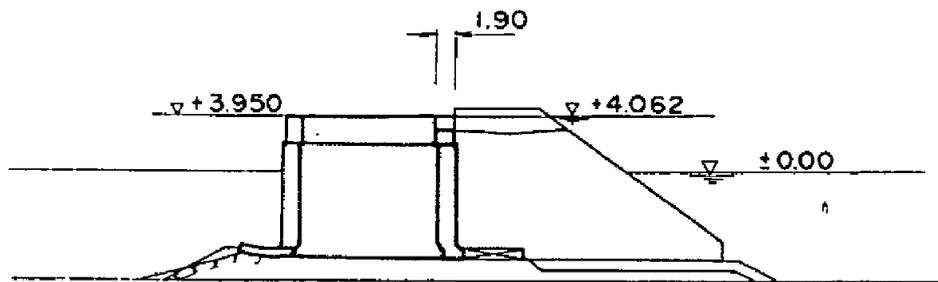


図Ⅱ-3.4 直立部被災状況(ケーソン No.46)

- No.51 は+4.0 m まで上部工が打設され、消波工も整備されていたが、裏込石は未整備であった。
- No.63～No.85 区間は+4.0 m まで上部工と消波工が整備されており、裏込石は未整備であった。
- No.63～No.84 区間の被災状況は 0.15～21.5 m の滑動が生じている。図Ⅱ-3.5はこの区間の最も滑動した箇所を示しており、対して図Ⅱ-3.6 は比較的被害の小さかった箇所を示している。



図Ⅱ-3.5 直立部被災状況(NO.68)



図Ⅱ-3.6 直立部被災状況(NO.80)

(2) 被災要因

a) 越流の影響

被災断面図より背後の洗掘が疑わしいものの、当時の調査資料では言及されていない。

b) 消波工の効果

裏込石、消波工が未整備であった No.36～No.50 区間は直立部が大きく移動し、側壁の破損があった。No.36～No.50 区間は、側壁が破損したことにより中詰材が流失し、津波波力に対して重量不足となったことが大きな被害へと繋がったものと考えられる。

一方、裏込石は未整備であったものの消波工が整備されていた No.63～No.84 区間については、被害を受けていない。

c) その他（裏込石について）

無被災区間の断面と被災区間の断面を比較すると、被災を受けた直立部の特徴として裏込石が未整備であることが第一に挙げられる。このことから、無被災区間については津波波力に対して直立部自体の耐力は足りないが、裏込石整備によって裏込石が滑動抵抗力として働き被災を免れたと想定される。

II-4 防波堤の耐津波設計を行う上での留意点

項目	性能照査上の留意点	引用資料		
		被害事例	参考文献	事例等からの類推
想定津波の特性	来襲時間と津波高 ・震源と港湾の距離・位置によって、第一波より第二波の方が大きくなることもある	・八戸港北防波堤（中央部・ハネ部）		
	流れの作用時間・方向等 ・作用時間は、洗掘量に影響する ・押し波だけでなく、引き波によっても海底面が洗掘する可能性がある		1-3) 1-4) 1-17)	
防波堤の配置	防波堤に対する津波の入射角 ・流速が増大する箇所であり、周辺の基礎地盤は洗掘されやすい	・八戸港北防波堤（ハネ部）		
	堤頭部・開口部・隅角部 ・流速が増大する箇所であり、周辺の基礎地盤は洗掘されやすい	・八戸港北防波堤（ハネ部） ・相馬港沖防波堤 ・奥尻港防波堤（北海道南西沖地震）	1-3)	
	隅角部 ・津波が集中する可能性がある			八戸港の被害事例
越流の影響	越流の有無 ・越流が発生すると、背後基礎が洗掘され、港内側へ堤体が転倒する危険性が増大する	・八戸港北防波堤（中央部） ・奥尻港防波堤（北海道南西沖地震） ・能代港埋立護岸（日本海中部地震）	1-3) 1-4)	
	越流の規模 ・越流規模（越流水深）が大きいと背後基礎が洗掘される危険性が増大する	・八戸港北防波堤（中央部）	1-3) 1-4)	
	ケーソンに作用する水平力 ・越流が発生すると、背面に負圧が生じ、港の内外で水位差以上の圧力差が生じる	・釜石港湾口防波堤 ・大船渡港湾口防波堤 ・相馬港沖防波堤 ・奥尻港防波堤（北海道南西沖地震）	1-3) 1-4)	
防波堤の天端高さ・天端幅・パラベットの有無等の影響	防波堤の天端高さ ・天端高さを高くすると、同じ高さの津波であっても越流規模を小さくすることができるため、越流洗掘の可能性を低減できる			参考文献1-3), 1-4)
	パラベットの有無 ・上部工を上部パラベット構造にすると、津波越流の突入角度が浅くなり、ケーソン背後に近い基礎の洗掘を防止できる可能性がある	・八戸港北防波堤（中央部）	1-4)	
	天端幅 ・天端幅が狭いと（越流水深が天端幅に比較して大きいと）、越流水塊の飛び出し方向が鉛直方向に傾くため、ケーソン近傍の基礎洗掘の危険性が増大する可能性がある			参考文献1-3), 1-4)
防波堤の設置水深	設置水深 ・防波堤の設置水深が深い場合、越流しても越流水塊は海底には届かず洗掘されにくい	・八戸港北防波堤（中央部）		参考文献1-3), 1-4)
地殻変動および基礎地盤の沈下	地殻変動および基礎地盤の沈下が及ぼす影響 ・地盤の沈下に伴い浮力が大きくなり、直立部の安定性が低下する可能性がある。 ・基礎地盤の液化化等により地盤のせん断抵抗力が減少し、基礎の支持力破壊の危険性が増大する	・釜石港湾口防波堤 ・石巻港防波堤など		参考文献2-1), 2-11)
越流背面の水位 (越流落下高さ)	背面水位 ・天端高さに対して背面水位が低いと、越流水塊の突入速度が大きく、かつ突入方向が鉛直方向に傾くため、ケーソン近傍の基礎が洗掘されやすくなる			参考文献1-3), 1-4)
基礎マウンドの特性	基礎マウンド層厚 ・層厚が小さいと浸透流速が増加する可能性がある			参考文献2-1), 2-11)
	基礎マウンドの形状 ・同じ流速が作用する場合、捨石重量が大きい方が洗掘に対しては有効である			参考文献1-3), 1-4)
基礎マウンドおよび海底地盤に発生する浸透流の影響	浸透流 ・防波堤前後に水位差が生じると、基礎マウンドおよび海底地盤表層において動水勾配が上昇し、支持力に対する安全率が低下し、不安定になる可能性がある ・浸透流速が大きいと、被覆工や基礎マウンドに浸透力が作用するため、洗掘する可能性がある ・間隙水圧が大きいと、マウンドのせん断強度が低下する可能性があり、洗掘する可能性がある		2-1)	参考文献2-1), 2-11)
	地盤改良 ・基礎地盤の固結改良は、洗掘を抑制する効果の可能性がある			参考文献1-3), 1-4)
	捨石重量 ・捨石重量が大きいと透水係数が大きくなり浸透流速が増加すると推定される			参考文献2-1), 2-11)

