盛土上の防潮施設に作用する津波波力

秋山 義信¹・岩前 伸幸²・池谷 毅³

¹正会員 鹿島建設技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:akiyamy@kajima.com

²正会員 鹿島建設技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:iwamae@kajima.com

³フェロー 鹿島建設技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:ikeya-t@kajima.com

東北地方太平洋沖地震の津波による広域被災の対策として、各所で防潮施設が建設中にある。陸上にある防潮施設の津波力に関する既往研究は、主に水平な陸上設置に対するものが主である。そこで、津波力への津波周期・陸上地形の影響の把握を目的とし、盛土(斜面)地形上に設置された壁堤・堰堤を対象に水理模型実験を行った。実験縮尺は1/50で、津波周期は現地換算で10, 15, 20分とした。結果、15分以上の津波では穏やかな持続圧が支配的で、一方、10分以下の津波では地形との関係もあり施設に津波が作用した瞬間に衝撃圧が発生し、津波周期の影響を確認した。津波分布は静水圧分布となり、水圧係数は水平陸上部の評価式の最大包絡値の3(朝倉ほか(2000))に対し、今回実験は同義結果となった。よって、水平陸上部の評価式を、基準高の定義、地形・構造からの反射影響等を考慮すれば適用できることを確認した。

Key Words : hydraulic model test, tsunami wave force, tide protection facility, embankment

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(Mw=9.0)の津波による広域被災で、現在、各所で復旧・防潮施設などの対策工が建設もしくは計画中の状況にある。

陸上構造物に作用する津波波圧の研究事例^{1,2)}は少なく、さらに、陸上地形については、今回の地震の後に研究された研究においても、水平な陸上に設置された施設(防潮施設や建物等)に作用する津波波圧に係る研究がほとんどである。

そこで、本論では、盛土(斜面)上に設置された防潮施設に作用する津波波圧の評価式の提案を目的として、断面二次元の水理模型実験を行った。施設が設置される地形の影響が大きいと考え、盛土(斜面)地形を実験で再現した。また、津波高を変化させた実験は多いものの、現地想定周期に対しての実験が少ない現状に対し、津波周期の影響が大きいと考え、周期を変化させた実験とした。なお、防潮施設は、壁堤と堰堤の2種類とした。

また、実験とは別途に、数値波動水路(CADMAS-SURF2D³⁾)を用い、今回地震による津波で、沖合で観測された二段型津波波形⁴⁾を再現し、盛土(斜面)地形上に設置された防潮施設周辺での津波変形の把握可能性について検討した。

2. 水理模型実験

(1) 実験方法

a) 縮尺・実験装置

実験幾何縮尺は1/50とした(Froude相似則)。以降、仮想現地換算での記載を基本とする。

実験装置は、図-1に示す長さ60m×幅0.7m×高さ1.5mの水路を使用した。津波の造波には、周期の長い津波を含む任意波形の造波が可能な、ポンプ式津波造波装置を使用した。なお、図には、海域部(沖部)の津波高の計測で使用する容量式波高計の設置位置を示す。

b) 仮想防潮施設条件

図-2に、護岸・盛土(斜面)地形、及び、防潮施設の実験配置図を示す。

護岸・盛土(斜面)地形条件は、護岸前面水深5.0m、護岸天端(水平床部)高DL+3.3m、盛土(斜面)地形天端高DL+9.3m(高さ6.0m、法勾配1:1.67)とする。

壁堤は高さ15m(実験換算30cm)で、設置位置は盛土(斜面)法肩よりの陸向き距離(離隔)で2m、20mの2種類とした。堰堤は高さ5m(実験換算10cm)、堰堤天端幅8m(道路2車線を想定)で法勾配を1:1、1:1.67の2種類とし、設置位置は斜面法肩よりの陸向き距離(離隔)の2mで共通とした。

図-1 実験水路断面図（海域部水位（津波高）計測位置 H1~H9）

図-2 仮想防潮堤模型設置図

写真-1 仮想防潮堤模型設置状況

表-1 津波条件

目標津波条件	波形	津波周期 T	仮想現地条件	模型換算 (縮尺 1/50)
正弦波 (押し初動)	津波高 η_0 (盛土天端高より)	10min	2.5m	84.85s
		15min	5.0m	127.30s
		20min		169.70s
高さ設定	海底勾配	1/100	1/100	1/100
	沖合海底高 (沖合水深)	DL-39.0m	DL-78cm	
	護岸前面海底高 (前面水深)	DL-5.0m	DL-10.0cm	
	水面高	DL+1.5m	DL+3.0cm	
	護岸高	DL+3.3m	DL+6.6cm	
	盛土高	6.0m	12.0cm	
	盛土天端高	DL+9.3m	DL+18.6cm	

