

津波防潮水門の効果と設計波圧について

—— 小本川水門の場合 ——

富 横 宏由*・山 口 進 吾**・平 山 康 志***

1. はじめに

現在の三陸沿岸は津波を対象とした湾口防波堤、陸上防潮堤などの堡壘でとり囲まれているが、さらに近年はこうした津波対策の中では弱点とみなされていた河川遡上津波を防止するための防潮水門を設置する機運が高まり、現に隨所に施工または計画中である。

ほとんどの場合、その天端高は昭和8年(1933)三陸津波か昭和35年(1960)チリ津波の浸水痕跡高にほぼ一致してとられているが、岩手県の小本川水門の場合も河口付近の最大痕跡高 T.P. 13.4 m にほぼ等しい T.P. 13.3 m と与えられている。ここで天端高決定の根拠となつた過去の津波の痕跡高の評価の仕方が一つの問題となるが、水門がない場合の痕跡高にはほぼ等しい大きさの波高をもつた津波が同じ高さの水門に入射すれば、進行波性が強いほど反射重複波高が増大して大きく越流することが考えられる。したがつて越流の可能性がある場合は、水門がその機能を十分に發揮しかつ安全であるためには、その遮蔽効果と設計波圧について水理学的に十分検討しておく必要がある。

しかし、今もって大津波の実態は十分よくわからないうえに、理論的にも実験的にも研究が困難で襲来時の被害を予測しがたいこともあって、入射波高が 10m 以上という大津波に対する防潮水門の水理についてはいまだかつて本格的に検討された例がなく、最も不明確でかつ重要な問題でありながら未解決のまま今日に至っている。

このような問題を単純化して理論的に数値解析することもある程度可能であるが、水門の具体的な形状とか門扉開度の影響などを詳細に検討するには不十分で、やはり水理模型実験によるのが一番の近道である。この結果は防潮堤の場合にもほぼ同様に適用できるであろう。

2. 小本の地形と津波および防潮水門計画

三陸海岸は図-1 に示すように、宮古以南は湾入の著しい典型的なリアス式海岸であるのに対して、宮古以北は湾入の少ない比較的平坦な海岸線が続いていて、小本海岸もこの中に含まれている。この平面地形の相違は湾

水振動の有無に関係するので、海岸線から陸側の河川または陸上遡上津波の挙動を論ずる場合の重要な要素となる。

小本の海岸線は図-2 に示すように偏平な U字形を成しており、わずかに湾入してはいるが顕著な湾水振動が起こる形とは認めがたくほぼ直線状とみなしてよいであろう。また小本川の河口汀線



図-1 三陸海岸

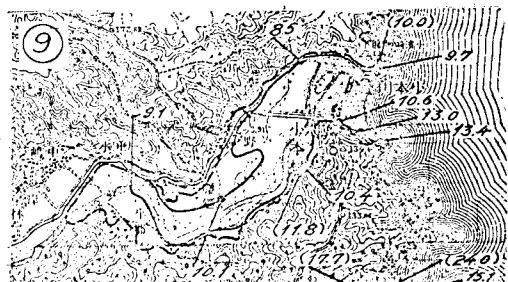


図-2 昭和8年と明治29年の津波による小本の浸水区域と痕跡高(T.P.)

付近から沖に向かって最深部を通る海底勾配は、水深 10 m くらいまでは 1/20 とかなり急で、それから水深 50 m くらいまでは 1/50 というようによく曲折していて、ほぼこの 2 つの勾配で近似できる。一方、小本川沿いの河床勾配は河口汀線付近から上流 5 km くらいまでは約 1/800 で非常に緩やかであるが、平面的にはかなり蛇行している。

岩手県の震浪災害土木誌によれば、小本における明治29年(1896)津波による痕跡高は 18 m で既往最大であり、昭和8年津波では 15 m となっているが、この値は測定方法と場所がよくわからないので、一般にはあまり

