世界に貢献する港湾空港技術

PARI

VOL.29

OCTOBER 2017

Airport

Technology

Port

2 __ Front Line - 特集 -

常時微動観測でサイト特性を把握

港湾計画の段階が勝負！
地震に強い港湾を低コストで

6 __ Focus On 研究活動の最前線へ

疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーションに関する研究
強い地震波の放出源を点と仮定
単純なモデルでも、再現性に遜色なし！

8 __ Close Up 現場からの報告

地震後の被害状況を正確に調査
ＧＰＳ技術を利用した変形計測ツールによる現地計測

10 __ Front People 研究者の広場 挑戦する研究者たち

研究の成果がついに港湾設計基準に！
新たに変わる鋼管杭の耐震設計法

14 __ CROSS LINE 国際交流レポート

オーストラリアで開催された
PIANC・YP-Com（若手技術者委員会）の会議に参加しました

15 __ TOPICS

地盤改良研究グループの高橋英紀グループ長が
文部科学大臣表彰で若手科学者賞を受賞！

「一般公開」を開催しました

地震防災研究領域
野津 厚 領域長

港湾空港技術研究所第２代理事長
元国土交通省港湾局長
金澤 寛 顧問

常時微動観測でサイト特性を把握

港湾計画の段階が勝負！ 地震に強い港湾を低コストで

南海トラフ等の巨大地震の発生が懸念されるなか、
港湾の地震対策は喫緊の課題。
しかもその対策は、低コストに抑えなければなりません。
難題解決のカギとなり得る港湾計画上の工夫について、
地震防災研究領域の野津厚領域長と金澤寛顧問が対談しました。

既に設計段階では注目されているサイト特性

金澤　野津さんが地盤工学会誌に書かれた「地震に強い港湾を低コストで実現するための港湾計画上の工夫について」という論説を読んで、強い興味を持ちました。従来の地震対策は「計画→設計→施工→維持管理」という一連のプロセスのうち、あなたの言うように、主として設計段階の工夫と、それに必要となる施工段階の工夫によって行われてきています。財政事情が厳しいなか、いかに小さいコストで実現するかを考えた場合、設計・施工段階の工夫に加えて計画段階の工夫が必要ではないか、という提言。こういった観点に基づく研究が、研究者の側から進められているのはすばらしいことだと思う。何がきっかけになったのですか？

野津　私が港空研に入った20年ほど前から、地盤や構造物の地震応答に関する研究は非常に進んでいたんです。しかし、肝心の、どういう地震波が来るのかというところの研究はあまり進んでいなくて。なら私は、これまでみなさんがあまりやっていないそちらの研究のほうを進めたほうがいいだろうと。そう考えて、最初から地震の揺れそのもの、地震動の研究に取り組んできました。

金澤　つまり、どこかで地震が起こったとき、それがどういうふうに伝播してくるか、その伝わり方を中心に研究したわけですね。

野津　はい。港によって地震の揺れにはクセがあるんです。八戸港には八戸港らしい、関空には関空らしい地震波がある。そういうのをきちんと考慮して、例えば横浜港なら横浜港ならではの地震波で耐震設計できるようにしようと。そのことに、いちばん力を入れて研究してきました。そのなかで重要になるのがサイト特性。これは、地点ごとにかなり違う地震波のクセのことです。例えば地震波の振幅が大きいか小さいか、周期の短い地震波が出やすいのか長い地震波が出やすいのか、そういうことも、地点によって大きく違う。それがわかったのは、とても大きな一歩でした。実は、このサイト特性については設計の段階では既にかなり考慮され、取り入れられるようになってきているんですよ。平成19（２００７）年にいまの港湾技術基準が改訂されましたが、その頃からサイト特性の重要性は注目されるようになってきた。技術基準検討会議などの場で、丁寧に説明を重ねた結果だと思います。

金澤　要するに、まず港湾計画で岸壁の位置などが決まる。そうすると、その地点のサイト特性は調べることができるから、それを考慮した設計をやるようになってきていると。

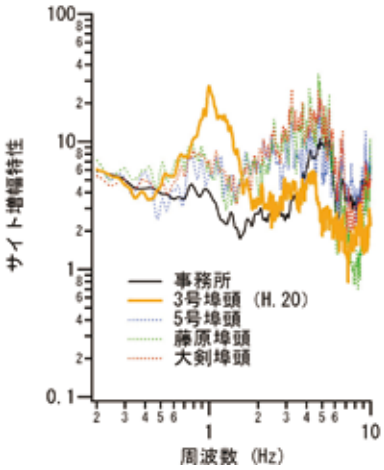
野津　そうです。サイト特性が大きな場所に施設を造る場合は、当然大きな地震波が懸念されますから、大きな設計入力地震動を考えることになりますし、岸壁も、とくに丈夫に造るようになっています。逆に、サイト特性がそこまで大きくない場所であれば、そこまでコストをかけなくてもいいという判断ができる。そういう意味では、設計というところでは、かなり合理化されていると思います。

計画段階から考慮できればコストの大幅縮減にも

野津　ただ、やはり設計の段階では、できることに限りがあって。例えば、岸壁が計画された場所が大きな地震動の想定される場所だったら、どうしても入念な地盤改良が必要になり、莫大な建設コストがかかるわけです。計画が終わった後で調査して、実はそこは地震の揺れが大きい場所だったとわかる……、そういう経験を何度もしているうちに、もう少し早く調べられればという思いが強くなりました。計画の段階から港の中のサイト特性の分布をしっかり調査して、新規に岸壁を整備するようなときに、サイト特性が小さいところを選ぶということが可能なのであれば、それだけで、ずいぶんコストが節約できる。できれば今後はそういう方向を考えていったほうがよいのではないかと。

金澤　計画をつくる段階で、配置を決める際の検討事項の一つに加えたらいいということですね。いままでは波や風、地盤の条件とか、自然環境の状況、背後の物流の容易性、周辺の土地利用の状況などを考えて計画をつくっていたわけだけど、事前にサイト特性も調べておいて、その分布をみた上で、そのことも考慮して場所を決めたらよいのではないかと。新規だけでなく、再開発もそう。例えば耐震強化バースの計画で候補が３つあったとしたら、その３地点のサイト特性がわかれば、よりコストのかからないところが選べるわけだ。

野津　おっしゃるとおりです。設計の段階では、常にコストのことに悩んでいるといっても過言ではなくて。お金をかければ強い岸壁が造れるけれど、そこまでコストは掛けられないという話は全国いたるところで聞きます。ですから、設計の段階では既に取り入れられているサイト特性の知見を、計画の段階でも活用していったほうがよいのではないかと。計画段階で配慮すべき事項はいろいろあるので、もちろん地震のことだけ考えて決めるわけにはいかないでしょうけど、それにしても、港湾計画の中で地震や地盤を考える要素というのはあまりに少ないと感じます。



