東北地方太平洋沖地震津波で被災した胸壁の津波越流に関する 数値計算による検証

Numerical Analysis on Damage of Seawall due to Tsunami Overflow at the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

浅井 正¹・樋口直人²・田中 聡³

Tadashi ASAI, Naoto HIGUCHI and Satoshi TANAKA

Coastal protection facilities were heavily damaged by tsunami more than the design tsunami in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. This paper describes the characteristics of the tsunami overflow exceeding seawall type of coastal structures and the effect on scour through numerical analysis. Profiles of tsunami overflow and wave forces acting to the seawalls and to ground surface behind them are examined to understand the mechanism of failure.

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震による津波により三陸沿岸の海岸保全施設は甚大な被害を受けた。施設天端を越流する流れとこれにともなう洗掘が被災原因の一つと考えられており、構造物の設計において、設計津波を超える津波への対応が求められている。

岩手県・宮城県の胸壁の被災調査結果から、浅井(2013)は、地盤面から天端までの高さが大きな場合に越流水深が小さくても被災が発生する傾向を示し、その原因として胸壁では越流の落差が大きくなることにより洗掘等が発生しやすくなっている可能性を示している。

ここで、胸壁とは、港湾等、海岸線に施設が存在する場合にその背後に設置される海岸保全施設のことを言う。このため、平常時に構造物海側は水面と接しておらず、被災時に遡上した津波が入射するという特徴を持つ。また、用地確保等の問題からコンクリート製の直立壁構造が一般的であり、天端上の越流では堤体側面から剥離し、直接陸側の地盤を打ち付けるという特徴を持つ。

越流による防波堤の被災メカニズムについては有川ら(2013)等、海岸堤防・護岸については加藤ら(2012)、八木ら(2012)等により検討が進められているが、胸壁のように陸側の地盤に直接越流が打ち付けるような場合についての検討はなされていない。

そこで、本論文では、津波により被災した胸壁の断面形状をモデル化して、CADMAS-SURF 2Dを用いて津波水位を数種類変えた数値計算を行い、越流時の堤体陸側の流況や堤体に作用する応力分布を整理した。次に、洗掘

形状による越流の流況や渦の発生、底面の応力分布の差異について検討し、洗掘の進行やこれによる胸壁の被災メカニズムへの影響について考察した。

2. CADMAS-SURF 2Dによる越流の数値計算

(1) 対象断面および計算領域

計算対象とした断面の諸元は、被災事例から押し波により被災し、堤体陸側に洗掘がみられた重力式胸壁を抽出した。また、胸壁および海側にある物揚場の形状は、メッシュ近似により設定した。対象断面の概要を図-1、構造物の諸元を表-1に示す。計算領域については、海側の領域を沖側から岸壁先端までの150m、陸側の領域を岸壁先端から終端までの94mに設定した。水平方向のメッシュ間隔は沖側から165mの範囲を0.5m刻み、165mから204m(胸壁法先から海側に15mの地点から陸側に39m)の範囲を0.1m刻み、204mから陸側終端の範囲を0.5m刻み

図-1 数値計算の対象断面

表-1 構造物の諸元

	設定条件	
胸 壁	・天 端 高	: D.L.+7.3m
	・表法勾配	: 1 : 0.1
	・裏法勾配	: 1 : 0.5
	・岸壁地表面の高さ	: D.L.+2.3m
	・岸壁から法先までの距離	: 30m
岸壁・物揚場	・天端高	: D.L.+2.0m
	・勾配	: 1/20
海底勾配	・水平	

1 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所
沿岸海洋・防災研究部沿岸防災研究室長
2 工修 (株)エコー 技術本部 防災解析部
3 正会員 工修 (株)エコー 技術本部 防災解析部長

に設定した。

(2) 計算条件

本論文では、海側の境界から津波を一樣流で与え、法先前面の浸水深がほぼ一定になった状態の水位、流速および圧力値を算出した。浸水深は、胸壁堤体の天端高(DL+7.3m)程度、現地の痕跡高さ(DL+9.6m)程度およびその中間の3種類とした。

