ペルプレン緩衝工に働く波力について

三田 重雄*・庄司 邦昭*
大和俊一郎**・橋本 一明*

Wave Force Acting on the Pelprene Protective Device

Shigeo MITA, Kuniaki SHOJI, Shunichirou YAMATO
and Kazuaki HASHIMOTO

Abstract

Recently large bridges have been constructed in navigable waters congested by ships, so that ship collision with bridge piers is on the increase. To decrease the accidents various kinds of protective system are planned. The pelprene protective devices is developed for one of these protection systems. The shape of the cross section is honeycomb which is made from thermoplastic polyester elastomers named Pelprene. Usually honeycomb structure have been used for the bumper of the cars and have seldom been used for the offshore structure.

In this paper the authors made a study of the wave forces acting on the protective devices by model experiments to decide how to install them around the bridge pier.

The following results are obtained.

The wave forces acting on the pelprene protective device model are smaller than that of the identically shaped box model.

The horizontal forces: F_x have a maximum value at the region; $\lambda/L=3\sim5$.

The vertical forces: F_z are smaller than horizontal forces in all the region of λ/L and have a flat distribution.

In comparison with a model made from steel, F_x of the pelprene model is larger than that of steel model and F_z is smaller than that of steel model.

1. はじめに

近年、船舶の輻輳する海域に瀬戸大橋に代表されるような巨大な橋梁が建設され、船舶が橋脚に衝突する事故が発生している。このような事故を防ぐための緩衝施設として、橋脚の周囲に鋼製のブロックやゴム製の浮き袋等を取り付け、直接的な衝突を避けて双方の被害を少なくするための緩衝工が実用化されている。こうした中で、材料にゴムとプラスチックの両方の特性を有するTPE（熱可塑性ポリエステルエラストマー）の一種であるペルプレンを用いたペルプレン緩衝工（以下“PEL緩衝工”と表す）が開発され、実用化に向けて色々な実験が行われている⁽¹⁾。この緩衝工は、ハニカム状に成型した部材で作られており、衝突による衝撃は座屈変形で緩和・吸収される。

ハニカム構造は身近なものでは自動車のバンパーにも衝撃吸収材として使われているが、海洋構造物に適用した研究例は見受けられない。本研究は、海洋構造物としてのハニカム状のPEL緩衝工の一研究である。今回、橋脚への取り付け方法を検討するため、東京商船大学・船舶運航性能実験水槽で波力実験を行った。この結果、PEL緩衝工に働く波力の特性がほぼ把握できたので報告する。水槽実験の実施時期は平

* 正 会 員 東京商船大学（〒135 東京都江東区越中島2-1-6）

**学生会員 東京商船大学大学院（〒135 東京都江東区越中島2-1-6）

成6年10月(基礎実験)と7年2月(応用実験), 6月(基礎実験の追加および確認)である。

2. 実験の方法

2.1 供試模型

波力実験に用いたPEL緩衝工模型の成型部材を、図1(a), (b)に示す。(a)は実物大の1.0m四方のもので、ハニカム状の凹凸の数が 7×7 である。また、(b)は凹凸の数が(a)とは異なる 5×5 で、縮尺1/5に作られた0.2m四方のものである。

緩衝工の基本特性を調べる基礎実験に用いた模型は、(a)の部材を前後方向の張り出し長さ(L)×高さ(D)×幅(B)を $1.0 \times 1.0 \times 3.0$ (m)に組み立てた実寸・単体模型(重量330kg)と、(b)の部材を $0.2 \times 0.2 \times 0.6$ (m)に組み立てた縮尺・単体模型(重量2.2kg)、この縮尺・単体模型をL方向またはD方向に2個連結した2L、2D模型、および縮尺・単体模型大の亚克力板製箱形模型である。これらの模型の概略を図2に示す。

