

傾斜孔型直立消波堤の上部床版に働く揚圧力と消波効果

国栖 広志*・ 福山 博信**・ 清水 虎重***

1. ま え が き

本研究の目的は直立消波堤の一形式である傾斜孔型直立消波堤^{1),2)}に波が斜から入射する場合の上部床版に働く揚圧力および消波効果の水理模型実験を行ない、その特性を把握することである。実験中スプレー、越波の発生限界についても観察を行ない図にまとめた。また、斜入射に対する消波効果についても検討を行なった。

この種の類似した構造物として従来より栈橋床版に働く揚圧力の研究が、伊藤³⁾、合田⁴⁾、室田⁵⁾、永井⁶⁾、堀川⁷⁾らにより成されており、とりわけ伊藤、永井らは栈橋の前面に有孔板を用いた実験を行ない揚圧力の低減効果のあることが報告されている。また、直立消波堤の床版に働く揚圧力に対してはスリットケーソンに空気圧縮モデルを用いて検討を行なった谷本⁸⁾や床版の浮上り重量と揚圧力について比較検討した尾崎らの研究のほか数例あるのみであり、特に斜入射に対する研究はまだ無い。この種の構造物は透過壁体部の形状が異なると遊水室内の波の挙動や空気とじ込め効果により衝撃圧波形が変形したり、作用時間が長くなるといった性質を有しており、形状によってその特性が異なることから、個々に実験を行ないその特性を把握する必要がある。

そこで、本報告では波の斜入射を主体にクリアランス、周期、波高の違いが床版の揚圧力に対する影響を実験による検討を行なったものである。また、比較のため透過壁体部を除いた横栈橋の構造についても一部実験を行なった。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験に用いた造波水槽は 図-1 に示すように長さ 34 m×幅 5 m×高さ 1.2 m で水路末端片側 12 m に観測用ガラス窓を設けたコンクリート製造波水槽である。

造波機は固定式である。また、駆動装置は AC 200 V、15 kW の電動モーターを用いた油圧サーボ方式で、造波

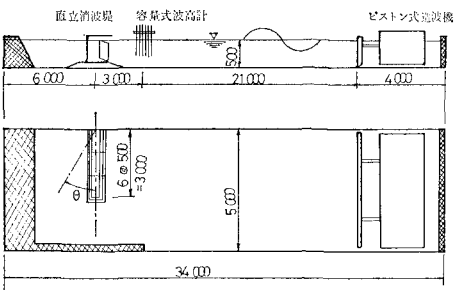


図-1 造波水槽

形式はピストン形である。

造波能力は周期 0.2~4.0 sec, 最大波高 30 cm である。波形は規則波と不規則波の使用が可能であり、今回は規則波で実験を行なった。

2.2 実験波諸元

表-1 は揚圧力、表-2 は消波効果の実験に用いた波の諸元を示す。揚圧力の実験に用いた波の入射角度は堤

表-1 揚圧力の実験波

θ	T (sec)	h_e' (cm)	d (cm)	h_M (cm)	L (cm)	H (cm)
0°	1.20	4.0	36.0	14.0	182.8	5.0
		6.0	34.0	16.0		
		8.0	32.0	18.0		
15°	1.34	4.0	36.0	14.0	241.9	7.5
		6.0	34.0	16.0		10.0
		8.0	32.0	18.0		
30°	1.79	4.0	36.0	14.0	354.3	12.5
		6.0	34.0	16.0		15.0
		8.0	32.0	18.0		
45°	2.24	4.0	36.0	14.0	461.6	17.5
		6.0	34.0	16.0		
		8.0	32.0	18.0		

$h=50.0$ cm 一定

表-2 消波効果の実験波

T (sec)	H (cm)	L (cm)	d (cm)	h_m (cm)	θ
1.39	10.0	226.0	18.5	22.5	0° 10° 20° 30° 40° 50° 60°

$h=41.0$ cm 一定

* 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 水理水工研究室主任研究員
** 五洋建設(株) 技術研究所 水理水工研究室所員
*** 五洋建設(株) 技術研究所 水理水工研究室主席研究員

