

半円筒状透過壁による衝撃碎波圧低減メカニズムについて

Shock wave pressure on a caisson with semi-circular hollow projections

多田二三男¹・藤田篤²・木村晃³

Fumio Tada, Atusi Fujita and Akira Kimura

¹正会員 工博 大豊建設株式会社 土木本部 (〒104-8289 東京都中央区新川1-24-4)

²正会員 工修 大豊建設株式会社

³正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科

This study focuses on the shock wave pressures on a wave dissipating caisson with semi-circular hollow projections in front of the wall, both theoretically and experimentally. Through a series of experiments in shallow and deep sea wave conditions, the model of the nonporous semi-circular wall reduces the shock pressure by 20~30% compared with the ordinary caisson of vertical wall and porous type reduces more. Especially in shallow sea wave conditions, the least shock pressure are obtained when the opening ratio is 30%, the value of the shock pressure is approximately 45% of the same on the vertical wall. A theoretical model of the shock pressure proposed for the porous semi-circular wall is verified through the experiments.

Key Words : Shock wave pressure, caisson with semi-circular hollow projections

1. はじめに

波力を低減したり反射波による波高の増大や攪乱を抑える構造物の一つに、前面に透過壁と遊水室を有する消波ケーソンがある。著者らは、前面の透過壁が半円筒形状である新しいタイプの消波ケーソン(図-1)を研究対象とし、衝撃碎波圧低減特性と反射波制御特性に関して理論・実験の両面より検討してきた。これまでに衝撃碎波圧低減特性に関しては、このケーソンの構造的な特徴である前面の半円筒形状と透過構造(スリット壁)との相乗効果により低減することを実験で確認している(多田ら¹⁾)。理論検討では、半円筒形状による衝撃碎波圧低減メカニズムを Karman の付加質量理論によって説明し、さらに不透過半円筒に発生する衝撃力を算定するモデルとして Wagner 型モデルの数学的特異点を解消した楕円モデルを提案した(木村ら²⁾)。しかし、透過構造(スリット壁)による衝撃碎波圧低減メカニズムに関しては、多田ら¹⁾の論文においても湧き出し分布法を用いた数値シミュレーションによる定性的な傾向を把握するにとどまっていた。本研究では、半円筒透過壁通過流体の運動量が背後のケーソン表面に達する伝達過程を考慮した運動量解析を行い、スリット開口率とスリット壁及びケーソン表面に作用する合力との関係を明らかにした。

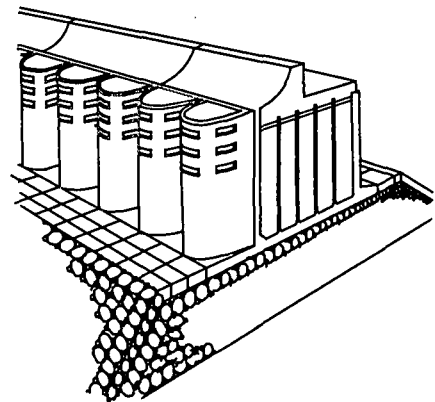


図-1 半円筒消波ケーソン

2. 衝撃碎波圧測定実験

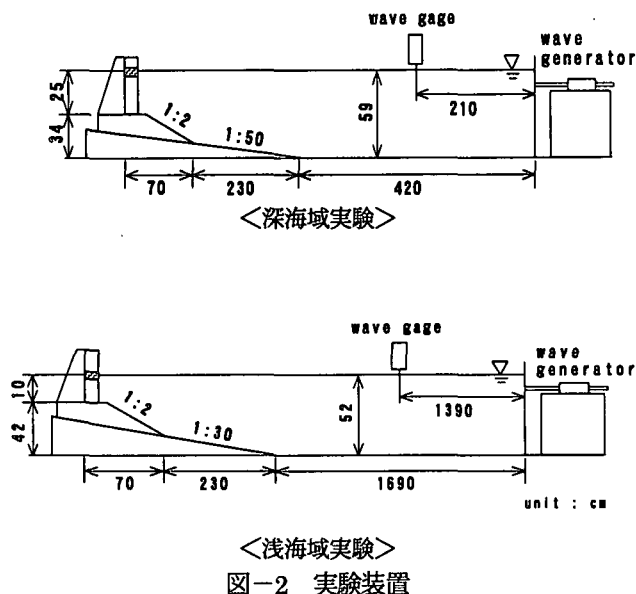
(1) 実験装置

実験は長さ 29m, 幅 0.5m, 高さ 0.75m の二次元水槽の一部を用いておこなった(図-2)。設置水深 20m を想定した 1/80 モデルの実験(以下深海域実験と呼ぶ)では、図-2 上に示すごとく造波板から 4.2m の位置より勾配 1/50 のスロープを設置し、その上に法面勾配 1/2 の鋼製マウンドを置き、アクリル製のケーソン模型を設置した。

