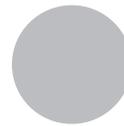


3.11津波談義—津波は防げない?!



工学博士 **西尾 宣明**
元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

はびこる「プレート跳ね返り説」

与太郎 今度の、東日本大震災を引き起こした津波は映像を見れば見るほどますます恐ろしくなりますね。大家さん。津波って防ぐ方法がないんですか？

大家 今度のような大津波の威力を見ると、そもそも防ぎようがないんだという気がしてきますね。

防波堤をずっと沖の、深い海のところに作れば、もしかしたら津波を撃退できるかもしれないけれども、それには膨大な費用が必要になるからね。

与太郎 でも、今度のような大きな地震は千年に一度だって言うじゃないですか。今から始めて100年とか200年の間に造れば、次の大地震が来るまでに何とかなるんじゃないですか？

大家 なるほど。長期分割払いっていうことですね。いいかも知れませんね。

その防波堤の上に風車を並べれば、立派な風力発電所にもなるし……。

潮の流れの状況次第では潮力発電所なんかもいいですね。

与太郎 大家さん。それで行きましょうよ。ね！

大家 私だけがそう言っても、みんなが賛同してくれないと駄目ですね。こういう意見を政治家に伝える方法も知らないし。

その前に、地震がなぜ起きるかをまともに知らない専門家が多いのも問題ですね。

与太郎 例の「プレート跳ね返り説」ですか？

大家 そうです。津波の場合もみんな「プレート跳ね返り説」で考えていますからね。

縮めば伸びる—ポアソン比

与太郎 大家さんの考えはプレートにかかる圧縮応力で地震が起きるってということだけ？

大家 そうですね。そのように考えれば、津波がどのようにして起きるか、なぜ地盤は沈下するのかなどもきちんと説明できますからね。

与太郎 へえー。地盤沈下も説明できるんですか。どんなからくりなのか知りたいですね。

大家 からくりと来ましたね。そのからくりの基本は、物は圧縮応力を受けると縮むということです。そのことはこの間も説明しましたね (No-Dig Today 76号)。

与太郎 聞きましたとも。約1,000分の1縮むと断層が沁って地震になるってということでしょうか？

大家 よく覚えてくれましたね。実は岩石でも何でも、大抵の物は縮むと横の方に膨らみます。逆に引張られて伸びた時は横方向には縮みます。縦方向に1だけ縮んだ時に横方向に膨らむ割合をポアソン比と言

いますが、岩石では大体0.26から0.27と言ったところ
です（図-1を参照）。

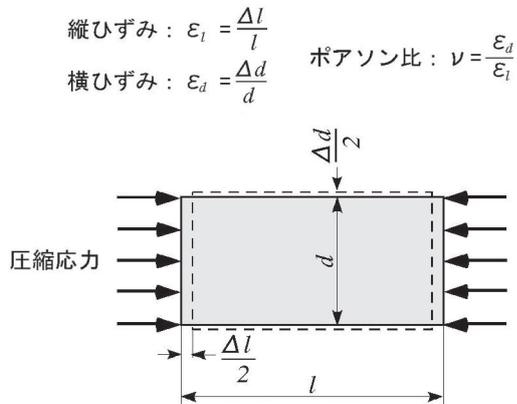


図-1 圧縮応力によりプレートは横方向にふくらむ(ポアソン比)

かりに厚さ10キロメートルの岩盤が縦方向に1,000分の1の圧縮ひずみを受ければ、横方向、つまり厚さ方向の膨らみは約1,000分の0.26と言うことで、これに10キロメートルを掛ければ膨らみの大きさは約2.6メートルということになります。

そこで地震が起きて、1,000分の1の圧縮ひずみが全部解放されたとすれば、横方向のひずみも元に戻って、地盤は2.6メートルほど沈下することになります。
与太郎 へえー。そんなに沈下するんですか。そうすると海面の方が高くなるから、それが陸のほうに押し寄せて津波になるってことですか？

最初に引き波が来やすいのは

大家 いやいや。海の部分のプレートも同じように沈下するから、それで津波が押し寄せるといってはありません。

ただ、実際にはプレートの圧縮ひずみは海から陸まで一様ではありませんし、地震で解放されるひずみの大きさも一様ではありません。

解放される圧縮ひずみは震源に近いほど大きくなるという話を前にしましたね（No-Dig Today 76号）。解放されるひずみが大きいほど地盤沈下も大きくなりますから、陸地に比べて、海の底の方が大きく沈下することが多いでしょうね。いつでもそうとは限りませんが。

