

水路を遡上する波の減勢工に関する二、三の考察

千 秋 信 一*・藤 本 稔 美**・島 田 真 行***

1. 序

近時大容量の火力・原子力発電所が内湾や外海に面して建設される傾向にともない、大量の復水器冷却水の取放水設備の設計に関して様々な水理学的課題が提起される。良質低温の底層水を取水するための深層取水の方法、復水器で昇温した温水を海域へ放流した場合の水温影響域の推定や再循環対策など、温度密度流に関連した問題が現今焦眉の問題であることは申すまでもないが、外海からの波の作用に対して取、放水構造物を防御する方法もゆるがせにできない問題の一つである。

外海に面して大量の冷却海水をとり入れる取水設備として、東京電力・福島原子力発電所の場合は、総延長2400mの防波堤によって敷地前面の海域をしゃへいし、常時静穏な取水泊地を形成せしめる方法を採用しており、別の原子力地点では、海底取水管によって深層低温水を取り入れると同時に、取水槽におよぶ外海波動の減衰の効果を期待する設計を考えている。内湾に設ける取水口では、自己の温水放流や周辺企業からの排熱によって水温成層の形成が期待できかつ温水の取水口への再循環が予測される場合、深層取水設備としてカーテンウォール式や海底取水管方式が採用されているが、これらの構造物も取水路や取水槽におよぶ波の影響を軽減阻止することに有効であると考えられる。

一方、冷却水の放水口については、外海へ放流する場合、水路の末端を特に拡幅することなく、比較的速い1.5 m/sec～2 m/secの流速で、海面潮位 L.W.L. 以上の敷高からたれ流し式に放流するか、逆に放水口天端標高を海面潮位 L.W.L. 以下として海面下に水中噴流式に放流するのが一般である。この前者の場合、潮差によっては高潮時放水路内へ波が遡上進入してマンホールからの噴水現象を惹起する例もあるが、通例波動の放水槽への伝達は阻止され、循環ポンプの運転に支障をおよぼすことはない。内湾へ放流する場合には、放水口前面の小船舶の航行に支障を与えずかつ流れの移流効果による熱の均一拡散を期待し、さらに深層取水との関連で海域に形成される水温成層の安定を保持するために、放流水を所

定の低流速でしかも均一な分布をもって海域表層へ流出せしめることが必要である。このための放水口構造物としては、放水路の末端を扇状に拡幅し円弧状のもぐりぜきによって放流水の均一化をはかった例や、敷地の制約から横越流型で堤を設けた例があるが、扇状の拡幅放水口では通常進入する波のエネルギーの収斂によって波高が増大し、もぐりぜきの高さによっては放水路を遡上する波が放水路開渠側壁から越波したり、ポンプ運転を阻害したりするおそれがある。

以上のような、波の作用を受ける冷却水取水・放水構造物の水理設計に関連する種々の問題のうち、経験的に処理されているいくつかの事項をふくめて未解決の問題を系統的に解明するために、水理学的な立場からは流れのある水路（開水路および管水路）に進入する波動の特性に着目し、工学的な立場からは波の進入遡上を阻止するための構造物について検討を行ない、水理設計法を提示することを目的として、一連の研究に着手した。

研究の対象としては、

- 1) もぐり固定ぜき
- 2) ブロック積み透過ぜき
- 3) 扇形拡幅水路
- 4) 減勢水槽
- 5) 海底取放水管
- 6) カーテンウォール

等を取り上げ、これらの波の作用下における水理特性と設計資料を順次明らかにしてゆく。

1) のもぐり固定ぜきは、これを扇形拡幅放水口内に円弧状に設置すれば放流水の均一化にきわめて効果的であることはすでに実証されているが、ここでは波の進入遡上に対していかなる特性を有するかを明らかにせんとするものである。2) のブロック積み透過ぜきは、放水口構造物の施工を締切りを行なわずに海中工事で実施しなければならない場合や通水運転中の放水口の改修のための方策として採用するもので、その期待する効果はもぐり固定ぜきと同様である。3) は通常放流水の流速低下策として採用する扇形拡幅部について、進入遡上する波の収斂特性を調べ、もぐり固定ぜきやブロック積み透過ぜきとの併用のもとにその設計指針を求めようとするものである。4) の減勢水槽は、波の進入する水路の一部を拡幅し、あるいは隔壁で水室を形成させることによ

