

須崎港における津波漂流物対策施設の現地実証実験

～対策施設の防護性能に関して～

田代 徹 *・金正富雄**・國松 靖 ***・内山一郎****

* 前 (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 調査部 調査役

*** 国土交通省 四国地方整備局 高知港湾空港整備事務所 所長

**** 日本海洋コンサルタント (株) 技術本部 技術部長

高知県須崎港では過去、南海地震等による地震津波で木材が漂流し、市街地の建造物の破壊や港湾の埋没等、大きな被害を被っている。一方、同港の木材工業団地には現在も輸入木材が野積みされ、南海・東南海地震等巨大地震による地震津波が再び来襲すると市街地や港湾への漂流・流出が懸念されている。

本検討は、高知県須崎港の港湾区域に野積みされている原木を対象とし、津波による市街地や港湾への流出を低減させる減災施設として、津波漂流物対策施設を検討し、施設の防護性能について実証実験を行った。

キーワード：波，津波漂流物，減災施設，現地実証実験

1. はじめに

津波による被害は直接的な浸水被害に留まらず、船舶や自動車、コンテナ、木材などが津波により漂流し、建造物の破壊や港湾機能の低下等大きな被害をもたらすことが東北地方太平洋沖地震でも確認されている。

津波漂流物対策施設とは、津波の「陸上遡上阻止」や「水流遮断」ではなく、津波による漂流物から人命を守り、財産の被害を低減させることを目的とした減災施設である。国内では、平成19年度に釧路港にて全国初となる津波漂流物対策施設が整備されており、その設計手法は「津波漂流物対策施設設計ガイドライン(案)¹⁾(以下、ガイドライン案と称す)」にとりまとめられている。しかしながら、構造部材である鋼管杭やワイヤロープの塑性変形も考慮した特殊な設計法を採用しており、設計法の妥当性を検証した事例はまだない。

本実験では、須崎港での現地実証実験として設置される津波漂流物対策施設(捕捉施設・固縛施設)を対象に、その防護性能や作業性、施工性および木材荷役に対する影響等を確認した。

また捕捉施設の検討では、ガイドライン(案)¹⁾に示されている設計手法の妥当性を、実構造物に対する実験結果の検証によって確認し、得られた主要な成果をとりまとめた。

2. 津波漂流物対策施設の現地実証実験概要

2.1 津波漂流物対策施設の概要

本実験を実施した須崎港の木材工業団地周辺では、輸入原木が長さ4m, 8m, 12mごとに「はえ」と呼ばれる木材を積み重ねた山として、ピーク時で約2万本積み重ねられている。

今回の実験で使用した津波漂流物対策施設は、木材の流出を抑制するため「はえ」をロープやネットで日常的

に固定する固縛施設(図-1)と、流出した木材の市街地や港湾区域への流出を抑制するガードケーブル方式(杭基礎構造)の捕捉施設(図-2, 図-3)である。



図-1 木材積載山固縛作業状況(須崎港)

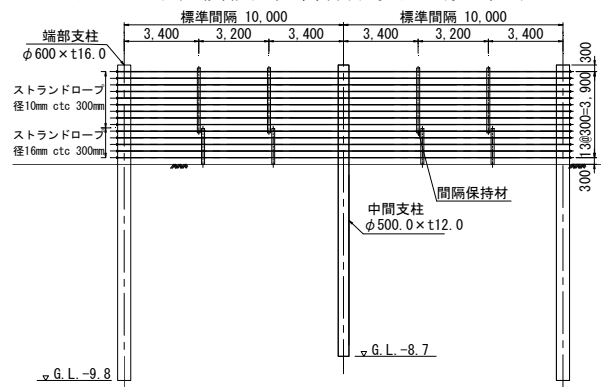


図-2 津波漂流物捕捉施設概略図



図-3 津波漂流物捕捉施設実験区間

2.2 現地実証実験概要

(1) 固縛施設の实証実験

固縛施設の实証実験は、過年度に検討された須崎市案を参考とし、固縛方法や使用材料、部品点数等を改良した4案についての实验である。

実験ではそれぞれの固縛タイプで実際に現地の木材積載山を固縛し、固縛時間の計測や安全性、歩掛等を確認するとともに、作業員へのヒアリングを実施し、以下の項目を確認して最適な固縛タイプの決定を行う。