与太郎 そうすると、海の水も一緒に沈むんですね。

大家 そうです。海面が下がって、いわゆる「引き波」の状態になるでしょうね。この間の地震では大船渡や釜石で地震の直後に引き波があったと記録されています。引き波の高さは10センチとか20センチ程度ですがね。

与太郎 本物の津波はその引き波の「返し」って奴ですか？

大家 いや、そうではないと思いますね。震源断層の先端、日本海溝の近くでは大陸のプレートが太平洋プレートの上に乗上げる形になります（図-2を参照）。

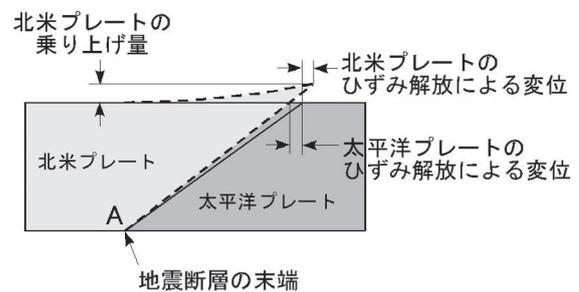


図-2 プレートの縦ひずみの解放により北米プレートは乗り上げる

とくに、地震断層の先端では二つのプレートは互いに動かせませんから、上側のプレートは下側のプレートに押されて上にかかるしかありませんね。そこではポアソン比による沈下を上回る海底の上昇がかなり広い範囲で起きると思います。それが大きな津波の元になると思います。

日本海溝は陸地から約200キロメートル。大陸棚の海の深さが平均2キロ程度とすれば、津波の速さは時速約360キロ。大体30分ちょっとで三陸海岸に着くと計算されますが、実際の記録とまさにぴったり合っています。

与太郎 そうなんだ。引き波だの津波だの、「プレート跳ね返し説」ではそこまできちんと説明できないですね。

大家 そういうことですね。

元に戻らない地盤沈下

与太郎 大家さん。そう言えば石巻だったかどこだったかでは1メートル以上も地盤沈下して、満潮の時は道路が水を冠って、子供じゃあ歩けないぐらいだって言うじゃないですか。

あれは液状化して沈下したのとは違うんでしょう？
テレビでは液状化っていう話は全然してないですよ。

大家 あれは液状化のせいではないと思います。

岩手県から宮城県，それに福島県の相馬港辺りまで，国土地理院が水準点や三角点で水準測量をした結果は軒並みかなりの地盤沈下になっています。相馬港など沈下の少ない所でも約30センチ，他はほとんどが50センチから80センチ，牡鹿半島などは1.2メートルも沈下していますね。

与太郎 この沈下はもうどうしようもないんですか？

大家 地盤の圧縮ひずみが解放されたことの影響ですから，また圧縮ひずみが溜るまで，自然には元に戻らないでしょうね。戻るまでに100年かかるか200年かかるか，あるいは1,000年かかるのか分かりませんがね。なにしろ1,000年に一度とも言われる地震ですからね。

与太郎 そうなのか。

ところで，さっき大家さんは1,000分の1のひずみが全部解放されると2点何メートル沈下するって言いましたよね。あれと水準測量の違いはどうしてなんですか？

大家 さっきは厚さ10キロメートルの岩盤が一様に1,000分の1のひずみを受けていたらという一つの例で，実際の話ではありません。

この間石巻市と鶴岡市を結ぶ線に沿う地盤の変位の話をしましたね（No-Dig Today 76号）。与太郎さんもテレビで見たかと思いますが，GPSで測った陸地の移動量が発表されています。

