

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1173

September 2021

港湾における防波堤・倉庫の津波フラジリティカーブ

本多和彦

Tsunami Fragility Curve of Breakwater and Warehouse in Port Areas

Kazuhiko HONDA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

港湾における防波堤・倉庫の津波フラジリティカーブ

本多和彦*

要 旨

東北地方太平洋沖地震津波は、港湾施設に甚大な被害をもたらし、荷役等といった港湾機能に深刻な支障が生じた。このような被害のうち、港湾施設の被害状況を把握するため、国土交通省港湾局や港湾管理者の協力を得て、港湾施設の津波被害の情報を収集した。

本検討では、東北地方太平洋沖地震およびそれに伴う津波による港湾および港湾施設の被害の概要を整理するとともに、収集した港湾施設の被害情報を用いて、港湾における防波堤および倉庫の津波フラジリティカーブを算出した。

キーワード：津波被害，港湾，港湾施設，津波フラジリティカーブ，東北地方太平洋沖地震津波

* 沿岸海洋・防災研究部 沿岸防災研究室長
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail：ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

Tsunami Fragility Curve of Breakwater and Warehouse in Port Areas

Kazuhiko HONDA*

Synopsis

The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami caused severe damage to port facilities and the operations of the ports were severely disrupted. We have gathered the data of damage due to the tsunami of each port facility with the cooperation of port management bodies and Ports and Harbours Bureau of MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism). This paper reports not only statistics of damage caused by the tsunami to ports and port facilities but also the tsunami fragility curves of port facilities by using the result of the data gathering on tsunami damage.

Key words: tsunami damage; port; port facility; tsunami fragility curve; the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami

* Head of Coastal Disaster Prevention Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5019 Fax: +81-46-842-9265 e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. まえがき	1
2. 港湾の被害	1
3. 防波堤の被害	2
3.1 被害の概要	2
3.2 津波脆弱性カーブ	2
4. 倉庫の被害	4
4.1 被害の概要	4
4.2 津波脆弱性カーブ	4
5. まとめ	8
6. あとがき	8
参考文献	8

1. まえがき

東北地方太平洋沖地震津波により、沿岸地域では非常に多くの方々が犠牲になり、多くの資産、建物および構造物が破壊され流失した。この津波は、防波堤、海岸堤防、倉庫、荷役機械等といった港湾施設にも甚大な被害をもたらした。港湾機能の著しい低下を生じさせた。港湾の公共土木施設の被害額は4,126億円にも上る。

津波波源に面した沿岸部に位置する14港の重要港湾（ただし、同一港湾でも港区で1港湾とする）における被災した公共施設の復旧費用は、およそ3,000億円を上回るものと見積もられた。八戸港、釜石港、大船渡港および相馬港における湾口防波堤および第一線防波堤には、非常に高い津波が来襲したため、これらの港湾においては、前述の14港の他の港湾と比較して、外郭施設の復旧費用が高くなっている。一方、他の港湾と比べて若干低い津波が来襲した小名浜港では、前述の14港の他港湾と比較して、係留施設の復旧費用が高くなっている。このことから、係留施設は、津波による被害よりも地震動による被害が生じやすい傾向があることが分かる。

本研究では、港湾管理者および国土交通省港湾局の協力により港湾施設の津波被害に関する情報を収集し、東北地方太平洋沖地震およびそれに伴う津波による港湾被害の概要を整理するとともに、Koshimura ら（2009）の手法を参考に、港湾における第一線防波堤および倉庫の津波被害についてフラジリティカーブを提案する。

津波波源に面した沿岸部に位置する14港の重要港湾における湾口防波堤を含む第一線防波堤について、被害延長を総延長で除することで被害率を算出した。この被害率を推定する津波フラジリティカーブのパラメータについて、異なる2種類を設定し比較したところ、防波堤前面における最大津波高 (η_{max}) を当該防波堤の設計波高 ($H_{1/3}$) で除したパラメータを用いた対数正規累積分布関数の適用性が高かった。

なお、本稿は、Honda ら（2014）の内容に補足説明を追加したものである。そのため、本研究を引用する際には、Honda ら（2014）も参考文献に挙げられたい。

2. 港湾の被害

平成23年発生災害国土交通省所管公共土木施設被害報告によると、平成23年の公共土木施設の被害総額は、東北地方太平洋沖地震に伴う災害以外も含むが、2兆5,750億円となった。平成18年から平成23年における公共土木施設の被害額について、月別の累積額を図-2.1に示