* 正会員 工修 長崎大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員

長崎大学技官 工学部土木工学科

よく利用されていない。しかし、現在のところ無視できるという根拠もないで、参考値として見ておくべきであろう。現在最も信頼すべき痕跡記録で資料も多いのは松尾¹⁾の踏査によるものであるが(図-2)、小本の場合は汀線波高よりも陸上最奥部の遡上高が小さくなっている。これは進行波性の強い遡上津波の特性であって、宮古以北にこの種の例が多く見られる。周期は5~25分くらいの幅で考えられるが、12分くらいという調査結果が多いようである。ここでは周期20分で、 $\eta = a \sin^2(\sigma/2)t$ なる波形を仮定した。

これに対する防潮水門計画は、河口汀線から650m上流に、幕壁天端高T.P. 13.3m、扉高6.4mで径間30mの大型水門が6門設置される予定で、入射波の最高水位は水門位置で幕壁天端高と等しくT.P. 13.3mとなっている。また、水門の敷高はT.P. -0.55m、満潮位はT.P. 1.05mとなっているから、結局水門位置の設置水深が $1.05 + 0.55 = 1.60$ mに対する入射波高は $13.3 - 1.05 = 12.25$ mとなる。これは前に述べた小本の津波遡上の特質からして、水門がない場合の入射波高とみるべきもので、水門があった場合の設計波高とは異なるものであるから、その場合の遮蔽効果と設計波圧を検討しなければならない。

しかし、水門計画の進行と合わせて、河口から水門までの両岸河川堤防の天端高も同じくT.P. 13.3mにかさ上げする計画については、蛇行河川の取扱いも含めて、次に述べる実験装置の制約からそうした平面的な効果を検討することはできないので、蛇行曲線と堤防高の効果を無視した直線状の水槽側壁でおきかえざるを得ない。

3. 実験装置、模型、器具および方法

造波装置は気圧式で、断面の幅2.0m、深さ4.5m、長さ4.0mの気密室の後方に機械室が隣接し、前方には断面の幅1.0m、深さ1.0m、長さ60.0mの実験水槽が連結されている。造波能力は周期が2~60secのタイマー4個の組合せに応じて、最大発生波高が40cmである。操作は波高調節は弁開度の手動、周期調節は周期設定自動タイマーによる半手動・半自動型である。

模型の縮尺は実寸の1/75とし、縦横ひずみなしでフルードの相似律によっている。ただし、海底および河床の粗度、水門の重量と板厚などについての相似律の適用

は行なっていない。海底および河床勾配模型は鋼板製で図-3に示す寸法で水槽に設置した。表面は吹付け塗装仕上げにしてあるので、実物よりはかなり平滑になっている。水門の模型寸法は図-4に示す。波の進行方向に直角方向の運動は無視して幅を一定にしてあるので、門柱はあえて入れる必要はなかったが、その効果も見たいために1/75の縮尺で水槽断面内に入る分だけは入れて目盛板を兼ねた隔壁で仕切り、側壁に当たって半端になるところは横方向への流れの影響を考慮してその半分を入れてある。

波高計は抵抗線式、容量式各3本の計6本を使用した。容量式波高計は静水位の小さな河川への遡上波高と静水位のない幕壁天端上の越流波高あるいは陸上遡上波高などの測定を目的として特別に工夫してある。写真-1に見られるように、支持棒の下端水平部に幅1.0cm、深さ1.5cm、長さ6.0cmの小箱を取り付けて中に充填剤を注入して頂部を平らに仕上げたものを、木製底版の所定の溝の中に箱の頂部が底表面と面一になるように設置して水との接触を避け、検出後の非直線部分の容量検出部分を除去することにより、水位0(零)からの波高も測定できるようにした。波高計設置箇所は図-3に示している。

圧力計は門扉と幕壁に作用する圧力分布を詳細に測定するためにできるだけ小型のものを選び、 $2.8\phi \times 8\text{mm}$ という蒸着薄膜半導体ひずみゲージ(超小型圧力センサー)を11個使用した。

