東日本大震災 津波災害に関する講演集

第8回国際沿岸防災ワークショップ＆沿岸技術研究センター創立記念特別講演会より

写真提供：海上保安庁

財団法人沿岸技術研究センター

3.11 Great East Japan Earthquake

本講演集は、国土交通省、(独)港湾空港技術研究所、および(財)沿岸技術研究センターが主催して
平成23年9月5日に横浜市開港記念館講堂において開催された
「第8回国際沿岸防災ワークショップ～レベル2津波災害からの復旧・復興～」における、
河田惠昭先生の基調講演及び「セッション1:東日本大震災における津波災害とその復旧・復興」で
東日本大震災について講演された4名の方々の講演を掲載するとともに、
平成23年9月20日にホテルルポール麹町で開催された
(財) 沿岸技術研究センター創立記念特別講演会での高橋重雄氏の
特別講演を掲載したものです。

写真提供(3点):海上保安庁

Index

第8回国際沿岸防災ワークショップ
～レベル2津波災害からの復旧・復興～

Report No. 1 基調講演

東日本大震災の復興と減災 P.4

河田惠昭　関西大学社会安全学部長・教授

Report No. 2 講演

2011年東北地方太平洋沖地震による津波 ー南海トラフ地震の連動シナリオの再検討ー P.12

古村孝志　東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター教授

Report No. 3 講演

東日本大震災での津波の被害像 P.16

今村文彦　東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター教授

Report No. 4 講演

東日本大震災における港湾被害 P.20

富田孝史　独立行政法人港湾空港技術研究所 アジア・太平洋沿岸防災研究センター上席研究官

Report No. 5 講演

「撓まず屈せず」 ー東日本大震災からの復旧・復興 P.24

野田武則　岩手県釜石市長

沿岸技術研究センター創立記念特別講演会

Report No. 6 特別講演

津波防災 ー想定外への対応：性能設計 P.28

高橋重雄　独立行政法人港湾空港技術研究所理事長

ページ４～２７は省略しています。
ご覧になりたい場合は、完全版を以下のURLに掲載しています。

http://www.pari.go.jp/event/seminar/2011/20110905ws.html

沿岸技術研究センター
創立記念特別講演会

特別講演

Report No. 6

津波防災 - 想定外への対応：性能設計

高橋重雄　独立行政法人港湾空港技術研究所　理事長

日時　平成 23 年 9 月 20 日（火）

はじめに

本日はまず、東日本大震災の概要、最大級の津波被害がどのようであったかという観点でお話ししたいと思います。その後、今議論されている最大級への対応について、「性能設計」というキーワードでお話ししたいと思います。

1. 東日本大震災の概要 - 最大級の津波被害 -

1.1GPSで観測された津波と痕跡高

最初に、「GPSで観測された津波と痕跡高」についてお話しします。図1は日本周辺の海を表すマップですが、ご承知のとおり日本周辺には海溝、深い海があります。日本海溝、南海トラフが、プレートといわれる地球の皮がぶつかり合うところです。そこで地震が発生し、津波が発生しているわけです。

今回は3月11日14時46分に仙台の東130kmのところでM9.0の巨大な地震が起きました。その結果、南北400km、東西200kmにわたって海底が隆起したり沈降したりしました。そして津波が起こったわけです。津波が発生してから大体30～40分で三陸の沿岸に達しています。同時に関東の方にも来ています。仙台湾には水深が浅いですから、津波がなかなか来ません。大体1時間後くらいにきています。津波は太平洋側にも広がり、ハワイやアメリカにも影響を及ぼしています。シミュレーションからも、津波が1回だけではなく何回も海岸にトラップされてやってくるのが分かっています。

図2は、GPS波浪計の津波観測値と津波の痕跡高の観測結果を示したものです。浸水高と遡上高が痕跡高なのですが、私達の測定では大体浸水高でいうと3～18mくらい、遡上高でいえば7m～30mぐらいの範囲で、いずれにしても10mを越すような巨大な津波が来ていたことが分かるかと思います。

ご承知のように、国土交通省は全国で12機のGPS波浪計を沖合20km、水深200mのところに設置しています。GPS波浪計が津波を計測したわけですが、例えば釜石沖では3時12分に6.7mの津波をとらえました。これは本当にとてつもない津波です。沿岸に近づくと確実に2倍、3倍になります。13m以上の津波が来襲することになり、気象庁では津波警報を10mの大津波警報に変更しています。