注: DL+0.0m が L.W.L. と想定
DL+1.5m が H.W.L. と想定

護岸・盛土（斜面）地形・防潮施設模型は塩ビで製作した。写真-1 に設置状況を示す。

c) 津波条件

津波条件を表-1 に示す。正弦波の押し初動で、津波周期は 10, 15, 20min の 3 ケース、津波高さは盛土天端より 2.5, 5.0m の 2 ケースとし、 $3 \times 2 = 6$ ケースとした。津波高さは 5m は、高さ 5m 堰堤の越流を考え設定した。

d) 計測方法

陸域部水位・防潮施設津波圧の計測位置を図-3 に示す。水位（海域部津波高、陸域部浸水深）計測は、容量式波高計を用いた。陸域部浸水深計測の波高計は、浸水深の零からの計測を可能とするため、下端ロッドを模型床の切欠きに埋め込み設置した。圧力（防潮施設津波圧）計測は、セラミックコンデンサー型圧力計（20 kPa 計、 $\phi 10\text{mm}$, $t3\text{mm}$ ）を用い、圧力計は防潮施設の切欠きに埋め込み、受圧面と壁面が一致するように設置した。

計測時間は津波周期の 1.5 倍程度とした。計測は津波条件当たり 3 回の計測を、サンプリング周波数 500Hz を基本とした（但し最初の計測で明かに衝撃圧が生じないことを確認した場合、計測回数を減じ、50Hz で計測）。

(2) 実験結果

a) 時系列波形

図-4に、壁堤・位置 II（離隔20m）実験で、津波高 2.5m（実験換算5cm）、津波周期3種類の水位・圧力の時系列波形を示す。図は模型値で、水位計測基準面は、海域部は静水面、陸域部は盛土天端高とした。

図-3 陸域部水位（浸水深）計測位置 H10～H16・防潮施設津波圧計測位置

図-4 水位・圧力の実験時系列波形（壁堤・位置 II（離隔 20m））

時系列波形の最初のピークは入射津波に対するもので、2つ目ピークは入射津波に実験施設沖側端からの再反射津波が重なった波形である（津波周期20分の場合、波長が長く、入射・反射・再反射の津波の分離は困難）。

水位波形より今回の実験条件でソリトン分裂は確認されなかった。施設前面水位 H15・H16 で目標津波高（浸水深）が 5cm 程度となった。周期10分の津波で壁堤の根元付近に衝撃的な圧力の発生が確認できるが、後続の持続圧のピークが大きく持続圧が支配的であった。

図-5に、顕著な衝撃圧の作用例として、壁堤・位置 I（離隔2m）実験で、津波周期10分での時系列波形を示

す。壁根元部 P1, P2 で衝撃圧の発生が確認できる。

図-5 衝撃波圧発生例（壁堤・位置 I（離隔2m））

b) 観察結果

観察結果のまとめを図-6に概念図で示す。

津波周期15分・20分と長い場合、陸上へ遡上した津波が、護岸・盛土(斜面)・防潮堤の境界で反射・再反射し、防潮施設前面は、各種の境界間隔が波長となる周期の波が重複する場となる。また、遡上水塊が前面に溜り、水位上昇する。これらが、水位・波圧の時系列波形の最大付近で振動が大きくなる原因と考える。

一方、津波周期10分と短い場合、護岸で打上・水平床部で跳ね水塊が離隔2m設置の壁堤の根元に直撃する等の現象となり、時系列波形で示す衝撃圧となった。なお、離隔20m設置の壁堤、堰堤では衝撃圧発生はなかった。

c) 波圧分布

図-7に壁堤(離隔2m, 20m設置の2種類)、堰堤(法勾配の違いの2種類)の無次元波圧分布を示す。図は長い津波周期(15, 20分)の実験結果である。

横軸は無次元波圧(同一波条件の計測結果の平均値)、縦軸は無次元高さである。波圧計測位置・波圧の無次元化の基準高は、施設下端位置の波圧最大値の発生時刻の施設前面における水位の盛土天端からの深さ η_2 とした。

図-7 無次元波圧分布(周期15・20分)