それぞれの浸水深を与える流速 u は、予備計算より、 $u=0.1\text{m/s}$ (浸水深DL+7.66m)、 1.0m/s (同DL+8.74m)および 2.0m/s (同DL+9.65m)と設定した。岩手県(2011)の東北地方太平洋沖地震津波の再現シミュレーション結果によれば、現地の津波流速として $1.0\text{m/s}\sim 3.0\text{m/s}$ の範囲の値が得られており、妥当な値であると考えられる。

(3) 洗掘形状

本論文では、堤体陸側の地盤が洗掘された場合の越流の状況を計算し、洗掘なしの場合との比較を行い、洗掘の進行にともなう堤体周辺の応力状態の変化について検討した。洗掘形状は固定して計算を行っている。津波被災時の洗掘状況に関する情報はほとんど得られていないため、正弦曲線、矩形、台形でそれぞれ近似した場合について計算した。端部の形状が計算結果に与える影響に

ついて流況等から検討し、被災時の堤体や地盤に作用する応力状態を議論した。

洗掘の最大深さ D については、越流により背後に生じる定在渦の直径に等しいと仮定して設定した。定在渦の直径については、野口ら(1997)が護岸を対象とした水理模型実験結果から提案した算定式を用いて算出した。

洗掘幅 X については、鳩貝ら(2012)が海岸堤防を対象とした水理模型実験の結果から得られた D と X の比(X/D)を参考に設定した。ただし、鳩貝らの実験では緩傾斜の海岸堤防を対象にしているため、本研究では越流水の落下角度の補正を加えて $X/D=5.4$ と設定した。しかし、いくつかの計算結果で洗掘部の流れが不安定であったことや渦が水平方向に2つ見られたことなどから、その1/2の値である $X/D=2.7$ と再設定した。

3. 数値計算の結果

(1) 洗掘形状が越流及び堤体背後の流れに与える影響

図-2~5は、それぞれ洗掘なし、洗掘あり(正弦近似)、同(矩形近似)、同(台形近似)の場合の越流状況に対する計算結果のスナップショットを示す。いずれも越流の流速 $u=2.0\text{m/s}$ としている。また、図-6~9は、それぞれ

図-2 越流の計算結果
(洗掘なし)

図-3 越流の計算結果
(洗掘あり：正弦近似)

図-4 越流の計算結果
(洗掘あり：矩形近似)

図-5 越流の計算結果
(洗掘あり：台形近似)

の計算における水面形状（時間平均）ならびに水平方向の各位置での底面における圧力水頭、速度水頭および全水頭を示している。ここで、水平方向の原点は胸壁表法先とし、原点から40m陸域背後地まで計測した。

設計津波をわずかに超える津波越流を与えた場合（ $u=0.1\text{m/s}$ ）、越流水深が小さく、越流が堤体の陸側側面に沿って流れ、地盤を打ち付けるような強い流れが発生しなかった。このため、越流による洗掘への影響は小さいと判断し、洗掘形状による影響の検討対象から外した。

洗掘なしの場合（図-3）は、越流が堤体陸側に放物線状に流出した後、陸側5m地点で地盤面に衝突して大きな乱れを形成している。圧力水頭は5m地点で急激に増加するが10m地点までに減衰する。10m地点以降、スナップ

図-6 洗掘の有無による水面形状の比較

図-7 洗掘の有無による速度水頭の比較

図-8 洗掘の有無による圧力水頭の比較

図-9 洗掘の有無による全水頭の比較

ショットでは流れに乱れがみられるが、図-6～9に示されるそれぞれの水頭の値はほぼ一定である。

この状況は、津波の越流した流れが地盤に打ちつけている状態を示していると考えられる。図-6に示す流れの落下場所と同地点において、図-8に示す圧力水頭が最大になっており、この圧力に対して地盤から底質が浮遊もしくは流出する場合に洗掘が始まるものと考えられる。洗掘ありの場合では、洗掘形状を正弦曲線で近似した場合（図-4）では、洗掘部分に大きな渦が発生しているのが特徴的である。最大洗掘深さは3.1mと設定している。渦部の方では水深が深くなるため圧力水頭が大きくなるが、洗掘なしの場合のような尖ったピークは見られない。速度水頭は、18m地点以降で大きくなり、25m地点以降はほぼ一定となる。その値は洗掘なしの場合の約40%であった。渦によるエネルギーの散逸による影響と考えられ、乱れによる散逸のほか、堤体陸側の地盤面へ洗掘の原因となる運動量として与えられると考えられる。