ケーソン模型

波高計

造波装置



また、ケーソンの沖側 5.8m には容量式波高計を設置し、沖波波高を測定した。波高計設置部の水深は 58.5cm であり、ケーソン設置位置の水深は 25 cm である。一方、設置水深 8m を想定した実験（以下浅海域実験と呼ぶ）では、図-2 下に示すごとく造波板から 16.9m の位置より勾配 1/30 のスロープを設置し、その上に法面勾配 1/2 の鋼製マウンドを置き、ケーソン模型を設置した。また、波高計はケーソンの沖側 6.0m に設置し、波高計設置部の水深は 52 cm であり、ケーソン設置位置の水深は 10 cm である。実験に使用した半円筒透過壁ケーソンの模型を、図-3 に示す。スリット開口率（スリット開口面積／半円筒表面積）は 45%、30%、15% の 3 種類とし、比較のために、スリット開口部のない半円筒不透過ケーソン、および半円筒のない通常の直立壁ケーソンの計 5 タイプを用意した。模型には、静水面を中心とした 5cm 幅の波力を測定する波力測定装置を取り付けた。この波力測定装置は歪みゲージを使用して、測定部を支える板バネに生じる歪みを測定することにより、水平方向の波力を算定する方式のものである。なお、測定系の固有振動成分は谷本ら³⁾の方法で取り除いた。

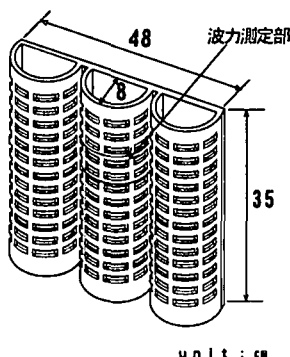


図-3 半円筒透過壁ケーソン模型

(2) 実験結果

実験では、周期・波高を変化させた試行錯誤法により、ケーソンの手前で碎波状態が発生する条件を探した。結果的に衝撃波圧が生じたのは、深海域実験においては、周期 1.3s、波高 27cm（規則波）の場合であった。この条件において崩れ波型の碎波が発生し、波面前面に発生する Surface-roller がケーソンと衝突することによって衝撃的な波圧が発生した。浅海域実験においては周期 1.2s、波高 24cm（規則波）の条件で、ほぼ鉛直に切り立った波前面がケーソンに衝突して大きな衝撃波圧が発生した。

5 種類のケーソン模型に各 10 回ずつ碎波を作用させ、図-3 の波力測定部（静水面を中心とする上下方向 5cm、左右方向 16cm、投影面積 80cm²）に作用した水平方向波力の時間変化を測定した。測定例を図-4 に示す。また、この波力変化のピーク値（衝撃碎波力）を、ケーソンのタイプ別に整理したものが図-5 である。●が浅海域 ◆が深海域実験値である。比較のために直立壁の場合の結果を開口率 100% の縦軸上に、半円筒不透過壁の結果を開口率 0% 上にプロットした。図中白ぬきは、各タイプの波力ピーク値の平均値である。図からわかるように、浅海域の衝撃力は深海域の 1.5 から 2.7 倍であった。また、スリットによる波圧低減効果は、浅海域において顕著であり、スリット開口率 30% のタイプでは直立壁に比してピーク値が約 55% 低減した。また、半円筒の形状効果により、深海域実験の場合には作用波力のピーク値が直立ケーソンのピーク値に比して約 20% 低減し、浅海域では約 40% 低減した。この深海域と浅海域の両実験により、半円筒ケーソンは半円筒の形状による作用およびスリット透過壁とその背面の遊水室による作用の相乗効果により衝撃波力を大幅に低減できることと、この効果は波力が強いほど大きくなることが明らかになった。