流速計は本実験のために新規に開発したものであるが、写真-1に示す外観の一種のピトー管式流速計ともいえるもの

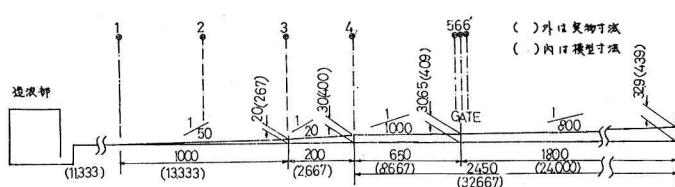


図-3 傾斜板の寸法と波高計設置位置

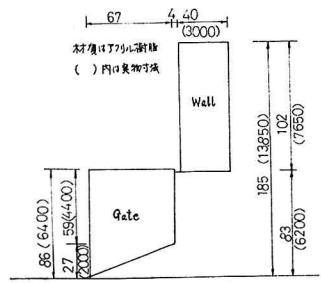


図-4 水門模型寸法

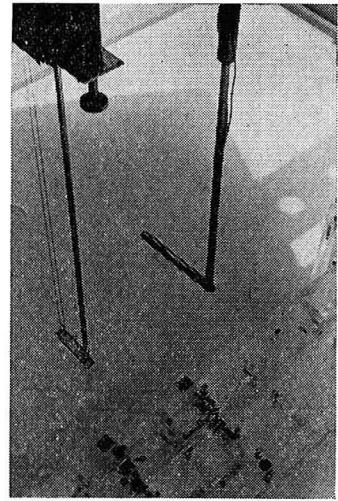


写真-1 容量式波高計と流速計

で、超小型圧力センサーを使用して全圧と静圧を測定し、差圧を動圧として取出す方法である。これによって初めに水のない状態から遡上波が襲来した場合の任意の深さの流速を測定することができる。

4. 実験結果と考察

(1) 浸水痕跡高

実験条件として、まず水門がない場合の水門位置における入射波高を 12.25 m (水位は T.P. 13.3 m) とした場合と、それに対して水門がある場合の門扉開度による部分重複波の各点の浸水痕跡高を比較したのが図-5 である。

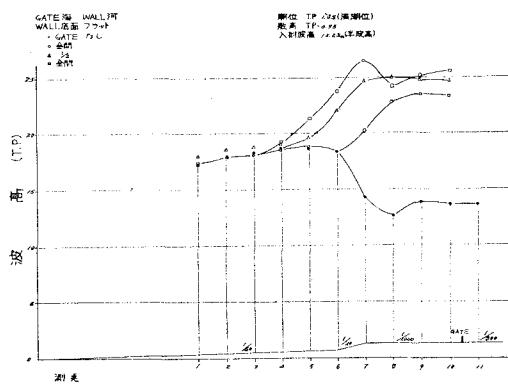


図-5 浸水痕跡高線

ある。水槽末端を始点として側壁に水平に 2.5 m 間隔で鉛直に 1.0 cm 刻みの目盛りを付けたスケールによつて、波が静まつた後の浸水痕跡高を目測して得られた記録である。

入射波の痕跡線については、河側の痕跡高にくらべて海側の痕跡高は一般に大きく、1/20 勾配始点前の測点 5 では最大 T.P. 19 m 近くもあって、海底斜面からの反射による重複波高が相当に大きいことと、このような重複波性を帯びた入射波がかなり急勾配の海から緩勾配の河に流入して射流状の波に変化する際に現われる測点 8 付近の凹みが目立つ特徴的である。

また重複波の痕跡線については、重複波の上には水門に衝突反射する際に発生するクノイド波状の短周期波成分が重なっていて、その最高水位(短周期波の山)が痕跡として記録されるが、重複波高はその平均値とみなされるものであるから、それよりは少し大き目の線が出ていることになる。門扉開度の影響としては、最高水位はやはり全閉時に最大で、水門前の値を平均すると約 25.5 m となり、半開から全開へと多少減少しているが、少なくとも 23.5 m 以上にはなるようである。また、重複波が急減して入射波高以下になる位置は全閉時には最も遠い海上までおよんでいるが、半開から全開へと開度が増大するにつれて重複波の影響範囲が小さくなる。しかし

