

不透過性防波堤による長周期波の制御に関する研究

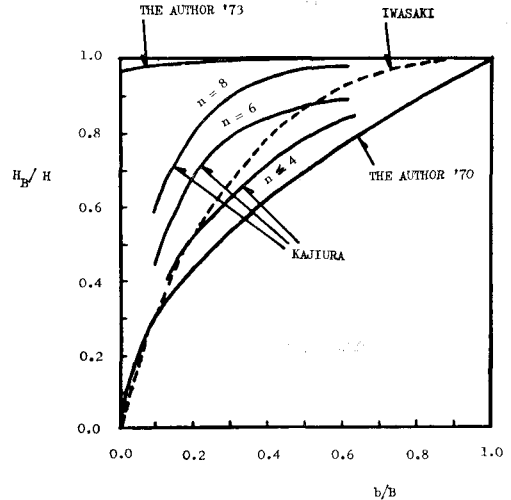
中 村 重 久*

1. 緒 言

海岸における波の制御の問題は、わが国のように海岸線に人口と産業とが集中している場合には重要な問題である。このような波の制御にはいろいろの方法があり、これまでに多くの試みがなされてきた¹⁾。海岸でみられる波のなかでも長周期波の制御は一般に困難であり、これまでにいろいろの試みがなされているが、実際には津波防波堤や高潮防波堤のような不透過性防波堤を利用して港湾内の波高をできるだけ小さくする方法が普通である。ここでは不透過性防波堤による長周期波の制御の問題を考える。その目的を達成するためには、防波堤を最も効果的に利用するためにはどのようにしたらよいか、防波堤を設けることによって生ずる不都合な問題点は何かを明らかにする必要がある。そのために、まず、港湾の奥で反射しない場合について不透過性防波堤の効果を簡単なモデルによって評価する。また、従来の港湾振動の理論を用いて、ここで考えたモデルに近い境界条件に対して、防波堤を港湾の入口に設けたことによって現われる共振条件を求め、その結果を実験結果と比較する。次に、このような防波堤を2段がまえにすると、港湾内での長周期波をさらに小さくできるものと考えられるので、これを実験的に明らかにする。また、2段がまれの防波堤を設けたとしても、港湾内に非線型共振を惹起することがあることを示すと同時に、そのような共振ができるだけ顕著に現われないようにする対策についても検討する。

2. 進行波の制御に対する簡単な力学モデル

長周期波の制御に対する不透過性防波堤の効果を評価するために、著者²⁾は1970年簡単なモデルを考え、そのモデルによって高知港の津波に関する模型実験の結果をかなりうまく説明することができた。このモデルには、1次元的な波のエネルギー・フラックスに着目して組立てられたものである。港湾へ侵入した波の港湾内での反射が無視できるものと仮定し、港湾内の水深 h 、波峯線の長さ l を考慮すると、港湾内の波高 H が防波堤の開口幅 b によってどのように変わるかを示す関係式が得られる。すなわち、



図—1 港内波高に対する不透過性防波堤の効果

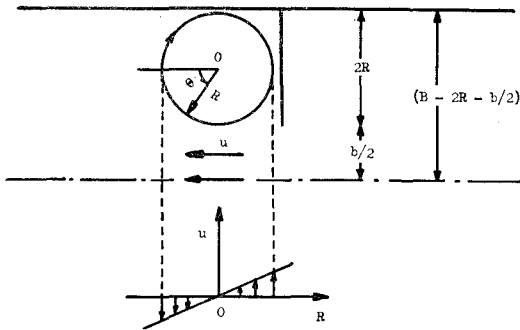
$$\left(\frac{H_B}{H}\right) = \left(\frac{b}{B}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{l}{l_B}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{h}{h_B}\right)^{1/4} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 B は港湾の幅であり、サフィクス B のついた量はそれぞれ防波堤のある場合の量を表わす。波峯線の長さについて $l_0 \sim l_B$ 、また $h_0 \sim h_B$ と考えることができれば、 H_B/H と b/B との関係は1つの曲線で表わされ、図—1に示されるような傾向をもつ。ここで考えたモデルと境界条件は異なっているが類似の問題を取扱かおうとしたもののうち、梶浦の理論曲線³⁾と岩崎らの理論曲線⁴⁾とをあわせて図—1に示した。これをみると、防波堤開口幅が小さくなるとともに防波堤による港内波高の減少効果が顕著になる傾向は、いずれの曲線も共通している。