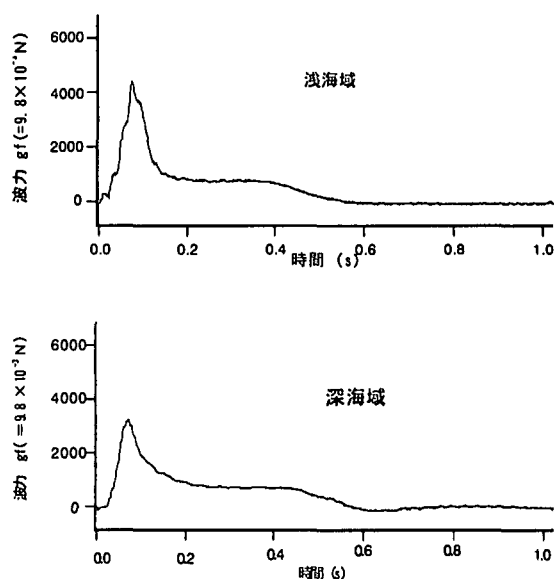


図-4 波力の時間変化の測定例（半円筒スリット 45%）

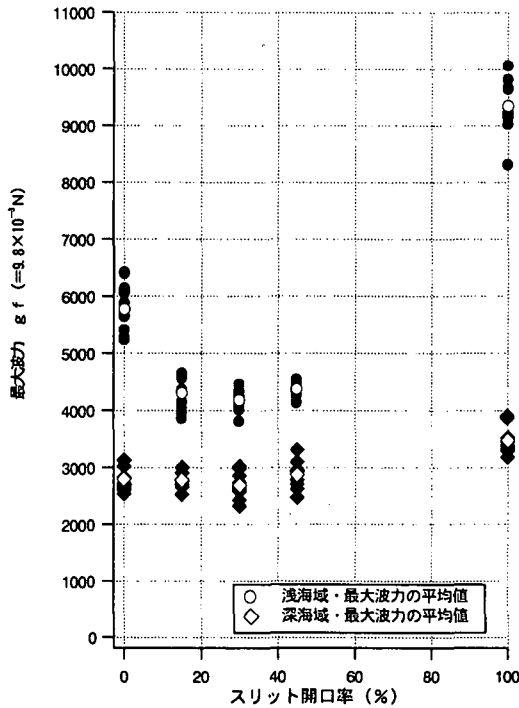


図-5 形状別最大波力

3. 運動量の伝達過程を考慮した解析モデル

浅海域の実験で得られた波力の時間波形には、ピーク付近で双峰型になっているものがいくつか見いだされた(たとえば図-4上)。ここでは、運動量解析に基づき、前面のスリット半円筒と背面のケーソン直立壁に発生する波力の時間差を考慮したモデルによってこの現象を説明するとともに、衝撃波圧の低減効果を評価する。

(1) 浅海域におけるモデル

浅海域実験における波力のピーク発生後の時間変化を、図-6のように直線で近似すると、衝撃力成分はほぼ三角形で近似できる。実験データについて、この衝撃力成分の力積(図-6の三角形部分の面積)をケーソンのタイプ別に示したものが図-7である。多少のばらつきはあるが、力積の平均値には大きな差がない。このことから、半円筒前面に波力を発生させる運動量と、スリットを抜けてケーソン表面に波力を発生させる運動量の和は一定であり、運動量保存則が成立していることがわかる。したがって、波圧は半円筒前面とケーソン表面の両方で発生しており、それぞれの発生時間がずれることにより、両者の合力のピーク値が変化するものと考えられる。

図-8は、浅海域実験における半円筒部とケーソン表面に発生する衝撃波力の時間変化を模式的に示したものである。図の上部左側が不透過半円筒の場合、右側が直立壁の場合に発生する波力、下図がスリット半円筒と背面の直立壁に発生する波力を合成した時間変化図である。下図の細実線が半円筒前面に発生する波力、細破線がスリットを抜けた流体がケーソン表面に発生する波力、太