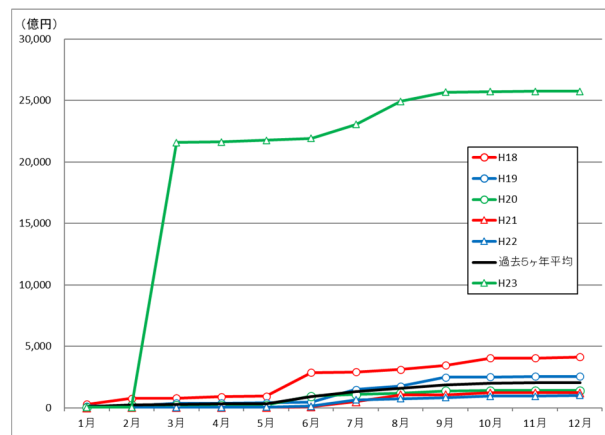


図-2.1 国土交通省所管公共土木施設被害

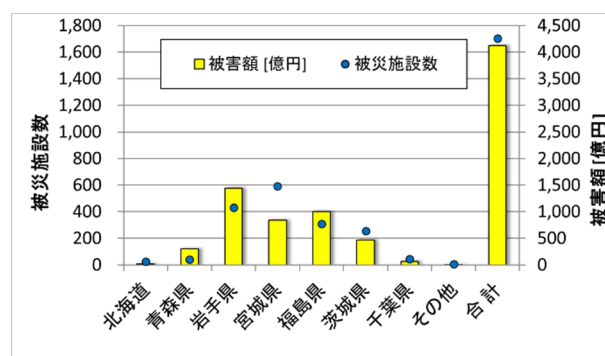


図-2.2 港湾の公共土木施設被害



図-2.3 対象重要港湾（14港）

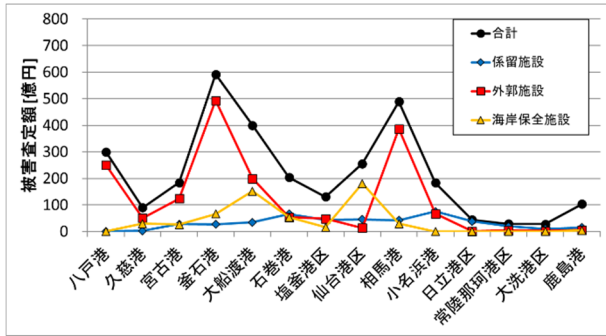


図-2.4 対象重要港湾の被害施設の復旧費用

す。平成23年3月における被害の月別の累積額は、その前年までの5年間（平成18年から平成22年）の平均額と比べて2兆円も高く、平成23年の被害総額は前年までの5年間の13倍以上にも上る。

東北地方太平洋沖地震およびそれに伴う津波は、港湾施設にも甚大な被害をもたらした。国土交通省港湾局により取り纏められた港湾の公共土木施設被害について、県別の被害総額を図-2.2に示す。岩手県における港湾の公共土木施設被害が1,438億円と最も高く、次いで福島県の1,000億円、宮城県の837億円であり、全ての合計は4,126億円に上る。

青森県から茨城県の太平洋側沿岸部に位置する重要港湾（14港）を図-2.3に示す。これら14港の重要港湾を対象に、港湾の被害施設の復旧費用の見積額を図-2.4に示す。これらの合計額は、およそ3,000億円である。八戸港、釜石港、大船渡港および相馬港における湾口防波堤を含む第一線防波堤には、非常に高い津波が襲撃し、これらの防波堤の復旧費用は非常に高くなる。そのため、これらの港湾における外郭施設の復旧費用は、他の港湾と比較して非常に高くなっている。一方、小名浜港については、係留施設の復旧費用について、他の港湾と比較して高くなっている。Nozu（2012）によると、地震動の0.3Hzから1.0Hzの範囲の周期成分が、岸壁の大きな変位に大きく影響する。対象の14港湾のうち震源に近い港湾については、この0.3Hzから1.0Hzの地震動の成分が比較的小さいが、小名浜港については、この周期成分の地震動がとりわけ大きい。このように、係留施設は、津波被害よりも地震動による被害が生じやすい傾向がある。

