

東日本大震災の津波来襲時の 海岸保全施設の被災メカニズムと新たな津波対策*

東北大学大学院工学研究科 橋本 潔
東北大学大学院工学研究科 田中 仁

1. はじめに

東日本大震災の津波（以下、「今次津波」という）によって、宮城県の沿岸部はかつてない甚大な被害を受けた。そこで、本稿では、宮城県における調査^{1), 2)}を基に、災害に強いまちづくりのための多重型津波対策の観点から、今次津波来襲時の海岸保全施設の被災メカニズムを明らかにすることにより、海岸保全施設による新たな津波対策について提示するものである。

2. 海岸保全施設の構造断面の被災メカニズムと粘り強い断面

現地調査による今次津波来襲後の宮城県沿岸の海岸保全施設の被災状況を踏まえて、海岸保全施設の堤防や護岸、陸閘に着目して断面的変化による被災メカニズムを表-1に整理した。

堤防、護岸、陸閘はいずれも、施設を越える高い津波の押し波のみならず、津波の戻り流れによって全壊、流出したことがわかった。

表-1 海岸保全施設の構造断面の被災メカニズム

被災状況	被災メカニズム推定
堤防：裏法から倒壊	①海岸堤防より高い津波が押し波で到達し堤防背後洗掘, ②堤防背後の洗掘により堤防天端が倒壊, ③戻り流れによりさらに堤防侵食, 表法が倒壊し全壊
堤防：天端から倒壊	①海岸堤防より高い津波が押し波で到達し堤防天端が流出, ②裏法倒壊, ③戻り流れによりさらに堤防侵食, 倒壊が進行し全壊
護岸：堤体の倒壊	①海岸堤防より高い津波が押し波で到達し堤防背後を洗掘, ②引き波が護岸天端を越流し護岸前面が洗掘, ③戻り流れにより堤体, 天端が倒壊, ④戻り流れによりさらに侵食, 倒壊が進行し全壊
護岸：波返工の破損	海岸堤防より高い津波が押し波で到達し波返工が破損
陸閘：破損・流出	①海岸堤防より高い津波が押し波で到達し陸閘を越流, ②陸閘背後に戻り流れが到達し背面からの水圧で扉体破損, ③陸閘の強度以上の水圧が作用し陸閘流出

また、宮城県全沿岸（施設整備済み延長 163 km : 2004 年河川局, 港湾局, 農村振興局, 水産庁整備分）のうち 24 海岸（施設延長 27 km）の海岸保全施設を対象として、海岸堤防の脆弱度の分析を行い、海岸堤防の粘り強い断面の方向性を模索した。着目するところは、海岸堤防の越流水深に対して、被災状況、天端高、比高、背後の状況（道路等の施設の有無）とした。

*Destruction mechanism of coastal structures during the 2011 Tohoku Tsunami and new countermeasures by Kiyoshi Hashimoto and Hitoshi Tanaka

図-1に示した海岸保全施設の形状と被害規模の結果から、①様々な越流水深で被災が見られるとともに、被災していないものも見られることから、粘り強い構造にすることは可能であるが、越流する場合は対策が必要であること、②天端高が低い方は被害が小さいが、必要な天端高は確保する必要があるため、天端高を低くすることは困難なこと、③比高が小さい方は被害が小さく、比高を低くすることで粘り強い構造にできる可能性があること、④背後に道路等の侵食を抑制する施設があると被災が小さく、背後に侵食対策を施すことで粘り強い構造にできる可能性があることがわかった。

以上より、比高が大きい場合は背後の侵食も大きくなるが、背後に侵食を防止できる施設があると被害が小さいことを踏まえ、できるだけ比高を小さくするとともに、裏法尻背後の侵食対策により、堤防を粘り強い構造とすることが可能であると言える。

