

# 事例調査に基づく防波堤・護岸の地震被災特性

鹿島 遼一\*・植田 和哉\*\*・岡 睦夫\*\*\*

## 1. はじめに

防波堤や防波護岸の設計においては、地震や津波により被災を受けても、直ちに壊滅的な状態に陥ることなく短期間に修復可能で、なおかつ相当の防波機能を維持しうる構造を採択することが大切である。こうした視点に立ち、防波堤や護岸の地震および津波による被災の実態とその特性を把握することを目的として、主要な地震に関する被災調査報告をもとに、これらの構造物に関する被災事例を収集、分析した。

## 2. 被災事例調査の概要

前面を消波ブロックで被覆した防波堤および防波護岸とそれに類する構造物（以下、被覆タイプと略称）、ならびに消波工のないケーソン式防波堤および護岸（以下非被覆タイプと略称）を対象とし、次に示す手順で調査を実施した。

調査の第一段階では、港湾地域に震度階IV以上の地震動を生じさせた関東大地震以降の地震を抽出し、東京大学地震研究所図書室において、これらの地震関連資料を閲覧し、調査対象構造物やその他の港湾施設に顕著な影響を与えた地震 13 を選定した。その結果を表-1 に示す。なお、これら以外に三陸地震（1933 年）、東南海地震（1944 年）、南海地震（1946 年）、チリ地震津波（1960 年）など臨海部に大きな被害を与えた地震、津波があるが本調査で対象とした構造物の被災は確認できなかった。

調査の第二段階では、選定した地震に関する被害調査報告書等を調査し、設計震度や土質条件などの設計条件、被災の断面図や平面図などの被災状況、強震記録や潮位などの外力条件および復旧内容などを整理した。地震加速度としては、被災例の検討のために運輸省港湾技術研究所が用いた値<sup>1),2),3)</sup>を採用した。これらの値は、当該港湾において得られた実測値あるいは地震応答計算により得られた推定値である。

今回の調査で得られた事例は、表-2 に示すように被災例 81 例、無被災例 26 例の計 107 例である。調査事例にみられる地震時最大地表加速度は最高 400 gal である。なお、ここで抽出した無被災例とは、被災例が得られた地区において、被災報告資料により無被災であると

表-1 調査地震一覧表

| No. | 地震名          | 発震年月     | 地震マグニチュード | 津波マグニチュード |
|-----|--------------|----------|-----------|-----------|
| 1   | 関東大地震        | 1923年9月  | 7.9       | 2         |
| 2   | 北伊豆地震        | 1930年11月 | 7.0       |           |
| 3   | 静岡地震         | 1935年7月  | 6.3       |           |
| 4   | 福井地震         | 1948年6月  | 7.3       |           |
| 5   | 1952年十勝沖地震   | 1952年3月  | 8.1       | 2         |
| 6   | 1962年日向灘地震   | 1961年2月  | 7.0       | 0         |
| 7   | 新潟地震         | 1964年6月  | 7.5       | 2         |
| 8   | 1968年十勝沖地震   | 1968年5月  | 7.9       | 2         |
| 9   | 1973年根室半島沖地震 | 1973年6月  | 7.4       | -1        |
| 10  | 大分県中部地震      | 1975年4月  | 6.4       |           |
| 11  | 1978年宮城県沖地震  | 1978年6月  | 7.4       | -1        |
| 12  | 1982年浦河沖地震   | 1982年3月  | 7.1       | -1        |
| 13  | 1983年日本海中部地震 | 1983年5月  | 7.1       | 不明        |

表-2 調査事例の内訳

| 事例数        |           | 用途別事例数    |   | 地震時に受けた最大地表加速度の範囲 |             |
|------------|-----------|-----------|---|-------------------|-------------|
| 事例数        | 用途別事例数    | 被覆タイプ     | 非被覆タイプ  |                   |             |
| 全事例<br>107 | 被災例<br>81 | 護岸<br>51  | 防波護岸 5<br>海岸護岸 3<br>防波堤 1<br>岸壁 31<br>物揚場 6<br>埋立護岸 5                               | 9<br>42           | 134~352 gal |
|            |           | 防波堤<br>30 | 防波堤 6<br>導流堤 1<br>突堤 3<br>離岸堤 7<br>防波護岸(施工中) 2<br>岸壁(施工中) 1<br>防波堤 9<br>防波護岸(施工中) 1 | 20<br>10          | 159~400 gal |
|            | 無被災<br>26 | 護岸<br>16  | 防波護岸 1<br>海岸護岸 1<br>岸壁 11<br>物揚場 3  | 2<br>14           | 118~282 gal |
|            |           | 防波堤<br>10 | 防波堤 9<br>導流堤 1  | 10                | 156~313 gal |

\* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所  
 \*\* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部  
 \*\*\* 正会員 五洋建設(株) 土木設計部

表-3 被災形態の分類

|                                   |
|-----------------------------------|
| 被災形態                              |
| 直立部の移動(滑動等)                       |
| 上部工の移動(滑動等)                       |
| 直立部の傾斜                            |
| 上部工の傾斜                            |
| 直立部, 上部工の破損                       |
| 直立部の沈下                            |
| 上部工の沈下                            |
| 基礎捨石, 被覆工, 根固め工, 消波工, 捨ブロックの散乱・流出 |
| 消波工, 根固め捨石, 上部工を有しない傾斜堤の沈下        |
| エプロンや背後地の沈下・ひびわれ                  |
| 壁体全体のすべり(円形すべり)                   |
| その他の被災(基礎地盤の洗掘, 背後地の浸水等)          |
| 不明                                |

表-4 被災規模の定義

| 被災形態 | 直立部の移動<br>上部工の移動   | 直立部の沈下<br>上部工の沈下  | 直立部の傾斜<br>上部工の傾斜   | 基礎捨石, 被覆工,<br>消波工等の散乱・<br>流出   | エプロンや背後地の<br>沈下・ひびわれ   |
|------|--|---|--|--|--|
| 定義   | $B$ : 堤体, 上部工の幅<br>$B'$ : 移動量<br>$D$ : 被害率= $B'/B$<br>小規模: $D < 0.1$<br>中規模: $0.1 \leq D < 0.5$<br>大規模: $D \geq 0.5$ | $H$ : 天端高とH.W.L.の差<br>$H'$ : 沈下量<br>$D$ : 被害率= $H'/H$<br>小規模: $D < 0.1$<br>中規模: $0.1 \leq D < 0.5$<br>大規模: $D \geq 0.5$ | $\alpha$ =傾斜角<br>小規模: $\alpha < 5^\circ$<br>中規模: $5^\circ \leq \alpha < 10^\circ$<br>大規模: $\alpha \geq 10^\circ$ | $a$ : 被災前断面積<br>$a'$ : 被災箇所面積<br>$D$ : 被害率= $a'/a$<br>小規模: $D < 0.1$<br>中規模: $0.1 \leq D < 0.5$<br>大規模: $D \geq 0.5$ | $L$ : 沈下量 (cm)<br>小規模: $0 < L < 50$<br>中規模: $50 \leq L < 100$<br>大規模: $L \geq 100$<br>沈下量が定量的に評価できない場合は被災状況より判断した。 |

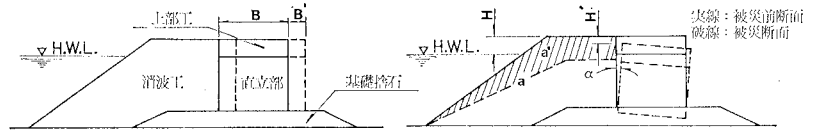


図-1 被災規模説明図

報告されている構造物で, かつ構造断面や設計条件などが明らかなるものである。

3. 被災形態および被災規模の特性

護岸, 防波堤の被災形態および被災規模の特性を主因別に考察する。ここでは主因を地震動, 液状化および津波に分類し, 被災状況による工学的判断および被災資料の記述から各事例の被災主因を判定した。被災形態の分類を表-3に示す。被災規模については, 表-4に示すように機能にほとんど影響しない程度の被災を「小規模」, 機能低下が著しいと目される被災を「大規模」, これらの中間を「中規模」と分類した。なお, 「直立部, 上部工の破損」や「その他の被災」については定量的な把握が困難なため規模を定義しなかった。また「壁体全体のすべり」は大規模とした。