このGPS波浪計のデータから、津波が直に海岸に入射したと考

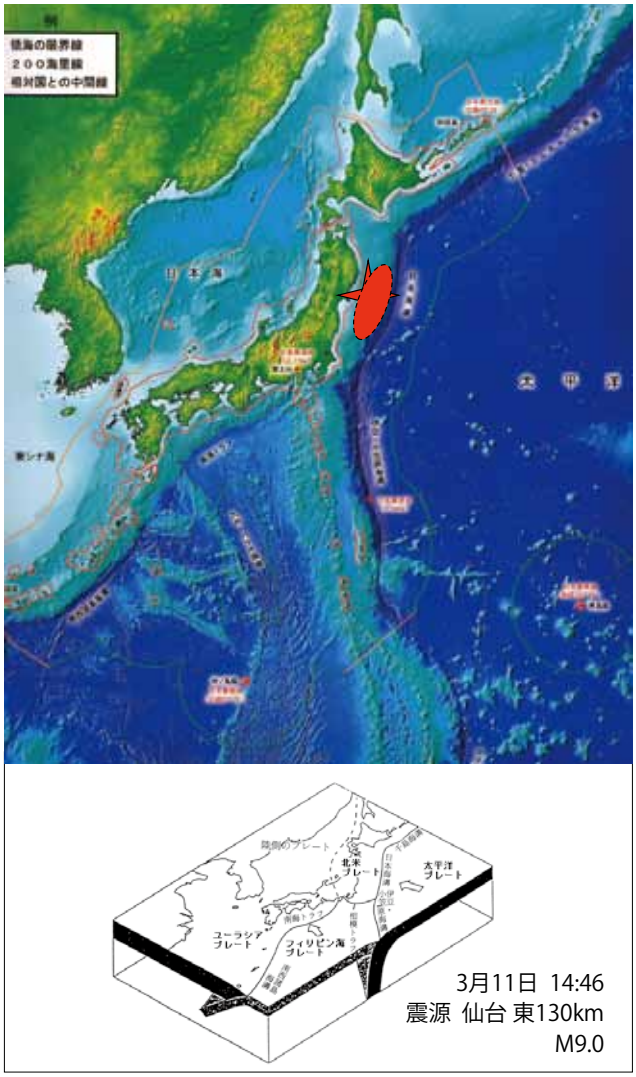

図1　日本周辺の海と海溝

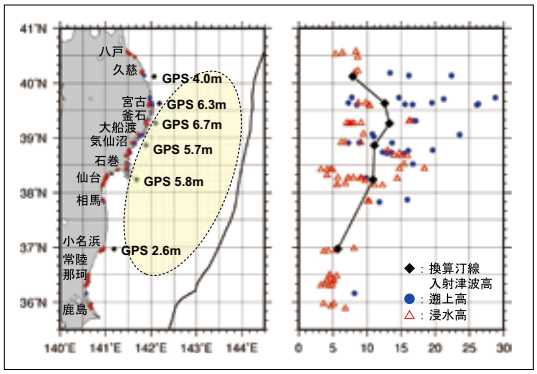

図2　GPS津波観測値と入射津波高さ

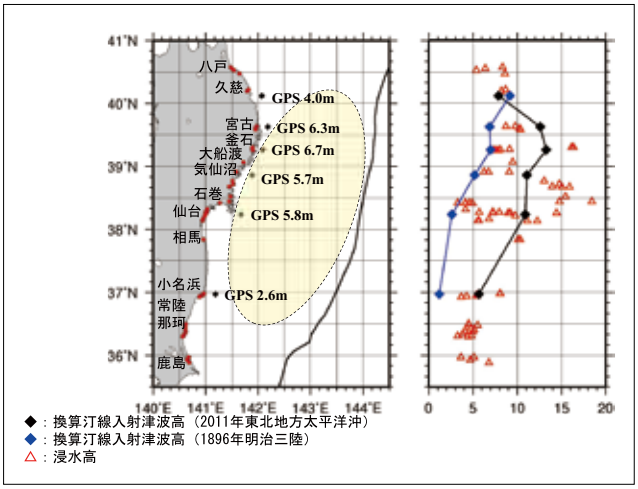

図3　明治三陸津波（1896年）との比較

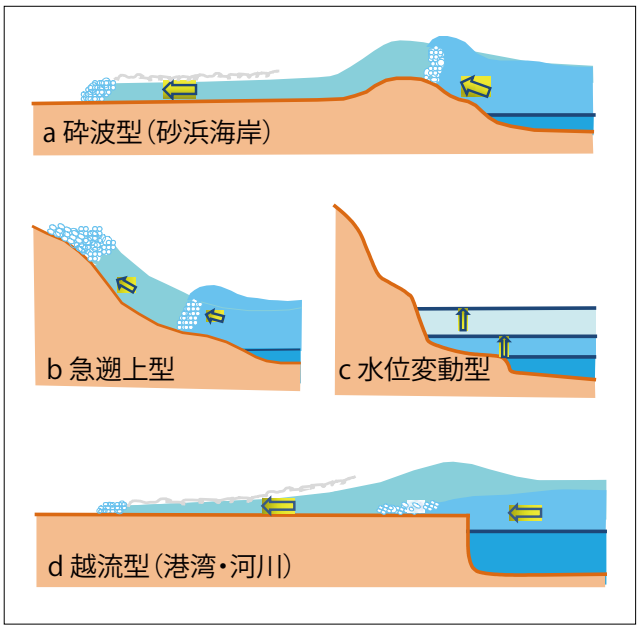

図4　海岸断面と津波の遡上の特性

え、水深が浅くなって大きくなる効果だけを単純に考えて推定したのが、図2の推定入射波高の実線です。釜石沖では13mを越しますし、仙台沖でも10mクラスになります。つまり、三陸沿岸では入射波で10m以上の津波がきているということです。この値は大体、浸水高の平均的な値と一致しています。

図3は、1896年の明治三陸津波との比較です。明治三陸津波のモデルから実際に数値計算をして、GPSの値と同じような計算手法で推定入射波高を出したものです。これで見ると、今回は明治三陸津波の2倍あるいは3倍ぐらいになっています。実は、明治三陸津波はこの地区の基本的な想定津波です。ただ、できるだけ安全側ということで震源を動かしたりして、明治三陸津波より危険な、大きな津波を想定していたと思います。それでも5割増しとか2倍で、特に南の方が解離差が大きくなっています。南の方は、明治三陸津波ではあまり大きな津波ではなく、どちらかというとチリ津波などの方が大きかったところです。

今回は鹿島や常陸那珂にも5mクラスが来ています。普通のM7.7ぐらいの津波だと、大きなところでもこの程度です。それに比べると、いかに大きいかが分かっていただけるのではないかと思います。

1.2津波被害の概要

今回は多くの津波の映像が撮られており、それによって津波災害の実態を理解することができます。仙台湾の名取川河口付近で撮られたビデオでは、津波の陸上への遡上の様子がよく分かります。名取川のこの地区はもともと非常に低い湿地帯が田園となったところで、2mくらいの高さしかないところです。そういうところに10mクラスの津波が入ってくると、抵抗するものが少ないのでどんどん入ってきて、1km、2kmと内陸に侵入します。津波の先端は非常に怖く、破壊力が大きくて、いろいろな建物を壊していきます。

釜石でもビデオがいくつか撮られていました。釜石港には湾口防波堤があるので浸水高は8mクラスなのですが、それでも非常に大きな被害が出ています。木造の建物は2～3mの津波で大きな被害が出るのですが、8mになると壊滅的になってしまいます。津波は港から溢れてきます。そして、河川からも溢れてきます。釜石港湾事務所では1階まで津波が来ているのですが、もし湾口防波堤がなくて13mが来ていたら、屋上の上まで来ています。

図4は、海岸の断面と津波の遡上の関係を示したもので、津波の陸上への遡上を説明する図面です。今回の釜石はｄタイプです。つまり、港は水深が深いので、波があまり砕けません。お風呂の水がふわっと上がるように越流します。これが、私達が越流型と呼んでいるタイプの遡上です。一方、名取海岸では、沖で砕けながら勢いがついてきて、砂丘あるいは海岸堤防を駆け上って内陸に進入してくる砕波型で、砂浜海岸の特徴的な型です。そのほかに、太平洋側に面した斜面の急な海岸では、津波が砕けながら遡上して、高い遡上高となる場合もあります。逆に勾配がもっと急になると波が砕けず、お風呂の中で水面が上下するだけというような形になります。海岸地形によって様々なパターンが見られ、浸水高や遡上高が大きく変化します。

10mクラスの津波は本当に甚大な被害を及ぼします。津波堤防を越える、内陸深くまで進入する、河川を遡上する、町全体を破壊するなど、私達が今までいろいろなところで見てきたあらゆる津波災害をすべて見ることができます。