体法線の直角方向に対して $0^\circ \sim 45^\circ$ の 4 ケースとした。

波の周期は短周期および長周期の特性を検討するため $T=1.20 \sim 2.24$ sec の 4 種類を用い、それぞれの周期に対してケーソン前面での通過波高が 5.0 cm $\sim$ 17.5 cm の 6 種類の波を使用した。

消波効果に用いた波は模型に対して最適な消波効果のある $T=1.39$ sec の波を用いた。入射波高は 10.0 cm 一定で、入射角度を $0^\circ \sim 60^\circ$ まで 10° づつ傾け 7 ケースについて行なった。このときの水深は 41 cm 一定である。

2.3 模型諸元

実験に用いた傾斜孔型直立消波堤および横栈橋の基本形状を図-2 $\sim$ 3 に示す。本実験に用いた模型の有効幅 ($B+D$) および透過壁体幅 (B) はそれぞれ 25.0 cm, 7.5 cm 一定である。斜入射に対する実験は造波機が固定式であるため、模型とマウンドを所定の入射角度に移動して設置して行なった。クリアランス (h_o') はマウンド天端高を調整した。消波効果に用いた模型は揚圧力実験と同じものを使用した。また、斜入射の場合側壁からの再反射を防ぐため水路側壁に消波装置を設置した。

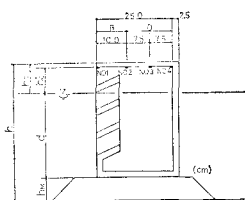


図-2 傾斜孔型直立消波堤模型

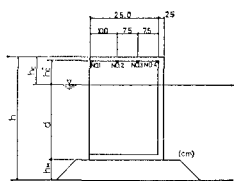


図-3 横栈橋模型

2.4 揚圧力・反射率の測定方法

揚圧力の測定は図-2 $\sim$ 3 に示すように小型波圧計 ($\phi=10$ mm, $P_{\max}=100$ g/cm 2) を 10.0 cm および 7.5 cm の間隔で 4 点に設置し増幅器を介して電磁オシログラフに記録した。また、波高が高くなると波自体が不安定となり易く、揚圧力のピーク値がばらつく恐れがあるので、同一条件で 2 回繰返し行ない波の有効波数中の連続 5 波づつのピーク値の平均をもってその点の揚圧力とした。また、各点のピーク値を総和し奥行幅で除し単位幅当りの平均揚圧力 $\bar{p}$ とした。

反射率はヒーリーの方法を用い、堤体法線と直角方向に容量式波高計を 10 cm ピッチで 6 本設置し、計測台車を移動させて波の腹と節の波高を計測して求めた。

4. 実験結果と考察

3.1 揚圧力の検討

(1) 揚圧力の波圧分布と波形の特徴

図-4 は入射角度が 0° で $h_o'=8.0$ cm, $T=1.20$ sec, 2.24 sec のときの各測点ごとの波圧形状を示したもので

ある。この図から前面の No. 1 の点の揚圧力に比べ奥の No. 4 の方が大きく、しかも揚圧力の発生が早かった。このことは遊水部に流入した水塊は後壁で重複波形になることを意味し、波高の小さい場合には単発型の衝撃力が記録されることから、後に述べる栈橋の揚圧力に対する合田の試論の適用性について暗示している。しかし、波高が大きくなると揚圧力の発生はほとんど同時に、しかもノコギリ形の衝撃波が発生し始める。これは遊水部内にとじ込められた空気が、エアークッション効果による衝力の分散や揚圧力の作用時間が長くなるように作用するためであり、谷本らの行なった研究成果が適用できるものと思われる。また、このような条件では合田の衝撃波力の試論による揚圧力の値は過大に評価する可能性がある。また、本実験に用いた波圧計の固有振動数は 3 kHz であり、ノコギリ形の波形の周波数は 100 Hz 程度であることから、この波形はエアークッション等による揚圧力の分散状況を記録したものと考えられる。

