

特別講演Ⅱ

東北地方太平洋沖地震津波の実態と復旧・復興の方向性

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授 磯部 雅彦

1. はじめに

今年(2011年)3月11日14時46分頃に発生した東北地方太平洋沖地震は、三陸沖の牡鹿半島東南東130km付近を震源とするモーメントマグニチュード9.0という巨大な地震であり、これによって発生した津波によって未曾有の被害を被った。政府緊急災害対策本部の7月12日発表の報告によれば、死者・行方不明者数は20,899人を数え、全半壊した建築物数は225,179戸に及んでおり、99,236名もの避難者が残っている。また、6月24日にとりまとめたストック(建築物、ライフライン施設、社会基盤施設等)の被害額は16.9兆円に上っている。このうち本稿の中心的なテーマとなる海岸保全施設については、岩手・宮城・福島の3県の海岸堤防300kmのうち約190kmが全半壊し、津波により561km<sup>2</sup>が浸水被害を被った。

津波に対する防災対策は、堤防や護岸などの海岸保全施設を中心に行われてきた。そこで、本稿では今回の津波に対する海岸保全施設の被災状況を把握した上で、海岸防災の視点から今後の復旧・復興の方向性を論じる。以下では、まず、津波の基礎理論と東北地方に起こった過去の津波について簡単に紹介する。続いて今回の津波の挙動と被害の実態について、現在までに明らかになった内容を紹介する。最後に、復旧・復興に向けた取組の現状を取りまとめるとともに今後の方向性についての私見を述べる。

2. 津波の基礎理論

2.1 津波発生メカニズム

津波は通常の場合、地震によって発生する。しかし、それだけではなく、海底の地滑りや、陸上からの火山噴出物の海中への突入、海底火山の噴火などにより、短時間(1~数十分)のうちに海面の広い範囲(数~数百km)が上下すると、その海面変位が四方八方に伝播することによって発生する。

典型的な海溝型の地震による津波の場合、幾枚かに分かれて地球の表面を覆うプレートの運動に

より、プレート境界には年々少しずつ歪みが蓄積するが、ある時それを開放する時に急激なずれが生じる。

図-1に示すように、海底下の地殻でのこのずれは、海底面にも影響し、海底面に凹凸が発生する。これは短時間に起きるので、同時に海水も持ち上げられたり、沈んだりし、海水面にも同様な凹凸ができる。すると海水は流動するので、海水面の凹凸は動きだし、波を作り出し、四方八方に伝播する。これが津波であり、沿岸域に到達すると陸上に遡上して大きな災害をもたらすことになる。

たとえば、太平洋プレートはハワイから日本方面に向かって年間数cmの速さで移動しており、その先端が東北地方太平洋沖で北米プレートの下に沈み込んでいる。これにより北米プレートは先端が湾曲するが、ある時それが跳ね返って地震となり、津波を発生させる。海上保安庁資料によれば、今回の場合、震源上の海底において東南東方向へ約24mの水平移動とともに、約3mの鉛直方向の隆起が起こった。

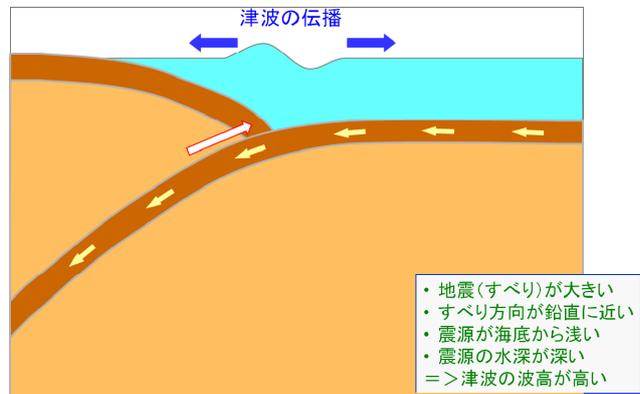


図-1 地震による津波の発生メカニズム

津波発生メカニズムよりわかることとして、発生する津波の波高が大きくなるのは、まず、地震の規模が大きく、断層のずれが大きくて、すべり面が鉛直に近いことである。また、震源が海底下の浅い（海底に近い）ところにある場合である。さらに、水深については、深い方が持ち上げられたり沈んだりする水の量が多いので、初期の位置エネルギーが大きくなるために、大きな津波になる。

つまり、阪神淡路大震災での瀬戸内海のような浅い海で起こった地震では大きな津波にはならず、今回の地震のように深い海で起きる地震が大きな津波を引き起こす。もちろん、今回の地震の規模がマグニチュード9.0という巨大なものであったことが大きな津波になったことは当然である。

## 2. 2 津波の波速

津波が伝わる速さ、すなわち津波の波速  $c$  は、水深  $h$  によって決まり、

$$c = \sqrt{gh} \quad (1)$$

と表される。ここに  $g$  は重力加速度 ( $9.8\text{m/s}^2$ ) である。参考のため、この式の導出方法の例を付録1に示す。

この式を使って代表的な水深での津波の波速を計算し、身近なものの速さと比較したものが表-1である。海水浴で水深1mにいた場合、津波の波速は時速

例	水深		波速	
	(m)	(m/s)	(km/h)	
海水浴場	1	3	11	
防波堤	10	10	36	
大陸棚	200	44	160	
太平洋	4,000	200	710	

参考例	速度 (km/h)
歩行	5
市街地の車	40
新幹線	300
ジェット旅客機	900

表-1 津波の波速の計算例

11kmなので、人が逃げても津波に追いつかれて溺れてしまう。太平洋の平均水深4,000mでは、時速710kmとなり、新幹線どころか、ジェット旅客機の速度に近いほどとなる。1960年や2010年のチリ地震津波では、太平洋の反対側のチリから日本に津波が伝播したが、ジェット機並みと言ってもちょうど一昼夜かかった。