洗掘形状を矩形や台形で近似した場合（図-4および5）では、正弦曲線で近似した場合と同様な傾向が見られるが、洗掘部分の陸側端の13m地点でも乱れが発生する。乱れにより圧力水頭、速度水頭ともに上昇している。25m地点以降の速度水頭は矩形近似では洗掘なしの場合の約62%であり、台形近似では約41%であった。

矩形近似や台形近似では、越流の落下地点や洗掘部の陸側端で圧力水頭が大きく、陸側端では水位の上昇もみられ、局所的に洗掘が進むと考えられる。正弦近似の場合は、圧力水頭が洗掘深さとほぼ同じなので静水压程度の圧力となり、洗掘がほぼ安定した状態と考えられる。

(2) 堤体に作用する応力

計算結果から得られる圧力をもとに、堤体の各面に作用する応力分布を算出し堤体海側圧力、揚圧力、堤体陸側圧力、天端面圧力をそれぞれ整理した。そして、防波堤に対する津波波圧の式である谷本式（谷本ら1983）、水工研提案式（八木ら2012）および静水压差から堤体の各面に作用する波力を算出し、比較した。堤体の各面に作用する応力のイメージを図-10に示す。堤体の揚圧力を計算するため、(1)で検討した堤体と同一形状の堤体について、下面を透水性のある捨て石地盤と仮定して再計算した。

図-10 堤体周各面に作用する応力のイメージ

図-11～14は、洗掘なしの断面について越流の流速 $u=2.0\text{m/s}$ とした場合の堤体海側圧力、揚圧力、堤体陸側圧力および天端面圧力の計算結果を示している。

堤体海側圧力および堤体陸側圧力は、天端付近で計算値と波力公式の値はよく一致しており、堤体の滑動や転倒の検討に活用できると考えられる。詳細に見ると、堤体の上端および下端で水工研提案式および静水圧は計算

図-11 胸壁堤体側面(海側)に作用する圧力

図-12 胸壁堤体側面(陸側)に作用する圧力

図-13 胸壁天端面に作用する圧力

図-14 胸壁に作用する揚圧力

図-15 数値計算結果と波力公式の波力の比較

結果より大きくなっている。堤体に作用する波力（圧力の積分値）は海側および陸側でそれぞれ計算結果の約1.1倍、約1.3倍である。堤体に沿った流れが生じるため、計算結果では圧力が小さくなると考えられる。

天端面の波力は、計算値とくらべて波力公式の値は約12倍になり、大きな値となった。これは側面の圧力が上端で小さくなるのと同じく、流れの影響と考えられる。天端面圧力は滑動抵抗力を増大させる方向にはたらくため、波力公式の値は危険側の値になっており、今後、水理模型実験等で妥当性を確認する必要がある。

揚圧力については、谷本式は堤体の陸側端でゼロと仮定しているため、全体的に小さな値を示している。また、水工研提案式は堤体の海側端で大きな値となり、波力で約1.3倍の値になっている。

図-15は、堤体海側圧力、堤体陸側圧力、天端面圧力および揚圧力をそれぞれ積分して得た数値計算結果と波力公式の波力を示す。波力公式は水工研提案式を用いている。いずれの値も波力公式の方が今回の数値計算の値より大きくなっており、安全側になっている。

(3) 洗掘幅が越流及び堤体背後の流れに与える影響

図-16および17は、洗掘あり（台形近似）の場合でそれ

図-16 越流の計算結果
(洗掘幅が短い場合)