小名浜港湾事務所、小名浜港3号埠頭、5号埠頭、藤原埠頭、大剣埠頭におけるサイト増幅特性
（東日本大震災後の余震観測のデータを総合したもの。港湾構造物に被害をもたらしやすい0.3 ～ 1Hz程度の周波数帯域では、3号埠頭のサイト増幅特性が群を抜いて大きい）

施設名称	構造形式	設計震度	最大せり出し量
3号埠頭岸壁（-10m）	矢板式	0.15	1.6m
5号埠頭岸壁（-12m）	ケーソン式	0.20	0.8m
藤原埠頭岸壁（-12m）	ケーソン式	0.12	0.3m
大剣埠頭岸壁（-7.5m）	ケーソン式	0.10	0.5m

東日本大震災における小名浜港地震観測点付近の4施設の被害比較
（3号埠頭の岸壁には顕著な被害が生じているのがわかる）

小名浜港3号埠頭3-2岸壁における被災状況

小名浜港5号埠頭岸壁（-12m）の被災状況

常時微動観測でサイト特性を簡便に把握

金澤　一つの港湾の中であっても、サイト特性という観点からみたらかなり違っているのですか？

野津　はい。その変化が大きい港もあれば、小さい港もあって、現地を調査するとわかるんです。サイト特性を調べるうえでもっとも確実なのは地震観測。例えば静岡の清水港は、中部地方整備局が港の中に複数の強震計を設置しているので、それぞれ揺れが違うのが明らかにわかります。福島の小名浜港の場合は設置されている強震計は1ヵ所ですが、東日本大震災の後、臨時でポータブルの地震計を置かせていただいてしばらく観測したことがあって。そのデータを解析したら実際の被害に対応していたんです。つまり、震災で顕著な被害を受けたバースは、サイト特性の大きい位置にあった。東日本大震災の事例をみても、サイト特性の大小が港湾構造物の被害に直結しているということは明確です。

金澤　でも、サイト特性を計画に取り入れるには、事前にそれが調べられていないと。現状ではどの程度わかっているのですか？

野津　事業が行われようとしている場所では、サイト特性を把握するために常時微動観測という方法がとられます。それをもう少し広げて、あらかじめ重要港湾の中で面的にサイト特性の分布を調べておこうということも、実はかなり行われているんです。

金澤　では、もうけっこうデータはあるし、仮になかったとしても、その常時微動観測を行えば調べることはできるわけだ。それはどういったものですか？

野津　常時微動観測は、地震観測に比べるとかなり簡便な方法です。地震観測の場合、地震が来るまで機器を設置して待っていなければいけませんが、常時微動観測はいつでもできる。実は、地盤というのは地震でない状態でも、非常に細かく震動しているんですよ。人間には感知できないこの振動を、非常に感度のよいセンサを地盤に設置することで計測できるんです。

地震観測と相関するデータをリーズナブルに入手可能

野津　常時微動の原因は、大気圧の変動や、遠くで波が砕波したことで伝わる振動など、いろいろ考えられています。例えば、大阪平野で行った常時微動の観測結果と日本海側の海の荒れ具合には相関関係があるというふうに。あと、当然、車の走行や工場の機械の振動など、人間の活動も関係します。

金澤　原因を問わないそういった常時

の微動でも、サイト特性については地震の揺れと同じように評価できるということですね。強震観測で得たデータも常時微動で得たデータも、同じように使えるということ？

野津　まったく質が同じとまでは言いませんが、非常に近いデータが得られます。例えば常時微動観測で1・3Hzにピークがあるようなデータが得られたとすると、その場所ではまず間違いなく、地震波を測っても1・3Hzにピークが出てくる。その相関性は非常に高いことが確認できています。逆に、常時微動観測でピークがないような場所は、地震波でもピークが出にくい。ですから、常時微動観測だけでも、港の中でどういったところがリスクが高いかという抽出は十分に可能です。

金澤　サイト特性がわかっていない港で新規の計画や再開発の計画をつくろうというときには、常時微動観測をすれば

必要なデータは得られると。十分に意味のある計画に導くことができるデータが得られると。そういうことですね。

野津　しかも、常時微動観測自体は1ヵ所あたり15分で済みます。よく常時微動計を持って観測に出かけるのですが、私1人でも丸1日あれば、港の中で15点くらい測ることができる。そういう意味ではコストパフォーマンスも非常によいです。

常時微動観測の様子

金澤　コンサルタントに委託するにしても、非常に安い値段で可能だろうし、それは使わない手はないな！

港湾計画上の工夫を積極的に提案したい

野津　常時微動自体は長年、日本の地震工学の分野でいろいろな人が観測し、研究してきています。そこにわれわれが新たに付け加えたとすれば、これまで地震観測データを分析して評価してきたサイト特性と、この常時微動との間に、きちんと対応関係があると示したということ。耐震設計の中でサイト特性の重要性が理解されるようになり、それと常時微動が結びついて、活用できる道が開けてきたのではないかと思っています。そういう意味では既にツールはあるので、あとは使えばよいのだと気づいていただければ……。

金澤　それはこちらから、港湾計画を主導しているところに出向いて話をしたほうがいい。予算的にも技術的にも支障がなくて、やれば効果が絶対に上がるわけでしょう？

野津　そうです。よいことずくめです！

金澤　インフラというのは新陳代謝していくもの。改良したり造り直したりするときは、絶対にこの話は取り入れたほうがいい。例えば民間施設については設計段階では関与できませんが、港湾計画には含まれるから、そこでならチェックも指導もできる。そういう意味でも、港湾計画の段階からこれをやるのは非常に重要だと思います。

野津　サイト特性を考慮する以外にも、港湾計画に関しては工夫の余地があると思っています。一つ考えているのは桟橋。桟橋の地震被害のパターンには特徴があって、必ず背後の土留めが関与しているんです。設計レベルを超える地震動が来た場合、どうしても後ろから土圧で押されて土留めが前に出てきてしまう。それによって桟橋が損傷するということがある。港湾計画上可能であれば、できるだけ土留めと桟橋の距離は離したほうが、地震に対しては有利です。整備する場所が決まってからでは遅いので、工夫するとしたら計画の段階から始めるしかない。これも、港湾計画を立てる方に知っておいていただきたいことです。サイト特性の話もそうですが、こういったことは港湾計画策定の主体である管理者に働きかけるのはもちろん、計画実務者であるコンサルタントに知ってもらうことが、最後には重要になるでしょう。勉強会を開くとか、あらゆるチャンネルを使って、今後しっかりやっていくべきだと考えています。

