世界に貢献する港湾空港技術

PARI

VOL.5

OCTOBER 2011

Airport

Technology

Port

FRONT LINE - 特集 -

決意も新たに
地震防災に取り組む
人命と社会・経済活動を地震から守る研究

FRONT PEOPLE その一歩先へ 挑戦する研究者たち

野津　厚 チームリーダー

小濱英司 チームリーダー

FOCUS ON ファシリティーの最前線へ

地震と津波が作用する実際の現象を模型で再現

大規模地震津波実験施設

港湾構造物の地震時挙動を解明

三次元水中振動台

CLOSE UP 現場からの報告

東日本大震災
被災地からの報告

決意も新たに 地震防災に取り組む

人命と社会・経済活動を地震から守る研究

今回焦点を合わせるのは、東日本大震災を経てさらに深化する地震防災研究。被災しても、施設に求められる機能を確保することを最重要とし、港湾や空港の耐震性向上に取り組んできた経緯に注目。研究開発の成果と課題を、菅野高弘特別研究官に伺いました。

菅野高弘 特別研究官

東北地方太平洋沖地震による被害（相馬港）

阪神・淡路大震災を契機に大きく変化した耐震設計

甚大な被害をもたらした東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）。港湾空港技術研究所からも、多くの研究者が現地に入り、調査を続けています。未曾有の規模の地震被害を受けて、今後ますます問われるのが地震防災研究。これまでの研究成果は今回どのように活かされたのか、不足していたものは何か、さらに、今後解決すべき課題とは？地震防災研究担当の菅野特別研究官にお話を伺いました。

まずは研究の背景から。1995年の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）を契機に、地震防災の考え方は大きく変化したといいます。「それ以前の耐震設計は『構造物の地震時の安定性』に注目したものでした。つまり、全国を5区分して設定された地震に対して〝壊れないように〟しようとしていた。阪神で起こった地震は、当時にしてみれば想定を遥かに上回るものだったので、技術者や研究者の立場から見ると、壊れるのが当たり前だっ

兵庫県南部地震による被害

世界に貢献する港湾空港技術
PARI

CONTENTS

2 FRONT LINE－特集－
決意も新たに
地震防災に取り組む
人命と社会・経済活動を地震から守る研究

6 FRONT PEOPLE
その一歩先へ
挑戦する研究者たち
野津　厚 チームリーダー
小濱英司 チームリーダー

8 FOCUS ON
ファシリティーの最前線へ
地震と津波が作用する実際の現象を模型で再現
大規模地震津波実験施設
港湾構造物の地震時挙動を解明
三次元水中振動台

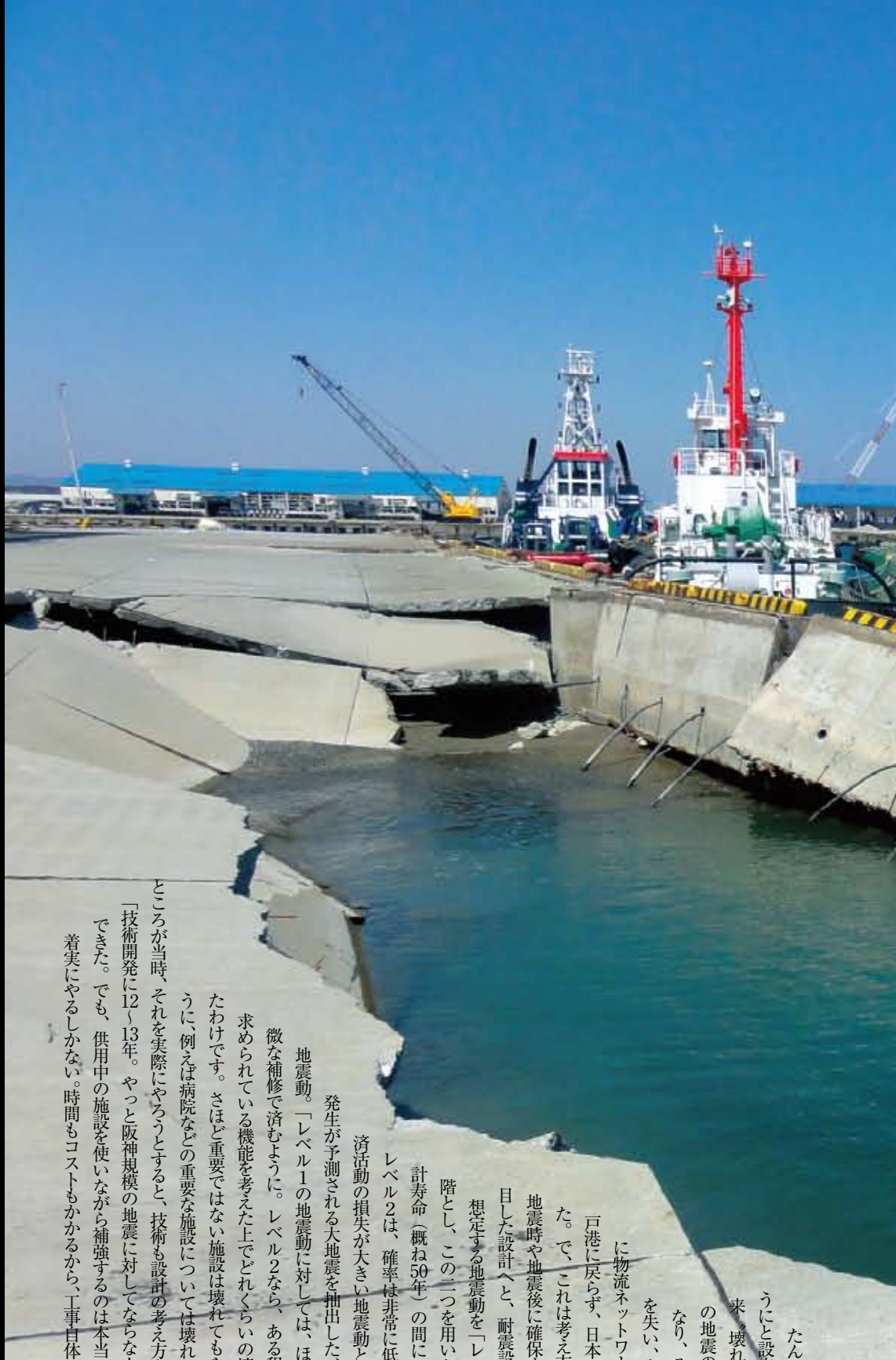
10 CLOSE UP
現場からの報告
仙台空港と仙台塩釜港を訪ねて
東日本大震災
被災地からの報告

13 Cross Line
国際交流レポート
東日本大震災日米共同合同調査

14 VISITOR'S FILE
来訪者の素顔
港空研が協力する
JICA集団研修
「港湾開発・計画」

15 Topics
「空港アスファルト舗装の層間剥離現象に関する赤外線を用いた検知手法」が第13回国土技術開発賞優秀賞を受賞！

企画・発行　独立行政法人　港湾空港技術研究所
編集・制作　㈱ホライゾン



たんですよ。構造物の設計でここまで保つようにと設定した地震より大きい地震が来たら、本来〝壊れなきゃいけない〟わけです。だけど、あの地震の教訓として、6400人もの方が亡くなり、そして神戸港という国際物流拠点が機能を失い、完全に直すのに約2年。その間に外国港に物流ネットワークの拠点をシフトした船会社は結局神戸港に戻らず、日本の経済活動も大きなダメージを受けました。で、これは考え方を変えなければということになって、地震時や地震後に確保すべき『構造物に求められる機能』に注目した設計へと、耐震設計の研究は大きく舵を切ったんです」

