

斜め入射波による防波堤の滑動実験について

奥村 研一*・西田 芳浩**

1. はじめに

防波堤等の設計に用いられる波圧式は、直角入射の場合が基本になっており、斜め入射の波に対しては、例えば広井式では $\cos^2 \beta$ (β は入射角) を直角入射の場合の波力に乗じる等の波力の補正を行っている。

現実の設計にあたっては、必ずしも直角入射の場合ばかりとは限らず、斜め入射の場合もよくあり、波向が波力に与える影響を知ることは港湾構造物の設計にとって重要なことであると考えられる。

以上のような点から、平面水槽を用いて防波堤の滑動実験を行い、この結果により従来から用いられてきた波圧式(広井式あるいはサンフルー+部分碎波圧式、以下従来式という)と合田により提案された式(以下合田式という)が斜め入射波による波力をどのように表現しているかを比較した。

なお、当所において実施した実験は大部分が重複波領域に属するものであり、これを補完する意味で、運輸省第一港湾建設局において行われた碎波領域での同種の実験結果を同様の視点に立って整理解析した。

2. 重複波領域の実験について

2.1 実験方法及び条件

(1) 実験条件

実験は入射角の大きな第三港湾建設局管内の混成防波堤をモデルに取りあげた。その断面形状を 図-1 に示す。

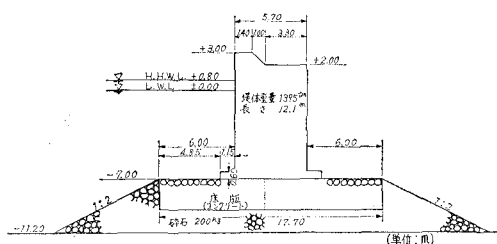


図-1 混成堤断面図(現地)

模型縮尺は水槽の水深、造波能力、波高計の性能等を考慮して 1/40 とし、フルードの歪なし相似則に従って模型の諸元を決定した。

模型ケーソンはモルタル製で、図-2 に示す配置で実験を行った。また、波向の変化は、模型堤体を移動させることによって与えた。

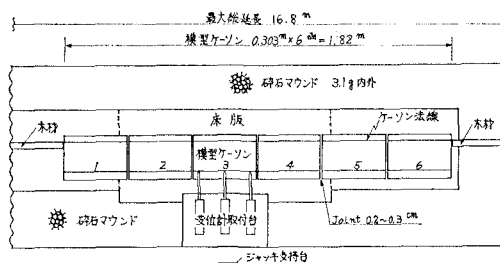


図-2 模型平面図

水槽や模型堤体の周囲には、開口部からの回折波、造波板からの再反射、隅角部の影響が少なくなるように、サンフレックス製の消波工を設置した。

なお、以下の説明においては、原則として現地量に換算して表現する。

(2) 測定項目及び測定方法

モルタル製床版と模型ケーソンとの摩擦係数の測定には油圧ジャッキとブルーピングリングを組合せて使用した。油圧ジャッキで徐々に力を加え、リングの針が急減する直前の値を読み取って、ケーソンが滑り始めようとする時の摩擦力を得た。これをケーソンの有効重量で除して摩擦係数とした。

波高の測定には、容量式波高計を用い、増幅器内蔵の電磁オシログラフに記録した。

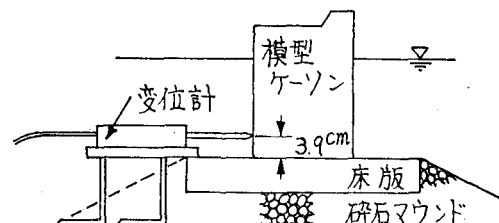


図-3 滑動量測定

* 正会員 沖縄総合事務局開発建設部港湾計画課建設専門官

** 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所係員

ケーソン滑動量の測定には変位計3台と増幅器内蔵のペンオシログラフを使用した(図-3参照)。記録は連続的に行ったが、造波機を作用させた後、波高がほぼ一定になった後の10波が作用したときの滑動量の累積値を読み取った。

(3) 実験ケース

実験は規則波を用いて行った。周期 $T=8, 10$ 秒, 波向 $\beta=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ とし, その組合せ 8 ケースを基本としたが, それ以外に周期の影響を考察するために, 直角入射 ($\beta=0^\circ$) の場合については, 周期 $T=6, 12$ 秒の2ケースを加えて計 10 ケースとした。これらを表-1に示す。