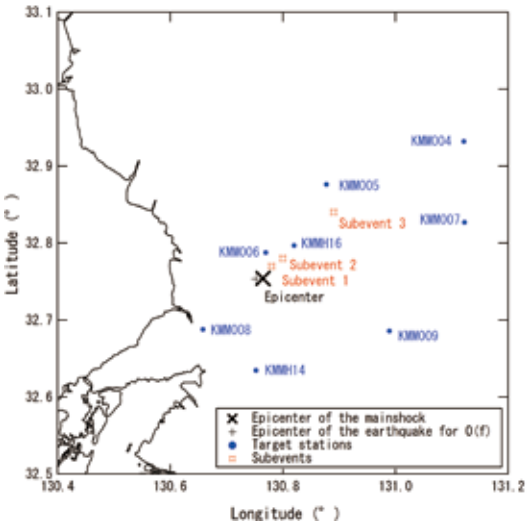
疑似点震源モデルを用いた強震動シミュレーションに関する研究

強い地震波の放出源を点と仮定 単純なモデルでも、再現性に遜色なし！

強震動シミュレーションのための震源のモデル化方法として従来よりも単純な疑似点震源モデルを開発した港空研。いくつかの地震について精度を検証したところ、単純にもかかわらず観測記録をよく再現できることが判明。一方で、課題も見えてきたといいます。研究に取り組む地震動研究グループの長坂陽介研究官に取材しました。

点震源の配置

×：震源
赤：点震源の位置
青：計算結果と観測結果を比較するための強震観測点



地震防災研究領域 地震動研究グループ
長坂陽介 研究官

震源をシンプルに点で表す 使いやすいモデルを提案

地震のシミュレーションを行う際、必要となる震源のモデル化。ここでの「震源」は地震を発生させた領域という意味ですが、いわゆる気象庁が発表する「震源」は地震が始まった地点のことで、使い方によって少し意味が変わります。実は大きな地震になると、気象庁による「震源」と「強い地震波を出す領域」が遠く離れていることも珍しくありません。震源のモデル化で重要なのは後者のほうで、その領域は、ある程度の広がりを持つものとされています。

「従来のモデルは、強い地震波を出す領域を、広がりを持ったままモデル化しようとするものです。現在、実務で広く利用されているのは特性化震源モデルというモデルで、これも実際の震源過程を考えるとかなり単純化されたモデルですが、仮定した領域を分割して一つひとつ計算し、足し合わせる必要があります。時間的・空間的な断層破壊の進行を考慮するため、必要なパラメータが多い。時間差はどれくらいかとか、どれくらい細かく分割したらよいのかとか、そういうのもけっこう煩瑣で難しいんです」

この領域を点と仮定してもよいのではないかという提案が、港空研が5年ほど前に開発した疑似点震源モデル。震源の時間的・空間的な広がりを最大限に単純化するため、必要なパラメータが少なく、使いやすいのだといいます。

「地震、震源を、なるべくシンプルに表すモデルですね。こういった単純なモデルでも精度よく計算でき、再現性が確保できることがわかれば、実務でも使えるようになるかもしれないと思い、研究に取り組んでいます。現時点でも、地震によっては特性化震源モデルと同等か、あるいはそれ以上にきちんとシミュレーションできることがわかりつつある。いろいろな過去の地震に適用してみて、どこまでできるか、課題は何なのか、それを確認しているところです」

過去の地震を用いた検証で 再現性の高さを確認

疑似点震源モデルでは、破壊を単純化しているため、きちんと観測記録を再現できるかどうかの検証が必要。2005年に起きた千葉県中部の地震を用いての検証では、178地点で観測結果と計算結果を比較。その結果、点震源でも十分精度よく観測記録を再現できることがわかったといいます。

「1つの点震源で、ほぼ完ぺきに再現できた。課題もとくに見つかりませんでした。ほかにもいくつかの地震について精度を検証し、従来の複雑なモデルと比べて少なくとも同等の精度を持つことがわかったんです。そんななか、2016年に熊本地震が発生。そこで、この熊本地震についても疑似点震源モデルでモデル化し、強震動シミュレーションを試みました」

千葉県中部の地震がマグニチュード6の震源の深いスラブ内地震（※）だったのに対し、熊本地震はさらに大きいマグニチュード7で、震源の浅い内陸地震。点震源の適用ははるかに困難なはず。このような地震に対し、疑似点震源モデルでどこまで再現できるか、どのような問題があるかを調べようとしたわけです。

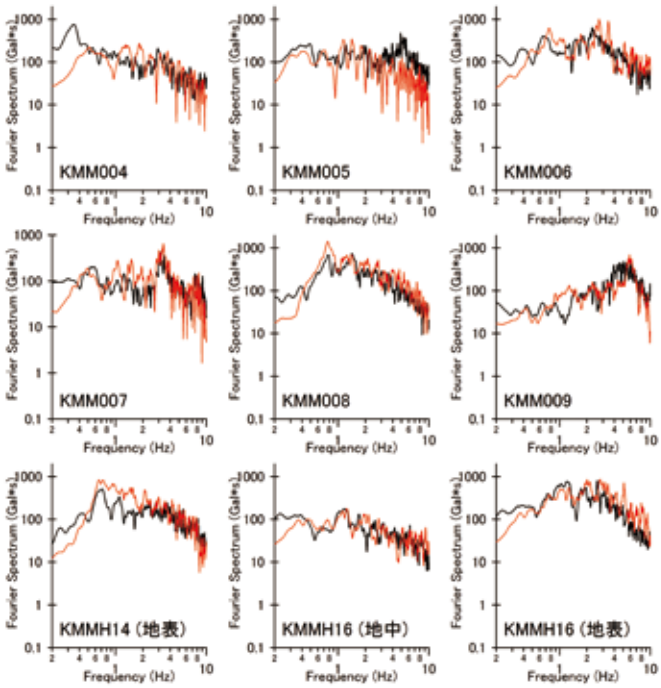
「熊本地震では、検討の結果、3つの点震源を置くことにしました。この時点で、熊本地震がより複雑な地震であることがわかりますよね。この3つの点に、それぞれ違うパラメータを設定。時間差をおいて地震波を発生させるのですが、それぞれから出たものを合わせると、うまい具合に再現できた。この結果は英文ジャーナルにも掲載されました」

