

津波被害からの知見とハード対策の方向性の考察（その1）

Lessons from Tsunami Disaster and Future Views for Hard Countermeasures

常田 賢一（ときだ けんいち）
大阪大学大学院 教授小泉 圭吾（こいずみ けいご）
大阪大学大学院 助教

1. はじめに

本文は、地盤工学会の2011年東北地方太平洋沖地震調査団・第二次関西支部調査団として、本震が発生した平成23年3月11日からおおむね50日が経過した4月29日～5月3日において、宮城県および千葉県の平野部の沿岸で実施した現地調査およびその後の追加調査の報告であり、(その1)～(その4)に分けて報告する。

本調査は、土木構造物を主たる対象として、津波による現地の被害状況をきめ細かく把握することにより、人命に加えて財産をも守る津波のハード対策に関する知見を明らかにするとともに、将来の復旧あるいは復興対策の方向性について、性能設計の視点から考察する。

なお、本文は、対象が平野部の津波被害、限られた箇所および短期間の調査、現地状況に基づく定性的な調査あり、津波高は海拔、T. P. が明らかな場合以外は推定であることなど、様々な制約の下での調査の範囲にあるので、今後、詳細な検証、定量的な評価が必要である。

2. 調査箇所および調査の視点

現地調査の実施箇所および調査前に想定あるいは調査結果から得られた評価の視点は、以下のとおりである。

2.1 調査箇所

本文で対象とする調査箇所は、以下のとおり、宮城県の17箇所、千葉県の7箇所およびその他である。宮城県および千葉県を主な対象にしたのは、前者が大規模な津波の被害に相当するのに対して、後者は中小規模の津波の被害に相当すると考えることができ、津波被害の発生特性などの比較により、津波規模に応じた考察が可能になると考えたことによる。なお、これらの24箇所は、引用写真に番号あるいはアルファベットを記しており、その他の箇所は地名を表記してある。また、表記の地名あるいは字名は、正確でない場合があることに注意されたい。

1) 宮城県内

仙台市若林区荒浜～井土浦：図一1(a)参照

- ①：荒浜，②：海浜公園冒険広場，③：井土浜，
④：東浦，⑤：井土浦

仙台市若林区今泉～竹野花：図一1(a)参照

- ⑥：仙台東部道路

岩沼市二の倉～寺島：図一1(b)参照

- ⑦：二の倉，⑧：北新田，⑨：寺島

亶理町荒浜～吉田：図一1(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：図一1(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12項目の視点で整理することにした。



図一1(a) 調査箇所位置図：仙台市荒浜～井土浦



図一1(b) 調査箇所位置図：岩沼市二の倉～寺島



図一(c) 調査箇所位置図：互理町荒浜



図一(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 | (その1) |
| 視点 2：河川堤防の機能 | (その1) |
| 視点 3：保安林，防潮林の機能 | (その2) |
| 視点 4：高盛土の機能 | (その2) |
| 視点 5：水域の機能 | (その2) |
| 視点 6：土堤防・盛土の機能 | (その3) |
| 視点 7：道路盛土の機能 | (その3) |
| 視点 8：表面の被覆の機能 | (その3) |
| 視点 9：自然砂丘の機能 | (その3) |
| 視点10：砂浜の機能 | (その4) |
| 視点11：離岸堤の機能 | (その4) |
| 視点12：消波ブロックの機能 | (その4) |

以上の視点に関す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(その1～その4)で、さらに、ハード対策の設計概念を4章(その4)で提示する。

3. 被害状況および知見

12の視点に関する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、相互に関する事項については、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)の方向の概略を示す。

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、あるいは将来の津波に対して機能するのかが視点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、表法部，天端部，裏法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法先にも目を向けることが必要と思われる。

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。写真一1は津波による住宅の浸水被害があった旭市下水井付近である。道路面から堤防天端までが1.1m，自歩道の天端幅は7m，緩傾斜堤の表法面の高さは2.5m程度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。したがって，浸水高が下永井リフレッシュ事業の海岸と同じ(6.1m)と仮定すると，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。なお，地元の話によれば，地元の人は緩傾斜堤での遡上を意識していた。一方，写真一2は砂の埋塞により高さが低くなった緩傾斜堤であり，遡上は少ないと思われる。