その結果、2万人以上の死者・行方不明者となっています。浸水域が大体535平方kmといわれていますので、南北に500kmと考えると1kmの幅で浸水していることになります。その地区には60万人が住んでおられたので、そのうち2万人というのは3～4%です。石巻市では5000人ぐらいの方が死者・行方不明者となっています。陸前高田市では2000人であり、これは人口に対して10%にも及ぶ大きな数値です。

写真1　陸前高田

写真2　陸前高田の航空写真

写真3　陸前高田（被災したアパート）

写真4　釜石港

写真5　気仙沼

写真1はその陸前高田市の写真です。避難所がある学校の高台から撮りました。海岸まで大体2㎞の間に町がありました。ほとんどが木造の建物であり、壊滅的な被害を受けています。

写真2は陸前高田の航空写真です。もともとこの土地は非常に低い湿地帯で、田園となって、最近市街地化したところです。10mを大きく越える津波によって、街全体が破壊されています。この海岸にあった高田の松原は地盤沈下と洗掘によって見えなくなっています。気仙川からも津波が進入して、4㎞先、この地図で上の方に竹駒という地区があるのですが、そこでも大きな被害が出ていました。

写真3も陸前高田で撮った写真です。ここには15mクラスの津波が来襲しアパートの4階まで浸水していました。ただし、4階まで浸水してもこの建物は残ったのです。鉄筋コンクリートの建物は結構強いことが逆に証明されています。

次に港湾の被害状況です。写真4は釜石港です。この船が津波によって漂流していろいろなところに衝突し、最終的にこの岸壁の上に載っています。

写真5は気仙沼の写真です。今回の津波では大体2万隻の漁船が被害を受けたと言われています。その中には、陸上の建物を破壊したものも多くあります。

写真6は仙台新港です。仙台新港にはコンテナが4000個近くあったそうです。それが漂流して、1000個は海の中に行ってしまったと聞いております。

写真7は相馬港の写真ですが、沖防波堤がこのように津波によって滑動しています。防波堤の滑動も幾つかの港で見られています。ただ、全部が動いているわけではありません。この港でも残っている防波堤は結構あるのです。

写真8は綾里の護岸ですが、パラペットが破壊されています。津波が砕けながらぶつかってパラペットを壊したもので、この後ろの方にパラペットの残骸があります。

写真9は岩手県普代村の航空写真です。少し分かりにくいと思いますが、普代村の普代地区には普代川があり、そこには津波水

門があります。中央に見えるのが太田名部地区の漁港です。漁港の防波堤が二重、三重にあって、その後ろに高さ15mくらいの防潮堤があり、その背後に村があります。普代川には20mくらいの津波が来て、水門を越して浸水が起こったのですが、水門は壊れませんでした。また、防波堤のおかげだと思うのですが、漁港の中の津波は比較的小さく、10m以下になっています。その結果、津波が背後の防潮堤を越えることはありませんでした。二つの地区の集落は守られています。

写真10が水門の写真です。後ろが洗掘されているのが分かります。

もう一つ見ていただきたいのが石巻市です（写真11）。石巻市

写真6　仙台新港

写真7　相馬港沖防波堤

写真8　綾里護岸（白浜）

写真9　普代の航空写真（普代地区　太田名部地区）

写真10　普代水門　15m（前面16-20m、後面10m程度）

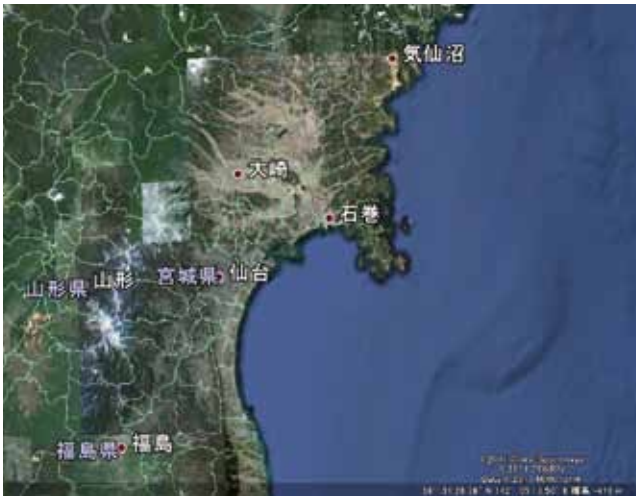

写真11　石巻航空写真

写真12　釜石湾口防波堤の被災状況

写真13　釜石湾口防波堤北堤（被災前）

写真14　釜石湾口防波堤北堤（被災後）

写真15　釜石湾口防波堤　津波作用時の越流状況
（東北地方整備局釜石港湾事務所撮影）

図5　音波による測深図

は合併によって広くなりましたが、旧市街が仙台湾に面したところにあります。旧市街は牡鹿半島があることによって基本的にかなり守られていて、ほかのところは10mクラスですが、ここは5mクラスでした。従って、最初は被害が小さいのではないかと思っていたのですが、実はここが一番死者が多かったのです。5mクラスでも、地盤が 1～2mとかなり低く、大きな被害になっています。

1.3津波防波堤の被害

写真12は津波防波堤の被災の例で、釜石湾口防波堤です。写真の下側に港があります。この防波堤は明治三陸津波を想定して造られていて、港奥で浸水高を8mから4mにするという目標で造られました。4mであれば完全に浸水をシャットアウトすることはできないのですが、かなり浸水域が小さくなり、浸水深も小さくなります。

写真13が直前に撮った北堤の写真で、写真14が被災直後の写真です。このようにケーソンが滑動・沈下している状況です。南堤の方は半分ぐらい残って半分が滑動していました。

図5は音波による測深図です。南堤の半分のケーソンは残っています。あとのケーソンは滑動していますが、海底にきれいに並んでいます。北堤側は洗掘の影響が非常によく見られます。

写真15は釜石港湾事務所が撮った津波作用時のビデオの一部ですが、きれいに越流しているのが分かります。ビデオから、第一波のピークあたりまでは防波堤が津波に耐えていたことが分かります。図6に示すように、津波の伝播計によると、防波堤なしでは港奥で大体13.7mくらいになるのですが、防波堤ありでは8mくらいになって、防潮堤の高さである4mぐらいの潮位になるのも5～6分遅らせることができたと考えられます。その8mぐらいが実際に私達が現地で計測した津波の高さです。