表-1 実験ケース(重複波領域)

波 向 β	周 期 T (秒)			
0°	6	8	10	12
20°		8	10	
40°		8	10	
60°		8	10	

実験は各々のケースについて波高を段階的に高めながら, ケーソンが滑動する波高を求めた。

2.2 実験結果

(1) 摩擦係数

摩擦係数の測定結果は $0.65 \sim 0.73$ の範囲にあり, その平均値は 0.69 であった。以下の結果の整理においては, この値を用いることにする。

(2) 波 高

実験に先だち, まず造波板に平行な測線及び垂直な測線で波高を測定した。その結果, 平行な測線での波高分布は両側壁付近を除いてほぼ一定であった。また, 垂直な測線での波高変化は, 水底勾配が0ないし微小であるため極く小さかった。以上の結果と測定の便宜を考慮して, 実験波高を堤体設置位置より $3\text{m}, 5\text{m}$ 沖合の2点で測定し, その平均値をもって堤体設置位置での通過波高とした。

(3) ケーソン滑動量

各々の実験ケースについて, 3台の変位計でケーソンの滑動量を測定した。観察によれば, ケーソンの滑動形態は一樣ではなく, 回転を伴うこともあり, そのため滑動量測定ケーソン両端の変位計の読みには, ばらつきがみられた。そこでケーソン中央部の滑動量をケーソン滑動量として考えることにした。

(4) 滑動限界波高

a. 滑動限界波高について

現在, 滑動限界波高 H_0 の定義については, 確立された考え方があるとは言えない。合田は波圧式の検討⁹⁾において, 実験上残留変位が 0.5mm 認められた状態を滑動限界とみなしている。滑動限界とは, 本来ならば滑動

量 $\delta=0$ の状態を言うのであろうが, データのばらつき, 繰り返し回数の問題や工学的な見地からすれば, ある滑動量をもって滑動限界とすることは, 必ずしも妥当性を欠いているとは言えないと考えられる。

以上のような点を鑑み, 本実験では, 滑動量 $\delta=0.5\text{mm}$ (現地量 2cm) ををもって滑動限界とした。

b. 滑動限界波高とその時の有義波高

滑動限界波高は各々の実験ケースについて, 実験から得た波高と滑動量の関係を図示して, $\delta=0.5\text{mm}$ となる波高を推定により求めた(図-4参照)。

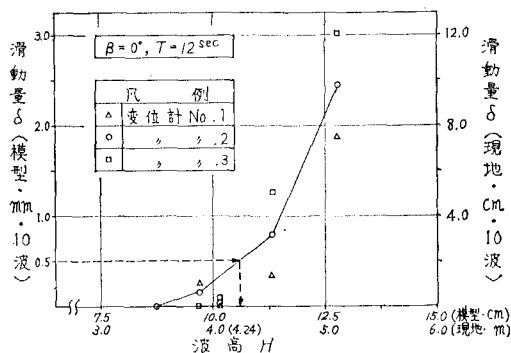


図-4 波高と滑動量の関係(一例)

ところで, 波力の算出に用いる設計波高 H_D は, 従来式では有義波高 $H_{1/3}$ を用いるのに対して, 合田式では最大波高 H_{max} を用いる。

今回, 何ケースかの実験を通して滑動限界波高 H_0 が求められたわけであるが, 合田式については, H_{max} がほぼ H_0 と考えられるので, 波力算出にあたっては, H_0 をそのまま H_D として用いた。しかしながら, 従来式については, H_0 を $H_{1/3}$ に変換する必要がある。以下にその方法を示す。

まず, あらかじめ $H_{1/3}$ を種々与えておいて, 合田の碎波変形理論⁹⁾を用いてそれに対応する H_{max} を求める。この H_{max} を実験から得た H_0 と考えて, そのときの $H_{1/3}$ の値を逆に求めるという試行による手法をとった。

表-2 滑動限界波高及びその時の有義波高

波 向 β	周 期 T (sec)	H_0 ($\delta=0.5\text{mm}$) (m)	$H_{1/3}$ (m)
0°	6.0	4.64	2.58
	8.0	4.45	2.48
	10.0	4.20	2.33
	12.0	4.24	2.36
20°	8.0	4.21	2.35
	10.0	4.70	2.64
40°	8.0	4.95	2.76
	10.0	5.06	2.93
60°	8.0	5.05	2.82
	10.0	8.05	4.49