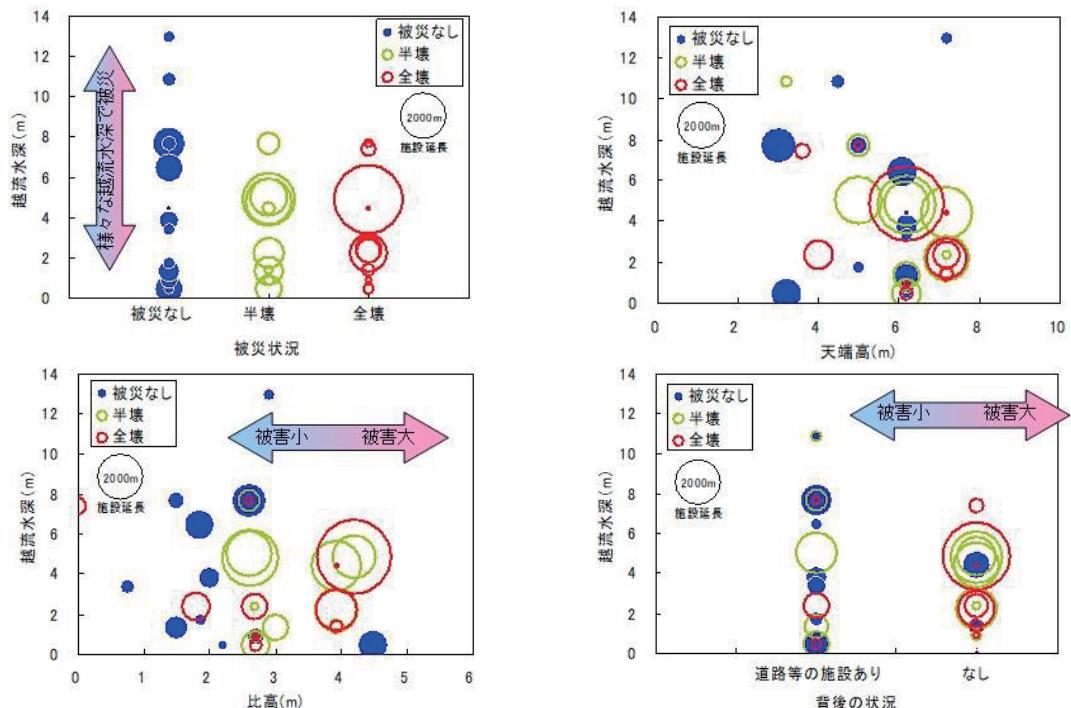


図-1 海岸保全施設の形状と被害規模

3. 海岸保全施設の戻り流れによる被災メカニズム

今次津波により仙台湾沿岸部の多くの海岸堤防が破堤しているが、前項に示したように、押し波のみならず陸域への遡上後の戻り流れにより破堤規模が拡大したと推定される。

そこで、国土交通省東北地方整備局から借用した防災ヘリ（みちのく号）からの空撮ビデオ映像をキャプチャーして、破堤している個所を中心として戻り流れのメカニズムの分析を行い、国土地理院による被災後の空撮も含めて、戻り流れによる海岸保全施設の被災メカニズムの解明を行った。表-2に、推定される戻り流れによる海岸保全施設の被災メカニズムをまとめた。

表-2 戻り流れの海岸保全施設の被災メカニズムの推定

資料	場所	戻り流れによる海岸保全施設の被災メカニズム
国土交通省東北地方整備局防災ヘリ(みちのく号)からの空撮ビデオ映像	閑上漁港、名取川周辺	広浦から勢いよく閑上漁港を通じて沖側に戻り流れが生じており、同時に隣する名取川及び井戸浦・藤塚からも戻り流れが生じている。時間が16時15分であることから、これは比較的大きな第1波後の戻り流れ。
	五間堀川と貞山堀	貞山堀に沿って南北相互から五間堀川河口部に流下して戻り流れが生じており、その背後の破堤開口部から沖合に流出している。多くに戻り流れが海岸堤防を破壊。
	阿武隈川河口右岸部	海岸と河川堤防の接合部に集まる戻り流れにより破堤した。また、陸側にパラペット(河川堤防上部工)と海岸堤防の波返しが散乱。海岸堤防裏法尻付近にできた侵食溝は、押し波と戻り流れとの繰り返しで形成。
	荒浜漁港	阿武隈川右岸側の荒浜漁港から勢いよく戻り流れが発生しており、それに追随するようにその南側の合間から沖側に向かって戻り流れが生じ、海岸堤防を破堤。
	山元海岸	破堤地点に集まる戻り流れが鮮明に映し出されており、渦流として流出。堤防背後に沿う流れ、陸域から海岸林を越える流れが破堤地点で合流し、速い流れが形成され、さらには侵食が増大。さらには、破堤地点から流れが速いため、押し波が進行できず重なって渦なども発生。また、海岸線を上空斜めアングルから見渡すと、破堤箇所が南北方向ある一定の位置で生じており、沖側の渦流の状況から判断すると、強い流れとその持続性を示している。渦水の境界は堤防背後の侵食部分。
国土地理院による被災後の空撮	山元町	山元町の地形は海岸線から背後近くまで山間が迫っており、海岸から遡上した津波が山に反射して戻り流れと変わり、勢いよく一気に海域に向かっており、沿岸各所では海岸堤防が破堤し冲に流出。
	亘理町、岩沼市	海岸背後が広域に平坦地であるため、押し波により内陸部奥深くまで津波が遡上し、ある時期から戻り流れと変わって貞山堀や五間堀川などの低い箇所に集まり海に流出。
	女川町	海岸背後がすぐ山間でもあり押し波の勢いが戻り流れに変わって、一気に海域へ戻る。