η_2 は施設からの反射波を含む深さで、現地調査や津波伝播解析で得られる痕跡高・浸水深に近い量である。また、 η_2 は今回実験で前記の様に地形・津波周期の影響や護岸付近の局所変形のため、朝倉ら¹⁾の施設なし状態での入射(通過)波深さの設定が困難、等の理由もあり異なる量を無次元の基準高とした。

図-6 観察結果概念図

図より、波圧分布は概ね静水压分布となる。津波周期が20分と長い場合、水压係数(水平波圧指標、静水压分布の倍率、朝倉¹⁾らの最大包絡値3.0)は、壁堤で1.25~1.75、堰堤で1.00~2.00となる。堰堤でばらつきが多く、また周期15分の津波でのばらつきが大きい傾向となった。壁堤の反射率を1.0とすれば、今回の反射波

を含む無次元の基準高は入射（通過）波深さの倍であり、入射（通過）波深さの水圧係数 3 に対し反射波を含む基準高の水圧係数は約 1.5 で概ね半分で、無次元化の基準高の定義の違いはあるが、同義の結果となる。一方、水圧係数が 1.5 より大きい、および、バラツキが大きい理由としては、反射率が小さいために（津波が施設作用前に地形等で反射）、反射波込みの基準高が小さい、前記の各所からの反射・再反射の重複場であることで壁前面水位が上昇・振動等の影響があると考えられる。

津波波圧式・水圧係数設定は、今回、地形影響、無次元基準高の設定、接近流速、盛土（斜面）と防潮施設の相互からの反射、直立護岸の局所的津波変形、等の各種影響で、一般化が困難であった。一方で、地形との関連もあるが、短い津波周期の時、顕著な衝撃圧が発生する可能性があり、津波波圧実験では適切な周期設定が必要である。

3. 数値波動水路による津波変形計算

(1) 計算目的・計算方法

二段型津波波形、盛土地形上に設置された防潮施設周辺の津波変形の再現可能性の確認を計算目的とした。

計算には、数値波動水路（CADMAS-SURF2D³⁾）を用いた。仮想現地条件での計算とした。入射津波波形の作成方法を図-8に示す。波形は2種類の正規分布を重ねて作成した（津波高6m、半周期20分の波形に半周期5分の波形を重ねる）。メッシュ作成方法を図-9に示す。防潮施設周辺の57mの詳細計算範囲（メッシュ幅0.1m）への、沖からの再反射波・岸からの反射波の到達時間の延長のため、岸側：約5km、沖側：約20kmの長い計算範囲を設けた。防潮施設は、実験対象の壁堤・位置Ⅰ（離隔2m設置）、堰堤・形式Ⅰ（法勾配1:1）の2種類とした。なお、海底地形や、防潮施設形状他の他条件は実験と同じとした。

図-8 計算津波波形

水平方向 区間番号	開始 節点	開始 座標 x	メッシュ間隔	要素 数 Nx	終了 節点	区間長	終了 座標 x
①沖部 海域	1	0.0m	$\Delta x=100\text{m}$ (等間隔)	220	221	22,000m	22,000m
②勾配 海底部	221	22,000m	$\Delta x=100\text{m} \sim 0.1\text{m}$ (等比級数) $r=0.9260$	90	311	3,350m	23,350m
③護岸～ 盛土天端	311	23,350m	$\Delta x=0.1\text{m}$ (等間隔)	570	881	57m	23,407m
④盛土部	811	23,407m	$\Delta x=0.1\text{m} \sim 450\text{m}$ (等比級数) $r=1.0992$	90	971	5,000m	28,407m

鉛直方向 区間番号	開始 節点	開始 座標 z	メッシュ間隔	要素 数 Nz	終了 節点	区間長	終了 座標 z
①水域部	1	0.0m	$\Delta z=0.5\text{m}$ (等間隔)	80	81	40.0m	40.0m
②水上・ 陸域部	81	22,000m	$\Delta x=0.3\text{m}$ (等間隔)	26	107	7.8m	47.8m
			$\Delta x=0.1\text{m}$ (等間隔)	100	207	10.0m	57.8m
			$\Delta x=0.2\text{m}$ (等間隔)	1	208	0.2m	58.0m
			$\Delta x=0.3\text{m}$ (等間隔)	40	248	12.0m	70.0m
							計

