

津波漂流物の衝撃力を考慮した 人工地盤の設計について

農業水産部 水産課 ○須永 純史
高橋 哲美
函館開発建設部 築港課 増田 亨

北海道開発局では平成18年度に「地震津波対策アクションプラン」を策定しており、この中で「港湾・漁港における避難対策の強化」「港湾・漁港背後地域への漂流物対策の推進」が求められている。このことから、漁港において用地の高度利用の観点から整備している人工地盤について、津波波力及び津波漂流物の衝撃力が作用した時の設計への影響を把握し、人工地盤の津波対策施設としての機能について検討した結果を報告するものである。

キーワード：地震津波対策、津波漂流物対策、設計、安全、人工地盤活用

1. はじめに

人工地盤は、荷捌作業や漁業関係車両が輻輳する狭隘な漁港において、漁港周辺に用地確保が困難な場合、これらの解消を目的として整備するものであるが、津波の発生により漁港周辺が浸水した場合、比較的高い位置に広い用地面積を有する人工地盤は、有効な一時待避場としての利用も期待されている。

一方、水産庁は18年3月に「災害に強い漁業地域づくりのためのガイドライン」を作成するとともに、「災害に強い漁業地域づくり事業実施要領」を制定し、人の安全確保と地域防災力の向上を図るため、災害に強い漁業地域づくり事業を行う地域の漁港について、避難場所の確保や漂流防止施設の設置等を挙げている。

北海道開発局においても、平成18年12月に策定された「地震津波対策アクションプラン」の「施策-10」において「港湾・漁港における避難対策の強化」施設として人工地盤の整備を挙げている。

また、「地震津波対策アクションプラン」の「施策-13」において「港湾・漁港背後地域への漂流物対策の推進」といったものも挙げている。

一般的に、津波は漁港構造物の安定計算上の外力として考慮していないが、人工地盤を一時待避施設として位置付けたとき、作用する津波波力に対して耐力を有する構造である必要があるため、一般的な手法で設計された人工地盤について、津波波力及び津波漂流物の衝撃力が作用した時の設計への影響を検討した。

2. 津波波力に対する検討

津波波力に対する検討について、本報告においては既往の人工地盤として、ウトロ漁港における人工地盤を対象として検討を行った。

また、津波漂流物対策施設の設置目的は、漂流物による2次災害の減災であるため、津波浸水深については、減災効果が期待できるとされる4.0m以下の津波（表-01¹⁾参照）を対象とし、参考値として津波強度0～2（1.0m、2.0m、4.0m）の津波について検討を行った。

表-01 津波強度と津波の特性や津波による被害の関係

津波強度	0	1	2	3	4	5
津波高(m)	1	2	4	8	16	32
津波形態	緩斜面 急斜面	岸で盛上がる 速い潮汐	沖でも水の壁 第二波砕波 速い	先端に砕波を伴うものが増える。	第一波でも巻き波砕波を起こす。	
音			前面砕波による連続音 (海鳴り、暴風雨)		浜での巻き波砕波による大音響 (雷鳴、遠方では認識されない)	
被害			津波漂流物対策施設による減災効果あり			岸に衝突する大音響 (遠雷、発破。かなり遠くまで聞こえる)
木造家屋		部分的破壊	全面破壊			
石造家屋			持ちこたえる	(資料無し)	全面破壊	
鉄・コン・ビ ^ル			持ちこたえる	(資料無し)	全面破壊	
漁船			被害発生	被害率50%	被害率100%	
防潮林被害		被害軽微	津波軽減	漂流物阻止	部分的被害 漂流物阻止	全面的被害 無効化
養殖筏		被害発生				
沿岸集落			被害発生	被害率50%	被害率100%	
打上高(m)	1	2	4	8	16	32

(1) 条件の設定

まずはじめに、津波波力による漂流物（船舶）及びその衝撃荷重についての条件設定を行った。

a) 衝突条件の設定

衝突条件の設定として、漂流物（船舶）を津波により押し流されるものと仮定し、角柱横向きで回転しない3次元衝突と想定し、その付加質量係数 C_{MA} を1.5とした²⁾。

