

講演2；「防災へのシミュレーションの活用」

有川 太郎

中央大学 理工学部 都市環境学科 海岸・港湾研究室 教授

本原稿は、2018年7月12日に東京都港区においてアドバンスソフト主催で実施した「防災シミュレーション講演会－自然災害を科学する－」において、有川太郎教授にご講演いただいた内容を、アドバンスソフトが書き起こした内容です。また、章立てに関する情報もアドバンスソフトで付加したものです。

1. はじめに

有川と申します。よろしくお願いいたします。河川の被害もそうですけど「防護水準をどこにするのか」と「そのためにシミュレーションをどのように活用していくのか」というような話を30分ほどさせていただきます。



図1 有川教授ご講演風景（その1）

いますから、だいたい同じようなものがまたできたということになりますが、東日本大震災以降少なくとも海岸の分野では「防護をするのは厳しいのではないか」というような話が哲学になってきたというふうに感じます。

一方で沿岸の防護というものがどのように変遷してきたか。これは戦後からのお話でして、戦前の内務省時代からいろいろありますけれども、海岸法自体は戦後の復興の中でどういうふうにしていくのかということを決めてきたものです。その中で1956年に海岸法などが出てきました。当然その頃は既往最大の潮位に対して、あるいは既往最大の津波に対して、どのように守っていくのかというようなレベルで話をしていました。それが東日本大震災以降、話が変わってきて先ほどのリスクの話ではないですが、今まで想像はしてなかったけれども科学的根拠に基づいて「これが最大であろう」というような予測に対してどのように守るのかという話をしています。それは、ここ（海岸法）の後ろの2015年の水防法の改正でもそうになっています。水防法が改正されたのは2015年7月ですからおよそ3～4年前です。その頃にもやはり豪雨災害の高潮災害に対して「最大級を考えて避難計画を建てましょう」といっていたところに、今年度7月の災害が生じて、比較的大きな災害になってしまったというような感じですか。

死者数ということの観点からみると、津波・高潮での死者数というものは海岸法が設定されて

2. 防災水準について

世界の中でも最も大きな防波堤の1つである釜石の防波堤が、東日本大震災では少なくとも半分くらい流されました。この防波堤は計画から30年ほどかけて造立し、2010年くらいに完成した後2011年に流されてしまっています。水深60mくらいのところにあってコンクリートの大きさも30mですから、およそ10階建てのビルが入っているようなものだというふうに理解していただければと思います。30年ほどかけて作り、流されました。そして今ちょうど再建設が終わって

以来、急激に小さくなっています。海岸法が設定されると日本の四方の海岸の周りに堤防が建ちますから、堤防のおかげかどうか分かりませんが、少なくとも千名程度以上の死者が出るというようなことはほとんど起こり得なかったのです。この 50～60 年くらい起こっていなかったのが、2011 年の東日本大震災で(千名程度以上の死者が出るということが) 起こった、そういう(似たような) 意味で、豪雨災害によって 200 名程度の死者が出るだろうと予測されています。そうすると 22 世紀の少子高齢化といわれている中でのインフラ整備はどういった方向性になるのか。皆さんのご年齢をざっとみていると、経済も人口も右肩上がりのところに暮らしてこられた方ばかり・・・だとは思いませんけれども、そういった方々が多いのかなという感じがします。そうすると上に書いてある通り、江戸時代それから第二次世界大戦後、さまざまな景気を経ながら「より国土を強靱化していきましょう」「国土を強靱化する中でインフラも強くしていきましょう」というような時代であったというふうに理解しています。