大船渡の湾口防波堤（写真16）は、1960年のチリ地震津波の後、

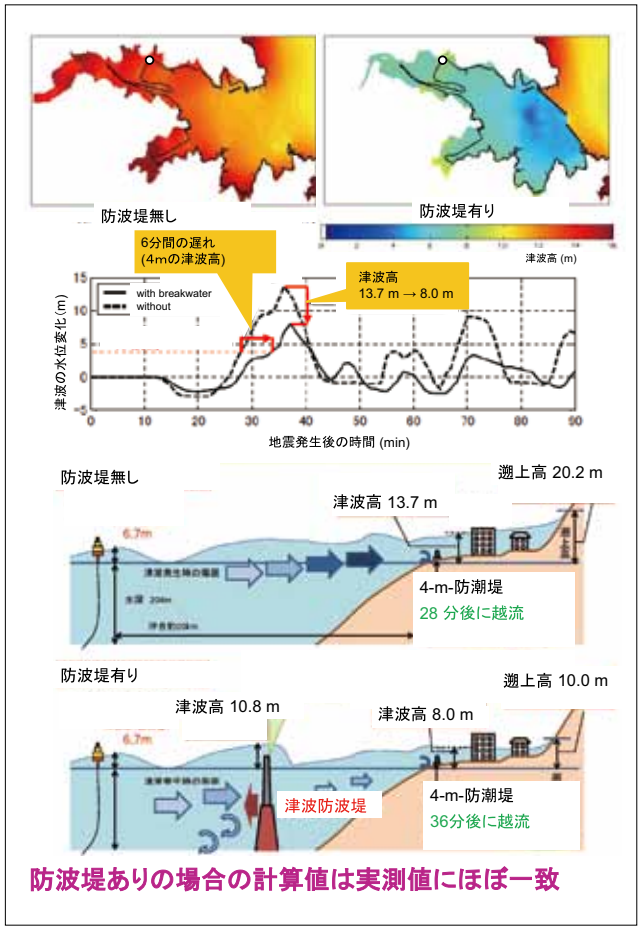

図6　湾口防波堤の津波低減効果

写真16　大船渡湾口防波堤

急速施工で造られて67年に完成しています。これは4mの津波を2mにするために造られたと聞いています。

これもビデオが撮られており、時系列を追ってどうなったかが分かります（写真17）。3時13分ぐらいから越流が激しくなりましたが、3時16分にはまだ残っていました。ここにはいわゆる防波堤灯台があるのですが、それがなくなったのが16～19分の間です。安定性の計算から考えると、比較的早い時期にケーソンが滑動していると思われます。ただし、これは概算値で今はもっと詳細な計算をしていますが、マウンドの影響等で12mぐらいの津波を10mぐらいにしているのではないかと考えられます。

写真17　大船渡湾口防波堤　津波作用時の越流状況

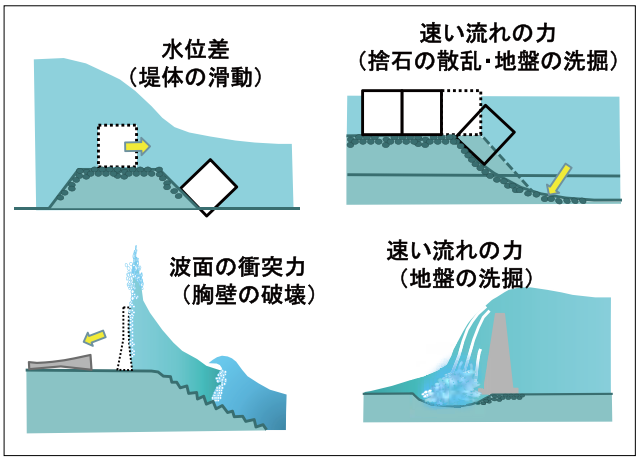

図7　津波防災施設の被災のパターン

図7はよく皆さんに説明している津波防災施設の被災のパターンです。水位差によって堤体が滑動します。前面が大きくなる割には、後ろもそこそこ高くなりますから、津波の力は見た目ほど大きくならないことが特徴かと思います。また、水位差によって速い流れが起きて洗掘が起こったり、砕けた波がパラペットなどに衝突して壊したり、あるいは越流して背後を洗掘して倒すなど、いろいろなパターンが見られました。

1.4東日本大震災の教訓と今後の対策

このような非常に大きな災害がどうして起こったのか、あるいはそれから学ぶべき点は何か、今後の津波対策として何をしたらいいのか等について、中央防災会議、国交省、気象庁や消防庁、あるいは学会など、いろいろなレベルで検討されています。

それらの論議から、私としては次の四つが主要な論点ではないかと思います。一番目は、やはり想定外の津波であった、非常に大きい最大級の津波が来た、それを十分予想していなかったということです。2番目は、警報が十分正確ではなかったことです。そして、3番目は緊急の避難が十分できていなかったこと、それから4番目は津波に強い街ではなかったということです。

最初の想定外の津波については後でまとめてお話ししようと思いますので、2番目から4番目について簡単にお話しします。

地震後3分で津波警報が発令されることになっています。しかし最初の警報は、岩手県で3mの大津波というものでした。3mで

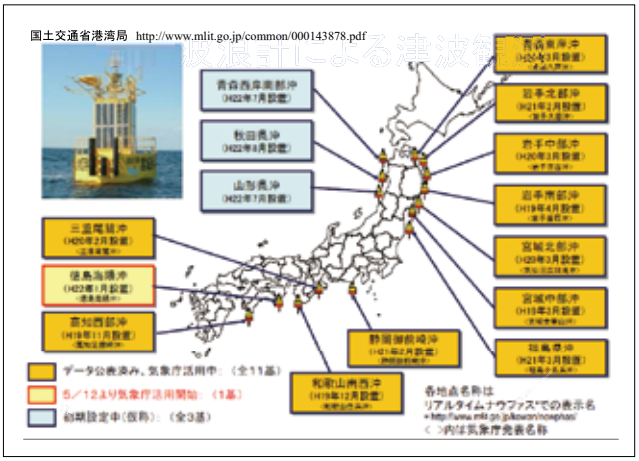

図8　GPS波浪計観測地点一覧

は大きな被害はないと考えて動かなかった人も多かったと聞いています。当然のことですが、より正確で分かりやすい津波警報が必要です。その一つの手段として、GPS波浪計などがもっと活用されるべきだと思います。それだけではなく、津波を見に行って亡くなった方がいます。消防署や警察の方も津波を見に行っていますので、そういうことをしなくても済むように、沿岸に波浪計やビデオ監視カメラなどを置く必要があると思います。また、今回はそれらが地震動や浸水、停電などでほとんど動かなくなったのですが、そういうことがないようにする必要があります。国土交通省では現在、初期設定中のものも含めて15機のGPS波浪計をセットしていますが、これをもう少し増やそうということになっています。それから、今は20km沖ですが、できれば50kmぐらいのところに置いて、もう少し早めに津波を観測するために技術的な課題を検討しています。

緊急避難の問題としては、避難所が遠いということがあります。先ほどの陸前高田では海岸から高台まで約2kmあるので、多くの人が1km以上移動しなければいけません。車で移動する人が結構いて渋滞し、途中で津波に巻き込まれています。私どもは道路で津波に遭遇することが一番危険だと言っていますが、そういう方が非常に多かったのではないかと思います。だから、身近な緊急避難所が必要だと思っています。