防波堤の存在によって、波は開口部周辺に渦を形成することは経験的にもよく知られており、波の防波堤通過にともなう波高減少には、渦を形成することによる効果がかかなり大きいものと考えられてきた⁵⁾。この渦の効果を評価するために防波堤開口部周辺に進行波によって形成される渦について、図—2のようなモデルを考え検討し、防波堤開口部の波高に対する港内波高の比を防波堤開口部の開口幅、港湾幅および港内水深の関数として表わそうとした例もある⁶⁾。

この結果によれば、港内水深 h が 10 cm の場合には港内波高は防波堤開口部の波高の数パーセント小さくな

* 正会員 理修 京都大学助手 防災研究所

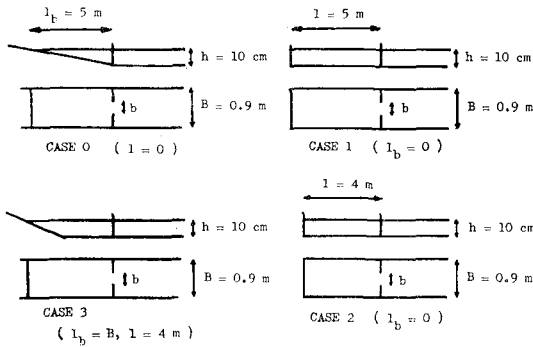


図—2 波の制御に関する渦モデル

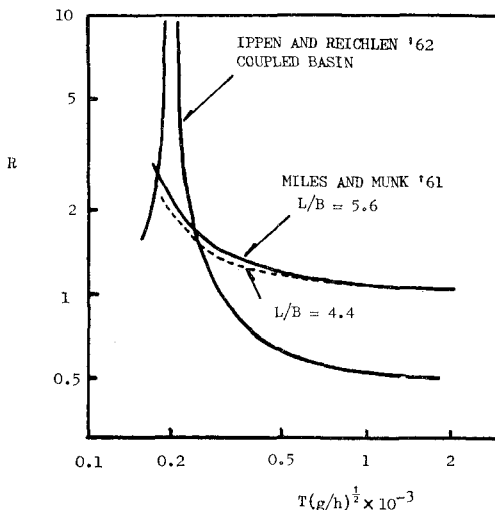
るに過ぎない。そして、さらに大きい h に対して R_H はほとんど 1 とみてよい。したがって、このモデルによって、防波堤による顕著な減高減小の効果を十分に説明できるとは考えられない。防波堤開口部を波が通過するときの渦形成過程における乱れによるエネルギーの消散などを考慮にいれなくてはならないであろう。

3. 港湾振動の理論からみた波の制御

港湾における長周期波の制御のためには、港湾の形状

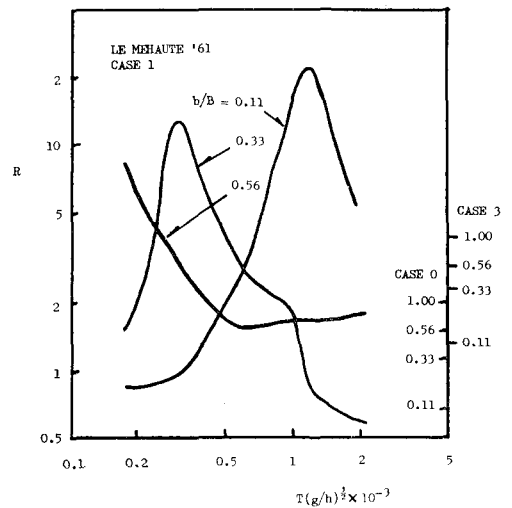


図—3 港湾モデル

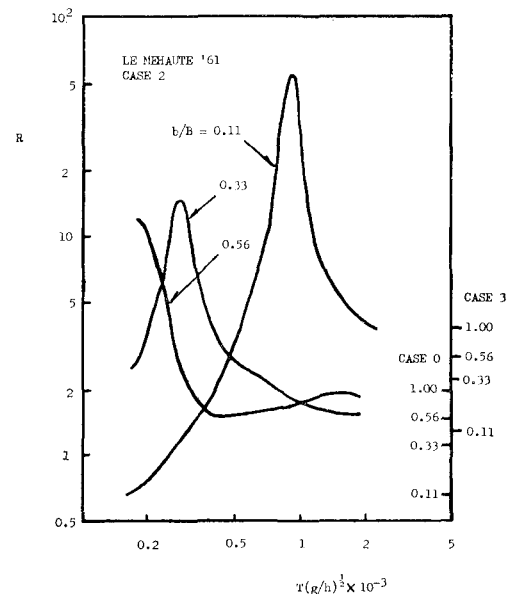


図—4 共振特性 (a)

