

東北地方太平洋沖地震津波を対象とした護岸への作用外力の分析*

パシフィックコンサルタンツ株式会社 永澤 豪
東北大大学院 田中 仁

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震およびそれに伴う津波による土木構造物の被災は、大規模かつ広域に渡り、我国の歴史上、類を見ないものであり、現在、復旧・復興に向けて国を挙げた対応が行われている。この津波は、陸上への遡上に伴って沿岸部で巨大な波力・流速を発生し、多くの沿岸部の構造物を破壊したと考えられる。したがって、その影響を正しく理解し、構造物破壊等のメカニズムを把握することは重要である。著者ら(2012)は、東北地方太平洋沖地震津波により発生した構造物の被災について、宮城県気仙沼市御伊勢浜海水浴場の護岸について現地踏査および津波の平面計算を行って被災要因の推定を行ったが、巨大な津波が具体的にどのように作用し、護岸が破壊されたのか詳細は未だ明らかになっていない。そこで、本研究では、東北地方太平洋沖地震津波を対象にして、数値波動水路により断面モデルでの計算を行い、津波が護岸を越流する際の護岸への作用外力について分析を行ったものである。

2. 検討対象箇所

研究対象箇所は、宮城県気仙沼市御伊勢浜海水浴場である。被災後の空中写真を写真-1に示す。御伊勢浜海水浴場は、被災前は護岸前に数10m幅の砂浜、背後地にはマツの海岸林を有する弓なりの海岸であったが、東北地方太平洋沖地震津波で護岸が数100mに渡って倒壊・流失し、汀線が50~200m程度後退した。津波浸水高は、15~16m(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる速報値)であり、被災前の護岸背後の地盤高は3~4m前後であったと考えられることから、約10m程度の深さで越流が発生したと考えられる。背後地は、海岸林と田圃と街道沿いの集落であり、浸水範囲内の海岸林・家屋はその多くが流出した。

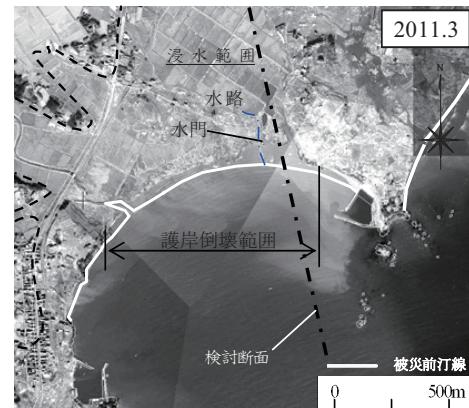


写真-1 御伊勢浜海水浴場被災後写真
(国土地理院撮影)

3. 検討方法

対象海岸に代表的な断面(写真-1 一点鎖線)を設定し、断面地形モデルを作成した。その地形モデルを断面水路として数値波動水路(CADMAS-SURFver. 5.1)を用いて津波解析を行った。入力波は平面津波計算モデルの結果から得られた数値を入力した。

3.1 計算モデル

数値波動水路の計算モデルを図-1に示す。地形条件は、護岸法線より海側(T.P.+3.65~T.P.-10.0m)につ

*Analysis of the effect of external force to the revetment due to the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake and Tsunami by Tsuyoshi NAGASAWA and Hitoshi TANAKA.

いては、被災後の深浅測量に基づく横断図より作成した。T.P. -10m～-30m については、被災前の海底地形図より作成した。護岸より陸側背後地形については、現地の背後地形の平均的な勾配に合わせて一様勾配とし、痕跡調査に基づく最大週上高（約 T.P. +15m）に対して十分な余裕を持つよう、最大標高を T.P. +20m に設定した。また数値波動水槽については、津波の打ち上げに対して十分な余裕を持つように水路上端高を T.P. +40m とし、下端高は造波境界部の水深-30m に設定した。なお、計算格子は、構造物周辺を 0.2m メッシュとし、その周辺から徐々にメッシュサイズを大きくして解析を行った。各諸数値の計測位置を図-1 に示す。計測項目は、水位、水平・鉛直流速、圧力とした。特に護岸部は計測間隔を密に配置した。