想定する地震動を「レベル1地震動」「レベル2地震動」の2段階とし、この二つを用いた設計に移行。レベル1は、構造物の設計寿命（概ね50年）の間に1～2回発生する確率を有する地震動。レベル2は、確率は非常に低いものの発生した場合に人命や社会・経済活動の損失が大きい地震動として、過去に発生した最大の地震や将来発生が予測される大地震を抽出した、設計対象の構造物にとって最も厳しい地震動。「レベル1の地震動に対しては、ほとんど壊れないように、万一壊れても軽微な補修で済むように。レベル2なら、ある程度壊れるのは仕方ないとして、施設に求められている機能を考えた上でどれくらいの壊れ方で収めるか、という設計に変わったわけです。さほど重要ではない施設は壊れてもやむを得ないが、重要な施設は使えるように、例えば病院などの重要な施設については壊れないものを目標に造ろうというふうに」

ところが当時、それを実際にやろうとすると、技術も設計の考え方も追いついていないという現実の壁が。「技術開発に12～13年。やっと阪神規模の地震に対してならなんとかできると技術的に思えるところまできた。でも、供用中の施設を使いながら補強するのは本当に大変なんですよ。ゆっくりじわじわ、着実にやるしかない。時間もコストもかかるから、工事自体にはコストダウンも強く求められます」

地震動の性質を把握し構造物の抵抗力を探る

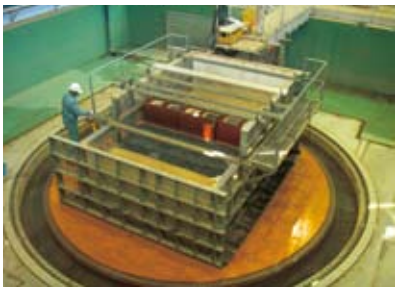
「地震で構造物が壊れる理由はいくつかあります。まず、揺れの強さ（加速度）による被害。そして、揺れの速さ（周波数）による被害。怖いのは共振です。構造物と地盤の揺れ方が一致すると、構造物にかかる応答加速度が大きくなって、とんでもない被害が起こってしまう。さらに、揺れの継続時間が長いことによる被害や、地盤の液状化による被害など。では、壊れない構造物を造るためにどうすればいいか。われわれが把握すべきは次の3点。まずは敵の正体を知るということで、地震動の性質。そして構造物の揺れ方。さらに、構造物が壊れていく過程。これらを研究して対策を練っているわけです」

地震動の予測技術を開発

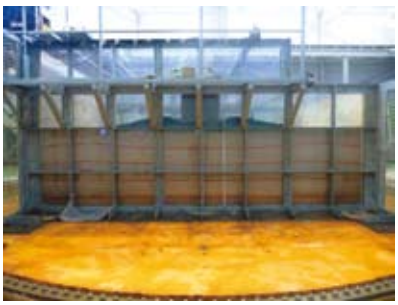
1962年に整備が始まった港湾地域強震観測網。現在61港、119台の地震計で観測が続けられています。「先輩たちが積み重ねてきた努力の賜物。これらのデータの蓄積が、地震動の性質を把握するために大いに役だっているんです。地震動研究チームが中心となって、データの分析を行うとともに、将来発生する地震についても地震動の予測技術を開発。実際に設計に用いられています。例えば、平成22年に完成して供用開始したばかりの羽田空港のD滑走路。南関東地震が発生した場合にどのように揺れるのか、羽田空港の強震記録をもとに最新の手法で地震動を作成し、実際の設計に用いられました。つまり、こういう地震がここで起こるだろうということが予測できれば、構造物が共振しないように、地盤改良の方法や部材を検討すればいいわけです」

地震時の構造物の挙動を実験・計算

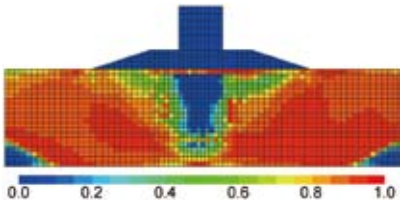
構造物の揺れ方や壊れていく過程を把握するためには、耐震構造研究チームが中心となり、振動実験施設やコンピュータシミュレーションを駆使。「三次元水中振動台（9ページ参照）で、縮尺模型に地震を作用させ挙動を観測、揺れ方や破壊していく様子を多数のセンサーで計測します。この模型実験は、対策工法の効果確認にも有効です。そして、最近完成した大規模地震津波実験施設（8ページ参照）では、地震に加え、津波も作用させての実験が可能に。コンピュータシミュレーションのほうは、おもに港湾空港技術研究所が開発した有効応力地震応答解析FLIPを用いて、模型振動実験の再現や実際の地震被害事例を再現。十分な精度で計算できるよう、常時進化させています」。阪神・淡路大震災による被災の再現実験に基づく被災メカニズムの究明や、復旧設計の妥当性の評価に、この水中振動台実験とFLIPによるシミュレーションは大きく貢献。また、巨大地震直後の緊急物資輸送などに使える耐震強化岸壁の施設整備にも活用されました。「平成19年に港湾施設の技術上の基準が改訂され、設計した構造物が想定される地震時に所要の機能を果たすことができるかどうかを照査することになりましたが、この照査ツールとしてもFLIPは活躍しています」



実験用に防波堤の模型を作製し、三次元水中振動台に設置



大型模型振動実験の変形状況



数値シミュレーションの結果

（過剰間隙水圧比：0.95 以上で液状化）

混成式防波堤を対象とした大型模型振動実験と数値シミュレーション（FLIP）

現地実験で液状化対策を可能に

空港施設の液状化対策に関しては、模型実験では十分に現象を再現できず、世界初の試みとして2007年に現地実験も。「国土交通省主催の『地震に強い空港のあり方委員会』で救急活動や緊急物資輸送といった災害時の空港が果たす役割が議論され、巨大地震に対応した空港施設の耐震性向上が急務になっていたんです。空港が被災した事例としては1964年の新潟地震での新潟空港の液状化が挙げられますが、当時と現在では航空機の大きさが違うため滑走路の構造が異なり参考にならなかった。模型実験を考えましたが、羽田空港で厚さ1mある滑走路の舗装を10cmにして実験しても、正しい結果を出しているのかわからず行き詰まってしまって。じゃあもう実物でやろうということになったわけです。液状化しそうな砂地で十分な面積があり、かつ近くに家がないところを探して、最終的にお借りしたのが石狩湾新港の整備中の土地。そこに、羽田空港と同じ滑走路50mと、空港内の土木施設を築造。爆薬1・8トンを散りばめ地中で爆発させて液状化状態を再現し、液状化に対する様々な課題について研究開発が進みました。これらの研究開発の成果の一つとして、液状化対策の新しい考え方を確立、約30%のコストダウンが可能なことも証明。仙台空港で施工が開始されたのが2年前でした」

東北地方太平洋沖地震の際、仙台空港には震災後わずか5日で緊急物資輸送用の大型輸送機が着陸しましたが、これは、滑走路の液状化対策を実施していたために実現したこと。「実験では大丈夫だったものの、今回の地震では、実験時に比べ揺れの継続時間も長かったし内心やっぱり心配で。調査に行ったとき、本来は港湾メインの予定だったんですけど、どうしても確認したくて空港へ。対策した滑走路をさわってみて、ああよかった！と安堵しました」