* 正会員 工博 財団法人 電力中央研究所

** 財団法人 電力中央研究所

*** 正会員 工修 財団法人 電力中央研究所

って進入波と反射波の位相を調整し、波高の減衰をはかるものである。この構造物は本来フランスの Chatou 水理研究所の発想にかかり、resonant-basin としてドックの入口などの消波装置として開発されているが、これを冷却水取放水路の設計へ適用する目的で検討するものである。5) の海底取放水管は、外海の圧力波高が管路を通じて取放水槽の水位変動におよぼす影響を、管路特性、水槽の容量との関係の下に明らかにし、取放水構造物を管路として設計する場合の効用とその設計指針を明らかにする。6) のカーテンウォールは、いわゆるカーテンウォール式深層取水設備の場合は、そのカーテン内の水容積が一般に大であるために、カーテン外側の波の作用はカーテンウォールによって十分に除去されることが理論的にも実物についても実証されているが、ここでは水路内に設けたカーテンウォールについて、5) の海底取放水管の限界のケースとしてその波の減勢作用について一考する。

今回はこれら一連の研究計画のうち、主としてもぐり固定ぜきおよびブロック積み透過ぜきについて、これらを進入波の減勢工として設計する場合の資料を与える立場から実施した実験結果について述べる。

2. もぐり固定ぜき

実験には循環流式造波水路を使用した。水路は全長 36 m、幅 0.5 m、高さ 1.0 m、循環流量最大 120 l/sec で、プランジャー型造波機を備えている。この水路の中央に図-1 に示すような形状の台形固定ぜきを設置して現象を 2 次元的に検討した。

実験対象の台形ぜきについて完全越流の状態からもぐり越流の状態までの越流特性をあらかじめ調べた結果は図-2 のとおりである。

この実験は冷却水放水口に台形ぜきを設置して外海か

図-1 実験に用いた台形ぜきと記号説明

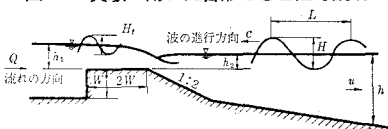
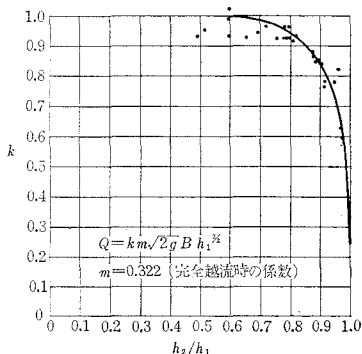


図-2 台形ぜきの越流特性



ら放水口に侵入する波がせきを越流する流れによってどのように変形し遡上するかを調べることを目的としているので、せきの下流側から流れに逆行して波をあて、波の波高、周期、せきの下流側水深、越流量を種々にかえて波の挙動を調べた。実験条件はつぎのとおりである(記号 図-1 参照)。

波 高	0 から碎波波高まで
周 期	1~2.5 sec
波 形 勾 配	$\delta = H/L = 0.001 \sim 0.065$
波のない場合の	
台形ぜき下流側水深	$h = 8 \sim 18$ cm
相 対 水 深	$h/L = 0.032 \sim 0.152$
単位幅当り流量	0~40 l/sec/m
相 対 速 度	$u/c = 0.072 \sim 0.435$

台形ぜきを越流した流れのせき下流側における挙動は、完全越流からもぐり越流の範囲までその様相を異にした局所的な現象であり、これに波の作用が重合するので現象は複雑な種々の様相に分類されることがみとめられる。さらにせきを越えて上流へ遡上する波も、波高の減衰した伝達波の場合もあり、せき直下流で碎波した波の衝撃がせき上流の流れに波動を伝える場合もあることが観測された。しかしここでは減勢工としての特性を調べ設計資料を求めることに視点をしぼり、せき上流側水路内へ遡上する波の波高のみに着目して実験結果を整理し、現象の分類とその詳細な考察については紙面の都合で改めて報告する。

