

以下津波に関して思った事を記載する。

まず提言である。

- 1) 完全に津波を防ぐ防波（防潮）堤は現実的サイズでない。良く発生する波浪を防げる程度の、成るべく低い防波堤とする。無理に高くすると流速が増し被害が大きくなる可能性がある。
- 2) 防波堤の内側は、流入水の破壊力を抑える為に、成るべく土地の高さを高くする。
- 3) 海岸近くは丈夫な木々のグリーン・ベルトを作る。出来れば 1km 幅あると非常に有効。
- 4) 高台が遠い平地では、地下シェルターと高台が必要。高台はその地域で漂流するであろうものの衝突に耐える必要がある。

津波とは

津波は元々津々浦々に押し寄せる波と言う事らしい。波と言っても海岸に押し寄せる普通に見られる波とは異なる。波は連続的に繰り返す。その主な原因は風である。一方、津波は連続的では無い。一回しか起きない。原因は海底の隆起で、数カ所の海底がずれて隆起すれば、複数の波として観測されるが、それでおしまいである。また、波の長さが非常に長い。海底の隆起の範囲が数十 m にわたる事が多く、数 k ~ 数十 km の長さである。海底の部分的隆起で、海水が押し出される。この余分な海水が世界中の海に拡散し、新しい海拔 0m が出来る。津波によって古い海拔 0m から新しい海拔 0m に移る。

通常の波では海水の粒子（主に水分子）の位置エネルギーと運動エネルギーが交換されながら波として伝わる。それぞれの海水の粒子は波長さ程度の往復運動をするが、大きくは移動しない。一方津波は発生地点に近いと海水の粒子自体が移動する。長く伝搬すると通常の波の様な性質を持つようになるが、大きな被害を出す津波は前者である。

防波堤高さと津波

津波の長さが十分短い場合をまず考える。通常法波浪は波の長さが 100m 程度であるが、津波の場合は 100km を超えた記録もある。時間でいうと分～時間の長さ。

防波堤など無い自然の浜の場合、①の様な**最大遡上高さ**を示すとする。海岸線から山へ緩やかな傾斜の場合である。②では①の**海岸での津波高さより高い防波堤**を考える。津波が防波堤に当たると、最大遡上高さ相当まで飛沫が発生する。後ろからどんどん津波が押し寄せるので、防波堤でさえぎられて海面は上昇する。津波の長さが短いと津波水量が少なく、又直ぐに負の津波部分が来るので、通常の波浪の様に防波堤で何とか食止められる事になる。

③は少し**防波堤を超えた**場合で、津波波長が短いこともあって、元々の防波堤を超える位置エネルギーを持つ水は少ないので、超えたとしても大した水量は防波堤内に入らない。水量が少ないと地面との摩擦などで急速に速度が落ちる。防波堤が無い状態より防波堤内

の水位も低いであろう。

④は長い津波を示している。①と同じ最大遡上高さの図とした。丈夫な高い建物を津波はすり抜ける。「丈夫な」と言うのは津波の速度による衝撃より強ければと言う意味と漂流物の衝突にも耐えると言う意味である。車の衝突でも知られている様に、の衝撃強さは波の速度の二乗に比例する。船など大きな漂流物が衝突しなければ多くの場合、通常の鉄骨やコンクリートで十分であろう。

⑤の様に通常の波浪や短い津波を防げる防波堤の場合、長い津波の大きな水量の為に水位が上昇し、堤防を乗り越える。乗り越えた場合所謂斜流が発生し、破壊力の強い海水が流入する。