石狩湾新港での現地実験。爆発させて液状化状態を再現

仙台空港を離陸する輸送機 C-130

港湾と空港の地震防災に活かされている技術開発

コンテナクレーンの免震化

対象施設に求められる機能の確保という視点から見ると、港湾の耐震設計にも自ずと変化が。「従来は岸壁構造物のみの耐震性を主眼に耐震設計を実施してきましたが、岸壁が完ぺきでもコンテナクレーンが壊れては荷役ができない。逆にコンテナクレーンが完ぺきでも、岸壁が壊れては船が接岸できない。岸壁とコンテナクレーンの地震時挙動を把握し、両者の耐震性のレベルを一致させる必要がありました」。縮尺模型実験と現地でのコンテナクレーン実機の振動実験、コンピュータシミュレーションによって「免震コンテナクレーン」を開発。「地震動と共振しないように、揺れの周期を遅くするべく一部にやわらかい材料を入れるんです。ふだんはガッチリさせておいて、強い地震がきたらぶよぶよになるという装置。まず新しい免震のクレーンを開発し、次に既存のクレーンを免震に直す技術を考えました。現在、全国で25基程度の実機が配備されています。これらの研究のためにクレーン運転士免許を取得した研究者もいるんですよ」

今回の地震で被災した仙台塩釜港仙台港区に4基あるコンテナクレーンのうち、2基が免震。そのうち1基は後付けで免震にしたもので、ジャッキアップして脚を切り、免震機構を入れて戻す工事を行ったのが昨年度。「現地で、免震機構が作動して構造に損傷が無いこと、免震化されていない1基には損傷が発生していることを確認。残念だったのは、免震にしたクレーンに地震計をつけようという1週間前に地震が来てしまったこと。つけていれば貴重な記録がとれ、更なる研究の進歩に役立ったと思われますが……」

仙台塩釜港仙台港区高砂埠頭の免震コンテナクレーン。地震による構造被害はなかった

羽田D滑走路プロジェクト

羽田空港のD滑走路建設においては、前述した設計用地震動の提供のほかに地震応答解析も。埋立部と桟橋部の境界部分の構造について、水中振動台実験と遠心載荷実験を実施し、レベル2地震時の安定性を確認。「さらに、長さ100m近い鋼管杭（うち80mは土中）の挙動をモニタリングするために、光ファイバーによる計測技術を開発。実際に敷設されています。通常、構造物を設計するときは50年寿命で考えますが、羽田の場合は設計寿命100年。100年保つセンサーは？と考えたとき、劣化しないガラスを用いる光ファイバーを思いついたわけですが、細いものなので杭を打ち込むときに切れないよう、固定方法などの研究に数年を要しました」。また、埋立部と桟橋部では地震時の振動特性が異なることから、動的に変位を計測できるGPSシステムを提案。地震で揺れても計測精度が保てるよう、独自に開発した免震機構を備えた基地局を提案し、常時モニタリングしています。

地震被害調査をはじめ総合的な研究で課題に挑む

実際の構造物がどのように壊れたのか、あるいは、なぜ壊れずに済んだのか。実際の被害を調査し、科学的・工学的に被災メカニズムを究明する努力も。「われわれは縮尺模型実験やコンピュータシミュレーションという最先端の研究ツールを持っていますが、これらが十分な精度を有しているか判断するには、実際の被害を再現できるかが鍵になる。ただし、被害調査ではどのように揺れたのかといった動的な現象はわかりません。ですから、模型実験やコンピュータシミュレーションを含めた総合的な研究が必要不可欠なんです」

東北地方太平洋沖地震では、地震動によって損傷した施設に津波が作用し、被害はより甚大に。被害調査では、地震による被害の痕跡が津波に流されてしまってよくわからないということも。「ですから、実験装置を使って縮尺模型に計測器をたくさん入れ、部材や地盤にどういう力が働いているかを観測しながら、地震が来てこうなった、続く津波でこうなったという破壊過程をおさえていきたい。大規模地震津波実験施設は、挙動解明や対策工法の効果確認に大いに活躍するでしょう」

今後に向けて、地震防災研究の課題は山積していると菅野特別研究官。まずは、地震動の予測精度の向上と、そのために合理的な設定ができるようにすること。また、延長の長い海岸保全施設に関しては、必要最小限の耐震性能を迅速に確保できる工法と、段階的に性能を向上させられる工法（成長する海岸保全施設）の両方の開発が必須。また、東北地方太平洋沖地震で記録された3分間以上にもおよぶ長継続時間の地震動に対応した研究も。長継続時間・長周期地震動に対応した次世代免震コンテナクレーンの開発にも着手したところです。「これまでの研究で30秒間の揺れで壊れないものを造ることはできるようになったが、何分間も続く地震動は考えていなかった。クレーンに限らず、長く揺すられることの影響を考える必要が出てきました。また、免震については地震動に対して構造物の揺れを長周期にすることで共振しないようにしていたのに、地震動そのものが長周期のものが来ることによって構造物の揺れの周期と合ってしまうものが出てくる。また逃げないといけないわけです。その逃げ方をどのようにすれば良いのか。研究することが次から次へと出てきます」。そして、これまでは別々に研究・検討されてきた地震と津波の複合災害に関する研究も。

「今回の震災の教訓をムダにはできない。これまで以上に一丸となって、これらの課題に取り組んでいかなければならないと研究者一同、新たな決意をしています」

新潟港 コンテナクレーンの振動実験

注：説明では分かり易さを優先して「機能」を使いましたが、設計では「要求性能」という用語が使われています

大学院では液状化を研究しているというインタビュアーの山口さん。東日本大震災の被害調査にも加わったのだとか。将来、技術者・研究者を目指す者として、専門分野のリンクする２人の研究者に取材しました。

関東学院大学大学院 工学研究科
土木工学専攻 博士後期課程
地盤防災工学研究室
山口恵美

港湾空港技術研究所　地震防災研究領域　地震動研究チーム
野津 厚チームリーダー

1968 年　千葉県生まれ
1991 年　京都大学工学部土木工学科 卒業
1993 年　京都大学大学院工学研究科 修士課程修了
1993 年　運輸省港湾技術研究所 構造部 地震防災研究室 研究官
1998 年　カリフォルニア工科大学 客員研究員
1999 年　運輸省港湾技術研究所 構造部 主任研究官
2001 年　独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 主任研究官
2004 年　東京工業大学大学院総合理工学研究科 博士課程修了 博士（工学）
2010 年～現職

港湾空港技術研究所　地震防災研究領域　耐震構造研究チーム
小濱英司チームリーダー

1972 年　兵庫県生まれ
1995 年　北海道大学工学部土木工学科 卒業
2000 年　北海道大学大学院工学研究科 博士課程修了 博士（工学）
2000 年　運輸省港湾技術研究所 構造部 構造振動研究室 研究官
2001 年　独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造振動研究室 研究官
2003 年　独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 主任研究官
2005 年　カリフォルニア大学バークレー校 赴任（日本学術振興会 海外特別研究員）
2008 年　国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 設計室長
2010 年 ～現職

地震の揺れを調べて耐震構造の研究に活かす

お二人の研究について教えてください。

野津　構造物を耐震設計したり既にある構造物の耐震検討をするためには、まずどういう揺れが来るのかわからないと何もできません。で、それを調べるというのが僕の主な仕事。つまり、役割分担でいうと、僕のほうで地震の揺れを調べて……

小濱　そこで出てきた結果を僕たちのチームで引き取って、その揺れで構造物が壊れるか壊れないか、揺れるか揺れないかということを調べるわけです。

野津　いままで土木という範疇のなかでは、地震の揺れについての研究はあまり行われてきませんでした。「強震動地震学」と呼ばれるこの学問が普及してきたのはつい最近のこと。いまだにマイナーなんですよ。場所によって揺れが違うことや、わりに近い場所でも10倍違うケースもあるといったことも、なじみがないから重要性が知られていない。これは問題だと思うんです。港湾や空港の技術者の間では理解が進んできましたが、ほかの分野の土木技術者にも、地震の揺れを調べることの大事さに気づいてほしい。学会などの場で、これまでの研究成果を根気強く伝えていくことも、自分の役割だと思っています。

東日本大震災後の東北には?