項目	性能照査上の留意点	引用資料		
		被害事例	参考文献	事例等からの類推
被覆工の規格	被覆工の種類・規格・配置等 ・被覆ブロックの素材、形状等によって洗掘特性が異なる ・越流によって速い流速が発生する範囲を考慮し、港内側の被覆ブロック設置個所を検討する必要がある		1-4)	
海底地盤の特性	海底地盤の土質性状 ・土質（砂質土・粘性土など）や締め固め具合等で洗掘特性が異なる			参考文献1-3), 1-4)
海底地盤又は基礎マウンドの洗掘が発生した場合の直立部の安定性に及ぼす影響	洗掘が直立部の安定性に及ぼす影響 ・地盤が崩れない傾斜角で海底地盤の洗掘が進行すれば、洗掘に伴う基礎マウンド及び直立部の連鎖破壊を防止できる可能性がある ・洗掘発生箇所を直立部から可能な限り遠方とすることで連鎖破壊を防止できる可能性がある			八戸港の被害事例
目地幅の影響	目地幅 ・目地幅が広い場合、目地洗掘からケーソンの変位が生じる可能性がある		1-3)	
消波工の効果	消波工の受動抵抗としての機能 ・堤頭部の周辺を囲んでいる消波工が受動抵抗として機能する可能性がある	・八戸港北防波堤（ハネ部） ・相馬港沖防波堤		
	消波工による側壁の防護 ・漂流物に対して消波工がケーソン側壁の防護効果を有していた可能性がある	・能代港埋立護岸（日本海中部地震）		
	消波工の波力低減効果 ・消波工は、津波に対して波力低減効果はないとされている（実験では確認していない） ・波状段波（ソリトン分裂津波）による衝撃的な波力を低減できる可能性があるが、ブロックの積み方を工夫する必要がある。 ・津波来襲時にケーソンへの寄りかかり荷重が発生する可能性がある	・八戸港北防波堤（中央部） ・能代港埋立護岸（日本海中部地震）		八戸港，相馬港の被害事例
腹付工の効果	腹付工 ・ケーソン背面に捨石を設置する腹付工は、滑動安定性を向上させる方法として有効である ・腹付工を行う場合は越流による洗掘対策が必要である		1-3)	