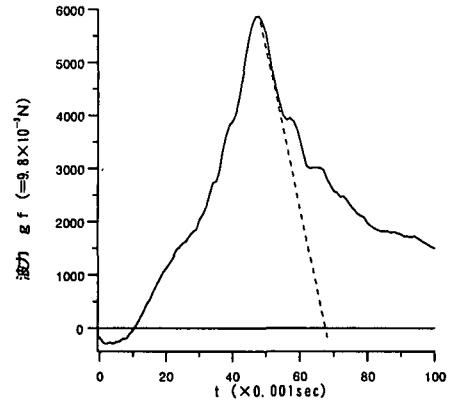


図-6 波圧時間波形における衝撃力成分の近似

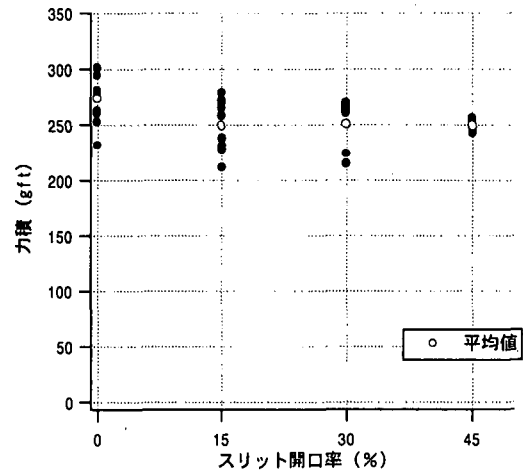


図-7 ケーソンの形状別力積の比較

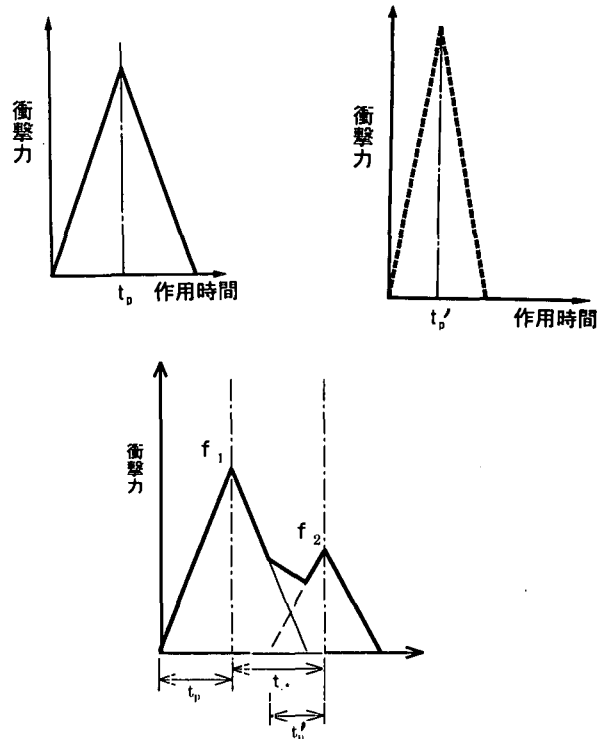


図-8 浅海域における衝撃波力の模式図

実線がこれらの合力を表している。いずれも実測値をもとに二等辺三角形で近似した。ここで、半円筒に対して直角に一樣な速度 U の流体が衝突している状況を考える。簡単のために半円筒を幅 $2R$ の有孔平板で近似すると、単位時間内に幅 $2R$ の範囲に流入する運動量は $2\rho U^2 R$ である。いま一樣流体場が $t=0$ で半円筒部に衝突した時、衝突の瞬間にスリット部を通過する流体の平均流速を u とすれば、孔を通過する運動量は $2\rho u^2 R \nu t_p$ となる。この ν はスリットの開口率、 t_p は半円筒に作用する波圧がピークに達するまでの時間（継続時間の $1/2$ ）である。衝撃力の発生は極めて短時間で起こるので、スリットの近傍の流速場は変化しないと考え（ $u=U$ ）と、 t_p の間にスリットを抜けて前方に輸送される運動量は $2\rho U^2 R \nu t_p$ となる。両者の差 $2\rho U^2 R(1-\nu)t_p$ が半円筒部に作用する衝撃力を生む。図-8 のモデル化を行った場合、スリット半円筒と直立壁との波力を合成した波形が双峰型のピークを持つのは、二つの衝撃波力のピーク出現時間間隔(t_*)が、継続時間の短い直立壁の作用時間の $1/2(t_p'$ とする)以上離れている場合に限られる。その場合に2つのピーク値は、図-8 下図に示すそれぞれの波力モデルのピーク値 f_1 、 f_2 に等しい(半円筒のピーク値を f_1 、直立壁のを f_2 とする)。波力変化の開始から終了までの積分値すなわち、力積は前面で $t_p \times f_1$ 、背面の直立壁で $t_p \times f_2$ となる。半円筒部は、運動量の時間変化が力に変換される過程で緩和機能を持つ。緩和される割合を λ とすれば、先に計算した運動量の値を用いて、

$$\begin{aligned} f_1 &= 2\rho U^2 R(1-\nu)\lambda \\ f_2 &= 2\rho U^2 R\nu \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ここに、 λ は半円筒部（不透過）の衝撃力の減少係数である。 $2\rho U^2 R\lambda = c_1$ とすれば、

$$\begin{aligned} f_1 &= c_1(1-\nu) \\ f_2 &= c_1\nu/\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

