

越流津波による都市型浸水シナリオの高精度化の試み

理工学域工学系 長山昭夫

1. 研究目的

2011年東北地方太平洋沖地震による越流津波により東北地方の多くで甚大な被害を被った。この地震発生以前でも多くの海岸工学者が地震津波に関する知見を蓄積し様々な防災・減災活動が実施されていたが、想定を大きく超えた津波が襲来したことで東北地方を中心に被害規模が拡大した。この結果を受け政府の中央防災会議は、津波の発生頻度と規模に応じL1津波とL2津波に分けそれぞれ対策を講じる方針を打ち出した。これは発生頻度が高く、規模がそれほど大きくないL1津波に対しては海岸構造物等のハードで対策し、発生頻度が低いが一度発生すると壊滅的な被害をもたらす大きさのL2津波に対してはソフト対策を中心に対応するとした。一方、津波に対しての避難計画などのソフト対策を実施する場合、襲来した津波の浸水想定範囲が全ての基本データとなる。しかしながら従来の津波に対する都市型浸水予測は、計算負荷の軽減のため水深方向に積分した2次元浅水モデルが用いられるため、強い3次元流動を有する巨大津波が都市部に作用した場合の予測精度には問題がある。さらに沖合から襲来した津波の多くは、防波堤を越流し市街地に浸水するため越流津波による浸水過程の解明が必須となる。

以上の背景を受け本報告は、3次元流体ライブラリ OpenFOAM を用いて津波による防波堤からの越流、街路への貯留、不透過街区への衝突と交差点での合流・衝突現象を抽出し、典型的な越流津波による都市型浸水シナリオの高精度化を目指す。

2. 数値モデルによる検討

2.1 支配方程式

本研究はオープンソースの数値流体ライブラリ群の OpenFOAM を利用した。使用ソルバは混相流計算である interFoam をベースに造波・境界条件を改良した olaFoam とした。また interFoam の基礎式は、連続の式と非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式であり有限体積法で離散化する。また気液界面の追跡については VOF 法 (Volume Of Fluid) を採用しており、特長としては界面の数値拡散を抑制する人工圧縮項を導入した移流方程式を採用している。また olaFoam は Active boundary と称するデジタルフィルターを導入し、入射した波の流速と逆向きの流速を与えることで反射波の発生を抑制している。

2.2 動的接触角の導入

液滴の接触角と界面エネルギーについては図-1に示すように液滴の静的平衡状態を想定した Young の式を採用し、この式に新たに動的接触角を導入した。動的接触角は液滴の動的平衡状態を表現するためのものでヒステリシスを有し、前進接触角と後退接触角では異なる値をとることがわかっている。今回は Faghri らが提案している式を利用した。

2.3 ベンチマークモデルによる精度検証

オランダ海洋開発機構 (MARIN) で行われた Breaking dam flows のベンチマークモデルを使用し、提案モデルの整合性について検討をおこなった。このモデルは図-2に示すように dambreak モデルに直方体を追加した3次元モデルであり、図中の CH02 と CH04 において水位変動の観測値が取得されている。また今回 interFoam ソルバの特徴である人工圧縮項 Ca についても検討した。この人工圧縮項は計算の安定性を向上させる目的で導入されており、値の妥当性については検討の余地がある。今回は表-1に示すように3つの条件で検討を行った。動的接触角は Yokoi らが提案した数値を採用した。その結果を図-3に示す。

まず CH04 において 2.5s 付近までは、重力による水面の低下を示しており、どの case においても実験値と一致することがわかる。2.5s 以降は、崩れた水が反対側の壁に衝突後、反射してきた時の水面変動を示しており全体として実験値をほぼ再現できていることがわかる。また 2.5s から 3.0s 付近の初期の水位上昇では case02 と case03 のほうが case01 よりも再現性が高いことがわかった。

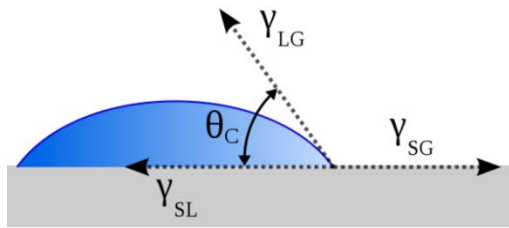


図-1 液滴の接触角と界面エネルギー

表-1 各ケースの設定条件

| | 動的前進 接触角 | 動的後退 接触角 | 人工圧縮 項 Ca |
|--------|-------------|-------------|----------------|
| case01 | - | - | 2.0 |
| case02 | 114° | 52° | 2.0 |
| case03 | 114° | 52° | 1.0 |