- ① 施工性の比較：固縛施設設置工程での作業歩掛の比較
- ② 作業性の比較：固縛施設設置工程での作業時間の比較と汎用性の確認（図-4）
- ③ 荷役作業への影響把握：固縛施設の設置作業が木材荷役作業に与える時間的な影響の確認



図-4 固縛施設現地実証実験（作業性の確認）

(2) 漂流物捕捉施設の实証実験

漂流物捕捉施設の实証実験は、設置された捕捉施設が木材荷役作業に与える時間的な影響の確認や、『津波漂流物対策施設設計ガイドライン（案）』の設計手法の妥当性の検証を目的とした実験である。

実験の内容は、捕捉施設設置前後の木材荷役効率の比較や現地作業員へのヒアリング調査による作業効率への影響確認と、木材衝突実験における杭頭変位、最大曲げモーメント、曲げモーメント第一ゼロ点深さ、鋼管杭の局部変形量、ワイヤロープの伸びなど実験値の計測およびガイドライン（案）に基づく設計値と実験値との比較による設計法の妥当性の検証である。

木材衝突実験では、実験区間（図-3）の前面に実験架台（図-5）を設置し、所定の衝突エネルギーが得られる吊上げ高さ（表-1）まで木材を吊り上げて衝突させた。得られた構造部材の挙動等7項目（表-2）を計測し、解析・評価を行った。

衝突による塑性変形が考えられるため、衝突させるロープはCaseごとに変えて試験を行った。



図-5 実験架台設置状況

表-1 実証実験ケース

実験 Case	木材重量 W(kN)	吊上高 H(m)	衝突速度 V(m/s)	衝突エネルギー Ed(kJ)	備考
Case1	15.68	1.08	3.2	8.19	杭への衝突実験（原木=12m、1本）
Case2	18.62	1.36	3.5	11.64	ワイヤロープ端部への衝突実験（原木=12m、1本）
Case3	15.68	2.3	4.9	19.21	杭への衝突実験（原木=12m、1本）
Case4	16.66	1.95	4.4	16.46	ワイヤロープ中央への衝突実験（原木=12m、1本）
Case5	15.68	2.3	4.9	19.21	杭への衝突実験（原木=12m、1本）
Case6	15.68	2.4	5.1	20.81	杭への衝突実験（原木=12m、1本）

なお、津波来襲時には木材が水面に浮いた状況で捕捉施設に衝突するため、付加質量を加えて衝突速度を設定している。

また、Case1の衝突エネルギーは設計条件の0.8倍、Case3は1.0倍、Case5は1.2倍、Case6は1.34倍とし、それぞれについて計測し、設計値と比較した。

表-2 実証実験計測項目

計測項目	計測機器
局部変形量	3Dスキャン装置（REVscan）
杭頭変位	CCDレーザー式変位計（超ロングレンジタイプ）
杭に発生する曲げ応力度	溶接型歪ゲージ（12箇所）
ロープ張力	センターホール型荷重系
ロープ変位	CCDレーザー式変位計（超ロングレンジタイプ）
木材衝突速度	CCDレーザー式変位計（超ロングレンジタイプ）
木材の加速度	圧電型加速度計

3. 津波漂流物対策施設の实証実験結果

3.1 固縛施設の实証実験結果

固縛施設の实証実験の結果、縦ロープ（高強度繊維ロープ）2本（間隔保持ロープ付き）、端部ネット4枚使用の固縛案（図-6）がa)～c)各項目で最も効率が良い固縛タイプとなった。結果として、須崎港には同タイプの固縛施設が16か所の木材積載山に設置されることとなった。

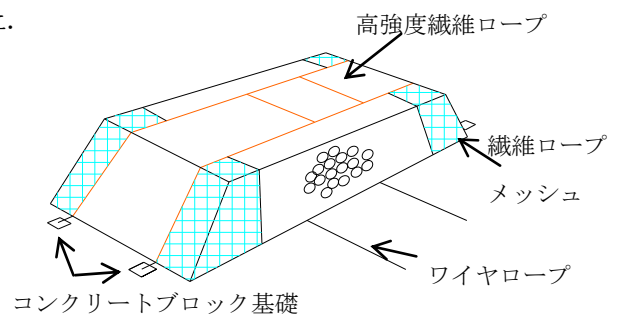


図-6 固縛施設選定案の構造図（須崎港）

3.2 捕捉施設の实証実験結果

(1) 木材荷役効率に与える影響

捕捉施設の設置により、荷役岸壁の作業幅や通路幅が狭くなり、荷役機械や補助運搬トラックの取り回しおよび積み込み作業効率の低下を確認した（図-7）。また、1日あたり荷役扱い木材本数の比較では、設置後の扱い本数（実績）は設置前の約87%に減少していることを確認した。