沿岸域においては津波が進行し水深が浅くなるにしたがって波速は小さくなる。この場合の伝播に要する時間を計算するには、水深ごとの伝播時間を積分すればよいことになる。1/100の一様な勾配の海岸があつて、100km沖合の水深が1kmとする。そこで津波を観測できれば、海岸線に伝播するまでに30分余りの余裕が生まれ、来襲する津波への備えに使うことができることになる。事実、今回の津波でも第1波が到達したのは、地震発生後30分以上後のことである。

## 2. 3 津波の波高変化

地震時の断層のずれによる初期の海水面の凹凸は数十cmから最大でも数mで、発生域での津波の波高はそれほど大きくない。深海で船に乗っていれば、津波といっても十分ないし数十分の間に高々数mの上下があるだけなので、津波によって被害を受けることはない。通常は津波を感じることもない。

しかし、岸近くに到達すると、様々な原因により津波の波高は増大する。図-2のように、水深が  $h_0$  から  $h$  に変化し、同時に湾の幅が  $b_0$  から  $b$  に変化した場合に、波高が  $H_0$  から  $H$  に変化するとした場合、

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{h_0}{h}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{b_0}{b}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

と表される。これより、たとえば、水深が1,600mから100mになると波高は2倍になり、また、湾の奥で幅が1/4に狭くなっても波高が2倍になる。

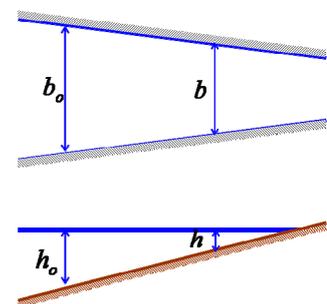


図-2 水深と幅の変化にともなう津波の波高変化

さらに、津波が陸上に駆け上がると、津波の流れの勢いでより高いところまではい上がる。特に、谷間の狭いところは部分的に異常な高さになる。

このことから、今回のように、地震発生域での水位変化が 3m としても、100m 程度の水深では 6m となり、さらに浅くなるとより波高を増すとともに、湾口に比べて湾奥の幅が狭くなればそれによっても波高を増す。それに加え、谷のような局所地形があれば遡上高は発生域での水位変化の十倍をも超えることになる。

### 3. 東北地方の過去の津波

東北地方では過去に最大級の津波として 4 回の記録が残っている。平安時代の貞観津波 (869)、江戸時代の慶長三陸地震津波 (1611)、そして明治三陸地震津波 (1896)、昭和三陸地震津波 (1933) であり、今回の東北地方太平洋沖地震津波とともに表-2 にその概要を示す。

明治三陸津波は津波のデータが計測された中で最も大きな津波であった。この津波では、22 千人余りの人が死亡し、10 千戸

年月日	名称	マグニチュード		最大遡上高 (T.P. m)	死者 (不明) (人)	家屋	
		地震 M	津波 m			全・半壊、流出 (戸)	床上・下浸水 (戸)
869.7.13	貞観津波	8.6	4		1,000		
1611.12.2	慶長三陸地震津波	8.1	3	15-20 (岩手県田老等)		田老、小瀬、下根待、宮古…	
1896.6.15	明治三陸地震津波	6.8	4	24.4 (岩手県三陸町)	22,072	10,393	3,694
1933.3.3	昭和三陸地震津波	8.1	3	23.0 (岩手県綾里村)	1,522 (1,542)	5,851	4,018
2011.3.11	東北地方太平洋沖地震津波	9.0		40.5 (岩手県宮古市姉吉)	15,555 (5,344)	225,179	

【鹿山偉夫(1985)：日本被害津波総覧、248p、政府緊急災害対策本部2011.7.2発表資料より作成】

表-2 東北地方の過去の大津波

余りの家屋が全壊・半壊・流出した。それに対し、昭和三陸津波は、地震としては明治三陸地震よりもマグニチュードが大きいものの、津波のマグニチュードとしてはやや小さく、津波の高さはやや低いものであった。被害としては、死者と行方不明者をあわせて 3 千人余り、全壊・半壊・流出家屋は 6 千戸弱である。ここで注目したいのは、家屋被害で比べると明治三陸津波の半分程度はあったのに対して、失われた人命の数は一けた小さく済んだということである。これは、明治三陸津波を経験した人が存命中で、地震の後には津波が来るというその時の知識が活かされて、避難につながったものと考えられている。過去の経験を活かすことにより、被害を軽減することができるという具体例である。