インフラが整備されていくにつれ、河川でいえば治水・利水ということがきちんと進み安定した水が入り、経済が復興し今の状況になりました。一方で自然災害に対する意識がずいぶんと低下したのかなというように感じます。それに対して、われわれの世代より若い 10～20 代がどのようなインフラ整備をするべきなのか、それにシミュレーションがどう活用できるのかという話をさせていただきながらクロージたいと思います。各論的な話で恐縮ですが、人工構造物をいろいろやっているといろいろな複雑な構造物ができるようになります。これは堤防の話です。堤防というものは土からコンクリート、水、それからもちろん空気といったものが相混じり合って作られるわけですから、それらを計算しようとするとな当然そのさまざまな物理過程を表現できるような方法で計算しなければならないということになります。ただ、これは良いのか悪いのか分かりませんが私はずっと海岸工学をやってきましたし、土木

という地盤の先生方は地盤のことをやってきました。互いにそれらのところで横の交わりがほとんどなかったというような状況でやってきたから、海岸の人達は一生懸命に波の計算をして「波すごいでしょう」というし、地盤の人達は地盤の計算をして「地盤すごいでしょう」というような感じでしたので、これらを連成するというのはなかなか難しかったのかなと理解しています。

3. シミュレーションの活用

3.1. シミュレーションの手法

研究所に入ってからだいたい十数年間そんな状況の中で実験を行って、最終的には(海岸と地盤の) 連成をするためのシミュレーションができないかと考えながらやって参りました。最初は真ん中に書いてあるナビエ・ストークス方程式の 3 次元方程式を解きましょうというところだけだったのですが、シミュレーション方程式との連成、それから連成をした時の安定性、もう 1 つは安定性と並んで計算効率といったところをきちんと加味しながら実用性に耐えうるような計算手法の構築を頑張ってきました。というところで今日は少しそのお話をさせていただきます。当然、ここの中に粒子法ですとかいうところも入ろうかと思いますが、粒子法を使われている方は結構たくさんいらっしゃると思いますので、こちらでやってきたことを少し話させていただきます。だいたい 2000 年くらいから 2 次元コードを開発していました。2000 年頃に私の指導教官が「3 次元計算で波が砕けるところを真面目に計算するなんていうことはたぶんあり得ないでしょう」ということを強くいわれていました。しかし 10 年～20 年くらい経つと充分にそれが可能で、先生がいていたことは当たってなかったなと思いました。20 年くらい経つとすべてが連成され、かなり細かい計算もでき、さまざまな計算ができるようになりました。それらがどの程度精度が高いのかというところを少しずつお話させていただきます。まずはこの伝搬から遡上というところですよ。このやり方がいつまで効率的なのかということはかなり議論していますが、遡上のところについては平

面 2 次元ですから、波動方程式を使い行列計算もせずかなり効率的な計算をしています。最後のところはナビエ・ストークス方程式のようにかなり高効率な計算をします。それら 2 つでカップリングさせて、two-way 方向、双方向での連成を行います。この two-way 方向の連成、双方向の連成を行うというのは僕の知る限り 2 つか 3 つくらいしか論文がなくて、最低限これができるのはそんなに多くはないだろうなというふうに思います。おそらく波動方程式とナビエ・ストークス方程式の境界条件を数学的に正しく連成をするということがかなり難しいからだと認識しています。そうすると、ここの部分をどうやって上手くつなぐのかというところをテクニク的にやらないといけないので、なかなか安定して計算する方法が確立されていないのだと思います。こちらでも 3 回に 1 回くらいは発散するのですが、そのくらいの割合で計算できるようになったので、こういうようなものを公開しようかなと思ったわけです。

3.2. シミュレーションの規模

その状況の中でそれぞれのプログラムはそれぞれの CPU もしくはノードで行いながら計算の効率を高め計算を行うのですが、20 年後も同じような計算の方が効率的ですよといえるかどうかは、少なくとも 20 年前の私の指導教官の話を聞くとまあないかなというふうに思っています。ただ、今現在はこれくらいでないと少なくとも遡上域のところを 1m くらいの格子もしくは 10cm の格子なんかでは解けないだろうなというふうに思います。それがどの程度正しいかというところですが、女川あたりでの計算をみると、CPU の数は 50 個に満たないくらいの計算をしています。その中で 1 千万から 2 千万格子くらいを使いながら、津波の計算の場合およそ 1~2 時間程度の再現時間を要しています。約 2 時間の再現時間の中で、その 500 から 1000 倍程度ですので、だいたい 20 日から 30 日くらいの計算時間だと思っています。すると、伝搬と遡上というところを 2 つ同時に解けます。時系列的にどの程度合うのかを、実際にビデオで解析された