以上の傾向は他の周期についても同様であり、入射角度が変わってもほぼ同様の傾向を示した。また、当然のことではあるが、クリアランス (h_o') が小さくなるに従って波高の小さいときからノコギリ形の波形が発生し、クリアランスと波高の関係が揚圧力に大きく影響していることを示している。

図-5 は横栈橋のときの No. 4 の揚圧力の波形を示した図である。この例から波高が大きくなってもノコギリ形の波圧は見られなかった。これは床版に直接水塊が衝

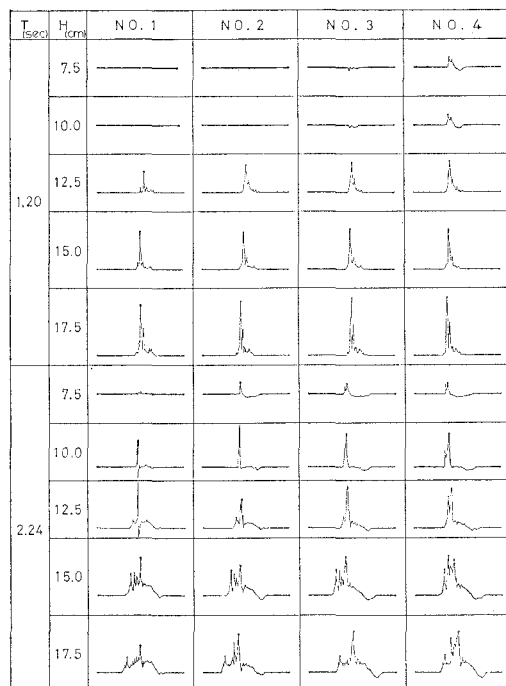


図-4 傾斜孔型直立堤の揚圧力波形

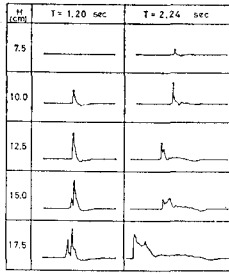


図-5 横棧橋の揚圧力波形

突しているためで、同一条件では直立消波堤に比べて揚圧力の値は大きかった。

(2) 入射角度の影響

入射角度の効果を検討するため図-6の(a)~(c)を示す。この図の横軸は入射角度、縦軸に平均揚圧力を $\omega_0 H$ で無次元

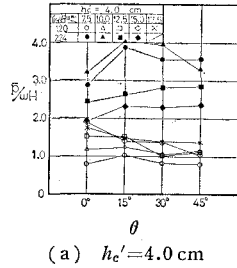
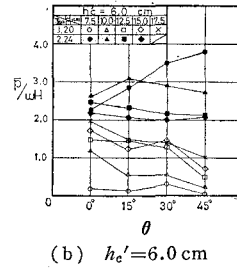
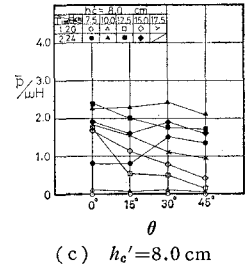
(a) $h_c' = 4.0$ cm(b) $h_c' = 6.0$ cm(c) $h_c' = 8.0$ cm

図-6 入射角度と揚圧力

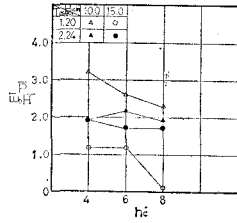


図-7 クリアランスの効果

化した揚圧力係数を用い、 $T=1.20$ sec と 2.24 sec について波高をパラメータに整理したものである。図の(a)~(c)はクリアランスが 4.0 cm, 6.0 cm, 8.0 cm のときの結果である。この図から $T=2.24$ sec で波高、クリアランスが一定のとき入射角度が大きくなるにつれて揚圧力は減少する傾向を示すが、 $T=1.20$ sec のとき多少の変動はあるがほぼ一定の傾向を示した。これは短周期の場合入射角度によって波形が乱され易く不安定であるのに対し、長周期の場合波自身が安定しているため斜入射に対しても揚圧力にあまり影響しないためと考えられる。