船舶諸元は、道内で最も登録隻数が多く、常時係留及び上架している可能性の高い10～20tの漁船（船長 $L=21.4\text{m}$ 、船幅 $B=5.1\text{m}$ 、空荷吃水 $d=1.0\text{m}$ 、 $M=600\text{kN}$ ）を対象とした。衝撃力算定に必要な代表高さ D は、 $D=2d$ と仮定して $D=2.0\text{m}$ とした。

なお、20t未満船より大型の船舶に関しては津波来襲時は港外に避難するため、本検討からは除外した。

津波浸水深と漂流物流速については、松富ら(1998)による津波の陸上流速算定式³⁾を用いた。

$$u = F_r \cdot (gh_r)^{0.5} \quad (2a)$$

u =津波流速、 g =重力加速度、 h_r =背面浸水深

津波流速 u と漂流物流速 V_s の関係は厳密に言えば対象とする漂流物の形状等により変化するが、本検討においては津波流速と漂流物流速を同じ値 ($u = V_s$) として考えることとした。

また、フルード数は一般的に0.7～2.0の値を持つが、人工地盤に対する津波漂流物対策検討においては、岸壁等でのシミュレーションにおける津波のフルード数より大きめの値である中間値 ($Fr=1.35$) を用いて検討を行った。

b) 衝撃荷重の算定結果

衝撃荷重の算定は、岩井ら(1979)の研究⁴⁾を参考として、衝突形態①として「橋脚正面に船首が激突」する場合と、衝突形態②として「橋脚隅角部へ船側が激突」する場合について検討を行った（図-01参照）。

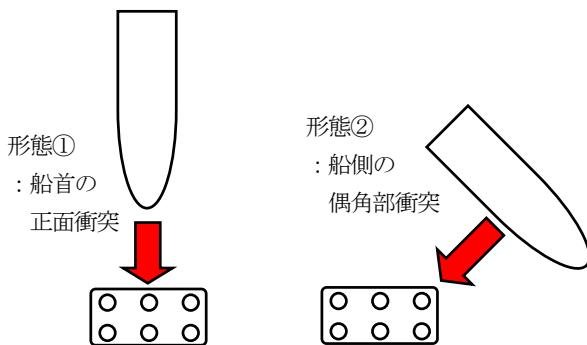


図-01 衝突形態①、衝突形態②イメージ図

衝撃荷重については、衝突初期は荷重が直線的に増加し、船体の破壊が進むとほぼ一定値に達するとされているため、一定値に達した時点における衝撃荷重 P をそれぞれ算出した。

ただし、岩井らは500GT～4,000GTの大型船を対象に検討していることから、今回対象としている20GT未満の漁船に適用するに当たっては、材質や形状も異なるため、

必ずしも正值であるとは言いえない。このため、人工地盤の検討における衝撃荷重の設定においては危険側を考慮して衝突形態①と②を比較し、最大となる値を採用することとした。

津波浸水深1.0m、2.0m、4.0mをそれぞれケース1、2、3とし、各ケースにおける浸水深と流速の関係及び検討に使用する衝撃荷重を、表-02に示した。衝撃荷重は各ケースとも形態②の値が最大値となるため、形態②における衝撃荷重を本検討における衝撃荷重と設定し各種検討を行った。

表-02 各ケースにおける津波浸水深と漂流物流速、及び衝撃荷重

設計条件	ケース1	ケース2	ケース3
津波浸水深： h_r	1.0 m	2.0 m	4.0 m
漂流物速度： V_s ($=u$)	4.2 m/s	6.0 m/s	8.5 m/s
衝撃荷重： P (形態①)	372.7 kN	532.4 kN	754.2 kN
衝撃荷重： P (形態②)	1308.7 kN	1869.6 kN	2648.5 kN
衝撃荷重： P	1308.7 kN	1869.6 kN	2648.5 kN

(2) 基礎の検討

2章(1)にて算定した各ケースにおける衝撃荷重がウトロ漁港人工地盤の支柱に作用する際の基礎部の検討を行った。検討断面を図-02に示す。また、船舶の衝突形態は確率は非常に小さいと考えられるが、考え得る最大の状態として、岸壁に係留している4隻の漁船が9本の柱に同時に衝突すると想定した。この際の1隻当たりの衝撃荷重 P は表-02の値と考え、支柱1本に作用する荷重 P' を表-03のように仮定した。