以上のようにして求めた各実験ケースの H_0 及びこれに対応する $H_{1/3}$ を表-2 に示す。

2.3 考 察

それぞれのケースについて、表-2 に示す波高を従来式、合田式に代入して、滑動限界時の波力を求めた。このようにして得た波力を以下、 P_0 (あるいは、計算値と呼ぶ) で表わす。

ところで、実験による滑動限界時の波力は、摩擦力とつりあっていると考え、次式で求めることができる。

$$P_E = \mu(W_{00} - U) \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し、 W_{00} は静水中での浮力を差し引いた堤体重量、 U は揚圧力、 μ は摩擦係数である。

本実験対象の堤体は天端高が低く越波するため、従来式では揚圧力 $U=0$ として、堤体全体に浮力を作用させて実験時の波力を求めることができる。合田式の場合には揚圧力が未知数であるため、谷本⁹⁾ と同じく合田式による波圧分布を仮定して、

$$P_E = \frac{\mu W_{00}}{1 + \mu U_0 / P_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

により実験時の波力を求めることにした。

但し、 U_0/P_0 は合田式による揚圧力と水平力の比である。

このように実験により求めた波力を以下、 P_E (あるいは実験値と呼ぶ) で表わす。

波圧式が実験的に得られた波力をどのように表現するかについては、 P_0 と P_E を比較することによって検討できる。すなわち、実験結果を説明する波圧式としては、 P_E/P_0 が 1 に近い程、実験の波力を的確に表わす波圧式であるということが出来る。図-5 に、 P_E/P_0 を縦軸に、波向 β を横軸にとって示した。

この図からは、 $T=10$ 秒で $\beta=60^\circ$ を除いて、全ての実験ケースについて合田式の方が従来式に比べて 1 に近

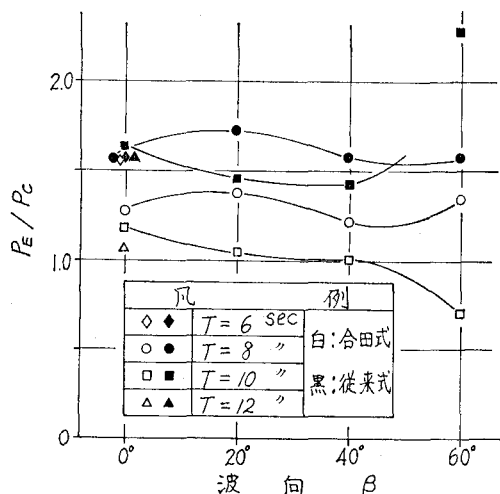


図-5 実験値 P_E と計算値 P_0 の比 (重複波領域)

い値を示している。特に $\beta=0^\circ$ において、 $T=10, 12$ 秒では 1 にかなり近い値となっている。従って、本実験結果より波圧式としては合田式の方が従来式よりも優れているということができよう。

なお、 $T=10$ 秒、 $\beta=60^\circ$ の場合は沿波碎波となり、他のケースに比べて実験結果の信頼性について問題を含んでいるので、以下の検討においても一応除外して考えることにする。

次に波向の影響をそれぞれの式がいかに表現しているかについて考察する。これは、図-5 において波向が変わっても、 P_E/P_0 の値が一樣であれば各式の斜め入射波に対する波力補正 (以下、波向による補正と呼ぶ) は妥当であって、実験をうまく説明しているということが出来る。波向を変えて実験したケースは、 $T=8, 10$ 秒の場合であるが、 P_E/P_0 の値の波向による変動は概ね 2 割弱であり、また、各周期における両式の傾向はよく類似している。以上の点と実験の精度を考えると、両式の波向による補正については特に優劣を論ずることはできず、かつ、ほぼ妥当な補正を行っていると考えられる。但し、今回の実験条件の範囲では、従来式は全てサンフルー+部分碎波圧式が適用されており、波向の影響が相対的に小さい点もこの結果に関連しているものと思われる。

また、従来式及び合田式について直角入射 ($\beta=0^\circ$) の場合の平均波圧係数 ($\bar{p}/w_0 H_D$) を基準に波向によって平均波圧係数がどのように変化するかを比をとってプロットしたのが、図-6(a), (b) である。