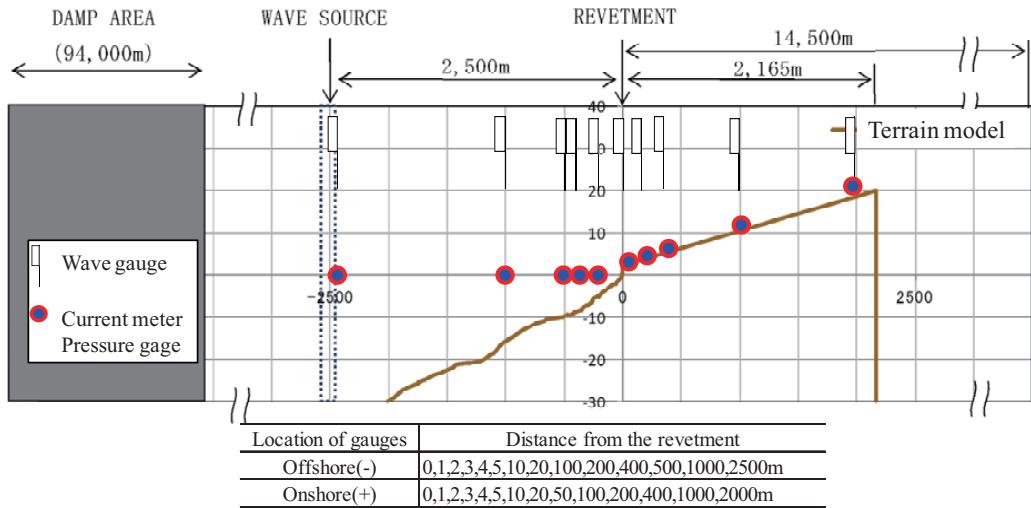


図-1 計算モデル図

3.2 計算条件

(1) 数値波動水路計算条件

数値波動水路の計算条件の一覧を表-1 に示す。

(2) 入力波

入力波については、津波の平面計算を行い断面上で得られた水位変化より作成した。津波の平面計算条件は表-2 の通りである。津波の平面計算結果（最大浸水深）を図-2 に示す。

表-1 数値波動水路の計算条件

項目	設 定
計算領域	X方向 : -952,536m～14,665m Z方向 : -30m～40m
水深h	29.662m (初期水位T.P.-0.338m)
Δx	0.2m～1m
Δz	0.2m～276m
Δt	Auto
差分スキーム	VP-DONOR
ポーラス下限値	0.001
造波モデル	造波ソース（津波波形入力）
右端側	開境界
境界条件	SLIP
SubLoop	2回

表-2 津波の平面計算条件

項目	計算条件
メッシュ	1350m, 450m, 150m, 50m, 10m
支配方程式	非線形二次元モデル, 連続式,運動方程式
計算手法	有限差分法,リープフロッグ法
断層モデル	東北地方太平洋沖地震津波 東北大模型ver1.0 (Tohoku University model version 1.0)
潮位	T.P.-0.41m
地形モデル	被災後地形
構造物条件	構造物の越流破壊なし

