

揺れの上限

京大名誉教授 梅田康弘

1. はじめに

前回、「マグニチュード 10 の地震は起こりうるか」というタイトルで、マグニチュードの上限についてお話しした時に、それでは「揺れの上限はどうか」というご質問をいただきました。ところが「揺れ」とはなんぞや? という基本的な問題に加え、地表での揺れの複雑さもあって、お答えするのはなかなか難しいところがあります。

前回お話ししましたモーメントマグニチュードは、断層の長さ×幅×ずれの大きさに、断層のずらしにくさを表す剛性率 (μ) を掛けたものから割り出しましたので、それぞれのパーツの上限を考えることによってマグニチュードの上限を検討することが出来ました。

しかし揺れとなると、地面が動く距離 (変位) なのか、動く早さなのか、加速度なのか、あるいはそれらが混在したものなのか、などと複雑です。人間の感じる「揺れ」については別の機会にお話しすることにして、ここでは「揺れ」は地震波の変位振幅として話を進めることにします。

2. 破壊寸前が揺れの上限

波の振幅の最大は、波が崩れる寸前であることを示しましょう。図 1 は、海面を伝わる波が、沖合(図の右) から左の岸に向かって進んでいく様子を描いています。岸に向かって海底が浅くなるため、沖合からくる波の速度はだんだん遅くなります。先行の波がスピードダウンすると、あとから来る波に押されて寸詰まり状態になりますので、図のように波長は短くなり、波高も高くなります。しかし波はどこまでも高くはなれず、やがて左端に点線で示したように波頭 (なみがしら) が崩れてしまいます。崩れる寸前、すなわち破壊寸前が、波としての高さの最大ということになります。

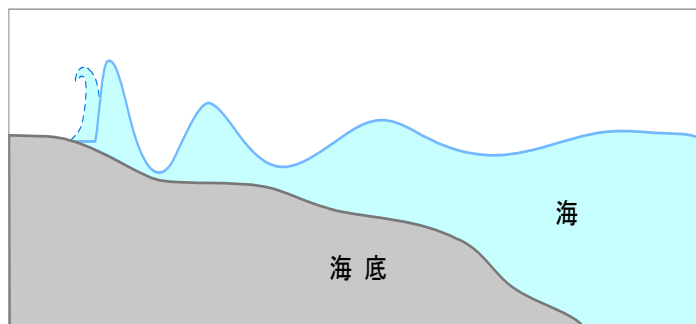


図 1 海の波が崩れるようす。

波が浅瀬に近づいてくると、スピードが遅くなり、波は寸詰まりになる。そのため波長は短く、波高は高くなります。波のスロープ (傾斜) がある限界を超えると波は崩れてしまいます。崩れる寸前が波としての上限です。

ここでわかったことは、波の最大の高さは、波の波長によって決まるということです。波の高さと波長という二つの要素を一口で言いかえすと、「波の傾き (勾配)」ということに

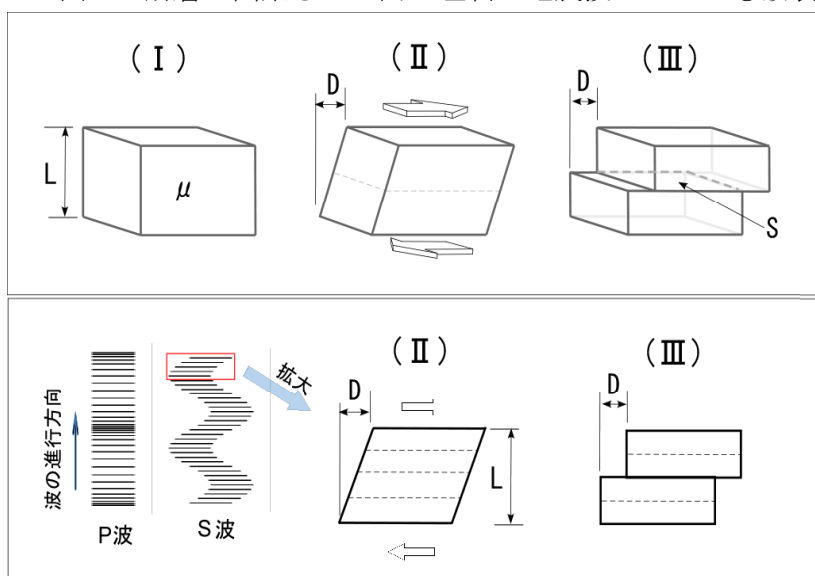
なります。ある程度の勾配までは波として伝わりますが、それ以上の勾配になろうとする瞬間に壊れてしまいます。このことは地震波のように固体を伝わる波についても言えることです。そこで、もう少し物理的に言い換えますと、波の振幅の上限は波の波長によって決まる、すなわち波の勾配（波の振幅／波長）によって決まるということです。