(3) クリアランスの効果

クリアランスの効果は、クリアランスの大きさだけでなく、作用力として加わる波高、周期との間に密接な関連がある。そこで、横軸にクリアランス、縦軸に揚圧力係数を取り $T=1.20$ sec と 2.24 sec のとき $H=10.0$ cm, 15.0 cm について整理したのが図-7である。この図は、いずれの周期においても $H=10.0$ cm の場合はクリアランスの増加により揚圧力係数は減少する傾向にあるが、 $H=15.0$ cm の場合はほぼ一定の値を示している。すなわち、クリアランスに比較して波高がある程度より大きい場合、揚圧力係数が一定になる傾向がある。揚圧力係数は前述のとおりであるが、揚圧力の絶対値に対してどうであるか調べるため整理したのが図-8(a), (b)である。この図は横軸に H/h_c' 、縦軸に単位幅当りの平均揚圧力 $\bar{p}$ をとり、各クリアランスに対する周期をパラメータに整理した図である。図-8(a)の短周期の場合、クリアランスが小さいときは H/h_c' の増加につれ徐々に揚圧力が増加する傾向を示すが、クリアランスが大きくなると、その勾配が急になり H/h_c' が同じ

であっても揚圧力が大きくなっている。また、長周期の場合、クリアランスのいかんにかかわらず、揚圧力の増加は H/h_c' の増加に対して急激に大きくなることがわかる。これは短周期の波は波形勾配が急であるため、反射波やエアークッションの影響で波形が乱れ易いこと、長周期の場合は実験に用いた模型が短周期用に製作されているため、遊水部に水塊を受け入れるための十分な容積が無いことが考えられる。

(4) 周期特性

図-9は周期特性の代表例として $\theta=0^\circ$, $h_c'=4.0$ cm, 6.0 cm, 8.0 cm で $H=10.0$ cm, 15.0 cm のときの結果である。この図の横軸は周期で、縦軸は平均揚圧力 $\bar{p}$ である。図から $H=10.0$ cm のとき周期が長くなるにつれて揚圧力は単調に増加する傾向を示し、これより小さい波高でも同様の傾向を示した。この原因はクリアランスの項で述べたように流入水塊の受け入れ能力と長周期の方が単位時間当りのエネルギー輸送量が大ききことに起因するものと思われるが、 1.20 sec と 2.24 sec のエネルギー輸送量の比を計算すると約 1.9 倍程度であるのに対し、実験結果では約 2 倍~ 10 倍の揚圧力が作用しており、明確にはつかめなかった。また、 $H=15.0$ cm

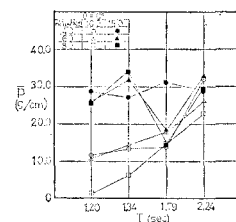
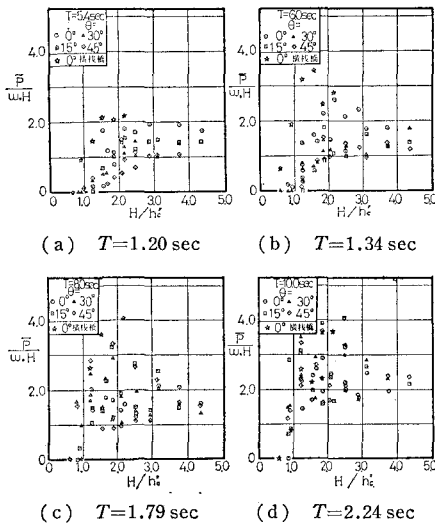


図-9 揚圧力の周期特性

のとき $30 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ 付近でほぼ一定の値をとっている。これは計測した波形を調べてみるとノコギリ形の波形を示していることからエアークッション等の揚圧力のピーク値の分散効果が生じているものと思われる。しかし、一部 $30 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ 以上の揚圧力が作用した例もあった。