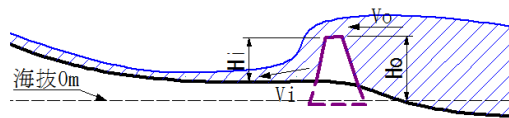
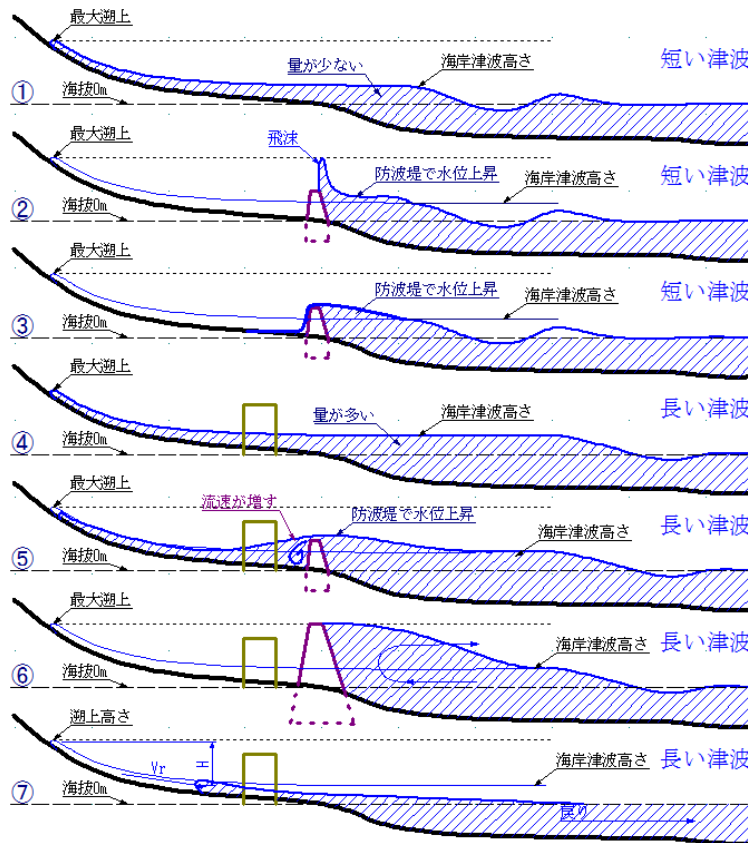
防波堤に近い部分では、防波堤が無い場合に比べて水位は高くなる事もあろう。

津波が防波堤を超えた場合を考える。防波堤の陸側高さを H_i とすると、超

えた津波の速度を無視できるとすると、超えた後の津波の速度 V_i は

$$V_i = \sqrt{2gH_i}$$

となるので、例えば地震後が防波堤の内側が海拔 0m となって、その時の防波堤の高さが 2m だと、 $V_i = \sqrt{2 \times 9.8 \times 2} = 6\text{m/S}(22\text{km/h})$ となる。僅か 2m の落差でも通常の人が駆けて逃げるのは困難である。5m だと、 $V_i = \sqrt{2 \times 9.8 \times 5} = 10\text{m/S}(36\text{km/h})$ 、10m だと



$V_i = \sqrt{2 \times 9.8 \times 10} = 14\text{m/S}(50\text{km/h})$ となる。防波堤を超える時の速度がある場合はより速くなる。防波堤の高さが高い程超えられた場合の水の速度が上がって車でも逃げられなくなる可能性が増す。また、破壊力も防波堤高さに従って大きくなる。津波を防げないなら高い防波堤は必ずしも有効策では無い。防波堤を作るなら陸側の海拔を同時に高くする必要がある。津波が去っていく時の引き波の時、防波堤を超えてより大きな落差となり、 $(H_o > H_i)$ なので $V_o = \sqrt{2gH_o}$ は更に大きくなって危険である。今回の津波でも多くの遺体が防波堤などの直ぐ外に沈んでいた。

⑥では**完全に長い津波を防げる防波堤**を示している。自然海岸での最大遡上高さ以上の防波堤が必要となる。津波に先立って地震が到達すると通常地震波によって地面が下がる。地震前の海拔 0m はその分下がり余計小さな津波でも実質高い遡上高さを示すことである。GPS など津波高さを測定すると、地盤沈下の影響を含んでいないので、注意が必要である。東日本震災では GPS で 7m 程度が観測されているが、実際は地面の沈下を加え 8m だった可能性が高い。

東日本震災では 40m の最大遡上高さが計測されている。過去の多くの津波も 30m を超える値を記録している。多くの場合木々や岩などの障害物でエネルギーを損失するので、条件によってはもっと高くなる。完全に防ごうとしたら安全を見て 50m とか 60m とかの津波用防波堤或いは防潮堤が必要となる。この高さの建設は現実的では無い。従来経験最大値の高さ程度としても 15m 程度になって、必要海岸線全長にわたって作るのは困難である。毎年の波浪程度(5m 程度)を防ぐ程度のあまり高くない防波堤で対処し、陸側も嵩上げするのが良からう。大きな津波に対しては、防波堤を乗り越える事を前提に、避難経路の確保と高い避難用構造物を作る。また、津波の災害後の短期間復興が難しいものは、数十 m 以上の高台に移すのが良からう。

