

1983年日本海中部地震津波における津波力と 埋立護岸の被災原因の検討

谷本勝利*・鶴谷広一**・中野 晋***

1. まえがき

昭和58年5月26日正午秋田県沖北緯40°24'，東経138°54'付近を震央として発生した日本海中部地震津波では，約100名に及ぶ死者・行方不明者を出すなどの人的被害，家屋の流出などの住家被害や船舶被害があったが，護岸・防波堤等の港湾構造物の損壊もかなりの場所で発生した．特に建設中の能代港外港地区埋立地ケーソン護岸では，多数の工事従事者に死者，負傷者が出るとともに，一部が欠壊したり滑動して甚大な被害を生じた．また，今回の津波の著しい特徴として秋田県北部海岸では短周期変動を伴う周期10~20分程度の段波性津波が観測された．

段波津波の波圧に関しては福井他¹⁾の研究があり，実験からその分布は衝突時の動波圧と，その後の持続波圧共に静水面に最大値を有する直線分布となることがわかっている．また，Tanimoto²⁾は波圧に関する合田公式を長波にあてはめ，実験結果も考慮して破波が生じないような比較的大きな水深での鉛直壁に働く津波力公式を提案している．しかし，これらの公式を適用しようとする場合には，入射波高や波速（動波圧を求める場合）をあらかじめ知っておく必要があるが，今回被災した能代港外港地区埋立護岸については津波がどのような状況のもとに，どのような状態で作用したのかはわかっていない．

こうしたことから本報告では能代港外港地区埋立地ケーソン護岸を想定した直立壁に作用する津波力について，能代港前面とほぼ同じ海底勾配1/200の地形上を進行する段波性津波を対象とした実験を行ない，直立壁に働く津波力の検討を行なうとともに，能代港埋立護岸の被災原因について考察したものである．

2. 護岸の被災状況

能代火力発電所用地は能代港南海岸の外港地区に埋立造成される予定で，そのための護岸を建設中であった．

図-1は直立部の倒壊，滑動の状況を示した平面図である．前面護岸は火力用地造成工事の2-5工区，3-5工区，4-5工区，および灰捨護岸建設工事の1-5工区からなり，1-5工区の南端側200mを残してケーソンが据付けられていた．

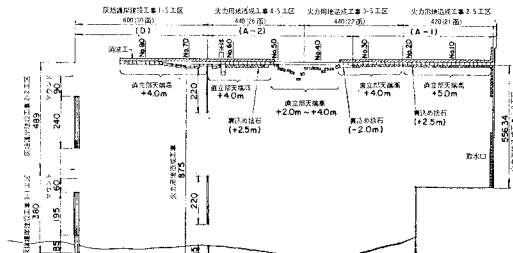


図-1 能代火力発電所用地の被災状況

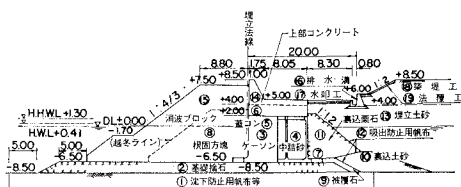


図-2 護岸標準断面図 (A-2 完成時)

図-2は火力用地護岸の完成時標準断面図(図-1中のA-2区間)である．ケーソンは長さ20m，幅11m，高さ8.5mで，フーチング付下幅は12.5mである．A-1区間およびD区間はパラペットの天端高のみこれと異なる．前面護岸の北側点を基点として21函め，すなわちN.21までは，+5.0m，No.35までは+4.0mまで上部工が打たれ，前面消波工も同高さまで施工されていた．また，背後裏込め栗石はNo.32までは+2.5m，No.35までは-2.0mまで施工されていた．この区間では被害が生じていない．No.36からNo.50の間は消波工，裏込め栗石は未施工で，中詰め砂を投入しフタコンクリートを施工しただけのケーソンから，上部工を+4.0mまで打設したケーソンまで種々の段階のものが混在していた．これが大きく破壊した区間である．たとえば，No.39のケーソンは原位置から38m堤内へ移

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長
*** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

動し、転倒している。また、No. 46 のケーソンは最も大きく移動したもので、約 74m 堤内側に流されている。

No. 51 から放水口の間は、上部工 +4.0m まで打設され、かつ消波工、裏込め栗石 (No. 51 を除く) が施工されていた区間で、端部の No. 51 を除いて被害が生じていない。

放水口より南側の No. 63~No. 85 の区間は直立部の天端高 +4.0m で、同高さまで消波工が施工されていた区間である。しかし、裏込め栗石は施工されておらず、端部の No. 85 を除いて 0.15~21.5m の滑動が生じた。図-3 はこの区間で最大滑動量を示した No. 68 の状況を示したものである。

