

Lessons from Tsunami Disaster and Future Views for Hard Countermeasures

11

2. 調査箇所および調査の視点

2.1 調査箇所

1) 宮城県内

仙海市若林区荒浜~井土浦:图-1(a)参照

①：荒浜，②：海浜公園冒險広場，③：井土浦，④：東浦，⑤：井土浦

仙台市若林区今泉～竹野花：図-1(a)参照

⑥：仙台東部道路

岩沼市二の倉～寺島：図-1 (b) 参照

⑦：二の倉，⑧：北新田，⑨：寺島

亘理町荒浜～吉田：図-1(c)参照

⑩：阿武隈川右岸，⑪：阿武隈川右岸，⑫：阿武隈川右岸，⑬：阿武隈川右岸，⑭：阿武隈川右岸河口，⑮：荒浜海岸部，⑯：荒浜港，⑰：吉田

2) 千葉県内

旭市足川浜～下永井：図-1 (d) 参照

A : 足川浜 (西), B : 足川浜 (東), C : 矢指ヶ浦,
D : 西足洗, E : 三川, F : 横根, G : 下永井

3) その他

茨城県ひたちなか市，同大洗町，宮城県陸前高田市

2.2 調査の視点

本調査の結果は、ハード対策に関するヒントを得るために、以下の8つの視点で整理することにした。



図-1(a) 調査箇所位置図：仙台市荒浜～井土浦



図-1(b) 調査箇所位置図：岩沼市二の倉～寺島



図-1(c) 調査箇所位置図：互理町荒浜



図-1(d) 調査箇所位置図：千葉県旭市

- 視点1：海岸護岸，防潮堤の機能
- 視点2：河川堤防の機能
- 視点3：保安林，防潮林の機能
- 視点4：高盛土・砂丘の機能
- 視点5：水域の機能
- 視点6：土盛・土堤防の機能
- 視点7：道路盛土の機能
- 視点8：表面の被覆の機能

以上の視点に係る被害および無被害の事例を適宜引用しながら、津波のハード対策に関する知見を3章で提示する。

3. 被害状況および知見

8つの視点に関して、津波のハード対策に関する知見は、以下のように提示できる。なお、相互に係る事項については、重複することがある。また、写真中の黄色の矢印は、津波（押し波）の概略の方向を示す。

3.1 視点1：海岸護岸，防潮堤の機能

海岸護岸あるいは防潮堤（以下、防潮堤と呼ぶ）は、津波を阻止する最前線の構造物として位置付けられるが、本地震の津波に対して機能したのか、あるいはするのかが視点1の課題認識である。

ここで、防潮堤の構造では、直立堤，斜堤などの基本構造に加えて、表のり部，天端部，裏のり部の構造が機能の評価対象になるが、津波による洗掘では裏のり先にも目を向ける必要がある。

なお、消波ブロック，離岸堤には津波の抑止機能があると思われるが、調査が不十分であるので考察外とする。

以下に、防潮堤の被害，無被害の状況から推察される知見を示す。

【知見1】緩傾斜構造は，耐侵食性があるが，津波の遡上を促す恐れがある

近年，海岸での親水空間づくりを目的として防潮堤が緩傾斜化されている。写真-1は旭市下永井付近であるが，道路面から堤防天端までが1.1m，自歩道の天端幅は7m，緩傾斜堤の表のり面の高さは2.5m程度のやや高い緩傾斜堤である。道路沿いの海拔は3.1mであり，1kmほど西側の下永井なぎさりフレッシュ事業海岸付近（横根F）よりも1mほど海拔が低い。従って，仮に，津波高が下永井リフレッシュ事業の海岸と同じ（6.1m）とすると，浸水深は下永井の方が1mほど高い3m程度，堤防天端の越流深は1.9mになる（4章，表-1）。

写真-2は砂の埋塞により高さが低くなった緩傾斜堤であるが，遡上は少ない。従って，写真-1のように高さが緩傾斜堤の場合は，津波が斜面に沿って遡上するので，防潮機能が低下する恐れがある。なお，緩傾斜堤の遡上は，地元の人の口からも聞かれた。



写真-1 緩傾斜堤（高い）：下永井G



写真-2 緩傾斜堤（低い）：荒浜①

【知見2】防潮堤の前面の地形が，防潮機能を低下させることがある

写真-3は直立堤の箇所であるが，背後の盛土の侵食度を隣接する河口の西側と比較すると，こちらの東側の方が天端の越流深が大きいことが想定される。この原因として，東側では写真-3のように直立堤との間に溜地があるものの，前浜には防潮堤の高さと同じレベルの堆積地形があり，これが緩傾斜堤のような役目を果たし，防潮機能が低下し，津波高が高くなったためと思われる。



写真-3 防潮堤の前浜で発達した地形：三川E

【知見3】表のりのブロック張りの斜堤は，裏のりの侵食の影響を受け易い

写真-4はブロック張りの緩傾斜堤であるが，被害は見られない。一方，写真-5は表のりがブロック張り，裏のりが格子枠の防潮堤であるが，表のりから裏のりまで決壊した状況である。このような破壊形態は随所で見られ，表のりのブロックが，背後地に飛ばされている。他にも

天端の欠落、裏のりの侵食、さらに裏のり先が洗掘され、大部分は渚地になっているが、深い箇所は滞水している。

写真-6 は裏のりの侵食による天端までの侵食であり、**写真-7** は浅い侵食ではあるが、変状がない RC 直立堤の状況である。

このように、表のりは侵食されにくいものの、裏のりの侵食が先行し、その影響を受けて、天端や表のりが決壊すると思われる。



写真-4 ブロック張り防潮堤の表のり：二の倉⑦



写真-5 裏のりの侵食による天端、ブロック張り防潮堤表のりの崩壊：北新田⑧



写真-6 裏のりの侵食による天端までの侵食：荒浜⑭



写真-7 裏のりが侵食（浅い）されても残る RC 直立堤：井土浜③

【知見 4】直立堤、波返し構造が望ましいが、波返しは構造に注意が必要である

写真-8 はパラペット（高さ 1m）付きの高さ 2m の直立堤であり、自転車専用道を挟んで高さ 2m の盛土がある。防潮機能からは、越流、遡上を直接的に防止する直立堤が望ましいと思われる。

写真-9 は海岸線にほぼ平行した防潮堤であり、下部の斜め部材と上部の曲面部材を組み合わせた波返し付きコンクリート護岸の決壊状況である。当地では延長 100m 程度の範囲で 3 箇所、やや南側の構造変化部付近で 1 箇所が決壊し、流出している。コンクリート部材の厚さは 0.5m であり、一般部では前面の砂面からの防潮堤の高さは 2.1m であるが、決壊箇所の残留防潮堤は 4m 露出している。決壊断面は鉛直できれいな面であり、継ぎ目に相当している。3 箇所の決壊箇所を含む区間では、防潮堤の裏側は天端と直立壁、それ以外の区間では、天

端とコンクリート版による裏のり面で構成されている。津波による波返し部分の決壊箇所もあるが、大部分は裏天端、裏のり面を構成するコンクリート部材の侵食、流出である。3 箇所の決壊箇所のうち、最も北側の 1 箇所では、緊急対策工事（大型土のう、石材による抑え）が進行中である。

南側の鳥の海都市公園の辺りでは、波返しコンクリート護岸の前に砂浜から 1.1m 高の直壁に、2m 程度の幅のコンクリート製の表天端が後付けされている区間がある。**写真-10(a)** は表天端、波返し、裏天端、裏のり面を構成するコンクリート部材において、最も被害が激しい箇所であるが、**写真**のように 4 部材の全てが流出している。これは、前面に天端を設けることにより、波返し効果が低減したためと思われる。裏のり先は越流により侵食され、幅 8m 程度の落堀になっており、背後の幅 80m 程度の松林がほとんど流出している。ここで、**写真-10(b)** の衛星写真によれば、**写真-10(a)** の箇所はこの激しい破壊区間（写真中央）の北端に位置することが分かり、南側の当該区間の背後には、落堀（写真では緑色のゾーン）が形成されていないことが分かる。つまり、防潮堤の全体的な破壊により、落堀が形成されるに至らず、あるいは形成されても、その後、再び埋塞し、浸水が直接的に保安林に作用したと思われる。なお、落堀の減勢効果は、知見 15 で再考する。



写真-8 直立堤の防潮堤：三川 E



写真-9 波返し構造の防潮堤の被害：荒浜⑭



写真-10(a) 波返しと前面天端の組構造の防潮堤被害：荒浜⑭



写真-10(b) 写真 10(a)の背後の浸水状況：荒浜⑭

【知見 5】防潮堤の天端は舗装で被覆するのがよいが、裏のりが侵食しない場合は、土堤でも耐える場合がある

防潮堤、堤防、盛土では、構造的に最も高い位置にパラペットの上端あるいは天端があるが、津波はこの高さを超えた場合に、堤内地が浸水することになり、所要の高さの維持が浸水の防止、抑制になるので、津波に対する構造的なコントロールポイントと言える。従って、これらが津波に対して安定していることが重要である。

天端の被災を見ると、写真-11 のようにアスファルト舗装の場合、全体的には被害が少ないが、写真-12 のように、舗装の表面が剥離する場合もある。これは、越流時の流速が大きいと思われる。なお、天端の被害形態として、写真-13 のように陥没する場合があるが、その原因は裏のり（この場合は、格子枠ブロック張り）の侵食にある。

一方、写真-14 のように、直立堤の背後の盛土が侵食していない箇所がある。直立堤の設置個所が少ないこと、あるいは越流規模が大きかったためか、写真-15 のように脊面の盛土が侵食され、流出した場合が多く、防潮堤の脊面の盛土が残り、植生が健全であったのは、この箇所だけである。なお、コンクリートの直立堤と土堤との構造の境界、変化部が弱部になると見ることができる。



写真-11 被害のない防潮堤天端の舗装：下永井 G



写真-12 堤防天端の舗装の剥離：井土浦⑤



写真-13 裏のりの侵食による天端の侵食：二の倉⑦



写真-14 直立防潮堤の背面に残った盛土：井土浜③



写真-15 直立防潮堤の背面の盛土の侵食：荒浜①

【知見 6】裏のりのブロック張りの斜堤は、ブロックが流出することがある

写真-16 および写真-17 は、それぞれブロック張りの裏のりであるが、前者は面的に一体化しているが、後者は格子枠内のブロックが独立している。従って、前者の場合は、表面侵食を受けにくく、のり先の洗掘が課題となるが、後者の場合は個々のブロックが剥離し、飛散することがある。