今回の地震で大陸側プレートが最大 50m 近く海側に移動したとのデータもあり、プレートの傾斜が 45 度程度とすると、上下移動も 50m 程度で、発生源では 50m の津波の発生も真実性が高い。

山側が緩やかな傾斜では無く、急に高くなっている場合は、山が防波堤となって、高い津波となる。

一般に海岸での津波高さを津波高さと言っているが、防波堤の検討には津波高さは余り意味ない。一方緩やかな地形では障害物が沢山あり、津波を弱めるので、遡上高さを測定できない。海岸付近での「津波の高さ」と「速度」を測る事が出来れば、計算から最大遡上高さを計算できる。一部の報道では津波速度 30m/S がビデオカメラの記録から計測されており、津波の高さを 10m とすると、障害物や粘性、渦などのロスが無ければ、遡上最大高さ = 遡上最大高さ = $\frac{1}{2}30^2 \div 9.8 + 10 = 55.9\text{m}$ となる。津波速度 20m/S 津波の高さを 7m の場合は 27.4m となる。

⑦は津波後の**引き波**を示している。津波前の引き波は津波に先立つ地震波による地盤沈下が原因で異なる。遡上高さから H 下がった位置で引き波は

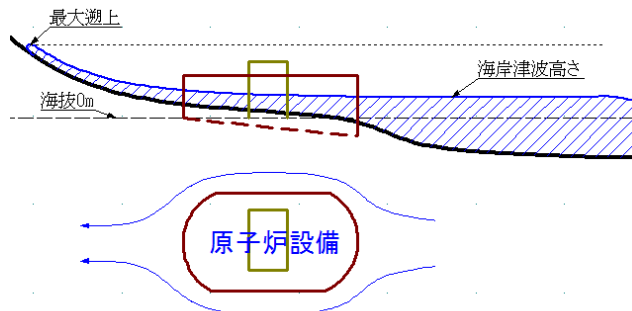
$$Vr = \sqrt{2gH}$$

の速度となる。遡上高さが 10m の場合、 $V = \sqrt{2 \times 9.8 \times 10} = 14\text{m/S}(50\text{km/h})$ 、20m の場合、 $V = \sqrt{2 \times 9.8 \times 20} = 20\text{m/S}(71\text{km/h})$ 、30m の場合、 $V = \sqrt{2 \times 9.8 \times 30} = 24\text{m/S}(87\text{km/h})$ となり、かなりの速度である。漂流物と共に流れてくるので破壊力が大きい。引き波で浚われる人が多い。海岸の松で助かったとの昔話を聞くので、海岸に木々のベルトを作ると良い（砂地に植えるのは強度が無いので避ける）。津波を弱める効果と引き波時に引っ掛かる可能性が増える。

原子炉と津波

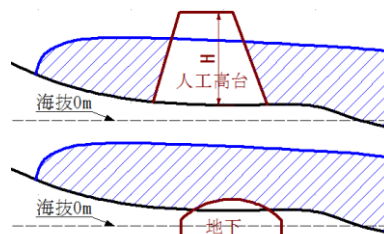
原子炉の設置場所と津波対策の構造は、上記の事を考えると、防波堤は低めにし、原子力設備全体を壁の中に閉じ込めるのが良からう。今回福島を襲った津波の海岸での津波高さは精々6m 程度で、遡上高さが 15m 程度であった。次図の様に構造なら、今回に対処するには 10m 程度の壁で十分と言う事になる。山側に十分な平らな土地が必要になる（奥行数 Km）。山などがあると、それが防波堤と同じ作用をして、津波高さが上がる事になるので、高台を作る事になる。

近くに高台が無い、町の中に同様の避難場所を作るもの良からう。



避難場所、シェルター

避難する場所は、高ければ高い程良い。どこまで津波が来るかは、津波地震と地形に依る為想定することは困難である。海岸近くに高台があれば、そこが良いが、更に高い場所に逃げる事が出来る場所でない、危険である。安全な高台が無い場合は人工の構造物を作る事になる。防波堤近くの斜流(高いとこの水が落下し速度を上げる水)による現象を除けば、津波は水自身の破壊力はそれほどでない。物を漂流し、それが衝突するのが問題である。高台を作る場合は平地部の長い海岸ではそれほど高さは必要としないであろう。今回の震災でデータからは 20m 程度でよさそうだ。震源が海岸の近くの場合は最低 50m 程度必要になる。防波堤がある場合は、それより高くする必要がある。漂流物が衝突の可能性が