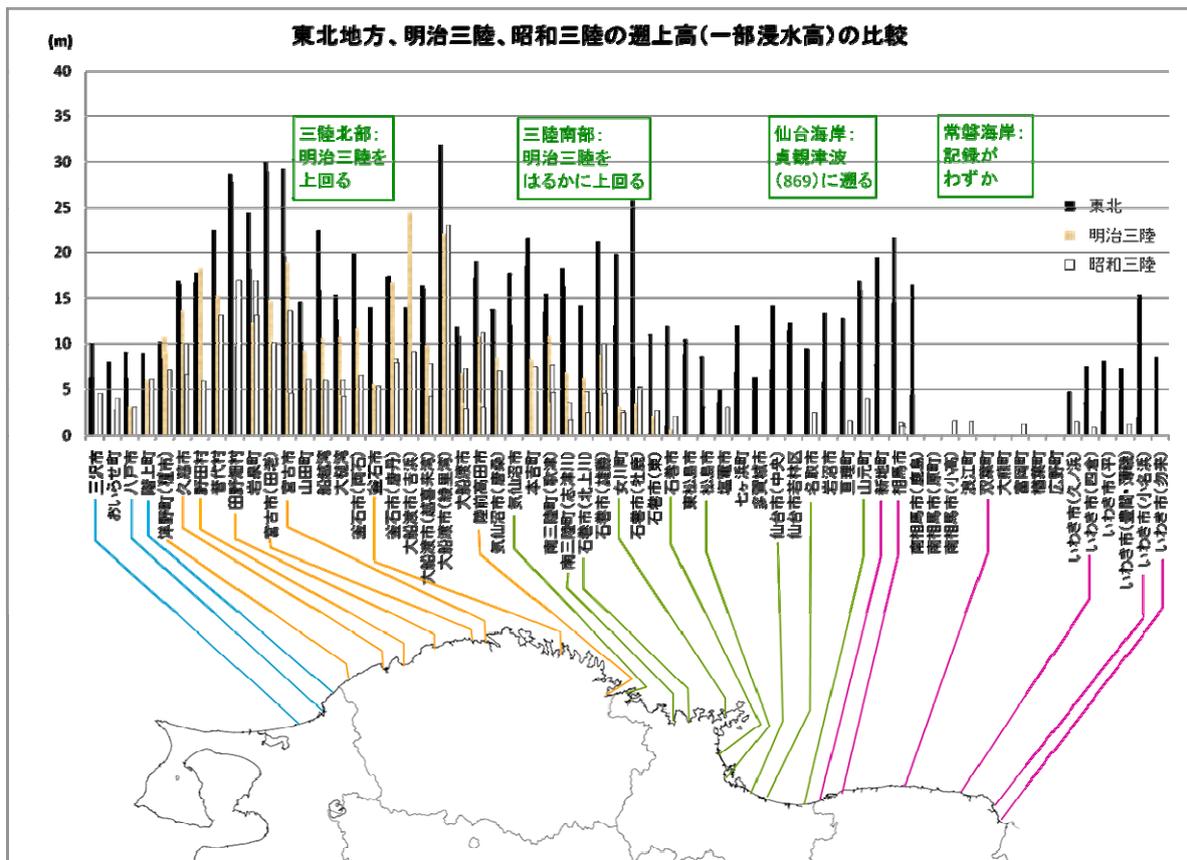
この意味で、明治三陸、昭和三陸、および今回の津波を比較してみる。明治三陸では全半壊・流出家屋数に対する死者・行方不明者数の比率は約 2 倍であったのに対し、昭和三陸では約 1/2 となっている。これに対し、今回の津波では約 1/10 であり、津波による物的被害の割に、死者・行方不明者数は少なく、問題点は山積しているものの、津波に対する知識が相対的には普及して避難につながったと考えられる。

慶長三陸津波も大きな津波であった。三陸地方で推定されている津波の高さは、昭和三陸津波に似たものである。仙台藩領内だけで 1.8 千人近くの犠牲者を出したとされている。

4 つの津波の中で最も古い、貞観津波は三代実録という歴史書に記載されているもので、津波が多賀城下にまでやってきて、千人もの溺死者がでたと記されている。最近になって (たとえば、阿部ら, 1990) 陸上の堆積物の柱状サンプルを解析したところ、仙台平野を始めとして、貞観津波が襲った地域には津波のときに海岸から流されてきた砂が埋もれていることがわかってきた。それにより、仙台平野では当時の海岸線から 3km も内陸に津波が浸入したことがわかった。そして貞観津波は仙台平野以南で最も大きな被害をもたらした津波となっている。今後、津波堆積物の調査を手がかりに、1,000 年以上の過去の津波の痕跡が見いだされ、最大クラスの津波を評価する際に利用されていくものと思われる。

#### 4. 東北地方太平洋沖地震津波の実態

これらの東北地方を襲ったどの津波に比べても、今回の東北地方太平洋沖地震津波は大きなものであった。図-3は各地区ごとに最大津波遡上高を、今回の津波と、明治・昭和三陸地震津波とで比較したものである。三陸地方の北側では、これまでの中で最も大きな津波が明治三陸津波であるが、今回の津波はそれを上回る高さであった。三陸海岸の南側では、明治三陸を始めとするこれまでの津波に比べて、今回の津波ははるかに高いもので、津波の遡上高は倍近いものであった。さらに南で仙台平野を中心とする平野部では、明治三陸や昭和三陸の津波では今回の津波とは比較にならないものであった。そして、はるか1,000年以上も遡る貞観津波(869)が今回の津波に匹敵するものであった。そのまた南の福島県の海岸に至っては、今回の津波に比較されるような大きな津波の記録がほとんど見つかっていない。



東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(<http://www.coastal.jp/ttjt/>)による速報値(2011年4月30日参照)に基づいて作成

図-3 東北地方太平洋沖地震津波と明治・昭和三陸地震津波の比較(暫定値)

このようなことから、今回の津波は1,000年に1回という希な、あるいは、広範囲に高い津波が襲ったという意味ではこれまでに記録されたことのない巨大津波であった。明治三陸津波と貞観津波を合わせたもの以上の規模であったと言えよう。

#### 5. 東北地方太平洋沖地震津波による海岸保全施設等の被害

##### 5.1 計画天端高と津波痕跡高の比較

海岸の防護は主に堤防や護岸などの海岸保全施設を建設することによって行われてきた。これらの施設の

設計には、設計外力となる津波や高潮が設定される。設計外力に対して、海岸線背後の地盤が十分に高い場合には、必要に応じて陸域の浸食・洗掘を防ぐために海岸護岸が建設される。したがって、護岸の場合には、護岸の天端高は背後の地盤高とほぼ同じになり、護岸は背後の地盤に支えられるような状態になる。