図-9 計算でのメッシュ作成方法

(3) 計算結果

図-10 に沖部海域を進行時の水面形の広域図、及び、壁堤・堰堤の防潮施設近傍で最大浸水時における水面形の拡大図を示す。広域図より二段型波形の再現が確認できる。また、拡大図より、施設周辺で壁堤からの反射や堰堤の越流が計算できることが分かる。

壁堤・位置Ⅰ（離隔 2m 設置）の、各点の水面高さ・壁堤前面波圧の計算時系列波形を図-11 に示す。また、図-12 には波圧分布の計算結果を示す。無次元化の基準高は実験と同様とした（盛土天端からの高さ、壁下端の波圧が最大時の水位より求める）。

図より、時系列波形および波圧分布の計算結果とも実験結果と同様な傾向となった。水圧係数は、津波周期が半周期 20 分と長く、持続波圧が主で、穏やかな現象となり、水圧係数は約 1.05 となった（概ね静水圧）。

図-10 水面形計算結果

図-11 時系列波形計算結果

図-12 波圧分布計算結果

4. おわりに

実験および計算で得られた結果を以下に示す。

- 1) 壁堤・堰堤形式によらず、津波波圧は水平床上の場合と同様に静水圧分布となる。
- 2) 長周期津波（周期 15 分以上）の場合、持続波圧が主で、壁堤の水圧係数は、反射波を含む高さで 1.5 となる（進行波高さでの水圧係数の約半分、反射率が概ね 1 と考えると同義）。今回、現象が複雑で定式化への整理や提案に至らなかったが、水平陸上部の朝倉¹⁾の評価式で、基準高・構造物からの反射影響等を考慮すれば適用可能である。

TSUNAMI WAVE FORCE ACTING ON THE FACILITY ON THE EMBANKMENT

Yoshinobu AKIYAMA, Nobuyuki IWAMAE and Tsuyoshi Ikeya

The hydraulic model test was conducted to evaluate the tsunami wave pressure acting on the facility (wall type and bank type) on the embarkment. In the wall type test results,

1. Tsunami wave pressure is hydrostatic .
2. Sustained tsunami wave pressure is dominant(in 20,15min long-period tsunami). Impact tsunami wave pressure occurred (in 10min short-period tsunami).
3. The tsunami pressure coefficient turned out synonymous with the results(proposed by Asakura et al(2000)).

- 3) 堰堤の無次元波圧は壁堤に比べバラツキが大きい。
- 4) 短周期津波（周期 10 分以下）の場合、直立護岸他での反射・水塊の跳ね他で、激しい現象となり、壁堤根元に水脈が直撃し、衝撃圧力を発生させた。
- 5) 数値波動水路で二段型津波波形を再現した。計算と実験の津波圧が同様傾向となることを確認した。

最後に、今後の課題として、津波波形・津波周期・陸上地形が、防潮施設の津波圧に大きく影響を及ぼす、今後、実験・計算で津波圧評価の際は、上記影響の考慮が必要である。また、実験再現が難しい津波条件（任意波形、長周期津波、沖からの伝播変形を含む検討等）に対しては計算での評価となり、そのために、計算の実験での検証（衝撃圧評価等）や、広域・狭域計算、伝播解析・氾濫解析・数値波動水路（水槽）との結合に係る方法検討も必要である。

参考文献

- 1) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高雄誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.911-915, 2000.
- 2) Asakura,R., Iwase,K., Ikeya,T., Takao,M., Kaneto,T., Fujii,N. and Ohomori,M. : The Tsunami wave force acting on Land Structures, Coastal Engineering, pp.1191-1202, 2002.
- 3) 磯部雅彦, 高橋重雄, 余錫平, 榊山勉, 藤間功司, 川崎浩司, 蔣勤, 秋山実, 大山洋志: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究－VOF 法基本プログラムの作成－, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp.321-326, 1999.
- 4) 高橋重雄, 戸田和彦, 菊池喜昭, 菅野高弘, 栗山善昭, 山崎浩之, 長尾毅, 下迫健一郎, 根木貴史, 菅野甚活, 富田孝史, 河合弘泰, 中川康之, 野津厚, 岡本修, 鈴木高二郎, 森川嘉之, 有川太郎, 岩波光保, 水谷崇亮, 小濱英司, 山路徹, 熊谷兼太郎, 辰巳大介, 鷲崎誠, 泉山拓也, 関克己, 廉慶善, 竹信正寛, 加島寛章, 伴野雅之, 福永勇介, 作中淳一郎, 渡邊祐二: 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No.1231, 2011.4