<震災の被災事例に関する参考文献>

- 1-1) 高橋重雄ほか：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報、港湾空港技術研究所資料、No.1231 2011
- 1-2) 東北地方整備局：東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会 資料3、2011
- 1-3) 有川太郎、佐藤昌治、下迫健一郎、富田孝史、辰巳大介、廉慶善、高橋研也：釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討、港湾空港技術研究所資料、No.1251 2012
- 1-4) 佐藤正勝、米山治男、長谷川巖、稲垣茂樹：一般防波堤の津波越流による港内側マウンドの洗掘と対策、土木学会論文集 B3 (海洋開発) 特集 Vol.68、No.2、2012
- 1-5) 根木貴史：港湾における津波被害と粘り強い構造に関する一考察、土木学会論文集 B3 (海洋開発) 特集 Vol.68、No.2、2012
- 1-6) 富田孝史、廉慶善、熊谷兼太郎、高川智博、鈴木高二朗、渡邊祐二、斉藤節文、佐藤正勝：2011年東北地方太平洋沖地震津波による八戸港の被害、土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.68、No.2、2012
- 1-7) 河田恵昭、古村孝志、今村文彦、富田孝史、野田武則、高橋重雄：財団法人沿岸技術研究センター 東日本大震災津波災害に関する講演集 2012.2
- 1-8) 高山知司：東日本大震災から1年-港湾被災で判ったこととまだ判らないこと-、一般財団法人沿岸技術研究センター機関誌 2012.4.
- 1-9) 高橋重雄：津波防災-想定外への対応：性能設計、財団法人沿岸技術研究センター機関誌 2012.1.
- 1-10) 河田恵昭：東日本大震災について考えたこと～減災に資する試みと復旧構想会議～、財団法人沿岸技術研究センター機関誌 2011.6.
- 1-11) 今村文彦：東北地方太平洋沖地震および津波について、財団法人沿岸技術研究センター機関誌 2011.6.
- 1-12) 高橋重雄、下迫健一郎、有川太郎、辰巳大介、根木貴史：東日本大震災における港湾施設等の津波被害、財団法人沿岸技術研究センター機関誌 2011.6.
- 1-13) 高山知司：東日本大震災における津波-津波の実態把握の重要性-、財団法人沿岸技術研究センター機関誌 2011.6.
- 1-14) 東北地方整備局：港湾施設の復旧・復興について、財団法人沿岸技術研究センター機関誌 2011.10.
- 1-15) 宮城県土木部港湾課：宮城県の復旧・復興への取り組み、財団法人沿岸技術研究センター機関誌 2011.10.
- 1-16) 谷本勝利ほか：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察、港湾空港技術研究所資料、No.470 1983
- 1-17) 高山知司ほか：1993年北海道南西沖地震津波の特性と被害、港湾空港技術研究所資料、No.775 1994

<津波と防波堤に関する参考文献>

- 2-1) 今瀬 達也、前田 健一、三宅 達夫、鶴ヶ崎 和博、澤田 豊、角田 紘子：捨石マウンド－海底地盤への津波浸透による混成堤の不安定化、Vol. 67 (2011) No. 2、土木学会論文集 B2(海岸工学)
- 2-2) 五十里 洋行、後藤 仁志、吉年 英文：ケーソン式混成堤の大変形解析のための改良型弾塑性 MPS 法の基礎的検討、Vol. 67 (2011) No. 2、土木学会論文集 B2(海岸工学)
- 2-3) 小竹 康夫、松村 章子、山野 貴司、金澤 剛、荒木 進歩：天端を越流する津波が防波堤の安定性に与える影響について、Vol. 67 (2011) No. 2、土木学会論文集 B2(海岸工学)
- 2-4) 榊山 勉、松山 昌史：津波に対する傾斜堤消波ブロックの安定性に関する実験的研究、Vol. 67 (2011) No. 2、土木学会論文集 B2(海岸工学)
- 2-5) 長尾 毅、橋本 淳：水理模型実験結果によるケーソン式混成堤の基礎変形特性に関する一考察、Vol. 67 (2011) No. 2、土木学会論文集 B2(海岸工学)
- 2-6) 琴浦 毅、川崎 浩司、有川 太郎、秋山 実：数値波動水槽における抵抗力算定手法の波力への影響、Vol. 66 (2010) No. 1、土木学会論文集 B2(海岸工学)
- 2-7) 宮田 正史、吉田 誠、安野 浩一郎、三好 俊康、三藤 正明、熊谷 健蔵：偶発波浪荷重を受けるケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究、Vol. 65 (2009) No. 1、土木学会論文集 B2(海岸工学)
- 2-8) 丸山草平、松本朗、半沢稔：防波堤港内側マウンド被覆材の津波に対する安定性に関する実験、Vol. 68 (2012) No. 2、土木学会論文集 B3 (海洋開発)
- 2-9) 小竹康夫、荒木進歩、松村章子：天端を越流する津波が混成堤式防波堤のケーソン部に与える波圧特性に関する実験的研究、Vol. 68 (2012) No. 2、土木学会論文集 B3 (海洋開発)
- 2-10) 古牧大樹、西畑剛、森屋陽一：SPH法における消波ブロック被覆堤の簡易モデルの提案、Vol. 68 (2012) No. 2、土木学会論文集 B3 (海洋開発)
- 2-11) 笠間清伸、善功企、陳光齊、Dong Si-meng、武末晃洋：津波による防波堤直下の捨石マウンドの安定性に関する水理模型実験、防災・減災のための地盤構造物の設計・施工法に関するシンポジウム，2012