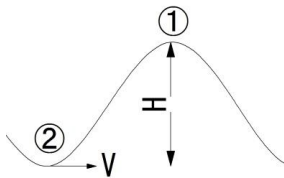
あるので、大型船の停泊できる港では強度が必要となる。鉄柱などで面積が小さな台を作るもの大きな漂流物が無ければ有効。

津波と地面の水流の速度は遅く、漂流物も浮くのでぶつかる可能性が減る。従って十分な空気を溜められる構造の地下室（地下シェルター）が有効な退避構造となる。小さなものは、庭に日曜大工で出来る。

原子炉の形状同様、海岸に近い構造物は、海岸に平行方向が狭く、直角方向に長い構造にした方が津波に対する抗力が増える。津波の前の地震波で液状化など起きる場所では特に縦長の構造物が有効となる。地上に大きな船が有ると思えばよい。

一般的波と津波の計測

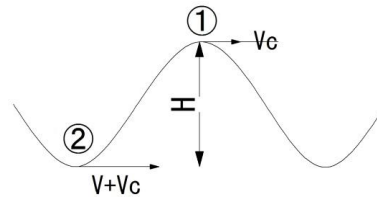
一般的波、即ち遠くで発生した波が伝わってきた波の場合右図の様に、一番高い山部分①では水分子の速度ゼロで、一番低い谷部分で水分子の速度が最高 V となる。高さの差を H 、密度を ρ とすると、①での位置エネルギーと②での運動エネルギーは同じで $E1 = \rho GH = \frac{\rho}{2} V^2$ となる。



Vc の速度の潮流などに乗ると、水分子の速度はその分増えるので

$$E2 = \rho GH + \frac{\rho}{2} Vc^2 = + \frac{\rho}{2} (Vc + V)^2 \text{ となる。}$$

海岸で、 Hm まで遡上するとし $E2 = \rho GHm = \rho GH + \frac{\rho}{2} Vc^2$ なので H の他に Vc も測らないと計算できない。



津波の場合は、速度ゼロの①の部分が存在しない。潮流と同様速度のある水の流れと考えられ、

沖合で $5m$ の高さでも①で速度が例えば $10m/S$ なら、その速度エネルギー分遡上高さが倍の $10m$ と高くなる。気象庁は単純な①の高さを測っているが、津波に関しては意味が無い数値である。

最大遡上高さの計測

津波が標高の高い所に上がる途中にエネルギーを減衰させる障害があると、遡上高さが下がる。小さな島や半島はその周りを津波が通り過ぎてしまう。本来何も無い時の遡上高さが判れば、色々な条件下（例えば防波堤や防風林など）による影響をある程度計算できる。測りやすいのは以下であろう。

- 1) 直線的に長く続く切り立った崖
- 2) 防風林、岩などが無い、遠浅の砂の海岸で、海岸線から高台の間には草以外に殆ど何も障害物が無く、傾斜が大きい場所。
- 3) 海岸から直線的に繋がっている急な小川や瀬。

良く V 字型に開いた湾の奥で高い遡上高さが観測されるが、これは水が集められ、地面の

凸凹などでエネルギーの減衰が少ないからである。最高遡上高さに達する水は一番高いエネルギーを持った水、即ち津波の最上部の水である。2)の場合で傾斜が緩やかで、距離が長いと津波の層が薄くなって地面との摩擦が発して、速度が落ちてしまう。

地震の計測

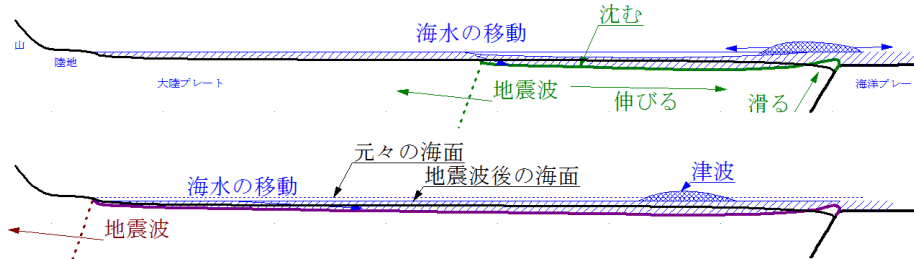
地震波震度計によって計測されているが、津波の予測にも使われている。しかし、この振動計の値は物理的には余り意味ない。元々人に感じる地震の強度の計測を目的に作られたものである。本来は加速度や変位（速度）などの物理量を計測するのが妥当であろう。