海岸線付近の地盤高が低い場合には、設計外力に対して浸水を防ぐために海岸堤防が建設される。したがって、海岸堤防の天端高は背後の地盤高よりも高く、堤防が地盤上に立ち上がった状態になる。

河川の河口では、護岸や堤防によって河口を閉じてしまうわけにはいけないので、河川の両岸に沿った上流で、津波・高潮による水位が洪水による水位を下回る所まで堤防が延長される。しかし、これでは高い堤防の延長が長くなりすぎるので、河口に水門が建設され、そこで津波・高潮を止めるようにしている所も多い。

港の内部では、岸壁を始めとして荷役機能を果たすために海岸線に海岸保全施設を建設することはできない。このような場合には、港の背後の適切な位置で防護を行う。一般に陸側から港に入る入口に立つ壁がそれであり、胸壁と呼ばれる構造物が建設される。胸壁を切れ目なく連続させてしまうと港への出入りができなくなるため、要所には開閉可能となるように陸閘が設けられる。

以上のような海岸保全施設を繋ぎ合わせて連続的なものにし、津波・高潮に対する防護ラインが形成されている。防護ラインによって防護される、陸側の地域を堤内地と呼び、港内などのように防護ラインの外側（海側）の地域を堤外地と呼んでいる。防護ラインをどのように強固にしても、人間の経済活動が活発に行われる堤外地が存在することは軽視してはならない。

現状の海岸の防護態勢に対して、今回の津波の規模が未曾有のものであっただけに、海岸保全施設をはるかに超える越流が生じて陸域に甚大な被害をもたらすとともに、海岸保全施設そのものの被害も尋常なものではない。海岸堤防などの海岸保全施設の計画堤防天端高は、津波または高潮を勘案して決定される。まず、三陸北部では明治・昭和三陸やチリ地震津波（1960）で決まっているのに対し、三陸南部ではチリ地震津波で決まっている。さらに、仙台平野や福島海岸では検討対象津波として大きなものがないため、より厳しい条件となる高潮・高波の条件によって天端高が決まっている。

これに対して、今回の津波の痕跡高は、北三陸の一部を除いて、計画天端高を大きく超えた。岩手県北端の野野町は岩手県では数少ない、津波が計画天端高を超えなかった地域である。平内駅地先のように、津波が海岸堤防より低かったために越流することなく、無被害であった。しかし、これは例外的であり、津波は海岸保全施設を大きく超えて越流し、地域に壊滅的な被害を与えるとともに、海岸保全施設そのものが被災する例が多かった。

## 5. 2 波返し工の破損

堤防や護岸に対する被害で、最も目立ったのは、波返し工（パラペット）の破損であり、図-4に一例を示す。この部分が津波によって折れ、さらには飛ばされて陸上に散乱している状況はあちこちで見られた。この部分は波しぶきを防ぐ程度の目的で設けられるものであるために、設計条件として、本格的に波や津波の力が作用することを考えていない。したがって、今回のように設計条件を超えた津波が作用すると、その力に耐えられなくなって折れてしまう。しかし、この部分の結合に十分な鉄筋を配置すれば、1m程度ではあるが有効に機能させること



設計上不要だが、鉄筋を配置を入れることで、強度を増せば津波に有効

図-4 波返し工の破損

ができるようになる。

### 5. 3 海岸堤防の被災

海岸堤防の被害では、図-5に示すように、堤防を越えて越流した津波が堤防の背後を流れ落ちる時に、摩擦力または負圧によって背後の面のコンクリートを引き剥がし、または裏側の法先を洗掘して、そこから堤体内部の土砂が抜け出して中が空洞になったところで、前面（海側）のコンクリート壁も水圧で倒れるというパターンが典型的であった。



図-5 海岸堤防の被災

海岸線のところどころが切れると、堤防上からの越流とともに、そこから津波が入り込んだ。さらに、引き波のときに、堤防の切れ目から速い流れで水塊が海に戻ったようで、その周辺に洗掘の跡が見られる場合が多い。しかし、このように堤防が完全に破壊してしまった箇所は、海岸堤防全体から見るとそれほど多くはなかった。

このような破壊の形態に対しては、堤防の裏側（陸側）のコンクリート壁が剥がれにくいように天端の部分と一体的にすることや、裏側の洗掘が起これないように水たたき（堤防の裏側に続く水平な床部分）を長くするなど有効と思われる。

押し波と引き波の両方によって全壊に至った海岸堤防もしばしば見かけられた。まず、押し波によって波返し工またはそれに近いコンクリートの打ち継ぎ目などが破壊して上部が陸側に散乱するとともに、おそらく洗掘が進行し、その後の引き波によって下部が海側に移動・転倒するというものである。

津波が堤防を越えて越流する場合でも、越流水深が小さければ背後に対する防護機能は有効に働き、被害は軽減されている。しかし、ある限度を超えると、堤防の効果は薄れるとともに、堤防自体が破壊する事例

が増えるようである。また、新旧の堤防で高さの異なるものが隣接している場合には、新しく天端の高い堤防の被害が小さかった例が見られた。

堤防の建設が完成していないような場合には、未完成の部分からの越流が大きな被害をもたらす。港内の状況などにより一部であっても堤防を建設できないような場合に注意が必要である。

#### 5. 4 護岸の被災

護岸の被災例では、波返し工の破損が最も多く見られたが、津波の引き波によって海側に転倒する例もしばしば見られた。護岸の場合は陸側は地盤の受動土圧に支えられているので、背後の洗掘がひどくならない限り、容易には破壊しない。しかし、護岸を含む海岸保全施設は越波や越流を許容することを前提とはしていないため、引き波に対しては構造的に強度が弱く、転倒を起こした護岸が多い。越流した津波の引き波が作用することを前提とする場合には、護岸の海側の法先の根固工の強化が必要である。