図-3 は台形ぜきを越流する流れを遡上する波の遡上限界を与え図表で、実験結果にもとづき相対速度 u/c および越流特性 h_2/h_1 をパラメーターとして相対水深 h/L と波形勾配 H/L との関係で表わしたものである。各曲線の下側がせきを遡上しない波、各曲線と碎波限界線との間が碎波せずにせきを遡上する波の条件を与える。遡上限界を与える相対水深と波形勾配との間には次式

$$\frac{H}{L} = C \left(\frac{h}{L} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

図-3 台形ぜきを越流する流れを遡上する波の遡上限界

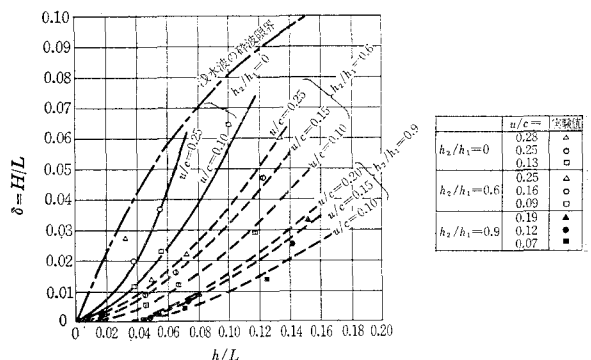


図-4 台形越流ぜきを遡上する波の限界条件式(1)中の係数値 C の値

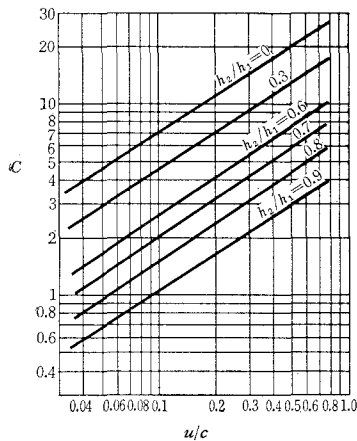
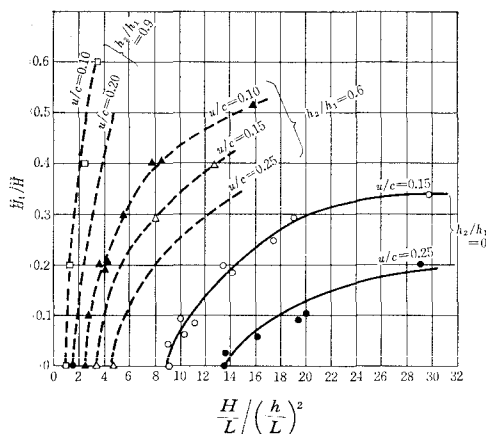


図-5 台形ぜきを越流する流れを遡上する波の波高遞減



の関係が認められるので、この式中の係数 C の値を求めると図-4のごとくなる。図-3中に示した曲線は、図-4の係数値を用いて式(1)を図にえがいたものである。

つぎに図-5は台形ぜきを越流する流れを遡上して、せき上流側の水路へ進入する波の波高 H_t の遞減を与える図表で、実験結果にもつぎ同じく相対速度および越流特性をパラメーターとして、伝達波高 H_t と入射波高 H との比 H_t/H と $(H/L)/(h/L)^2$ との関係で整理したものである。図から明らかなように越流特性が完全越流状態に近いほど遡上する波高の遞減は著しく、もぐり越流状態になるほど水路に侵入する波高は大きくなる。また相対速度が大きいほど、すなわち水路の流量が大であるほど波高の遞減は著しい。

計算例

放水流量: $Q=25 \text{ m}^3/\text{sec}$, 水路幅: $B=6 \text{ m}$,

入射波高: $H=4 \text{ m}$, 周期: $T=10 \text{ sec}$,

海面潮位: $EL.+0.70 \text{ m}$

せき下流側水深:

海底面 ($EL.-3.8 \text{ m}$) 基準 $h=0.7+3.8=4.5 \text{ m}$

せき頂 ($EL.+0.1 \text{ m}$) 基準 $h_2=0.7-0.1=0.6 \text{ m}$

$h_2/h_1 < 0.55$ (完全越流) と仮定して $k=1$ にとり、

$$h_1 = \left(\frac{Q}{km \sqrt{2gB}} \right)^{2/3} = 2.05 \text{ m}$$

$$h_2/h_1 = 0.6/2.05 = 0.3 (< 0.55)$$

周期 $T=10 \text{ sec}$ の波に対する波長, 波速は,

$$L=64.40 \text{ m}, c=6.44 \text{ m/sec}$$

$$\therefore \frac{h}{L} = \frac{4.5}{64.40} = 0.070$$

せき下流側平均流速

$$u = \frac{Q}{Bh} = \frac{25}{6 \times 4.5} = 0.925 \text{ m/sec}$$

$$\frac{u}{c} = \frac{0.925}{6.44} = 0.144$$

図-4より、

$$h_2/h_1=0.3, u/c=0.144 \text{ に対して } C=5.5$$

$$\therefore \text{式(1)より } \frac{H}{L} = C \left(\frac{h}{L} \right)^2 = 5.5(0.070)^2 = 0.027$$

ゆえに遡上限界波高は, $H=0.027 \times 64.40=1.74 \text{ m}$, 設計入射波高は $H=4 \text{ m}$ で限界波高 1.74 m より大であるから波はせき上流側水路へ遡上進入する。

$$\delta = \frac{H}{L} = \frac{4}{64.40} = 0.062$$

$$\therefore \frac{H}{L} \left(\frac{h}{L} \right)^2 = \frac{0.062}{(0.070)^2} = 12.65$$

ゆえに図-5より

$$h_2/h_1=0.3, u/c=0.144$$

に対して内挿により

$$H_t/H = 0.27$$

ゆえに遡上波の波高は $H_t=0.27 \times 4=1.08 \text{ m}$

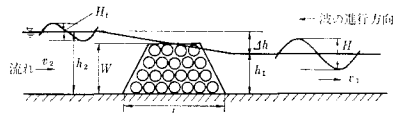
3. ブロック積み透過ぜき

この実験も循環流式造波水路を用い、水路内にブロック積み透過ぜきを設置して現象を2次元的に検討した。実験条件はつぎのとおりである(記号図-6参照)。

波 高	6.5 cm
波 の 周 期	0.72~1.44 sec
波 形 勾 配	$\delta=H/L=0.03\sim0.10$
透過ぜき下流側水深	$h_1=12\sim18 \text{ cm}$
単位幅当り流量	0~30 l/sec/m
透 過 ぜ き	
異形ブロックの種類	テトラポッド
ブロック重量	157 g (8トンブロックの1/36の模型に相当)

積み形式

図-6 ブロック積み透過ぜきの実験における記号説明



標準4層積み上層2列 ($l/W=2.0$),
3列 ($l/W=2.35$) および4列 ($l/W=2.72$)

せき高 $W=16.5\text{ cm}$
せき底幅 $l=33, 38.8, 44.9\text{ cm}$
空げき率 水深16 cmに対して51%

この実験においては、ブロック積み透過ぜきを形成する異形ブロックとして実験の都合上157 gのテトラポッド一種のみを用いたが、重量および種類の異なるブロックで作った透過ぜきについても空げき率はほとんど変わらず、また他の実験資料と比較して損失係数の値も大差ないことが判明しているため、この実験結果を他種のブロック積み透過ぜきに関する設計に適用しても工學上支障はないものと考えられる。

実験結果のうち、第一にブロック積み透過ぜきの流量特性、すなわちせき上下流の水位差 Δh と流量との関係を示したものが図-7である。この図は波の作用のない流れのみの場合と流れに逆行して下流側から進行する波の作用を受ける場合とについて、せき上下流の水位差 Δh が下流水深 h_1 、せき高 W 、せき下流側の流速 v_1 によってどのように変化するかを h_1/W をパラメーターとして、 $\Delta h/h_1$ と $F_{r1}=v_1/\sqrt{gh_1}$ との関係で表わしてある。実験に用いた波形勾配の範囲内では、 $\delta=H/L$ の値の違いは水位差に影響をおよぼさないことが認められたので、波の作用を受ける場合の流量特性の曲線群はそれぞれの l/W に対して一組に統一して表示した。