写真-16 防潮堤の裏のり先の洗掘：荒浜①



写真-17 ブロックが飛ばされた裏のり：二の倉⑦

【知見 7】越流の程度により、裏のり先の侵食、裏のりの侵食の発生の規模が異なる

津波が防潮堤を越流すると、裏のりの傾斜部を流下するが、特にのり先での侵食が顕著であり、その規模が大きいと、全体的な崩壊に結びつく。ここでは、ブロック張りなどの構造を対象とし、土堤については後述する。

写真-18 は比較的小規模と思われる越流によるのり先の侵食の状況である。海浜でのアクセス部分は、天端幅 4.0m で、表と裏のいずれも、ブロック 2 枚張りで高さ約 2m の斜堤である。表側は 1m 程度、裏側は 1.2m 程度露頭している。裏のり先は簡易舗装の道路であるが、その一部は浅い箇所 0.8~0.9m、深い箇所 2m、洗掘されているが、水は溜まっていない。従って、越流程度が小さければ、小規模な洗掘に止まる。

さらに洗掘が進行すると、写真-19 のように洗掘深や洗掘幅が拡大する。裏のり先の洗掘深さは、1.5m 程度であり、全体的に滞水はしていないが、やや深い所では水溜まり状に滞水しているが、小規模である。

写真-20 では、裏のり先の落堀のため、海側の状況は確認できないが、裏のりは高さ 3m 程度の 3 段の格子枠であり、のり先は洗掘され、幅 5m 程の落堀になっている。背後の松林は、落堀から 20m 程度の範囲でなぎ倒されているが、その先は立木が目立つ。

写真-21 では表のりがブロック張り、裏のりは格子枠であり、写真-20 と同様な洗掘状況であるが、大部分は窪地になっており、深い箇所は滞水している。防潮堤の銘板によれば、T.P.7.2m であり、天端幅は 4m で、裏のりが崩壊している。

写真-22 の防潮堤では、波返し斜材部分から決壊している箇所が多数見られ、その他の場所でも、裏天端およびのり面のコンクリート部材が侵食され、流出している。のり先は幅 20m 程度の大規模な落堀が発生しており、その背後の松林は数十 m の範囲でなぎ倒されているが、その先は立木の状態にある。このような大規模な落堀は、亘理町の荒浜でも見られる（**写真-10(a)** 参照）。



写真-18 裏のり尻の侵食（小規模）：荒浜①



写真-19 裏のり尻の侵食（中規模）：二の倉⑦



写真-20 裏のり尻の侵食（大規模）による落堀：寺島⑨



写真-21 裏のり尻の侵食による格子枠の崩壊：北新田⑧



写真-22 裏のり尻の侵食（大規模）による落堀：吉田⑩

3.2 視点 2：河川堤防の機能

河川の河口は海岸線の開口部であるため、津波は河口から上流に向かって遡上するが、河川堤防が地震動により沈下、すべりなどの被害を受けている場合、そうでなくとも津波高が堤防高を超える場合は、堤内地に津波が越流して、浸水被害をもたらす恐れがある。本地震での

津波でも名取川、阿武隈川、旧北上川などで遡上が発生しているが、河川堤防が津波に対して機能したのか、あるいはするのかが視点 2 の課題認識である。

ここで、堤防は土構造であること以外は、防潮堤と類似の構造であるので、表のり部、天端部、裏のり部の構造および裏のり先の状況が機能の評価対象になる。

以下に、河川堤防の被害、無被害の状況から推察される知見を示す。

【知見 8】洪水と同様に、津波でも水衝部は弱部であり、越流する可能性が高い

写真-23(a) は阿武隈川河口から 1.8km 上流右岸にある亘理大橋直下流の河川堤防である。ブロック張り護岸であり、水面（5/1、9:30 頃）からパラペット（高さ 0.7m）上端までの高さは 6.2m である。天端幅は 6.3m であるが、パラペットが飛ばされた箇所では、裏のりの侵食が見られる。さらに、ここから 600m ほど下流でも、**写真-23(b)** のように同様な被害が発生している。**写真-24** は同地点の堤内地の様子であるが、津波が住宅地を突き抜けたことが分かる。なお、同様な現象は、2004 年台風 23 号による出石川の破堤箇所（左岸 5.3km 地点、出石町鳥居地先）でも見られているが、津波の流れに強弱があることを示すものと考えられ。

一方、**写真-25** は**写真-23(a)** と**写真-23(b)** の間の区間であり、パラペットの損傷は無く、裏のりの侵食も軽微であり、堤内地の家屋も大きな損傷は受けていない。

ここで、これらの 3 箇所の被害の差異は、**図-1(c)** により説明できる。つまり、図中の矢印の方向を河口から進入した津波の進行方向と見なすと、実線の矢印は堤防の法線に対して或る角度があるが、破線の矢印はほぼ平行であることから、津波の波力や水深に差異が生じたと推察できる。言い換えれば、洪水と同様に堤防の法線が湾曲した水衝部は、津波の場合も水位が上昇して越流の可能性が高くなることを示唆する。

ここで、**写真-26** は阿武隈川河口から亘理町の鳥の海付近の衛星写真であるが、**写真-23** および**写真-25** における堤防の法線形状および背後の被害の差異が分かる。

なお、**写真-27** は対岸の左岸側の堤防の様子であるが、河川側の津波高は右岸ほど大きくは無いように思われる。

さらに、他の事例として、**写真-28** は河川が河口から写真の左方向に蛇行している箇所であり、この場合も水衝部の越流により、直立壁の河川護岸の背面が侵食されている。河口付近の盛土の越流状況によれば、津波高は 4.5m 以上と想定されるが、**写真-28** の自転車専用道橋の高欄（破損している）の上端辺りに相当する。なお、10m 程度背後にある九十九里ビーチラインの道路では、海拔が 3.2m である（4 章、表-1）。

以上から、河川における津波の遡上を考える場合、水衝部に注意が必要であり、堤防高で対処するか、堤防法線を変える（津波の進行方向に並行）などが望ましい。ここで、洪水では上流からの水衝部、津波では下流からの水衝部である。

なお、**写真-23** の堤防に近接した亘理大橋では、高さ 1m の高欄が破損しており、津波（飛沫？）が達したことを示すが、水面（5/1、9:30 頃）からの高欄の上端の高さは約 10.4m である。従って、堤防のパラペットの高さと高度差の 4.2m（4 章、表-1 では津波高を 10m と仮定しており、3.8m）が、堤防での越流深と考えられるが、**写真-25** の箇所の堤内地での被害状況を見ると、それほど大きな越流深とも思えない。



写真-23 (a) 越流による河川堤防護岸の被害：阿武隈川右岸⑪



写真-23 (b) 越流による河川堤防護岸の被害：阿武隈川右岸⑪



写真-24 津波が堤内地を抜けた状況：阿武隈川右岸⑫



写真-25 越流が見られない河川堤防：阿武隈川右岸⑬



写真-26 阿武隈川河口～荒浜～鳥の海付近：地震後



写真-27 阿武隈川左岸の河川堤防：亘理大橋下流



写真-28 河口からの越流での河川護岸の背面侵食：三川 E

【知見 9】通常の河川ブロック張り護岸であれば、表のりの損傷は殆んど無い

河川護岸あるいは堤防では、表のりが津波を受ける面になるが、被害は皆無である。写真-29 はブロック張り護岸であり、越流した箇所であるが、表のりの損傷は見られない。これは、津波はのり面に沿って水位上昇するが、津波の進入流速では侵食するような波力にならないためと思われる。なお、後述の土堤・土堤防でも、芝などの植生に対する侵食は少ない。



写真-29 損傷が無いブロック張りの河川護岸の表のり面：阿武隈川右岸⑭

【知見 10】堤防の天端は、アスファルト舗装あるいは相当の幅の植生があれば、侵食は少ない

堤防の天端は、道路として利用されていることが多く、アスファルト舗装であることが一般的であるが、洪水時の越流と同じように、アスファルト舗装の天端は津波に対しても侵食されにくい。写真-30 は桜づつみとするために、腹付けして拡幅した堤防であるが、若干の侵食痕はあるが、天端全体としては保持されており、拡幅された天端は侵食しにくいといえる。

ただし、写真から分かるように、裏のりは侵食しやすい。当該事例では、裏のりは 3 段（上から 1.5m, 2m, 2m）構造であるが、いずれの裏のり面も侵食が見られる。ただし、この地点は亘理橋の右岸直上流であり、相当規模の越流があったと思われるが、堤防全体としては、一部の侵食はあるが、機能的には大きな損傷とは言えない。



写真-30 天端幅のある裏のり 3 段の河川堤防：阿武隈川右岸⑮

【知見 11】堤防の裏のりは、越流により侵食され、のり先に落堀ができることもある

河川堤防の場合も、越流によりのり先が侵食されて、

写真-31 のように落堀が形成されることがある。これは、洪水時の越流でも見られるが、水位上昇が主な表のり面と比較して、裏のり面ではのり面を下る津波の流速が加速されるためである。その流速の規模に関しては、裏のり高さ、裏のり表面の構造（ブロック張り、植生）、越流深、越流時の流速などが関係すると思われる。例えば、写真-80 のように、越流深が浅く、裏のり高が低く、裏のり面が植生で被覆されているような場合は、侵食は発生しない。



写真-31 越流による河川堤防の裏のりの侵食と落堀の形成：阿武隈川右岸⑩

【知見 12】堤防の背後からの津波により、護岸が侵食され、損傷することがある

河川での津波の遡上は、河側からの津波の進入が前提になっているが、写真-32 および写真-33 は、河川護岸の背面から津波の浸水があり、護岸が侵食、倒壊した事例である。河口から蛇行した河川であり、海岸線から 70～100m 程度で海岸線に平行になるような法線となっていたために、海からの津波を背後からも受けている。

また、水路の場合であるが、写真-34 は海岸線から 250m 程度離れた位置にある貞山堀の海側の矢板護岸であり、海側からの津波により、背面が侵食された状況である。この付近では護岸が川側に傾斜した箇所もある。

このように、河川の河道側からの津波だけでなく、背後からの津波を考えること必要な場合がある。



写真-32 河川護岸の背後からの津波による侵食：三川 E



写真-33 写真-31 の横からの状況：三川 E



写真-34 貞山堀の矢板護岸の背後の侵食：井土浜③

3.3 視点 3：保安林、防潮林の機能

仙台平野の太平洋沿岸には、広い所では海岸の防潮堤から 600m にも及ぶ幅がある松林が帯状に分布している。また、陸前高田市では高田松原と呼ばれる保安林が海岸沿いにあった。本地震の津波は、この松林を突きぬけて、あるいはなぎ倒して内陸部に浸入し、津波に加えて、流木によっても甚大な被害を及ぼしたため、その防潮機能は発揮されなかったとも言われているが、松林、つまり保安林は津波に対して機能したのか、あるいはするのかが視点 3 の課題認識である。