また、津波の場合は鉛直避難が必要です。現実は水平の避難で、遠くの避難所に行くことが多いのです。実は避難所は地震の避難所がほとんどなのです。地震の避難所は、地震が起こってから生活する場所ですから、避難生活所であって、緊急避難所ではありません。そこのところがあまり明確に分かれていなくて、どうしても遠くにあることが多いのです。せっかく校舎の高いところにいたのだけれど、避難しなければいけないということで下の体育館の方に移動するということも実際に起こっています。避難生活所と緊急避難所を分けていかなければいけないと思います。緊急避難所としては避難タワーや中高層のアパート、オフィスビルを使う必要があると思います。

津波に強い沿岸都市づくりとしては、高台に移ることが重要だと思います。ただし、それだけしか解決策がないかというと、そうではないと思います。高台避難は明治三陸津波当時からの考え方です。新しい時代には高層のビルなど、いろいろな新しい技術で、沿岸でも津波に強い都市づくりができるのではないかと思っています。

2. 最大級の高潮・高波・津波への対応 - 性能設計 -

ここでは、沿岸防災施設の性能設計体系の導入についてお話ししたいと思います。

これは高山先生らのご指導で港空研でずっとやってきている成果ですが、2003年の土木学会の各研修会や、インド洋大津波後の港湾技術交流会、ハリケーン・カトリーナの後には港湾談話室、あるいは国交省や沿岸センターの方々と一緒にやっている国際沿岸防災ワークショップなどでもお話ししている内容です。

2.1最大級の高潮・津波災害

1999年には18号台風が襲来しました。そのとき山口宇部空港が高潮と高波によって浸水しました。写真18は滑走路です。写真19は駐車場です。ここにあるのはボートではなく車です。このような被害が起きて、1週間程度、空港が閉鎖されています。

2004年には多くの台風被害がありました。覚えておられる方も多いと思いますが、その当時話題になったのが「台風の巨大化」で、これが今も使われているキーワードです。

2004年12月26日にはインド洋大津波がありました。M9.1で、10mクラスの津波がインド洋の各地を襲いました。そのとき、「M9.1クラスは日本では起きないのではないか」と思った人は多いのです。ただし、よく考えてみると、M9.0の地震はいろいろなところで起こっています。だから、日本でも起こりうると考えるべきだったと思います。

写真18　台風18号による高潮・高波災害（山口宇部空港滑走路）

写真19　台風18号による高潮・高波災害（山口宇部空港駐車場）

写真20　ロビンソン・クルーソー島

2005年8月29日にはハリケーン・カトリーナが来襲して、6mクラスの高潮と高波によってメキシコ湾岸に大きな被害が出ています。

平成22年2月にチリ地震津波がありました。写真20はロビンソン・クルーソー島ですが、10mクラスの津波によって跡形もなくなっています。今回見た現象と同じです。

設計を超える高潮や津波はあるのであって、最大級の高潮や津波を考えなければいけないのです。そして、そのとき具体的に何が起こるのかを予測することが重要だと思っています。

最大級の高潮や津波に対してハードとソフトによる対策をとるためにハリケーン・カトリーナの後に、アメリカの人たちはワーストケースシナリオを考えて準備をすべきであるといろいろな会議で言っておられました。ただ、そのワーストケースシナリオを考えたハード・ソフト対策を具体的に実行するには、新しい設計体系としての性能設計が必要です。私達は沿岸防災施設について性能設計を導入する必要があると言ってきました。

2.2防災施設の性能の設計

性能設計（Performance Design、Performance-based Design）とは、要求される必要な性能とこれに対する照査方法を明確に体系化した設計体系で、1960年代にヨーロッパから発信されて、1994年のノースリッジ地震を契機に具体的になってきています。性能設計とは何が起きるのかを具体的に示すとともに、それがどの程度の確率で、何年に一度起きるかを示す設計体系だと思っています。

特に重要なのは、「設計以上のものは来襲しない、だから施設は壊れません」ではなく、「設計を上回る台風も来る可能性がある、施設は破壊されることもあるのだ、だから破壊されたときに具体的に何が起こるかまで考えて、ハードとソフトによる対策をとる」ことが、性能設計として重要ではないかと思っています。

性能設計では、複数のレベルの外力に対して具体的な性能を示すことが求められているのですが、そこでは性能マトリックスの導入が非常に重要になってきます。

図9はその概念図で、縦軸は外力のレベルで横軸は要求性能です。レベルⅠ、レベルⅡ、レベルⅢとここでは三つ掲げていますが、

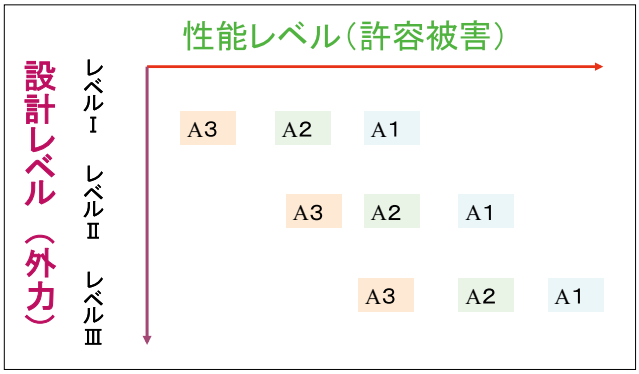

図9　性能マトリックス

レベル	重要度	背後地の条件
A１	通常の施設	比較的家屋の少ないところ，避難の比較的容易な地域
A２	重要な施設	家屋の密集したところ，あるいは高度な商業・工業用地，あるいは避難の比較的困難な地域
A３	非常に重要な施設	原子力施設等のように高い安全性を必要とする施設

表1　性能設計における重要度

レベル	再現期間	対応する潮位偏差と天文潮
Ⅰ	30～100年	比較的発生頻度の高いクラスの台風による潮位偏差と台風期の平均満潮位
Ⅱ	100～1000年	既往最大級の台風による潮位偏差と朔望平均満潮位
Ⅲ	1000～10000年	考えられる極限の台風による潮位偏差と朔望平均満潮位

表2　設計外力のレベル:例えば高潮位

それに応じて要求性能、この場合だと許容被害を決めていくわけです。このA1、A2、A3というのは重要度です。重要度に応じて、それぞれの外力レベルに応じて要求性能を決めていくのが、性能マトリックスを使った性能設計です。