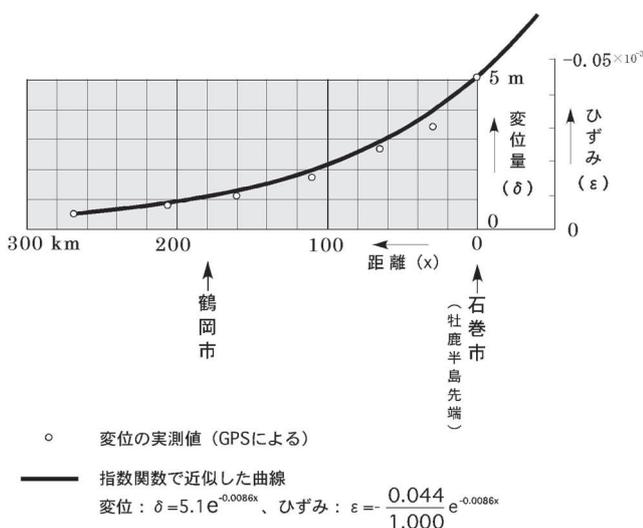


図-3 石巻市—鶴岡市ラインに沿う地盤の変位およびひずみ分布図

そのときの変位の分布を次の図に点で描きました。その点の並びを図のように指数関数という曲線で近似して見ました。大体良く合っているでしょう？

この間描いた地盤変位の図はこの曲線を頭に置いて描いたものです。

なぜそうしたかと言うと，変位を距離xで微分するとひずみが得られるんですが，そのひずみをグラフに描くと，変位と全く同じ形の指数関数になるんです。ただ，グラフの目盛りが変わるだけなんです。

図-3のようにね。

与太郎 GPSで測ったやつって，テレビで放送されたのでしょうか？

あのとき大学の先生が，東北地方の地盤は引きのばされたとか何とか言っていましたね。

大家 そう。あのときのもので。あれを見て，地盤には引張り応力が生じて正断層の地震が起きた，などと——確か京都大学の先生でしたね。

あの図を素直に見れば，確かに地盤は引きのばされたことになります。

しかし，引き伸ばされた原因をどう説明するかです。

与太郎 それはプレートが沈んだからじゃないんですか？

大家 じゃあ，プレートを沈らせた原因は何でしょうね。まさか，神様が引っ張ったからなんて言うんじゃないでしょうね。

与太郎 そういうことか。やっぱり圧縮応力が解放されたからなんだ。

それで，このひずみのグラフからどれだけ地盤沈下するか分かるんですか？

大家 これからすぐ分かるわけではありません。このグラフは水平方向の圧縮応力がどれだけ解放されたかを示しています。

これにポアソン比の0.26などを掛けると上下方向の解放ひずみに換算できます。

たとえば，石巻市では約0.7メートル沈下しましたが，ここはこの図では大体x=25キロメートルです。ここでは解放された圧縮ひずみが約1,000分の0.035ということがグラフから分かります。これに0.26を掛けると解放された横ひずみは1,000分の0.0091ということになります。

これで沈下量0.7メートルを割ると，このひずみが解放されたプレートの範囲の概略の大きさを知ること

ができます。計算結果は約77キロメートルです。

与太郎 ふーん。まだピンと来ないけど、それって大家さんの計算が実際と合っているってことですか？

大家 ぴったりということではないでしょうが、考え方としてはとてもよく合っていると思います。

こないだのプレートの押し合いの図をもう一度見て下さい。

Aと書いた地震断層の先端の深さがちょうど75キロぐらいです。二つのプレートはそれより浅い所だけでずれているわけです。

与太郎 その75キロの範囲で応力が解放されてるってことですか？

大家 そうです。よく分かってくれましたね。

与太郎 ところで、今まで全部地盤が沈下する話だけですよね。——て言うことは津波は引き波しかないって言うことになりませんか？

大家 確かに、ひずみの解放だけを考えれば地盤は沈下するだけです。

とくに日本海溝に近い震源の付近では太平洋プレートのひずみの解放も加わって、ほとんど100%近く圧縮ひずみは解放されるでしょうね。

かりに、プレートの深さ75キロの範囲で1,000分の1の圧縮ひずみが解放されたとすると、地盤の沈下は約20メートルになります。これは太平洋プレートも同じひずみを受けていたとしての話ですがね。

与太郎 へえー。ずいぶん沈むもんですね。それよりも大きく海底が盛り上がりないと「押し」の津波にはならないんでしょう？

大家 そうですね。さっきの図-2に描いたように、北米プレートと太平洋プレートが重なり合っていて、応力解放による変位はお互いに反対方向ですね。だから北米プレートは太平洋プレートの上に乗上げるしありません。

両方のプレートが50メートルずつ動くとしたら、合計100メートルのずれが起きることになります。

プレート境界近くでのプレートのずれの角度を10度から15度としたら北米プレートの乗り上げ量は約19メートルから27メートルと計算されます。平均して約23メートルということですね。