※沈み込んだプレート内で起こる地震

疑似点震源モデルの2016年熊本地震への適用

再現結果2：フーリエスペクトル

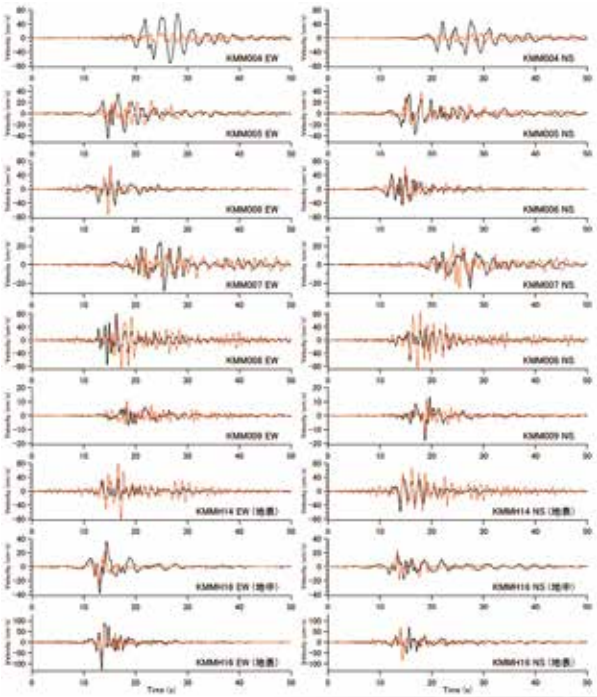
赤：疑似点震源モデルによる計算結果
黒：観測記録



0.6Hz以下の低周波数で全体的に過小評価となっている

再現結果1：速度波形

赤：疑似点震源モデルによる計算結果
黒：観測記録



一部地域では計算結果が小さい傾向に出ている。
例えば、1番目にある「KMM004」の地点は、右の配置図の一番北東側にあり、破壊伝播効果の影響を受けている

熊本地震の検証で2つの課題が明らかに

ただ、一部の地域では合わず、計算結果が小さくなる傾向が出たのだとか。

「現実には断層破壊が進行するにしたがって、地震波は重なり合い、その重ね合わせによって、破壊の進行方向では地震波が増幅されることになります。これを破壊伝播効果というのですが、熊本地震では、北東方向で増大しました。広がりを持ったモデルであれば、分割された領域から出た地震波を足し合わせていくのですが、現状の疑似点震源モデルでは重なり合いを表わすことができません。そのため、地震波が強くなっている部分でもそれが考慮されないということが起こったんです。結果、地震動を過小評価してしまう可能性があり、設計上は危険。熊本地震を用いた検証で、より明らかになった課題です」

新たに出てきた課題はもう一つ。フリングステップが再現できないということ。

「フリングステップというのは断層の極々近くのみで見られる大きな段差のある変位波形のこと。要は、ずれたまま戻らない。なかなか得られない記録なのですが、熊本地震ではけっこう観測されました。いまのシミュレーションでは必ず0に戻るようになっているので、とくに低周波数帯で観測結果と整合しないんですよ。これは、疑似点震源モデルだけでなく、従来のモデルでも再現が難しい課題なんです」

これまでフリングステップが重視されてこなかったのは、断層極近傍にしか現れないため観測例自体少なかったことに加え、低周波なので構造物にはあまり影響しないと考えられていたためとか。ところが熊本地震の記録では、岸壁など構造物にも影響を及ぼしかねない周波数に届いていたようなのです。そのため現在、フリングステップを考慮した強震動シミュレーション法を開発、熊本地震の再現計算が行われているところ。

「まずはフリングステップの問題をクリアし、それができたら地震波の重なり合いのほうをやる予定。この2つの課題だけなら、1～2年以内に解決できそうな目処は立っています」

検証を続け、課題を克服 簡単でも実用性のあるモデルへ！

従来のモデルのウィークポイントとして、パラメータの設定が複雑であることのほかにもう一つ、周波数によっては観測結果に見られないようなスペクトルの谷ができるということが挙げられます。

「人工的に分割し、ゆっくりした地震波から細かい地震波まで全部足し合わせて計算しているので、どうしても近いところ同士で足す際に、時間差と距離で打ち消し合ってしまう成分が出てくるんです。これはけっこう問題視していたこと。谷を避けるための設定も考えなければいけませんでした」

この谷ができないことも疑似点震源モデルの強み。なめらかで自然なスペクトルが得られます。

「むしろ疑似点震源モデルのほうが、観測とほぼぴったり合うくらいに再現できている例も多い。より簡単にうまくいって、計算時間も短くできるなら、そのほうがよいのではないかと思って、研究を進めているわけです。こちらを使うことで、設計地震動をつくる人はラクになるはず。できる人が増えるのは、大きなメリットだと思います」

検証はまだ半ば。

「まずは、どこまで使えて、どこが使えないかをはっきりさせたい。従来の複雑なモデルの代わりになり得るか、いま確かめているところです。できれば、それに代われるものにしていきたいです。課題をクリアしていくことで、きっと、簡単でも実用性のあるモデルになる。そんな手応えは感じています」

地震後の被害状況を正確に調査
GPS技術を利用した変形計測ツールによる現地計測

港空研では、地震後の係留施設の利用可否を判断するため、GPSを用いた係留施設変形量計測ツールを開発しています。今回は、港空研の地震防災研究領域 耐震構造研究グループ 小濱英司グループ長らが実施する現地計測の現場を訪ねました。この計測は、2015・2016年に続き3回目となります。同行されたアジア航測株式会社 総合研究所長の織田和夫さんと、国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室長の宮田正史さんにお話を伺いました。

計測ツール開発の経緯

港湾施設は地震で被災した後、係留施設が変形しても緊急物資や避難者の輸送に利用しなければならない場合があり、施設の利用可否を判断しなければなりません。しかし、見た目だけでは損傷判断が難しいこともあります。例えば1995年の阪神淡路大震災時の神戸港高浜埠頭では、杭式横桟橋の杭の被害がありましたが、地上からの見た目では大きな変状は見られず、その後の現場での引き抜き調査で、初めて実際の杭の被害が確認されるということがありました。

大きな地震が起こると地盤変動は広域範囲で生じて測量の基準となる点も移動している可能性があり、過去のデータと比較して構造物だけの変形を把握することが難しくなります。それらの問題を解決して、地震動による係留施設の変形量を正確に把握するために開発されたのが、RTK-GPS(Real-Time Kinematics GPS)を用いた変形量計測ツールです。

「港空研では、港湾施設が地震などで被災した後、現地の調査を行います。その時に施設が使える状態なのかを判断しますが、地震の影響で係留施設がどのくらい動いているのかわからないことがあります。そこで開発したのがGPSを使って計測するツールです。これにより係留施設の変形に特化した計測が可能になりました。港空研ではアプリケーションや実際の運用方法を開発しました。このツールを使えば、計測点1カ所につき10秒程度で結果がスマートフォン端末のアプリ上に出ます」(小濱グループ長)

その場で正確な変位量を計測する これまでにないGPSを用いたシステム

この計測ツールは、RTK-GPS方式により誤差1～2㎝の高精度な計測ができます。現場で即座に変位量を把握することで、地震後の係留施設の状態を正確に把握できるようになります。

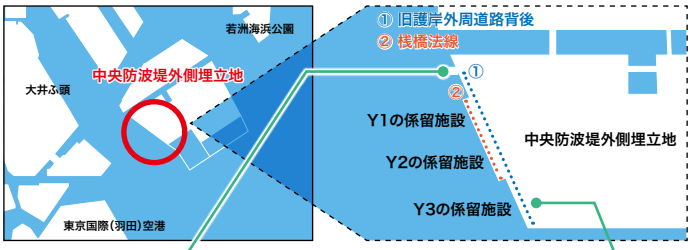
システム導入時には、係留施設などの計測が必要な箇所に予め計測点を設け、また通常は、岸壁移動が影響しない陸域の、地震で変状しない耐震性のある建物の屋上などにGPS基準局を設置。初期値を測り、システムに登録します。地震発生後に計測するときは、計測システム(RTK-GPS移動局、操作端末)を使って計測点を順に計測することで地震前後の発生変位量を把握できます。スマートフォンのアプリで簡単に操作できるので、熟練した技術者がいなくても、一人でも計測できるのが特長です。また、測量結果をPCにインポートし、係留施設全体の被災状況を確認することもできます。