表1は当時使っていた表なのですが、重要度としてA1、A2、A3を設定し、例えば、比較的家屋の少ないところや避難の比較的容易な地域はA1としています。例えば発電施設のように高い安全性を必要とする施設などは、A3という重要度を考えなければいけません。当時考えていた三つの設計レベルは、30～100年ぐらい、100年～1000年ぐらい、1000年～1万年ぐらいの津波や高潮を考えていました。ただ、今はもっとシンプルに、レベルⅠ、レベルⅡとして100年程度、あるいは1000年程度を考えようということになってきています。

性能設計はもう始まっていて、神戸震災の後、耐震設計に取り入れられているのは皆さんご承知のとおりです。二つの設計レベル、変形量による要求性能が具体的に設定されています。

海岸の分野でも、例えば混成堤直立部の期待滑動量、あるいは消波ブロックの被害率などに使われ始めています。これを防災施設の性能設計に使おうというわけですが、ご承知のように、実は性能設計の基準への導入はすでに始まっています。2004年6月の「海岸保全施設の技術上の基準」の中には「性能設計」という言葉が入っています。「港湾の施設の技術上の基準」にも入っています。性能設計の導入は図られて、仕様設計から性能設計へ移行しており、あるいは信頼性設計、確率論設計の導入が始まってます。ただ、私達が本当に残念だと思っているのは、複数の設計レベルを使うことは未採用であったことです。

2.3性能設計と説明責任

少し角度を変えてもう少し説明します。土木施設、特に防災施設では市民への説明が重要です。特に避難しなければいけないということになると、市民に分かってもらってないと、防災施設をつくっても全然意味がありません。だから、性能設計と説明責任は非常に重要な関係にあると何度も言ってきました。

それを一番感じたのは1999年の18号台風のときでした。現地を調査していて、ある漁師のおじさんに会いました。おじさんに「どこまで高潮が来たのですか」と聞いたら、「この辺までだ」と言い護岸の天端付近を示しました。堤防の上から見ていたのです。この人は「こんな高い階段を毎日行かなければいけなかったから、本当に不便で、こんな施設はなくてもいいのではないかと思っていた。でも、今回は助かった。」と言っていました。

その時は、私はこの人に防災施設の重要さを分かっていただいて良かった、助かって良かったと思ったのですが、帰ってきてよく考えてみると、違うかなと。この人はたまたま幸運なだけだったのです。もう少し高潮が大きかったら越流して死んでいたかもしれないのです。やはり危険性をきちんと知らせていく必要があるのではないかと思いました。ですから、事前に危険性（予測される災害）を把握して、それを伝えておくことが防災施設として本当に重要です。これは当然のことで、今まででもやっていると思うのですが、十分ではなかったと思います。設計体系を変えないと十分にはできないのではないかと思ったのです。

現在の設計技術は説明責任を果たしているか、その果たすという要請に応えられる体系になっているかという視点で見る必要があります。土木学会では「社会の合意形成のためにその必要性を具体的に説明するなど積極的な対話に努める」と倫理規定に書いています。アカウンタビリティが盛んに言われるようになって、「対話に努める」と書いてあります。ただ、何を説明するのか、具体的に説明するものがあるのか、何回かやることも重要かもしれないけれど、もっと具体的な説明が必要ではないかと思います。今私達が説明できるのは、「設計波に対して安全率は1.2です」「設計波に対して越波流量は＊0.02m3/sec/m＊になります」ということで、そうとしか言えないのです。もっと具体的な性能を示す必要がある、だから性能マトリックスによる性能設計が必要ではないかと思っています。

また、分かってもらうためには災害のシナリオの作成が重要だと思っています。施設の被害や浸水、人的・経済的被害を具体的に示すような災害のシナリオを作らなければいけません。そして、それをビジュアルなイメージとして伝える必要があって、被害シミュレーションの動画、ハザードマップというもので皆さんに伝えていく必要があるのではないかと思っています。私どもは性能設計を宣伝するときには、市民に分かる設計、市民に向かった設計であると言っています。

さらに、性能設計体系では、ハザードマップだけではなく、警報や避難勧告、避難指示などが一体として扱われなければいけないと思っています。

図10はそのまとめですが、性能設計体系を大きな枠で考えると、被害の予測はその一部で、ハザードマップはその成果の一つですから、この部分で説明責任を果たしていく必要があると思っています。性能設計体系を沿岸防災施設の技術基準に導入することが大切であると思います。

2.4性能設計と粘り強さ

次に性能設計と粘り強さについてお話をします。ハリケーン・カトリーナの調査に沿岸センターの人たちと一緒に行きました。そのときにニューオーリンズやガルフポートなどのメキシコ湾岸の街々を歩いて、二つのタイプの災害があることに気付きました。ニューオーリンズはハードによる防災で、あとの都市はほとんど何の防災施設もない、ただ避難を主にしたソフト防災でした。それを見て、ワーストケースを考える際には、粘り強さを考えなければいけないと思ったのです。

ハリケーン・カトリーナは、上陸時は918hPの室戸台風や、伊勢湾台風よりも大きいハリケーンで、ミシシッピ川のデルタと言

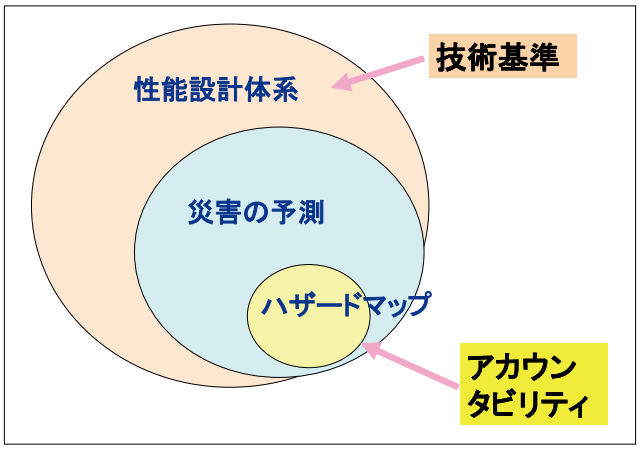

図10　性能設計体系とアカウンタビリティ

われる浅いところを中心に、非常に大きな高潮災害となりました。

図11は最大高潮偏差の分布ですが、この湾岸では6mを越すような高潮に高波も加わっています。ハリケーンのコースの左側がニューオーリンズで右側がガルフポートです。ニューオーリンズはポンチャートレイン湖からの高潮で被害を受けました。

図12の左はポンチャートレン湖の堤防、右はニューオーリンズの運河の堤防で、盛り土に矢板を打ち込んでコンクリート板をつけたカミソリ堤といわれる形でした。覚えておられる方も多いと思いますが、これが図13のように壊れて倒れた瞬間、水が全部一気に流れてこの辺に壊滅的な被害が起きました。もともとこの地区は堤防で守られていますから、なかなか避難する人がいませんでした。一気に壊れると、甚大な被害になるのです。