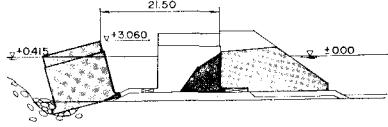


図-3 No. 68 号箱被災状況

以上のように滑動あるいは倒壊は裏込め栗石未施工の区間を中心に生じていることが指摘できる。

3. 直立壁に働く津波力の実験

実験に用いた水路は長さ 163m, 幅 1m, 深さ 1.5m の鉄筋コンクリート製長水路で、ここに能代港前面の海岸とほぼ同様な海底勾配 i が 1/200 の海底模型を設置した。模型床の詳細については文献 3) を参照のこと。なお、模型の縮尺は歪みなしの 1/200 である。以後とくに断りのない限り、すべて現地換算値で示すことにする。

構造物としては図-4 に示すように水深 9m の位置に天端高 4m のアクリル製防波堤模型を設置した。この模型の水路中央部の沖側 2 箇所 (静水面下 1.4m と 6.3m) および岸側 1 箇所 (静水面下 6.3m) の合計 3 箇所径 8mm の波圧センサーを取付けて波圧を測定した。なお、今回用いた波圧データは沖側の 2 点のみで、岸側の波圧データは使用していない。波高は防波堤の設置位置から 450m 沖側の C 点 (水深は 11.25m) で測定している。用

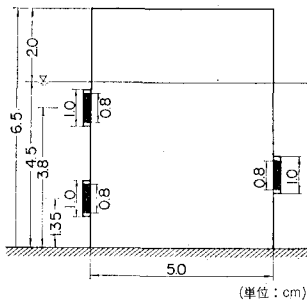


図-4 防波堤模型

表-1 実験ケース (実験値)

i	T (s)	L (m)	$2a_0$	$2a_0/L$
1/200	60	187.79	9 種類	$3.23 \times 10^{-5} \sim 8.52 \times 10^{-5}$
	40	125.17	〃	$5.91 \times 10^{-5} \sim 2.40 \times 10^{-4}$
	35	109.51	〃	$1.20 \times 10^{-4} \sim 3.22 \times 10^{-4}$

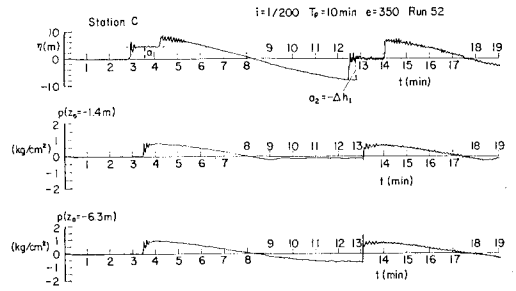


図-5 C点での水位記録と波圧記録 ($i=1/200$)

いた波の周期は 15, 10, 8 分 (実験ではそれぞれ 60, 40, 35 秒に対応) で、各周期について波高を 9 種類変えている。津波のタイプは押波初動の正弦波形である。表-1 に実験ケースを示す。表中の a_0 は沖側の一樣水深部における第一波目の波の振幅である。

図-5 は周期 10 分の場合の C 点での水位記録と静水面下 1.4m および 6.3m の位置での波圧記録である。

波形の記録からは平滑化した段波の高さを第 1 波については a_1 , 第 2 波については a_2 として読み取った。第 2 波の段波の高さは第 1 波の引きがあるために来襲直前の水位からの高さで定義する。第 1 波の引きの高さは Δh_1 とするが、図-5 の例では第 2 波の峰の高さが静水位に等しいので $a_2 = -\Delta h_1$ である。また、段波の波状性に対応して波圧記録にも波状性が認められる。図-6 に図-5 の下段 ($z_0 = -6.3m$) の波圧記録を拡大したものを示す。第 2 波は段波の衝突によって衝撃圧 p_i が認められるが、局所的であり図-5 を見ると高さ方向の位置によって明らかに位相差がある。また、5. で後述する

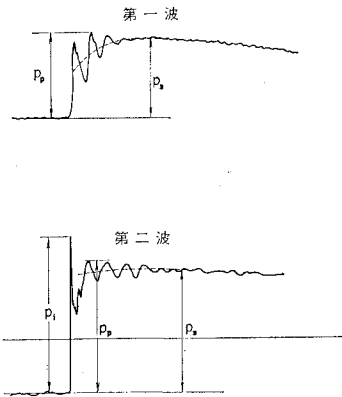


図-6 波圧記録の拡大図 (図-5, $z_0 = -6.3m$)