ここで、保安林は、海・陸方向の幅、海岸線方向の延長、樹木密度、樹種、樹高などが基本特性として考えられるが、樹林の残存状況、後背地の浸水およびそれに起因する被害が評価対象になる。

なお、津波に対しては“防潮林”の呼称があるが、防潮を意図した林であればよいが、当地の保安林がそのような位置付けになっているか把握できていないので、本文では“保安林”と呼ぶ。

以下に、保安林の被災およびその影響の状況から推察される知見を示す。

【知見 13】保安林、樹木は津波の力を減勢できる

写真-35 は、津波で残された家屋の状況であるが、海岸線から 700m 程度離れている。家屋と海岸の防潮堤の 650m ほどの間には貞山堀があるが、その大部分は松の保安林であった。津波により、写真の手の状況のように、保安林は殆どが流出してしまったが、その中にも残存している箇所もあり、その一例が写真-35 である。これによると、家屋の 1 階部分は損傷を受けているが、基本的な構造は残っており、その原因が海側にある残存した保安林（幅 200m ほど）であることは容易に想像ができる。このように、保安林が無ければ、津波は直接的に家屋に作用するので、保安林といえどもある程度の減勢効果はあるはずであり、この事例がその証である。また、保安林が倒れても、その場に残れば、下流域での流木被害を減ずることにもなる。

この場所を上空から見たのが写真-36 であり、写真-35 の住宅は、写真中央下に見え、住宅の存否と保安林の流出の有無の対応が明確に示されている。この場所の津波に流された、および残存した保安林の様子は、写真-47 からも分かる。

仙台平野の保安林の他に、写真-37 の旭市の事例がある。これは下永井海岸なぎさリフレッシュ事業の海岸であり、防潮堤は緩傾斜化されている。防潮堤の背後は、自転車道、さらに九十九里ビーチラインがあり、その先が住宅地である。事業の一環として、防潮堤の海側ののり肩付近には、写真-37 のように、幅 10m、長さ 15m ほどの松林の植栽帯が法線方向に 15m ほどの間隔で設置されている。つまり、長さ 15m の松林の空いた空間があるが、空いた箇所と松林がある箇所を比較すると、松林がある箇所の方が、写真-38 のように住宅の被害が小さいようにも思われる。

また、写真-39 は、保安林の中を海岸線に向かって作られた道路盛土である。貞山堀の水門から防潮堤まで 280m 程度であり、天端幅 6m で、地震前からのり肩には（工事用ののり肩保護のためか）鉄板が幅 1m で全長に置かれていた。盛土は高さが 3m 程度であり、のり面は芝である。道路盛土の中間部分の被害は無いが、水門

側は全体的に侵食を受け、アスファルト舗装が剥離し、鉄板が飛ばされている。他方、防潮堤側は両のり面およびのり尻が侵食し、防潮堤の裏のりの侵食部分に繋がっている。水門周辺の貞山堀では、写真-40 のように、堤防の侵食、重機の転落が見られるとともに、対岸の上流 30m ほどでは、ブロック張りを含めた堤防全断面全体の被災のためか、土のうによる堤防締切りの応急復旧工事が行われている。これらから、保安林を取り除いてオープンな空間にした防潮堤からの道路が、津波の通路になり、被害を大きくしたと思われる、言い換えれば、保安林の減勢効果を減じていたということになる。

さらに、写真-41 は若林区の県道 10 号沿いで、5, 6 本の松に囲まれた祠が、高さ 1m 程度の小さな丘の上に残っている様子である。ここは海岸線から 1km ほどであるが、海岸線から 3.5km ほどにある仙台東部道路まで津波が達しており、漂流物も流されていることから、この祠も津波の浸水を受けているはずであるが、その姿を止めているのは、松の木の減勢の効果によると考えられる。



写真-35 保安林により流出を免れている住宅：東浦④



写真-36(b) 津波後の保安林と写真-35の住宅（中央下）：東浦④：上が海岸方向



写真-37(a) なぎさリフレッシュ事業に合わせて整備された保安林：横根 F



写真-37(b) 写真-37(a)の上空からの状況：横根 F



写真-38 写真-37の保安林の山側の状況：横根 F



写真-39 海側から見た海岸への進入路：井土浜③



写真-40 写真-39の突き当たりの水門付近の被害：井土浜③



写真-41 松に守られた祠：荒浜①

【知見 14】保安林の幅は、大きいほど減勢効果がある

保安林の減勢効果の大小に関係する要因の一つとして、その幅があると思われる。ここでは、保安林の幅の効果に着目して事例の考察をする。

写真-42 は、保安林の幅が異なる住宅地における津波後の衛星写真である。ここは、600m ほどの幅がある保安林を切り開いて造成されており、保安林の狭小部は 50m 程度であり、広い箇所は、元来、写真のように二重になっていたかは不明であるが、300～450m の幅である。防潮堤から 250m ほどに貞山堀があるが、写真-43 は貞山堀から山側を遠望した状況であり、上の写真は幅が広い保安林の背後地であり、下の写真は幅が狭い保安林の背後地である。衛星写真および現地状況のいずれによっても、幅が広い保安林の背後地の方では住宅が残存し、幅が狭い保安林の背後地の方では住宅はほとんど流出していることが分かる。これらの住宅の有無の差異は、写真-42 ではより明確である。このように、保安林の幅が住宅の被害の程度に関係があることが示唆される。

また、類似の事例として、写真-44 は津波後の衛星写真であるが、海岸線から 900m 辺りに貞山堀（写真の下）があり、写真-42 と同様に、元々、幅 600m 程度の保安林があった場所を切り開いて、貞山堀と海岸の間に住宅や工場が建てられた地区である。そのため、海側に残さ

れた保安林の幅は50m程度である。海岸近くには、市民プールの施設があるが、50m幅の保安林というものの、道路が通っていたり、松の木の生え方がまばらである印象が強く、防潮機能は小さいと思われる。そのため、写真-45のように、海に近い住宅は流出しており、宅地内のアスファルト舗装の道路の山側は洗掘されたりしている。なお、写真-44を詳細にみると、工場の建物が残留しているが、一般住宅との構造の違いはあるものの、工場位置での保安林の幅が住宅地の3倍程度あることから、保安林の幅の効果も示唆していると思われる。

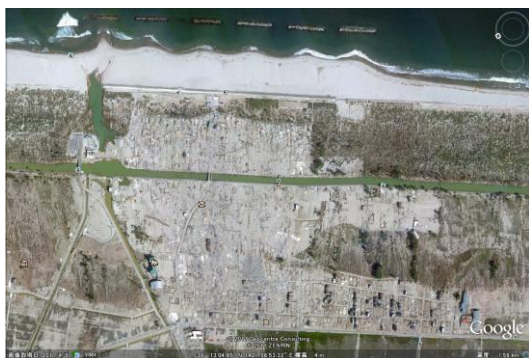


写真-42 保安林を開拓した住宅地〔地震後〕荒浜①



写真-43(a) 幅が広い保安林の背後地：荒浜①



写真-43(b) 幅が狭い保安林の背後地：荒浜①



写真-44 保安林の開発による住宅、工場：二の倉⑦



写真-45 保安林幅が狭い防潮堤背後の住宅被害：二の倉⑦

【知見15】落堀が保安林に対する減勢に効く

写真-46(a)は津波により堤防の裏のり先に形成された落堀と残された保安林の状況である。また、写真-46(b)は写真-46(a)の残された保安林から左方向に目を転じて、山側を遠望しているが、津波で流出した保安林が目立つ。さらに、同じ場所で角度を変えてみたのが写真-47であるが、これを見細く見ると、落堀の位置(白○)では保安林が残り、のり先が洗掘されていない位置(黄○)では保安林が流出していることが読み取れる。これらの状況は、津波により新たに出来た落堀が、津波の減勢に係ることの示唆である。

さらに、以上の現地状況に加えて、衛星による上空からの状況が写真-48であるが、写真中央上の落堀(緑色のゾーン)の途切れた箇所が、写真-47でのり先が洗掘されていない箇所である。同箇所の背後(写真の下側)は保安林が流出している状況にあるのに対して、同箇所の左側の落堀の背後の保安林が、残存している様子がうかがえる。

なお、既出の写真-10(b)では防潮堤が全体的な破壊をすると、落堀が形成されないことに言及した。さらに、同写真の上方あるいは下方にある落堀の背後を見ると、保安林は或る程度、残留している様子が分かるが、その前面にある防潮堤では、落堀が形成されており、かつ裏のりは侵食までの被害に止まっている。このように、防潮堤が全体的な破壊をすると、落堀が形成されない傾向があると思われるので、落堀の形成による減勢効果を期待する場合は、防潮堤が破壊しないこと、させないことが前提条件になると思われる。

なお、落堀は、或る程度の規模がある場合には、視点5で着目する水域に相当すると考えることができ、その減勢効果と見ることもできる。



写真-46(a) 盛土の裏のり尻に形成の落堀と保安林：東浦④



写真-46(b) 写真-46(a)に隣接した保安林の流出箇所：東浦④



写真-47 盛土の裏のり尻の侵食と保安林：井土浦⑤



写真-48 写真-47の上空からの状況：井土浦⑤
：上方が新設堤防と落堀

【知見 16】保安林の樹木は、密生していると減勢効果は高いが、樹高、浸水深に依存する

防潮林の幅が狭い箇所において、樹木密度が小さい、あるいは倒木により低密度化した箇所は、津波が通りやすくなるため、住宅地の被害が大きいように思われる。写真-49は津波の保安林の通り易さと被害の差異を比較したものであり、上の写真は防潮堤からの遠望であり、樹木あるいは立木の密度差がうかがえる。他方、下の写真はその背後の住宅地であり、津波の通り易い箇所（写真の黄色の矢印）では、アスファルト舗装の剥離があり、路肩の洗掘が大きいといった状況にある。他方、津波の通り難い箇所（写真の白色の矢印）では、アスファルト舗装の剥離が無く、宅地の侵食の程度も小さい。

写真-50は小規模な津波が、密生するやや低木の松の保安林に浸水した後の状況であるが、倒れている保安林は海側の限られた範囲に止まり、密な保安林の減勢作用が効いていたと思われる。他方、写真-51は大規模な津波が密生する、やや高木の松の保安林に浸水した後の状況であるが、保安林はほとんどが倒されており、密な保安林の減勢効果はそれほど発揮できなかったと思われる。

以上から、保安林の植生密度の津波の減勢効果の大小は、樹高や浸水深に依存すると考えられる。



写真-49 津波の通り易さと被害の差異：写真上は防潮堤から遠望・写真下は背後の住宅地：荒浜①



写真-50 津波（小規模）後の保安林：足川浜 B



写真-51 津波（大規模）後の保安林：井土浜③

【知見 17】裏のり先付近の樹木は、のり尻の侵食の影響を受け、その程度により、根洗い、倒木、流出することがある

防潮堤の裏のり先は、樹木が植生されていることが多いが、越流により裏のり先が洗掘される。写真-52は侵食により、倒木あるいは流出した状況であるが、写真-53は侵食が写真-52より軽微であり、樹木も残存している。さらに、侵食が小規模な場合は、写真-80のように発生しないこともある。