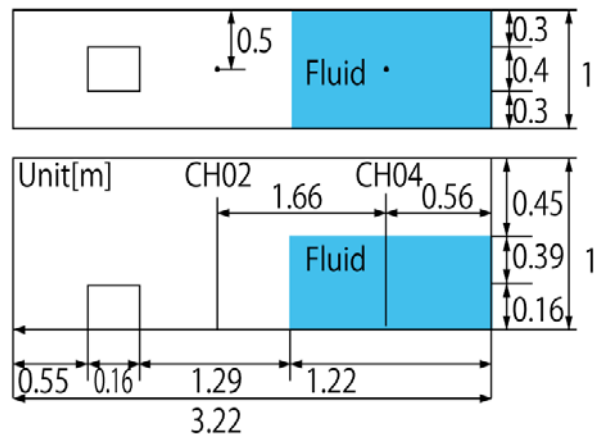


図-2 ベンチマークモデルの計算領域

CH02 は、水塊と直方体の中間位置であり、1.5s までは水塊先端部が直方体と直方体奥の壁に衝突するまでの水位上昇を示し、どの case においても実験値とほぼ一致する。しかし 1.5s~3.0s は、直方体と壁に衝突した水塊が反射された時の水位変動であり、気相と液相の複雑な混合が発生するため実験値と計算値は一致しない。動的接触角を設定していない case01 と設定した case02 と case03 においても差異が認められ、動的接触角を設定することで流体の混合過程に違いがあることが影響していることが想定される。人工圧縮項 Ca が水位変動に与える影響については、大きな違いはなく今回の条件下では Ca が水位変動に与える影響は小さいことがわかった。以上より人工圧縮項を考慮した VOF モデルに動的接触角を導入することで水位変動の再現精度が向上することがわかった。

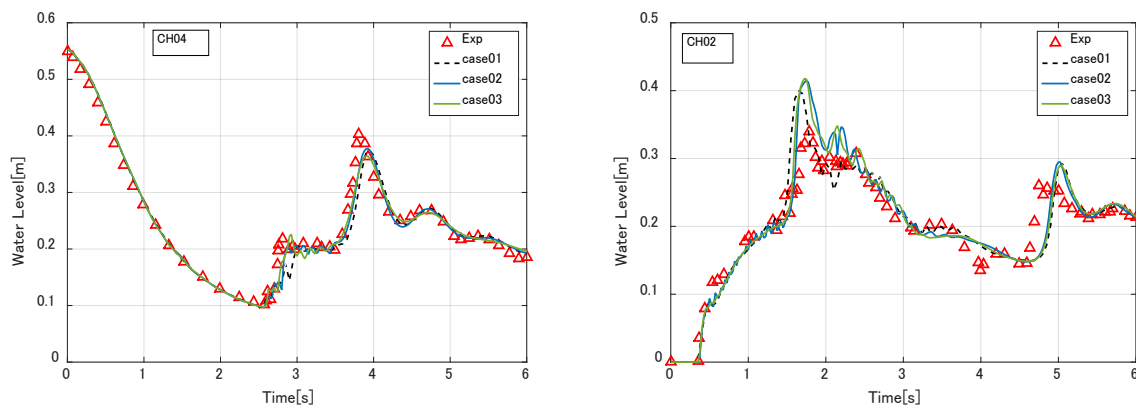


図-3 CH04(左)とCH02(右)における各caseの水位変動

2.4 津波越流モデルによる検討

次に津波が防波堤を越流し市外地に浸水することを想定した図-4のような計算領域を作成した。長さ 2.00m・幅 0.35m・高さ 0.195m の水路に高さ 0.05m の防波堤を想定した壁を設けた。また壁左側を海側とし津波入射による水位上昇を想定し流入境界部から $0.01\text{m}^3/\text{s}$ の流量を継続して流入させる条件とした。

堤内地には家屋群を想定した一辺 0.05m の直方体 6 個を格子状に配置し、この設置間隔を変化させた。直方体は、沖側から順に構造物 A、B、C と称する。今回は表-1 に示すように構造物の設置数と構造物設置間隔を変更し caseA から F までの計 6 ケースで検討を行った。caseF は構造物を全く設置していない場合、caseA は構造物 A を 1 個のみ設置した場合であり、その他は構造物を 6 個設置している。構造物設置間隔は直方体 1 辺の 0.25 倍、0.5 倍、1.0 倍、2.0 倍とした。