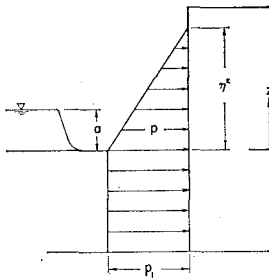


図-7 波圧分布と座標軸

被災条件では顕著な衝撃圧は発生しないので衝撃圧 p_i はここでは無視する。第1波, 第2波とも波状性を示す波圧のピーク p_p と段波の平均高さに対応する波圧 p_s があるが, 段波の波圧としては p_s を代表値と考える。なお, 段波が波状性を示す場合には平均的に $p_p=1.1p_s$ であった。

次に, 波圧の鉛直分布を求めるために図-7のように座標軸をとる。ここに, z は段波到達直前の水位を基点とした鉛直座標, a は $z=0$ からの段波の高さ, p は $z=0$ を基準とした波圧強度である。

このようにして整理した波圧分布を図-8に示す。波圧 p_s は段波の高さ a で無次元化してある。段波到達直前の状態を基準とすれば第1波, 第2波を区別する必要はなくなる。図中の直線は $\eta^*=3a$, $p_1=2.2w_0a$ としたものである。

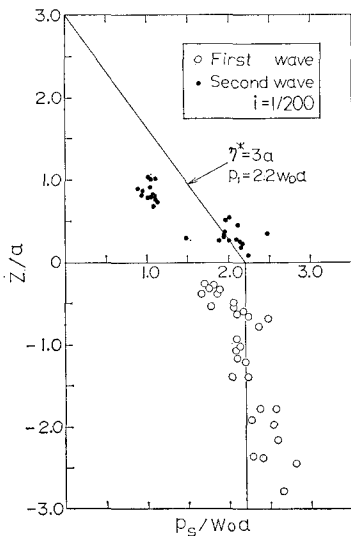


図-8 z/a と p_s/w_0a の関係

4. 津波力の算定法

以上の実験結果から, 直立壁に働く津波力の算定法として図-9に示す分布を考える。すなわち, 静水面 ($z=0$) 上 η^* での0から静水面での p_1 まで直線分布, 静水面下は p_1 で一様と仮定し, η^* , p_1 を次のように与える。

$$\eta^* = 3.0a_I \dots\dots\dots(1)$$

$$p_1 = 2.2w_0a_I \dots\dots\dots(2)$$

ここに, a_I は入射津波の静水面上の高さ(振幅)であり, w_0 は流体の単位体積重量である。この静水面は段波津波の場合には段波来襲直前での水位にとる。また, 揚圧力は当実験では測定していないけれども, 前端で前面波圧強度に等しい p_u , 後端で0の三角形分布とする。すなわち, $p_u=p_1$ である。ただし, 直立壁前後面で静水位に差がある場合には, これによる静水圧差を考慮する必要がある。図-9にはこれを考慮した分布が示されており, h_1, h_2 はそれぞれ直立壁前後面での水深である。 $h_2 > h_1$ の場合には直立壁背後から前方へ向かう静水圧力が働く。このときの浮力は図に示しているように水没体積に対して考慮する必要がある。

なお, ここに示した津波力の算定法は入射津波の波高 H_I を $H_I=2a_I$ とすれば, 非砕波津波に対して既に提案している方法²⁾と同じである。

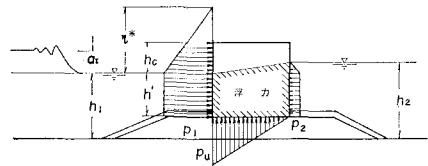


図-9 直立壁に働く津波力の算定法

5. 被災原因の検討

(1) 滑动限界津波高

図-10は被災直前の前面護岸の代表的な幾つかの断面図を示したものである。この護岸は建設中であって種々の施工段階にあり, 被害を受けたのは裏込め栗石を未施工の断面IIIおよびIVであった。このうち断面IIIは消

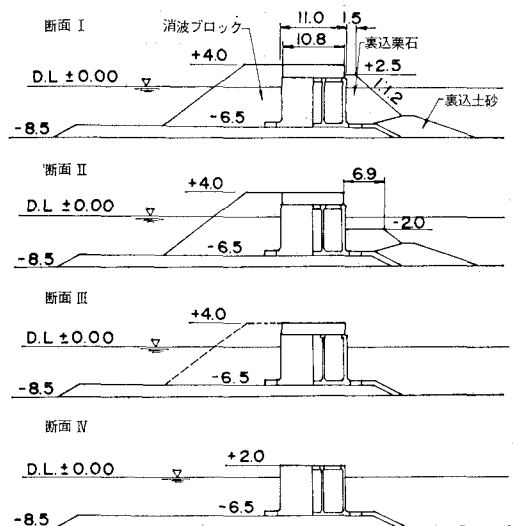


図-10 前面護岸の断面(建設中)