「係留施設の上がどの位動いたかがわからないとその下がどうなっているかという類推もできませんから、このツールによって比較的簡単な方法で、係留施設の変形量を単独で測ることができるようになったのは大きな進歩です。私も阪神淡路大震災の後に現場の調査に行きました。桟橋などは上から見ると何でもないように見えますが、下の杭が曲がっていたりしました。どの位動いたかというのがわからない限り、施設の利用可否の判断ができないということは痛いほどわかっているので、この技術は画期的だと思います」(宮田室長)

旧護岸外周道路背後における計測状況

係留施設上での計測状況

東京港中央防波堤外側埋立地 計測実施位置



計測システム

スマートフォンでの計測結果の表示例

東京港での現地計測

今回の現地計測は東京港中央防波堤外側埋立地で行われました。Y1からY3の係留施設周辺において、旧護岸外周道路背後と桟橋法線の2側線を対象に実施。基準点は、埋立護岸近傍ですが基礎を含め構造が堅固で、耐震性があり地震時護岸変状も影響しない臨海トンネル中央防波堤側換気所の屋上に設置しました。計測方法としては、Y1からY3に向かって歩いて計測点を測定していくという方法です。結果としては、昨年度の計測から今回の計測までの期間中に大規模な地震等は発生していないため、大きな変位はでていないことを確認できました。

最後に、今後この計測ツールをどのように発展させていき、現場で使っていくべきかお伺いしました。

「実際に計測してみましたが、スマホで操作できるので使いやすいと思いました。RTK-GPS自体は新しい技術ではないですが、このツールでは平常時からの計測との比較が瞬時に現場で判断できるようになっているところがいいと思います。機器の導入コストの問題はありますが、それぞれの計測にかかるコストは減るのではないかと思われます。今後このツールを普及させるためには、機器を導入するだけでなく地元業者との災害協定等を行うなどの工夫が必要かと思います」(織田所長)

アジア航測株式会社 織田さん(左)、
港空研 小濱グループ長(右)

国土技術政策総合研究所 宮田さん(左)

「今後は東京港だけでなく、他でも基準局の設置、試計測を行って地震後の係留施設の利用可否判断におけるこの計測ツールの有効性をアピールし、他港でも導入してもらえるよう働きかけていきたいと思います」(小濱グループ長)

「いかに簡単に使えて有効であるかということを周知していくことが重要です。まず現場の皆さんに知っていただいて、コストに見合った働きができるかどうかということも説明していく。その上で事前に準備しておくべき重要な現場はどこかを決め、そこから導入をしていくという手順になるのではないかと思います。これから南海トラフ地震など大規模地震が起こる可能性があり、その時には複数の被災現場で判断しなければならないので、例えばTEC-FORCE(緊急災害対策派遣隊)と港空研の方が測量のセットを持って行って現地で測ったり、各地方整備局と港空研で実際の災害時に対応できるような準備をしていく必要があると思います」(宮田室長)

港湾空港技術研究所
地震防災研究領域
耐震構造研究グループ
大矢 陽介
主任研究官

国土交通省
国土技術政策総合研究所
港湾研究部　港湾施設研究室長
宮田 正史 さん

一般社団法人
鋼管杭・鋼矢板技術協会
技術委員
塩﨑 禎郎 さん

東京工業大学
環境・社会理工学院 土木・環境工学系
社会基盤マネジメント研究室
教授
岩波 光保 さん

港湾空港技術研究所
地震防災研究領域
耐震構造研究グループ
小濱 英司
グループ長

研究の成果がついに港湾設計基準に！ 新たに変わる鋼管杭の耐震設計法

桟橋を中心に、港湾分野で多く用いられる大口径鋼管杭。
港空研では鋼管杭・鋼矢板技術協会と連携し、
近年、その耐震設計法の開発に関する研究に取り組んでいます。
得られた成果は、2018年春に改訂される
「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（港湾設計基準）に導入されることに。
今回は、この研究および基準化に関わりのある方々にお集まりいただき
これまでの経緯や課題、今後の展望などを伺いました。

径が大きく板厚が薄い桟橋の鋼管杭

大矢　平成19（2007）年に港湾設計基準（以下、基準）が改訂された際、耐震強化施設の桟橋について、レベル2地震動（発生確率は非常に低いが、想定される最大クラスの地震動）に対する地震応答解析による耐震性能照査が必要になったんです。それを受ける形で研究がスタート。最初から現在まで一貫して携わっておられる塩﨑さんに、まずその背景をお話しいただきたいと思います。

塩﨑　レベル2地震動に対して地震応答解析を行うとなると、地盤が大きく変形することがあるので、従来港湾で用いられる鋼管杭では厳しいのではないかということで、当時港空研に在籍していた岩波さんに研究をお願いしたんです。港湾施設で多く使われている鋼管杭は、直径は圧倒的に大きいんですが板厚は非常に薄くて。径厚比（＝直径／板厚）でいうと100倍くらい。例えば1500㎜の径だと板厚は15㎜くらいしかない。これは、港湾工事で大きな杭を数少なく打つという傾向が強くなるなか、経済設計という観点から多用されるようになりました。道路橋などの場合、それぞれ杭ごとの最低の板厚が基準によって決まっていますが、港湾の基準ではそこまで明記されていなかったんですね。そういう大径厚比の鋼管杭が、地震荷重を受けたらどういうことが起こるのか、実験や数値解析などでご検討いただいたというのが始まりでした。

岩波　そのときの基準改訂で、桟橋の耐震設計法の考え方が非常に大きく変わったために、それまでに研究グループの中に蓄積されていた知見だけでは十分対応できないように感じました。設計の方法が変わったことで顕在化しそうな問題については認識していたんです。いままでダメだったものがよくなったり、よかったはずのものが悪くなったり……。そういったことへの問題意識は持っていたので、お話をいただいて、ではお手伝いしましょうと。

塩﨑　基準の改訂で設計が変わった直後くらいからお話しさせていただいて、研究がスタートしたのは平成21（2009）年度だったと思います。

大矢　当初、構造研究グループのほうでは、道路橋の鋼製橋脚でとられていた手法を、港湾の杭にも使えるよう制限を広げて適用したらどうかというのを実験ベースでやっていました。私は数値解析が専門なので、その検証のための計算をということで川端主任研に声を掛けられ、研究に参加したんです。最終的には地震時にどうなるかというところまで、実務で使うときのイメージを含め、手法として確立したものにしました。その後、現場の事例を集めていたら、杭にかかる軸力が想定より大きいものがけっこうあったりして、軸力が大きくても使えるように改良しないといけないと。で、板厚が薄くて、軸力が大きいところを考えようと、実験主体の研究から数値解析寄りの研究にシフトしてきた。そこから、塩﨑さんといっしょに、いろいろなケースを計算しながら進めてきたわけです。