写真-52 裏のり尻で樹木の侵食：荒浜①



写真-53 裏のり尻での樹木の侵食：西足洗 D

3.4 視点 4：高盛土・砂丘の機能

仙台平野は平坦であるため、本地震の津波は内陸の奥深くまで達するとともに、避難の際も、数や場所が限られる学校などの比較的高さのある施設に依らざるを得ないといった状況にあったと思われる。

従って、背後に山地が控えている三陸海岸のように、高台の位置付けが明確にできない当地ではあるが、仙台市若林区荒浜の現地調査の際に、海浜公園の一角に人工的に造成された冒険広場の高盛土があることが判明した。そこで、このような人工高盛土が津波に対して機能したのか、あるいはするのかが視点 4 の課題認識である。

なお、視点 4 の高盛土は、前述の河川堤防、後述の土盛・土堤防と類似の構造であるが、相当規模の土構造物として、堤防などと区別している。さらに、類似の防潮機能が期待できるとと思われる自然砂丘にも目を向ける。

ここで、冒険広場の高盛土は隣接する貞山堀の堤防天端から大凡 11.5m の高さがあるが、浸水深、盛土のり面の侵食状況などが評価対象になる。また、自然砂丘では、高さ、勾配などが評価対象になる。

以下では、この高盛土および旭市の自然砂丘、大洗海岸の自然砂丘を引用し、それらの状況から推察される知見を示す。

【知見 18】所要の高さがある高盛土は、越流を免れる

津波は津波高あるいは浸水高と言われるように、その高さは重要な要素の一つである。そして、基本的には、津波高、さらに遡上高以上の海拔があれば、越流しないので、浸水も発生しないことになる。

海岸公園冒険広場になっている高盛土は、東側の貞山堀と西側の県道 10 号の間にある幅 50m 程度、長さ 400m 程度の船型形状であり、海・陸方向、つまり、東西方向に細長い。さらに、高低については、写真-54(a)のように海側（写真の右方向）の貞山堀側が高く、県道に向かって傾斜して低くなっている。高盛土と貞山堀の間は 20m ほど離れているが、貞山堀の天端から 3m ほど低い窪地となっており、コルゲートパイプを設置して土盛りをして、貞山堀から高台へのアクセス歩道が付けられている。高盛土への遊歩階段があるが、登り切った遊歩道位置の高さは、貞山堀の天端から 5.5m 程度である。

高盛土は、階段を上った遊歩道から、さらに、お椀型に土盛された構造であり、その高さは 6m ほどである。従って、貞山堀の天端からは大凡 11.5m の高さになる。なお、高盛土の海側は、写真-57 のように急な崖状になっているが、崖を登り切った所の遊歩道では、二本の鉄柱に支持された園内の案内看板（ほぼ海に面した向き）が根元で折れて、17m ほど、また、ベンチは 10m ほど移動している。また、遊歩道の外周には生け垣があるが、海側の生け垣が流出している。これらのことから、少なくとも遊歩道より 1~1.5m 程度の高さまでは津波が達したものと推察される。ここで、貞山堀（堤防高 3m）の水面あるいは高盛土の周辺地盤面からの高盛土の頂点の高さは、14.5m であり、水面からの浸水高は 9.5~10m と推定される。なお、高盛土の外周のり面は、写真-54(b)のように下部で表面侵食が見られるが、致命的な侵食は受けていない。

さらに、以上の現地状況に加えて、写真-55 は地震後の衛星写真である。上方の緑色の帯が貞山堀であり、流線型の高盛土を回り込むようにある倒木の様子から、津波の流れ方が見てとれる。また、範囲は定かではないが、高盛土の下側（山側）の半分程度の変色状況から、低い盛土部分が浸水していることがうかがえる。なお、写真の左側の空き地は、漂流物の集積場である。

なお、写真-56 は展望台から見た高盛土の南側の様子であるが、写真-54(b)からも分かるように、隣接してあった保安林の立木は見当たらない。



写真-54 津波を避けた高盛土：海浜公園冒険広場②



写真-54(b) 写真-54(a)の海側からの状況：冒険広場②



写真-55 上空からの高盛土：冒険広場②：上が海側



写真-56 高盛土からの俯瞰（南側）：海浜公園冒険広場②

【知見 19】水衝構造の高盛土であっても、自然植生のり面の侵食は僅かである

冒険広場の高盛土は流線形に近い形状をしており、その先端方向から津波が来て、両側面に分流して、流下して行ったことになるが、津波が当たる先端部分は水衝部に相当すると考えられる。従って、このような形状の高盛土の津波に対する安定性が問題となるが、その一つが水衝部および側面部のり面の侵食である。

高盛土の側面の斜面は写真-54(b)、海側の先端部分は写真-57 のような植生斜面であり、通常の堤防と同程度あるいはやや急な勾配である。それぞれの侵食状況について、表面が侵食されている箇所もあるが、盛土全体の安定に及ぼすようなものではない。



写真-57 津波を受けた高盛土の前面：海浜公園冒険広場②

【知見 20】自然砂丘は、規模に応じた防潮機能が発揮できるが、緩勾配では遡上に注意が必要である
冒険広場の高盛土は人工盛土であるが、砂丘は自然の作用により創出された自然盛土と言えるので、その意義を考える。

写真-58 は茨城県大洗町の大洗港の海側から、北側の住宅地を遠望した様子であるが、岸壁から約 200m から先は、大洗海岸から続く砂丘地形であり、高さ 20～30m 程度の高台になっている。元来、砂丘斜面上に南向きの住宅地が形成されていることが分かる。ここで、岸壁から 100m 程度離れたコンビニエンスストアでの浸水深は約 1.5m であるが、海面からの岸壁高を 2m とすると、津波高は概ね 3.5m 程度と想定される。従って、今回の津波は砂丘斜面の下端部に達した程度と思われるが、さらに高い津波が襲来する場合は、砂丘斜面を遡上すると思われる。

那珂川の河口の南側では、約 1.5km に渡る大洗海岸があり、海水浴場になっている。この場所は自然砂丘の地形であり、沿岸道路および併置された大規模駐車場は、写真-59 のように砂丘の途中斜面で海面から 15m 程の高台にある。道路の背後は松林に囲まれたゴルフ場であり、さらに高い位置になる。なお、砂浜に近い位置の柵には、特に変状らしいものは見られないが、今回の地震によるこの付近の津波高は 3～4m とされているものの、この程度の津波高では、浸水、遡上は全く問題ないことは容易に想像がつく。このように、沿岸に存在する相応な高さの自然砂丘の地形は、津波に対して効果が期待できる。

写真-60 は防潮堤から 50m ほどでの状況であり、中央の樹木に覆われた自然砂丘の背後に住宅があるが、海側は整地されており、津波により被災した家屋が撤去されたと思われる。この自然砂丘は 2～4m の高さがあるが、既出の写真-37(b) では、右上部の上下の二つの道路に挟まれた木立の場所であり、西側（写真の左側）に川がある。砂丘の背後にある住宅の住人によれば、津波は隣接する河川方向から砂丘を回り込んで浸水し、浸水深は 2m 程度であったと言う。なお、砂丘の一角には、写真-61 の山側に向かって置かれた三峰神社があるが、道路面から 2.5m ほどの祠は浸水しなかったという。写真-60 のビーチライン位置での海拔は 4.1m(写真-61 参照)であり、浸水深の 2m から津波高は概ね 6.1m 程度と算定できるが、防潮堤上の自転車道はビーチラインの道路面から 0.7m 高いので、防潮堤位置の越流深は 1.3m 程度になる(4 章、表-1)。

このように、砂丘高さと浸水深との関係で、自然砂丘が防潮機能を発揮することがあること、回り込みがない連続性が必要であることが示唆される。

なお、写真-62 は自然砂丘であり、ほぼ安息角の勾配で形成されていることが分かる。自然の作用では、それほど急な斜面の形成にはならないので、津波に対しては、緩傾斜堤と同様に遡上が懸念されるので、注意が必要である。



写真-58 港側からの砂丘上の住宅地の遠望：大洗港



写真-59 高さのある自然砂丘の海岸：大洗海岸



写真-60 津波を避けた自然砂丘地形：横根 F



写真-61 写真-60 の砂丘背後の三峰神社と道路沿いの海拔表示：横根 F



写真-62 勾配の緩い自然砂丘：足川浜 A

3.5 視点 5：水域の機能

仙台平野の太平洋沿岸には、保安林が帯状に分布しているが、その内部あるいは山側の外縁を南北に走る貞山堀がある。また、随所に井土浦、閑上港、広浦、荒浜港、鳥の海といった相応の規模の水域が存在する。本地震の津波は、これらの水域に流入し、通過したと思われるが、これらの水域が津波に対して、何らかの機能を果たしたのか、あるいは果たせるのかが視点 5 の課題認識である。

ここで、水域について、水路では水路幅、堤防構造が、港湾などでは面積、護岸構造などが基本特性として考えられ、被害状況、後育地の浸水およびそれに起因する被害が評価対象になる。

以下に、水域の被災およびその影響の状況から推察される知見を示す。

【知見 21】陸域の水域は、津波の減勢、貯留に資する

水路、港湾などは、或る水深、面積、さらには水面上に空間がある領域であり、津波が浸入した場合、その空間の規模に応じた貯留機能に加えて、乱流状態が形成されることによる津波の減勢が想定される。実際の減勢効果の定量的評価は難しいが、事例から可能性を探る。

写真-63 は津波が浸入し、通過した貞山堀であるが、防潮堤から 250m ほどに位置し、幅 30m 程度、水面から天端までの高さが 1.2m ほどであり、水深は 1m 程度と思われる。写真からでは、若干の貯留の可能性は想定できるが、減勢については不明である。なお、浸水深が小さければ、この程度の貯留機能も有効となる。

写真-64 (a) は荒浜漁港の水域の状況であるが、上の写真は海側からの浸水が水域に入り込む側を、下の写真は水域から出る側である。特に、興味を引くのは、下の写真であり、護岸の背後の家屋の損傷が、水域の背後にない住宅地よりも小さいように思われる。この住宅地にも水域以外からの浸水があった可能性があるが、漁港水域の減勢効果がうかがえる。また、漁港水域の規模は縦(海陸方向) 400m、横 200m 程度で、岸壁の水面高は 1.5m 程度であり、相応の貯留機能があると思われる。なお、当漁港は湖の“鳥の海”の水域の一角にあるため、河口からの津波の遡上も考慮する必要がある。