以上より、今次津波による海岸堤防の破堤の原因は、大半が津波の戻り流れによるものであることがわかった。

また、図-2に津波の戻り流れによる海岸保全施設の被災メカニズムのイメージを示したが、海岸保全施設の被災メカニズムは、①河口部周辺等地形の低い箇所や押し波時に破堤した個所に戻り流れが集中し、②戻り流れにより堤防法線に津波が流下し、③堤防背後の侵食がさらに進行、④堤防の破損、倒壊、破堤が拡大した、ということであった。

なお、真野ら³⁾は、すでにこのような戻り流れによる海岸堤防破堤のメカニズムを明らかにしているが、宮城県の調査¹⁾から、山元町から石巻市まで地区ごとの旧地形と津波破堤箇所の関係を見ると、海岸堤防破堤箇所は、海岸背後の地区に湿地や干拓地が存在するところ（例えば、牛橋河口、五間堀川河口、藤塚地区、南長谷地区、東松島洲崎海岸背後など）や旧河川が存在するところであることを確認することができた。

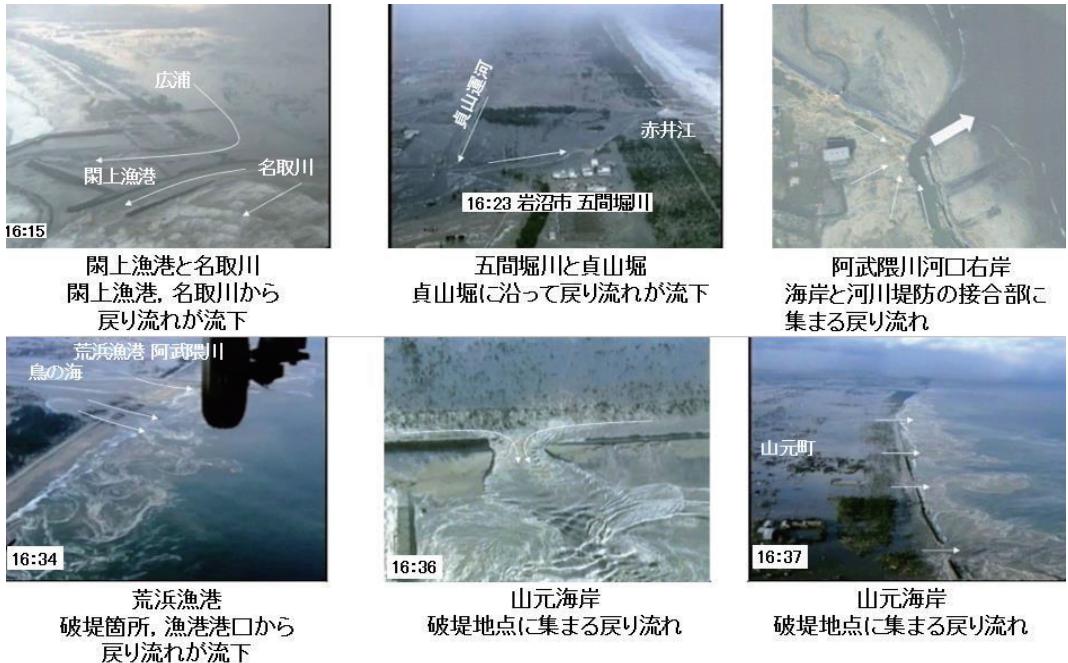


写真-1 国土交通省東北地方整備局防災ヘリ (みちのく号) からの空撮ビデオ映像

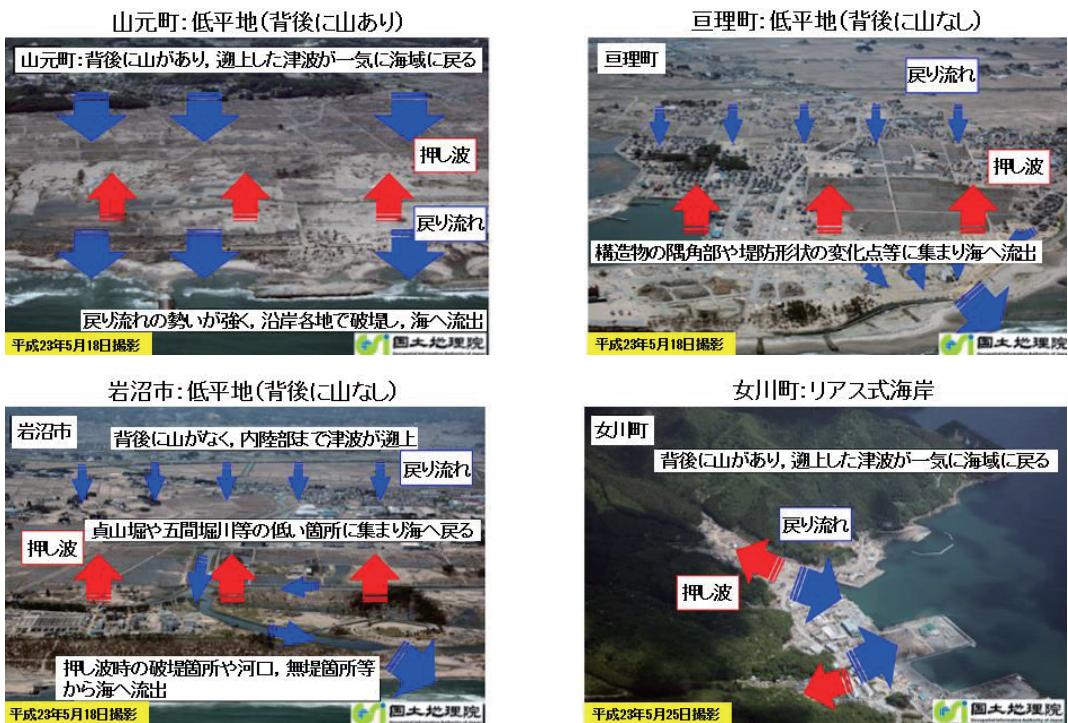


写真-2 国土地理院による被災後の空撮

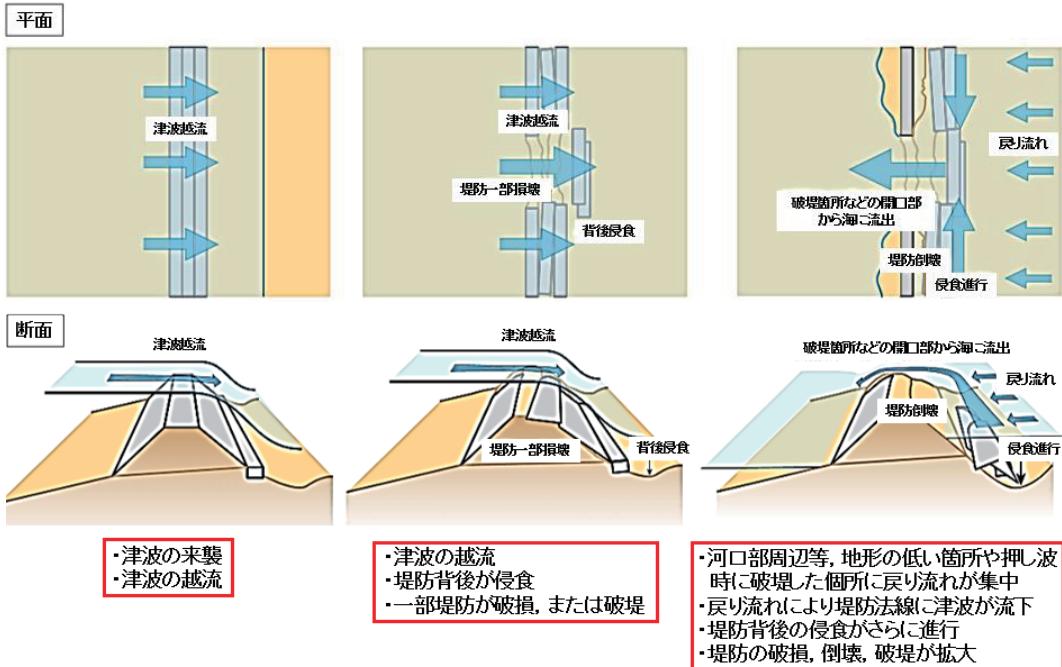


図-2 戻り流れによる海岸保全施設の被災のメカニズムのイメージ化

5. 海岸保全施設における新たな津波対策