図-7 木材荷役効率の比較 (運搬作業：設置後)

(2) 木材衝突実験の解析

1) 地盤反力係数の設定

実験場所の地盤 N 値は、表層から0.5mの深度で $N=23$, 1.0mで $N=30$, 1.0m以下では $N=5$ 前後のゆるい層である。港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾ およびガイドライン(案)¹⁾に添いC型地盤とし平均的に $N=14$ と設定した。

また地盤反力係数 kc の評価は、道路橋示方書³⁾によれば地震荷重のような動的作用では静的作用の2倍となる。本検討では $N=14$ の場合の $kc=2986$ ($\text{kN/m}^2\cdot\text{s}$) と、動的作用時で2倍となる $kc=5972$ ($\text{kN/m}^2\cdot\text{s}$) を設定し、港研方式²⁾を用いて設計諸量の計算値と実測値の比較を行った。

2) 吸収エネルギーの比較および検討

杭に原木が衝突すると、くいは横方向にたわむことと衝突部が窪む(局部変形)ことでエネルギーを吸収する。

a) 吸収エネルギーの算出

実証実験で実測した局部変形量 δ_{L0} や、地表面変位 y_0 、地表面たわみ角 i_0 から、式(1)と式(2)、(3)で、局部変形による吸収エネルギー (ER) と杭基礎の吸収エネルギー (En) の合計値が衝突エネルギー (E_d) に等しくなるように繰り返し計算により衝突荷重 F を推定した。さらに、得られた衝突荷重 F (最適値) を再度、式(1)および式(2)に代入し、 ER と En を算出した。

<局部変形による吸収エネルギー (ER) >

$$ER = F \frac{\delta_{L0}}{1.8} \quad (1)$$

<杭基礎の吸収エネルギー (En) >

$$En = \frac{1}{2} F y_{top} \quad (2)$$

$$y_{top} = A_1 y_0 + A_2 i_0 h + \frac{F h^3}{3EI} \quad (3)$$

ここに、 y_{top} : 荷点変位、 h : 載荷点高さ、 E : ヤング係数、 I : 断面二次モーメント、 A_1 、 A_2 : 繰返し載荷の影響係数 (=1.0) である。

一方、現行設計法では局部変形量 δ_{L0} を既値として表せられないため、式(4)の Ellinas 式で局部変形量 δ_{L0} を推定した。さらに実測値からの算出方法と同様、繰り返し計算により衝突加重 F を仮定し、 ER および En の設計値を算出した。

$$\delta_{L0} = D \left(\frac{4F}{K \sigma_{yd} t^2} \right)^{1.25} \quad (4)$$

ここに、 D : 鋼管径、 t : 鋼管肉厚、 F : 衝突荷重、 K : 実験定数、 σ_{yd} : 動的降伏応力である。

b) 吸収エネルギーの実測値と設計値の比較

a) で算出した実測値および現行設計法の吸収エネルギー (ER , En) が、それぞれ杭全体の吸収エネルギーに占める割合を比較した(図-8)。

実測値 (δ_{L0}) から算出した局部変形による吸収エネルギー (ER) は、杭全体の吸収エネルギーに対する割合が約10%となった。また、杭基礎による吸収エネルギー (En) の割合は約90%であり、実測値において、杭全体の吸収エネルギーに対する吸収エネルギーの割合 (ER/En) は約1/9となった。

一方、現行設計法から算出した吸収エネルギーの割合は、

局部変形による吸収エネルギー (ER) は約40%、杭基礎による吸収エネルギー (En) は約60%となり、杭全体の吸収エネルギーに対する割合 (ER/En) は約4/6となった。

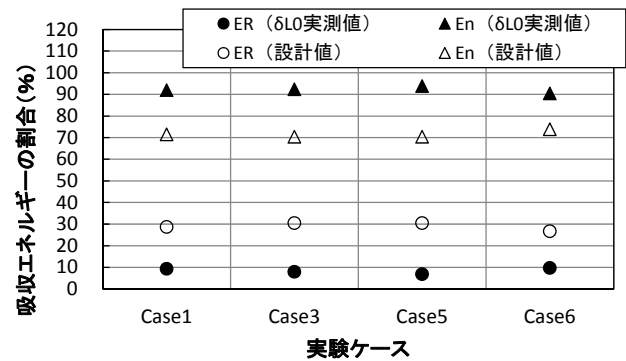


図-8 吸収エネルギーの割合 ($kc=2986$ ($\text{kN/m}^2\cdot\text{s}$))