以上の現地状況に対して、写真-64 (b) は地震後の衛星写真であるが、漁港の湾内の西側(写真の左側)の住宅の状況と、北側および東側のそれは異なっており、漁港水域が被害軽減に関係することが示唆される。



写真-63 津波が通過した貞山堀：荒浜①



写真-64 (a) 荒浜港の沿岸：写真上は背後の海側から流入・写真下は港の北側の様子：荒浜港⑩

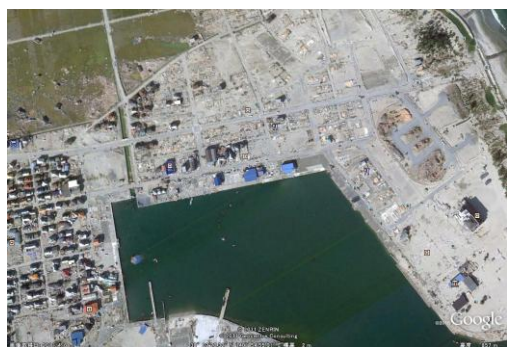


写真-64 (b) 津波後の荒浜港周辺：右が海側

【知見 22】新たに形成される落堀は、水域として津波の減勢に資する

裏のりの侵食については、知見 7 では越流による裏のり先の侵食、知見 17 では裏のり先付近の樹木に対する裏のりの侵食の影響、知見 15 では落堀の保安林に対する減勢効果について考察したが、ここでは、落堀を水域として捉える。

今回の現地調査では、洪水時と同様に、防潮堤、堤防などの裏のり先で形成される落堀が随所で見られているが、津波の浸水中に新たに形成される水域として見ると、対策に関係すると思われる新たな知見が見えてくる。

写真-65 は代表的な落堀であるが、写真-46 と同様に背後の保安林は、全てではないが残存した状態にある。落堀の保安林に対する津波の減勢効果については知見 15 で考察しているが、別に保安林だけでなく、住宅であってもよい。つまり、落堀を水路や漁港水域と同様に、津波の減勢に資する水域空間と捉えると理解し易やすい。言い換えると、防潮堤や堤防が決壊しない範囲において、落堀の形成を許容すること、さらには、裏のり先に落堀に相当する水域空間を設けることなど、防潮堤の設計に結びつくヒントになる。

なお、写真-65 などは落堀の規模が小さい(幅 5m 程度)が、写真-22 の防潮堤では、裏のりの崩壊が発生しているものの、落堀としては幅 20m 程度の大規模なものである。



写真-65 堤防の裏のり尻に形成された落堀：井土浦⑤

【知見 23】水路は堤防、護岸と同じ防潮機能があるが、裏のり面の侵食に注意が必要である

貞山堀のような水路に期待できる津波に対する機能には、3 つあると考えられる。一つは防潮機能であり、これは堤防の高さとその安定性が課題である。二つ目は減勢機能、三つ目は貯留機能であり、幅、深さなどの規模が課題である。後者の二つは知見 21 で考察しているので、ここでは前者の安定性、つまり、耐侵食性を考える。

写真-63 でも津波に対する裏のり(左側の堤防の表のり)では侵食されているが、表のり(右側の堤防の表のり)では軽微である。写真-66 は上記の裏のりの近景であり、住宅地内のアスファルト舗装道路(残存)と同レベルの堤防天端ののり肩から裏のりでの侵食が分かる。

写真-67 は別な場所の貞山堀において、津波に対する表のりの状況である。水面から下部のブロック張りが 2m、上部の土堤が 1m である 3m の高さの堤防であるが、表のりの侵食は見られない。なお、この場所では貞山堀の山側に隣接して、新たな堤防が 1m 高く造成されており、その表のり面の張り芝だけが全て剥離しているが、それに関しては、知見 28 で考察する。

写真-68 は貞山堀に近接した 2 箇所の山側の堤防であり、堤防の水面高は 3m ほどであるが、上の写真の箇所

では津波により堤防が決壊しているが、裏のりの侵食が進行した結果である。一方、裏のりの侵食の程度が小さい場合は、下の写真のように天端のアスファルト舗装の剥離や裏のりの小規模な侵食に止まる。



写真-66 貞山堀の津波が下る側のり面：荒浜①



写真-67 貞山堀の海側の表のり：東浦④



写真-68 貞山堀の山側の堤防：写真上は破堤・写真下は侵食止まり：井土浦⑤

【知見 24】相応の幅の遠浅海岸，湿地帯であれば，津波の増勢を抑制できる

写真-69 は名取川左岸河口付近に広がる井土浦とそれに隣接する湿地帯である。両者の間に貞山堀があるが、海岸線の砂浜から湿地帯の山側縁までの距離は 400～500m にも及ぶ大規模な平坦地形である。後掲の写真-71 では、下方に新設堤防があるが、湿地帯の山側縁に相当する。津波に対して、この広大な空間の機能に興味があるが、人工リーフと同様、ここを津波が進行する間は、少なくとも津波高あるいは水位の変化（増加）の抑制が期待できると思われる。

茨城県ひたちなか市には、阿字ヶ浦漁港から南下した所に、白亜紀層海岸がある。この海岸は東向きであり、写真-70 のように海岸の防潮堤は数 m と比較的低いが、海側は白亜紀層が 50m 程度以上露頭したリーフ状の磯である。海岸沿いの県道沿いの住宅で明確な津波被害は見られない。定量的評価はできないが、本事例のように、砂浜海岸ではなく、防潮堤の前浜がリーフ状の磯海岸になっている場合も、人工リーフと同様に、津波の増勢（波高あるいは水位の増加）を抑制する機能があるように思われる。

以上の 2 事例は、いずれも自然地形であるが、その利用あるいは人工化といった視点から、津波の抑制対策のヒントになると思われる。



写真-69 広大な谷地、浦などの存在：井土浦⑤



写真-70 防潮堤の前の白亜紀層海岸：茨城県ひたちなか市

3.6 視点 6：土盛・土堤防の機能

現地調査の際に天端を道路として利用する堤防を新たに設置した箇所が判明したので、河川堤防（前述）、高盛土（前述）、道路盛土（後述）と類似の構造物であるが、区別して考察する。

写真-71 は地震後の衛星写真であるが、海側の貞山堀（写真中央の左右の緑色ゾーン）と新設堤防は、写真-69 の湿地帯を囲むように配置されており、その延長は 1.5km ほどである。なお、新設堤防の北側（写真の左側）は貞山堀と一体構造で東浦④へ、また、南側も貞山堀と一体構造で名取川の河口方向に延伸されている。写真から明らかなように、海沿いの砂浜は部分的に侵食されており、海岸線の形状を止めていない。また、砂浜と貞山堀の間にあった井土浦は、侵食、埋塞して原形を止めていない。さらに、貞山堀の山側（写真の下）の堤防は 5 箇所が決壊し、新設堤防の天端は所々で白くなっており、アスファルト舗装が剥離していることが分かる。

この堤防は、既存堤防の嵩上げで出来た堤防ではなく、適切な施工管理の下で新たに整備された堤防であり、本地震による津波の越流被害を受けているが、このような新設堤防が津波に対して機能したのか、あるいはするのかが視点 6 の課題認識である。



写真-71 津波後の貞山堀と新設堤防：井土浦⑤

なお、類似の構造として、旭市の海岸では防潮堤の背後に防潮を意図した盛土があるので、併せて考察する。

ここで、河川堤防と同様に、表のり部、天端部、裏のり部の構造および裏のり先の状況が評価対象になる。

以下では、新設堤防の被災状況から推察される知見を、以下に示す。

【知見 25】海側の表のり面は、張り芝などにより、耐侵食性は確保できる

写真-72 は新設堤防の津波後の表のりの状況であるが、張り芝に砂の堆積は見られるものの、顕著な侵食はほとんど見られない。

写真-71 において、湿地の北側（写真の左下）で貞山堀に流入する河川があるが、この南隣は津波の集中により、特に越流が激しかったと思われる箇所であり、写真-76 のように延長 100m 程度に渡って、天端が 1m 程度、侵食されている。写真-73 は、この天端の侵食箇所とそうでない箇所の境界部の状況であるが、手前が侵食されたのり面、奥が下部に堆砂が見られるものの、侵食されていないのり面である。注意すべきは、手前ののり面は芝が剥離し、表面が洗われているが、僅かな侵食に止まっており、盛土本体が侵食された状況では無い点である。

なお、写真-71 の湿地帯の南端（写真の右側）の堤防では、表のり、天端、裏のりの侵食が発生している箇所（写真-84）があるが、その原因は知見 28 で考察する。

写真-74 は、0.5m 程度と想定した越流による盛土の海側の表のり面（奥側）の状況であり、部分的な侵食が見られる。また、写真-75 は防潮堤に隣接する盛土の表のり面の侵食状況である。このような大規模な侵食がある原因として、前面の防潮堤が緩傾斜堤になっているため、津波が直接的に表のり面に当たったためと思われる。

以上から、特別な条件でない範囲では、海側の表のり面は、張り芝などにより耐侵食性は確保できると言える。



写真-72 堤防の海側の表のり：井土浦⑤



写真-73 侵食を受けた堤防の海側の表のり：井土浦⑤



写真-74 津波（低越流）を受けた盛土の表のり面：三川 E



写真-75 津波を受けた盛土の表のり面の侵食：矢指ヶ浦 C

【知見 26】堤防の天端は、舗装が適しているが、浸水規模によっては、張り芝などの植生でも侵食を防ぐことができる

知見 5 では防潮堤について、知見 10 で河川堤防について、天端を舗装することが適当であると考察した。

新設盛土の天端のアスファルト舗装では、写真-12 のように浸水規模によっては剥離する場合もある。また、写真-76 は知見 25 でも表のりの侵食で考察したが、堤防の天端のアスファルト舗装が剥離し、本堤にも侵食が及んだ事例である。これは、この場所が湿地帯の奥まった位置にあり、津波が集中し、越流深が過大であったためと思われ、越流深の規模が大きい場合は、アスファルト舗装でも剥離あるいは侵食が発生する。しかし、天端の剥離あるいは写真-76 の程度の侵食は、致命的な被害ではないので、アスファルト舗装で充分であると思われる。

次に、土堤の場合の植生被覆の有用性について考察する。写真-77 は防潮堤の背後に自転車道を挟んで整備された高さ 2m の盛土である。津波高は、隣接する矢指ヶ浦 B の津波高 6m 程度と思われることから、防潮堤の天端位置で 2m 以上の越流深と思われる。盛土では天端の草の状況あるいは裏のり尻の侵食跡により、越流したことは確認できるが、越流深 0.5m 程度と小規模であったと推察できる。従って、越流が小規模であるために、盛土の全表面の植生は、侵食されておらず、小規模な越流であれば、植生の被覆でも充分と言える。