図-17 越流の計算結果
(洗掘幅が長い場合)

図-18 洗掘の有無による水位形状の比較
(洗掘幅が長い場合: $X/D=5.4$)

図-19 洗掘の有無による圧力水頭の比較
(洗掘幅が長い場合: $X/D=5.4$)

ぞれ $X/D=2.7$ および 5.4 の場合の計算結果のスナップショットを示す。いずれも越流の流速 $u=2.0\text{m/s}$ である。

洗掘幅が短い($X/D=2.7$) 場合は、洗掘部に渦が1つ形成され、洗掘部の直後で水位が大きくなった後、乱れを形成しながら後方に流れる。洗掘幅が長い($X/D=5.4$) 場合の計算結果では、洗掘部の流れが不安定であり、水平方向に渦が2つみられる。

$X/D=5.4$ の場合の水面形状および底面での圧力水頭をそれぞれ図-18および19に示す。図-18より、洗掘部上の17m地点と22m地点の2箇所水面にピークができてい。また、図-19よりピークの部分で圧力は減少している。実際の現象では、水面がピークになる場所では越流した流れが滞留するため、その地点で地盤の洗掘が緩やかになり、安定した洗掘形状になると考えられ、現象の再現には洗掘幅の設定も重要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、重力式胸壁を対象に、天端を超える津波による越流を用いた数値計算により再現し、胸壁への作用圧力、胸壁陸側の洗掘に影響するエネルギー変化について整理し、被災メカニズムへの影響について検討した。得られた知見についてまとめると以下のとおりである。

- ① 洗掘がない場合、越流の落下地点で圧力水頭が大きくなり、洗掘の進行に寄与すると考えられる。洗掘がある場合、とくに正弦近似した場合では、圧力水頭が静水圧程度であった。洗掘部で発生する渦のためエネルギー散逸が大きくなり、堤体陸側の速度水頭は洗掘なしと比べて約40%であった。
- ② 胸壁堤体の応力分布の形状は水工研提案式でよく表現できたが、積算値で比較すると側面で計算結果の1.1～1.3倍、天端部で約12倍であり、滑動の検討において過大評価となっている可能性がある。
- ③ 洗掘形状や洗掘幅により数値計算で得られる越流や圧力の状態は変化する。越流による堤体陸側地盤への影響を適切に評価するためには、実際の現象にあわせて洗掘形状を適切に与える必要がある。

最後に、現地の早期復興を祈る一方で、断面設定で参考にした現地調査の実施や関連データの入手にあたり国土交通省港湾局や東北地方整備局の各位には多大なご尽力をいただいた。ここに記して感謝の意を申し上げたい。

参考文献

- 浅井 正 (2013): 2011年東北地方太平洋地震津波における胸壁の被災状況およびその要因, 第68回年次学術講演会, II-186, pp.371-372.
- 有川太郎・佐藤昌治・下迫健一郎・巖 駿 (2013): 津波越流時における防波堤の安定性に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.916-920.
- 岩手県 (2011): 第6回岩手県津波防災技術専門委員会参考資料 (岩手県HPより)。
- 加藤史訓・野口賢二・諏訪義雄・木村 晃・河合雅史・高木利光・小俣雅志 (2012): 東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野南部での海岸堤防被災・洗掘に関する調査, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1396-1400.
- 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田 繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野晋・平石哲也 (1983): 1983年日本海中部地震津波の実態と二、三の考察, 港湾技術研究所資料, No.470, pp.299.
- 野口賢二・佐藤慎司・田中重信 (1997): 津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集第44巻, pp.296-300.
- 鳩貝 聡・諏訪義雄・加藤史訓 (2012): 津波の越流による海岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理模型実験, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.406-411.
- 八木 宏・杉松宏一・中山哲蔵・西 敬浩・三上信雄・佐々木崇之・林健太郎 (2012): 東北地方太平洋沖地震津波による漁港施設 (防波堤) の被災状況とその原因について, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1341-1345.