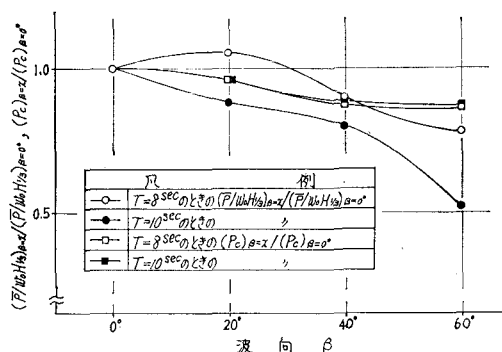


図-6(a) 従来式の波向による波力の変化 (重複波領域)

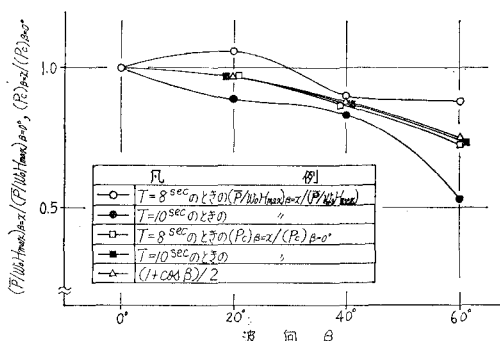


図-6(b) 合田式の波向による波力の変化 (重複波領域)

同図には $\beta=0^\circ$ のときの設計波高(滑動限界波高)を用いて、波圧式の中で波向による補正を施した結果を $\beta=0^\circ$ のときの波力を基準にして、比を求め併記した。

従来式、合田式ともに、実験的に得られた波圧係数の波向による変化(○, ●)と波圧式の中で波向による補正を行った値の変化(□, ■)との差は大きくなく、先にも述べたように、両式の波向による補正は妥当なものといえる。なお、特に合田式の場合、 $T=10$ 秒のケースは実験値とよく合っている。また、図-6(b)には、合田式による波向補正項の一部である $(1+\cos\beta)/2$ をプロットした(△)。△と□あるいは■との差は α_2 に乗ずる波向補正項 $\cos^2\beta$ に起因するものである。

次に順序が前後するが、再び図-5に戻って、 $\beta=0^\circ$ の時の周期と波圧式の関係について考えることにする。合田式では、 P_E/P_0 の値がいずれの周期についても従来式に比べて1.0に近いものの周期の変化によって P_E/P_0 の値が大きくばらついている。一方、従来式では、ばらつきは極く小さくなっている。これは合田式が実験値以上に周期の変化に対して敏感であって周期の波力に及ぼす影響がやや大きく算定されていることを示している。

3. 碎波領域の実験⁴⁾について

2.に述べた当所における実験は重複波領域に属するものである。一方、碎波領域における同種の実験(断面は若干異なっている)が運輸省第一港湾建設局で行われており、先の結果を補完し、比較対照する意味で同様の方法により整理し、考察した。実験の概要及び結果は次のとおりである。

模型縮尺は 1/70, 規則波を用いたフルードの歪なし模型による実験であり、摩擦係数は 0.62 である。

なお、この実験では滑動限界状態を見出すために、波高を一定にして模型堤体の重量を変え、滑動限界重量を求める方法に拠っている点が重複波領域の実験と異なっている。実験ケースは表-3に示すとおりである。

表-3 実験ケース(碎波領域)

波 向 β	周 期 T (秒)			
0°	13*			15
30°	12	13*	14	15
45°		13*		15

註) *印は波高水深比を変えて4ケースの実験を行っている。

重複波領域における実験と同様に実験値 P_E と計算値 P_0 の比及び実験値から平均波圧係数を算出し、これらと波向との関係を求め、それらの結果をそれぞれ図-7, 8(a), (b)に示した。

図-7 から、 P_E/P_0 の値は従来式に比べて合田式の方が1に近く、波力をよりの確に算定していることがわかる。

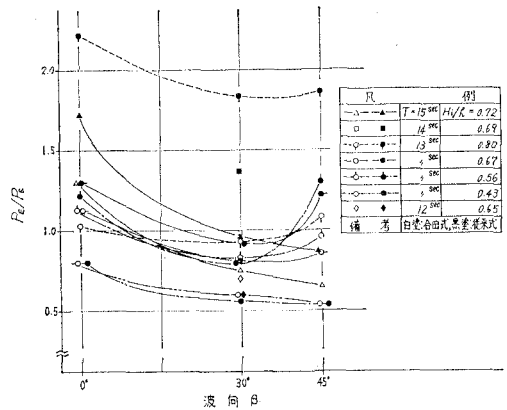


図-7 実験値 P_E と計算値 P_0 の比(碎波領域)