表-3 及び図-3 に、海岸保全施設の構造断面の被災メカニズム、海岸保全施設の被災状況分析による粘り強い断面の検討に加え、津波の戻り流れによる海岸保全施設の被災メカニズムを踏まえ、津波防護レベル（数十年から百数十年に1度の津波を対象に、人命及び資産を守るレベル）における海岸保全施設の対策と津波減災レベル（今次津波のように構造物対策の適用限界を超過する津波に対して、人命を守るために必要な最大限の措置を行うレベル）に対して考慮すべき対策について示したが、災害に強いまちづくりのための多重型津波対策の観点から、海岸保全施設における新たな津波対策については、海岸保全施設は、津波防護レベルで整備し「粘り強い」構造にすること、津波減災レベルに対しては、海岸堤防背後の盛土嵩上による「補強効果」、防潮林の設置による「減勢効果」、運河の活用による「減勢効果」と戻り流れの「誘導効果」を発揮させ、さらに「誘導効果」発揮のために、津波の戻り流れを円滑に排水するための破堤点を考慮する必要があることを明らかにすることができた。

6. おわりに

筆者ら⁴⁾は、仙台湾沿岸における貞山運河等の津波減災効果と破堤点の赤井江における戻り流れの解析を行い、運河の津波減災効果と誘導効果及び戻り流れの排水効果について確認しているが、災害に強いまちづくりのための多重型津波対策の観点から、今後とも、戻り流れについて定量的に解析し、運河の設置効果や戻り流れを排水させる方策等について、詳細に検討を進めることが必要であると考える。

表-3 海岸保全施設における新たな津波対策

項目	対策	対策内容
海岸保全施設の粘り強い構造	堤防対策	天端を幅広に、天端被覆工、裏法被覆工を強化。裏法勾配を緩勾配化し、比高(背後地盤と堤防高の差)を小さくし、裏法尻に洗掘防止工を施工。