3. 地震波が破壊を引き起こすか

この節では、これまでの基礎講座の応用という切り口で、波と破壊について考えます。図2の上は、第1回基礎講座の「マグニチュードとは」で説明した図と同じです。物体(I)に、(II)の矢印で示したように逆向きの力、すなわち物体をずらすような力を掛け ていきますと、物体はしだいに歪んでいき、ついには(III)のようにバシッとずれてしまうという図です。地震の場合はずれた面が断層面で、Dはずれの大きさです。長さLに対するD (D/L) は歪と言い、地震が起こるような地殻ではおおよそ1万分の1だということは第1回の基礎講座でお話ししました。L=10kmにつきD=1mほど歪むと、地殻は耐えきれなくなって破壊する、つまり地震が発生するというわけです。

図2の下の左端は、第6回基礎講座の「P波・S波の意味」で使った図と同じで、P波は伸び縮みしながら、S波は進行方向に対して横にずれながら伝わって行くことを話しました。S波は“ずれ”ですから、同図上の(II)と同じことが起こります。S波の1部分、赤枠で囲んだ部分を拡大したのが下の図の(II)です。平面的に描いていますが、立体的に描かれた上の図と理屈は同じです。上の図の地震断層は数千年かかって (D/L) の歪が蓄積されますが、S波の場合は秒の単位で“歪”が変化します。ある所で、ある一瞬、歪 (D/L) が物体の歪限界を超えますと、下の(III)のように破壊してしまいます。この状況は、時間の違いこそあれ、上の図の地震断層の場合も、下の図の地震波による破壊も同じです。

図2 断層が出来るのと同じ理屈で地震波によっても破壊が起こる。



上の図:直方体の物体(I)に、白矢印のような逆向きの力を掛けるとDだけ歪む。歪 (D/L) が限界を超えると破壊します(III)。地震の場合は破壊面(ずれた面)が断層です。

下の図:S波はずれながら伝わっていく。赤で囲んだ部分を拡大したのが(II)の図であり、(D/L) が限界を超えると、上の図と同じように破壊します(III)。

しかし、地震の時に断層から放出された地震波が、断層の直ぐそばに新たな破壊をひき起こすことはありません。断層のずれの速さは、1秒間に数m程度なのに対して、地震波の伝わる速さは数km/秒ですので、たとえ波動が生成され続けても、拡散してしまう方が3桁も早いからです。では、どんな場合に地震波による破壊が発生するのでしょうか。

4. 地震波が地面を破壊する

図3はS波が地下から地表に向かって進行していくようすを表したものです。地表に近いほどS波の速度は遅くなりますので、ちょうど2節で述べた海の波と同じように、波は寸詰まり状態になって、波長は短く、振幅は大きくなります。地表近くでは波の勾配が図2の(II)のようになっていることがわかります。もしこの時の歪が限界歪を超えたならば地表は破壊されます。波の最大は地表破壊の寸前ということになるのですが……

しかしながら、地震波の速度が著しく低下するような地表付近では、地震波の勾配が大きくなる半面、非常に柔らかい(剛性が小さい)地層であるため、逆に壊れにくくなります。極端な表現をすれば、岩盤の上にコンニャクのような地層があるようなもので、揺れは非常に大きく(歪は大きく)なりますが、剛性が著しく小さいため、ちょっとやそつとでは壊れなくなるのです。破壊するかしないかは、波の勾配(D/L, すなわち歪み)と剛性率(μ)との兼ね合いで決まります。