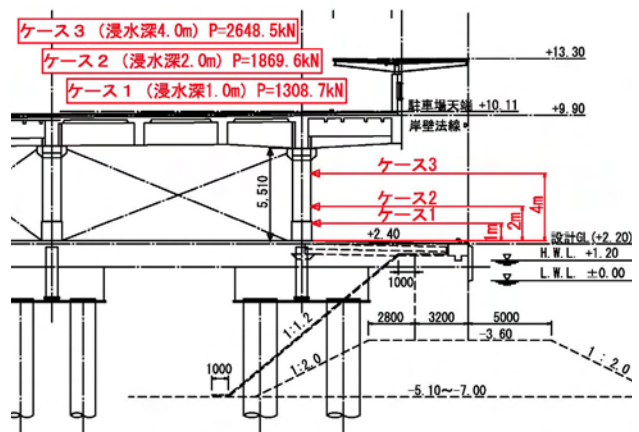


図-02 検討断面

表-03 衝撃荷重及び支柱1本当たりに作用する荷重

	衝撃荷重 P	支柱1本当たりに作用する荷重 P'
ケース1	1308.7 kN	581.6 kN
ケース2	1869.6 kN	830.9 kN

ケース3	2648.5 kN	1177.1 kN
------	-----------	-----------

また、図-03、図-04に船舶の衝突形態イメージ図及び荷重作用平面図をそれぞれ示す。

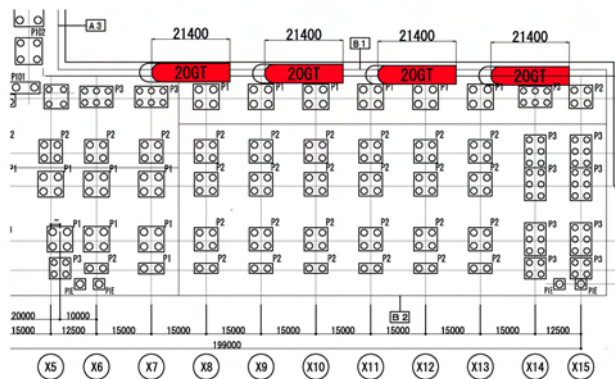


図-03 船舶の衝突形態

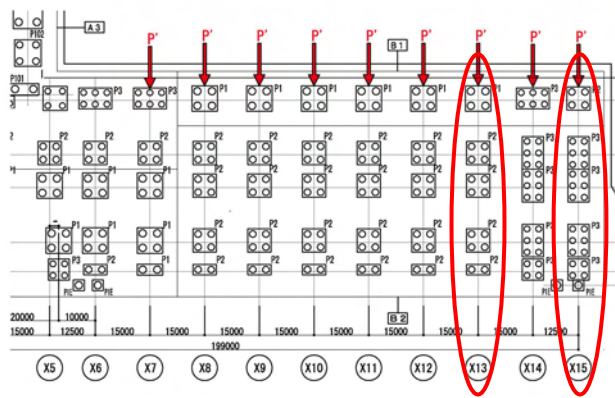


図-04 荷重作用平面図

以上の条件で基礎に作用する荷重を検討した結果、全てのケース及び基礎について、支持力は許容値を満足し、衝突に対して基礎は安定するという結果となった。代表例として表-04に一番大きく荷重のかかるケース3における計算結果を示す。

表-04 ケース3 (浸水深4.0 m、P=2648.5 kN/隻×4隻)

杭種	杭径 (m)	杭長 (m)	杭断面積 (m ²)	杭の断面係数 (m ³)	支持力 (kN-m)	曲げモーメント (kN-m)	圧縮応力度 (N/mm ²)	杭頭変位量 (cm)	
					押込力 許容値		計算値 許容値	計算値 許容値	
B1-P1	2.0	12.8	3.14	0.785	2132.8	4867.4	312.5	1.08 12.00	0.07 2.00
B1-P2	1.8	12.6	2.54	0.573	1778.1	4265.5	232.8	1.11 12.00	0.07 1.80
B1-P3	1.6	12.4	2.01	0.402	1329.7	3698.2	171.5	1.09 12.00	0.07 1.60
A3-P1	1.6	10.8	2.01	0.402	1584.5	2643.9	187.4	1.24 12.00	0.07 1.60