(5) 揚圧力強度と H/h_0' の関係

揚圧力が入射波高とクリアランスの関係でどのようになるか整理したのが 図—10 の (a)~(d) である。この図から $T=1.20 \text{ sec}$, 1.34 sec のとき $\bar{p}/\omega_0 H$ は最大 2 倍程度であり、 $T=1.79 \text{ sec}$, 2.24 sec の波については 3~4 倍程度であった。一方、床版の安定性について、衝撃性の圧力は大きくても作用時間が短くなり力積はほぼ一定の値を取り、短時間に作用する衝撃圧のピーク値を床版の浮上げ力として直接用いることはできないとの指摘がある。このような波圧計で測定した揚圧力のピーク値と床版が振動を始める振動限界重量との関係は伊藤、尾崎らの研究から、後者は前者のほぼ $1/5$ 程度であることが報告されている。このことを考慮して今回の実験値から傾斜孔型直立消波堤の振動限界重量を推定すると、短周期の場合で $0.5\omega_0 H$ 、長周期で $1.0\omega_0 H$ 程度であると思われる。



図—10 揚圧力強度との関係

(6) 合田の試論との関係

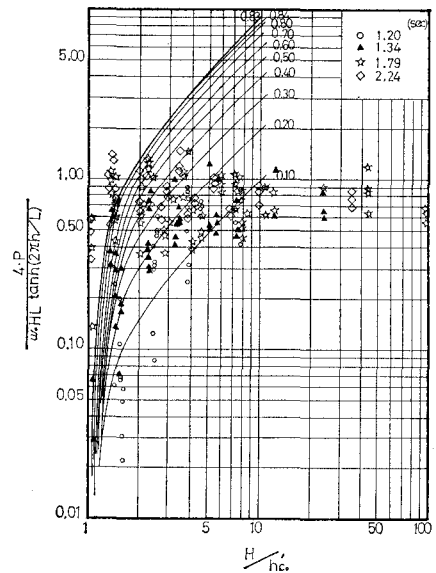
前述したようにクリアランスに比べ波高がある程度より低い場合は、床版に単発型の衝撃的な揚圧力が記録されることから、合田が栈橋の揚圧力を衝撃的に作用する波の運動量の急変による力として導いた式 (1) と今回の実験値との比較を行なった。

$$P = \zeta \cdot \frac{\omega_0}{4} \cdot H \cdot L \cdot B \tanh \frac{2\pi h}{L} \left(\frac{H}{h_{c0}'} - \frac{h_{c0}'}{H} \right)$$

$$h_{c0}' = h_{c0}' - \pi \frac{H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L}$$

P : 全揚圧力 ζ : 補正係数 H : 波高
 L : 波長 B : 幅員 h : 水深
 h_{c0}' : 静水面からの距離

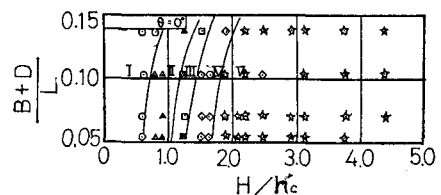
合田は $\zeta=0.84$ 程度の補正係数を用いると栈橋の揚圧力は実験値とかなり適合すると指摘しているが、今回筆者が行なった横栈橋の実験結果からも確認できた。しかし、直立消波透の実験結果をみると 図—11 に示すとおり $\zeta=0.1\sim 0.84$ の間にばらついており、長周期の波ほど大きな値を示した。また、 $H/h_{c0}'=2.0$ 以上では理論曲線から大きく下まわり $2P/\omega_0 HL \tanh(2\pi h/L)$ が 2 以上の値を示さなかった。これは合田が指摘しているように、奥行が深くクリアランスが小さいと完全重複波が十分形成されないことや、部分的なエアークッション効果のためと考えられるが、その他に必要以上の波は反射や越波してゆくために H/h_{c0}' がある値以上のとき揚圧力の強さが飽和状態になるものと考えられる。また、この図から長周期になると透過壁体部の有無にかかわらず栈橋の揚圧力と同程度であることがわかる。