方と、この計算で合わせました。具体的には横軸が時間・縦軸が水位もしくは流速を比較しました。ここは水位だけを合わせています。黒いところは観測し、いろんな点がついている、黒以外の点のところはそのそれぞれの波源の違いということになります。それをみていると波源の違いの方が明らかに大きくて、波源さえきちんと合わせていけば、ほぼ一致するような計算結果が得られます。逆にいうと 3 次元計算でそれぞれの構造物にかかる力が丁寧に計算できるのではないかというふうに思います。これは 1m の格子で切っていますが、だいたい今の感覚では 50cm くらいまでだったらいけるだろうと思います。50cm の間隔で切ると 8 倍くらいですから、そうすると約 10 倍程度の格子の数ということになりますので、現実的には今の「京」なんかを使えば充分に対応できる数だというふうに思っています。

3.3. 津波と構造物との連成

一方で、その構造物との連成というところで、これはどちらかというと僕の感覚で「粒子法の方が得意かな」と思うのですが、この部分を直交格子の状況の中でいかにできるようにするかとこのところで、流体計算と FEM (有限要素法) による計算を行っています。

これで計算すると当然 FEM の計算の方と直交格子ということになりますので、それぞれの空隙率等々の取り扱いですとか、圧力の与え方ですとか、そういったところに少し工夫をしてあげなければなりません。シミュレーションの方が気になれるだろうと思う部分は上図の方で、いかにきちんと空隙つまり占有体積をきちんと求められるかというのが計算の安定性に実はかなり効いてきています。ここではすごく簡単に書いていますが、そこを工夫することによってロバスト性を高めているということです。また、空隙率が小さくなるようなところでは圧力がすごく大きくなりますから、そういったところを工夫したり計算のコストを高めたりということを行いながら、それぞれのところはどの程度の計算精度になるのかというところを検討しています。

3.4. シミュレーションと実験との比較

これは研究所時代に釜石の防波堤を 1/20 のスケールで実験しているものです。先ほどいいましたように 30m くらいですから高さは 1.5m ほど。それで左側から津波がきて右側に流れていくような状態を実験していて、ある程度の水位差が発生すると右から左側に流れていきます。これはコンクリートでできていますけれども、コンクリートの下にはたいてい石のマウンドと呼ばれているものがありますので、石とコンクリートの摩擦係数でほぼ決まってきます。ここにあるものが力によって摩擦係数そのもので流れていく、というただそれだけの計算なのですが、これがなかなかご理解いただけなかったのが東日本大震災だったのかなと思います。そこは置いておいたとして、こうした大きな実験をして「こういうふうに流されるのですよ」ということを計算したものです。台形で作っている下の方のところが地盤になっていて、その上がコンクリートになっています。その摩擦係数と、それから地盤の方は剛性と支持力を計算します。すると水位がある程度になれば当然、実験と同じように流れる、これがどの程度実験と数値計算が合うのかというところをみると、実験と数値計算がおおよそ合ってきます。少し地盤の方に強い人だと、この台形のところの地盤の支持力、いわゆる、この「ここが壊れるのではないか」というような意見もありますので、こここのところを DEM か何かに置き換えて壊れる場合の計算も既にできるようになっているというような形です。こうなると数値計算で何でもできるのではないかと思うのですが、研究所にいる時は実験で予算をとっていかないといけませんから、やはり「そうはいうものの大きい実験でないとできないのですよ」とかなり強くアピールするのですが、大学にいくとそういうことを気にしなくてもよくなってきます。計算で全部できるのではないかみたいなことをいってしまいます。だいぶ細かいところまでいくともしかしたら難しいかも知れませんが、おおよそのことは計算できるのではないかと個人的には思っています。それで、また 1 つ難しいのは地盤の中の浸透流で