#### 5. 5 港湾・漁港の被災

港湾や漁港では、堤外地側の港内の被害を軽減するために、港の重要施設は高いところに置く、防水性を高めるなどの工夫が必要となる。また、堤外地ではある程度の被災は避けられないことなので、被害を拡大させず、軽減するような工夫や、被災した後に早く復旧できるような態勢を整えることも重要になる。

港の機能維持は、それ自体の経済活動とともに、発災後の緊急対策における物資輸送の拠点として重要な役割を持っている。このため、港が被災した場合には、ただちに航路や泊地に沈んでいる障害物を取り除くという啓開作業を行う必要が生じる。加えて、使用可能な岸壁を確認・準備し、陸域へのトラック輸送などのアクセスを確保することにより、港の機能が回復していくことになる。緊急物資を大量に速く届けるためにも港の機能回復は緊急性を要することである。

胸壁の中には、地盤面のところから地上部全体が折れてしまい、それが内陸側に散乱している例が見られた。地盤面のところは曲げモーメントが最大になる部分なので、設計条件を超える津波に対しては折損してしまったのである。

港などへの出入りのために胸壁の途中に設けられる陸閘では、鋼鉄製の扉体が曲がったり、取り付け部が破断して扉体がとんだりしたケースがしばしば見られた。しかし、駆体は破壊されずに残っているケースがほとんどであり、基礎や構造の強度を増すことができれば、超過外力に対しても破壊しない構造物の設計が可能となることを示唆している。

海岸保全施設とは異なるが防波堤に関しては、日本では混成式防波堤と言って、多くの場合、まず海中にマウンドを作り、その上に直立部となるケーソンを置く。これに大きな津波が作用すると、まず防波堤が津波を受け止めることによって、海側の水位が上昇する。そのために海側の圧力が高くなって、陸側に押す力が発生し、それが限界を超えるとケーソンが動き出し、ついにはマウンドから落ちてしまい、海面から見えなくなる。

小さな漁港などで、設計波高が小さく、耐えられる外力が小さなところでは、津波によって多くの防波堤が流され、多くの部分が見えなくなった場所もある。

釜石湾には湾口防波堤があり、津波によって相当な被害を受けて、海面からは消えた部分も相当あった。しかし、海面のすぐ下に大部分の防波堤ケーソン部が残っており、これが最後まで釜石湾への津波の浸入を軽減していた。このため、湾口防波堤の内外の津波の高さは格段に違っており、釜石市は大きな被害を受けたとは言え、相当被害が軽減されたと言える。釜石湾の場合は、設計対象が明治三陸津波という大きな津波であったことから、機能を発揮できたと言える。それに対して大船渡の湾口防波堤はチリ地震津波(1960)であったため、老朽化も重なって、それほどの効果は発揮されなかったと見られる。

このような防波堤の被災に対しては、ケーソンの根固を強化することが考えられる。

防波堤の海側は、波の反射を防いだり、防波堤にかかる波力を軽減したりするために、消波ブロックで被覆される場合が多く見られる。この場合、津波が防波堤を越流する際に、海側では防波堤を乗り越えるための上昇流が生じ、それに乗って消波ブロックが防波堤の上に打ち上がる現象も見られた。64t という大型の消波ブロックでも打ち上げられてしまっていた。

### 5. 6 水門の被災

河口などに設けられた水門は、左右につながっていた堤防が破壊しても、躯体としては形状を維持していたケースがほとんどである。水門は、基礎工および上部工ともに水門を支持し得るように大きな外力条件が設定されるので、単体として全壊するようなことは見られなかった。これ自体としては、超過外力に対しても粘り強い構造物と言えようが、単位長さあたりの費用は大きなものとなっている。

### 5. 7 砂浜・干潟の浸食

津波が海岸線に近づくと強い流れを伴うので、土砂移動を引き起こす。砂嘴と言って海岸付近に細長く砂が堆積した地形は、周辺に比べてやや高い、凸型になっている。このような場合には、津波の流れが凸部の土砂を削り取るように作用することと、さらに今回の地震では広い地域で地盤沈下を起こしているために、砂嘴が大規模に減少した例が見られる。仙台市宮城野区の蒲生干潟や、釜石市鶴住居地区の根浜での砂浜・干潟の地形変化は著しく、今後の変化も含めて注目すべきである。これらは、海岸の環境を大きく変化させることになり、生態系の変化をもたらす可能性がある。

また、砂浜の背後に海岸堤防が建設されている場所も多い。仙台海岸の北部では、砂浜の背後に海岸堤防が建設されているために、津波による土砂移動を阻止することができ、結果として浸食を防ぐことができた。これは、隣接する蒲生干潟が国設仙台海浜鳥獣保護区の特別保護地区であるために、同様な海岸堤防は建設されていなかったため、大きな地形変化を起こし、ラグーン環境が著しく変化したのと対照的である(図-6)。



図-6 海岸堤防前面の砂浜の防護

また、仙台海岸南部では、堤防や突堤が建設されていたにもかかわらず、浸食が著しく、堤防の陸側までえぐり取られるような形で、ラグーンのような地形が形成された。この地域では、以前から海岸侵食が著しく、砂浜がほぼ消失してしまっていたために、津波が堤防に直接あたって堤防を破壊するとともに、大きく浸食したものと思われる。