想定した実機の特性を調べる応用実験に用いた模型は、(b)の部材で実機寸法の1/5の大きさ(L×D×B= $0.8 \times 0.6 \times 0.72$ (m)、重量42kg)に組み立てたPEL緩衝工実機模型(以下“PEL実機模型”と表す)と、比較のために既に実用化されている多室構造型の鋼製緩衝工をモデル化した縮尺1/5(L×D×B= $0.9 \times 0.6 \times 0.72$ (m)、重量39kg)の鋼製実機模型とである。鋼製実機模型を図3に示すが、重量を減らすため波の当たらない上部を省略し、水面下の高さも約3/4にして波の影響の大きい水面付近をモデル化した。

2.2 実験・計測装置

実験を行った船舶運航性能実験水槽は、有効長さ50×幅10×水深2(m)で(実験時水深1.9m)、フラップ型の造波装置と曳航電車が設置されている。緩衝工模型は波力計測用のロードセルを介し、曳航電車に搭載した上下動装置に図4のように取り付けて水槽のほぼ中央に設置した。また、緩衝工模型の背面に、橋脚を想定した取り外し可能な高さ1mの壁を設置した。写真1に、PEL実機模型での実験状況を示す。

使用したロードセルは3分力ロードセル(日章電機、LMC-3504-5、LMC-3504-50、アンプ:ユニパルス、AM10)で、実寸模型ではX軸とY軸方向の2分力とZ軸周りのモーメントを、実寸模型以外ではロードセルの取付方向を変え、X軸とZ軸方向の2分力とY軸周りのモーメント(計測点が壁面から

ほぼL/2離れているので、ここで計測された値は橋脚取り付け時のモーメントとは異なる)を計測した。また、造波装置で起こした波(入射波)は、模型前方に設置した容量式波高計(計測技研、CH-403)で計測した。これらのデータは、曳航電車上でペンレコーダ(グラフテック、WR-3701)に記録し、解析に供した。

(a)実寸模型

(b)縮尺模型

図1 PEL緩衝工の成型部材

図2 基礎実験用PEL緩衝工模型

図3 鋼製実機模型の形状

図4 緩衝工模型の設置

2.3 実験条件

今回行った波力実験の実験状態を表1に示す。基礎実験においてはPEL緩衝工の特性を多方面から把握する目的で、緩衝工模型を単体で置いた状態(“壁無し”と表す)と、橋脚を想定した壁を設けた状態(“壁有り”と表す)の実験とを行った。また、応用実験においてはすべて壁有りとし、鋼製緩衝工と比較した。使用した波は、波長0.7~11m、波高12~90mmの規則波で、主に幅方向の正面から当てた。なお、実機模型と2D模型については、喫水を変化させた。

計測した入射波と波力は、ペンレコーダの記録波形からpeak to peakの値を読みとり、次式により無次元化して実験結果を表した。

張り出し方向の力： F_x

$$C_x = F_x / (\rho \cdot g \cdot d \cdot B \cdot H_w)$$

幅方向の力： F_y

$$C_y = F_y / (\rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot H_w)$$

上下方向の力： F_z

$$C_z = F_z / (\rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot H_w)$$

Y軸回りのモーメント： M_y $CM_y = M_y / (\rho \cdot g \cdot L^2 \cdot B \cdot H_w)$

Z軸回りのモーメント： M_z $CM_z = M_z / (\rho \cdot g \cdot L^2 \cdot B \cdot H_w)$

写真1 PEL実機模型の実験状況

表1 実験状態一覧表

実験名	模型名	材質, 形状, 縮尺等	組合せ名称	寸法 (L×D×B(m))	壁の有無
基礎実験	実寸模型	PEL製 2Q型 S=1/1	単体模型	1.0×1.0×3.0	有り、無し
	縮尺模型	PEL製 4AR型 S=1/5	単体模型	0.2×0.2×0.6	有り、無し
			2L模型	0.4×0.2×0.6	無し
			2D模型	0.2×0.4×0.6	無し
応用実験	箱形模型	アクリル板製	単体模型	0.2×0.2×0.5	有り
	実機模型	PEL製 4AR型 S=1/5	PEL実機模型	0.8×0.6×0.72	有り
		鋼製 多室型 S=1/5	鋼製実機模型	0.9×0.6×0.72	有り