となる。図-5の実験値を用いると $\lambda \approx 0.61$ となる。図-9は、 $c_1=3.95$ として、スリット開口率毎の $\max\{f_1, f_2\}$ を実線で示したものである。 $\max\{f_1, f_2\}$ は双峰型波力のピークを表しており、この最小値は $\nu = \lambda/(1+\lambda) = 0.38$ で発生する。図からもわかるように、モデル（実線）はデータの平均的な傾向をよく説明している。

(2) 深海域におけるモデル

深海域においても、現象としては浅海域と同様に半円筒筒透過壁とケーソン表面直立壁で2度衝撃力が生じているものと推定される。しかし、明確な双峰型のピークを示すケースが実験値に見られないのは、二つの衝撃力のピーク出現時間間隔(t_*)が浅海域の場合に比べて短いためと考えられる。

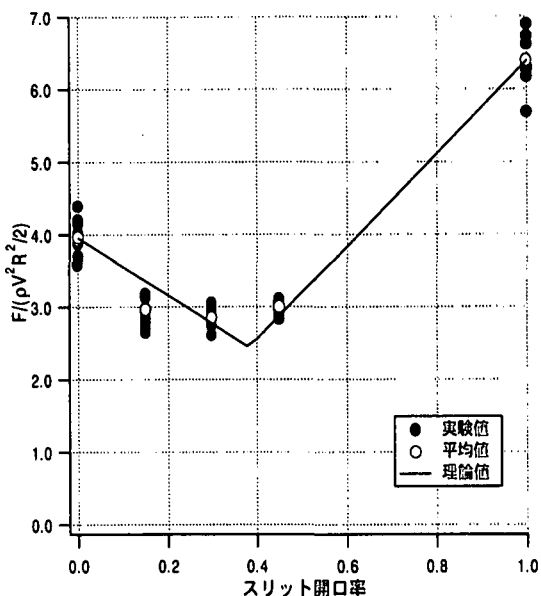


図-9 浅海域における衝撃波力の実験値と理論値

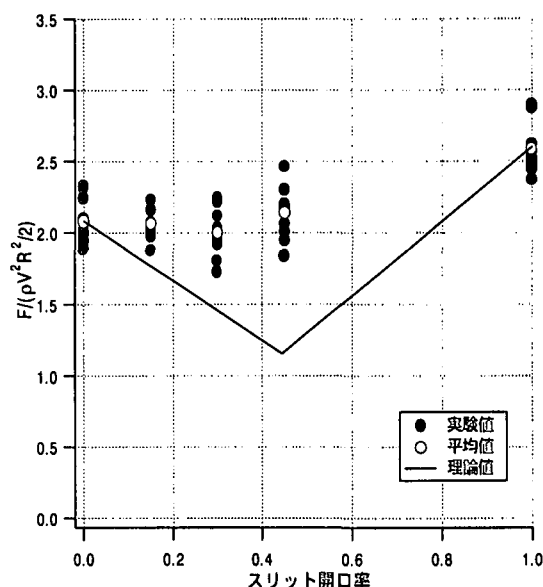


図-10 深海域における実験値と浅海域モデル理論値

しかし、あえて浅海の場合と同じ解析を行うと、以下のような結果が得られた。ここでは衝撃波力の発生機構、波力の継続時間等は浅海域と同じであると考え、図-10は深海域実験の平均値を用いて、式(2)の $\lambda=0.81$ 、 $c_1=2.08$ としたモデル（実線）と実験値との比較を行ったもので、図からわかるように対応は良くない。このように、半円筒前面と背面の直立壁での波力ピークの出現時間間隔(t_*)が、浅海の場合のように直立壁における継続時間の半分以上離れているとする双峰型波力モデルでは、深海域実験のデータの傾向を説明することが出来ない。