定量的な評価は今後に待たなければならないが、広い砂浜を安定的に管理することは、堤防が被災しにくい状況を作り出し、それが砂浜自体の浸食を防ぐとともに、背後地域を防護するという本来の目的の達成にも寄与するということにつながっていると考えられる。

## 5. 8 家屋の被害

家屋については、木造では浸水深が約 2m で全壊するという目安が与えられている。これは、1階の上部の高さに相当するが、およそこのような目安で木造家屋が流出しているのが認められた。逆に、浸水深が 1m 以下では流出には至らず、最悪でも床上浸水となる。そこで、津波先端が坂道を駆け上がったところなどを見ると、地盤高の変化によって、ほとんど被害を受けていない状態と、全壊の状態の家屋が隣り合うという場所が見られた。このような地点では、被害の有り無しの境界が明瞭に現れる。

また、鉄筋コンクリートの建物は抵抗力が大きいので、外観上は多くが残っている。しかし、一部の建物では鉄筋コンクリートといえども転倒した例が見られ、その中には液状化と思われる現象により、PC 杭ごと抜け出していたものがあつた。今後、多くの津波避難ビルが必要となるが、その際に注意すべき点である。

集落で被害を受けなかったのが、十分な高地移転を実行した集落である。釜石市唐丹本郷地区では、高地に移転した集落まで津波は浸入しなかった。また、もし津波がこの高さまで駆け上がったとしても、その背後の坂道を上るとより高いところがあり、2重の備えができていいる。安全という意味からは、今後の対策を考える上で、理想的な例となる。

## 6. 今後の復旧・復興の方向性

### 6. 1 最大クラスの津波に対する減災と、設計津波に対するハード整備

この津波による甚大な被害を受け、国においては「東日本大震災復興構想会議」を始めとする様々な検討組織が設置され、対策が議論されてきた。6月26日にはこの会議から復興への提言がなされるとともに、同27日には「中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」の中間取りまとめと提言がなされた。

そこでは、津波対策を考える上で、最大クラスの津波と、比較的頻度の高い一定程度の津波の2種類を対象とすることになっている。最大クラスの津波に対しては減災の考え方に基づいて、住民の避難を軸に、土地利用、避難施設、防災施設の整備などの手段を尽くした総合的な津波対策により人命を保護することを目標とする。また、比較的頻度の高い津波は海岸保全施設の設計に用いる津波（設計津波）であり、人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保を目標とする。したがって、海岸保全施設はこの設計津波に対して健全に機能する構造とするが、さらに最大クラスの津波に対しても倒壊しない粘り強い構造物にするための技術的再検討が求められている。

これを受けて同28日には、海岸4部局の「海岸における津波対策検討委員会」において、設計津波の設定手法が決定され、海岸管理者に通知されることになった。

### 6. 2 粘り強い構造物の開発

このような流れにおいて、設計津波は多くの場合、従来の設計に用いられたものと同程度になる見込みであり、これに対して構造物が所要の性能を有するように設計することは困難なことではない。しかし、最大クラスの津波に対する減災効果をいかに実現するかは今後の大きな課題である。これまで、津波警報が発せ

られても多くの住民は避難行動を取らなかったし、今回の津波による海岸保全施設の被災状況を見ると、大きく費用を増加させることなく、最大クラスの津波に対しても倒壊しないで、ある程度の減災効果を発揮するようにすることは容易ではない。

しかし、今回の津波に対しても形状をとどめた構造物が減災効果を発揮したことを見ると、設計津波をある程度超えても粘り強く形状を維持し、減災効果を発揮するような構造にしていくことは是非必要である。その上で、最大クラスの津波に対してもある程度の効果が期待できるような技術開発がなされれば、人命の保護に直接寄与するものとなるとともに、土地利用や避難において、それを見込んだ計画を立てることが可能となり、日常生活や産業活動での制約条件が緩和されることになって、より自由な活動が可能になる。効果が大きく、技術的に可能な部分については積極的に最大クラスの津波への対応をすべきである。また、最低限でも設計津波を多少超えた津波に対しては、何らかの機能が発揮できるように設計すべきである。

### 6. 3 土地利用と避難におけるソフトとハードの連携

海岸保全施設を粘り強くしていく一方で、最大クラスの津波やさらにはそれをも超える可能性がないとは言いきれない津波に対して海岸保全施設で完全に防護するのは不可能である。また、漁業や港湾活動など、どうしても防護区域外で行わなければならない活動もある。したがって、土地利用や避難による人命保護が不可欠となる。

その際、土地利用については、安全で利便性の高い環境を整備するために、ソフトな地域計画とハードなインフラ整備との連携が不可欠である。また、避難についても、避難訓練や防災学習によって国民が適切で迅速な避難行動が取れるようにすると並行して、普段は意識しなくても、いざとなった時にすぐ近くに避難施設が見えて利用できるように避難施設を整備する必要がある。人々の意識だけに頼っては、年とともに防災意識が薄れることは歴史が示すところである。

明治三陸や昭和三陸の津波後などに高地移転が実施された。今回も適当な高地があり、背後の避難路からさらに高地に避難できる場所に移転することは、粘り強い、二重の安全という意味で望ましい。しかし、漁業、農業、港湾活動、海洋レクリエーション活動などを考えると、今後も海岸付近で活発な活動が展開することは必然である。昼間に津波が来襲することを想定すると、ここで活動中の人々の生命を守る必要がある。そのために、海岸付近に津波避難ビルや避難タワーなどの避難施設が一定距離以内に配置されている必要がある。さらには、安全性を高めるためには、より安全な避難施設の選択が可能となるように、多数の避難施設をネットワーク化することが望まれる。このような避難施設の必要性を勘案して、避難のみを目的とする施設を多数整備することは容易に実現することとは思えない。現実的な選択としては、公的施設やさらには住宅までも高層化して積極的に海岸付近に建設し、それらを避難施設としても活用することによって、避難施設を密に配置した津波安全体制が実現すると思われる。長年の間には海岸付近での活動や、さらには居住までが行われるという過去の事実からすれば、被災地の復旧・復興に際しては、まず海岸付近に津波避難の橋頭堡を築くことを必須条件として、その後の地域の産業や生活の展開を行うようにするのがよいと思われる。