その範囲は全開時でもまだ河口付近まで波及している。

(2) 入射波高と部分重複波高

1/50 海底勾配の始端(法先水深 32.25 m)における入射波高(H_1)を基準として、各点の波高(H_t)の波高比(H_t/H_1)をとつて門扉開度による変化を見たのが図-6 である。

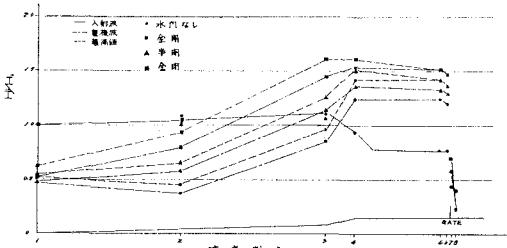


図-6 波高比の変化

入射波高の変化については、測点 3 (1/20 勾配始点)までは門扉開度の影響を受けないようで、ほとんど同一の曲線となってその差が現われていない。

しかし、部分重複波高の変化には頗る著しい相違が見られる。破線と一点鎖線の差は前述の短周期波の半振幅に相当するもので、それは全閉時には水門直前では生じないが、測点 4 から海側に入るにつれて発生していく。しかし、半開と全開時には水門位置からすでに発生し、開度が大きいほどこの振幅も大きい。こうした現象差はあっても、平均波高は痕跡高と定性的によく似た傾向を示している。

(3) 越流曲線、越流波高および越流時間

図-7 は門柱上における越流曲線であり、径間中央に

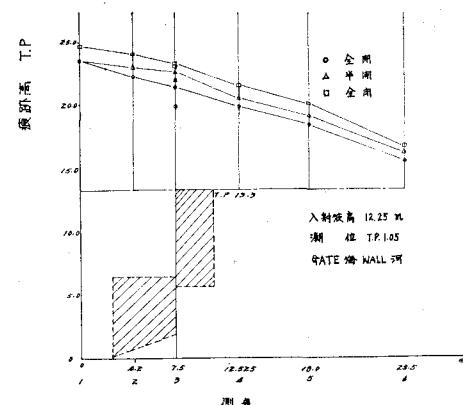


図-7 門柱上の越流曲線(痕跡高)

おける越流曲線とはかなり異なり、背後の曲線形が緩やかになっている。図中測点 3 の○△□印は径間中央の越流波高であるが、門柱上よりも若干小さくなっている。その相違の模式図を図-8 に示しておく。図-7 によれ

ば、門扉開度の影響が重複波高の大小となって明瞭に現われたのに相応して、越流曲線形形状は変わらないまま上下したかたちになっている。

これを幕壁天端上の始端部測点3における越流波高と越流時間に対する門扉開度の関係で示したのが図-9である。これから開度の如何を問わず、いずれにしても越流量は相当大きいことが推察される。

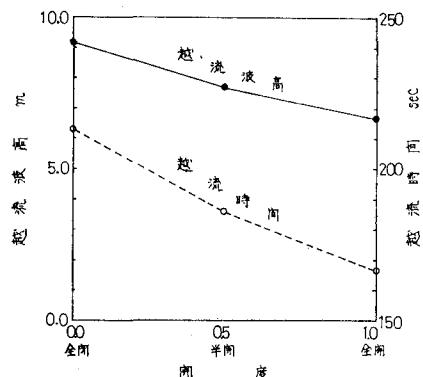


図-9 越流波高と越流時間

(4) 水門背後への透過波高

門扉全閉時には幕壁天端上を越流し、半開または全開時にはさらに門扉からの流出も加わる水門背後への透過波高（実寸で水門後方位置の測点8）の開度による影響を調べたのが図-10である。ここでは透過波高に満潮位を加えた T.P. 上の水位で表わしてある。水門背後の上流側の現状の河川堤防天端高は T.P. 5.67 m であるから、図-10によれば全閉時には安全であって問題ないが、半開または全開時には両岸から溢流することに