つぎにブロック積み透過ぜきを透過遡上してせき上流側水路へ進入する波の波高 H_t が、下流水位、せき高、

図-7 ブロック積み透過ぜきの流量特性

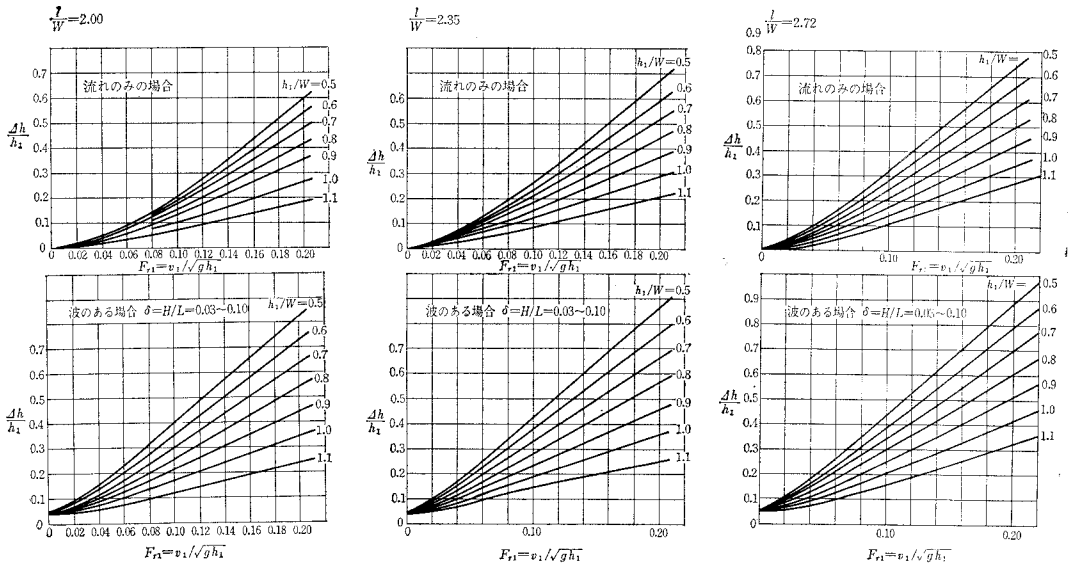
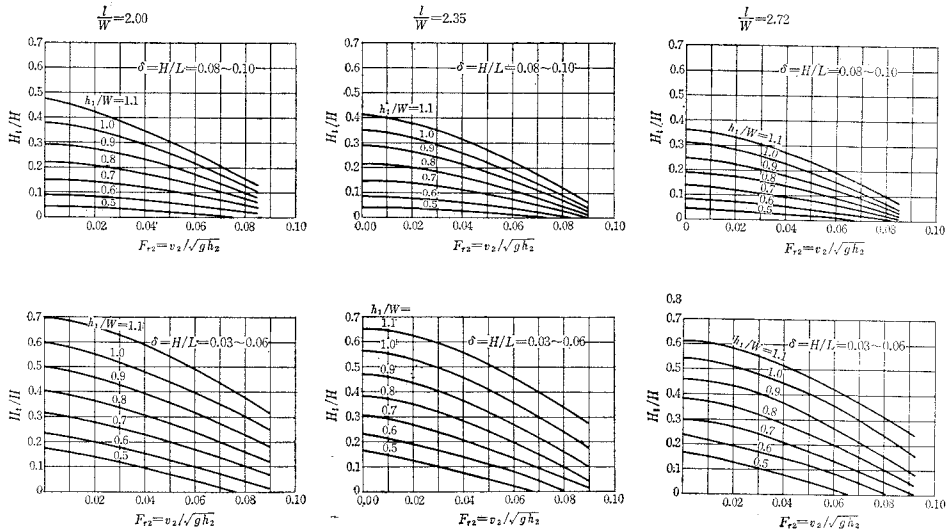