野津　東北の被災地には、これまでに5、6回行っています。多くの港に設置されていた強震計によって、今回の揺れが測られているのですが、その設置場所は、必ずしも揺れという観点から見たとき港全体を代表しているポイントとは限らなくて。強震計が置かれた場所があまり揺れていなくても、例えば岸壁ではもっと揺れた可能性もある。そのあたりを調べるのが主な目的。いろんな港で、その調査をやってきました。

小濱　東北行きは最近になってからで、直後に入ったのは茨城県の鹿島港や茨城港。こちらは津波の被害はそれほどでもないものの震度は大きかったほうで、岸壁も壊れたりしていました。自分は耐震構造の専門家として、港や岸壁が使用可能かを問われる立場。ただ、大丈夫そうに見える岸壁でも、いざ使うという判断をするにはきちんとした調査が必要ですし、県や整備局の人たちが協議してゴーサインを出すまでにはそれなりの時間がかかるんですよ。緊急物資を運ぶ船などが少しでも早く使えるように、速やかな判断が下せるよう、技術的なサポートの必要性を感じました。

野津 厚チームリーダー
「学生時代はサイクリングをやっていました。いまは絶対無理だけど、いつかまた自転車旅行に行きたい」

東日本大震災を契機に研究の見直しを

私は4月中旬に初めて被災地に入って。そのとき思ったんです。いくらすごい技術を持ってしても、人間は自然には勝てないのかな、って。お二人は今回の被害を見て、あらためて思ったことはありますか?

小濱　やはり人間が造るものには限界があるなということは思わずにはいられなかった。学生の頃、阪神・淡路大震災の現場に行っているので、地震の被害を見たのは初めてではないのですが、今回あらためて痛感しました。

野津　いろいろな分野に手を出すのは研究では禁物。なのでこれまでは、津波については門外漢でいるのが正しいと思っていました。津波の研究者は別の部門できちんといるわけですから。でも、今回の被害を見るとやはり津波は圧倒的で。港湾で地震に関する仕事をしていて「津波のことは知りません」では通用しなくなってくると思いましたね。地震と津波は、必ずセットで来るわけなので。

小濱　ただ、科学の〝科〟は、分類された部門の一つひとつの意で、つまり専門ということ。細分化して突き詰めていくから科学は発展するともいえます。もちろん、そればかりではなく、違う分野が合わさることで新しいことが生まれる。両方あると思うんですよ。地震と津波も、これからは一緒に研究を進めなければならないことが増えるでしょう。複合災害というのも、バラして考えればそれぞれの要因に分かれる。だから、一点集中でがんばる研究者は必要だし、融合させて考えられる研究者もいなければいけない。役割分担してやっていくべきなんでしょうね。

小濱英司チームリーダー
「僕も学生の頃はサイクリングで旅行を。いまは街乗り程度で我慢(笑)。休日は子どもと過ごします」

この地震を受けて、何か新たな取り組みを?

野津　今回の地震はマグニチュード9で、かつて日本で起きた、記録に残っている地震では最大。このような巨大地震に対しても、これまで使っていた地震動予測の計算方法がそのまま使えるのか検証しなければなりません。港湾の耐震設計の基準自体は、平成19年に新しい考え方を取り入れたものになっているので、今回の地震を踏まえても大きく変わることはないでしょうが、個別の設計では、いろいろとやり方を変えていかなければならなくなると思います。

小濱　何かが起これば変わるし、技術革新によっても変わるもの。今回の地震も、その一つのきっかけにしないと。そのために、まずは何が起こったのかをちゃんと調べて記録に残すことが大事です。記録している間にわれわれ自身が問題に気づくこともあるでしょうし、のちの人がそれを見て気づくこともあるはず。将来よくしていくための材料になる。壊れたものを直し、すぐ使えるようにするという現場の仕事を全力で支援するのと同じくらい、記録を残すということには力を注いでいくつもりです。

小学生の頃から漠然と、土木の道に進もうと思っていたんです。現場を知っておきたいので、一度は民間に出て働くつもりですが、将来的には研究に戻りたい!　今日はお話が伺えてよかったです。ありがとうございました。

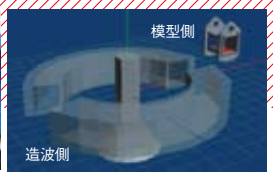
山口恵美さん

関東学院大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 博士後期課程
地盤防災工学研究室

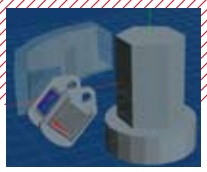
細分化された専門分野を突き進むからこそ、その分野が発展する。まさにその通りだと思いました。しかし今回の地震で問題となった複合災害については、各分野のプロがアプローチをして、総合的な防災に取り組まなければいけないと思います。将来は、専門をとことん突き進む精神と総合的にものをとらえる目、両者をバランスよく兼ね備えた技術者、あるいは研究者を目指したいと思いました。

回転部に配置されたバケット

土槽内に再現された海岸堤防の模型



運転前、バケットに模型をセットする


運転開始 バケットが振り上がる

実験時 バケットが水路と一体化

上から見た回転部

回転時

菅野高弘 特別研究官

地震と津波が作用する実際の現象を模型で再現

大規模地震津波実験施設

実際は複合災害なのに、これまで別々に研究されていた地震と津波。一連の被災過程を模型実験で再現できる世界初、世界唯一の実験施設を開発。破壊メカニズムの究明に期待！

脱水機にヒントを得て生まれた高速回転する実験装置

地震によって施設に損傷が生じ、続いて発生する津波によって破壊に至る。どうしても知りたいその被災のメカニズム。明らかにするには、模型に多数のセンサーを取り付け、地震と津波を作用させる実験を行うしかありません。その一念で、「ブンブン丸」の愛称で呼ばれる大規模地震津波実験施設の開発に取り組んできた菅野高弘さん。「この構想を得たのは2004年。スマトラ沖地震とインド洋大津波の現場に行ったときでした。地震の研究者として、地震で何が壊れたかを見に行ったのに、みんな津波で流されてしまっていてわからない。調べる方法はないものか、と」

なにぶん世界で初めての試み。まず予算を獲得するまでに3年近くかかり、造るのにさらに3年余。「あと3年くらい早く完成していれば、この装置を使った研究の成果によって、もしかすると今回のような甚大な被害は防げたかもしれない。それを思うと悔しいんです」

波を起こす装置（造波装置）、地震を発生する装置（水中振動台）、水路から構成されるこの施設。1分間に123回転という高速で回転させることで生じる重力加速度の50倍の遠心加速度の中で、模型の挙動の観測・計測を行います。「全自動洗濯機の脱水モードの原理ですね。なぜ50倍の加速度が必要なのかというと、例えば1／50の縮尺模型で1mの地盤は、実物ではがっちりした50mの地盤に相当しますが、所詮1mなので簡単に崩れてしまいます。模型と実物の間では、力の関係がうまく再現できないんです。でも模型を回すことによって50倍の加速度をかけてやれば、水圧も土の圧力も上がり、実物と同じ強さを発揮する。小さい模型で大きな現象を再現するための工夫です」。