に関係の深い港湾振動の問題を検討しておく必要がある。ここでは、簡単のため、図—3 のような港湾モデルを考える。そして、図—4 には、Miles および Munk⁸⁾ による共振特性を CASE 1 (実線) と CASE 2 (破線) とで示し、同時に Ippen および Raichlen⁹⁾ の COUPLED BASIN に関する共振特性も図示してある。また、図—5 および 6 には Le Méhauté の理論による計算例がある。これによると、湾内水深が一定であれば、防波堤開口幅が大きくなると共振周期は小さい方へずれ、湾長が長くなると共振周期は大きい方へずれる。Le Méhauté によれば、湾奥に傾斜海浜がある場合には、海浜の勾配によって波の反射率が定まることになり、非常に海浜の勾配がゆるやかになると波の反射率は 0 となり、計算上、湾



図—5 共振特性 (b)



図—6 共振特性 (c)

内波高増幅率は入射波の周期によらないことになる。そして、湾内に一定水深部がないとき波高増幅率は最小値をとる。しかも、図-3 の CASE 0 および 3 の場合、開口幅が小さいほどこの増幅率は小さい。理論の実際問題への適用にあたっていろいろ考慮すべき点はあるが、ここに得られた結果から判断すると、湾口に防波堤を設け、さらに、湾内地形として CASE 0 のようなものを与えると、波の制御の目的が果たせそうである。

4. 不透過性防波堤の効果に関する実験的検討

(1) 単一港湾モデル

図-3 の CASE 1 および 2 のように、港湾内の水深が一定で、境界が鉛直壁である場合についての関連研究は多数あるようであり、これらは湾水振動の代表的研究として認められている。ここでは、前節に検討した Le Méhauté の理論の示すところを実験によって検証してみる。ここでは、図-3 の CASE 0 の場合について、防波堤開口部より外側 0.2m の測点での波高 H_2 を基準にとり、これに対して防波堤より内側 3m での波高測定値を H_5 とし、実験波の周期を 0.3~3min の範囲にとり、防波堤の開口幅の効果が H_5/H_2 にどのようにあらわれるかを示す。実験の結果は図-7 のようである。図-7 の R/H_2 は測上高の防波堤開口部の波高に対する比である。この図において、防波堤の開口比 b/B をパラメータとし、 $b/B=0.11$ (実線), 0.33 (破線), そして 0.56 (点線) の場合を示した。 $b/B=0.11$ の場合の曲線

を基準にとって、防波堤の開口比が 0.33 および 0.56 の場合の曲線を比較すると、いろいろのことが明らかになる。すなわち、図-7 を図-4, 5 および 6 と対比させるとき、 H_5/H_2 を R とよみかえることができたとしても、実験の結果は計算曲線と一致しない。 R の値と H_5/H_2 の値との間にも差があるし、また図-7 の曲線は H_5/H_2 が周期の関数であることを示しているのに対して、図-4, 5 および 6 の R の値は CASE 0 では周期に関係しない。このような差の生じた原因の 1 つは、実験と理論とで厳密には境界条件が異なっていることによると考えられ、また、理論展開の段階で Le Méhauté が与えた波の反射の条件にもよるものと考えられる。

境界条件が対応するとして、図-7 の実験結果に、前述の式 (1) を適用できたと考えると、 $H_B/H=(H_5/H_2)B/(H_5/H_2)_0$ の値が図-1 で考えた範囲の値をとるのは、 $T\sqrt{g/h}$ の値が 1.5×10^3 以上の場合でなくてはならない。港湾内の波高が港口あるいは港外の波高より高いという実験結果は、港湾内で波の多重反射があることを意味していると考えざるを得ないから、このような簡単なモデルに対する実験結果でも、式 (1) のみによって説明できるというわけにはいかない。