連携して取り組んだ基準化までの10年の道程

大矢　耐震設計の計算というのは、杭と地盤の三次元的な挙動をいっしょに計算しないといけない。私は地盤が専門なので地盤の細かいところは気にしていましたが、鋼管杭は地盤に比べれば硬いし強いし、計算式に則って考えれば間違いないだろうと思っていたんです。ところが実際に三次元の構造を壊すようなシミュレーションを行うと、いわゆる構造計算の式とはまったく違う答えが出てきた。いままで何の疑いもなく信じてきたものが、実は違うとわかった瞬間。驚きましたね。杭そのものもこれだけ影響を受けるのかって。これまでの設計は、条件によっては杭の耐力を過大評価した〝危険側の設計〟である場合もあったことが判明したわけで、これはちょっと困ったぞ、と。

塩﨑　港湾施設で多用される大径で板厚が薄い杭で、大きな軸力（軸力比0・4以上くらい）が作用する際の挙動は検討例がほとんどなかったんです。今回初めて、100ケース近い条件に対して網羅的な検討を行うことができたのですが、数値解析を行うと、予想どおり、曲げていくときれいに曲がらない。シワが寄るような形で局部的に曲がってしまう。この局部座屈によって耐力低下が生じる可能性が高いということがわかったわけです。また一方で、板厚を厚くすれば、多少変形が進んでも耐力を維持できること

FRONT PEOPLE

もわかってきました。そこで、板厚が薄いときの耐力低下とともに、この板厚を厚くすれば耐力が落ちずに粘るという、これまで見ていなかった性能も考慮できるように考えました。

宮田　ある条件では板厚が薄いと鋼管の局部座屈がすぐに発生してしまう、そちらの方向だけ見つけると「まずい！」ということになるでしょう。でも逆にちゃんと板厚をとれば、鋼管が粘って最後までもちます、と。その両面を見つけたわけですね。真実になるべく近い姿の設計法やモデル化ができると、設計は必ずよくなる。重要なのは、そうやって真実を追究していくということ。真実がわかったら、基準をつくる国総研（国土技術政策総合研究所）に打診していただければ。新しい知見をどういうふうに現場に落としていくか、そこはわれわれの仕事になります。

小濱　見つけたことが本当にそうなのか、それを確認するのには、やはり時間がかかりましたね。

宮田　やはり基準を変えるのはおおごと。たぶん、足掛け10年くらいの時間オーダーです。研究で真実が出てきても、それを現場に落としたとき本当に設計ができるのか、実務でみなさんがトレースできるのか。コストのバランスも考え、本当にリーズナブルな設計になるのか、質がよくなるのか。その確認にも、相当な時間がかかる。開発と、現場に出したときに本当に実のあるよいものになるかというのは、ステップが違うと思います。それが最後に消化されると、しっかり基準として書ける。こういうのが10年間の成果だと思います。港空研の見つけた〝種〟を、われわれがどういうふうにして花を開かせるか。基準をつくるというのはそういう仕事だと思います。

塩崎　メーカーの団体がどこまで設計の基準のことを言っていいのか、そういう躊躇も昔はありました。でも、鋼管杭というものを世の中によりよく使ってもらうためには、基準がしっかりしていないといけない。なので、ある時期から、港空研や国総研と連携させてもらうという仕組みをつくったんですよ。ここ10年はそうやって、連携しながらやってきた。こういう関係があって本当によかったです。

宮田　次の基準は、2018年の春の出版を目指しています。原稿としてはだいたいでき上がって、いま最終確認中です。とくに耐震強化岸壁のような、大きな地震動に耐えなければいけない岸壁について、鋼管杭がどこまで耐えるかという新しいモデルを入れて計算し、設計を確定するという方法に移行する予定です。

港湾施設の維持管理にもつながる成果

岩波　板厚が薄いものが本当にダメなのかどうかは、地震が来てみないとわかりません。もしかしたら、もつのかもしれない。東日本大震災でも、地震動の特性も関係しますが、桟橋はほとんど壊れていないんです。条件によっては計算上はちょっと危ないかもしれないものが世の中に出てしまっているのは事実ですが、いろいろなところに安全率は入っていますし、杭も、桟橋の杭であれば実際は何本かまとまって全部で一体として挙動するわけですから、本当にパタッと壊れるとは思っていません。

小濱　桟橋の大きな地震被害というと、阪神・淡路大震災のときの神戸港の例しか知られていません。東日本大震災と比べると、地震動としては阪神・淡路のほうが大きいので、あのクラスの地震がもう1回来たらどうなるかっていうのはわからないですけどね。

大矢　確かに、いまの基準よりも次の基準を用いたほうが杭が「弱い」と評価されるケースもあります。でもたくさんのケースを計算してみると、杭の板厚は厚くなったり、薄くなったり、変わらないケースがあって、全体としては大きく変わらないだろうということがわかってきました。桟橋としてもたないというものがたくさん出てくるかというと、そこまでではない。あとは、上にクレーンを載せるなどの理由でいままで厚く設計していた杭については、もう少し薄くできる場合もあると思います。

岩波　レベル2の地震は何百年に1回くらいしか来ないので、もしかするとその施設は一度も遭遇しないかもしれない。使用者からすれば、当然地震のことは気にしつつも、普段使うこと、使い続けることも大事です。今回基準を変えることで、本当に地震が来たときに曲がったり座屈したり倒れたりといったリスクは少なくなるはず。50年、100年使い続けていくうえで、そういった事故のリスクは減る。そういう意味では、ライフサイクルマネジメントの観点からも、今回の基準改訂はよいことだと思います。それと、地震が来れば、壊れなくても何らかの損傷は出る。いまの設計ではそのリスクは明らかな形では考慮されていませんが、径厚比を考えると地震後の変形も精度よく計算できるようになるはずなので、50年、100年使っているうちに地震に遭う確率はこれくらいだから損傷する

阪神・淡路大震災時に被害を受けた神戸港の桟橋。杭頭と地中部で局部座屈が発生していた

確率はこれくらい、予測される損失はこれくらいになる。だから、設計はこうしよう、維持管理はこうしようといったことまで考えられるでしょう。まだ夢物語かもしれないけど、いつかはそういうことも考えた耐震設計ができると、最終的にライフサイクルマネジメントと統合されて、一つの大きな設計、時間軸を本当に考慮した設計ができてくるのではないかと思うんです。

よりよい設計に向けて 基準改訂後のフォローや検証も

宮田　国土交通省による「港湾の施設の技術上の基準」に基づく省令や告示の改正が2018年4月1日に予定されています。その後、速やかに設計を切り替えていくことになるでしょう。4月1日以前に着手されている設計は除外ですが、それ以降は新たな基準で設計していただくということになります。