(3) 支柱の検討

基礎については全てのケースで安定であることが確認されたため、人工地盤支柱について、衝突時の応力照査を行った (表-05)。

検討箇所は中フレームのX13通りと端のX15通りを代表 (図-04の楕円部分) にして、ケース1~3の最も応力の大きいケースについて検討を行い、X13通りはケース2が、X15通りはケース3がそれぞれ最大の応力とな

った。

人工地盤におけるPC柱の耐力は地震時応力に対して設計しており、地震時の応力 (M2) と衝突時の応力 (M1) の比較をおこなった結果、M1のほうがM2より小さいため、M2を満足するように設計しているPC柱では船舶の衝突に対して問題ないという結果になった。

表-05 各ケースにおける最大応力

X13 通り Y6 端柱脚	ケース1	M1= 1370 kN·m	< M2 = 3287 kN·m	OK
	ケース2	M1= 1989 kN·m		
	ケース3	M1= 1871 kN·m		
X15 通り 6 端柱脚	ケース1	M1= 1433 kN·m	< M2 = 3176 kN·m	OK
	ケース2	M1= 2122 kN·m		
	ケース3	M1= 2128 kN·m		

3. 衝撃荷重に対する支柱への防護対策例

2章ではウトロ漁港の人工地盤を例にとって基礎及び支柱の衝撃力に対する検討を行った結果、安定するということが判った。もし、基礎や支柱が安定しないという結果が出た場合は、それぞれ安定するように設計を見直す必要があり、設計中もしくは未設計の構造物であれば対応は可能と思われる。しかし、既に施工済みの構造物の場合は、利用状況も考慮すると再設計を行い構造物を作り直す等の改良は困難だと思われる。そこで、ここでは既設構造物を改良するのではなく、既存の支柱に防護対策を施すことで衝撃荷重に対応する方法についての検討を行った。

なお、この対策方法については参考例であり、施設の重要度や利用状況等を考慮し、構造物自体を補強するか、防護対策を行うかについての判断はそれぞれの該当地域ごとに判断する必要がある。

(1) 津波波力の検討

まず、支柱に作用する津波自体の波力についての検討を行った。支柱高さは5.80m、径は1.10mであり、波力算定の基本式は、津波避難ビル等に係るガイドライン⁵⁾に準じて算定しており、荷重形態は下辺q1、上辺q2とする台形分布となる。算定結果を表-07に記載した。いずれのケースにおいても船舶衝撃力Pが津波波力qを大きく上回るため、検討は船舶衝突で行うこととした。

表-07 支柱に作用する津波波力計算結果

	3h (m)	q1 (kN/m ²)	q2 (kN/m ²)	波力 q(kN)	衝撃荷重 P(kN)
ケース1	3.00	3028	0.00	49.96	< 1283.83
ケース2	6.00	60.56	2.02	199.63	< 1834.08
ケース3	12.00	121.13	62.58	586.03	< 2598.18

表-12 津波漂流物による衝撃力に対する保護対策工の評価

	鋼管杭	ゴム防舷材	橋梁海中基礎緩衝工 (PEL緩衝工)
イメージ図			
構造概要	人工地盤の基礎フーチングを利用し、鋼管杭を建て込み、漂流物を支柱の局部変形および梁変形による吸収エネルギーにて捕捉するものである。	支柱に取り付けたゴム防舷材の変形により漂流物の衝突エネルギーを吸収する。	支柱にとりつけた橋梁海中基礎緩衝工の変形により漂流物の衝突エネルギーを吸収する。
人工地盤の 利便性の保持	人工地盤支柱前面に鋼管杭が設置されるため、基本的な動線は確保されるが、エプロン上に鋼管杭が突出するため、荷役等に若干影響する。 - B -	人工地盤支柱に防舷材が設置されるため、基本的な動線は確保される。防舷材の高さ分、エプロンに掛かるため、荷役等に若干影響する。 - A -	人工地盤支柱に防衝工が設置されるため、基本的な動線は確保されるが、防衝工の奥行きが大きくエプロンに掛かるため、荷役等に若干影響する。 - C -
人工地盤への 影響軽減対策	鋼管杭で人工地盤への漂流物（漁船）を捕捉するため、既設への影響が最も小さい。またあらゆる角度からの衝突にも対応できる。 - A -	防舷材反力が発生するため、支柱・基礎への影響が考えられ、漂流物（漁船）が、防舷材に対し横方向～斜め方向に衝突した場合、その機能は確保できない。 -	緩衝工反力が発生するため、支柱・基礎への影響が考えられ、漂流物（漁船）が、緩衝工に対し横方向～斜め方向に衝突した場合、その機能は確保できない。 -
漁具等の 流出対策	漁具等への流出対策には寄与しない。 - C -	漁具等への流出対策には寄与しない。 - C -	漁具等への流出対策には寄与しない。 - C -
概算金額	最も安価である。 - A -	鋼管杭案の次に安価となる。 - B -	最も高価である。 - C -
対策選定	○	△	×