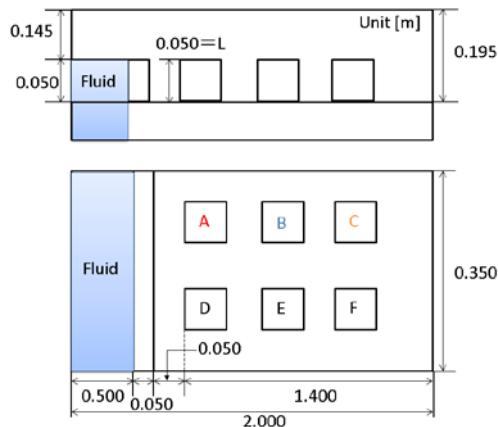


図-4 計算領域

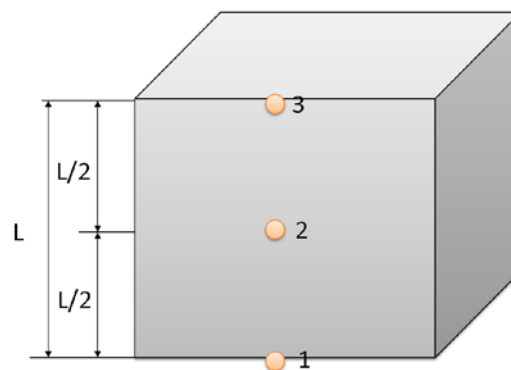


図-5 圧力測定位置

表-1 計算条件

| case | 構造物設置数 | 構造物設置間隔 |
|------|--------|---------|
| A | 1 | - |
| B | 6 | 0.25 |
| C | 6 | 0.50 |
| D | 6 | 1.00 |
| E | 6 | 2.00 |
| F | - | - |

2.5
水位の
時間変
動
全
く
構

造物を設置していない条件下での堤内地での水位変動を測定し、構造物を設置した条件下での各箇所での水位変動を測定し、無次元水位を求めた。図-6は構造物Aのみを設置した場合のA各面における無次元水位を示している。この図より、構造物前面での水位が最も低くついで側面、最終的に水位が最も高いのは背面との結果になった。これは構造物A直前で越流による渦が発生し、構造物背面においては渦流が発生しているためだと考えられる。また全てのケースにおいて6s以降では定常状態に達することを確認した。

図-7, 8, 9は、格子配列中央部の構造物Bの各面における無次元水位を示している。図-7は構造物間隔が0.25倍、図-8は構造物間隔が1.0倍、図-9は構造物間隔が2.0倍の条件である。これらの図より前後に構造物に挟まれた構造物Bでは、間隔条件により図-7のように各面がほぼ一定の水位になる場合と、図-9のように局所的に水位が上昇する面が存在する2つのパターンが存在することがわかる。つまり構造物が密に配置されている図-7においては、各面の水位変動にほとんど差がなく間隔が広がるにつれ、各面において水位差が生じ構造物間隔が1倍の場合、前面と背面が同じ高さの水位になり側面部はそれらよりも低い結果となる。さらに間隔が広がり2.0倍に達すると、前面での水位が上昇し他の面はほぼ一定水位になる。このように前後を構造物に挟まれている構造物の面での水位変動は構造物間隔に大きく影響を受けることがわかる。

2.6 作用波圧の検討

全く構造物を設置していない条件下での堤内地の圧力測定位置における水位変動を測定し、この水位変動の最大水位による静水圧を求めた。次に直方体の各面に作用する波圧を測定し、その波圧を最大水位による静水圧で除して無次元波圧を求めた。その一例を図-10に示す。