塩﨑　大きく変わるところもあるので、周知活動をしていかないと。実際に手を動かしてやっていただくコンサルタントさんに対しては、講習会などの機会は必要だと思います。また、国総研、港空研とわれわれのほうでも、基準が変わって設計で杭断面がどのように決められるようになるかというところを少しやろうと思っていて。いままでは、例えば直径1200㎜で板厚12㎜の杭でやってみたら耐力が足りなかったとすれば、次は1300㎜、1400㎜と杭径を大きくしていくいう道筋があった。でも今後は、板厚を上げるか径を上げるか、道は1つではなくなるわけです。どちらが近道か、どちらが最適なのか、われわれも全部把握しているわけではないので、これから半年くらいかけて、こういう場合にはこうやったほうが合理的な設計になるという事例を出していこうという話をしています。

小濱　鋼管の板厚が厚いことのメリットを示せるようになったので、地震が来てみないとわからないこともまだあると思いますが、よりよい方向には進んでいます。これまできちんと評価していなかった鋼管杭の特性というものを、われわれも理解することで、より有利に使えるのではないかと。

宮田　今回の鋼管杭のことに限らず、港空研にはやはり基礎的な真実を追究する、世界最先端の研究をしていただきたい。基準を所管する立場からするとそう強く思います。なぜなら、設計をよくするためには、本当の姿をしっかり知ること、さらにどうやって壊れるか、もしくは50年、100年経つとどういうふうに劣化するかを正確に予測することが重要。それがわかればよい設計になる。必ず正のスパイラルが回ります。真実をつかめれば、それに対応して、こうやって改善できるというルートが見えてくる。そういう点で、突き抜けた基礎的な研究をやっていただきたいと思います。もう一点は、これから世界中のマーケットで日本の技術で戦っていかなければいけないので、世界も視野に。海外に持って行ったときリスペクトされる基準にできるよう、国内と海外を見つつ、一番を目指してほしいというのが大きなお願いです。

岩波　今回の径厚比の件のように、これからも10年先、20年先に問題になりそうなことを想像して、そういうテーマにぜひ取り組んでほしい。耐震設計がよくなって、地震で壊れなくなったら、次は劣化とか疲労とか。時間とともに壊れていくほうがクローズアップされるでしょう。それに対してどうするか。桟橋の補強方法、改良方法って、いまはほとんどないんです。今後長寿命化したり、もっと深い岸壁にしたいとかいうときどうするか。これからはそういうこともやっていただきたいですね。あと、地震が来ないと今回の結果はわかりませんが、基準改訂の検証のほうも引き続き。実フィールドなりデータなりを持っているのが港空研の強みだと思うので。

塩﨑　港湾施設というのは意外に鉄を多く使うので、使い方や維持管理を含め、われわれ鋼材メーカーの持っている情報とうまく連携する仕組みをずっと続けていけたらと願っています。

大矢　今回の研究では、塩﨑さんに伺う鋼管杭に関するこれまでの研究の経緯、現場の話など新鮮で、大いに参考になりました。ご意見をいただいて、方向性を決めたりできたのがよかった。今後も引き続き、ご指導いただけたらと思います。

小濱　産官学と立場の違うみなさんに、いろいろな視点から港空研を見ていただいて、どういうふうにやるべきとか、どんどん言ってもらいたい。そういう交流を、これからもずっと続けさせていただきたいと思っています。

FRONT PEOPLE

オーストラリアで開催されたPIANC・YP-Com（若手技術者委員会）の会議に参加しました

6月15日(木)～6月20日(火)、シドニーとケアンズで開催されたPIANC(国際航路協会)・YP-Com(若手技術者委員会)の会議に、地盤研究領域 高橋英紀グループ長らが参加しました。

PIANCは、港湾や水路、港湾施設の運営に関する発展と、沿岸地域の開発を図ることによって水上交通の維持・発展を目的とする協会です。港湾管理者や公共団体、研究機関、民間会社などがイベントを通して情報交換を行い、各種ガイドラインの発刊や技術委員会による報告書を公表しています。

PIANCの若手の活動促進のために10年ほど前に設立したのがYP-Comです。日本では2014年に設立され、現在は34名が参加。高橋グループ長はアジア・オセアニア地域代表補佐と日本代表を努めています。今回、参加した会議「BTV」は2年に一度行われるYP-Com最大のイベントで、今年で6回目になります。

BTV 集合写真

会議では、各国YP-Comの活動報告や国際レベルのイベントについての議論、シニアメンバーからの講義などが行われ、高橋グループ長からはアジア・パシフィック地区と日本の状況について報告し、会議後の各国の参加メンバーとの食事の場でも、積極的な交流が行われました。

またシドニー港と港湾再開発地区の視察も行われました。2年前に供用が開始されたシドニー港国際クルーズターミナルは、税関やパスポートコントロールなどが空港のように整っており、これまで使われていたヤード跡もオフィスビルや公園として再開発されています。古い桟橋の上も商業施設や集合住宅として利用され、既存施設が有効活用されています。

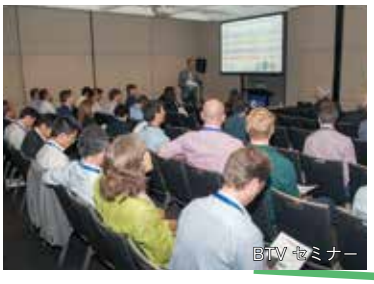
地盤研究領域 高橋英紀グループ長コメント

「PIANCは、設計などに関するガイドラインやビジネスの展開の場ともなっているので、協会に参加することはとても意義があります。さらにそれを維持して発展していくために、若手も今回のような大きな規模の会議に積極的に参加していくことが大切です。たまに会うくらいでは覚えてもらえないので、年に何回も会うことに加えてネットミーティングなどを繰り返していくことが重要で、今後も私たちのプレゼンスを示していきたいと思います。今回の会議でも、セミナーや視察から学んだことも多かったですが、何より各国に知り合いが増え、今後の活動における人脈を形成できたことが大きな成果であったと考えています」

PIANC(国際航路協会)・YP-Com(若手技術者委員会)「第6回 BTV」会議

日　程：2017年6月15日(木)～6月20日(火)
場　所：シドニー・ケアンズ(オーストラリア)
参加者：**地盤研究領域 地盤改良研究グループ**
高橋英紀グループ長・松村聡研究官・藤井愛彦研究員
地震防災研究領域 地震動研究グループ
長坂陽介研究官

夜の会


BTV セミナー

各国代表者会議

地盤改良研究グループの高橋英紀グループ長が文部科学大臣表彰で若手科学者賞を受賞！

地盤研究領域 地盤改良研究グループ 高橋英紀グループ長が、「遠心力を利用した流体と地盤挙動の物理モデル化に関する研究」において平成29年度科学技術分野の文部科学大臣表彰で若手科学者賞※を受賞しました。

高橋英紀グループ長にお話を伺いました。

――受賞した研究内容はどのようなものですか？

波などの大きく動く流体の挙動によって地盤は変形し、時には安定性を失って破壊にいたります。この問題に対して、地盤の挙動に着目した研究は少なく、その変形や破壊のメカニズムが明らかになっていないのが現状です。解明が進んでいない理由の１つは模型実験の難しさにあります。通常の重力場での実験だと水槽内に大きな地盤構造物を作ることができず、実際の地盤の挙動の再現が難しいのです。そこで、遠心模型実験手法を用いて、この問題の解明に取り組んだのが、受賞した研究になります。