3. 防波堤の被害

3.1 被害の概要

第一線防波堤がない仙台塩釜港の塩釜港区を除く13港の対象重要港湾における湾口防波堤を含む第一線防波堤について、その総延長および被災延長、ならびに、

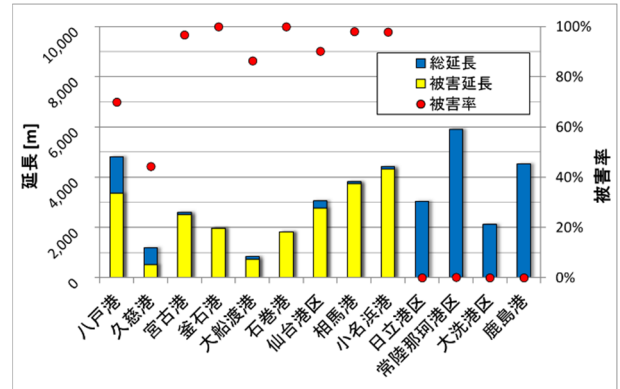


図-3.1 対象重要港湾の第一線防波堤の被害

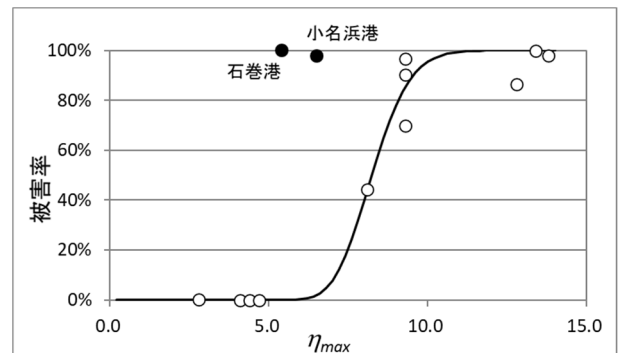


図-3.2 第一線防波堤の津波フラジリティカーブ（その1）

被災延長を総延長で除して得られた被害率を図-3.1に示す。なお、この被災延長には、津波被害のみならず、地震動による被害も含まれ、また、ケーソンが流失する等といった甚大な被害のみならず、被覆ブロック等が移動する等といった軽微な被害も含まれていることに注意されたい。詳細は次節で述べるが、地震動による被災が主要因であった石巻港および小名浜港の第一線防波堤を除くと、津波が高いと第一線防波堤の被害率が大きくなる傾向がある。

3.2 津波フラジリティカーブ

13港の対象重要港湾について、第一線防波堤の被害率および当該防波堤前面における最大津波高（ η_{max} ）を図-3.2に示す。なお、当該防波堤の前面における津波高は、その延長に渡って分布するが、その全延長での津波高の最大値を、ここでは最大津波高としている。この最大津波高は、東北地方太平洋沖地震津波について、Tomitaら（2006, 2008）の津波解析モデルを用いて再現した解析結果による値を採用した。なお、この解析結果の妥当性は別途検証しており、対象港湾内の痕跡調査との比較から再現性を確認している。

石巻港および小名浜港では、他の対象港湾と比較して

津波高が低かったにもかかわらず、第一線防波堤の被害率が大きかった。これは、石巻港および小名浜港における第一線防波堤の被害の主要因は地震動であり、一方で、他の対象港湾における第一線防波堤の被害の主要因は津波であったことに起因している。そのため、第一線防波堤の被害率と最大津波高を比較した図-3.2に示すように、石巻港と小名浜港のプロットは、他の対象港湾のプロットの分布から外れている。

このことから、第一線防波堤の津波脆弱性カーブについては、石巻港と小名浜港を除いた対象重要港湾のデータを用いて算出することにした。

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x \frac{1}{t} \exp\left(-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (3.1)$$

第一線防波堤の最大津波高と被害率との関係に、式(3.1)に示す対数正規累積分布関数を回帰させた曲線が、図-3.2に示す実線である。このとき、 $F(x)$ および x は、それぞれ、被害率および最大津波高 (η_{max}) である。また、このときの μ および σ の値は、それぞれ、 2.108×10^0 および 1.147×10^{-1} である。

この最大津波高のみをパラメータとする場合、大津波高が約9mのところ、異なる被害率の3つのプロットがある。これは、第一線防波堤の津波外力に対する耐力が考慮されていないためである。そこで、適切な津波脆弱性カーブを算出するためには、第一線防波堤の設計耐力を考慮する必要がある。

設計波高は、作用する波浪に対する施設の安定性を表すものである。そのため、設計波高は、作用する津波外力に対する施設の耐力の目安として、一つの指標となり得る。そこで、第一線防波堤の設計波高を用いることで、第一線防波堤の設計耐力を考慮することとした。第一線防波堤の被害率と、 η_{max} を $H_{1/3}$ で除したパラメータとの関係をプロットしたものを図-3.3に示す。ただし、前述の津波高と同じように、設計波高は、当該防波堤でも場所により異なる値となっていることがあるが、その全延長での設計波高の最大値を用いて、ここでは設計波高 ($H_{1/3}$) としている。

ここでも同様に、地震動が被害の主要因である石巻港および小名浜港では、他の対象港湾のプロットの分布から外れている。一方で、津波が被害の主要因である大船渡港についても、他の対象港湾のプロットの分布から外れている。これは、大船渡港の第一線防波堤（湾口防波

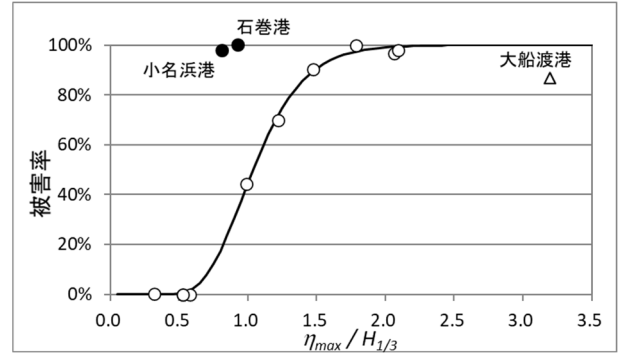


図-3.3 第一線防波堤の津波脆弱性カーブ (その2)