す。浸透流で難しいのは「抗力係数をちゃんと与えられるかどうか？」というところ、抗力係数をちゃんと与えるようなことをいくつかの実験で検討し、最終的に実験と計算で比較する、地盤の中の流れが大きくなると、地盤の支持力というのが弱くなります。そうすると、この板や壁が倒れやすくなるためきちんと表現しないといけません。それで中の水圧みたいなものを調べると、きちんと合いますよということになります。

3.5. シミュレーションでできること

最終的に 5 つくらいのプログラムをきちんと連成して、どこまで計算できるのだろうかということになりました。波源からの伝搬・変形・構造物の連成というところの 5 つくらいのプログラムを重ねて計算しています。これも CPU 的には、だいたい 200 程度の CPU を使っています。この計算くらいだとやっぱりだいぶかかっていたから 40 日くらいですかね。ただ 40 日間僕としては、ぼーっとしているだけだし、専攻 4 年生の学生はボタンをポンポンポンポン押すだけなので、僕は待っているだけなのですが「計算が止まりました」といわれるとかなり愕然とするというような計算になります。その中で防波堤のデータをいただきながら、マウンド・石の部分・コンクリートの部分を作って空いているところは何というところを作りながら形状を模します。最終的に、本当は波源からやりたかったのですが、波源のところの少し手前（岸側）から波源を与えてあげて計算するというを行います。そうしてあげると、これだけ大きいと（計算できる部分が）すごく小さくなっているのですが、すごく小さいところで構造物との連成計算をずっと一生懸命やっているというような状態です。最終的に先ほどみていただいた通り、浸水被害の「水位差がついてくると流されてしまう」というようなことが実際に計算できます。当然（水位差によって）流れるとそこから水が増えていって、流されることによる影響というものが出るであろうということになります。

3.6. シミュレーションの次の課題

このくらいの計算であればもうだいたいできます。防波堤というのは僕の感覚では一番簡単な構造体ですが、それぞれの地盤が重なったところが徐々にできていくのではないかと思います。これ（資料 32p 上段※）は、左側のところがナローマルチビームで撮った釜石の北防波堤の流されていく様子です。それぞれ四角く小さく書いていますが、それぞれ 50m くらいあるようなものだと思っていただければと思います。この右側のところが計算の様子で歯抜けのところもよく似ているなと思ったのですが、なぜ歯抜けになったのかはちょっとよく分かりません。実際にも歯抜けになっていましたから、何かしらの水位の微妙な差によって歯抜けになったのではないかなと思います。この歯抜けになったところは実は私が研究所にいた時はかなり議論になっていて「そもそも歯抜けになっていた理由が説明できないのであれば財務省はお金を出さない」というくらいの勢いでいわれたくらいでしたので、何とか理由を付けて一生懸命頑張ったのが当時の思い出です。それで未だに僕としてはそれがずっと尾を引いていて、なぜ歯抜けになったのかということは何とかして証明したいという思いでやっています。

それで、洗堀がまだほとんど計算できていない。ただ洗堀で DEF なんかの計算を入れていくとさらに時間がかかりますので、ここのところは全部、構造体の漂砂のところに入れて、実際に漂砂があると構造物の変形にも影響するということを経験できるようにしておく。今度 7 月くらいのアメリカの学会で発表するのですが、漂砂の影響を入れて釜石のところは最終的にそういうふう（計算通りに）砂が抜けているかというような発表をさせていただこうかと思っています。ただ、今ここではお見せできないのはまだアニメーションができていないからです。これくらいのところができるようになっていて後はやるだけ、とはいえ粒子法でもやっているのですが、計算時間と全体の粒子を小さくすること・どうつなぐかとい