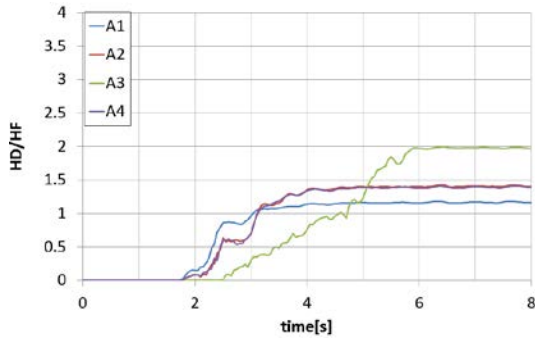


図-6 構造物Aのみ設置した場合の無次元水位

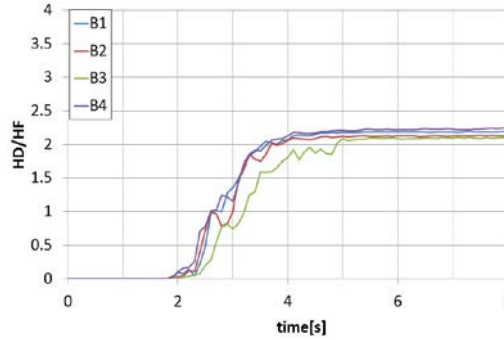


図-7 間隔0.25倍の構造物B各面での無次元水位

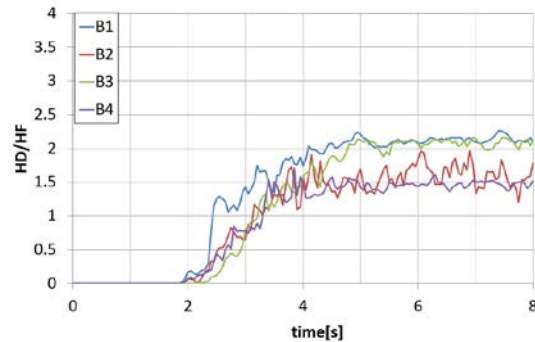


図-8 間隔1.0倍の構造物B各面での無次元水位

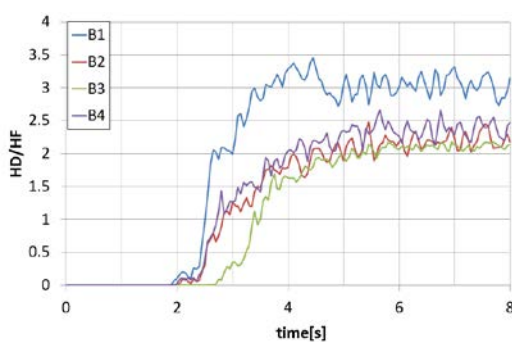


図-9 間隔2.0倍の構造物B各面での無次元水位

この図より防波堤を越流した津波は構造物の各面に波圧として作用することがわかり、静水圧のように水深があるほど(構造物底面に近づくほど)波圧が大きくなることがわかる。また陸上を遡上する津波が構造物に衝突すると、衝撃波圧と持続波圧の2つのピーク値が現れるといわれているが、今回は瞬間的な変動である衝撃波圧は確認できなかった。これは越流する速度が遡上津波よりも小さいためであり、今回の流入条件において6s以降は波圧が定常状態に達する結果となった。

図-11, 12, 13 は各構造物の面に作用する無次元最大波圧を構造物間隔ごとに整理したものである。図-11 は、構造物 A の各面に作用する波圧を示しており、構造物が全く設置されていない場合の静水圧の 1.5~2.0 倍程度の波圧が作用することがわかり、これは構造物間隔にほぼ影響を受けないことがわかる。図-12 は、構造物に前後を挟まれた構造物 B の各面に作用する波圧を示しており、面 1 において間隔が広いほど波圧が大きくなり、間隔が 2.0 倍の場合、静水圧の 3.5 倍の大きな波圧が生じていることがわかる。これは設置間隔が広がることで、構造物間に多量の水が流れ込むためであり、さらに図-9 の B1 のラインの無次元水位の大きさにも現れている。また側面の 2 と 4 は、反対側に構造物が存在するかどうか異なるが、今回の場合は設置間隔が狭いほど、反対側に構造物がある面 4 の無次元作用波圧が大きくなる傾向にあり、設置間隔が広がると反対側構造物の影響が小さくなるため、面 4 と面 2 への波圧はほぼ同程度になることがわかる。図-13 は前方のみに構造物が存在する構造物 C の各面に作用する波圧を示しており、構造物 B と同様に面 1 に作用する波圧が設置間隔に比例し上昇する傾向にある。しかし間隔 0.5 の場合が最も値が小さくなることから、必ずしも設置間隔と比例するわけではないことがわかる。この点については今後の検討としたい。さらに特徴的な点としては、背面である面 3 への波圧であり、構造物 C は背後に構造物が設置されていないため、水位が上昇しにくいと作用波圧が大きくなることとわかる。次に無次元最大水位と無次元最大波圧との相関を求めた。各面ごとに相関係数を求め、それを平均すると 0.796 と強い正の相関があることがわかった。これは各面に対して静水圧が作用することで生じる持続波圧が卓越するためである。

