

斜め入射波による鉛直堤の越波に関する実験的研究

井 上 雅 夫*・土 屋 義 人**

1. 緒 言

1955年石原・岩垣¹⁾は、海岸堤防あるいは護岸の天端高を決定するにあたっては越波を許さないという考え方では天端高の非常に高い堤防かあるいは多量の消波ブロックが必要となり、その経費もばく大なものになるので、背後地の状況や堤防の構造、排水設備などによって、越波を差し支えない程度まで許容するという立場から、堤防の天端高を決めるべきであることを主張した。近年、わが国の海岸堤防や護岸はこうした考え方に基づいて設計されるようになり、そのため越波に関する基礎的な実験や模型実験が多く行われてきた。しかしながら、こうした実験の多くは1次元的なものであり、堤防に波が斜めに入射する場合や堤防法線が屈曲している場合などの2次元的な越波についての実験結果は少なく、設計に役立つ基礎的な資料にとぼしい。

従来、こうした斜め入射波による波のうちあげ高については、オランダにおける Wassing や細井・首藤の研究がある。Wassing²⁾の結果によれば、波のうちあげ高は波の入射方向と堤防法線との角度 α が小さくなれば減少し、その減少比は $(1 + \sin \alpha)/2$ であり、また、細井・首藤³⁾は、この減少比が波形勾配によっても変化することを実験的に見出した。さらに、細井・首藤⁴⁾および富永・首藤⁵⁾はV字状法線をした海岸堤防への波のうちあげ高の分布を詳細に測定し、興味ある結果を発表している。最近、三井⁶⁾、種々の法線形状をした護岸前面の波高分布を波の回折と散乱に起因するものとして理論的に計算し、実験値と比較してかなりよく一致することを見出している。一方、このような場合の越波については、石原・岩垣・三井⁷⁾の実験結果がある程度であろう。すなわち、入射角が 45° の波による1/10勾配の斜面上に設置された鉛直堤の越波量を測定し、その結果と直角に入射する場合の結果とを比較して、実験を行なった範囲内では斜め入射波の越波量は直角に入射する波の越波量よりも、すべて減少することを明らかにした。そしてこの原因が、斜め入射の場合には越波のもつエネルギーの一部が堤防前面の水粒子の横方向の速度成分として消耗されるためであると説明している。

このように、斜め入射波による波のうちあげ高や越波については二、三の成果は得られているが、まだ十分満足すべき結果ではなく、特に、越波に関しては未知の点がきわめて多い。

以上のことから、著者らは2次元の越波現象の特性を明らかにし、基礎的な資料を得るために、平面水槽によって詳細な実験を行なった。この論文は、波が斜めに入射する場合の鉛直堤の越波と堤防法線が屈曲した隅角部付近の越波に関する2つの実験結果を示し、若干の考察を行なったものである。

2. 鉛直堤の越波におよぼす波の入射角の影響

ここでは、鉛直堤が十分長く、無限の長さをもつと考えられる場合の越波におよぼす波の入射角の影響について実験的に検討することにする。

(1) 実験装置および実験方法

実験は京大防災研究所宇治川水理実験所にある長さおよび幅のいずれも約25m、深さ0.3mの港湾模型平面水槽で行なった。造波機は造波板の長さが10mのフラッター型である。この実験では、現象を単純にするため、一様水深に設置された鉛直堤を対象とした。鉛直堤の模型は高さ20.7cm、長さ8.0mの鋼製で、前面水深 h は19.2cm、したがって、静水面上の天端高 H_e は1.5cmである。実験波の波向 α (波の入射方向と堤防法線との角度)は 90° 、 60° 、 45° および 30° に変化させ、周期 T は1.0sec、波高 H は2.3~4.4cmとした。波高は入射波高のほか、堤防前面の波高を越波量測定時と天端をあげ越波しない場合とについて電気抵抗線式波高計で測定した。越波量は堤防背後に幅5cmの小さな容器を数多く並べ、越波量の分布も測定できるようにした。実験は規則波を対象とし、造波機始動後の7~11波の5波について測定を行なった。また、こうした平面水槽における実験でもっとも重要なことは、入射波高が場所的に一様でなければならないことである。このことから、この実験ではいずれの入射角の場合についても、入射波高が場所的に十分一様な堤防中心から両端へそれぞれ1.0mの部分で越波量の測定を行なった。