図—11 合田の試論と実験結果の比較

(7) スプレー・越波量の発生限界

実験中目視観測により床版に作用する波の状況および越波状況について縦軸に $(B+D)/L$ 、横軸に H/h_{c0}' をとって整理したのが 図—12 である。波の判定規準として



図—12 スプレー・越波の発生限界

次の5段階に分類した。Ⅰ：揚圧力が作用せず。Ⅱ：床版に静かに当たる。Ⅲ：沖に水塊を放出する。Ⅳ：スプレーが発生する。Ⅴ：床版上に流水（越波）

この図は H/h_0' の大きいほど、また $(B+D)/L$ が小さいほど越波しやすく、他の入射角度のときもほぼ同様の傾向を示した。

3.2 消波効果の検討

斜入射の場合直角入射に比べてどの程度変わるか調べるために $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ の7ケースについて実験を行なった。図-13はこの結果である。この結果から斜入射のときでも十分消波効果のあることがわかった。図中 $\theta=40^\circ$ より大きな入射角になると反射率が小さくなり、消波効果が良くなっているがこれは、堤体との角度が急になるため、堤体前面に沿って波が走るため見かけ上反射率が小さくなった。

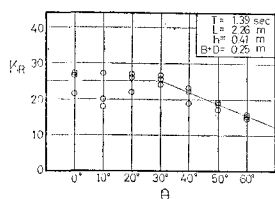


図-13 斜入射の消波効果

4. ま と め

以上の結果をまとめると

4.1 揚 圧 力

- 1) 短周期のとき入射角度が大きくなると揚圧力は減少するが、長周期のとき角度の効果は少ない。
- 2) クリアランスの効果は波高や周期の影響が大であり、クリアランスが一定のとき所定の波高以上になっても揚圧力は増大しない傾向にある。
- 3) 周期特性は短周期に比較して長周期の波の方が同一

波高では大きな力が作用する。

- 4) 直立消波堤に作用する波力は長周期では合田の式の $\zeta=0.84$ 程度であったが、短周期では小さかった。
- 6) スプレー、越波の発生限界は入射角度による差はほとんど見られなかった。

4.2 斜入射の消波効果

波が斜から入射するときでも直角入射で設定した消波効果と同じで十分消波効果のあることがわかった。

この研究にあたって、運輸省港湾技術研究所の合田良実氏および谷本勝利氏の貴重な御助言をいただいた。紙面を借り感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山田貞彦・国栖広志・伊藤雅通：傾斜孔型直立消波堤の実験的研究，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 271～275，1977。
- 2) 山田貞彦・国栖広志・伊藤雅通：傾斜孔型直立消波堤の実験的研究（Ⅱ），第26回海岸工学講演会論文集，pp. 318～322，1979。
- 3) 伊藤喜行・竹田英章：棧橋に作用する波の揚圧力，港湾技術研究所報告，第6巻4号，pp. 37～68，1967。
- 4) 合田良実：衝撃波力に関する試論，第22回土木学会年次学術講演概要，pp. 101-1～101-3。
- 5) 室田 明・古土井光昭：棧橋床版に作用する揚圧力についての実験的研究，第13回海岸工学講演会講演集，pp. 120～125，1966。
- 6) 永井莊七郎・久保 直・時川和夫：棧橋に働く揚圧力に関する研究（その1），第13回海岸工学講演会講演集，pp. 112～119，1966。
- 7) 堀川清司・中尾忠彦・矢島昭弘：棧橋に働く揚圧力に関する実験的研究，第14回海岸工学講演会講演集，pp. 148～153。
- 8) 谷本勝利・高橋重雄・村永 努：直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力——空気圧縮モデルによる検討——，港湾技術研究所報告，第19巻，第1号，pp. 3～31，1980。
- 9) 尾崎 晃・鴻上雄三・中込國喜・荻谷広見・田崎邦男：直立消波堤の波力に対する安定性，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 323～327。
- 10) 時川和夫：スリットケーソンタイプ特殊防波堤の開発，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 328～332，1979。