明治三陸、昭和三陸、今回の3津波を比較すると、津波に対する知識は広がっていると言えるのかもしれない。それでも多くの人命が失われた今回の津波を教訓として、今後再び悲惨な被害を受けないようなソフト・ハードの備えが必要である。

### 参考文献

- 1) 渡邊偉夫(1985): 日本被害津波総覧, 東京大学出版会, 206p.
- 2) 阿部壽・菅野喜貞・千釜章(1990): 仙台平野における貞観11年(869年)三陸津波の痕跡高の推定, 地震, 第2輯, 第43巻, pp. 513-525.

3) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2011): <http://www.coastal.jp/ttjt/> (2011. 4. 30参照)

### 付録1 津波の波速の導出

津波の波長は通常数百 km であり、太平洋の平均水深 4km と比べても十分に長いので、長波の仮定が成立し、水圧は静水圧分布となる。また、特に沖合においては水深に比べて津波の波高は十分小さいので、微小振幅の仮定が成立し、水深と波高を加えた合計の長さを考えるような場合には、波高の分を無視して水深分だけをとればよいことになる。

付図-1において津波が左から右に波速  $c$  で進行しているものとする。波速を求めるには、時間  $\Delta t$  の間に波が進行する距離  $\Delta x$  を求めればよい。図中の実線と点線は、それぞれ基準時点とその後  $\Delta t$  の時点での水面形を表している。奥行きを単位長さとして、幅が  $\Delta x$  で、高さが海底から水面までの直方体の水柱に着目する。この水柱は左右から水圧を受けているが、互いにキャンセルする分を差し引けば、正味の全水圧は大きな三角形から小さな三角形を除いた台形の部分であり、さらに微小振幅の仮定から上端の小さな三角形の部分は無視できるので、正味の全水圧は濃く塗りつぶした平行四辺形の部分になる。ここで、水柱の左右の水位差を  $\Delta\eta$  と表せば、左右の水圧の差は  $\rho g \Delta\eta$  ( $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力加速度) であるから、全水圧  $f$  は、

$$f = \rho g \Delta\eta h \quad (1-1)$$

と表される。また、この水柱の質量は  $\rho \Delta x h$  であるから、(加速度) = (力) / (質量) という運動の法則を使って、加速度  $\alpha$  は、

$$\alpha = \frac{\rho g \Delta\eta h}{\rho \Delta x h} = \frac{g \Delta\eta}{\Delta x} \quad (1-2)$$

と表される。したがって、 $\Delta t$  の間の速度の変化  $\Delta u$  は

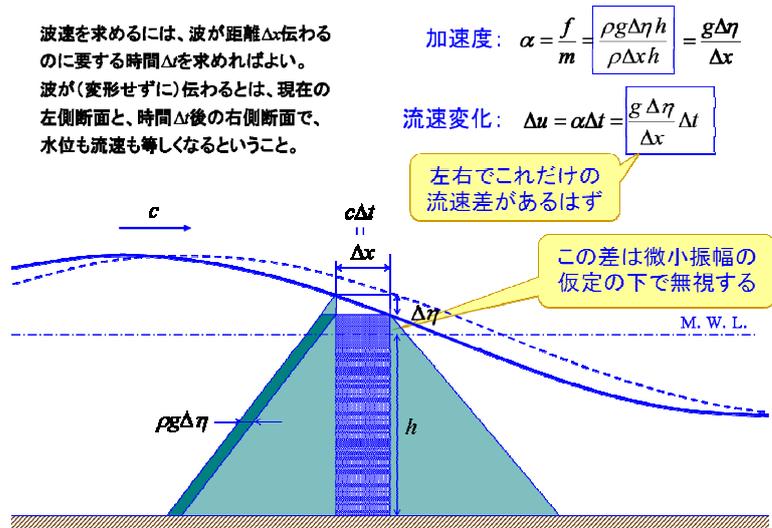
$$\Delta u = \alpha \Delta t = \frac{g \Delta\eta}{\Delta x} \Delta t \quad (1-3)$$

となる。そして、これは基準時点で  $\Delta x$  離れた左右の断面での流速の差に等しいことになる。

次に付図-2を見ると、 $\Delta x$  離れた左右の断面から水が流入出しているが、その流速は上で求めた  $\Delta u$  だけ左側からの流入が大きい。したがって、時間  $\Delta t$  の間に余分に流入する水の体積は  $\Delta u h = \frac{g h \Delta\eta}{\Delta x} (\Delta t)^2$  となるが、これは斜線を付けた体積増加分、すなわち幅  $\Delta x$  の水柱の水位上昇分に対応する体積増加分  $\Delta\eta \Delta x$  と等しいはずであるから、

$$\frac{g h \Delta\eta}{\Delta x} (\Delta t)^2 = \Delta\eta \Delta x \quad (1-4)$$

である。これより直ちに、



付図-1 線形長波理論 (その1: 運動方程式)