図5 実寸・単体模型に働く波力

ここに、 ρ :流体の密度、 g :重力加速度、 L :緩衝工の張り出し長さ (m)、 B :緩衝工の幅 (m)、 d :緩衝工の喫水 (m)、 Hw :波高 (m) である。また、波長 λ (m) は、張り出し長さ L で割った値 λ/L を用いて表した。

3. 実験の結果および考察

3.1 基礎実験の結果

基礎実験の結果を、図5～10に示す。

図5は、実寸・単体模型の壁無しと壁有りの状態における、波高30、60mm時の波力を示す。図によると、どの力の成分も、壁有りは壁無しよりも大きな値になっている。また、壁有りの場合、 C_x は $\lambda/L=3$ のところで最大値をとっていて、壁無しの2倍になっている。 C_x は波高の大きさによる変化がなく、波力は波高に比例して大きくなっている。この実験状態は橋脚に取り付けられた緩衝工の正面から波を受ける場合に相当しており、 C_y は C_x よりも十分小さいことを示している。図6は、縮尺・単体模型の、壁無しと壁有りの状態における波高12、30mm時の波力を示す。 C_x は実寸・単体模型の結果とほぼ同様で、 $\lambda/L=4$ 付近で最大となり、 $\lambda/L=15$ 付近からは壁無しと壁有りの差がなくなっている。 C_z も全体的に壁有りの方が大きい、最大でも0.2程度であって C_x よりも小さい。 CM_y は、 C_x と変化の傾向がよく一致している。これは、 My を模型上面の中心で計測しているので、主に F_x が作用しているものと思われる。したがって、緩衝工を橋脚に固定する場合には、固定中心がずれた分 F_z による転倒モーメントが加わることに注意する必要がある。また、壁有りで C_x 、 CM_y は、波高が大きいほど幾分大きくなっている。図7は、 C_x を壁無しと壁有りについて、実寸模型と縮尺模型を比較して寸法影響を表したものである。前述のとおり全体的な傾向は

図6 縮尺・単体模型に働く波力

図7 実寸と縮尺模型の波力の比較

図8 箱形模型との波力の比較

図10 波力に対する喫水の影響

図9 波力に対する波向きの影響

図11 実機模型の記録波形の例

(a) PEL緩衝工 $\lambda=9\text{m}$ $H_w=73\text{mm}$ (b) 鋼製緩衝工 $\lambda=11\text{m}$ $H_w=90\text{mm}$

一致しているが、いずれも縮尺模型の方が多少大きくなっている。この理由として、図1に示したように凹凸の構成が異なること、 d/L の値が少し違うこと等が考えられる。

図8は、壁有りの状態で、箱形模型と縮尺・単体模型に働く波力を比較したものである。図において、 C_x は変化の傾向は一致しているが、最大値が箱形模型では1に近くなっている。また C_z も、箱形は波長の増加とともに増加し、1に近づいている。この図からハニカム状の部材からなるPEL緩衝工は、同規模の平板で構成された箱形模型よりも、受ける波力が小さいことがわかる。

図12 PEL緩衝工模型に働く波力

図9は、壁無し状態で緩衝工に対する波向が変化した場合について示したものである。45度の方向から波を受けた場合、正面から波を受けた場合に対し、張り出し方向の力の係数 C_x と上下方向の力の係数 C_z は幾分、減少することがわかる。図10は、壁無し状態で、縮尺・単体模型と2L模型、および喫水 d を変化させた2D模型の波力を、 d/L をパラメータとして示したものである。 C_x は $\lambda/L=4$ 付近でいずれも最大値をとる。この値は d/L が小さいほど大きくなる傾向を示しており、水面付近で波力の大きいことがわかる。 C_z については d/L による変化は小さい。