このように，高さがある緩傾斜堤の場合は，津波が斜面に沿って遡上し，防潮機能が低下する恐れがある。

【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

写真一3は直立堤の箇所であるが，背後の盛土の侵食度合を隣接する河口の西側と比較すると，写真一3の河口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，写真一3の東側では直立堤の前面に窪地があるものの，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，遡上高が大きくなったことが考えられる。

【知見3】表法のブロック張りの斜堤は，裏法の侵食の影響を受け易い

写真一4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，写真一5は表法がブロック張り，裏法が格子枠の防潮堤であるが，表法から裏法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，表法のブロックが，背後地に飛ばされている。他にも，天端の欠落，裏法の侵食，さらに裏法先が洗掘され，大部分は窪地になっているが，深い箇所は滞水している箇所がある。写真一6は裏法の侵食による天端までの侵食であり，写真一7は浅い侵食ではあるが，変状がないRC直立堤の状況であり，ブロック張りより安定していることが分かる。

このように，ブロック張りの斜堤は，表法が侵食されにくいものの，裏法の侵食が先行し，その影響を受けて，天端や表法が決壊すると思われる。

【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



写真一 緩傾斜堤（高い）：下永井 G



写真八 直立堤の防潮堤：三川 E



写真二 緩傾斜堤（低い）：荒浜①



写真九 波返し構造の防潮堤の被害：荒浜④



写真三 防潮堤の前浜で発達した地形：三川 E



写真四 ブロック張り防潮堤の表法：二の倉⑦



写真五 裏法の侵食による天端，ブロック張り防潮堤表法の崩壊：北新田⑧



写真六 裏法の侵食による天端までの侵食：荒浜④



写真七 裏法が侵食（浅い）されても残る RC 直立堤：井土浜③

写真八はパラベット（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、遡上、越流を直接的に防止する直立堤が望ましいと思われる。

写真九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法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、裏法面を構成するコンクリート部材の侵食、流出であり、斜材と曲面部材は残っている。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、石材による押え）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1m高の直壁に、4m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。写真一10(a)は表天端、波返し、裏天端、裏法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部材のすべてが流出している。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。裏法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、写真一10(b)の衛星写真によれば、写真一10(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。

【知見5】防潮堤の天端は舗装の被覆がよいが、裏法が



写真一10(a) 波返しと前面天端の組構造の防潮堤被害：荒浜⑤



写真一10(b) 写真一10(a) (黄の○)の背後の浸水状況：荒浜⑤

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。したがって、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、写真一11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、写真一12のように、舗装表面が剥離する場合もある。これは、越流時の流速が大ききことによる。なお、天端の被害形態として、写真一13のように陥没する場合があるが、原因は裏法（この場合は、格子枠ブロック張り）の侵食にある。

一方、写真一14のように、直立堤の背後の盛土が侵食されていない箇所がある。直立堤の設置箇所が少ないこと、あるいは越流規模が大きかったためか、写真一15のように背面の盛土が侵食され、流出した場合が多く見られたが、防潮堤の背面の盛土が残り、植生が健在であったのは、写真一14の箇所だけである。前面の波消ブロックの影響について、写真一14と写真一15による限りでは判断できない。なお、写真一15は、コンクリートの直立堤と土堤との構造の境界部、変化部が弱部になることの示唆とも考えられる。

【知見6】裏法のブロック張りの斜堤は、一体化構造が望ましく、そうでない場合はブロックが分離し、流出することがある

写真一16および写真一17は、それぞれブロック張りの裏法であるが、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。したがって、前者の場合は、表面侵食を受けにくく、法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、飛散し、流出することがある。

【知見7】越流の程度により、裏法先の侵食、裏法の侵食の発生の規模が異なる



写真一11 被害のない防潮堤天端の舗装：下永井G



写真一12 堤防天端の舗装の剥離：井土浦⑤



写真一13 裏法の侵食による天端の侵食：二の倉⑦



写真一14 直立防潮堤の背面で残った盛土：井土浜③



写真一15 直立防潮堤の背面の盛土の侵食：荒浜①



写真一16 防潮堤の裏法先の洗掘：荒浜①



写真一17 ブロックが飛ばされた裏法：二の倉⑦

津波が防潮堤を越流すると、裏法の傾斜部を流下するが、特に法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。