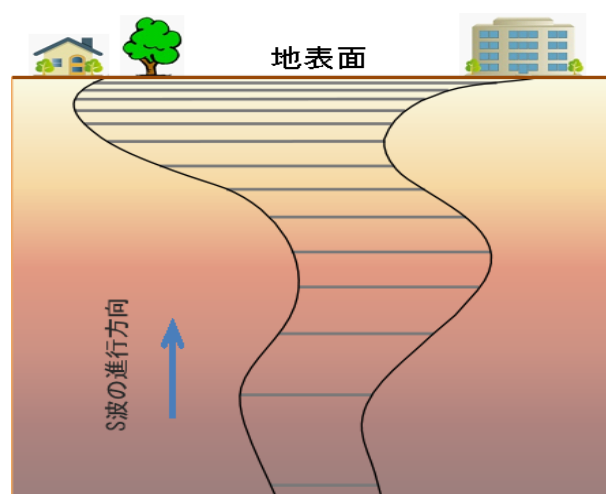
ここまでは簡単のため、地層は水平としていましたが、実際の地表付近は、地震波の速い層と遅い層が水平方向に互層(入れ子)になっていたり、それらが傾いていたり大変複雑です。地震の波の伝わり方も複雑になり、上記の兼ね合いも単純ではありません。

今回はS波について説明してきましたが、P波についても同じことが言えます。P波は伸び縮みしながら伝わります(図2)ので、伸びが限界を超えますと「引っ張り破壊」、縮みの場合は「圧縮破壊」になります。同様の用語を使いますと、S波の場合は「ずれ破壊」です。

図3 S波が地下から地表に向かって進行していくようす。

S波は進行方向に対して横にずれるように伝わりますが、図ではくねったS字のように表現しています。階段状の横棒の長さで振幅を、その間隔で波長を表しています。バックの色のグラデーションは、浅いほう(図の上のほう)に行くほど波の速度が遅くなることを表現しています。

S波は地表に近づくにしたがって、波長が短く(横線の間隔が狭く)なり、振幅が大きくなる(横線の長さが長くなる)ことを表現しています。



5. 揺れの上限は観測事実として

地震断層が地表に達して、地表にずれが出来ることはよく知られていますが、地震断層が地表に達しない場合でも、波動によって地表が破壊されるメカニズムは、これまでほとんど知られていませんでした。前節で述べたように地表付近の構造が非常に複雑なことから、また揺れが大きくなると、弾性波動の理論が成り立たなくなることもあって、地表における「揺れの上限」についての研究はほとんどなされていません。

地殻（岩盤）のひずみの限界は 1 万分の 1 というのは観測事実として求められたものですが、それと同じように、地表での「揺れの上限」も、たくさんの地震計が設置されましたので、これからは観測事実として求められるでしょう。

例えば、2008 年の岩手・宮城北部地震（M7.2）では、岩手県一関市に設置された防災科学研究所の地震計が 4000gal（ガル）を超える大きな加速度を記録しました。これまでに世界で記録された最大の揺れ（加速度）で、ギネスブックにも登録されたそうです。一関での震度は 6 強、防災科研の報告によりますと、地面の最大速度は 85cm、最大変位は 163cm でした。とても大きな揺れでした。

6. 地表が無重力になると

一関で記録された 4000 ガル強（上下動は 3866gal）は、信じがたいほど大きな加速度です。上下動が地球の重力加速度 $1g$ （980gal）を超えますと、地表の物体は無重力状態になり、固定していない物体は跳びあがることがあります。地面は粘着力がありますので、見た目には跳び上がってはいませんが、それに近い状態になっていると思われます。そして次の瞬間、それがドスンと落ちてきます。2008 年の岩手・宮城北部地震では、こういうことがあって、たくさんの山地崩壊を引き起こしたのではないかと思います。

本稿では基礎的なことを中心に述べてきましたが、地表で地震波が大きく増幅されるのは、地下の構造だけでなく、地表の地形（地表の凹凸）にも大きく依存します。また震源からも大きな地震波が出てくるのは破壊過程（断層形成過程）の複雑さにもあります。まだまだメカニズムはよくわかっていません。

従来は地震計が少なく、まれにしか観測されなかった大きな揺れですが、地震計が増えるにしたがって観測される機会も増えるでしょう。大きな揺れ、「揺れの上限」はこれから大きな研究テーマになると思われます。