3.2 応用実験の結果

応用実験での記録波形の例を図11に、結果を図12~14に示す。

図12は、PEL実機模型の喫水0.4m、波高20~90mmにおける波力を示す。図によると、波高35mmでは、 C_x は $\lambda/L=4$ 付近で最大値1をとるが、波高の大きさによって係数 C_x の違いもあらわれている。これは図6に示した壁有りの傾向と一致している。一方 C_z は、 $\lambda/L=6$ 付近で最大値0.2をとっている。図13は、鋼製緩衝工模型の喫水0.4m、波高35~90mmにおける波力を示す。波高35mmにおいては、 C_x は $\lambda/L=3$ 付近で最大値0.3をとり、PEL緩衝工よりも小さい。

また、 C_z は $\lambda/L=6$ 付近で最大値1となり、 C_x とは逆にPEL緩衝工よりも大きく、緩やかな減少を示し、 $\lambda/L=12$ においては0.6位の値をとっている。多室構造になっている鋼製緩衝工では、図11の波力の記録例（ローパスフィルタ $f_c=10\text{Hz}$ ）にも見られるように、 F_x 、 F_z とも衝撃波状の鋭い上がりを示し、+側と-側で大きさが数10%異なるものもあった。PEL緩衝工ではこのような衝撃波形は見られなかった。この様子も、波高の大きい数点について0 to $\pm$ peakの値を読みとり、▲、▼記号で図12、13に示した。

図14は、PEL緩衝工模型と鋼製緩衝工模型の波高35mmにおける喫水と波力の関係を示したものである。 C_x の値は、PEL緩衝工では $\lambda/L=4\sim7$ 付近で喫水 d が小さいほど大きくなっており、基礎実験で調べたのと同様 d/L によって変化している。一方、鋼製緩衝工は、実験の範囲内において喫水が変わると係数 C_x 、

図13 鋼製緩衝工模型に働く波力

図14 実機模型による波力の比較

C_z の両方の値が変化することを示している。これは、図3に示したように、鋼製緩衝工模型は高さ方向が200mmごとに区切られているので、喫水が変わると水面付近の形状が大幅に変化するためと思われる。

4. まとめ

ハニカム状の部材でできたPEL緩衝工の水槽実験を実施し、いくつかの波力特性がつかめた。主なものは、

- ・ PEL緩衝工は、同規模の平板で構成された箱形よりも、受ける波力が小さい。
 - ・ PEL緩衝工の張り出し方向の力 F_x は λ/L に対して山形の変化を示し、 $\lambda/L=3\sim 5$ 付近で最大となる。上下方向の力 F_z の最大値は、これよりも小さく、緩やかな変化を示す。
 - ・ 喫水変化に対する波力の増加割合は喫水が小さいほど大きく、水面付近の影響が大きい。
 - ・ 鋼製緩衝工と比較すると、 F_x はPEL緩衝工の方が大きく、逆に F_z はPEL緩衝工の方が小さい。
- 等であり、このような特性を考慮した取り付け方を行う必要がある。

波力に対する実機性能を評価するに当たっては、まだ十分なデータが揃ったとは言えない。大波高の実験や、複数連なって設置されたときの相互干渉の問題等が考えられる。模型の縮尺比をもっと上げて小さくすることにより、実験も容易になり、実験項目の多様化も図れるので、今後の課題とする。

最後に、本研究の実施にあたり多大なご指導を頂いている東京商船大学商船学部武井幸雄講師、並びに多大なご協力を頂いている東洋紡績㈱に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 庄司・有田：船舶の衝突に対するペルプレン緩衝工の特性に関する研究，テクノ・オーシャン'94，国際シンポジウム PROCEEDINGS VOLUME II, pp.577-581, 1994.10.

質 疑 応 答

大津皓平(東京商船大学)：x方向とz方向で波力が、PELと鋼製とは異なった傾向がでていますが、どちらの波力が小さい方が緩衝工としては良いのでしょうか。

三田重雄：取付部の強度から見ると、z方向の波力が小さい方が良いといえます。すなわち、緩衝工の水面より上の部分は橋脚に容易に固定できますので、固定部に働く波力のモーメントは、喫水に比べて張り出し長さの方が大きく、レバーが長い分z方向の波力影響が大きくなるからです。