模型をセットするのは振動台と造波装置が組み込まれたバケット。回転が始まるとバケットは振り上がり、水路とガチッと一体化したのち、水が注入されるという仕組み。地震を起こして模型を揺らし、その後、造波装置で発生させた津波が、幅1m（実物では50mに相当）、深さ0・8m（実物では40mに相当）の水路を経由して模型に到達します。最大128個の計測センサーで、地震前から地震中、地震後の津波来襲時までの全挙動を観測できるのだとか。

研究・技術開発を推進し懸念される巨大地震に備えを

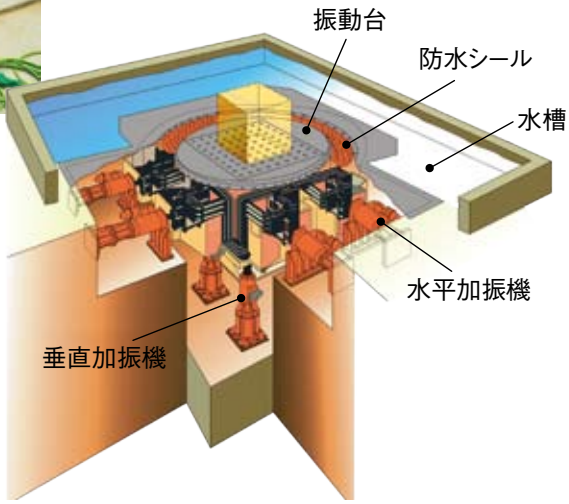
「私の頭の中だけに存在したプランを、みごと形にしてくれたのは、日本が世界に誇る町工場の技術力。大田区蒲田近辺にある15、6社の工場の、達人たちの技が結集しました。装置としてはもう完成して、実験結果の分析に基づく成果を出すまで、あと一歩のところまできている」（2011年7月現在）

すぐにも調べたいと菅野さんが話すのは、東日本大震災の津波によって宮城県女川で相次いだ、本来災害に強いはずの鉄筋コンクリートのビルの倒壊。「基礎部分から根こそぎ横倒しになるなんて、まさにあり得ない事象。地盤の液状化と津波の両方が作用していると考えられます。今後の津波避難ビルを考える上で、原因究明は急務です」

東海、東南海、南海地震などの巨大地震の発生が、以前にも増して懸念されるいま、大規模地震津波実験施設を用いた研究および技術開発には、各方面から熱い期待が寄せられています。

地震防災研究領域　耐震構造研究チーム　小濱英司チームリーダー

実験時。水中で作動している



港湾構造物の地震時挙動を解明

三次元水中振動台

海底の地震動を三次元で再現。
大縮尺の実験模型に作用させ、揺れ方や破壊過程を計測・分析。
耐・免震化のための技術開発やその検証、地盤の液状化特性の解明にも貢献。

耐震構造研究を支える世界最大の水中振動台

中央に設置されているオレンジ色の丸いテーブルが振動台で、その直径は6m。13m角、水深2mの水槽の底にあり、最大変位±30cm、最大加速度±2Gにて水平2方向・鉛直1方向の三次元で振動させることができるのだとか。「このテーブルを動かして、地震の揺れを再現します。1／30～1／15のスケールで造った構造物の模型を上に置き、実際に揺らしてみて、模型がどのように動くか、どのように壊れるかを調べる。阪神・淡路大震災を機に整備されたもので、水中で作動する振動台としては世界最大なんですよ。僕自身は見ていませんが、それ以前は二次元の水中振動台を有していたそうです」と、地震防災研究領域 耐震構造研究チームのリーダー、小濱英司さん。例えば臨海地域や沖合人工島の護岸や防波堤などは、水中に建設されるため、地震によって受ける影響は陸上の構造物とは異なります。水中での実験は不可欠なのです。

「実際に造る構造でそのまま模型にして実験し、揺れに耐えられるかを調べることもあります。また、設計にあたって毎回実験を行うことは不可能なのでコンピュータシミュレーションを用いるのですが、その計算手法が正しいかを判断するには実験結果との比較が重要に。さらに、設計の手法や基準を新たにつくる際の検証実験も、この装置を使って行います」

構造物を造るときは予算もあるため、何が何でも絶対に壊れないものをというのはどだい無理。「想定した地震動に対しては壊れないように、というのが基本です。で、最初から新たに造るのであればことは容易ですが、どうしても既存のものを有効利用する場合が多くなる。耐・免震構造を付け足す形になるので、構造的には複雑になるし、当然その挙動も複雑に。通常の設計のやり方は新たに造ることを基本にしていますから、それを適用していいかわからないと、実験をやってみようということにもなる。そのためにも、こういう装置は必要なんですよ」

東日本大震災で何が起きたか模型実験で導き出す

いざ地震が起こったとき、被害という形でその結果は目に見えるけれど、ではどういうふうに動いたのか、どういう過程を経て壊れたのかとなると、実際はわからないことばかり。

「今回の地震もそう。各港1、2ヵ所に設置した強震計で揺れの記録はとっていましたが、構造物に計測器は入っていない。それを知るには、実験をやるしか方法がないんです。計測器をたくさん入れて揺らしてやるしか」。模型に計測器をつけて今回の地震と同程度の揺れを起こしたときの数値と、実際に壊れているものとの比較が目下の課題。「順序としては、まず実際のものがどうだったのかを調べるのが先です。とくに土の場合、状態が固かったか軟らかかったかでも違ってくるので、そういう前提を現地で確認してから、揺れの再現実験へ。実験や計算をいろいろ試して、現地の状況と合致する結果が出るかどうかというのをやってみないと。壊れたところは何で壊れたのか。今年度中には答えを出す必要があるでしょう」

仙台空港と仙台塩釜港を訪ねて
東日本大震災被災地からの報告

地震と津波による複合的な被害を受けた仙台空港と仙台塩釜港を訪ね、地震直後の様子と今の復興状況を取材しました。

東日本大震災当日
津波に襲われた仙台空港

3月11日に発生した東日本大震災から早くも半年が過ぎました。亡くなられた方々に深い哀悼の意を表するとともに、被災された皆様に心よりお見舞い申し上げます。

今回は、甚大な被害を受けた宮城県の仙台空港と仙台塩釜港を訪ね、地震直後の様子をお聞きするとともに、その後の復興状況を取材しました。

地震直後の仙台空港

大きな被害を受けた仙台空港はどのような状態だったのか。国土交通省 東京航空局 仙台空港事務所 仙台空港長・大坪守さんと、総務部 先任施設運用管理官・鈴木富二さんにお話を伺いました。

「津波襲来時にこの空港の惨状を見た人間からすると、空港がこんなに早く使えるようになるとは思いもしませんでした。民間航空機が飛べるようになるまで半年は無理だろう、ひょっとしたら1年くらいはかかるのではないかと思っていましたから」（大坪さん）