そこで、深海域においては図-11 に示すような、二つの波力ピークの時間間隔 t_* が直立壁における継続時間の半分(t_p)より短いとするモデルを考える。半円筒を前と同様に有孔平板で近似する。流速を U とすれば、半円筒の幅 $2R$ 全体に時間 t_p の間に流入する流体の運動量は、浅海の場合と同様に $2\rho U^2 R t_p \mu$ となる。深海域での衝撃力は、前面部の空気を含むローラーの衝突により発生することは前に説明した。 μ は空気を除く流体実質部分の割合である。スリットの孔の面積比率を ν とすれば、空隙を通過して t_p 間に輸送される運動量は $2\rho U^2 R \nu t_p \mu$ となる。 $2\rho U^2 R t_p \mu$ からこれを差し引いた値 $2\rho U^2 R t_p \mu (1-\nu)$ が半円筒部に衝撃力を生ずる運動量となる。半円筒前面と背面のケーソンでの衝撃力は、浅海域と同様に三角形でモデル化する。それぞれの継続時間は浅海域と同様に t_p , t_p とする。半円筒前面で発生する衝撃力のピーク値を f_1 、ケーソンに作用する衝撃力のピーク値を f_2 とすると、次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} f_1 &= 2\rho U^2 R \mu (1-\nu) \lambda \\ f_2 &= 2\rho U^2 R \mu \nu \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 λ は半円筒部（不透過）の衝撃力の減少係数である。 $2\rho U^2 R \mu \nu = c_2$ とすれば、

$$\begin{aligned} f_1 &= c_2 (1-\nu) \\ f_2 &= c_2 \nu / \lambda \end{aligned} \quad (4)$$

となり、図-5 の実験値を用いると $\lambda=0.81$, $c_1=2.08$ となる。

ここまでは、浅海域のモデルと同じであるが、 f_1 と f_2 の出現時間間隔 t_* が図-11 に示すように t_p より短い場合、両者の和は f_1 と f_2 の間で直線的に変化する。両者の合力の最大値 F は次式で表される。

$$\begin{aligned} F &= \max \left\{ C_2 (1-\nu) + \frac{(t_p' - t')}{t_p} C_2 \frac{\nu}{\lambda}, C_2 \frac{\nu}{\lambda} + \frac{(t_p - t')}{t_p} C_2 (1-\nu) \right\} \\ &= \max \left\{ C_2 (1-\nu) + \frac{(\lambda t_p - t')}{\lambda t_p} C_2 \frac{\nu}{\lambda}, C_2 \frac{\nu}{\lambda} + \frac{(t_p - t')}{t_p} C_2 (1-\nu) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

t_* は実測できないので、ここでは t_*/t_p を 0.1 刻みで 0.3 まで計算した。実験値とモデル（破線）を比較した結果を示したものが図-12 である。図から分かるように、 $t_*=0.2t_p$ の場合に両者の対応が最も良い。なお、 t_*/t_p に関わりなく F の最小値は $\nu = \lambda^2/(1+\lambda^2) = 0.396$ で現れる。

浅海においては $t_* > t_p'$ 、深海では $t_*=0.2t_p$ となる理由は明かでないが、遊水部内の水の存在が関係するものと考えられる。すなわち、浅海の場合、碎波の前面の傾斜は非常に大きい。したがって、流体が衝突した時点では遊水部内の水位は低く、スリットから遊水部に吹き出した水は僅かの間空中を飛び、その後上昇してきた水に

衝突して衝撃力が発生する。一方、深海では碎波前面の傾斜は小さく、スリットから吹き出した水が遊水部内で上昇してきた水に衝突することによって衝撃力が発生する。この遊水部内の水位の差が t_* の差となるものと推定した。