写真一18は比較的小規模と思われる越流による法先の侵食の状況である。防潮堤は、天端幅4.0 mで、表と裏のいずれも、ブロック2枚張りで高さ約2 mの斜堤である。表側は1 m程度、裏側は1.2 m程度露頭している。裏法先は簡易舗装の道路であるが、その一部は浅い箇所では0.8~0.9 m、深い箇所では2 m、洗掘されているが、水は溜まっていない。したがって、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、写真一19のように洗掘深や洗掘幅が拡大する。裏法先の洗掘深さは、1.5 m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ものの、小規模である。

写真一20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、裏法は高さ3 m程度の3段の格子枠であり、法先は洗掘され、幅5 m程の落堀になっている。背後の松林は、落堀から20 m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。

写真一21では表法がブロック張り、裏法は格子枠であり、写真一20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. 7.2 mであり、天端幅は4 mで、裏法が崩壊している。

写真一22の防潮堤では、波返しの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、裏天端および法面のコンクリート部材が侵食され、流出している。法先は幅20 m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、



写真一18 裏法尻の侵食 (小規模) : 荒浜①



写真一19 裏法尻の侵食 (中規模) : 二の倉⑦



写真一20 裏法尻の侵食 (大規模) による落堀 : 寺島⑨

その先は立木の状態にある。このような大規模な落堀は、亙理町の荒浜でも見られる (写真一10(a)参照)。

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、あるいは将来の津波に対して機能するのかを視点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、表法部、天端部、裏法部の構造および裏法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

写真一23(a)は阿武隈川河口から1.8 km 上流右岸にある亙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0.7 m) 上端までの高さは6.2 mである。天端幅は6.3 mであるが、パラペットが飛ばされた箇所では、裏法の侵食が見られる。さらに、ここから600 mほど下流でも、写真一23(b)のように同様な被害が発生している。写真一24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号により、出石川の破堤箇所 (左岸5.3 km 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、写真一25は写真一23(a)と写真一23(b)の間の区間であり、パラペットの損傷は無く、裏法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ようである。

ここで、これらの3箇所の被害の差異は、図一1(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



写真一21 裏法尻の侵食による格子枠の崩壊 : 北新田⑧



写真一22 裏法尻の侵食 (大規模) による落堀 : 吉田⑬



写真-23(a) 越流による河川堤防護岸の被害：阿武隈川右岸①



写真-23(b) 越流による河川堤防護岸の被害：阿武隈川右岸③



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

防の法線に対してある角度があるが、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ことと推察できる。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、河川側の遡上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、浸水高は4.5 m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、10 m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3.2 mである。

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が、その位置は必ずしも同じではない。



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



写真-29 損傷が無いブロック張りの河川護岸の表法面：阿武隈川右岸⑭

なお、写真-23の堤防に近接した亘理大橋では、高さ1 m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10.4 mである。したがって、堤防のパラペットの高さととの高度差の4.2 m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。

【知見9】通常の河川のブロック張り護岸であれば、表法の損傷はほとんど無い

河川護岸あるいは堤防では、表法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、表法の損傷は見られない。これは、津波は法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。

【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、



写真一30 天端幅のある裏法3段の河川堤防：阿武隈川右岸⑩

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。写真一30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、裏法は侵食しやすい。当該事例では、裏法は3段（上から1.5 m, 2 m, 2 m）構造であるが、いずれの裏法面も侵食が見られる。なお、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。

【知見11】堤防の裏法は、越流により侵食され、法先に落堀ができることもある

河川堤防の場合も、越流により法先が侵食されて、写真一31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、水位上昇が主な表法面と比較して、裏法面では法面を下る津波の流速が加速されるためである。射流が発生するとも言われるが、その発生条件としては、裏法高さ、裏法表面の構造（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。本調査でも、越流深が浅く、裏法高が低く、裏法面が植生で被覆されているような場合は、侵食は発生しない事例が見られている。

【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となっているが、写真一32および写真一33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



写真一31 越流による河川堤防の裏法の侵食と落堀の形成：阿武隈川右岸⑩



写真一32 河川護岸の背後からの津波による侵食：三川 E



写真一33 写真一31の横からの状況：三川 E



写真一34 貞山堀の矢板護岸の背後の侵食：井土浜③

70~100 m 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、写真一34は海岸線から250 m 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が必要な場合もある。

(原稿受理 2011.6.6)