仙台空港は津波による被害が大きかったところです。滑走路は泥水で覆われ、車や土砂や瓦礫が海水に流されて悲惨な有様でした。

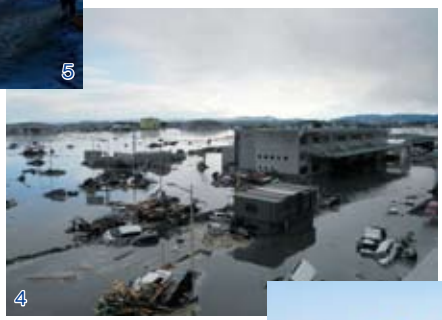
国土交通省 東京航空局 仙台空港事務所 大坪 守 仙台空港長

その後、在日米軍の協力を得て応急復旧を進め、3月16日には滑走路長3000mの内1500mを使って米軍輸送機が到着。4月13日よりターミナルビルの一部を暫定的に利用して国内線臨時便が運航再開され、7月25日にはターミナルビルの大半が復旧し国内線定期便が再開されました。現在は、9月末を目途にターミナルビルの全面復旧に向けた工事が進められています。

「津波で現場にある車もすべて流され、ただ眺めているしかないという状態でした。そこに、13日の朝8時過ぎにはTEC-FORCE（テックフォース、国土交通省緊急災害派遣隊）が、ロードスイーパー（路上清掃車）を伴って駆けつけてくれたのです。こんなに早く復旧できた一番の要因は、私たちが手も足も出せない状況のなかで東京から車両などを持ってきてくれて『さあ、片付けの作業をやろう』と強い意思を示してくれたことだと思います。米軍や自衛隊の輸送機が仙台空港の滑走路を使えるようになったのは、テックフォースの支援部隊と、鈴木先任指揮下で駆けつけてくれた土木維

国土交通省 東京航空局
仙台空港事務所 総務部
鈴木富二 先任施設運用管理官

1. 数メートルにも達している津波（車寄せの屋根まで達している）
2. 津波で流されたバスが炎上している
3. 航空局の消防車両等も津波の被害に
4. 浸水した貨物ターミナル施設
5. 津波によって流された車や瓦礫
6. 泥にまみれたエプロンとボーディング・ブリッジ



持業者の方々が協力して滑走路を片付けてくれたからなのです」（大坪さん）

「自分たちが落ち込んでいてなにからやればいいのかわからない状態のときに、本省や局からの『やるぞ！』という意思表示があったのは嬉しかったですね。滑走路をどこまであけるかなどの判断を的確に指示してくれたので現場の作業もとても動きやすくなりました」（鈴木さん）

16日に米軍機C-130が着陸した段階では、ライティングシステムはほぼ全滅で稼動していませんでした。飛行機を誘導するための無線施設もこのときは稼動しておらず、ハンディの無線機を使って管制官が交信していました。

滑走路に流されてきた車や瓦礫は、フォークリフト等を使って移動させました。支援部隊が東京から連れてきた業者と、ふだんは空港内の舗装の点検や芝刈りなどを行っている地元の維持業者が全国から人員と機材・重機をかき集め、本来の業務とはかけ離れた瓦礫の撤去等を手伝ってくれたといいます。

「滑走路などは、今はきれいになっていますし、傷んでいたところは補修しているので基本的なものは直っています。ただ、実は飛行機を安全に飛ばすためのレーダー管制室などは水没して使えないので、代わりに小さな非常用施設を使って業務を行っています。こうした部分までが完全に元に戻るにはあと1年くらいかかるといわれています」（大坪さん）

3月13日 テックフォースが到着

仙台空港の液状化対策

仙台空港は滑走路の下に道路（仙台空港トンネル）が通っていたり、用水路が流れているところがあり、そのような地盤の弱い部分は既に改良工事が終わっていました。

しかし、エプロン部の一部に沈下、舗装面の亀裂が確認されています。また、液状化現象と津波によるものとみられる道路の盛土の崩壊がみられました。滑走路部分は、一部に軽微な亀裂は発生していたものの、横ずれ、段差、目地の開き等は認められず、当面の供用には支障はないと判断されています。液状化対策が施されている部分においても被害は見られませんでした。

「対策を行っていたところはやはり効果があり、問題ありませんでした。改良していない部分はこれから実施していく予定です。今回のことで液状化対策の必要性を再認識させられました」（大坪さん）

復旧した仙台空港（2011年8月現在）

性能設計の視点での「液状化による構造物被害」

港湾空港技術研究所は国土交通省と協力し、港湾・空港・海岸の早期復旧・復興のために技術的な支援を鋭意実施しています。地震直後から国土技術政策総合研究所と協力し、計10回にわたり現地調査団が派遣され、津波・地震についての調査報告が行われました。ここでは、液状化に関する見解についてご紹介します。

施設の設計体系は仕様設計から性能設計に移行（港湾施設：平成19年4月、空港土木施設：平成20年7月）していますが、被害を受けた施設は仕様設計（旧基準）によったものが多数ありました。

液状化が懸念されるときには、「液状化する・しない」の判定を行い、原則的には、液状化すると判定された土層の対策を実施してきました。こうした対策の効果により構造部材の破壊や大規模な変状状態には至らず、構造の安定性は確保できたと判断できます。

一方で、性能設計の視点から評価すると、「液状化しない」材料で埋立されていても、材料の圧縮や破砕などにより、比較的大きな沈下が発生、あるいは段差が発生するなどの事例が確認されました。こうしたことから、今後は、性能設計の立場から耐震性を再評価する必要性が示唆されたものと考えられ、構造構成材料（地盤材料含む）の動的特性の把握に基づく耐震性能照査手法の再検証・高度化も必要とされてくると思われます。

仙台塩釜港の地震被害

仙台市中心部から西方約10ｋｍに位置し、特定重要港湾にも指定されている仙台塩釜港仙台港区も津波による大きな被害を受けました。

「この地区一帯は地震発生から30分後くらいに津波が来ました。塩釜港湾・空港整備事務所も1階は浸水したので2階に避難したのですが、なかなか水が引かずにひと晩を事務所の中で過ごしました」

当時の状況を語ってくれたのは国土交通省 東北地方整備局 塩釜港湾・空港整備事務所副所長の東山和博さん。付近の企業の人など80人くらいが避難されてきて、朝まで事務所の2階と屋上に避難したそうです。

仙台港区には約7・2ｍの津波が来襲し、被害を受けました。

「かなりひどい状況でしたが今では瓦礫撤去等は進んでいます。災害復旧の準備も進んでいて、最優先の高砂埠頭の14ｍ岸壁をはじめ、中野埠頭の10ｍ岸壁の2箇所はすでに着工されました。幸いにも、岸壁は津波で瓦礫に埋まったりしたのですが、地震によって大きく壊れたものがほとんどなく、供用しながら復旧できる状態です。堀込式港湾なので従来の締まった地盤に直接、矢板を打ち込んで岸壁を作っているので液状化も少なく非常に粘り強い構造なのです。特に、3月17日に雪が降る中、耐震強化岸壁の高松埠頭に救援物資を積んだ九州地方整備局の海翔丸が接岸した時には涙が出ました」（東山さん）

国土交通省 東北地方整備局
塩釜港湾・空港整備事務所
東山和博 副所長

雷神埠頭と高砂埠頭の現状

供用しながら、増深や耐震補強が出来る二段タイ材地下施工を行っている雷神埠頭は、既に施工が完了している部分もあるため、大きな被害はなかったようです。震災の影響で工事は一時中断されましたが、取材に訪れたときにはすでに工事は再開され、施工完了済みの岸壁を供用しながら工事が行われていました。

雷神埠頭 9m 岸壁 二段タイ材地下施工

高砂2号岸壁にも伺いました。この岸壁は震災前には、東北地方で唯一の北米航路が寄港していたそうです。今回の震災で、被災しており、現在復旧工事中です。また、免震装置付きのガントリークレーン2基は、倒壊をまぬがれましたが、電気系統の損傷のため補修を待っています。震災直後から、国による航路啓開業務がスタートし、航路上の漂流コンテナなどの障害物の撤去が行われました。