これから地盤沈下の20メートルを差し引けば、約3メートル海底は盛り上がることになります。

与太郎 この盛り上がりの幅っていうのはどのぐらい

になるんですか？

大家 きちんと計算したわけではありませんが、今度の地震では50キロから100キロメートルぐらいにはなっていたんじゃないですかね。そうして、その範囲での平均盛り上がり量は約1メートルということになるでしょう。海面の盛り上がりもほとんど海底と同じことになります。

ここでは海底の盛り上がりプラスになった範囲を50キロメートルと仮定すれば、これによる水面の盛り上がりの半分、約25キロ幅の分は陸地に向かい、もう半分は太平洋の沖の方に向かって遥々南北アメリカへの旅に出るわけです。

与太郎 そうということなのか。

それにしても大家さんの考え方——モ、モ、……モデルっていうんですか？圧縮ひずみモデルっていうのかな。それって凄いですね。

実際に起きてることが全部説明できちゃうんだから。

大家 与太郎さんにそう言って貰えると最高に嬉しいです。チョー嬉しいっていうのかな？ハッハッハ。

幅1キロメートル当り東京ドーム20個分？

与太郎 津波の原因も「プレート跳ね返し説」なんかじゃなくて、プレート同士が押し合って圧縮ひずみを受けてたのが、断層——地震断層っていうんですか？——それができてひずみが解放されるのが原因だということもわたしにも分かったような気がするけど、その津波が防げないっていうのはなぜなんですか？

大家 その前に、津波がどのぐらいの水量を運ぶものかを見ておきましょうね。

ここでは海底が50キロメートルぐらいの範囲で1メートルばかり盛り上がると仮定します。海面の盛り上がりもほとんど同じことです。

与太郎 そうすると、その半分の25キロの分が陸の方に押し寄せるってことですね。

大家 そうということですよ。

そうすると岸の幅1メートルあたりに押し寄せる水の体積は25×1,000×1×1イコール2万5千立方メートルということになります。

与太郎 もし千メートル幅だったら全部で2千5百万立方メートルか。これって東京ドームに換算すると何個分ぐらいになるんですか？

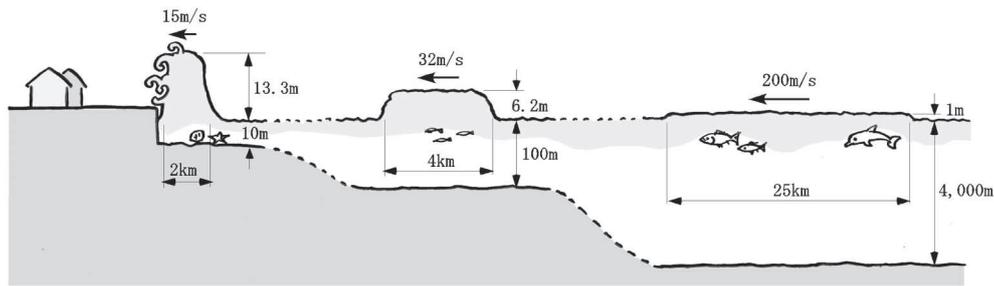


図-4 深さの変化に伴う津波の速さ、高さ等の変化（概念図）
（縦横の縮尺は全く實際を無視しています）

大家 東京ドームが約124万立方メートルだから、約20個分ですね。

与太郎 うわー!! 凄いや。これじゃあ狭い港なんかはひと溜まりもないわけだ。

大家 しかも、陸地に近づいて波は遅くなりますが、単位時間に運ばれて来る水の量は変わりませんから、波の高さはぐんぐん大きくなります。

計算はちょっと複雑なので、結果だけを見てもらいますが、図-4のようになります。

狭い湾などに入った場合は、狭くなった分だけ更に津波は高くなります。

与太郎 ふうーん。最初は1メートルの波が海岸に近づいただけでずいぶん高い波になるんですね。

それで、この波を防ぐ方法って何かないんですかね。

津波を防ぐには

大家 幅1メートル当り2万5千立方メートルもの水を防波堤でせき止めるというのは至難の業です。

たとえば先の図の深さ100メートルの所に防波堤を作るとしますね。津波の高さが図のように約6メートルとして、防波堤の高さも海面から6メートルの高さがあれば津波が防げるとしたら大間違いです。防波堤にはお構いなく2万5千立方メートルの水は止まることなく押し寄せますから、6メートルや10メートルの高さでは簡単に乗り越えて堤防の内側に流れ込みます。