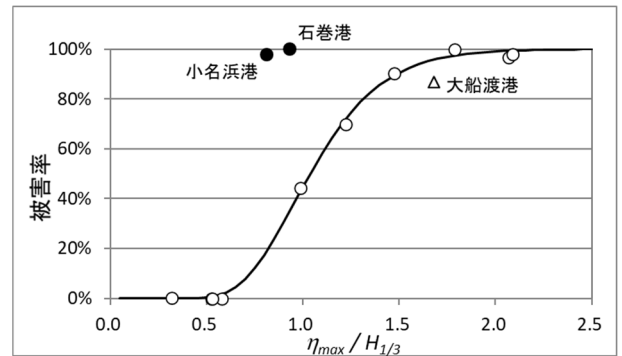


図-3.4 第一線防波堤の津波脆弱性カーブ (その3)

堤) では、設計波浪による作用外力よりも、設計津波による作用外力の方が大きく、当該防波堤の断面は、設計波浪ではなく設計津波によって断面が決定されていることに起因している。つまり、大船渡港の第一線防波堤の作用外力に対する耐力は、設計波高を指標とすることができない。なお、他の対象港湾の第一線防波堤の断面は、設計津波ではなく設計波浪によって決定されている。

これらのことから、第一線防波堤の津波脆弱性カーブについては、石巻港および小名浜港、ならびに、大船渡港を除いた対象重要港湾のデータを用いて算出することにした。

第一線防波堤の被害率とパラメータ $\eta_{max}/H_{1/3}$ との関係に、式(3.1)に示す対数正規累積分布関数を回帰させた曲線が、図-3.3に示す実線である。このとき、 $F(x)$ および x は、それぞれ、被害率およびパラメータ $\eta_{max}/H_{1/3}$ である。また、このときの μ および σ の値は、それぞれ、 3.861×10^{-2} および 2.793×10^{-1} である。このパラメータ $\eta_{max}/H_{1/3}$ を用いた津波脆弱性カーブは、前述の除外した3港湾を除いて、被災の実態を非常によく再現している。

大船渡港の第一線防波堤は、設計断面の決定には設計

波浪ではなく設計津波が用いられているが、被災の主要因が津波であるため、大船渡港のように設計津波により断面が決定された施設に対して、このパラメータ $\eta_{max}/H_{1/3}$ を用いた津波フラジリティカーブの適用可能性について検討した。

具体的には、滑動安定性に着目し、設計津波による作用外力と同じ外力を作用させる設計波高を求め、仮想的な設計波高を設定する。なお、設計波の周期については、実際の設計波と同じものとした。この仮想的な設計波高を用いて、大船渡港のパラメータ $\eta_{max}/H_{1/3}$ と被害率とをプロットしたものを図-3.4に示す。なお、図中の実線は、図-3.3に示す津波フラジリティカーブと同じである。図中の大船渡港のプロットは、実線から若干外れている。これは、実際の設計波と同じ周期を用いていることが原因と考えられる。しかし、その被害率の差異は10%程度であることから、設計津波で断面が決定された第一線防波堤であっても、仮想的な設計波高を用いることで、被害率を概略で評価することは可能である。

4. 倉庫の被害

4.1 被害の概要

港湾管理者および国土交通省港湾局の協力を得て、港湾における防波堤、係留施設、海岸保全施設、倉庫、荷役機械等といった港湾施設について、東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による被害に関する情報を収集した。この被害に関する情報を収集した対象は、北海道から茨城県までの太平洋沿岸に位置する港湾である。収集した情報の内容は、それぞれ施設毎・工区毎に、被害程度（「大」、「中」、「小」および「無し」）地盤高または水深、設計波高等の設計条件、構造形式、来襲した津波高、復旧費用、復旧期間、被災原因（地震動または津波）等である。

本検討では、これらのうち、港湾内の倉庫を対象に被害の概要および津波フラジリティカーブを取り纏めた。197の倉庫の被害情報を収集でき、その情報の内容は、構造形式、地盤高、津波高および被害度である。

構造形式は、「鉄筋コンクリート造」(RC)、「鉄骨鉄筋コンクリート造」(SRC)、「鉄骨造」および「その他または不明」の4種類に分類され、それぞれのサンプル数は、34、65、14および84である。被害度は、「大」、「中」および「無し」の3種類に分類した。被害度「大」は、鉄骨の変形や倉庫自体が流失する等といった倉庫の構造体に被害が生じているものとした。また、被害度「中」は、倉庫の構造体への被害は生じていないが、壁やシャッター

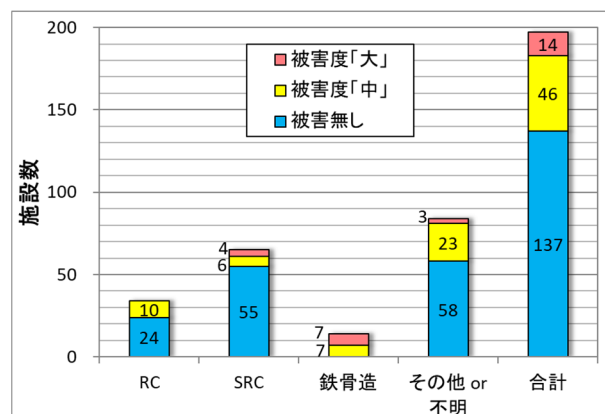


図-4.1 港湾における倉庫の被害

一に被害が生じたものとした。

倉庫の構造種別毎の被害程度を図-4.1に示す。被害度は、津波高や津波の流速に応じた津波外力の大きさだけではなく、構造形式によっても異なる。RCおよびSRCについては、壁部材の耐力も構造体の耐力要素として見込んでいることから、耐力を期待していない壁部材としている鉄骨造と比較して、津波に対する構造体全体の耐力が高くなっている。そのため、RCおよびSRCについては、被害度が低く抑えられていると考えられる。