仙台港区の港湾利用者や荷主さんからは、一日も早い北米航路就航の運用再開の強い要請が多く寄せられていて、港湾工事では異例ともいえる24時間体制での復旧工事を行っているとのこと。

コンテナの撤去作業

8月上旬に作成・公表された、仙台・塩釜港復旧・復興方針によれば、10月中には延長180ｍを供用して、荷役制限付きながら北米航路に就航しているコンテナ船の寄港を可能とし、11月中にはさらに90ｍを追加供用して合計270ｍ部分を供用させることにより、荷役制限を撤廃する予定とのこと。このため不眠不休で復旧業務に当たっている東北地方整備局港湾空港部、塩釜港湾・空港整備事務所、仙台港湾空港技術調査事務所などからの要請に応えるため港湾空港技術研究所も全力で技術支援を実施しているそうです。

今回の取材では、災害時の空港や港湾の果たす役割の重要性が大きく、被災地の復旧・復興に欠かすことのできない施設であることを肌で感じました。液状化対策、耐震対策により、地震による被害を最小限にとどめた施設が活用されたことから、事前の対策や早期復旧の重要性を再認識することとなりました。

免震装置付きのコンテナクレーン

Cross Line 国際交流レポート

東日本大震災日米共同合同調査

石巻港

4月5日から5月26日まで、港湾空港技術研究所地震関連研究グループと米国の2つの研究機関が合同で、東日本大震災緊急調査が行われました。

港空研の地震関連研究グループと米国の研究機関とは、これまでにも情報交換や共同研究、人材交流などを継続的に実施しています。

例えば1989年ロマプリエタ地震の際には、カリフォルニア州に研究者を派遣し共同調査を実施。また、2001年11月には十勝港で実施した大規模な液状化実験、2007年10月には石狩湾新港で空港土木施設を対象とした液状化実験をするなど、さまざまな共同研究を実施してきました。

今年の東日本大震災の際には、地震発生からわずか30分後に、Geotechnical Extreme Events Reconnaissance（GEER）から「お見舞いと調査協力の準備をしている」との連絡があり、被災地の救急活動・救援活動を優先させるために、4月以降に共同調査を実施することで合意しました。

そして、GEERから2チーム（4月5日～7日、12日～14日）3名、American Society of Civil Engineers の Coasts,Oceans,Ports & Rivers Institute（ASCE-COPRI）から3チーム（5月12日～17日、20日～26日）9名を受け入れ、各チームに概ね2名の港空研究者が参加し、共同で被災調査を実施しました。

米国側メンバーは異なった専門家が参加し、各々分担して調査に当たりました。移動中の車内では日米のメンバーが被災メカニズムに関する議論で盛り上がり、食事中や宿泊施設においても熱のこもったディスカッションが行われました。当所の若手研究者も積極的にディスカッションに参加しており、米国側メンバーから「PARIの若手研究者は凄い」と称賛の言葉をいただきました。

今回は「被災メカニズムの解明」、「迅速な復旧」と「今後発生する可能性のある巨大地震・津波への備え」に資する知見を得ることを目的に実施されました。今後、論文やワークショップ等を通じて、今回の成果を公表することで合意しています。

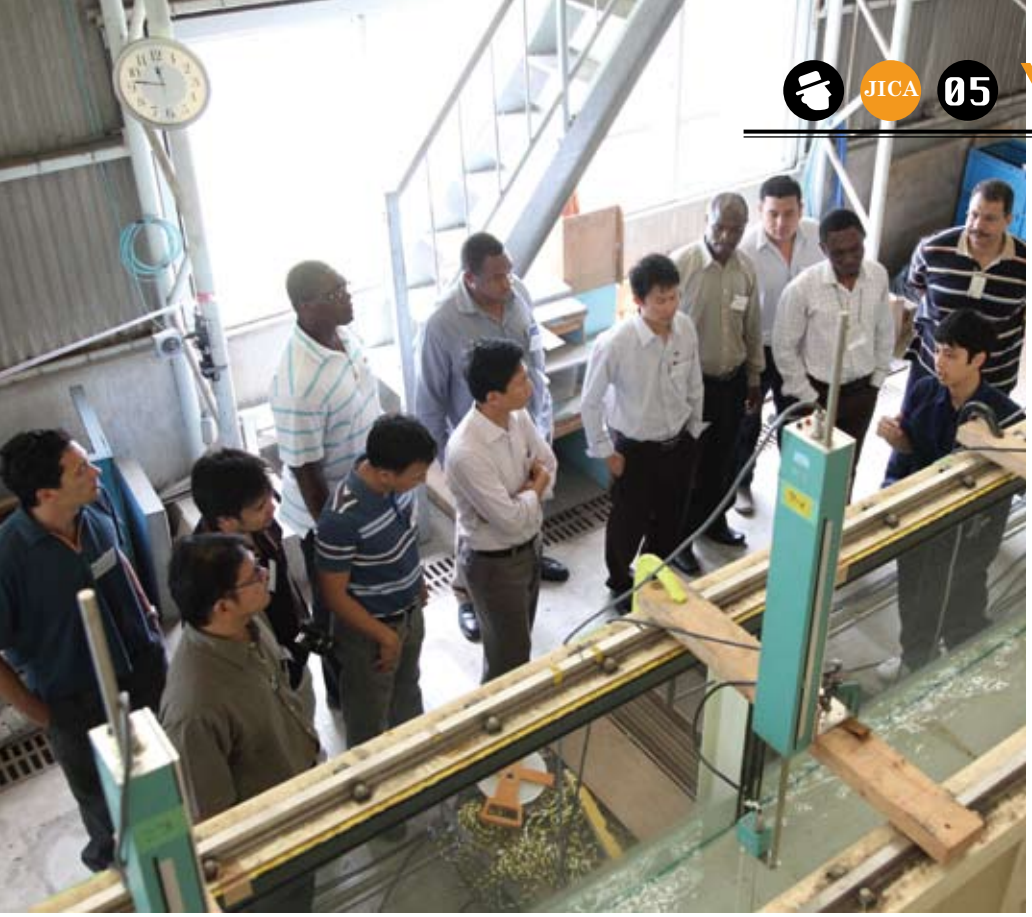
これらのチームとは別に、ASCE-COPRIの津波研究チーム（米国側5名、5月11日～18日）がアジア・太平洋沿岸防災研究センターメンバーと協力して、現地調査を実施しています。

調査期間中、復旧途中の宿泊施設に宿泊する場合はお湯が出ないため、近くの銭湯や温泉などの公共浴場を利用しましたが、米国には全裸で入浴する習慣が無いことから最初は困惑した様子でした。しかし深夜の露天風呂はとても気に入った様子でした。

代表的な調査港湾

釜石港

仙台塩釜港（仙台港区）向洋海浜公園にて



港空研が協力する JICA集団研修

「港湾開発・計画」

国土交通省港湾局では1963年より港湾開発・計画に関するJICA集団研修を受け入れており、今年で48年目を迎えます。この研修はこれまでに世界約60ヶ国から712人の研修生を受け入れ、世界の港湾の発展だけでなく、日本と発展途上国の友好に大きく貢献してきました。港湾空港技術研究所（以下港空研）では毎年、港湾局、各地方整備局、国土技術政策総合研究所（以下国総研）、財団法人国際臨海開発研究センターと共に研修生の受け入れを行っています。