図-8 ブロック積み透過ぜきを遡上する波の波高通減



せき部の流速, 波形勾配によってどのように変化するかを実験結果にもとづいて図表化したものが図-8である。この図は, せきの形状を特性づけるそれぞれの l/W に対して, せき下流側水深 h_1/W をパラメーターとして波高減速率 H_t/H と, せき上流側水路内のフルード数 $F_{r2} = v_2/\sqrt{gh_2}$ との関係で表わしてある。せきを遡上する波の波高減速に対しては波形勾配の影響は顕著にあらわれるので, $\delta = H/L = 0.08 \sim 0.10$ と $\delta = 0.03 \sim 0.06$ の2群に分けた。図から明かなように, 周期の短い波形勾配の大きい波は周期の長い波形勾配の小さい波よりも透過せきによる波高の減速が著しい。また流量が大であるほど波高は減速する。せき長が厚いほど波高が減速することは当然であるが, その効果は顕著でない。いずれにしても, ブロック積み透過せきの場合には, 外海からの波を完全に阻止する効果はもぐり固定せきよりも劣ることが認められる。

計算例

放水流量: $Q = 30 \text{ m}^3/\text{sec}$, 水路幅: $B = 10 \text{ m}$,
 沖波波高: $H_0 = 2.8 \text{ m}$, 周期: $T_0 = 8 \text{ sec}$,
 海面潮位: $\text{EL.} + 2.90 \text{ m}$
 ブロック積み透過せき:

異形ブロック種類 8 トン テトラポッド
 ブロック積み形式 標準積み4層, 上部3列
 ($W = 5.94 \text{ m}$, $l = 13.95 \text{ m}$, $l/W = 2.35$)

せき下流側水深 せき敷 (EL. - 2.5 m) 基準
 $h_1 = 2.9 + 2.5 = 5.4 \text{ m}$

この水深での波形勾配を求めるに,

$$L_0 = 1.56 T_0^2 = 99.8 \text{ m}$$

よって $h_1/L_0 = 5.4/99.8 = 0.054$ より

$$L/L_0 = 0.55, H/H_0 = 1.01$$

$$\therefore L = 55 \text{ m}, H = 2.83 \text{ m}$$

$$\therefore \delta = \frac{H}{L} = \frac{2.83}{55} = 0.051$$

碎波指標より $H_0/L_0 = 0.028$ に対して $h_b/H_0 = 1.40$

$$\therefore \text{碎波水深 } h_b = 1.40 \times 2.8 = 3.92 \text{ m} < h_1 = 5.4 \text{ m}$$

よってせき下流側で碎波しないので, 図-7, 図-8 を適用することができる。

$$F_{r1} = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}} = \frac{30}{10 \times 5.4 \times \sqrt{9.8 \times 5.4}} = 0.076$$

図-7 より $l/W = 2.35$, $h_1/W = 5.4/5.94 = 0.91$ に対して

$$\Delta h/h_1 = 0.18$$

$$\therefore \Delta h = 0.18 \times 5.4 = 0.97 \text{ m}$$

$$h_2 = \Delta h + h_1 = 0.97 + 5.4 = 6.37 \text{ m}$$

$$F_{r2} = \frac{v_2}{\sqrt{gh_2}} = \frac{30}{10 \times 6.37 \times \sqrt{9.8 \times 6.37}} = 0.060$$

図-8 より, $\delta = 0.051$, $l/W = 2.35$, $h_1/W = 0.91$ に対して $H_t/H = 0.27$

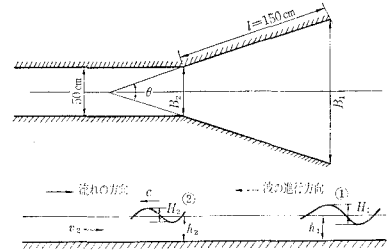
$$\therefore \text{遡上波の波高は } H_t = 0.27 \times 2.83 = 0.764 \text{ m}$$