港湾における倉庫の被害度について、地盤高の他に、津波高（ここでは、浸水高を表すものとする）との関係を示したものが図-4.2である。全ての構造形式について、被害度「大」となる閾値と「中」となる閾値の差異を確認することができない。しかし、被害度「大」もしくは「中」となるケースを合わせた場合、津波高4mを閾値として、何らかの被害が生じることが確認できる。

港湾における倉庫の被害度について、地盤高の他に、浸水深との関係を示したものが図-4.3である。被害度「大」となる閾値および「中」となる閾値について、構造形式による明確な差異を確認することができない。しかし、全ての構造形式を対象にした場合、被害度「大」の閾値および「中」の閾値は、それぞれ、浸水深2mおよび浸水深1mであることが確認できる。

4.2 津波フラジリティカーブ

Koshimura ら (2009) は、インド洋津波によるインドネシアのバンダアチェの建物被害を用いて、建物の津波フラジリティカーブを提案した。本検討では、このKoshimura ら (2009) と同様の手法を用いて、港湾における倉庫の津波フラジリティカーブを算出した。なお、Koshimura ら (2009) の建物のサンプル数は3万を超えているが、本検討でのサンプル数は197と非常に少ないことに注意されたい。そのため、構造形式別ではなく、全

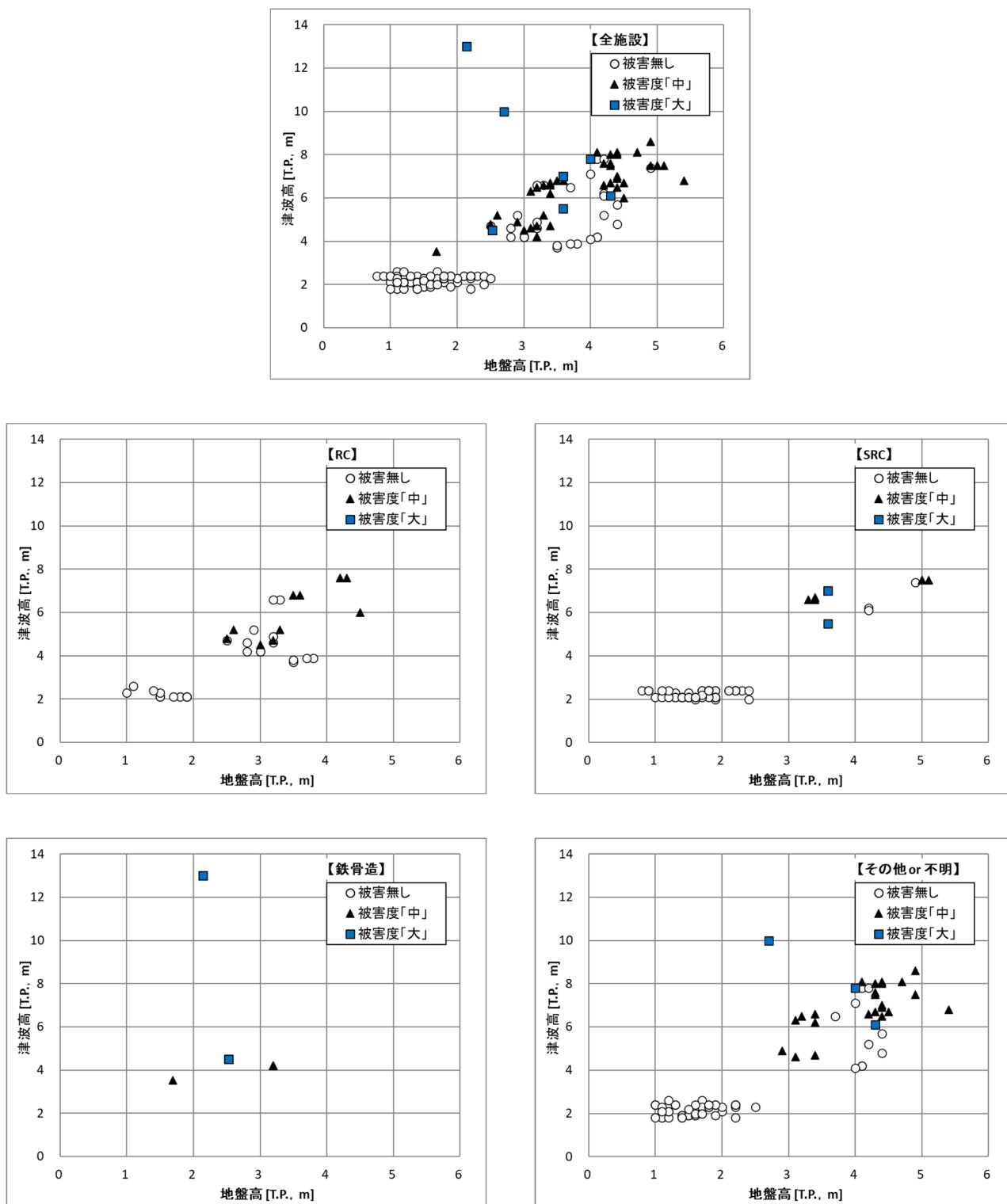


図-4.2 港湾における倉庫の構造別の被害と津波高

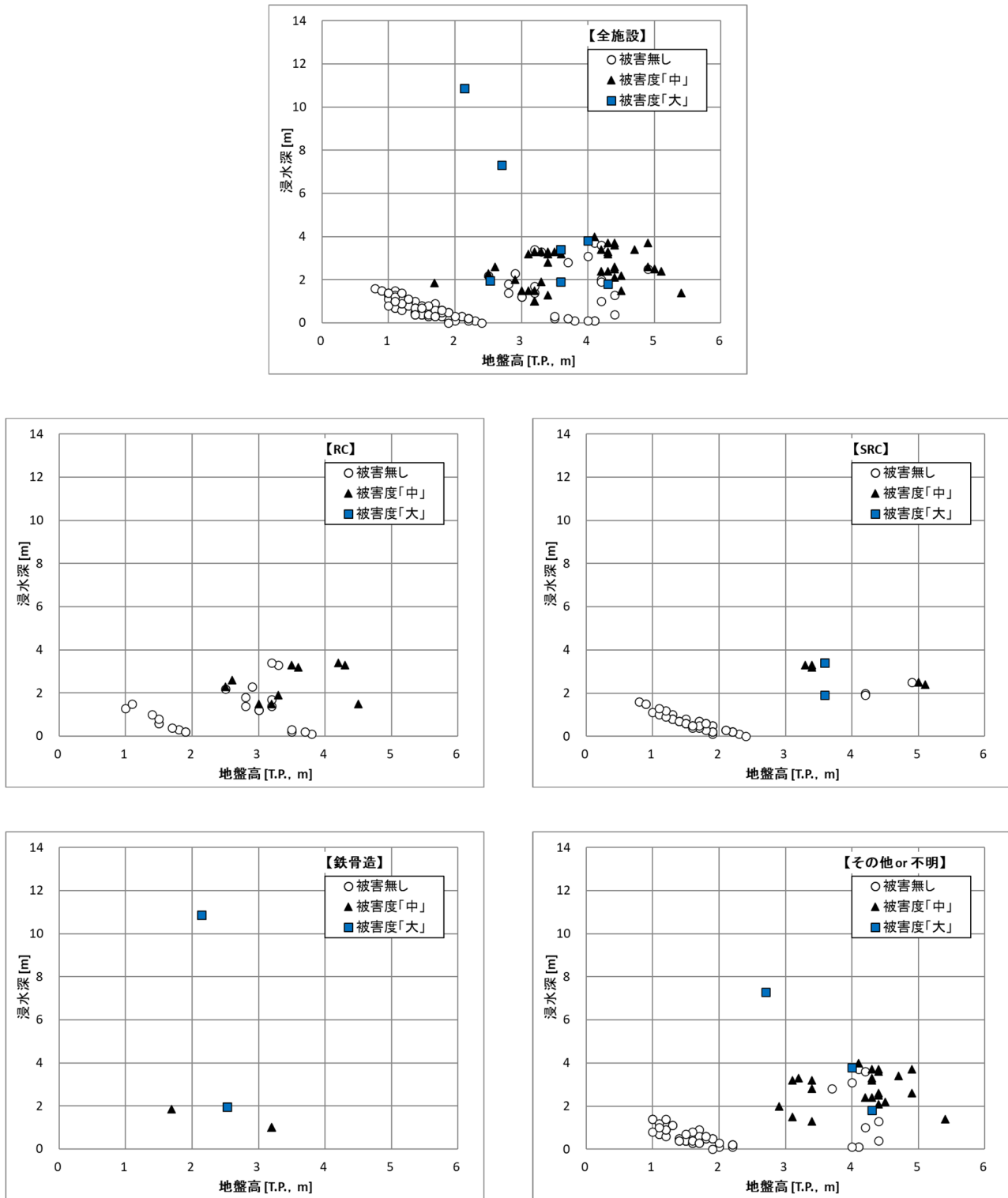


図-4.3 港湾における倉庫の構造別の被害と浸水深

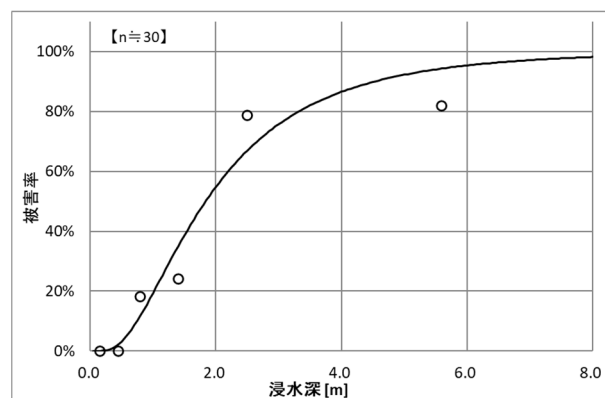