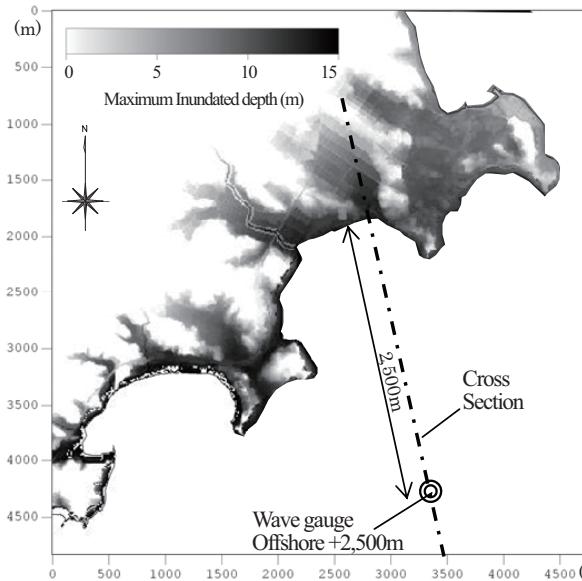


図-2 平面計算結果（最大浸水深）

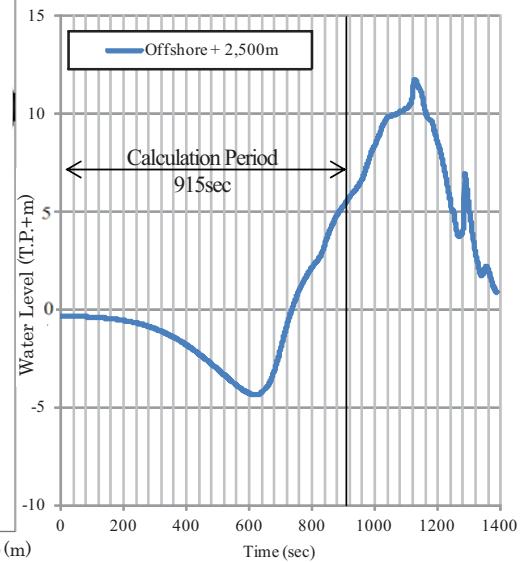


図-3 入力波（計算値、沖合2, 500m 地点）

平面計算結果のうち、比較的反射の影響を受けにくい範囲の沖合点の水位として、護岸法線より沖合2,500m地点の水位波形を入力波として用いることとした（図-3）。また、入力波形としては、最初の第1波を対象とし、反射波の影響が大きい第二波以降は対象外とするとともに、検討対象区域では水位変動が小さい地震発生から最初の20分間も対象外とした。入力波形を図-3に示す。本稿では、護岸に大きな力が作用すると考えられる護岸越流時（約890秒）を含む915秒間の計算結果について報告する。

なお、引き波時に反射波の影響と見られる小さなピークが見られることから、入反射分離を試みたが、除去できなかった。従って、測線近傍以外からの反射波と考え、除去しないこととした。

4. 計算結果

4.1 入射波の検定

最初に波が正しく入力されているかどうか確認を行うため、入射波の検定を行った。検定箇所は、造波位置（2,500m沖）とした。図-4にその結果を示す。計算結果の方が、水位が低いものの概ね想定どおり入力ができていることがわかる。

4.2 水位変化

各地点における水位の時系列変化を図-5に示す。なお、同図には、護岸周辺に津波が到達する800秒以降の変化を示した。また、護岸周辺の水位・流速・圧力の計測地点の詳

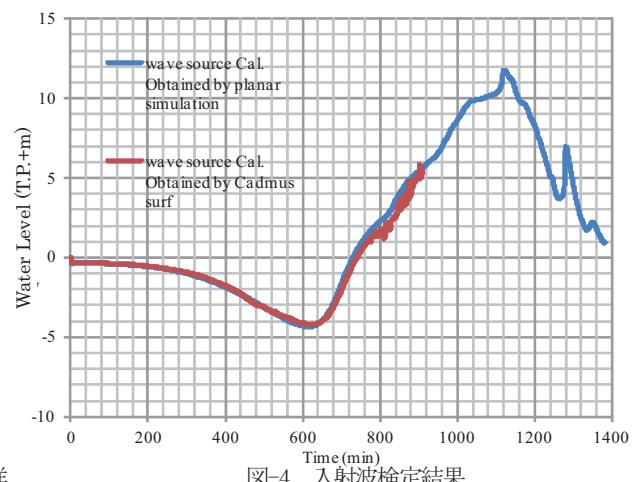


図-4 入射波検定結果

細位置図を図-6に示す。入力波形は引き波初動であり、沿岸ほど水位が低下する。水位の低下量は、沖合400m地点で-7m以上に達し、汀線から沖合200m地点までは海底が露出した。押し波時には、今回の計算期間では水位はピークに達していないものの、沿岸部での水位は10m近くに達して護岸を越流し（約890s）、護岸部陸側（図-5, Onshore03m）の水深は5mにも達した。越流時には、護岸にぶつかり、水塊が大きく跳ね上がっており（図-7）、護岸前面の水位が高くなつた。