なお、小規模の概念について、後掲の写真-88 に示すように、この箇所の盛土の高さは 1.5m～2.5m と変化しているので、後述の表-1（4 章）に示すように、この箇所の盛土の越流深は 0.5～1m 程度と推察できる。



写真-76 越流箇所の堤防天端の侵食：井土浦⑤



写真-77 津波（低越流）を受けた盛土天端：足川浜 B

【知見 27】越流による堤防の裏のりの侵食は、表層的であり、のり先の侵食により、本堤の欠落などが発生する

知見 11 の河川堤防の裏のりの侵食と類似であるが、津波が土盛、土堤防などの天端を越流する場合、裏のり面の侵食に関係するせん断応力の発生要因には、越流深、越流速度、のり面高、のり面勾配、表面の状態などが考えられる。裏のり面の侵食の評価では、これらの要因を統計的に考察する必要があるが、ここでは、越流深および裏のり高について考察する。

写真-78 は新設堤防の裏のりおよびのり先の状態である。裏のりは侵食されているが、表面あるいは表層だけである。また、のり先が侵食されていない箇所もあるが、流下条件が異なるのか、のり先の地盤の耐力が大きいのかは不明である。

また、写真-79 は新設堤防の裏のり先に形成された落堀とのり部の欠落の様子である。落堀の形成により不安定化することにより、本堤の欠落が発生しているが、裏のり部だけの欠落は発生しないようである。

写真-80 は直立堤の防潮堤の背後で自転車道を挟んで整備された盛土であるが、直立堤の高さが 2m、パラペット高が 0.9m、盛土高は 2m である。天端幅は 2.5m であり、裏のり高は 2m～1.5m である。ここで、直立堤の下端と汀線の高度差を 1m と想定すると、盛土天端の汀線高は 4.5m となるが、津波は盛土を越流しているため、津波高は 4.5m 以上と想定される。盛土の越流深は不明であるが、0.5m～1m 程度と推定される（4 章、表-1）。

写真-82 では、裏のり先はほとんど侵食されていないので、0.5～1m 程度の越流深で、1.5m～2m 程度の裏のり高では、裏のり先の侵食は発生しないと思われる。

既出の写真-53 は、写真-82 と同様な高さ 2m の盛土の裏のり先の侵食の状況であるが、表面的な侵食に止まっている。この箇所は写真-82 に近いので、津波高を同じ 4.5m 以上と見なすと、汀線と直立堤の下端が同レベルと見なすと、パラペット高が 0.7m であるため、防潮堤のパラペット上端での越流深は 2.5m、自転車道からの津波高は 3.2m となり、盛土の天端での越流深は 1.2m 以上であったと推定される（4 章、表-1）。

従って、写真 53 と写真-80 の裏のり先の侵食の程度の差異は、越流深の違いによると推察される。



写真-78 裏のり侵食と侵食していない裏のり先：井土浦⑤



写真-79 裏のり尻の落堀の生成と裏のりの欠落：井土浦⑤



写真-80 津波（低越流）による軽微な裏のり尻侵食：三川 E

【知見 28】裏のりでは複断面により防潮機能が向上するが、表のりでは低下することがある

知見 23 の写真-67 および知見 25 の写真-71 では、新設堤防と既存堤防である貞山堀との一体構造に言及した。通常、河川堤防の裏のりでは小段を設置したりするが、ここでは堤防あるいは盛土の複断面構造、つまり断面形状による耐浸食性を考察する。

写真-81 は防潮堤の背後に整備された盛土であるが、裏のりが小段状になっている箇所である。海側の盛土高は 2m であるが、天端幅は 2.2m、上段および下段の盛土高は、それぞれ 1.2m および 1.5m であり、小段幅は 4.5m であり、下段のり面が若干侵食している。

また、写真-82 は写真-81 と同じ区間にある盛土であり、3m 程度の間隔で二山になっているが、両天端の間の窪みは浅いため、侵食は見られない。

以上の 2 事例は、いずれも越流深を 0.5m 以上と推察しているが、小規模であるため複断面形状の効果は明確ではないが、少なくとも盛土体の体積増加あるいは流速の低減により、耐浸食性の向上が期待できるとと思われる。

写真-83 は水面からの高さが 3m で、自転車道になっている幅 3m のアスファルト舗装を天端とする貞山堀の盛土に隣接して、新しく後付けされた堤防である。写真-71 の右中央の堤防と貞山堀の接続位置であるが、写真-83 の表のり、写真-84 の天端と裏のりの全てで侵食している。なお、新設堤防の写真-83 あるいは写真-84 の箇所以外では、一部の天端のアスファルト舗装の剥離および裏のり面の侵食が発生しているが、写真-83 のような激しい侵食は見られない。

この原因として考えられるのは、貞山堀と新設堤防の一体構造の表のり面の形状にあると思われる。つまり、一体構造において、自転車道は表小段となる。ここで思い出されるのは、知見 4：写真-10 の波返しコンクリート護岸の前に表天端を後付けした防潮堤である。つまり、前面に表天端を設けたことが波返し効果を低減したと推察したが、この箇所も新設堤防の後付けにより、単一のり面であれば、遡上により直接的な作用力は軽減されるが、貞山堀の天端が波返しの表天端と同様に働いたために、新設盛土の表のり面に過大なせん断応力が作用することになり、表のり面や天端の侵食に至ったと推察される。

また、写真-84 と類似の事例として写真-85 があるが、この箇所でも貞山堀に新設堤防を後付けし、一体化構造化されている。貞山堀の表のりに損傷は無いが、新設堤防の表のり面の張り芝は全て剥離している。

以上の 2 事例は、堤防の構造的な損傷は軽微であるが、被害拡大の引き金になる可能性はあると思われる。



写真-81 小段構造の裏のり：三川 E



写真-82 二重構造の裏のり：三川 E



写真-83 貞山堀と新設堤防の併設部：井土浦⑤



写真-84 新設堤防の天端と裏のり面の侵食：井土浦⑤



写真-85 新設堤防の表のりの張り芝の剥離：東浦④

【知見 29】落堀により津波の減勢を見込んでも、全体破壊にはならない

知見 22 では、新たに形成される落堀が水域としての津波減勢の効果を推察したが、ここでは新設盛土において落堀の効果を積極的に評価しようとした場合に、堤防構造の安定を損なわないかを考察する。

写真-86 は裏のり先の落堀の状況であるが、裏のり面が欠落している。しかし、その欠落の規模はのり面の下部止まりであり、天端に至る大規模なものではないことが分かる。仮に、越流が繰り返された場合は、このような欠落が拡大する恐れはあり、今回の津波で越流が何回あったのか不明であるが、結果的に今回の津波でも写真-86 程度に止まっているのは、一つの事実である。

ここで、洪水時の越流と比較してみると、2004 年の台風 23 号による円山川の越流破堤した堤防は、全断面が流出しており、写真-86 とは明らかに異なる。これらの差異の原因として、定量的ではないが、洪水による越流

時間が長いこと、洪水の場合は事前の降雨あるいは河道の水位上昇による堤体の地下水位の上昇が考えられる。従って、津波の場合も、地下水が高い堤防あるいは津波の発生前に地下水位が上昇するような状況にあると、大規模なりのり部の欠落が発生する恐れがあることになる。さらに、余震により、欠落した部位が拡大し、二次災害に繋がる可能性もある。



写真-86 裏のり先の落堀と裏のりの欠落：井土浦⑤

【知見 30】表のりは、可能な限り、勾配を持たせることが、防潮に有効である

知見 1 の緩傾斜構造の津波の遡上の恐れ、知見 20 の緩勾配の自然砂丘での遡上に対する注意、さらに知見 4 での直立堤が望ましいとの考察に関係して、新しい堤防、盛土の整備においても、その防潮機能を高めるためには、安定性を確保しながら、可能な限り、表のり面に勾配を持たせることが有効である。

写真-87 は直立堤の背後に整備した高さ 2m の盛土であるが、写真-1 の緩傾斜堤あるいは写真-62 の自然砂丘よりも勾配があることが分かる。また、写真-20 の高盛土ののり面の勾配も参考になる。



写真-87 勾配のある盛土：三川 E

【知見 31】津波に対しては、不整形部、不連続部が弱部になる

津波の浸水、越流は、低い所、開いている所から展開し易いこと、構造的な不連続部が侵食し易いことが、基本原理であり、このような弱部を作らないことが必要である。つまり、防潮堤、堤防、盛土の高さが均一であること、開口部や欠落部が無く、連続していること、異質な構造が隣り合っていないことなどに注意が必要である。

写真-88 は防潮堤の背後に整備された盛土であるが、その高さは 1.5～2m であり、不揃いになっている。従って、盛土の越流深も、堤防の高さ 1.5m、2.0m および 2.5m に対して、越流深は、それぞれ 1m、0.5m および 0m と推察している（4 章、表-1）。

また、写真-89 は写真-88 の盛土の一角であり、背後地と海岸を連絡する通路のために、盛土が開けられている箇所である。手前の海側からの浸水の集中により、通路の両側の盛土が侵食されているのが分かる。このような箇所は、盛土の天端高より低い浸水の進入を許容すること、開口部の拡大による浸水の促進の恐れがある。

さらに、写真-90 は河川の河口部であり、河口の前後で盛土が途切れているが、盛土の端部は、津波の浸水の

集中により侵食している。

なお、知見 32 の道路盛土における横断ボックス、高架橋などは、津波に対しての開口になるとともに、次に示す、異質構造と見ることができる。

異質な構造について、例えば、既出の写真-15 は直立堤とその背面の盛土の境界部、つまり、コンクリートと土の境界で発生した侵食である。また、既出の写真-34 は貞山堀の矢板護岸と背後の地盤との境界部、つまり、コンクリートや鉄板と土との境界で発生した侵食である。



写真-88 高さの不揃いの盛土：足川浜 B



写真-89 写真-88 の盛土でのアクセス道の侵食：足川浜 B



写真-90 河口で途切れた盛土の端部の侵食：西足洗 D

3.7 視点 7：道路盛土の機能

仙台平野では、津波が内陸の奥深くまで達したが、仙台市から山元町迄の間には、海岸線から 2.3km (名取川、亘理町付近)～4.2km (若林区付近) の位置に仙台東部道路があり、供用中であった。本地震の津波に対しては、盛土構造であったために、津波の進行を抑制する効果があったと言われているが、このような道路盛土が津波に対して機能したのか、あるいはするのかが視点 7 の課題認識である。

ここで、河川堤防と同様な構造であるが、越流は発生していないので、浸水深、海側と山側の浸水被害の状況が評価対象になる。

以下では、道路盛土の周辺状況などから推察される知見を、以下に示す。

【知見 32】道路盛土での越流、河川からの越流、津波の進行方向に対する道路の平面線形の向きなどの条件が揃えば、道路盛土は津波の浸水深あるいは漂流物を海側に止める、或る程度の効果がある