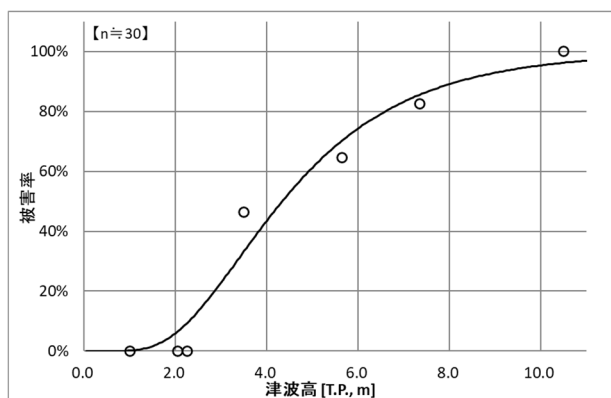
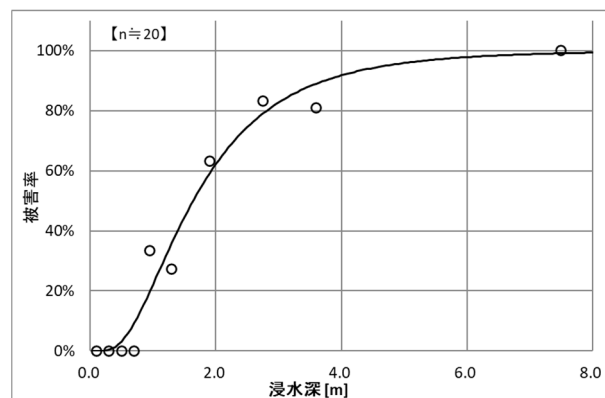
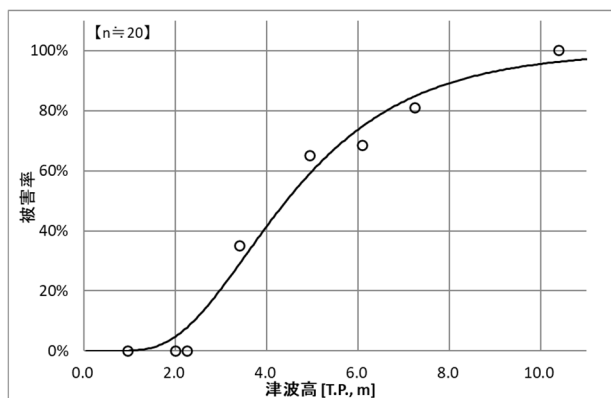
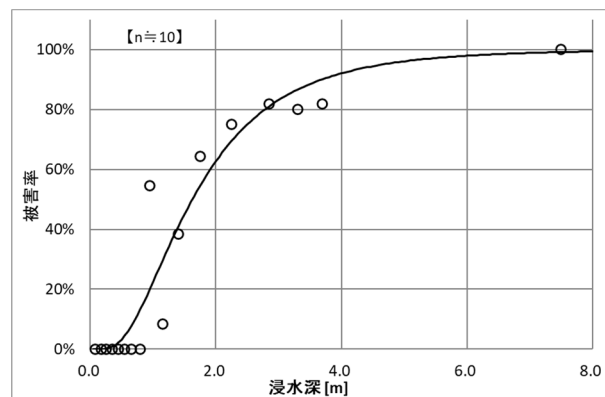
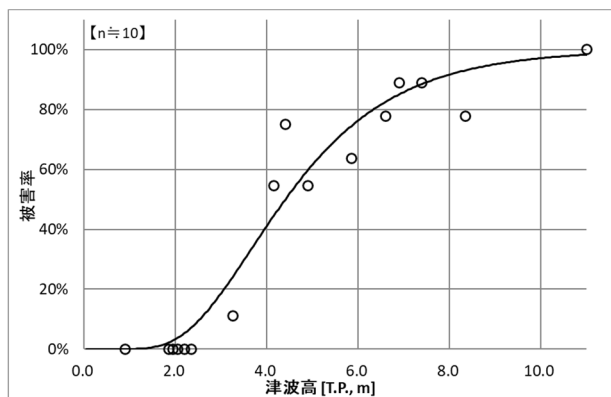


図-4.4 津波高をパラメータとした港湾における倉庫の津波フラジリティカーブ

図-4.5 浸水深をパラメータとした港湾における倉庫の津波フラジリティカーブ

での構造形式を合わせて、港湾における倉庫津波フラジリティカーブを算出した。また、被害度についても「大」および「中」の区別をせず、両方を合わせて「被害有り」とした。