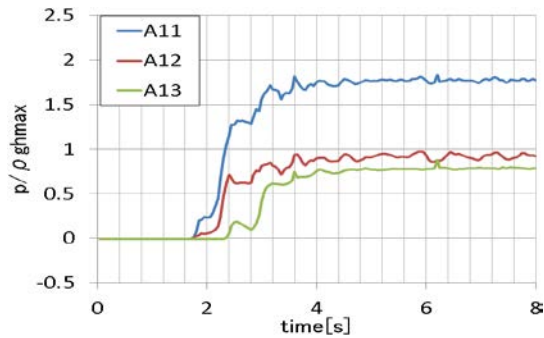


図-10 構造物面に作用する無次元波圧の一例

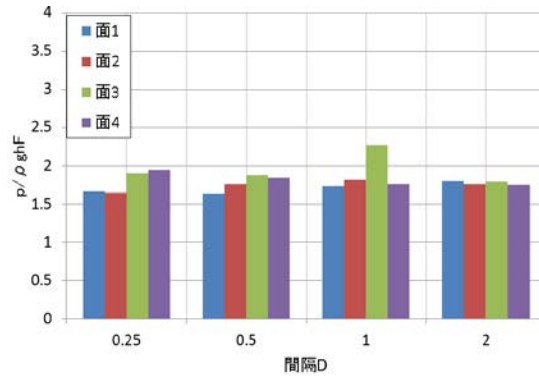


図-11 構造物Aの各面に作用する無次元最大波圧

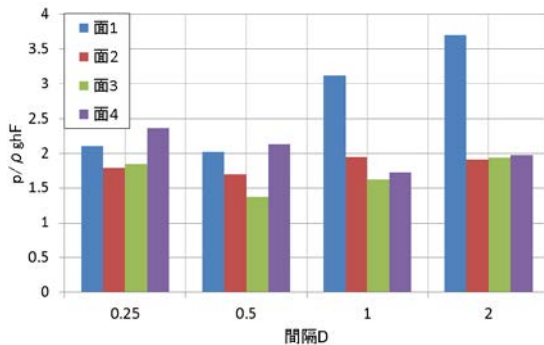


図-12 構造物Bの各面に作用する無次元最大波圧

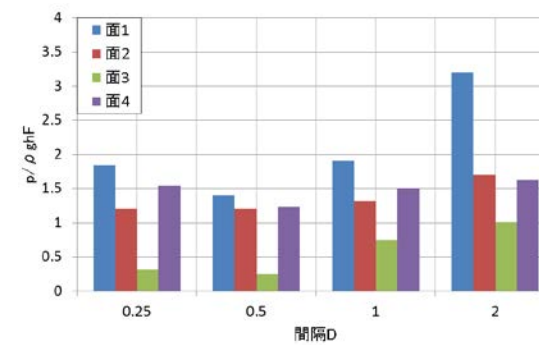


図-13 構造物Cの各面に作用する無次元最大波圧

2.7 流速変動の検討

次に構造物間の中央位置の水位変動に関して検討を行った。水位変動測定位置は図-14に示すように1から11の位置とした。図-15に構造物Aのみが設置されている場合の構造物A周辺の水位変動を示す。測点1と5では、越流による逆流の影響で負の値をとる。また構造物背後の測点2においては、構造物Aに向かう逆流が発生している。構造物間の測点6と7においては、岸向きの流れが定常的に発生していることがわかる。図-16には各ケースでの測点2での定常時における流速を示す。この図から構造物設置条件により、逆流の発生について違いがあることがわかる。caseAの場合、構造物1つのみを設置した条件であるため、構造物背後には渦が発生するため逆流が発生していることがわかる。また設置間隔が1よりも狭い場合のcaseB、C、Dにおいて逆流が発生しており、この流速は設置間隔が狭いほど小さい傾向にある。さらに設置間隔が1よりもcase2では逆流が発生しない。これは設置間隔が広がることで大量の水がこの区間に入り込むためであることがわかる。図-17には各ケースでの測点7での定常時における流速を示す。測点7では構造物設置条件に関係なく岸方向の流速が発生することがわかる。構造物間の岸沖方向に位置する遡上通路での流速も構造物の設置間隔に影響を受けることを想定していたが、今回の条件下では間隔に関係せず一定流速となった。