杭全体の吸収エネルギーに対して、実測値 (δ_{L0}) から算出した吸収エネルギーの割合は、設計値(現行設計法)による算出値と比較して非常に小さい結果となった(図-8)。

実測値と設計値で、杭の局部変形 (δ_{L0}) による吸収エネルギーに差が生じた要因は、式(4)の実験定数 K 値の差によると考えられる。式(4)での実験定数 K 値 (=185) は星川ら⁴⁾による鉄球-鋼管杭(コンクリート基礎)の衝突試験による推定値であり、実験ケースの木材-鋼管杭(杭基礎)とは実験定数 K 値が異なることに起因する。

このことから、津波漂流物捕捉施設の設計検討を行う場合、設計段階で対象施設の支柱等の部材や基礎形状、また対象とする衝突物(津波漂流物)の材質や形状に合致した実験定数 K 値を室内実験等から求めることが望ましいことを確認した。

3) 最大曲げモーメントおよび曲げモーメント第一ゼロ点位置の実測値と設計値の比較

吸収エネルギーの評価と同様に、実測値を基に、 $ER+En$ が E_d に等しくなるように、繰り返し計算により衝突荷重 F (最適値) を求めた。得られた衝突荷重 F (最適値) を用いて、港研方式²⁾から求まる最大曲げモーメント M_{max} および曲げモーメント第一ゼロ点 Im_1 を計算値とする。

また、鋼管杭に1m間隔で設置したひずみゲージで実測したひずみ量から算出した最大曲げモーメントおよびスプライン補間から推定したモーメント第一ゼロ点を実測値として計算値と比較する。

最大曲げモーメント (M_{max}) および曲げモーメント第一ゼロ点 (Im_1) の結果を図-9と図-10に示す。最大曲げモーメントの比較では、港研方式で算出した値と実測値が Case1 および Case3 でおおむね整合していることを確認した。また Case3 と Case5 は、同じ最大曲げモーメント

が作用する荷重条件での実験に対し、Case5で M_{max} が増大した。さらにCase6では大きな衝突荷重を加える条件での実験に対し、 M_{max} は低下した。

この実験結果から、Case5以降は繰返し荷重の作用により、鋼管杭に生じた残留変位の影響によるものと考えた。また、曲げモーメント第一ゼロ点の検討結果では(図-10)、実測値と設計値が良い一致を示しており、地盤反力係数 kc 値を1倍($kc=2986$ (kN/m^{2.5}))とした設計法で、安全側の評価となることを確認した。

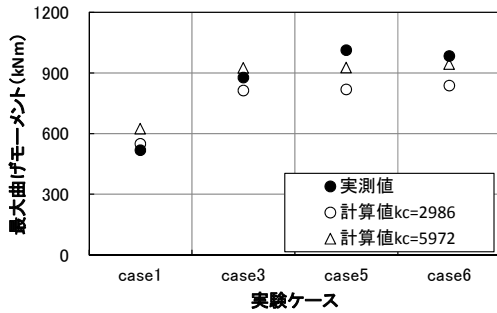


図-9 最大曲げモーメントの比較

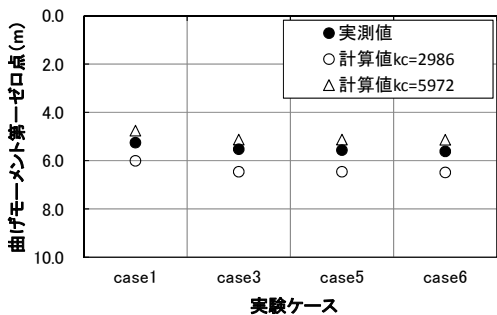


図-10 最大曲げモーメント第一ゼロ点の比較

3.3 捕捉施設のワイヤロープの実証実験結果

(1) ワイヤロープ吸収エネルギー

ワイヤロープの吸収エネルギーは、弾性域 ER_1 および塑性域 ER_2 および ER_3 に分類される。図-11には本実験で用いられたワイヤロープの各吸収エネルギーを示す。