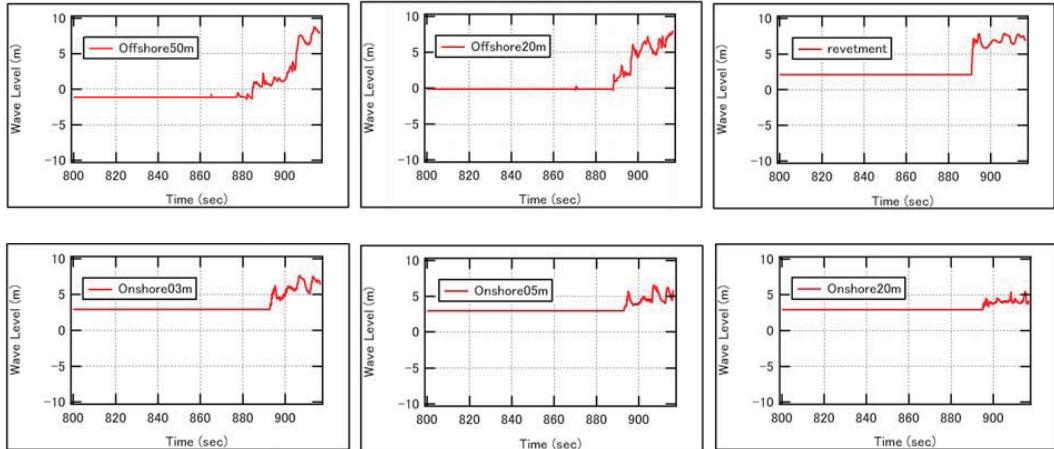


図-5 水位の時系列変化計算結果

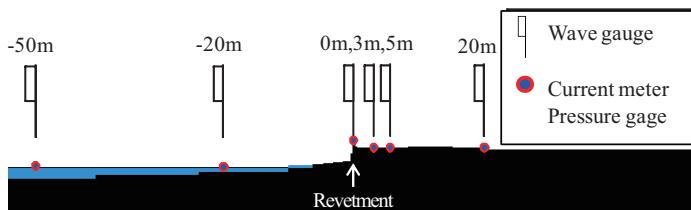


図-6 護岸周辺の水位・流速・圧力の計測地点

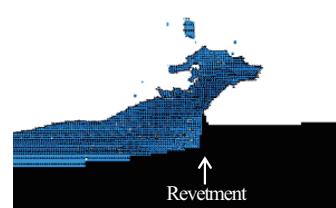


図-7 護岸越流状況

4.3 流速変化

各地点における流速の時系列変化を図-8に示す。流速計測点は、水位計測点と同じ箇所であり、海上についてはT.P. ±0.0m、陸上については、地面直上部である（図-6）。入射波形は、引波初動であり、最初の時間は、流速値がとれていないことから、水位変化同様に800秒後からの結果を図-8には示した。

反射波の影響がでていない沖合1,000mの流速は2~3m程度と安定しているが、反射波の影響出始めると500mより陸側では、鉛直流速（W）はほとんどないものの、水平流速（U）の変動は大きく、流速5~10m/sとなつた（図-8, Offshore50m, 20m）。次に、護岸部分では、水平方向の流速が小さくなる一方で、鉛直上方向の流速が非常に大きくなつておる、特に先端部の流速は15m/sを越えるような流速が発生した（図-8, Revetment）。一方、護岸直背後では、流速方向が陸向きから海向きに反転した。これは、渦が形成されたためと考えられる（図-8, Onshore03m, 05m）。護岸から10m程度離れると流向・流速が比較的安定し、5~10m/s程度の流速値となつた（図-8, Onshore20m）。