名取川の河口から左岸上流 2.5km 付近にある仙台東部道路の盛土構造および周辺の被害状況を調査した。写真

-91 は仙台東部道路の山側の状況、写真-92 は海側の状況である。“名取 14”の横断 Box および高架橋付近であるが、盛土高は 5m 程度であり、のり尻は高さ 2m のブロック積み土留めである。“名取 14”の横断 Box は幅 7m、高さ 4m 程度であり、高架橋は支間 10m 程度の多径間連続構造である。浸水痕は、海側の盛土のり面のブロック積みで 1.9m、横断 Box および高架橋橋脚で 1.6m、山側のブロック積みで 1.15m である。従って、道路盛土の山側の浸水深は、0.75m ほど低減されて海側の約 2/3 になっている。また、道路盛土から望む海側の住宅被害や漂流物の規模は、山側より大きいことから、道路盛土による津波抑制の効果がみられる。

写真-93 は、以上の現地の状況について、衛星写真による上空からの様子であるが、中央の道路盛土を境にして海側になる上部と山側になる下部の状況について、差異は判読しにくい。

写真-94 は、津波による浸水の最先端付近の道路盛土の状況である。この位置での浸水深は 1m 程度であるが、周囲には車両などの大型漂流物は見当たらず、浸水の先端付近にある道路盛土では、津波の抑制効果も小さいことを示唆している。

このように、今回の津波に対して、道路盛土による或る程度の効果が見られるが、以下のような条件を考慮しておく必要がある。

(1)道路盛土の越流の有無

仙台東部道路は海岸線から或る程度の距離があるため、今回の津波では道路盛土を越流しなかったが、海岸線に近く越流する場合は、通行車両の被害の発生、道路管理方法、堤防と同じような構造上の配慮が必要になる。

(2)河川からの越流の有無

今回は隣接する名取川からの越流は無かったと思われるが、河川が近く、津波の遡上により、道路盛土より上流で越流した場合は、抑制効果は得られない。

(3)道路盛土の平面線形の方向

今回は海からの津波の進行方向に対して、或る程度の交差角度があるような道路盛土の平面線形であったために、津波を防潮する形になったが、両者が平行方向では道路盛土の防潮効果は期待できない。

今回の津波では、これらの 3 条件はいずれも該当しなかったが、その意味で幸運であったと言える。



写真-91 仙台東部道路の山側：今泉地区⑥



写真-92 仙台東部道路の海側：竹野花⑥



写真-93 仙台東部道路の海側（上）と山側（下）：竹野花⑥
：盛土の左半分は高架橋、右側は名取川



写真-94 浸水した仙台東部道路の山側：山元町山元 IC 付近

【知見 33】道路盛土の高架橋，河川，水路，横断ボックスなどの開口部では，津波の進行を完全には抑制できない

写真-91 は道路盛土の山側の状況であるが，漂流物も多量にあり，完全に津波の影響を阻止することは難しいことを示している。その理由は，道路盛土は全てが盛土構造ではなく，写真のように横断 Box，高架橋，水路，河川などの所要の施設があるので，津波に対して構造的な弱部になる開口部から，津波は浸水するためである。

【知見 34】緊急時には，避難高台として，解放，誘導が効果的である

仙台平野は平坦であるので，高台が無い状況にあるが，そのような状況における避難用の高台としての道路盛土の利用方法もある。実際に徒歩あるいは車両で避難した人もいようであるが，車両による避難の場合は，地震直後の点検のために道路が閉鎖されており，道路内へ進入が困難である状況にあったということも聞かれる。そもそも，高速道路の進入口は限られているので，解放されたとしても，効果の程は不明である。

なお，道路盛土を津波対策構造として，積極的に考える場合は，道路に対するニーズと津波に対する要件が，

必ずしも一致する訳ではないので，知見 33 および知見 34 の諸条件を十分に検討することが必要である。

3.8 視点 8：表面の被覆の機能

現地調査の際に，津波に浸食された地表あるいは堤防などの天端やのり面の被覆の状況を見ると，植生が残り，浸食を抑制していると思われる箇所が見られた。盛土，堤防など，土構造では表面の侵食が引き金になり，変状が拡大するので，侵食の防止の基本と言える。そのための補助的な手段として，表面被覆があるが，その方法には，植生によるもの，アスファルトなどの人工物によるものがある。これらは，津波による表面の浸食の抑制に効果があると思われるが，表面被覆が津波に対して機能したのか，あるいはするのかが視点 8 の課題認識である。

ここで，侵食が問題になるので，地表面，盛土あるいは堤防の表のり部，天端部，裏のり部での残留状況が評価対象になる。

以下では，様々な表面被覆の被災状況から推察される知見を示す。

【知見 35】表のりは，通常の芝，笹などの植生により，侵食の抑制が可能である

既出の写真-72 では，張り芝による堤防の表のりが侵食に耐えていることを確認した。この堤防の天端の海拔を 4m と推定し，津波高を 10m と仮定すると，堤防での越流深は 6m と想定できるが，天端の海拔が不確定であるので，参考値である（4 章，表-1）。

また，既出の写真-83 は貞山堀と新設堤防の併設部であるが，貞山堀の表のりは笹で被覆されており，津波後も残留している。この笹が植栽されたものか，自生していたものかは，不明であるが，侵食の抑制効果があると言える。なお，新設堤防の表のり面は張り芝であったと思われるが，視点 28 で考察しているように，表のり構造の特殊性により剥離，侵食されている。

写真-95 は緩傾斜堤の防潮堤に併設された，植生表のり面であるが，津波後でも特に侵食は見られない。表のり面に作用する，せん断面応力に係る浸水深などは不明であるが，この箇所の津波高を 6.1m と想定すると，防潮堤位置の浸水深は 1.9m と想定される（4 章，表-1）。

また，写真-96 は写真-37 で整備された松林帯の間の草地であるが，明確な侵食は見られない。なお，海拔とヒアリングに基づく，この箇所の津波高は 6.1m 程度であり，防潮堤位置の越流深は 1.3m である（4 章，表-1）。

なお，表のり面の植生の効果の定量的評価のためには，浸水特性との関係を明確にすることが必要である。



写真-95 表のり面の草地の状況（中越流）：下永井 G



写真-96 表のり面の草地（低越流）：横根 F

【知見 36】天端は、通常の芝などの植生により、侵食の抑制が可能である

既出の写真-77 は津波（低越流）を受けた盛土天端の草地の状況であり、侵食は見られない。この盛土の天端で越流深は、0～1m と仮定される（4 章、表-1）。

写真-97 は桜づつみ化して天端を腹付け拡張した堤防の天端の状況であり、全幅 15m 程度（アスファルト舗装 3m 含む）であるが、侵食が見られるが、部分的であり表面に止まる。なお、付近の阿武隈川右岸⑪の堤防天端の越流深は 3.8m と推定されている（4 章、表-1）。

写真-98 は写真-97 と同じ天端に植えられている桜の木の様子である。根周りに侵食された円形の溝が残っているが、円の内部は根が張った範囲で一体化しており、外縁が土との異種構造の境界となり、侵食され易くなったためと推察される。これは知見 31 の不連続部が弱部になることに関連する。



写真-97 堤防の天端の芝：阿武隈川右岸⑩



写真-98 堤防天端の桜の根周り：阿武隈川⑩

【知見 37】裏のりは、表のりよりも侵食されやすいが、通常の芝、笹などの植生により、侵食の抑制が可能である

写真-99 は堤防の裏のりの植生の残存状況であるが、手前は侵食されていないが、奥側は侵食され、ブルーシートで拡大防止をしてある。このように隣接した箇所でも侵食の差異が見られるが、条件によって、侵食されない、あるいは軽微であることもある。

また、写真-100 は水路ののり面であるが、津波が流下するのり面になる。右側の裸地にも植生があったかは不明であるが、少なくとも左側の笹ののり面のように、笹により侵食が防止できることは知られる。このような笹による侵食の抑制効果は、随所で見られたが、張った根により地盤の表層が補強されるためと思われる。

さらに、写真-101 および写真-102 は同じ区間の防潮堤の背後の様子であるが、前者では植生が残留しているが、後者では侵食されている。両者の差異は、津波の越流特性あるいは盛土の植生を含めた強度などの差異によるためと思われるが、詳細は不明である。少なくとも、条件によっては、防潮堤の背後にある盛土の植生が残留することもあるということである。

なお、調査を通じて、のり面の侵食は、表のりよりも裏のりの侵食が顕著であり、植生のり面でも同様である。



写真-99 堤防の裏のりの芝など：阿武隈川右岸⑪



写真-100 下り側のり面の笹の有無：寺島⑨



写真-101 防潮堤裏のりの草地：井土浜③



写真-102 防潮堤裏の草地（侵食）：井土浜③

【知見 38】のり先は、通常の芝、笹などの植生により、侵食の抑制が可能な場合もあるが、裏のりに先立って侵食しやすい

既出の写真-80 は裏のり先の植生が侵食されない事例であるが、越流深などが小規模な場合は、草地による侵食の抑制が可能である。

一方、越流深などが大規模な場合は、のり先がほぼ全てが侵食、洗掘されており、侵食抑制は期待できないことが分かる。既出の写真-78 が唯一の残留事例であるが、この場合でも表層は侵食されており、過度な期待は難しいと思われる。

なお、土堤の堤防、盛土における津波の越流による侵食のプロセスは、裏のりの表層侵食、裏のり先の侵食・洗掘・落堀形成、裏のりの欠落が、一般的な流れと考えられる。

【知見 39】平坦部は、通常の芝、笹などの植生により侵食が抑制できるが、剥離することがある

裏のり先から先の地盤あるいは平坦部での植生による侵食の抑制の可能性であるが、或る流速の押し波、あるいは引き波によって、地表面に作用するせん断応力が問題である。

写真-103 は広場に張られた芝の残留状態である。侵食により剥離した部分もあるが、残留している箇所もあり、条件によっては残留が期待できる。

また、写真-104 は保安林内の草地の残留状態であるが、侵食は見られず、侵食防止効果が期待できる。

なお、写真-105 は津波後の平坦部の地表面の状況であるが、液状化による噴砂跡がある。クレータの表面は洗われた様子が見られるので、津波の浸水前の地震動で出現したと思われるが、地震後 50 日が経過しているので、真偽は不明である。津波の浸水により流されていないのが奇異に感じたが、浸水による地表面でのせん断応力が小さいことを示唆するとも考えられる。