遠心模型実験装置を用いた実験の様子

――今後はどのような研究に取り組みたいとお考えですか？

昨年度から今年度にかけて、より本格的に波や流れを遠心力場で発生させられる装置を整備中です。この装置も利用して、護岸が地盤を含んで波で壊れる現象の解明や、その対策方法についても検討を進めていきたいと思います。また護岸と高波だけでなく、高潮や津波、堤防や防波堤など、より広い範囲において流体と地盤挙動が絡む問題に対して取り組んでいきたいと考えています。

※「若手科学者賞」は、萌芽的な研究、独創的視点に立った研究など、高度な研究開発能力を示す顕著な研究業績をあげた 40 歳未満の若手研究者を対象としたもの。

「一般公開」を開催しました

「干潟の生き物に手で触れてみよう」

「巨大津波の破壊力を体感しよう！」

スタンプラリーに並ぶ皆さん

7月22日（土）、毎年恒例となっている一般公開が開催されました。港空研と国土交通省国土技術政策総合研究所との合同開催で、普段入ることのできない研究・実験施設を公開し、港湾・空港分野の研究を紹介するとともに、未来の研究者である子供たちに興味をもってもらうことも目的の一つとしています。

当日は天気にも恵まれ、県内外から親子連れを中心に1,000人を超える来場者が訪れました。整理券を配り対応するほどの人気だった人工津波実験では、大きな衝撃音とともに水しぶきが上がり、子供はもちろん大人たちもその威力に圧倒された様子。

このほか、小型軽量化した最先端の水中音響ビデオカメラの展示や生態系を再現した干潟の見学、干潟の水中生物とのふれあいや煮干し解剖などの体験コーナーもあり、子供たちに大好評でした。「近くの海岸の砂にどんな生き物がいるか調べてみたい」という声も聞かれ、将来の研究者たちには有意義な一日となったようです。

どの企画も、研究者たちが自ら工夫して研究紹介をする様子に、大人も子供も大変興味をひかれた様子で、研究所への理解と親しみを増すイベントとなりました。

「煮干しを解剖して生き物の中を知ろう」

PARI 世界に貢献する港湾空港技術
VOL.29 OCTOBER 2017

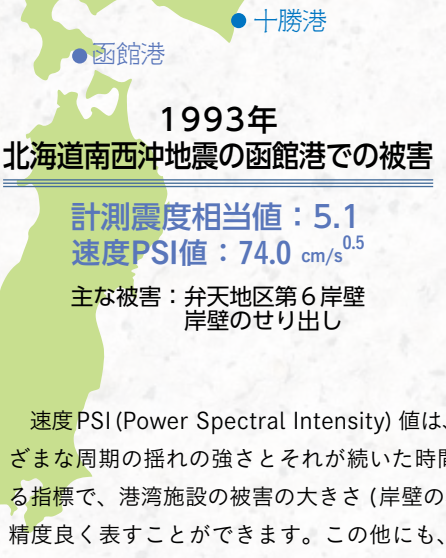
もっとよく知ろう 港湾空港 ～海や空の豆知識～

速度PSI値って何？

1993年 釧路沖地震の十勝港での被害

計測震度相当値：5.2
速度PSI値：20.0 cm/s$^{0.5}$

主な被害：南-5.5m岸壁
上部工とエプロン部の目地の開き

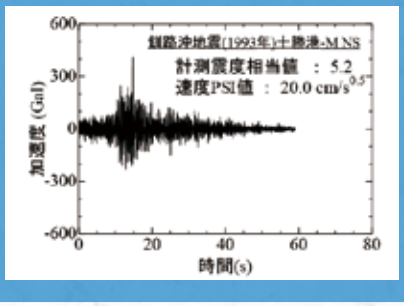


1993年 北海道南西沖地震の函館港での被害

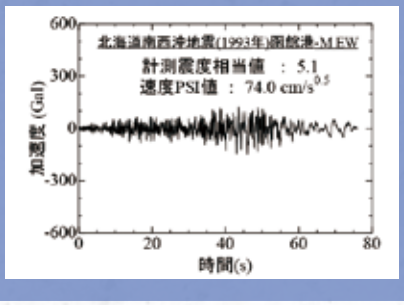
計測震度相当値：5.1
速度PSI値：74.0 cm/s$^{0.5}$

主な被害：弁天地区第６岸壁
岸壁のせり出し

十勝港



函館港



速度PSI (Power Spectral Intensity) 値は、地震波のさまざまな周期の揺れの強さとそれが続いた時間から求められる指標で、港湾施設の被害の大きさ (岸壁の移動量など) を精度良く表すことができます。この他にも、新聞やニュースでよく聞く指標として、その地点での揺れの強さを表す震度がありますが、港湾施設の被害の大きさと震度の大きさは対応しないことがしばしば起こります。

例えば、ともに1993年に発生した釧路沖地震と北海道南西沖地震による十勝港と函館港の観測データと被害の様子をみてみましょう。震度に相当する計測震度相当値は、十勝港が5.2、函館港が5.1であり、これだけを見ると十勝港のほうが強く揺れたと判断してしまいます。しかし、被害の写真をみてみると、岸壁が大きく海にせり出すなど大きな被害を受けているのは函館港のほうであり、計測震度相当値の大きさと被害の大きさの関係が逆になっています。一方、速度PSI値を見ると、十勝港は20.0cm/s$^{0.5}$、函館港は74.0cm/s$^{0.5}$と函館港のほうが大きく、実際の被害の大きさに見合っているといえます。

速度PSI値は、地震後に港湾施設の被害の大きさをおおまかに推定することに役立てられており、他の情報と併せて考えることで、被災地に水や食料・医療品などの救援物資を運ぶ船を接岸させられるかどうかの判断をするのに役立ちます。さらに、設計を行う時には、想定される複数の地震の揺れの中で、どの地震の揺れがより危険なのかを判断することにも役立てられています。このように、私たち港湾空港技術研究所では、港湾や空港における施設を対象として、地震に対する防災・減災を目的としたさまざまな研究を行っています。

解説
地震防災研究領域
耐震構造研究グループ
近藤明彦 研究官

解説
地震防災研究領域
耐震構造研究グループ
伊藤広高 研究官

本紙の定期送付・送付中止・送付先変更のご依頼、ご意見・ご感想などはこちらまで

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
Port and Airport Research Institute（PARI）

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1　TEL：046（844）5040　FAX：046（844）5072　URL：http://www.pari.go.jp

企画・発行　国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所　Port and Airport Research Institute（PARI）
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1　TEL:046-844-5040　FAX:046-844-5072　URL:http://www.pari.go.jp
編集・制作　（株）ホライゾン

グリーン購入法に基づいた用紙を使用しています。