津波高をパラメーターとした場合の被害率の算出方法は次のとおりである。まず、被害率を算出するための津波高の範囲に含まれるサンプル数 n を設定する。次に、津波高0mから上げてサンプルを数えていき、設定したサンプル数 n に達したところで最初の津波高の範囲の上限値とする。次の津波高の範囲は、最初の津波高の範囲の上限値から上げてサンプルを数えていき、同様に設定したサンプル数 n に達したところで、当該範囲の上限値とする。この方法を全てのサンプルを終了するまで続ける。このように設定した津波高の各範囲について、当該範囲に含まれる全サンプル数で「被害有り」のサンプル数を除して被害率を算出した。また、当該範囲を代表する津波高は、その範囲の中間値とした。なお、設定するサンプル数 n は、10、20および30の3ケースとし、比較検討を行った。

港湾における倉庫の被害率と津波高との関係を図-4.4に示す。図中の曲線は、前章の第一線防波堤の津波フラジリティカーブと同様に、式(3.1)に示す対数正規累積分布関数を回帰させた曲線であり、ここでは、 $F(x)$ および x は、それぞれ、被害率および津波高である。

設定するサンプル数 n が10のケースでは、他のケースと比較して、より多くのプロットが得られるが、津波高の範囲毎に含まれるサンプル数が少ないため、分布にばらつきが認められる。一方、設定するサンプル数 n が30のケースでは、プロットの数が非常に少ないため、回帰した曲線の信頼性が低い。そのため、津波高をパラメーターとした津波フラジリティカーブの場合、本検討の条件下では、設定するサンプル数 n が20のケースが最も再現性が高いと考えられる。このときの μ および σ の値は、それぞれ、 1.488×10^0 および 4.775×10^{-1} である。

港湾における倉庫の被害率と浸水深との関係を図-4.5に示す。被害率の算出方法等は、津波高をパラメーターとした場合と同様であり、パラメーターを津波高から浸水深に置き換えて実施した。津波高をパラメーターとした津波フラジリティカーブと同じように、浸水深をパラメーターとした津波フラジリティカーブの場合も、本検討の条件下では、設定するサンプル数 n が20のケースが最も再現性が高いと考えられる。このときの μ および σ の値は、それぞれ、 4.927×10^{-1} および 6.418×10^{-1} である。

5. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による港湾および港湾施設の被害の概要を整理するとともに、港湾における第一線防波堤および倉庫の津波フラジリティカーブを提案した。

港湾における第一線防波堤の津波フラジリティカーブについては、港湾毎の当該防波堤の被害延長を総延長で除した値を被害率とした場合、最大津波高を設計波高で除したパラメーター $\eta_{max}/H_{1/3}$ とする対数正規累積分布関数の再現性が高い。

港湾における倉庫の津波フラジリティカーブについては、津波高をパラメーターとするケースと、浸水深をパラメーターとするケースの2つを提案した。これらと比較した場合、浸水深をパラメーターとする津波フラジリティカーブの方が、曲線の勾配が大きいため、より良いと考えられる。

6. あとがき

本研究で提案した港湾における第一線防波堤の津波フラジリティカーブは、各港湾における第一線防波堤の被害延長を総延長で除した値を被害率としているため、港湾毎の被害の概要把握には活用できる。しかし、その被害率の定義を踏まえると、被害度別の被災確率の評価に用いることができない。例えば、防波堤の工区毎の被害情報を用いて、より詳細に被害率を設定することで、被害度別の被災確率を評価可能な津波フラジリティカーブを提案することが、今後の課題である。

本研究で提案した港湾における倉庫のフラジリティカーブは、設定したサンプル数 n を満たす津波高または浸水深の範囲を設定し、その範囲毎に被害率を算出したが、全サンプル数が少なく信頼性が低い。そのため、サンプル数が比較的少ない場合に適用できる統計的な手法を用いることが、今後の課題である。

(2021年8月31日受付)

参考文献

- 国土交通省：平成 23 年発生災害国土交通省所管公共土木施設被害報告概要
 国土交通省：「交通政策審議会港湾分科会」第 48 回会合資料
 Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H. and Imamura, F. (2009),
 “Developing Fragility Functions for Tsunami Damage

Estimation Using Numerical Model and Post-tsunami Data from Banda Aceh, Indonesia”, Coastal Engineering Journal, JSCE, Vol.51, No.3, pp.243-273.

Honda, K and Tomita, T (2014): Damage to Port Facilities by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, Proc. 24th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Busan, Korea, ISOPE, pp. 30-37.

Tomita, T., Honda, K. and Kakinuma, T. (2006), “Application of Threedimensional Tsunami Simulator to Estimation of

Tsunami Behavior Around Structures”, Proc. the 30th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp.1677-1688.

Tomita, T. and Honda, K. (2008), “Tsunami Estimation Including Effect of Coastal Structures and Buildings by 3d-model”, Proc. the 5th International Conference on Coastal Structures, ASCE, pp. 1433-1445.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1173 September 2021

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019 〕
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

国土技術政策総合研究所資料

No.1173

港湾における防波堤・倉庫の津波フラジリティカーブ

September 2021