(2) 2 連カスケード港湾モデル

波を制御する目的で港口に防波堤を設けても、港内の波高が港外より大きくなることになれば、これは不都合なことである。このような不透過性防波堤による波の制御効果をあげる 1 つの方策として、防波堤を 2 段がまえ

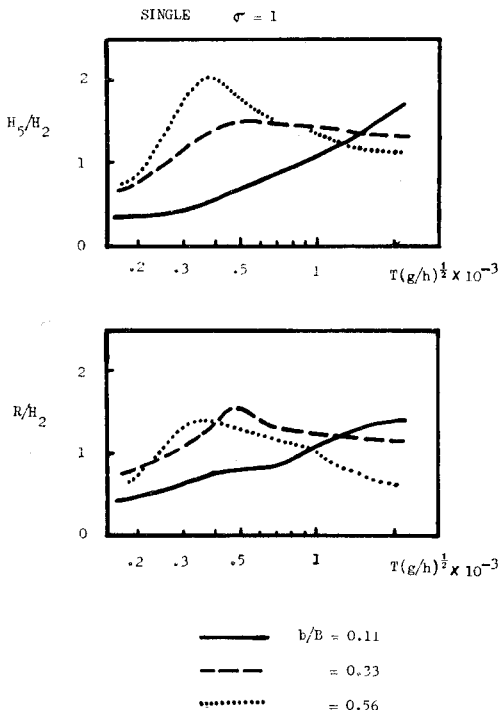


図-7 港湾モデル CASE 0 の共振特性 (実験)

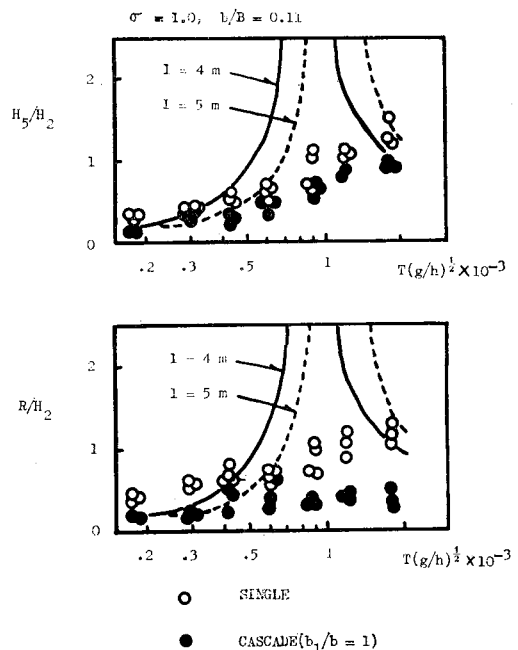


図-8 単一港湾モデルと 2 連カスケード港湾モデルにおける共振特性の比較 (実験)

にすることが直観的に考えられる。

ここで、図-3 の CASE 0 の場合について、防波堤より内側 2.5m の位置にあたに防波堤を設け、防波堤を2段がまえにした場合を考える。この場合、新しい第2の防波堤によって港内水域は2分され、防波堤開口部によって連結されることになる。図-8 には防波堤の開口比 $b/B=0.11$ の場合について、波高比 H_2/H_1 の実験結果を、単一港湾モデル(白丸)と2連カスケード港湾モデル(黒丸)とについて示し、不透過性防波堤を2段がまえにしたことによる長周期波の制御効果を明らかにした。また、第2の防波堤の開口部の対称性の波高比 H_2/H_1 への影響は、実験的にみて顕著ではなかった。防波堤周辺の渦形成を考えたモデルでは、当初、防波堤開口部の対称性を考慮したが、その対称性の効果を表わす量は実験結果には明確に表われてこなかった。

5. 港湾モデルにおける非線型横振動

前節で検討した2連カスケード港湾モデルで、港湾内および港湾前面の幅をいずれも $B=7\text{m}$ とし、2組の不透過性防波堤は対称に配置され、防波堤開口幅は 0.8m とする。第1の防波堤の開口部で初期水深は 8cm の場