(1) 地震動を主因とする被災

a) 護岸

地震動を被災主因とする護岸44例の被災形態としては, 直立部の移動, 沈下, 傾斜およびエプロン等の沈下

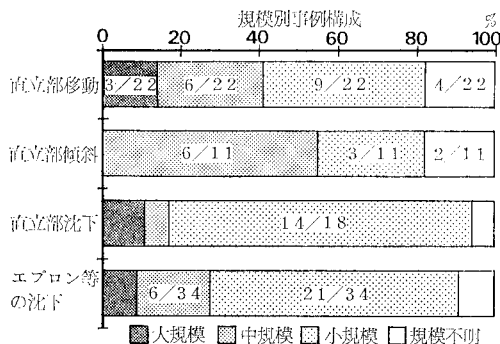


図-2 護岸の地震被災規模特性

・ひびわれの4形態が多かった。これらについて被災規模別の事例数を整理して図-2に示す。直立部の移動では中規模および大規模の被災が全体の約40%であり, 直立部の傾斜は中規模以下の事例が多く, 大規模の事例はみられなかった。また, 直立部の沈下およびエプロン等の沈下の約60%が小規模の被災であった。

b) 防波堤

地震動を被災主因とする防波堤13例の被災形態としては直立部の沈下, 消波工等の沈下の2形態が多かった。これらについて被災規模別の事例数を整理して図-3に示す。事例は少ないが直立部の沈下の約80%が小規模の被災であり, 消波工等の沈下では中規模以上の被災が約70%であった。

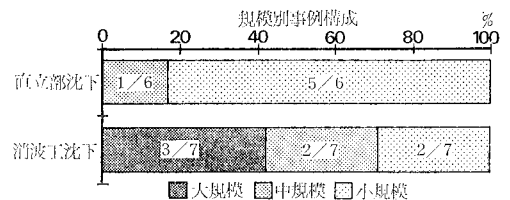


図-3 防波堤の地震被災規模特性

(2) 津波を主因とする被災

本調査では津波を主因として含む護岸の被災は4例と少なかった。ここでは防波堤について, その被災形態および被災規模の特性を考察する。

津波を被災主因とする防波堤13例の被災形態としては直立部の移動, 沈下, 傾斜ならびに消波工などの散乱・流出, および基礎地盤の洗掘が多かった。これらの被災形態について被災規模別の事例数を整理して図-4に示す。今回調査した津波の被災例では被災規模が大きな

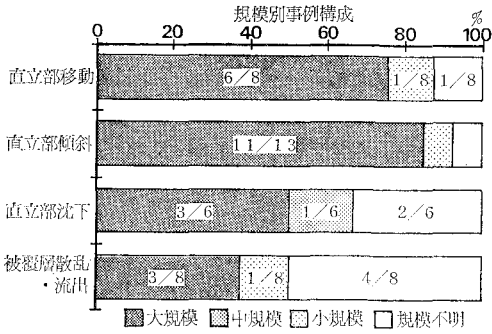


図-4 防波堤の津波被災規模特性

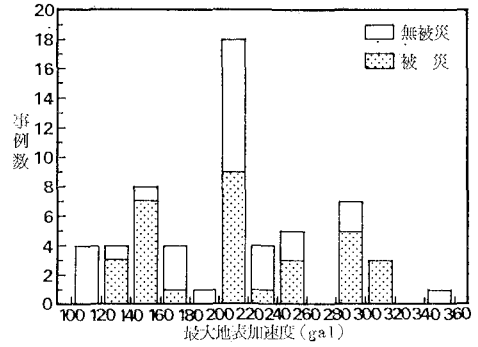


図-6 最大地表加速度と護岸の被災、無被災の関係

ものが多かったことがわかる。

(3) 液状化を主因とする被災

被災事例のうち液状化を主因として含むものは3例だけであった。これらの事例は新潟地震による新潟西港の被災例であり、いずれも堤体が2~3m沈下し、被災後さらに津波により背後地盤の侵食が生じた。一例として新潟西港西海岸護岸元付部の被災断面を図-5に示す。この例では、基礎地盤は相対的に大きいN値(10以上)を示していたが、局部的にN値の小さい層をはさんでいた。