メキシコ湾岸もガルフポートなど多くの街で大きな被害がでています。200～300mくらいにわたって建物が破壊されましたが死者がほとんどいませんでした。それは、防災施設がなかったからです。ちょっとした高潮でも被害があり、避難は古くから行われていました。

図14はニューオーリンズとガルフポートの二つのタイプの災害から作成した図です。横軸は外力レベルで、縦軸が被害です。ニューオーリンズタイプはハード対策をしているので、想定レベルを超すぐらいまではそれほど被害が大きくならない、しかし堤防が決壊した途端、どんと被害が進んでいくという形になります。一方、ガルフポートなどメキシコ湾岸では何もハード施設がないですから、小さいハリケーンでも被害が出ます。

もちろんハード施設があれば、想定レベル（レベルⅠ）付近は大きく被害を低減しています。ニューオーリンズなどで問題になっているのは想定レベルを越えたところです。想定を大きく超えたワーストケースをレベルⅡとしていますが、レベルⅡのあたりは、被害が急に拡大しないようにすべきです。これが粘り強さです。構造物が粘り強ければ、レベルⅡ付近の被害を小さくすることができるのではないか、だから粘り強さは本当に大切ではないかと思います。

「粘り強さと避難」のハード・ソフト対策をとれば、全体として被害の軽減、減災が図れるのではないかと思います。防災施設のレベルⅠのあたりでの貢献は本当に大だと思うのですが、これからはレベルⅡの対応も大いに求められると思います。

2.5性能設計の導入

性能設計の導入についてお話しします。今回の経験から、今後の津波対策としては最悪のシナリオを考慮した対策をしようということで、性能設計という言葉自体はなかなか出てこないのですが、そういう形になりつつあります。レベルⅠ津波とレベルⅡ津波を考える必要があります。レベルⅠ津波は近代で最大（100年

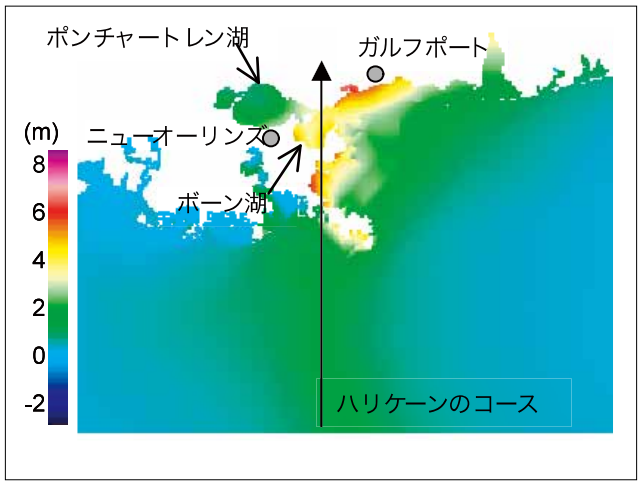

図11　最大高潮偏差の分布

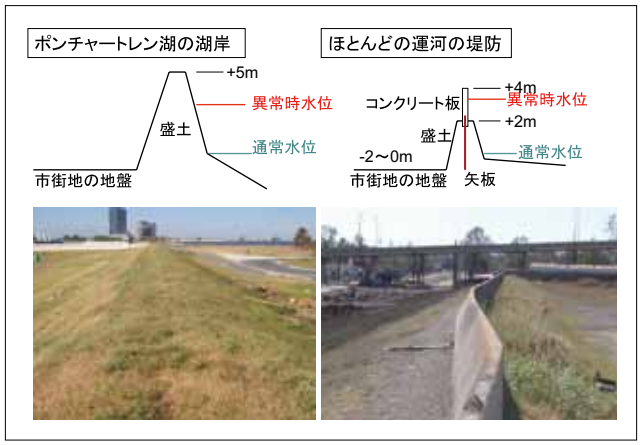

図12　ニューオリンズにおける堤防の特徴

図13　堤防の外観と断面

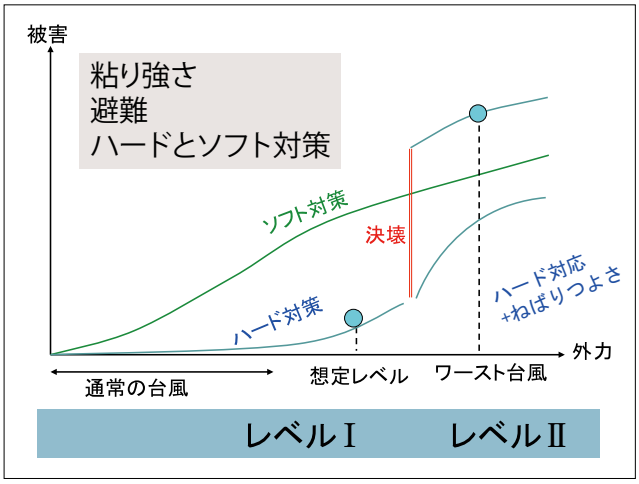

図14　外力レベルと災害の程度

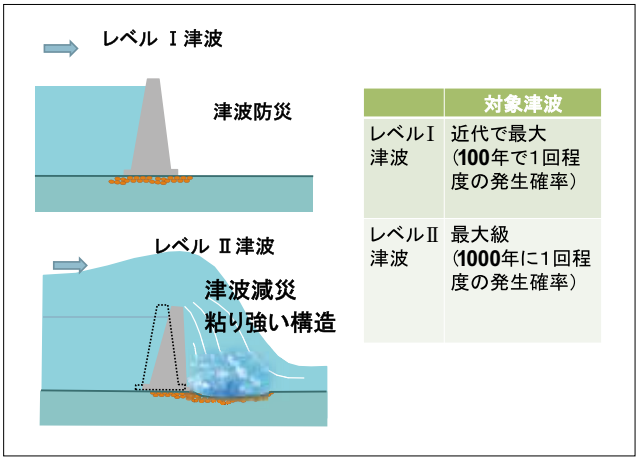

図15　レベルI津波とレベルII津波に対する津波防災施設

に1回）、レベルⅡは最大級（1000年に1回程度）です。要求性能としてはレベルⅠについては防災で、人命、財産、経済活動を守る、レベルⅡは減災で、大きな二次災害を起こさずに早期復旧を図れるようにしようと考えています。

そのとき防災施設は、レベルⅠに対しては高さも十分あって、原則としてきちんと津波を防ぐ必要があります。レベルⅡでは、津波は越流していきます。洗掘されてもなかなか壊れないようにすれば、粘り強い構造として機能は発揮すると期待されます。