3. まとめ

都市部には住宅やビルの直方体構造物が規則的に配置されており、その間に街路が縫うように存在している。今回、直方体構造物を格子状に配置、前面に防波堤を設置した状態で津波を入射させた。その結果、護岸を越流した津波は都市浸水シナリオを有していることがわかった。

1) 津波先端部の街路への着水

越流した津波は防波堤上端から堤内地に着水する。その際、防波堤の壁面から距離が離れた位置に着水するため壁面と着水の空間に逆流が発生し定常的に渦が発生する。この渦の発生は、防波堤に隣接した構造物前面位置にまで影響を与えることがわかり、これは防波堤形状や構造物間距離、越流津波の条件に関係していることが想定できる。

2) 構造物面への衝突と街路への遡上

津波先端部は防波堤直近の構造物に衝突しながら構造物間の街路への遡上を開始する。

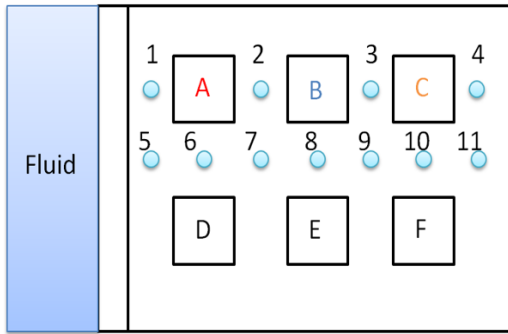


図-14 水位変動測定位置

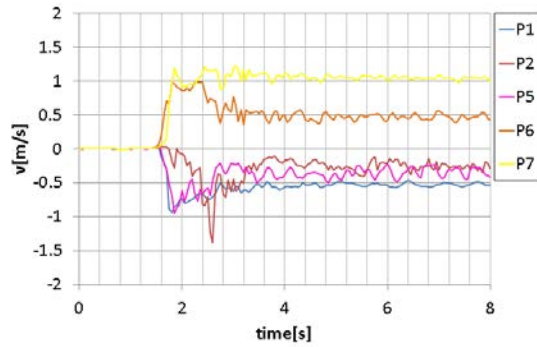


図-15 間隔0.25倍での構造物B各面での無次元水位変動

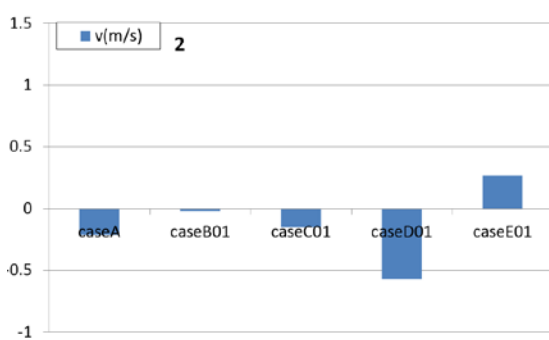


図-16 測点2における定常流速

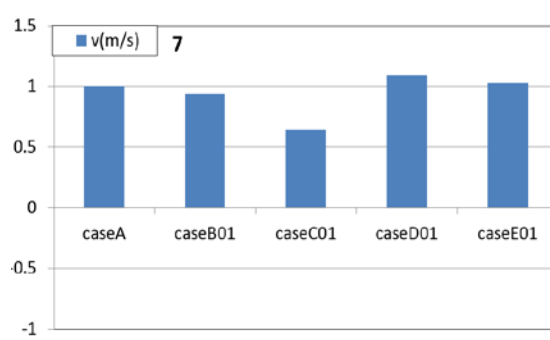


図-17 測点7における定常流速

構造物への衝突については今回の条件下では衝撃波圧が発生せず、水位に比例する持続波圧のみが発生していた。また構造物面に作用する無次元波圧は最大で3.5になりこの構造物は前後に構造物が設置されている中間部に位置する構造物であり前面に構造物が存在することで、水が大量に貯留することで波圧が大きくなることがわかった。街路での津波先端部の合流箇所では構造物の両端から水が衝突するために波圧が大きくなる。

3) 狭小部での滞留

構造物に挟まれた狭小部には、水が両端から浸水してくため流速が打ち消しあい滞留しやすく、渦が形成される。またこの滞留した水が構造物に対して大きな波圧として作用し格子状に配置された構造物の場合、四方を構造物に囲われた構造物前面に最も大きな波圧が生じる結果となった。

4) 前方構造物への越流

津波が長時間に渡り越流を継続した場合、防波堤に近い構造物においては新たに越流が発生する。さらに越流が継続する場合、背後の構造物への越流も継続することが想定できる。