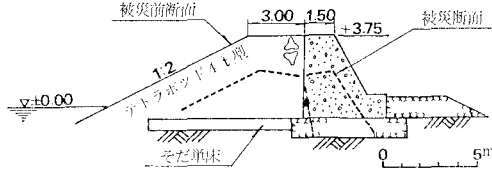


図-5 新潟地震による新潟西港西海岸護岸元付部被災断面

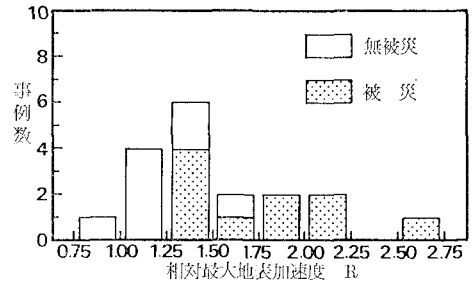


図-7 相対最大地表加速度 R と護岸の被災、無被災の関係

図-7に示す。ここで相対最大地表加速度 R は次式で定義する。

$$R = \frac{\text{最大地表加速度} / 980 (\text{cm/s}^2)}{\text{設計震度}} \dots\dots (1)$$

図より明らかなように、護岸の被災、無被災の境界は  $R=1.25\sim 1.75$  であり、 $R$  が 1.75 を越えると無被災例はみられない。

(2) 護岸直立部および上部工の被災

直立部および上部工の水平移動量と最大地表加速度の得られている護岸の被災 16 例について、水平移動量と最大地表加速度の関係を図-8に示す。水平移動量が大きな事例は 1944 年以前に完成した構造物であり、これらのデータを除けば水平移動量は最大で 57 cm である。

次に直立部および上部工の沈下量と最大地表加速度の

4. 最大地表加速度と被災の関係

最大地表加速度が実測または推定されている事例について、最大地表加速度と被災の関係を考察する。なおここでは、地震が主要設計外力である護岸について主に検討する。

(1) 護岸被災の発生

護岸の被災 33 例と無被災 26 例について最大地表加速度別事例数を図-6に示す。なお、護岸本体に異常はなくエプロンのみ被災した場合には無被災とみなした。図より最大地表加速度が 120 gal を越えると被災例がみられる。護岸の設計水平震度は 0.1~0.15 程度に設定されることが多く、最大地表加速度を構造物に作用する加速度とみなせば、被災が生じはじめる最大地表加速度が 120~140 gal 程度であることはうなずける結果である。

次に、相対最大地表加速度 R と護岸の被災、無被災の関係を、これらの情報が把握できた 18 例について図

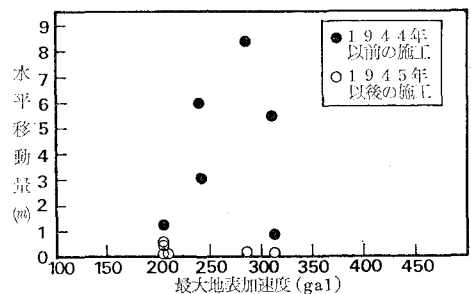


図-8 最大地表加速度と護岸水平移動量の関係

得られている護岸の被災 16 例について、沈下量と最大地表加速度の関係を 図-9 に示す。沈下量の最も大きなグループは基礎地盤が液状化した事例であり、沈下量は 2~3 m に及んでいる。次いで沈下量が大きなグループは 図-8 に示す大規模に水平移動した 1944 年以前の構造物であり、沈下量は 73~155 cm である。これらを除けば沈下量は最大で 32 cm である。なお岩盤設置事例として 1982 年浦河沖地震により被災した浦河港中央埠頭 -3.5 m 物揚場がある。最大地表加速度は不明であるが、ケーソンの沈下は 10 cm である。

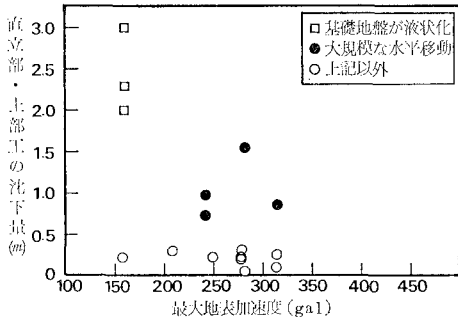


図-9 最大地表加速度と護岸直立部および上部工の沈下量の関係

さらに消波工沈下と直立部沈下の関係を考察する。消波工を設置した護岸および防波堤のうち沈下被災した 7 例について、直立部と消波工の沈下量を整理して 図-10 に示す。護岸の 3 例は全て本体の基礎地盤が液状化した事例である。防波堤の場合、直立部はあまり沈下せずに消波工が大きく沈下する傾向がみられる。この沈下には地震に先行して生じた累積沈下が加わっている可能性が考えられる。