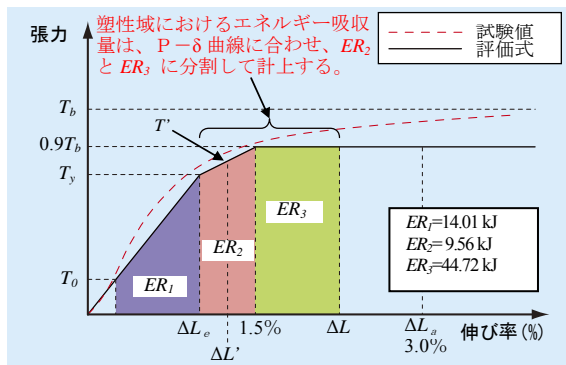


図-11 ワイヤロープの吸収エネルギー

(2) ワイヤロープ吸収エネルギーの評価

ガイドライン(案)¹⁾の評価式、実測した発生張力および伸び量の比較を行った(図-12)。実線は実験の際に計測した発生張力および伸び量をプロットしている。

実験による値(●, ▲)は直線の傾きが大きいいため、衝突エネルギーに対してワイヤロープの吸収エネルギーが小さいことが確認できた。

設計では、ワイヤロープは1本で木材の衝突エネルギーを100%吸収する。今回の実験では、ワイヤロープ周辺の鋼管杭や間隔保持材等へ木材の衝突エネルギーが吸収されたため、ワイヤロープの吸収エネルギーが小さい評価になったと考えられる。

なお、評価式は静的な作用を前提に導き出された式であり、直線の傾きは弾性係数 E_w である。本実験では、動的作用の影響でワイヤロープの弾性係数 E_w が評価式より大きくなっていると考えられる。したがって、ワイヤロープに対する動的作用実験を今後行い、動的弾性係数 E_w を推定する方が望ましい。

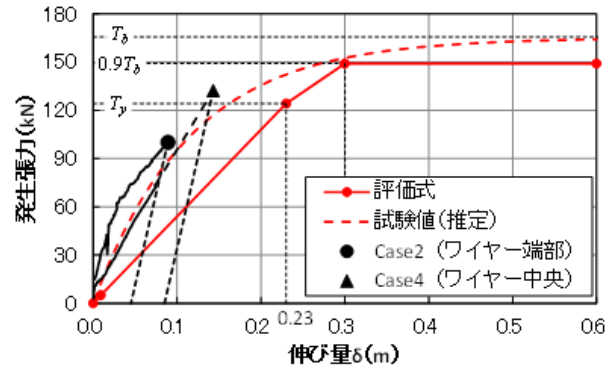


図-12 評価式と実測値の比較

4. おわりに

本実験では津波漂流物対策施設の現地実証実験を通じ、津波漂流物対策施設設計ガイドライン(案)に示されている設計手法の妥当性及び以下の課題を確認した。

(今後の課題)

- Ellinas式での K 値は、鉄球-鋼管杭の衝突試験により推定された値であり、杭基礎構造の鋼管杭に木材が衝突する場合には K 値の差異が生じることが確認できた。したがって、支柱や衝突物の材質や形状に合致した実験定数 K 値を室内実験により求めていくことが必要である。
- ワイヤロープの弾性係数 E_w は、静的な作用を前提に導き出された式であり、実験時の動的な作用が影響し、弾性係数が大きくなっていると考えられる。ワイヤロープに対する動的作用実験を今後行い、動的弾性係数 E_w を推定する方が望ましい。

最後に、当実験を行うにあたり、港湾空港技術研究所、須崎港埠頭公社や須崎港木材工業団地ほか多くの方々にご指導、ご協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を示します。

参考文献

- 1) 財沿岸技術研究センター、(社)寒地港湾技術研究センター：津波漂流物対策施設設計ガイドライン(案)，2009。
- 2) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp584-648，2007。
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，pp.254-257，2002。
- 4) 星川辰雄，石川信隆，彦坂熙，阿部宗平：局部変形とひずみ速度効果を考慮した鋼管固定はりの衝撃応答変位，土木学会論文集，N0513/I-31，pp.101-115，1995。
4. (1) 地形・構造物情報データベース
- 5) 國松靖，田村節雄，芝清久，小原恒平，金正富雄，田代徹，内山一郎，鈴木雄太：須崎港における津波漂流物対策施設の防護性能に関する現地実証実験，土木学会論文集 B3 (海洋開発) 投稿中