波工がある場合であっても滑動している。

まず、これらの断面についてどのような津波が来襲したときに滑動が生じるかを、4. で示した直立壁に働く津波力の算定法に基づいて検討する。ただし、引き波は比較的長時間継続するので、段波来襲直前での直立壁前後での水位は第2波めであっても同じ ($h_1=h_2$) であると仮定する。また、津波力は比較的静水圧に近いので、消波工があっても変化しないものとする。このとき、滑動限界状態に対応する入射津波の高さ a_c は次式のように表される。

$$a_c = \frac{\mu W_0 + W'_0 \tan(\theta + \phi) + 1.1w_0 h_c^{*2}/B}{\left(1 + \frac{h_c^*}{h'} + \frac{\mu}{2} \frac{B}{h'}\right) \times 2.2w_0 h'} \dots (3)$$

ここに、 $h_c^* = \min\{h_0, 3.0a_c\}$ であり、 μ は直立部と捨石マウンドの間の摩擦係数 (=0.6)、 W_0 は直立部の単位長さあたりの静水中重量 (=tf/m, =9.8 kN/m)、 w_0 は海水の単位体積重量 (=1.03 tf/m³, =10.09 kN/m³)、 h_0 は直立部の静水面上天端高 (m)、 h' は直立部底面の深さ (m)、 B は直立部の幅 (m) である。また、 $\min\{a, b\}$ は a または b いずれか小の値を示す。

式 (3) の分子第2項は裏込め栗石の滑動抵抗力 R を表す。すなわち、

$$R = W'_0 \tan(\theta + \phi) \dots (4)$$

である。ここに、 W'_0 は最上層の被覆層を除いたすべり面より上の割石水中重量 (tf/m)、 θ はすべり面傾斜角 (度) であり、 ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = \tan^{-1} \mu_2 \dots (5)$$

ここに、 μ_2 は割石と割石との摩擦係数で、 $\mu_2=0.8$ である。図-11 に裏込め栗石の滑動抵抗面の状況を示す。

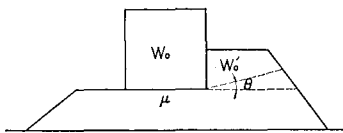


図-11 裏込め栗石の滑動抵抗面

式 (4) の滑動抵抗力は θ を試行的に変えて求められる R の最小値として与えられるが、今回の 図-10 における断面 I, II の裏込め栗石の状態では R が最小となる θ の値はいずれも 0 (度) であった。裏込め栗石の有効重量は水面上の体積に対して 1.8 tf/m³、水面下の体積に対して 1.0 tf/m³ の単位体積重量を用いている。

図-12 は断面 I~IV に対して式 (3) により a_c を求めたものである。津波来襲時の天文潮を +0.15m とし、段波来襲直前での水位変化 Δh を 0~-6m (ーは水位低下を表す) の範囲で変化させて計算してある。直立部の単位長さあたりの空中重量は断面 I~III が 251.3 tf/m、断面 IV が 201.6 tf/m である。

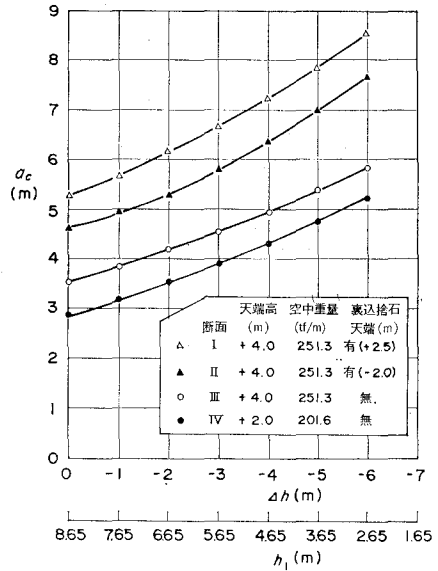


図-12 滑動限界津波高

(2) 被災条件の推定³⁾

来襲津波の周期は 10 分程度であったと考える。また、能代港の検潮記録には初動に引きが認められるが、その偏差は 0.2m 程度と小さく、工学的意味からは押し波初動と考える。