津波に関して考えれば、沖合でのプレートの伸び＝上昇により海水が持ち上がる事によって発生すると考えられるので、持ち上がり高さを測るのが妥当である。沖合の為に直接測れないが、陸地に地震波として伝わってくる。この地震波の変位量が津波高さの良い指標となろう。現状の地震計はこの変位の二回微分、広帯域地震計で一回微分相当の値を計測していて、微分されたために、本当に欲しいデータが無くなっている。例えば、沖合で海面が 10m 程度隆起し、その変化が数秒程度ならデータを積分して何とか歪を計測できるが、それよりゆっくりした変化だと逆計算が出来なくなる。静岡近辺に気象庁が歪計を配置しているが、そのデータを見る限り、絶対歪ではなく、相対値の様である。歪系計測装置で回路上微分されている可能性もある。音響計測機器では多くの場合低周波では微分される回路構成をとらざると得ない。例えばコンデンサーマイク。また、歪系の配置は表面のみでは不足で、地底の数カ所の深さに配置する必要がある。これは通常地震計も同じで、地表面の震動を測った場合、地震波表面近くの波を測っただけであって、地下に硬い岩盤があれば、そこを通過した地震波を捉えていない。地震の全体を捉えるには無理がある。

津波の前、地震直後の引き波に関して

津波の前の引き波は、地震波に依って起こされる。津波の発生の原因である地震波は太平洋岸の場合負の音圧波である。陸地が海側に引かれる。次図上で黒線が元々の地面（海底）である。海溝のプレートの境界が滑ると地震が発し、海側に伸びる。プレートの厚さは 100km 程度あって、その全て或いは一部に溜まっていた歪が解放されたのである。この伸びに依って、プレートは薄くない、海底が沈む。伸びる部分の先端は縦波音速で伝搬するが、縦波による歪解放量は少ない。縦波に続く横波の歪解放量が大きく、この伝搬直後に海底が沈む。そこに海水が流れ込む。縦波を無視すると沈む部分の先端は横浪音速で伝搬していく。次図下では横浪地震波が海岸に達した時を表している。海水が沈み部分に流れ込むのは海の彼方から始まって海岸に近づいてくる。海水内の変位の伝播速度は約 1.5km/S（深さ温度で変化）、地震波の伝播は 3~5km/S で、地震波の方が早い。津波の速度は 1km/S 程度で引き波が先に発生する。チリ津波の様に地震波を伴わない場合、引き波は無い。地

震波に伴う海底面の沈み全体を震源から遠い所の海水が移動して満たし、最終的にはほぼ元の海面と同じ高さに戻る。(図はスケールを無視して書いてある)



簡単な理論

津波を流体理論で計算する方法もあるが、流体理論は完全では無く（多くの場合初期条件と応力波が計算に含まれない）、津波の発生と遡上高さを考えるにはエネルギーのみを考える方が簡単である。

物質の持つエネルギーは質量エネルギーと重力場エネルギーの総和である。核分裂などしない限り質量エネルギーは変化しない。重力場エネルギーは地球上では速度エネルギー（運動エネルギー）と位置エネルギーの和である。位置エネルギーは地球表面上では高さに比例すると簡略化できる。運動エネルギーは質点の温度と移動に伴う真の運動エネルギーから成る。渦を巻くなどの現象が無い限り熱への変換は無いので、熱エネルギーは無視する。

メカニカルエネルギー E_m

$$E_m = \frac{1}{2}mV^2 + mgh$$

震源に近い場所で海水は位置エネルギーを取得する。

$$E_0 = mgh_0$$

となる。これが運動エネルギーに変わって移動していく。高くなった部分が広がり、位置エネルギーを失うと同時に運動エネルギーを得る。 h_1 の高さでは以下の式の V_1 の速度となる。

$$E_1 = \frac{1}{2}mV_1^2 + mgh_1 = mgh_0$$

移動している水とその下の水との間に摩擦が働き、少しずつ運動エネルギーを下の水に与えながら水は移動していくが、その損失エネルギーは少ない。

アマゾン川を逆流するポロロッカを見れば摩擦の少なさは実感できるであろう。

水の得たエネルギーは防波堤や海岸の傾斜に達すると、最後に速度エネルギーは0となるので、震源から海岸に達するまでの損失を無いものと仮定すると到達（遡上）高さ hc は