今年の研修は6月5日（日）～8月6日（土）の2ヶ月に渡り、アンゴラ、エジプト、エルサルバドル、カンボジア、ガーナ、コロンビア、タンザニア、フィリピン、ミャンマーの9ヶ国より13名が参加しました。

例年実施されている港湾関係に関する講義に加え、東日本大震災の被害状況や復旧状況、風評対策等について理解してもらうための講義や視察も行われました。港空研と国総研では、業務の説明や施設見学、港湾構造物の耐震設計や港湾・沿岸域における地震・津波対策などについての講義を行い、6月23日に加島研究官による講義と施設見学も行われ、実験施設を利用しての実用的な講義に、研修に参加された方からは大きな反響が寄せられました。

国土交通省 港湾局 国際・環境課 国際企画室 国際協力係長 土井 豊照さんにお話を伺いました。

「研修を始めたきっかけは日本の港を深く知っていただき、日本が持っている港湾技術を伝える人づくりによる国際協力でした。今年は東日本大震災による影響を心配された方もいらっしゃるので、参加者に日本を見ていただいて『心配されるような状況ではない』ということを自国に伝えていただきたいですね。長年の研修実績の積み重ねでOBの方とも深い信頼関係が生まれています。昨年はフィリピンで同窓会が行われ、たくさんの方が参加されました。これからアジアを中心とする新興国に向けて、日本の優れたインフラ関連産業を官民連携により展開していく上で、これまで築いてきた人と人との繋がりが大きな意味を持ちます。アジアに向けて戦略的なプロジェクトが動いていますが、こうした人と人との繋がりをうまく活用して、これまでにつくりあげてきた財産を無駄にしないようにしていかないといけません。

また、東日本大震災ではアジア各国から支援をいただいたので、感謝の気持ちも込めて、日本の防災技術や研究結果の報告などを、セミナーなどを通じて積極的に伝えていきたいと思います」

土井豊照係長

JICA研修員インタビュー

――講義はいかがでしたか？

実験水槽や波の造波を見て、講義内容をより深く理解することができました。私の国には断面水槽も平面水槽もなく、砂浜などの現場に行って機材を設置して計測しています。ふだんは実験を行わないので、この研究チームが業務で使用している数値計算プログラムについてとても興味がありますし、ぜひ水槽実験を行ってみたいと思いました。

インタビューに答えていただいた、ガーナのオフォリ コムラ ウブマセさん

「空港アスファルト舗装の層間剥離現象に関する赤外線を用いた検知手法」が第13回国土技術開発賞優秀賞を受賞！

2011年7月8日、東京国際フォーラム（東京都千代田区）にて第13回国土技術開発賞表彰式が行われ、港湾空港技術研究所の空港舗装研究チームの前川主任研究官が応募した「空港アスファルト舗装の層間剥離現象に関する赤外線を用いた検知手法」が優秀賞を受賞しました。

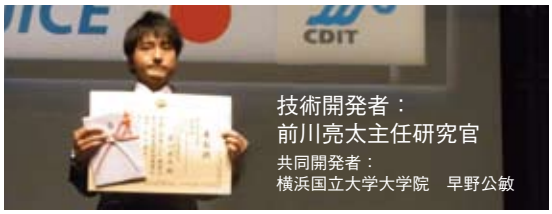
受賞技術は、近年問題となっている空港の滑走路や誘導路のアスファルト舗装の「層間剥離現象」を早期に発見するための技術です。層間剥離現象が進行すると舗装の表面が隆起して舗装が壊れ（写真-1）、事故の原因となります。

これまで、層間剥離の探査は、路面をハンマーで叩いた際の反射音を基に層間剥離の有無を推定する「打音探査法」が用いられてきました（写真-2）。しかし、打音探査法には一定の技能を持った測定者が多数必要で作業時間にも多くの時間を要することや、探査結果が測定者の主観に強く依存するため経年的な調査が困難なことから、空港を管理する上での課題となっていました。

受賞技術は、赤外線技術を用いて、層間剥離が発生している箇所と健全箇所との路面温度差から層間剥離箇所を特定する技術です。赤外線カメラを自動車に積載させた装置（写真-3）によって、走行しながら舗装の路面温度を測定して層間剥離箇所を検知することができます。

剥離箇所は空気が断熱層となるので、昼間の日射による熱を夜間に放射しやすく、夜間の表面温度は健全個所と比べると剥離箇所の方が低くなります。層間剥離が発生している箇所と健全箇所との路面温度差に着目することで、層間剥離の箇所を特定できるのです（図-1）。

従来の打音法と比べて舗装上の作業時間を大幅に短縮できるため、深夜の短時間にしか作業できないような混雑空港において特に有効な技術です。



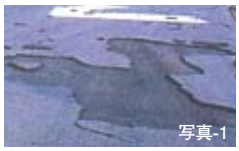
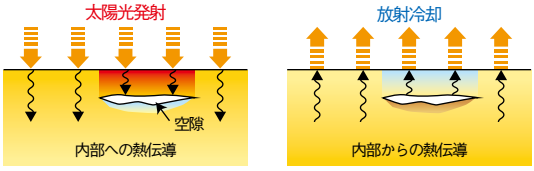


写真-1

写真-2

写真-3

図-1　路面温度に着目した層間剥離検知の原理



昼：剥離部の温度が高い　　夜：剥離部の温度が低い

就任のご挨拶

7月1日付で港湾空港技術研究所の理事長に就任しました。

当研究所は、第二次大戦後、横須賀市にその母体が設立されて以来、港湾や空港を中心とした沿岸や海洋の防災・環境・利用に関する研究を進めてまいりました。特に、沿岸域では地震や津波、高潮や高波の災害が多く発生しており、伊勢湾台風（1959年）やチリ地震津波（1960年）のころから重要な研究として推進しております。2004年のインド洋大津波の後には、津波防災センターを設け、2010年からはアジア・太平洋沿岸防災研究センターに改組して、重点的な研究を進めております。

インド洋大津波だけでなく、ハリケーンカトリーナの高潮災害、チリ地震津波の調査などを通じて、私どもは、こうした大災害は世界のどこでも発生する可能性があり、各国で最大級の高潮や津波に備えることが必要であることを議論してきました。例えば、ハリケーンカトリーナの後には、Worst Case Scenario（最悪のシナリオ）という言葉や、Preparedness（準備）という言葉がいろんな機会に使われています。

本年3月11日に、東日本大震災が発生し、巨大な津波で東日本の太平洋沿岸は壊滅的な被害を受け、2万人以上の死者・行方不明者となっています。沿岸防災に関係するものとして、これほど衝撃的で、悲しくまた残念なことはありません。Worst Case Scenarioという言葉や、Preparednessという言葉の大切さを本当に理解していたとは言えなかったと思います。これまでの取り組みの甘さを、深く反省する必要があると思っております。

港湾空港技術研究所は3月11日以降、国の要請を受けて現地被災調査を実施するとともに、被災した沿岸域の再建に向けて種々の調査・研究を推進しています。沿岸防災に対する考え方の抜本的な見直しも必要であり、将来の沿岸防災に向けた長期的な研究にも総力で取り組む必要があると思っております。

独立行政法人港湾空港技術研究所
理事長　高橋　重雄

世界に貢献する港湾空港技術

PARI

独立行政法人　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）5010　FAX：046（841）8307
URL：http://www.pari.go.jp/

PRINTED WITH SOY INK
●この印刷物は環境にやさしい
植物性大豆油インキを使用しています。
グリーン購入法に基づいた用紙を使用しています。