今、そのレベルⅠ、レベルⅡ津波をどう決めるかが問題になっています。レベルⅠ津波は、これまでの想定津波がまず考えられます。レベルⅡ津波は、決めがたいというのが正直なところです。これまでの津波の2倍とか5割増しとか考えられますが、地震学の人たちがしっかりと見直してくれるまで待たなければいけません。ただ、三陸地方は今回の津波がレベルⅡ津波になるだろうと思います。

防災施設の復旧・復興では、できれば今回の津波に対応できるように改良しないといけないのですが、今のところ原型復旧が考えられています。できれば後で粘り強い構造に補強ができるような構造としてほしいと思っています。

粘り強い構造にすることはなかなか難しいのですが、今回の津波でも、残っているものもあります。それがなぜ残ったかを考えれば、粘り強い構造がおのずから見えてくると思っています。

私達は非常に反省しています。なぜレベルⅡを考えられなかったのか。少し前に考えていれば、だいぶ違ったのではないかと思っています。それは当然、私どもの認識が甘かった、努力が不足していたわけですが、あえて言わせていただくと、いろいろな抵抗がありました。

今の設計体系は既往最大を想定して設計します。既往最大は一番説得力があります。財務当局も説得できるし、住民に対しても説得できる。だから既往最大以上を考えることはありえないという人たちが結構多かったのです。

もう一つあったのは時期尚早論です。そんな粘り強い構造や、レベルⅡに対応することなど技術的にできるはずがない。理想論を言ってもらっても困るというのが大勢です。ただ、そうは言っても、仕様設計から性能設計へ変わるとか、信頼性設計の導入という方向には進んでいます。ただし、複数の外力レベルを導入するところまでは至っていません。

今、東日本大震災の後、追い風が吹いていて、導入の方向ではあるのですが、最初の1～2カ月に比べると、だんだん熱が冷めてきて、難しくなりつつあります。いろいろな地元の方や技術者と話すと、「やはり既往最大が一番いいのではないか。それで説得できるし、1000年に1回なんて説明しきれないよ」と言われます。

時期尚早という議論もあります。特に時期尚早と言われているのは粘り強さです。「粘り強さは難しいよ。どうやって定量的に表すのだ。そんなことできるはずがないじゃないか」「そんなことを言われても、もし粘り強くなかったら、後で責任をとらなければいけないのではないか」とも言われています。私達が言いたいのは、技術開発は土木技術者の基本的な社会的責任であり、責任を果たす覚悟が必要だということです。伊勢湾台風時代の技術者は本当に偉かったと思います。堤体の三面張りなど、既に粘り強さを考えていました。その当時から粘り強さについてはそんなに進んでいないのです。

それから、危険な沿岸域から撤退すればいいのではないかという議論もあります。とにかく避難すればいい、防災技術などあまり頼りにならない、とにかく避難すればいいという議論もあります。私達は、謙虚に反省しなければいけません。やはりできることとできないことを明確に言わなければいけないと思っています。また、フェイルセーフの考え方をとらなければいけないと思います。ただし、1896年の明治三陸津波の時代とは違って、リスクをしっかり管理する技術があると思っています。

他にもいろいろな議論があります。減災であっても財政的に無理だろうという意見がある一方で、住民からはレベルⅡに対しても防災にしてほしい、減災では困るという二つの意見があります。私達は重要度によって決める。住民がコストと効果を考えて決める必要があると答えています。重要度や住民の意思によって変えることができるのが性能設計であると言っています。

さらに、レベルⅡを上回るものもあるのではないか、最悪のシナリオを考えていたのだけれど、それを越すことが十分あるでは

ないかという議論もあります。これももっともな意見ですが、やはりレベルⅡを設定しない限り、何事も進みません。避難が重要だということを意識しつつ、レベルⅡの設定を行わざるを得ないのではないかと言っています。

なお、沿岸防災施設全体への性能設計の導入も考えなければなりません。地震について性能設計が導入されていますが、津波や高潮・高波に対しても導入する必要があります。大きな高潮災害の発生を非常に危惧しています。高潮については、図16のような検討もずいぶん前ですが、実施しています。

おわりに

私達は今回、研究所を挙げて調査しました。現地の方も含めて多くの人々がすごいエネルギーを使っています。もし被害の発生前にこのエネルギーを使っていれば、どれだけ効果があったことでしょうか。被害の発生前にどんな被害が出るか検討していくことが本当に重要だと思います。ハザードだけではなく、いわゆる脆弱性をきちんと理解して、その地区のリスクをきちんと管理するようにしておけば、もう少しいい結果になったのではないかと思っています。

私達はその基本ツールとして性能設計を推進したいとずっと思っています。ただし、それを推進するために必要なツールがまだまだ十分ではありません。数値計算も必要です。大規模波動地盤総合水路などを造ったのも、水理模型実験で性能評価ができるようにするためです。現物大であれば相似則の問題がないので、性能設計に不可欠な被害の程度が定量的に分かります。

私達だけではなく、企業の方も含めて、粘り強い構造の提案を技術者の人たちにしてほしいと思っています。そうした技術を推進するためにも性能設計体系の基準を整備する必要があります。私達の憲法である基準が変わらないと、なかなか変わらないと思っています。

図17はいつも使っている図です。海との共生は非常に重要です。今回、私達は本当に海の厳しさを知りましたが、海は豊かなところでもあります。やはり豊かな海との共存を図る必要があり、そのために私達の技術や知恵が生かされなければいけないと思っています。

以上です。どうもありがとうございました。

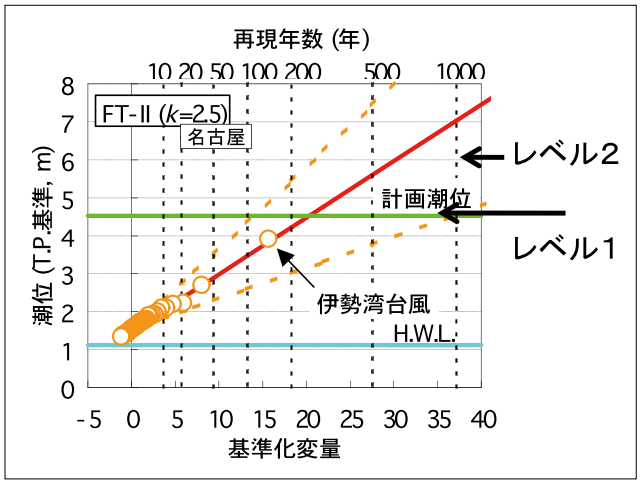

図16　潮位の出現確率分布の例

図17　海との共生

発行　財団法人 沿岸技術研究センター
〒102-0092　東京都千代田区隼町3-16　住友半蔵門ビル6F
TEL. 03-3234-5861　FAX. 03-3234-5877
URL http://www.cdit.or.jp/
2012年2月15日発行