4. 扇形拡幅水路

この実験には長さ 30 m, 幅 6 m, 深さ 0.6 m の循環水路つき平面造波水槽を用い, 扇形に拡幅する水路に進入する波の波高変化を3次的に検討した。

実験条件はつぎのとおりである (記号, 図-9 参照)。

図-9 扇形拡幅水路の記号説明



波 高	2.7~8.3 cm
周 期	0.83~1.83 sec
波 形 勾 配	$\delta = H_1/L = 0.01 \sim 0.09$
水路内水深	$h_1 = h_2 = 11 \sim 22 \text{ cm}$
単位幅当り流量	0~30 l/sec/m
扇形拡幅区間長と波長との比 l/L	1.0~2.0
拡幅区間の終点と始点の水路幅比 B_1/B_2	1~4
(拡幅中心角 $\theta = 0 \sim 60^\circ$)	

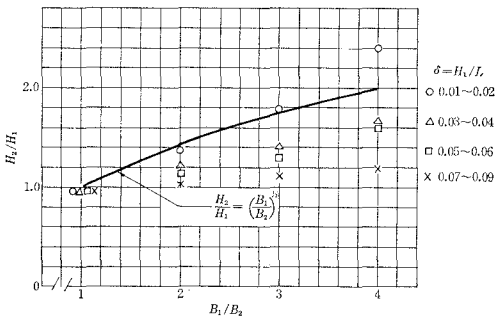
図-10 は流れのない場合, 水路へ入射する波形勾配をパラメーターとして水路拡幅比 B_1/B_2 と波高変化率 H_2/H_1 の関係を示している。図中に記した曲線はエネルギー損失を無視した場合の微小振幅波理論による波高増大率である。波形勾配が小さな波についてはこの曲線でおおむね近似できる。波形勾配が大きくなると増大率が小さくなるが, これは拡幅部の側壁により進入波が反射し水路内への入射エネルギーが減少するためと思われる。つぎに流れのある場合について, 水路内の平均流速と波速の比 v_2/c と波高変化率との関係を水路拡幅比 B_1/B_2 をパラメーターとして波形勾配のグループ別にあらわしたものが図-11 である。波形勾配 $\delta = 0.01 \sim 0.04$ の範囲では $v_2/c = 0.1$ の近くで波高の増大が最大となるが, $\delta = 0.05 \sim 0.09$ では波高の増大も小さく, v_2/c による変化も小さい。一般に流水中を波が遡上する場合, エネルギー伝達速度が減ずるため波高が増大するが, この拡幅水路のように3次的な拡散現象を生じている流れの領域内へ進入遡上する波の変形は複雑であり, ひきつづき水理学的な検討を重ねる所存である。

4. 海底取水水管

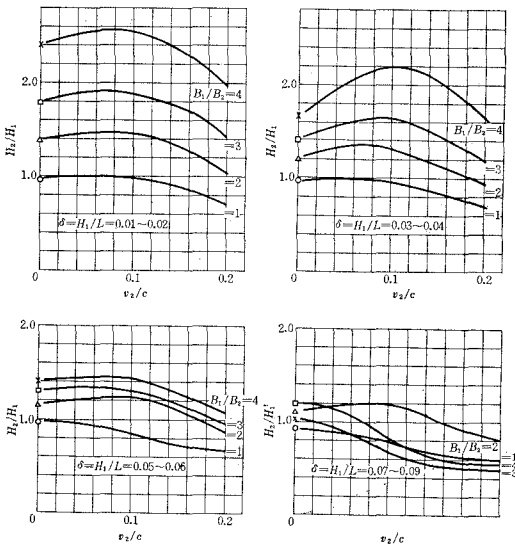
波の作用が海底取水管を通じて取水槽の水面変動にどのような影響をおよぼすかについて一考する (海底放水管の場合も同じ)。

図-12 の記号を参照し, 定常状態時の取水槽内水位

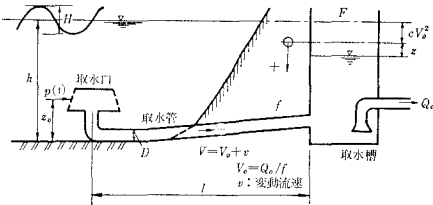
図—10 扇形拡幅水路の波高変化（流れのない場合）



図—11 扇形拡幅水路の波高変化（流れのある場合）



図—12 海底取水管



を基準として、取水管路内の流れの運動方程式は

$$\frac{l}{g} \frac{dv}{dt} = cV_0^2 + z - c(V_0 + v)^2 + \frac{p(t)}{\rho g} \quad \dots\dots(2)$$