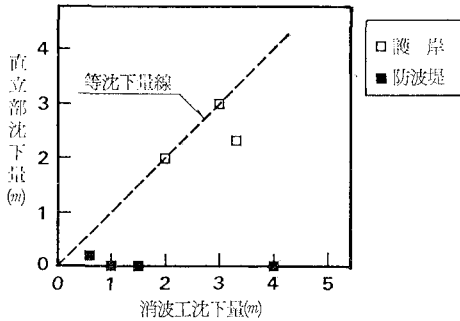


図-10 護岸、防波堤の直立部沈下量と消波工沈下量の関係

5. 大規模な被災事例

表-4 の被災規模の定義に従い「大規模」と分類され

た 24 例を 表-5 に示す。これらのうち地震動および津波を主因とする典型例を次に示す。なお液状化による大規模被災例は既に 図-5 でとりあげた。

図-11 は 1930 年北伊豆地震により被災した清水港日の出埠頭乙岸壁の事例である。直立部が約 8 m 前方に滑り出し、背後の地盤も大きく沈下している。ケーソンの基礎は浸漬した良質砂利により置換されていたが、基礎地盤は粘土層よりなり、*N* 値もかなり小さく軟弱であった。

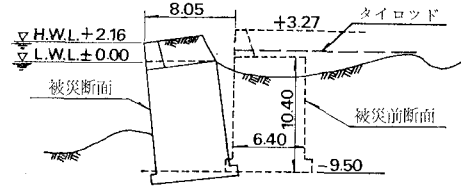


図-11 北伊豆地震の地震動による清水港日の出埠頭乙岸壁被災断面<sup>6)</sup>

図-12 は 1983 年日本海中部地震の津波により被災した能代港工業用地造成護岸の事例である。本図に示す護岸の工区では消波工、裏込め栗石が未施工であった。堤体は原位置から堤内へ 38 m 移動するとともに転倒しており、堤内のマウンドや基礎地盤は大きく洗掘されている。なお、隣接する護岸で裏込め栗石が施工されていたものは被災していない。

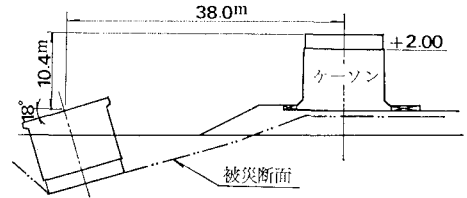


図-12 1983 年日本海中部地震津波による能代港工業用地造成護岸被災断面<sup>7)</sup>

次に 表-5 に示した 24 例について、被災報告書等を参考にしながら、地盤条件や作用震度、さらに津波来襲時に構造物のおかれた状況や津波に対する配慮の有無などを調査し、被災原因を考察した。その結果、地震動により被災した 12 例のうち、11 例が弱い基礎地盤上に施工された構造物である。残り 1 例は突堤状埠頭の先端部の被災であり、基礎地盤は *N* 値 30 程度の砂礫層で、野田ら<sup>8)</sup>の研究によると作用震度は構造物の安全率が 1.0 となる震度を越えていた。また、津波を主因とする被災 12 例のうち、3 例は施工中の施設、9 例は離岸堤のような小規模な施設である。これらは津波を主要外力とした設計ではなかったと考えられる。