$$E_c = mghc = E_0 = mgh_0$$

となって、震源での高さと同じとなる。エネルギーのロスが無ければ震源で得た高さまで上る能力があると言う事である。これは一般に遡上高さと呼ばれる津波の高さに相当する。津波の経路が長いと途中一部又は全部変化し、通常的位置エネルギーと運動エネルギーを交換する波になるが、海底が浅くなると上記の様な状態に戻るであろう。波動の場合は位置エネルギーと運動エネルギーを交換しながら伝わっていくが、地形などでフォーカスされたり拡散されたりする。最大到達高さはフォーカスすることに依り、元々より高くなる。一方波動で無い状態では、粒子の持つ全エネルギーで最大到達高さが規定される。

東北大津波の場合沖合 50km と 80km 地点での津波の断面形状に差が少なく、海面上を津波が個体の様な状態で移動したものと考えられる。海面の上に津波が乗っていて、何故低くならないかとの疑問があるが、この一つの説明は以下である。「津波が前進しているので津波前方下面に対して応力波を発生しその反力及び海底面からの反射応力で浮いている。」飛行機のグラウンドエフェクトの様な力である。また、水面上を動物が場合によっては人が駆けて水に水没しないで移動できる。従って海面の上に津波があっても不思議ではない。また、地震波で海底面が沈下し、その分海面が下がり、その上に津波が来ると海拔 0 を基準とすると津波高さは沈下分低くなる。なお、応力波の発生で津波に戻ってこない分は海に拡散し、津波のエネルギーロスになる。

津波の高さは各地で計測されているが、本来津波の高さと速度の両方が判って津波のエネルギーが判る。

平野部で津波が奥まで入り込む場合は、海岸付近での津波の高さの測定値を高さとしても不具合は無いであろう。しかし、山が差し迫ったり、防波堤がある部分では、それを遡上又は乗り越える。津波の評価を高さで速度の両方を測定した結果とすべきであろう。

なお、震源で海面の上昇は、一定の速度で上がる。その運動量分、上記より高いエネルギーを得る。例えば、30mの隆起が 10 秒で起きた場合は 3m/S で、水頭 0.5m に相当する。

また、地盤構造によっては、地震波動がある海面部分で焦点となる事もある。その場合はもっと高くなる。こう言った、水の上昇速度が有る場合、水中では大気圧より低くなって、海面表面ではゆらぎを生じる。

コメント [YU1]: 修正 2012/2/28

津波のエネルギーの損失

水のエネルギーが減るのは渦などで水の粒子間での速度が差が出来、粘性で熱エネルギーに変換される場合が大半である。また、小さな飛沫、水滴になると、やはり粘性が相対的に大きくなってエネルギーを熱に変換する。木々が多く茂る自然の海岸では、水が木々に裁断され、木々（葉も含む）粘性で減衰する。海岸に木々を植えるのは有効である。しか

し、砂地の様な場所に木々を植えると津波で木が流されるので、流木での破損事故の原因になるので、避けるべきである。防砂林等の場合は背の低い木を植える事が勧められる。確りした土壤の上に木を植えないと不味い。自然の木は大体地上部と地下部の大きさが等しく、津波程度では簡単には大きなダメージを受けない。元々台風などに耐える構造と成っている。津波は町では漂流物を伴い、更に破壊して行く。この際の破壊と漂流物の運動エネルギーの為に損失する。ただし、建物は中身が無いので、津波の重量に比べ微々たるもので損失は僅かと考えられる。

津波の上の水の落下

海岸近くでは、波の先端では斜流など津波の上の方の水が落下したりしながら、高速の流れに成ったりする。この破壊力は非常に大きい。一番最上部の水のエネルギーである為である。

津波が防波堤を超えた場合を考える。防波堤の海側高さを H_o 陸側高さを H_i とすると、超えた津波の速度を V_o とすると、超えた後の津波の速度 V_i は

$$E = \frac{1}{2}V_o^2 + gH_o = \frac{1}{2}V_i^2 + g(H_o - H_i)$$

なので、

$$V_i = \sqrt{V_o^2 + 2gH_i}$$

特に V_o が 0 の場合は

$$V_i = \sqrt{2gH_i}$$

となる。