うところが一番のネックです。例えば、先ほどのような構造格子と粒子体の粒子法のところをいかにつなぐのかという研究をずっとやっています。それができ上がれば、粒子法の知見を使いながら、その連成問題をやるということになります。現在は、河川の山からの雨量等の計算をこの状況の中でやっています。

4. 避難に対する取り組み

残り 10 分くらいで避難に対する取り組みについてお話しします。僕が問題意識を持っているのはこちら（避難に対する取り組み）です。そもそも避難に対してシミュレーションをすることはできます。流体計算とマルチエージェントというものを用いて避難の計算をやっています。これ（資料 37p 上段※）はチリ国の、とある北の方の街の避難状況です。左側に黒い人達がいる避難しています。そもそも、このプロジェクトをやる前この地域に避難経路はなかった、ここに避難経路がないと右側からだと詰まってしまうので避難経路を入れようというシミュレーションを行って計画を立てました。これをみると確かにシミュレーションが役に立っていると感じます。一方、可視化というものについて、人を配置して、建物の写真を貼り付けて、最終的な避難方法を可視化することができるので、10 分後に開始したら、20 分後に開始したらこうなりますよというようなツールもできなくはないのかなというふうに思います。ただ、ここから先が僕の問題意識です。ここは高知県の中土佐町というところで、中土佐の方々に避難訓練のときにこの映像をみてもらいながら「やはり 10 分ぐらいで避難してもらえないと困りますね」というような意識を高めるために役場の方々と一緒にシミュレーションをやったのですが、これで本当に意識が高まるのかというところは、ちょっとよく分からないなというところです。

私立大学のブランディング予算というものがあって中央大学もその予算を獲得したので一応紹介をさせていただきます。中央大学では河川も

海岸の先生もいらっしゃいますので、河川・海岸の先生方の中から、データベースを作りながら避難シミュレーションをしましょうと。避難に必要な人に使えるような誘導システムを作りましょうというようなことをやっています。その状況の中で先ほどの港湾研のときにやっていたことを、港湾研と一緒にこのようなツールを作りました。このツールは学部で4年生くらいでも充分使えるようなツールで、これを公開することによって皆さんにこのようなツールを簡単に使えるようにしていただけたらというような思いで今やっています。それで、この予算の中でこういう水槽を作りまして、波とか流れとかを体験していただくというようなことを作りながら、教育と研究と国際展開というところを意識しながら研究しているというのが、ブランディング予算の目的となります。こういうことをやりながらシナリオバンクに基づいて避難誘導の仕組みを作って、それをどういうふうに皆さんにお伝えしようかというところになっております。

5. 避難意識とインフラ整備

最後の5分程度ですが、その中で避難意識とインフラ整備のあり方についてお話しします。このへんがもしかしたら今日僕が一番いたかったことなのかもしれません。旧谷中村、ご存知の方がいらっしゃるかどうかは分かりませんが、栃木県の南部・茨城県の渡良瀬川のところに谷中村（現在は栃木県栃木市）というところがあって、そこはカスリーン台風で浸水被害があった場所です。もしかしたらここの中にご経験された方はいらっしゃらないかと思うのですけれども、カスリーン台風は相当被害が出て河水側が大きな被害を受けたところです。谷中村の方々は15年くらい前まで「2年分備蓄をしておきましょう」とか「雨が比較的ひどかったら近くの水塚に避難しましょう」ということを生活の知恵として意識していました。水塚というのは避難所みたいな場所で、雨がひどくなったら警報がなくてもそこに避難したのですよというようなことです。ただ、谷中村の人達もいっていましたが当然それらを

維持できないし、70年前ですから、ここに住んでいる方々のほとんどがそもそもとして洪水が起るということをご理解していません。ですので、ここに書いてある通りに避難するということもできないのではないかなということをおっしゃいます。この説明をしていただいた方は72歳の方と80歳くらいの方でしたので、この方々がお亡くなりになったらこういうことを伝える人もいなくなるのかなというような形でいわれていました。先ほどの山口先生の話でもないのですが、基本的には文明依存すれば災害意識が低下します。適応力というものは基本的に低下していきます。