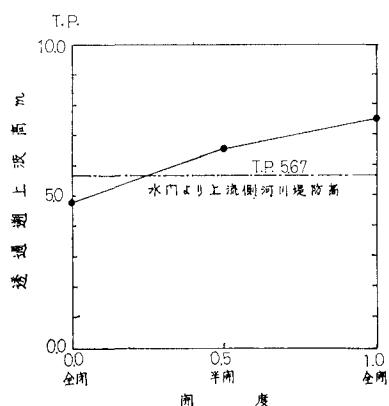


図-10 透過波高

なり、津波遮蔽効果としては思わしくない状態になる。

(5) 波压

a) 波压分布

最大波压は各点の重複波が同時に最大となる時点での最高水位によって与えられ、先端波の衝撃波压はいずれの場合もこれより小さいことが波压記録より確認された。

最大波压時に門扉と幕壁に作用する波压分布を門扉開度に応じて調べた結果が図-11, 12, 13である。これを

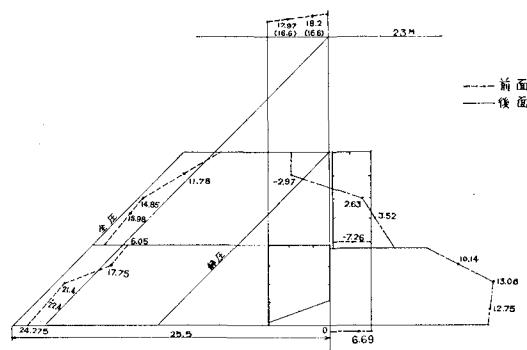


図-11 全閉時の最大波压分布

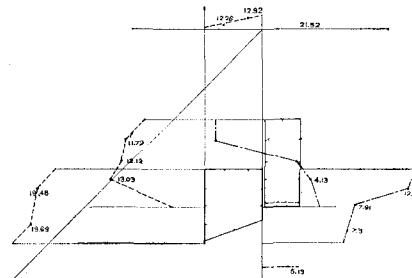


図-12 半開時の最大波压分布

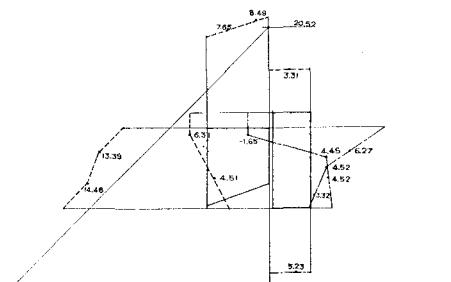


図-13 全開時の最大波压分布

見くらべてわかることは、門扉と幕壁に作用する水平波力は全閉時が最大で、半開から全開となるにつれて減少しており、門扉の背压についても同様な傾向を示している。しかし、幕壁の背压については上面から背後にかけては負圧が働いており、背圧は開度が大きくなるにつれ

て一般に増大する傾向がある。また、いずれか一つの図に着目して開度一定の場合で見ても、波圧分布は一様ではなく複雑に変化していて、三角形で示した静水圧分布とは異なり、周辺の流況とか流速が微妙に影響していることがわかる。特に幕壁上面から背面上部にかけての負圧の発生は、現象の観察によれば、越流に伴って背面に巻込まれた空気が越流波高の増大とともに次第に流れに混入して縮少し、それが最小になる頃に上面の始端部から流れがはく離し、幕壁は広頂堰から狭頂堰または刃形堰の性質を帯び、同時に越流波高も最大になるといった流況の変化によるものと考えられる。

b) 流速分布

水門前 20 cm (実寸 15 m) における最高水位時（即ち最大波圧時）の水平流速の鉛直分布を調べたのが図-14である。もちろん水門がない場合の流速が最大ではあるが、この場合はすでに常流に変わっているようである。開度が減少するにつれて一般に流速も次第に減少する傾向があるが、全閉時でも 2 ~ 4.5 m/sec 程度の流速があり、これが水門に衝突した場合の全波圧に対する動水圧の寄与を説明するものと思われる。それは河床面上の負の流速が門扉底部にある淀み点の存在を裏付けることでもわかる。