	護岸対策	護岸前面に洗掘防止、基礎部を杭などにより補強。波返工の突出長を短くし構造を強化。施工打継部を強化し排水口を設置。背後を洗掘防止。
	陸閘対策	乗り越し用階段を設置し陸閘の数を減らす。フラップゲート等により遡上した津波を排水。
津波減災レベルに対し考慮すべき対策	堤防背後の盛土嵩上	堤防背後の洗掘に対して余裕しろを確保。防潮林の設置位置での浸水深を低減させることにより、防潮林の効果を拡大可。
	防潮林の設置	押し波時に津波の勢いを低減。ただし、押し波及び戻り流れにより、倒木した防潮林が漂流物となり、背後家屋等の被害を拡大させる可能性もあることに留意。
	運河の設置	運河により、戻り流れの濬筋を固定し、堤防背後等の公共土木施設に影響を与える箇所での洗掘を防止。ただし、押し波時に津波の侵入経路となる可能性もあることに留意。
	戻り流れを排水するための破堤点の考慮	わざと破堤させること(ヒューズ)により、スムーズに遡上した津波を海に排水。押し波時に破堤の可能性があることに留意。

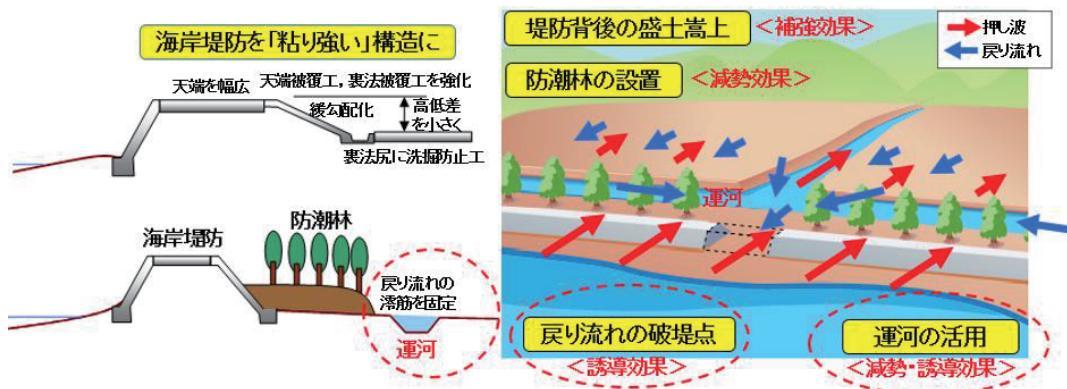


図-3 海岸保全施設における新たな津波対策

参考文献

- 1) 宮城県 (2011) : 宮城県東北地方太平洋沖地震津波防災対策検討業務委託報告書
- 2) 宮城県 (2012) : 宮城県公共土木施設構造検討会報告書
- 3) 真野 明・有働恵子・田中 仁 (2013) : 海岸堤防の被災・明石書店
- 4) 橋本 潔・田中 仁 (2018) : 仙台湾における運河群の津波減災効果、土木学会論文集B3 (海洋開発), 第74巻2号, p.I_157-I_162.