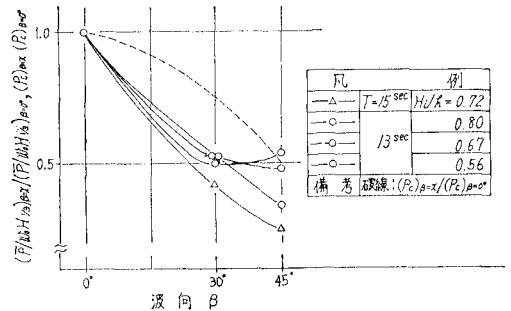


図-8(a) 従来式の波向による波力の変化(碎波領域)

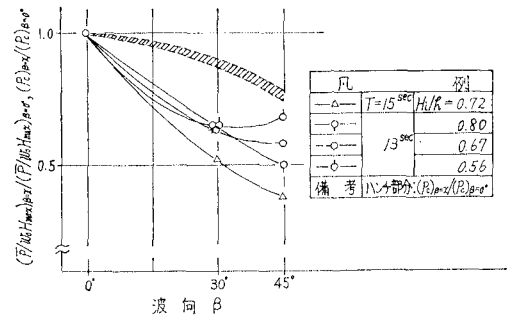


図-8(b) 合田式の波向による波力の変化(碎波領域)

また、波向による補正については、両式の優劣を論ぜられないが、 $\beta=30^\circ$ の場合、実験値に対して計算値が大きくなっているケースが多く、両式とも波力を大きめに算出する傾向があることがうかがわれる。図-8では、この傾向がより明確に表われている。すなわち、全ての実験ケースについて計算から求めた波向による波力の補正は実験値よりも緩やかに変化し、直角入射の場合に比して、低減の割合が小さい。計算値はやや大きめの値を与えることになり、計算式としては安全側に立ったものとなっているといえよう。図-7, 8の結果を勘案すれば、碎波領域の場合も重複波領域における実験の結果と同様、両式の波向による補正はほぼ類似していると

いってよいであろう。

図-7 に戻って、 $\beta=30^\circ$ の場合における周期の影響について比較することにする。

従来式では $P_E/P_o=0.60\sim 1.37$ 、合田式では $P_E/P_o=0.70\sim 0.98$ であり、合田式の方が変動幅が小さく、また 1 に近い。以上の点から、重複波領域の場合とは異なり、今の場合、合田式は周期による波力の変化をうまく捉えていると考えてよいであろう。

4. ま と め

以上、規則波を用いた平面水槽による 2 つの防波堤の滑動実験結果から確認された事項をまとめると次のとおりである。

(1) 実験値 (P_E) と計算値 (P_o) を比較すると、従来式に比べて合田式の方が実験時の波力をよりの確に表現している。

(2) P_E/P_o の値から波向の影響をみると、両式の波向による補正の傾向は類似している。

(3) 重複波領域では、 P_E/P_o の変動幅は各周期について概ね 2 割弱であった。実験の精度を勘案すれば、波圧式における波向による補正としては、ほぼ妥当な値を示している。

(4) 碎波領域では、計算値が実験値より大きく、波

力を大きめに算出する傾向にあるが、これは設計面からみれば、安全側に立ったものといえる。

5. あとがき

平面水槽による 3 次元的な滑動実験は、かなりの時間と労力を必要とし、かつ難しい実験であって、得られたデータはあまり多くはないが、どれも貴重なものである。従来の実験に比べて、小さな滑動量で議論を進めることになったため、精度の点で若干問題のあるデータも見受けられるが、今後も機会があれば、更に詳細に検討を続けて行きたいと考えている。

最後に、本報告のとりまとめに当って、御指導を頂いた運輸省港湾技術研究所、谷本勝利室長に紙面をかりて御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第 12 巻第 3 号 2，pp. 31~70，1973.
- 2) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第 14 巻第 3 号 3，pp. 59~106，1975.
- 3) 谷本勝利：港湾技術研究所講演会講演集 (1)，pp. 1~26，1976.
- 4) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所：“安全港湾対策に関する防波堤の諸問題について (II)”，第 13 回管内工事報告会，pp. 123~146，1975.