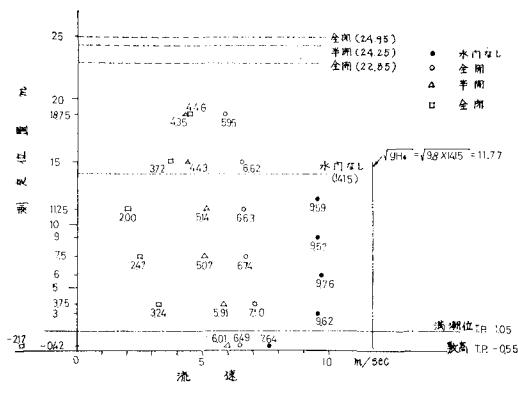


図-14 水平流速の鉛直分布

c) 設計波圧

これまで述べた波圧記録、波圧分布および流速分布に対する考察から、設計波圧としては門扉全閉時の全波圧をとればよいことがわかったので、その場合に限って検討してみる。たとえば、門扉の場合、背圧を考慮すると合力が相殺されて最も合理的な取扱いになるが、より単純に背圧を除いて前圧だけを対象に危険側の条件で考えることは、結果的にはより安全側の設計になるので、簡便でもあるし、むしろその方がよいであろう。

図-11 より、門扉に作用する全波圧 P_t は

$$P_t = 127.02 \text{ t/m} \dots \dots \dots (1)$$

と計算される。ところで、これを三角形分布の静水圧の

みとして計算すると

$$P_s = 123.38 \text{ t/m} \dots \dots \dots (2)$$

となるが、その比は

$$P_t/P_s = 127.02/123.38 = 1.03 \dots \dots \dots (3)$$

となる。また、図-11 の門扉中央部の最大波圧点では

$$P'_t/P'_s = 21.4/19.78 = 1.08 \dots \dots \dots (4)$$

となる。この比で示される差圧は動水圧によるものであるが、その大きさは高静水圧の 10% 以内である。したがって、設計波圧は水門位置の最大越流波高の最高水位で与えられる静水圧の約 10% 増の全波圧か、あるいは水門前の最大重複波高の最高水位で与えられる静水圧を全波圧として採用すればよいであろう。しかし、現在のところこの最高水位を見積ることは、実際問題としては事例解析によらざるを得ない。

一方、従来の慣用的な設計波圧のとり方は、水位は幕壁天端高と等しいとおいて静水圧 P_s を求め（図-11 の静圧）、これに波速 ($V = \sqrt{gh}$, g : 重力の加速度, h : 水深) に伴う動水圧 P_d と称して、 $P_d = 0.1 V^2$ を加算したものを全波圧（図-11 の全圧）としてきたが、この計算では

$$P_t = P_s + P_d = 66.65 + 72.23 = 138.88 \text{ t/m} \dots \dots \dots (5)$$

となり、式(1)で与えられた実験値のほぼ 10% 増の波圧になる。このような算定の仕方に理論的な根拠はないから、全く偶然の一致としかいいようがないが、それでも非常に近い値が出ていて感心するほどである。しかし、この算定法は入射波高だけで決まるもので、水門の設置位置とか形状、背圧の有無とは無関係であるから、常に一致することはあり得ない。

次に、幕壁下面に作用する揚圧力 P_n については、下面の圧力に上面の負圧が加算されるので、図-11 より、

$$P_n = 6.69 + 7.26 = 13.95 \text{ t/m} \dots \dots \dots (6)$$

となるが、幕壁の自重よりは小さいようで、この構造では浮上がる危険性はないようである。

5. 結論

小本川における津波防潮水門は、大津波来襲時の水門前の溢流は避けられないが、水門位置の両岸堤防に直角に副堤を設けるなどの二段構えで災害減少策を講じ、門扉全閉状態で対処すれば、かなりの遮蔽効果が期待できるし、設計波圧には満潮位に入射波高の約 2 倍の部分重複波高を加えた水門前の最高水位による静水圧をとれば十分であろう。

なお、現在岩手県が施工、計画中の幕壁海・門扉河側配置の場合については別の機会に報告する予定である。

参考文献

- 1) 松尾春雄：三陸津波調査報告、内務省土木試験所報告、第24号、昭和8年。