写真-103 津波後の芝：陸前高田市



写真-104 津波後の草地：荒浜①



写真-105 津波後の噴砂跡：寺島⑨

【知見 40】天端あるいは平坦部のアスファルト舗装、ブロック舗装は、剥離することがある

植生による表面の被覆以外として、アスファルト舗装やブロックによる被覆がある。アスファルト舗装の被覆効果は、防潮堤は知見 5、堤防は知見 10、新設堤防は知見 26 で効果を考察したが、住宅地などでも同様である。

写真 106 はブロック舗装の事例であるが、侵食により単体のブロックが剥離している。アスファルト舗装と異なり、連続体でないのも必然とも言えるが、浸水条件次第と思われる。



写真-106 ブロック舗装：陸前高田市

4. 性能評価によるハード対策の方向性

本章では、3 章で得られた知見に基づいて、津波に対するハード対策の計画、設計の方向性を考察する。

4.1 津波対策のための津波特性

津波対策を考えるためには、前提条件あるいは設計条件に繋がる津波特性の把握が必要である。今回の調査の範囲では、十分に津波特性の把握ができていないので、津波特性を概観することを目的として、或る程度の確度を得られた特性のみを整理したのが表-1 である。

津波特性としたのは、津波高、防潮堤位置の越流深、

表-1 主な調査箇所の津波特性

調査地区		防潮堤位置	津波高	越流深		背後地浸水深さ例
				防潮堤	盛土天端	
①	荒浜：直立堤	一般部	10m（仮定）	4.8m（T.P.5.2m（実測））	－	－
	荒浜：ブロック張り			3.9m（T.P.6.1m（実測））	－	－
⑤	井土浦：貞山堀	7m（天端3m（推定））		－	－	
	井土浦：新設堤防	6m（天端4m（推定））		－	－	
⑧	北新田	一般部		2.8m（T.P.7.2m（実測））	－	－
⑪	阿武隈川右岸	（河川堤防）		3.8m（天端6.2m（推定））	－	－
⑭	阿武隈川右岸河口	河口		3.65m（T.P.6.35m（実測））	－	－
A	足川浜（西）	一般部	4.8m（実）	1.1m（推）～1.5m（実）	（自然砂丘：高さ1.5～5.5m）	トイレ：2.3m（路面上）
B	足川浜（東）	一般部～河口	6m（推）	2m（推）	やや小規模 1.0m程度（仮）（盛土高1.5m）	－
					小規模 0.5m程度（仮）（盛土高2.0m）	
					無し（盛土高2.5m）	
C	矢指ヶ浦	河口	6.1～6.3m（実）	0.9～1.1m（実）	小規模 0.5m程度（仮）（盛土高1m～1.5m）	倉庫：2.7m（路面上） トイレ：2.5m（路面上）
D	西足洗	河口～一般部	4.5m以上（想）	2.5m以上（想）	1.2m以上（仮）	－
E	三川	一般部	4.5m以上（推）	1.5m以上（推）	西側：小規模 0.5m程度（仮）（盛土高2m）	－
					東側：やや小規模 1.0m程度（仮）（盛土高2m）	
F	横根	河口	6.1m（実）	1.3m（実）	無し	住宅：2m（路面上）
					（自然砂丘：高さ2～4m）	
G	下永井	一般部	6.1m（想）	1.9m（想）	無し	住宅：3m（路面上）（想）
			注：	（実）：海拔の標示、浸水深さの実測・ヒアリングによる		
				（推）：汀線からの防潮堤下端の高さは目視による（潮位補正もない）		
				（想）：近隣からの想定による		
				（仮）：盛土の侵食の度合いの差異を付けるために仮定		

背後の盛土天端位置の越流深および背後地浸水深例の 4 項目である。

同表において、仙台平野の①～⑭については、5 箇所を取り上げたが、津波高は一律に 10m の仮定値とし、防潮堤での越流深は、①荒浜、⑧北新田および⑭阿武隈川右岸河口では、防潮堤の銘版に記載された T.P.に基づいた実測値であり、井土浦⑤および阿武隈川右岸⑪は、調査時の堤防位置での水面を基準とした推定値である。

また、旭市の A～G については、全箇所を取り上げたが、津波高と防潮堤での越流高は、足川浜（西）A、矢指ヶ浦 C および横根 F では、海拔の標示、浸水深さの実測・ヒアリングによる実測値であり、足川浜（東）B および三川 E では、汀線からの防潮堤下端の高さは目視により、潮位補正もしていない推定値であり、西足洗 D および下永井 G では、近隣からの想定による想定値である。なお、盛土の天端の越流深の（仮）の表記では、盛土の侵食の度合いの差異を付けるための仮定値である。

表-1 によれば、仙台平野の防潮堤位置での越流深は、新設堤防の表のり先＝貞山堀の水面＝T.P.0m と見なした井土浦⑤だけが 6～7m であるが、その他の箇所では 2.8～4.8m である。仮に、井土浦⑤を T.P.2m とすると、4～5m になる。また、旭市では、防潮堤位置の越流深は 0.9～2m 以上、背後の盛土天端位置の越流深は 0～1m 程度である。

4.2 津波対策のための津波特性

前節で整理した津波特性および今回の調査を通じて、工学的な津波規模は表-2 で例示する。ここで、“工学的”の主旨は、通常は“津波高”あるいは“遡上高”が注目されるが、住宅などの津波による被害に関係するのは、防潮堤の背後地の“浸水深”などであるので、ここでは、まず、浸水深に基づいて、2m 以下、2～4m および 4m 以上に 3 区分した。津波高は、浸水深の 2 倍として、便宜的に設定している。ここで、浸水深の 3 区分の根拠は、以下のように定義している。

大規模津波（浸水深：4m 以上）：2 階以上で浸水し、家屋は流出する浸水規模

中規模津波（浸水深：2～4m）：1 階床上から 2 階が浸水し、流出する家屋もある浸水規模

小規模津波（浸水深：2m 以下）：床下あるいは床上の浸水に止まり、家屋が流出しない浸水規模

表-2 背後地の影響を考慮した浸水深による津波規模の区分

津波規模	津波高	浸水深	備考
大規模	8m 以上	4m 以上	仙台平野沿岸
中規模	4～8m	2～4m	旭市：足川浜・矢指ヶ浦・下永井
小規模	4m 以下	2m 以下	旭市：横根

4.3 津波ハード対策のための性能評価方法

津波のハード対策の基本理念は、避難による人命の守護だけに止まらず、住宅などの生活・社会基盤の致命的な被害を防ぐことが必要である。ここで、生活・社会基盤の被害を防ぐことは、人命の守護にもなる。

その場合、予め想定する津波規模だけでなく、津波の不確定性をも考えたハード対策を想定することが必要になるが、ハード対策が目標とする性能を明確にする性能評価が、合理的であるとともに、国民に対する説明責任を果たす上でも望ましいと思われる。

性能評価の視点は、通常の土木構造物の性能設計と同様に、ハード対策自体の安全性、供用性および修復性であるが、津波の場合は、その影響を受ける住宅などの安全性、供用性および修復性を考えることが必要である。ここで、住宅などの性能は、ハード対策自体の供用性とも見ることが出来るが、ここでは区別している。

まず、ハード対策自体については、

- (1) 越流しない状態において、津波に対してハード対策が安定であること
- (2) 越流した状態において、津波に対してハード対策が安定であること、言い換えると、損傷しても致命的な

決壊はしないこと

これらの性能は、通常、考えられているものであるが、津波ではハード対策の影響を明確にすることが必要であるので、さらに、以下の性能が必要になる。

(3) 越流による浸水により、住宅などが所定の被害レベルにあること

ここで、所定の被害レベルとは、要求する住宅の性能であり、次のように考えることができる。

性能1：浸水しないレベル

性能2：浸水が住宅の床下に止まるレベル

性能3：浸水が床上、1階天井辺りまでであり、住宅が流されないレベル

性能4：浸水が住宅の1階以深となり、住宅が流されるレベル

これらの性能の評価は、住宅の位置での浸水深を尺度にしているが、それはハード対策位置における越流深と関係するので、それに基づいてハード対策の規模が規定される。浸水深と越流深との関係は、越流特性（流速など）、ハード対策の構造（裏のり、のり尻など）、浸水経路の条件（水路、保安林など）などから想定される。

各々の性能に対応する浸水深は、表-3のように例示できる。なお、これらの性能と表-2の津波規模を対応させると、性能1～性能3が小規模津波であり、性能4が中規模津波あるいは大規模津波である。このように、小規模津波に対する性能を3区分し、細分化しているが、流出しない状態での住宅の被害レベルの差異を明確にすることを意識している。

なお、表-3では、各機能に対応する浸水深を参考で示しているが、津波の場合、浸水深だけが、機能に係わる要因ではないとの認識からである。例えば、堤防、盛土などに対する津波の越流は、洪水時の越流に類似した現象と思われるが、津波による浸水では流される家屋が多いのに対して、洪水時の破堤などによる浸水では、流出する家屋は少ない、あるいは限定的であると思われる。その差異は、住宅に作用する水圧あるいは流速に依ると思われるので、浸水深だけではないということになる。

表-3 津波に対する住宅などの要求性能の区分例

区 分	性能の水準	参考：浸水深
性能1	浸水しない	0 m
性能2	浸水が住宅の床下に止まる	$0\text{ m} < H \leq 0.5\text{ m}$
性能3	浸水が床上、1階の天井辺りまでとし、住宅が流されない	$0.5\text{ m} < H \leq 2.0\text{ m}$
性能4	浸水が1階以深となり、住宅が流される	$2\text{ m} < H$

4.4 津波ハード対策の基本的な考え方

3章の知見および4章の性能評価の視点に基づいて、津波のハード対策の基本的な考え方は、以下のよう例示できる。

- (1) 津波は海、河川、湖沼などの水域に封じ込める、言い換えれば、背後地に浸水させないことを基本とする。
- (2) 封じ込めは、防潮堤、河川堤防、護岸を基本とするが、他の方法との併用も考える。
- (3) 封じ込めが困難あるいは想定以上の津波の可能性を考慮する場合は、浸水を許容する。
- (4) 浸水の評価は、木造あるいは簡易鉄骨構造の住宅の機能で行うこととし、浸水深（および流速）による。
- (5) 浸水の許容は、小規模津波に相当する床上浸水迄（浸水深2m以下）とし、性能1から性能3のいずれかを満足し、家屋は流されないこととする。

以上は、暫定的なものであるので、今後、検証に基づ

いて、具体化に向けた展開が必要である。

5. おわりに

本文は、限られた時間で実施した緊急調査の概要であるが、被害の事実だけの報告だけでなく、今後の津波対策、特に、ハード対策を意図して、参考になる知見を整理するように配慮した。また、今後のハード対策を考える際に、有効と思われる性能評価およびハード対策の基本的な考え方を考察した。

本報告が、今後の速やかな復旧、復興に資することを望んでいる。

（原稿受理 2011.5.24）