ことに留意が必要であるものの、それ自体は複数回の衝突に耐えられるものを設置することが可能である。

最も重要な点は、既存の構造物にこのような防護対策を行うことによって、施設の利用状況に影響がでないようにすることである。今回検討した防護対策は、ある程度スペースを必要とするものであるため、防護対策を行う方がよいのか既存の構造物自体を改良する方がよいのかについては、利用者や管理者等と十分協議する必要がある。

なお、ここでは耐力などの詳細な検討は行っていないが、駐車場出入口等にあるような可動式のポールや、ゲート式の可動柵など、通常時の施設利用を阻害しないような漂流物捕捉手法を取り入れることにより、地震災害時に人工版をさらに有効に活用することも考えられることを述べておきたい。

4. あとがき

ウトロ漁港人工地盤を対象に津波漂流物による衝撃力への構造物の安全性について検討を行い、支柱及び基礎構造物については津波波力や漂流物の衝撃力に対して十分な安全性を有することが確認された。

しかし、津波漂流物による衝撃力への構造物の安全性とは、あらゆる大津波に対しての安全性を保持するものではなく、津波浸水深や津波流速等に対する限界が存在するため、当該構造物のある地域ごとに検討、設定を行い、その効用と限界については十分周知していく必要がある。

また、人工地盤の支柱では捕捉しきれない漁具や流木、小型船といった小型漂流物に関しては、押し波時には岸

壁背後施設を破壊する可能性が、引き波時には港内に流入して岸壁としての機能を阻害する可能性がある。どちらの場合も二次災害としての影響が大きいため、小型漂流物も含めた漂流物対策も考慮する必要があるが、人工地盤に小型漂流物の捕捉機能を付加する場合の検討については、今後の課題としたい。

終わりに、本報告では主に設計の観点から津波漂流物による衝撃力の構造物への安全性というハード対策に主眼をおいて検討を行ったが、一時避難機能も含めた津波対策施設としては、避難ビル等に係るガイドライン等を参考にして、ソフト対策を含めた総合的な対策が必要となることに十分留意する必要がある。また、安全性についての評価方法は確立されているものではないため、特に条件設定に関しては、対象とする構造物ごとに適切に設定する必要があることに十分注意していただきたい。

参考までに、避難ビル等に係るガイドラインからいくつか留意点を挙げると、①当該人工構造物における避難スペースとした時の機能と、本来の利用目的による機能を維持する部分を考慮し、利用者避難者双方に周知する。②当該人工構造物の施設管理者と十分協議し、津波避難場所として利用することに対して承諾を得る必要がある。また、避難時の事故や施設・備品の破損時等における責任分担についても同様に確認しておく必要がある。

③当該人工構造物までの安全な避難路、避難経路についても十分確認、周知しておく。といったことが重要となってくるが、詳細は避難ビル等に係るガイドラインを確認していただきたい。

参考文献

- 1) 首藤伸夫：津波対策小史，津波工学研究報告，第17号，2000.
- 2) 池野正明ら：段波津波による漂流物の衝突力に関する実験的研究，電力中央研究報告書，2004.
- 3) 松富英夫ら：津波の陸上流速とその簡易推定法，海岸工学論文集，第45巻，1998.
- 4) 岩井聰ら：船舶の橋脚衝突と衝突力，海岸工学講演会論文集，1979.
- 5) 津波避難ビル等に係るガイドライン，内閣府，2005.
- 6) 鋼製砂防構造物設計便覧，砂防・地すべり技術センター，2001.
- 7) 星川辰雄ら：鋼管はり部材の動的終局限界に関する一考察，土木学会論文集，1995.
- 8) 白石博文ら：部材損傷を有する鋼製透過型防砂えん堤の残存性能に関する研究，大学評価・学位授与機構，2006.