表-5 大規模な被災事例

| 被災主因        | 施設名称                 | 構造様式              | 地震No.    | 主要な被災形態・規模        |
|-------------|----------------------|-------------------|----------|-------------------|
| 地震動         | 清水港日の出埠頭乙岸壁          | ケーソン式直立岸壁         | 2        | 堤体 8 m 移動         |
|             | 〃 丙岸壁                | 〃                 | 3        | 〃 5 m 〃           |
|             | 御路港北埠頭 -8.2 m 岸壁     | 〃                 | 8        | 〃 6 m 〃           |
|             | 函館港若松町護岸             | ケーソン式混成護岸         | 8        | 〃 の円形すべり          |
|             | 室蘭港西一号埠頭西側 -5.5 m 岸壁 | 〃 直立岸壁            | 8        | エプロン 1 m 陥没       |
|             | 横浜港北水堤               | 捨ブロック式傾斜堤         | 1        | 堤体 4 m 沈下         |
|             | 〃 東水堤                | 〃                 | 1        | 〃                 |
|             | 新潟西港西突堤元付部           | 前面消波工設置ブロック式混成堤   | 7        | 消波工 4 m 沈下        |
| 津波          | 八戸港八太郎 -10 m 岸壁先端護岸  | 〃 ケーソン式混成堤        | 8        | 堤体 6 m 移動, 5 m 沈下 |
|             | 能代港工業用地造成護岸          | 〃                 | 13       | 〃 22 m 〃          |
|             | 岩館漁港本港東側突堤           | 〃 直立堤             | 13       | 〃 転倒              |
|             | 八斗崎海岸離岸堤             | 捨ブロック式傾斜堤         | 13       | 大規模散乱             |
|             | 門前漁港離岸堤              | 〃                 | 13       | 〃                 |
|             | 八森海岸浜田地区離岸堤          | 〃                 | 13       | 〃                 |
|             | 峰浜海岸離岸堤              | 〃                 | 13       | 〃                 |
|             | 八竜海岸離岸堤              | 〃                 | 13       | 〃                 |
|             | 八戸港河原木防波堤 I 区        | ケーソン式混成堤          | 8        | 堤体 60 m 移動        |
|             | 〃 II 区               | 〃                 | 8        | 〃 40 m 〃          |
| 〃 III 区     | 〃                    | 8                 | 〃 90 m 〃 |                   |
| 能代港工業用地造成護岸 | 〃                    | 13                | 〃 38 m 〃 |                   |
| 地津震動波       | 新潟西港東海岸臨港前面護岸        | 前面消波工設置コンクリート壁護岸  | 7        | 堤体が大きく破損, 沈下      |
| 地津震動波状化     | 新潟西港臨港A埠頭先端護岸        | 前面根固め工設置コンクリート壁護岸 | 7        | 堤体 2 m 沈下         |
|             | 〃 西海岸護岸標準部           | 前面消波工設置           | 7        | 〃                 |
|             | 〃 〃 元付部              | 〃                 | 7        | 〃 3 m 〃           |

## 6. 結 論

本検討の結果、次の知見が得られた。

① 護岸の直立部の水平移動量または沈下量が大きいのは 1944 年以前の構造物あるいは基礎地盤が液状化した事例である。これらを除いた事例の水平移動量の最大値は 57 cm、沈下量の最大値は 32 cm であった。この程度であれば護岸としての機能はかなり保持されていると考えられる。

② 護岸では最大地表加速度が 120 gal を越えると被災がみられる。被災、無被災の境界は相対最大地表加速度  $R=1.25\sim 1.75$  である。

③ 地震動を主因とする防波堤の被災では、直立部の沈下は小規模被災が多い。

④ 地震動により大規模に被災した構造物のほとんどが弱い基礎地盤上に設置されたものであり、岩盤に設置された 3 例はいずれも小規模被災であった。

⑤ 津波により大規模に被災した構造物は津波を主要外力とした設計ではなかったと考えられる。

以上を総括すると、現行設計で用いられている震度法は地震時の護岸の安定限界を良好に反映しているといえ、現行設計法による適切な耐震設計がなされていれば、耐震上安定な地盤に築造される護岸は、たとえ地震により被災したとしてもその被災規模は小さいと推定さ

れる。

地震被害調査資料や主要港湾の強震観測資料は港湾構造物の耐震性の向上にとり非常に有益であり、今回の調査でも使用させていただいたが、構造物の被災直前の状況や被災時の自然条件に関するデータは、その記録が無いなど入手困難な場合が多かった。被災そのものを有効に活用する体制をより一層充実させていくことが今後の課題といえる。

最後に、本研究を行なうにあたり貴重な御意見を賜った(財)電力中央研究所 江刺靖行耐震構造部長に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 野田節男・上部達生・千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地震加速度、港湾技術研究所報告、第 14 巻、第 4 号、pp. 67~111, 1975.
- 土田 肇・稲富隆昌・野田節男・柳生忠彦・田端竹千穂・徳永省三・大槻有吾・平野忠告：1978 年宮城県沖地震港湾被害報告、港湾技研資料、No. 325, pp. 4~20, 1979.
- 土田 肇・稲富隆昌・土田 寛：1982 年浦河沖地震港湾被害報告、港湾技研資料、No. 472, pp. 3~11, 1983.
- 渡辺偉夫：日本被害津波総覧、東京大学出版会、206 p., 1985.
- 運輸省港湾局・運輸省第一港湾建設局・運輸省港湾技術研究所：新潟地震港湾被害報告第 1 部、pp. 87~89, 1964.
- 野田節男・上部達生：動力式岸壁の地震被災例集、港湾技研資料、No. 227, pp. 23~140, 1975.
- 東北大学工学部津波防災実験所・五洋建設株式会社：日本海中部地震による能代港被災記録、p. 95, 1984.