さて、能代港両側の海岸での遡上高は河口部など特殊な地形の所を除いて 6~7m 程度である。これに対応する水深 200m 地点での第1波めの入射津波の振幅 a_{10} は 1.2~1.4m である。これが水深 9m 程度のところに伝播したときの段波の高さ a_1 は実験値を補間して 2.3~2.6m と推定される。

同じような津波が第2波めにも続いたとすると、第1波の引きによる水位変化 Δh および第2波めの段波の高さ a_2 は次のように推定される。

- ① $\Delta h = -5.2m, a_2 = 5.0m$
- ② $\Delta h = -5.8m, a_2 = 6.0m$

こうした津波が作用したとき、護岸直立部の安定性は以下ようになる。

- 1) 第1波の作用
 - $\Delta h = 0m, a_1 = 2.3 \sim 2.6m < a_c$ (断面 IV) = 2.9m したがって滑動しない。
- 2) 第2波の作用 ①
 - $\Delta h = -5.2m, a_2 = 5.0m > a_c$ (断面 IV) = 4.9m $< a_c$ (断面 III) = 5.5m したがって、断面 IV は滑動するけれども、断面 III は滑動しない。
- 3) 第2波の作用 ②
 - $\Delta h = -5.8m, a_2 = 6.0m > a_c$ (断面 IV) = 5.1m $> a_c$ (断面 III) = 5.8m

$\langle a_0 \text{ (断面 II)} \rangle = 7.5 \text{ m}$

したがって、裏込め栗石のない断面 IV, III は滑動するけれども、裏込め栗石のある断面は滑動しない。実際には断面 IV, III が滑動しているので、以上の推定値のうち大きいほうの条件を採用して、第1波めは高さ 2.6 m 程度の津波が来襲したけれども護岸は滑動には至らず、第1波の引きによって水位が 5.8 m 程度低下していたときに、高さ 6 m 程度の第2波めの段波が来襲し被害が生じたものと推測される。

ただし、この推測は以下のような仮定をおいたものであることに留意する必要がある。

① 能代港に来襲した津波の第1波と第2波が、実験において造波板を等振幅運動させたときの発生波のようである。

② 第1波来襲時の堤背後水面は静水面であり、第2波めの段波来襲時には前面水位と同じ高さに低下している。

①の仮定は第1波については検潮記録から逆算した入射津波の高さとほぼ一致することから、それほど間違いないと考えられる。また、②の仮定は今回の津波が段波状で来襲し水位の上昇が急激であったことと、引きは比較的長時間継続するので堤背後の海水は開口部から充分流出できることにより、ほぼ妥当と考えられる。

ただし、検潮記録やシミュレーション計算⁸⁾による能代での波形に認められるように、第1波の顕著な押しの前に小さな引きが先行している。これによって第1波の押し波が影響されて、より大きな段波となって来襲したとすると、第1波によって一部滑動が生じた可能性も否定しきれない。

6. あとがき

能代港外港地区埋立護岸の被災原因について考察し

た。まず、段波津波の作用状況と波圧分布を知るために、水理模型実験を行ない、直立壁に働く津波力の算定式を得た。これらの実験結果等により、第1波めは高さ 2.6 m 程度の津波が来襲したけれども滑動には至らず、第1波の引きによって水位が 5.8 m 程度低下していたときに、高さ 6.0 m 程度の第2波めの段波が来襲し、被害が生じたものと推測される。段波津波の作用の著しい特徴は変化が急激であることにある。たとえば、第2波めの段波の来襲は、第1波の引きにより水位が著しく低下しているときであり、最も引いた状態で前方 50 m 程度の沖に段波の来襲を認めてから約 6 s 程度で越流が始まるという急激な変化を示す。そのため、背後に津波が充分回り込むことができず、堤内外に著しい水位差がついて滑動、倒壊したものと考えられる。ただし、以上は多くの仮定を含むもので、第1波の作用による滑動を完全に否定するものではない。

最後に、現地調査や資料の収集において協力していただいた第一港湾建設局、秋田県の関係者の皆様に心からお礼を申し上げます。また、合田良実水工部長、田中則男海洋水理部長には終始御支援と御教示を頂いた。さらに水理実験の実施には水理研究室の一戸秀久技官の協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福井芳郎・白石英彦・中村 克・佐々木泰雄：津波の研究(II)第9回海講講演集, pp. 50~54, 1962.
- 2) Tanimoto, K.: On the hydraulic aspects of tsunami breakwaters in Japan, Proc. of the International Tsunami Symposium, 1981, IUGG Tsunami Commission, pp. 423~435, 1983.
- 3) 谷本勝利 他：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技研資料, No. 470, 299 p., 1983.