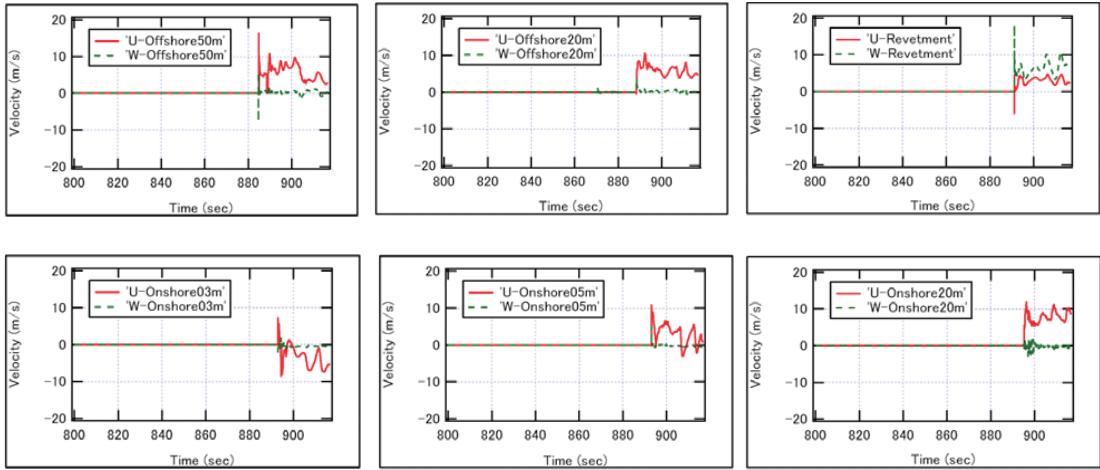


図-8 流速の時系列変化計算結果

4.4 圧力変化

圧力の時系列変化を図-9に示す。圧力の計測位置は、流速計測地点と同地点である。護岸より沖側の各地点の圧力変化はほぼ水位変動に対応しており、ほぼ静水圧になっていると考えられる（図-9, Offshore50m, 20m, 0.0m）。護岸より陸側の計測点の水位変化と圧力変化を比較すると、津波先端が到達したと考えられる890秒付近で、静水圧を越える強い圧力が発生している（図-9, Onshore03m, 05m, 20m）。これは、越水した水が落下したことによる衝撃的な圧力と考えられる。東北地方太平洋沖地震津波では、海岸保全施設背後地盤の洗掘や裏法面等の破壊が多く見られていることから、護岸より陸側の強い作用外力の影響については、今後検討が必要と考えられる。

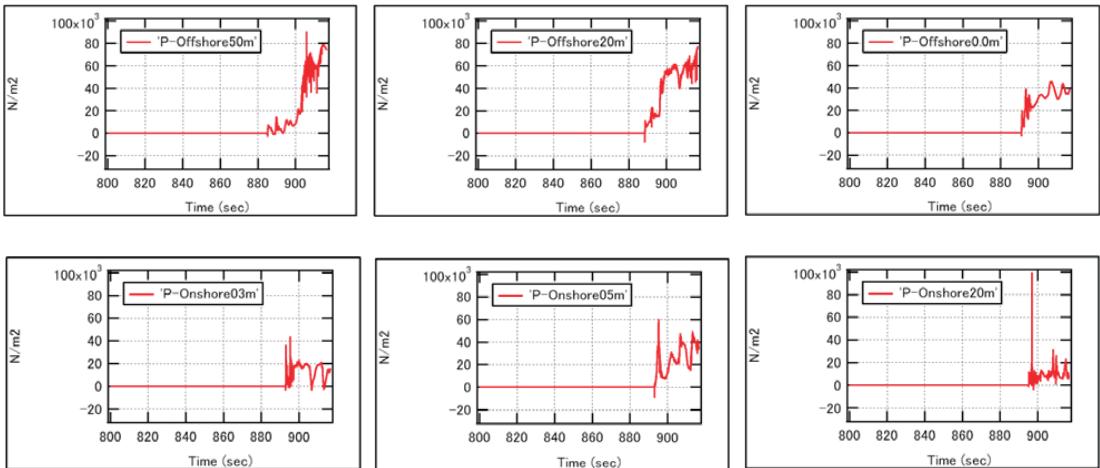


図-9 圧力の時系列変化計算結果

5. 波圧による断面照査

当該海岸は護岸タイプであり、背後に土圧を抱えていることから、押し波に対して強い構造であると言える。そこで、護岸の弱点となる波返し部分の断面照査を行った。護岸に作用する圧力の計算結果を図-10に示す。