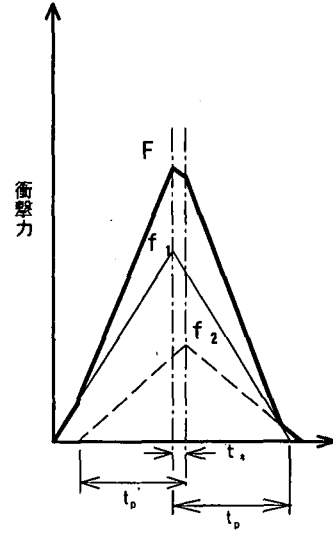


図-11 深海域における衝撃波圧の模式図

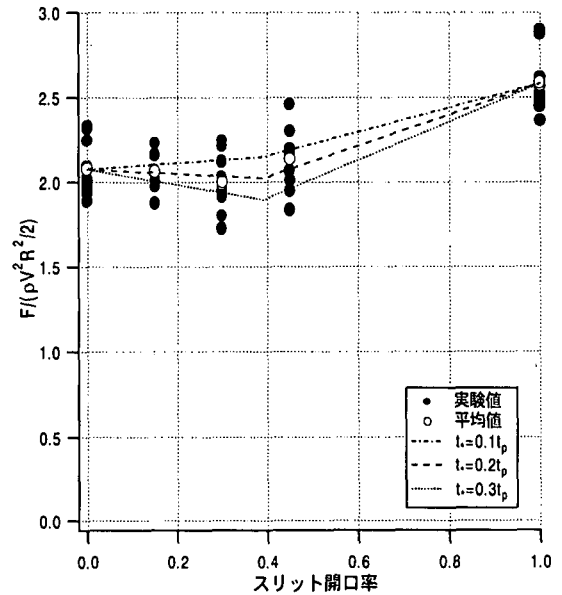


図-12 深海域における衝撃波圧の実験値と理論値

4. 結語

本研究では、半円筒スリットケーソンの衝撃碎波圧低減特性を、定量的に把握するための水理実験および理論研究を行った。ケーソンの設置水深を変えて前面形状の異なる二種類の碎波を発生させた水理実験では、半円筒

消波ケーソンに作用する衝撃波圧が、通常の直立壁ケーソンと比してどの程度低減しているのかを定量的に把握することができた。また、理論検討では、スリット壁通過後の流体が背後のケーソン表面に達する伝達過程を考慮した運動量解析により、スリット開口率とケーソンに作用する衝撃波圧との関係を明らかにすることもできた。本研究で得られた主な結果は、次の通りである。

①半円筒の形状効果により、衝撃波圧のピーク値は、通常の直立壁ケーソンと比べ、20～40%低減する。低減率の違いは作用波力の違いにより異なり、浅海域において切り立った波前面が構造物に衝突し大きな衝撃波圧が発生した場合に、約40%の低減効果を確認した。設置水深が深くなるにつれ衝撃波圧は小さく、低減率も小さくなる。

②スリット透過壁および遊水室による衝撃波圧低減効果は、作用する衝撃圧が大きくなるほど効果を発揮する。最も低減効果が高かったのは、浅海域実験におけるスリット開口率30%の半円筒スリットケーソンであり、直立壁の場合に比して約55%波力ピーク値が低減した。このように、半円筒スリットケーソンにおいては、前面の半円筒形状による効果、およびスリット透過壁とその背面の遊水室による効果の相乗効果により衝撃波圧を低減させることが確認できた。

③運動量解析において、波圧は半円筒前面とケーソン表

面の両方で発生しており、両者の運動量は保存されるが発生時間がずれることにより、構造物に作用する波圧合力のピーク値が低くなることが分かった。切り立った波面を持つ碎波が作用する浅海域においては、2つの部分での波圧の発生時間差が大きく、合成した波圧波形が双峰型のピークを持つ。また碎波前面の傾斜が小さく、波面前面に発生する Surface-roller の衝突により衝撃波圧が発生する深海域においては、発生時間差が小さく、合成した波圧波形は単一のピークとなる。本研究の解析においては、発生時間差を浅海域では直立壁の衝撃圧作用時間の1/2以上、深海域では直立壁の衝撃圧作用時間の1/10にしたモデルが実験値とほぼ一致した。そしてこのモデルによれば、衝撃圧を最小にする最適なスリット開口率は38～40%である。

参考文献

- 1) 多田二三男・松見吉晴・藤田篤：半円筒消波ケーソンの衝撃碎波圧低減効果について、海洋開発論文集 Vol.14, pp.357-362, 1998.
- 2) 木村晃・多田二三男・松見吉晴：大きな水深に設置された構造物に作用する碎波衝撃圧について、海岸工学論文集 第44巻, pp.781-785, 1997.
- 3) 谷本勝利・高橋重雄・吉本靖俊：衝撃応答波形からの外力推定法について、港湾技研資料 No.474, pp.24, 1983.