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \sqrt{gh} \quad (1-5)$$

であるが、定義により波速  $c$  は  $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$  で

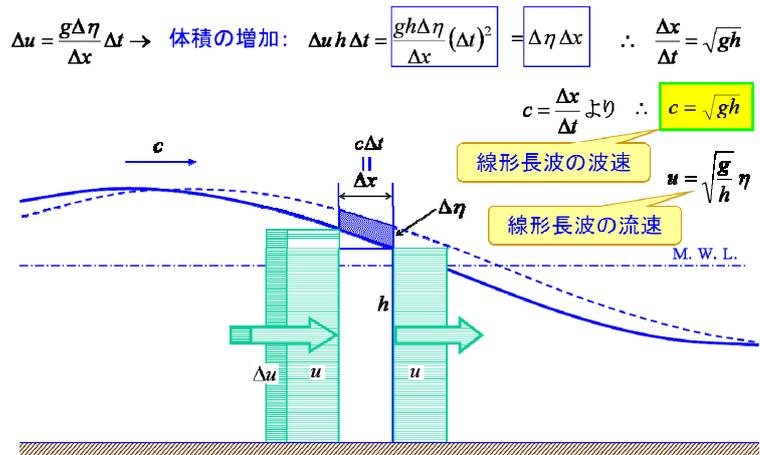
あるから、結局

$$c = \sqrt{gh} \quad (1-6)$$

を得る。これが線形長波（津波）の波速である。

また、式(1-3)と(1-5)を組み合わせると、水の流速  $u$  は、水面変位  $\eta$  を用いて下記のように表される。

$$u = \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \quad (1-7)$$



付図-2 線形長波理論 (その2: 連続式)

### 付録2 水深と幅の変化による津波の波高変化の導出

水深や湾の幅が変化した場合の津波の波高の変化は、津波によって輸送される全エネルギーが不変であることから求められる。

付図-3のように、津波によって単位幅・単位時間あたりに輸送されるエネルギー（エネルギーフラックス）は、エネルギーをもった水粒子そのものが輸送される分と、津波が進行方向に向かってなす仕事の分との和である。前者の中

(エネルギーフラックス)  
 = (エネルギーの輸送) + (仕事)  
 = (単位体積あたり全エネルギー) × (流入量) + (圧力) × (作用面積) × (移動距離)  
 = [(単位体積あたり位置エネルギー) + (単位体積あたり運動エネルギー)]  
 × (流速) × (断面積)  
 + [(静水圧) + (動圧)] × (流速) × (断面積)  
 ~ (動圧) × (流速) × (断面積)

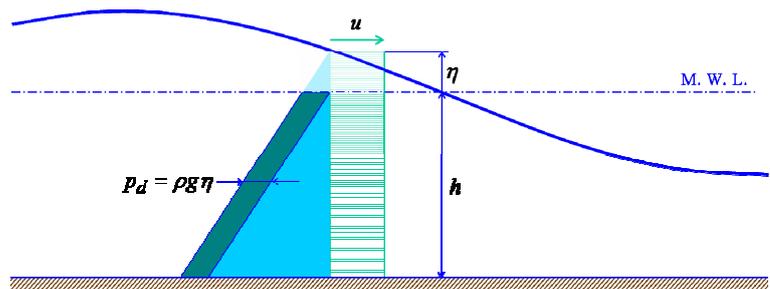
付図-3 波によるエネルギーフラックス

中のエネルギーは 1)位置エネルギーと 2)運動エネルギーの和となる。後者の仕事は (力) × (距離) だが、水の運動の場合、水圧がかかる断面が流速に応じた距離を移動することによって生じる。水圧は 3)静水状態の圧力 (静水圧) と、4)波による変動分 (動圧) とに分かれる。ここで、1)の単位体積あたりの位置エネルギーは  $\rho g z$  ( $z$  は静水面を基準とする上向きの鉛直座標) であり、3)の静水圧は  $-\rho g z$  であることからキャンセルされてしまう。また、2)の運動エネルギーは、微小振幅の仮定の下では微小量である流速の2乗であり、さらにその輸送量を求めるのに再び微小量である移動速度を乗ずるので、結局微小量の3乗のオーダーの量となり、これは微小量の2乗のオーダーとなる4)に比べて無視できる。

したがって、付図-4により、4)の動圧による仕事を求める。動圧  $p_d$  は水面変位による水圧の変動分であり、

$$p_d = \rho g \eta \quad (2-1)$$

となる。また、流速  $u$  は式(1-7)で表されるから、ある瞬間のエネルギーフラックス  $F$  は、



付図-4 線形長波のエネルギーフラックス

$$F = \rho g \eta \times \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \times h = \rho g \eta^2 \sqrt{gh} \quad (2-2)$$

であり、時間的な平均をとることによって

$$\bar{F} = \rho g \overline{\eta^2} \sqrt{gh} \quad (2-3)$$

となる。ここに、 $\rho g \overline{\eta^2}$  は波の単位面積あたりのエネルギー  $E$  であり、それが  $\sqrt{gh} = c_g$  という輸送速度で運ばれることを意味している。なお、水面変動  $\eta$  として波高  $H$  の正弦波計を仮定すると、

$$E = \rho g \overline{\eta^2} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2-4)$$

となる。最終的に、単位幅あたりの波のエネルギーフラックスは

$$\bar{F} = E c_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{gh} \quad (2-5)$$

と表される。

いま、水深  $h_o$  において幅  $b_o$  の断面を波高  $H_o$  の津波が通過したとして、水深が  $h$  に、幅が  $b$  に変化した断面での波高を  $H$  とすれば、両断面での津波の全エネルギーフラックスが等しいことから

$$\frac{1}{8} \rho g H_o^2 \sqrt{gh_o} b_o = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{gh} b \quad (2-6)$$

であり、これより、

$$\frac{H}{H_o} = \left(\frac{h_o}{h}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{b_o}{b}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-7)$$

となる。これはグリーンの法則と呼ばれる。