図-10に示した護岸表法面に作用する圧力値から波返工に対してせん断と曲げモーメントに対して許容応力度法による照査を行った結果、無筋構造物とした場合、曲げモーメントに対して安全率が1程度となった。したがって、断面モデルで計算した状況が対象海岸の護岸越流時の状況の全てを表現しているわけではないことを考慮すると、地形条件の違い等に伴う作用波圧の大小や波返工の配筋の有無、部材厚の違いにより破壊が左右されたものと考えられる。実際、当該海岸では、破堤せずに残った海岸堤防では波返工の破壊が見られなかったが、近傍の海岸では波返工の破断も見られており、両方の状況が見られた。

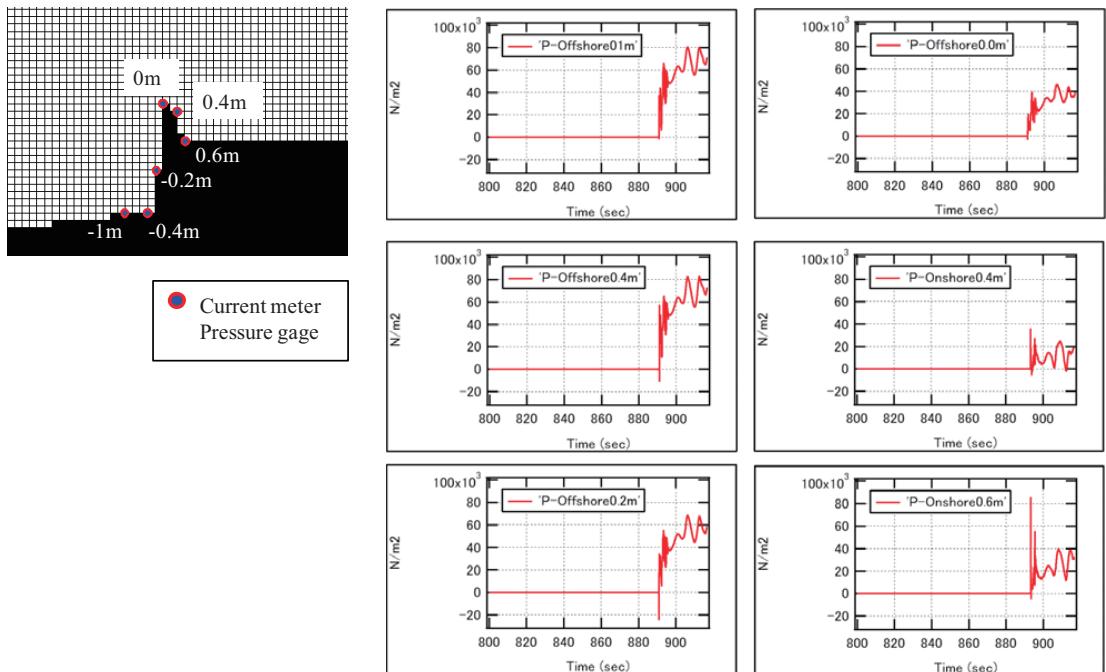


図-10 護岸に作用する圧力の時系列変化計算結果

6.まとめ

東北地方太平洋沖地震津波を対象に数値波動水路による護岸越流時の津波挙動の再現計算を行い、作用外力の検討を行った。計算結果から、護岸周辺には5~10m/sの非常に速い流れが発生し、特に津波の先端が護岸に到達した際は、鉛直上方に大きな水塊がうちあがり、護岸背後に落下することが分かった。このような護岸周りの強い流れに伴い、護岸背後地盤等が洗掘される等により、護岸の安定性が低下し、破堤に至ったと考えられる。ただし、当該海岸は、現地護岸の破壊状況により引き波時での破壊も示唆されていることから、さらに検討が必要である。

参考文献

- 1) 永澤 豪・田中 仁(2012):津波による大規模地形変化とそれに伴う構造物の被災要因の分析、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.68,No.2, pp.1361-1365.
- 2) 「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」による速報値
- 3) 平成23年(2011年)東日本大震災2.5万分1浸水範囲概況図(宮城県版)国土地理院技術資料D・1-No.589, No.77
- 4) 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル(version1.0)
(<http://www.coastal.jp/ttjt/index.php?plugin=attach&refer=津波計算結果&openfile=110610vers1.0.pdf>)