合を考える。2組の防波堤の間隔は 2m 、第1の防波堤から港奥の汀線までの距離は 4m であるとする。

図-9 に示される実験結果をみると、第1の防波堤の開口部の波高 H_1 と水深 h_1 とにより、 $0 < H_1/h_1 < 0.2$ では第1および第2の防波堤を腹とし、その中間点を節とするような2次的振動がみられるが、 $0.2 < H_1/h_1$ の場合には、第2の防波堤を境界とし、そこから第1の防波堤へとった距離、すなわち、図中の Y 軸に沿って波高が指数関数的に減ずるような傾向がみとめられる。この傾向は、たとえば Caldwell ら¹¹⁾ が示しているエッジ波的なものに対応しているものと考えられる。また、第1の防波堤の開口部における波高 H_1 に対する港湾内の波高 H の比の周期特性は、実験の結果によれば図-10 のようになっている。この図は $T\sqrt{g/h_1} \sim 10^2$ の付近の実験結果をのぞけば、 $T\sqrt{g/h_1} > 1.8 \times 10^2$ の範囲で図-8 とよく似た傾向を示している。ここで、特に $T\sqrt{g/h_1} \sim 10^2$ での現象を注意してみると、港湾振動における共振によく似ている。この場合の実験波の周期は 9sec である。実験波の記録例は図-11 に示すようであり、第2の防波堤前面にあたかも2つのソリトン²²⁾が存在するかのような挙動を示す。この波は周期的に第2の防波堤の前面を往復し、波峯の速度は 78cm/sec である。ところが、そこでの水深から長波の伝播速度をもとめると 62cm/sec となるから、この波は長波と考えるわけにはいかない。波形と波速とについて検討を重ね、Laitone の理論^{13),14)} とその結果を図式的に実用化した岩垣の研究¹⁵⁾ に基づいて、図-11 の実験波が孤立波に近いクノイド波(第2近似)とみなすことにすると、波速は計算上 78.3cm/sec となり、実測値とよく一致する。また、Ursell's parameter HL^2/h^3 (H : 波高, L : 波長, h : 水深)を検討するために、図-11 の実験波が得られた実験条件に近い値として、 $H \sim 2\text{cm}$, $h \sim 4\text{cm}$, $T \sim 9\text{sec}$,