与太郎 ふうーん。そうなのか。

大家 最近、テレビに津波の専門家という人が出ていて、釜石の大防波堤——釜石湾を塞ぐように造った最大深さ約60メートル、長さ約1キロメートルの堤防ですが——これは津波で大きく壊れてしまったけれど

も、津波の勢いを殺すのにはかなり役に立ったという話をしていました。

実際、堤防に沿う海の深さを平均40メートルとすれば、そこにやって来る津波の速さは秒速20メートルを下りません。そのままの勢いで釜石湾の中に進んで行ったら、被害はずっと厳しいものになります。

与太郎 でも、堤防は壊れてしまったんでしょう？

大家 そうです。しかし、堤防を壊すために津波のエネルギーはかなり消耗したと思います。

与太郎 でも、結局津波は湾の奥の方まで入って行って、家などを流してしまったんでしょう？

大家 与太郎さん、良い所を突いてますね。実際にはそここのところが問題なんです。

もし堤防が全然壊れなくて、いっぺん津波はそこで止まったとしますね。しかし、後ろからは幅1メートルあたり2万5千立方メートルの水が次々に追いかけて来ているわけです。釜石湾の間口が約2.7キロメートルですから、東京ドーム54杯分の水です。

堤防で止まった水は後ろから押されるから、堤防を越えて湾の中に流れ込まざるを得ません。もっとも、堤防が10メートルぐらいの高さしかない場合ですがね。

東京ドーム54杯分の水が全部流れ込んだとすれば、釜石湾と今度浸水した陸地を合わせた面積を13平方キロメートルとして、湾内の水位は約5メートル上昇することになります。

与太郎 やっぱ結構高くなるんですね。

大家 もしも堤防がなくて津波がそのままの勢いで湾に入ってきたら、岸壁には10メートル以上の波がもろに押し寄せたと思いますよ。

その意味では、壊れたとは言っても堤防の効果はある程度あったと言えるんでしょうね。水量は変わらない

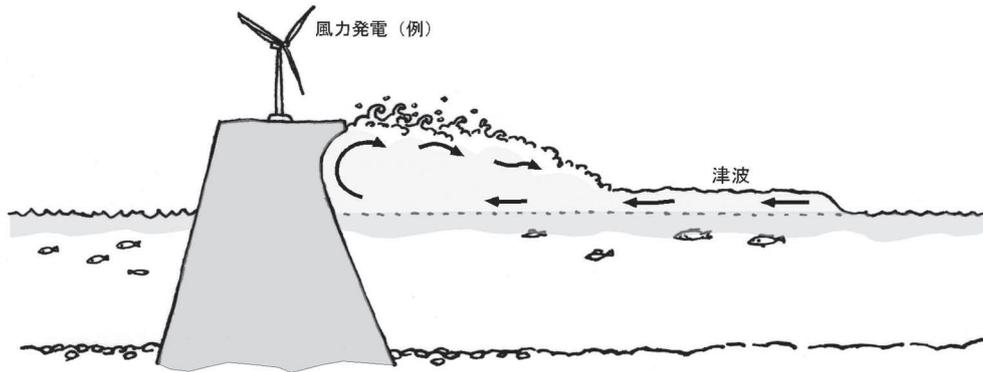


図-5 津波を跳ね返す—こんな防波堤なら

いけれども勢いはかなり弱められたということです。

与太郎 でも、やっぱり堤防を乗り越えないようにしなくちゃ被害は無くせないですよ。

大家 そうなんです。波の高さが10メートルで秒速20メートル、30メートルというような津波をどうやって止めてしまうかというのが問題なんです。

そんな波の動圧は壁の幅1メートルあたり2,000トン以上にはなります。

そんな圧力に耐えて、しかも押し寄せる津波を全部はね返してしまうような構造の防波堤を造ることができるものかどうか。

しかし、最初に与太郎さんが言ったように、100年200年と言った長期計画で、壊れない防波堤を造る必要があるのかも知れませんね。たとえば図-5のような防波堤をね。

与太郎 そうなのか。

福島原発だって5メートルや10メートルの堤防じゃとても津波を防ぐことなんてできなかったんだ。

大家 6メートルの津波ならば6メートルの堤防で止められると考えていたとすれば、それはとんでもない間違いだったということです。