寺田寅彦という方が『天災と国防』という書籍の中でこのようなことをいっています。「災害は忘れた頃にやってくる」本当にいったかどうかは分かりませんが、こういうことをいっている方がいらっしゃいました。その中で、どういう整備がいいのかなということを考えないといけないというふうに思っています。過去、東大から出て新潟大に行った大熊孝先生という方が「原則的に災害というものは制圧をするものである」というふうなことをおっしゃっていました。のちに「水害の制圧から受容へ」といっています。この発言をされた当時45歳で今70歳くらいの方です。僕は今でもこの考え方は合っていると思います。

海岸堤防も既往最大潮位で100年守るといっていますけれど、実際問題として70年ではほぼ忘れてしまうといっているところに本当に100年でいいのだろうかというところは気になる部分です。

もう1つは「合理的選択」というところで、そもそも感情というものは進化の表れであるということをおっしゃっています。「親族に近い人が犠牲になり関係者が訴訟を起こし、行政が、災害が生じないようにするという努力をしてきた」というのは、経済発展も相まってできる経済的な余裕があり、同じことを繰り返さないようにするぞというところがインフラの整備かなと思います。その中で土木というところは進化を遂げてきたのかなというふうに思っています。一方で、教育を施したり、虎のいないところに住むな

どしたりというようなことができればそれはそれで別の進化ではないのかなと考えている次第です。ただ、これは本当に強くいすぎると国家予算の問題にもなってくるので、なかなか難しいところではあります。ただ僕としては何度も申し上げている通り、今まで多くの方が（防災のインフラを）築いてきたということについては非常に感謝したいところです。非常に感謝したいのですけれども本当にこのままでいいのでしょうかというところをどうやってお伝えしながら、その次の進化を遂げていくかを考えないとならないのです。

昔は簡単なシミュレーションしかできなかったのが、今は木々の変化、またその状況までシミュレーションできるようになっていると理解しています。グリーンインフラということもいわれていますが、あのへんのところが難しかった最も大きな理由は、やはり維持管理コストがかかるということと定期的な品質保証ができないというところでしたので、今後シミュレーションしながら品質の次の進化ということができないのかというふうに考えています。

それでその中で、この適度な災害が生じるような国、これはチリとかということ意識しているのですが、ここのところでは実は適切な避難がなされています。これは、例えば彼らとしては揺れが入ったら 10 分以内に避難するというのがすごく適切にできるようになっているので、その自然に対して堤防に頼らないでも人間の適応能力というものが上がっているなというふうに感じます。従って、自然災害というものを受容するというような考え方の中で、適応能力を高められないかなというのが、次なのではないかなというふうに思っています。

6. さいごに

これは僕の専門ではないのですが、先ほどのリスク管理の中で、日本と安全管理の中で、英国の安全保障がいつているところは最後の部分で「どこの中まで受容するのか」また「広く受容される



図 2 有川教授ご講演風景（その 2）

領域というところはどこなのか」というところが重要なのかなというふうに考えられます。

そういう中で、この個人と地域と国の便益バランスをどういうふうにとっていくのか、当然、国民の税金で作られている堤防ですから国益に資するべきです。ところが国益に資するということは地域の人たち、それから住んでいる人たちの便益に本当につながるかということそれはそれで疑問です。どのへんの水準にするといいのかというようにところまでシミュレーションを活用できるといいのではないかなというふうに考えている次第です。長くなりましたが、発表は終わりたいと思います。ありがとうございました。

※ 当原稿は、有川太郎教授のご講演をもとに、アドバンスソフトが構成したものです。写真は、ご講演当日の写真です。

※ スライド資料をアドバンスソフトの HP シミュレーション図書館に公開しております。本稿とスライドは、ひとつの段落がひとつのスライドに対応しておりますので、ダウンロードの上、本稿をみていただければより詳細な情報となります。

http://www.advancesoft.jp/support/download/28simlib_seminar_20180712_all.html