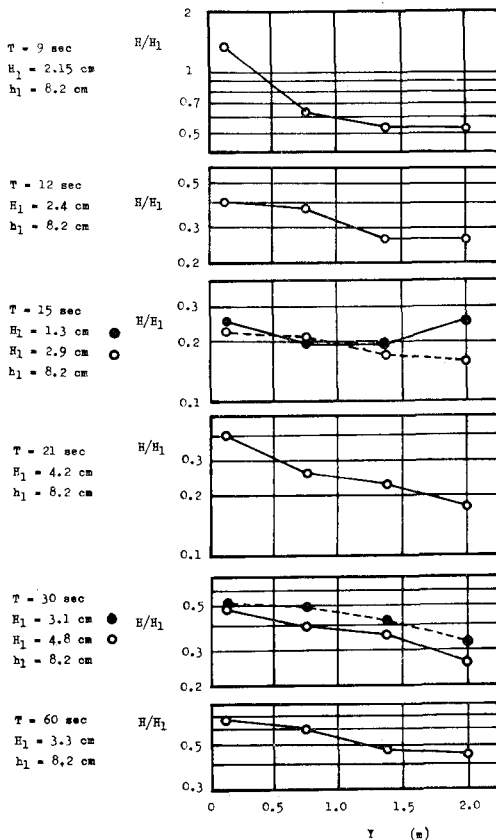


図-9 港湾モデル内におけるエッジ波の波高分布

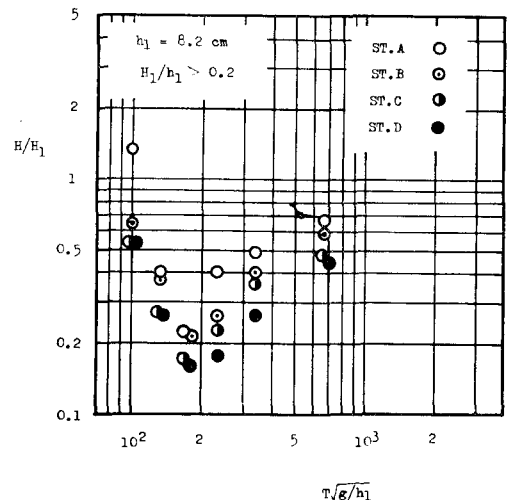


図-10 2連カスケード港湾モデルの共振特性

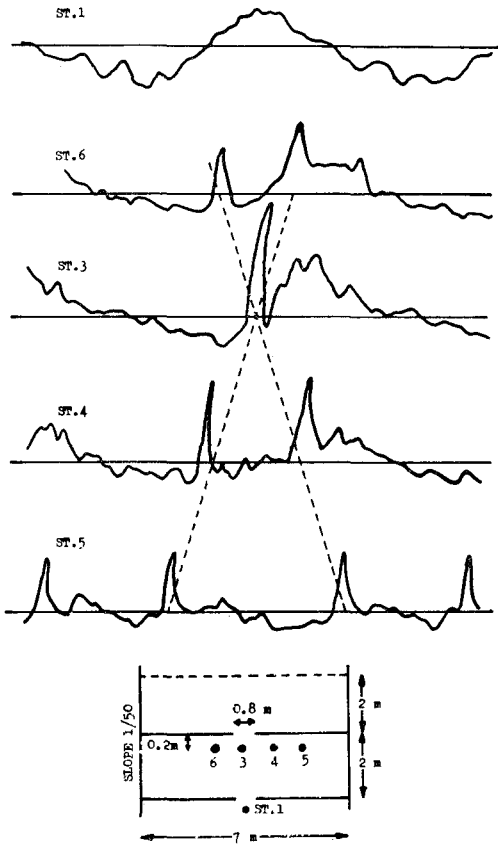
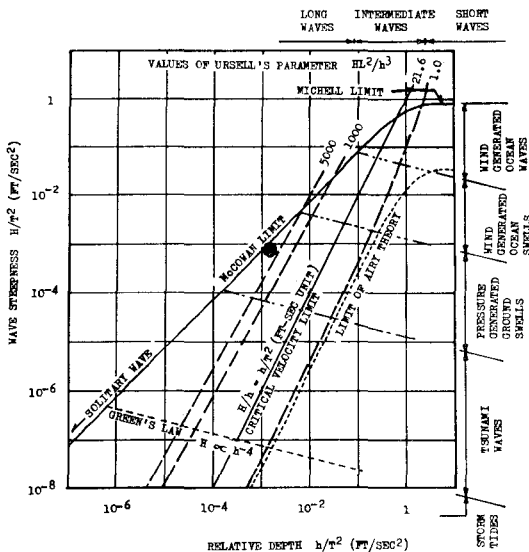


図-11 クノイダル・エッジ波の記録例

$B=L=7\text{m}$ をとることにすると $H^2L/h^3 \sim 1.5 \times 10^4$ となる。この値を、波形勾配と相対水深を考慮して Wilson¹⁶⁾ の図上にプロットすると、図-12 の黒点で示されるように、この実験波は McCowan の砕波限界に近い波に対

図-12 波の特性をあらわす Wilson¹⁶⁾ の図

応していることがわかる。このようにみえてくると、この実験波はクノイダル・エッジ波とよんでもよいような特性をもっているといえそうである。このようにみえてくると、防波堤を2段がまえにしても港内波高が小さくならない場合があることがわかる。

したがって、ここで考えたような港湾モデルによって波の制御を検討する場合には、港湾振動としてあらわれる非線型現象を十分考慮しておく必要がある。また、従来の線型理論によって説明しようとすれば、Munk⁸⁾ の Harbour paradox の問題を考慮しておくと同時に、最近、Carrier^{17),18)} によって提唱されている Channel paradox の問題も考慮しておかねばならないと言えそうである。しかし、波の制御の目的からみれば、線型的であっても非線型的であっても、共振現象が現われることは不都合なことである。

簡単な実験によれば、港湾幅、防波堤開口幅、港湾内の水深条件などを若干変更すると、このような非線型横振動も顕著ではなくなる。しかし、それでも、2つの防波堤の間の水域における波には、エッジ波的な特長が認められる場合がある。