連続の式は

$$F \frac{dz}{dt} = -vf \quad \dots\dots(3)$$

式(3)を式(2)に代入し、かつ $v \ll V_0$ であるから cv^2 を省略すると、

$$\frac{l}{g} \frac{F}{f} \frac{d^2z}{dt^2} + 2cV_0 \frac{F}{f} \frac{dz}{dt} + z = -\frac{p(t)}{\rho g} \quad \dots\dots(4)$$

この式は一般の粘性減衰をもつ強制振動の式である。

波の作用によって取水口に作用する変動圧力は次式で

与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{p(t)}{\rho g} &= \frac{H \cosh(kz_0)}{2 \cosh(kh)} \sin \omega t \quad \dots\dots(5) \\ &= \frac{H}{2} K \sin \omega t \end{aligned}$$

ここに、

$k=2\pi/L$, $\omega=2\pi/T$, H : 波高, L : 波長, T : 周期
式(4)の一般解は減衰自由振動と強制振動との和で与えられるから、式(5)の周期関数の外力による定常的応答時の取水槽水位の最大変位 z_m は次式で与えられる。

$$z_m = \frac{(H/2)K}{\sqrt{\left(\frac{lF}{gf} \frac{4\pi^2}{T^2} - 1\right)^2 + \left(2cV_0 \frac{F}{f} \frac{2\pi}{T}\right)^2}} \quad \dots\dots(6)$$

取水槽水位の最大変動幅は $2z_m$ であるから、取水管路系による外海波高の減衰率 η は

$$\eta = \frac{2z_m}{H} = \frac{K}{\sqrt{(\chi^2 - 1)^2 + 4\mu^2\chi^2}} \quad \dots\dots(7)$$

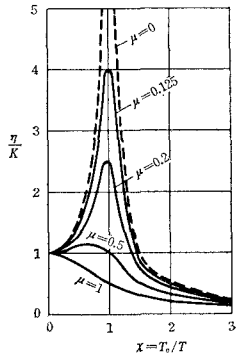
ここに、

$$\mu = cV_0 \sqrt{\frac{gF}{lF}}, \quad \chi = \frac{T_0}{T}, \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{lF}{gf}} \quad (\text{取水管路}$$

系の固有周期)

式(7)を図示すれば図—13のようになる。取水管路系の μ の値は通常 0.5 以下であるが、管路系の固有周期は 30 sec 以上で、通常の波の周期 10~15 sec に対して $\chi > 2.5$ となるから、取水槽における水位変動の最大振幅を外海波高の 20% 以下におさえることが可能である。

図—13 定常的応答時の取水槽水位の変動特性



計算例

取水管路系の諸数値 $l=$

100 m, $F=60 \text{ m}^2$, $D=3 \text{ m}$,

$f=7.06 \text{ m}^2$, $c=0.077$,

$Q_0=20 \text{ m}^3/\text{sec}$, $V_0=2.83 \text{ m/sec}$, $z_0=2 \text{ m}$ 。

波の条件 $H=6 \text{ m}$, $T=10 \text{ sec}$, $h=8 \text{ m}$,

$L=83.77 \text{ m}$ 。

これらの値より, $T_0=58.4 \text{ sec}$, $\chi=T_0/T=5.84$,

$\mu=0.198$, $\eta/K=0.030$, $K=0.855$, $\eta=0.026$ 。

取水槽水位の最大振幅 $2z_m=0.026 \times 6=0.156 \text{ m}$

上記と同じ諸条件で、管路長 $l=20 \text{ m}$ とすると、

$T_0=26.1 \text{ sec}$, $\chi=2.61$, $\mu=0.443$, $\eta/K=0.16$,

$\eta=0.137$, $2z_m=0.82 \text{ m}$ 。

海底取放水管路系による波の減衰特性については、その限界のケースと見なされるカーテンウォールの場合もふくめてひきつづき詳細な検討を進める。