6. 結 語

以上、不透過性防波堤による長周期波の制御に関して研究を行った結果をとりまとめると、次のようになる。まず、(1) 防波堤による波の制御の効果を評価するために簡単な不透過性防波堤のモデルを考えた。また、長方形港湾モデルについて港湾振動を考慮し、Le Méhauté (1961) の理論によって防波堤による波の制御を検討した。実験の結果は、簡単なモデルでも、長方形港湾モデルでもうまく説明できないことがわかった。港口に防波堤があっても、また港内に一定の海底勾配があっても、港内波高には周期特性があり、特に周期の長い波の制御が難しいことが明らかになった。(2) さらに不透過性防波堤による長周期波の制御効果をあげるために、港湾モデルで防波堤を2段がまえにすると、その効果は港湾の奥でとくに顕著に認められる。(3) しかし、防波堤を2段がまえにしても、港湾モデルの幅が奥行に比較して大きく、港湾内の水深が小さくなると、港湾モデル内にエッジ波的な波が形成され、場合によってはクノイダル・エッジ波とよんでもよいような波が認められ、非線型横振動を誘起する。(4) この非線型振動も港湾振動における共振の1例と考えられ、港湾幅、防波堤開口部の開口幅、港湾内の境界条件を若干変更すると顕著ではなくなる。

なお、残された問題点については、今後逐次検討を行っていきたいと考えている。

終りに、本研究の糸口を与えられた京都大学工学部岩垣雄一教授ならびに適切な御助言をいただいた防災研究

所土屋義人教授に心から感謝の意をあらわす。また、本研究の一部は自然災害特別研究“海岸における波の制御に関する研究”(代表者 岩垣雄一教授)に関する科学研究費によって行った。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一: 海岸における波の制御とその問題点, 第10回災害科学シンポジウム論文集, 1973, pp. 177~180.
- 2) 中村重久: 高知港の津波と振動特性に関する模型実験, 第17回海岸工学講演会論文集, 1970, pp. 435~439.
- 3) 梶浦欣二郎: 湾水振動におよぼす防波堤の効果, 東大地震研究所報, No. 41, 1963, pp. 403~418.
- 4) 岩崎敏夫・揚 沢民: 湾内津波の計算(1), 第16回海岸工学講演会論文集, 1969, pp. 371~375.
- 5) 岩垣雄一・村上仁士: 防波堤開口部における波のエネルギー損失に関する実験, 第19回海岸工学講演会論文集, 1972, pp. 221~225.
- 6) Nakamura, S.: Tsunami suppressor in sloped bottom harbour, Proc. Symposium on Tsunami—Wellington, 1974 (投稿中).
- 7) 中村重久: 津波の制御に関する研究—問題点と研究の方向—, 第10回災害科学シンポジウム論文集, 1973, pp. 181~183.
- 8) Miles, J. and W. Munk: Harbour paradox, J. Waterways and harbours Div., ASCE, 1961, pp. 111~130.
- 9) Ippen, A. T. and F. Raichlen: Wave induced oscillations in harbours: the problem of coupling of high reflective basins, Rept. No. 49, Hydrodynamics Lab, MIT, 1962.
- 10) Le Méhauté, B.: Theory of wave agitation in a harbour, J. Hydraulics Div., ASCE, 1961, pp. 31~50.
- 11) Caldwell, D., L. Cuchin and M.S. Longuet-Higgins: Some model experiments on continental shelf waves, J. Mar. Res., Vol. 30, No. 1, 1972, pp. 39~55.
- 12) Segur, H.: The Korteweg-de Vries equation and water waves, solution of the equation, Pt. 1, J. Fluid Mech., Vol. 59, Pt. 4, 1973, pp. 721~736.
- 13) Laitone, E. V.: The second approximation to cnoidal and solitary waves, J. Fluid Mech, Vol. 9, 1961, pp. 430~444.
- 14) Laitone, E. V.: Limiting conditions for cnoidal and stokes waves, J. Geophys. Res., Vol. 67, No. 4, 1962, pp. 1555~1564.
- 15) 岩垣雄一: クノイド波に対する研究(第2報)—波速および波長について—, 京大防災研年報, No. 8, 1965, pp. 343~351.
- 16) Wilson, B.W.: Generation and dispersion characteristics of tsunamis, Studies on oceanography, 1964, pp. 413~444.
- 17) Carrier, G.F., R.P. Shaw and M. Miyata: The response of narrow-mouthed harbors in a straight coastline to periodic incident waves, J. Applied Mech., Vol. 38, 1971, pp. 335~344.
- 18) Su, C.L.: Asymptotic solutions of resonances in harbours with connected basins, J. Waterways and harbours Div., ASCE, 1973, pp. 375~391.