(2) 実験結果とその考察

図一は、縦軸に無次元越波量 $2\pi Q/HL$ (Q :堤防法線に直角に測定した堤防単位幅、1周期当りの越波量、

* 正会員 関西大学助教授 工学部土木工学科

**正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

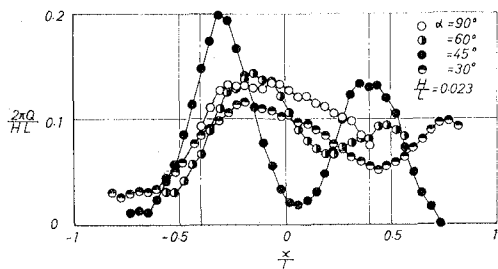


図-1 越波量の分布

H : 入射波高, L : 入射波長) をとり, 横軸に堤防中心を原点 0 にとり波の入射方向に向かって右側を正とし堤防法線に沿って測った距離 x と波長 L との比 x/L をとり, 入射角 α (入射方向と堤防法線との角度) をパラメーターとして, 入射波の波形勾配 H/L が 0.023 の場合の堤防法線方向の越波量の分布を示したものである。これによると, 入射角が 90° の場合には, 越波量は比較的一様に分布するのに対し, 斜め入射波の場合には, かなり明確な極大および極少値が現われている。特に, この傾向は入射角が 45° の場合に著しい。この原因を明らかにするために, 堤防の天端をあげ越波をさせない状態で, 堤防前面での波高 H'' を測定した。図-2 には, 縦

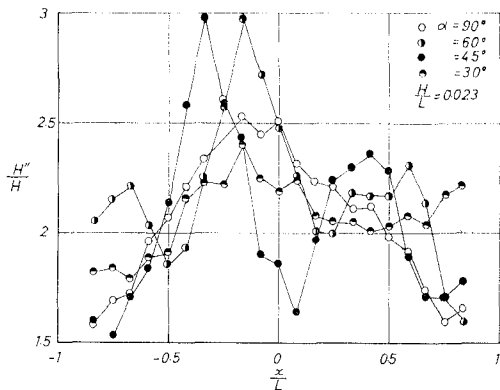


図-2 堤防前面の波高分布

軸に H'' と入射波高 H との比 H''/H を, 横軸に図-1 と同じ x/L をとり, 堤防前面での波高分布を示す。これによると, 波高分布は越波量分布とかなりよく対応しており, 越波量が分布をもつ原因は堤防天端高の誤差などによるものではなく, なんらかの本質的な現象が存在するように考えられる。さらに, 細井・首藤ら³⁾ が行なったのり面勾配が 1/2 の傾斜堤への斜め入射波のうちあげ高の実験結果においても, これとほぼ同じ現象がみられる。すなわち, うちあげ高もかなりはっきりした分布を示し, のり面に沿っての最大と最少のうちあげ高の差は, 入射波高の約 2 倍にも達している。以上のことから, 斜め入射波による波のうちあげ高や越波量が場所的に変動することは, 単なる実験上の誤差によるものでは

なく, 何か他の原因によるためであると考えられる。しかしながら, こうした現象の機構を水理学的に説明することは現在のところ困難であるので, ここでは主として実験値にもとづいて, これらの分布特性を考察する。

図-3 は, 越波量と前面波高とについて, それぞれの

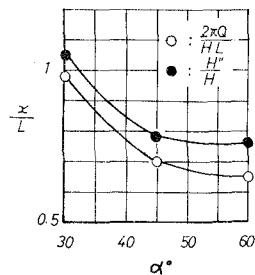


図-3 越波量および前面波高の極大値の現われる間隔と入射角との関係

極大値が現われる間隔を入射角との関係で示したものである。これによると, いずれの極大値の現われる間隔も入射角が小さくなれば長くなることがわかるが, こうした現象は単なる反射の理論だけでは説明できない。また, 図-4 は, 越波量と前面波高のそれぞれの最大値と入射角との関係を示したものである。これによると, 前

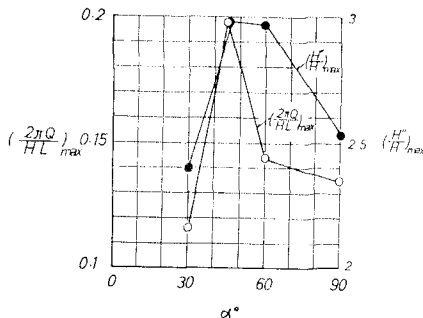
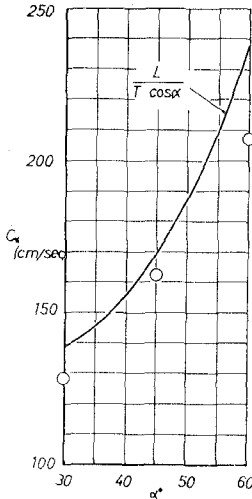


図-4 越波量および前面波高の最大値と入射角との関係

面波高と越波量の最大値はともに入射角によって変化し, 入射角が 45° の場合に極大値を示している。しかし, 鉛直堤に波が斜めに入射し, 入射角と等しい反射角で反射するものと計算した斜め重複波の波高は, 入射角に関係なく一定であり⁸⁾, この実験結果を説明することはできない。さらに, この斜め重複波は壁面に沿って位相速度 $C_a = L/(T \cos \alpha)$ で移動する。この位相速度を 16 mm カメラで撮影して求めた実験値を図-5 に示したが, $L/(T \cos \alpha)$ よりもやや小さい値を示している。

以上ようなことを考慮すると, 斜め入射波による越波量がある分布を示すことは, 入射波と反射波とを単に重ね合わせた斜め重複波で説明することはむづかしく, さらに, 詳細な検討が必要であろう。

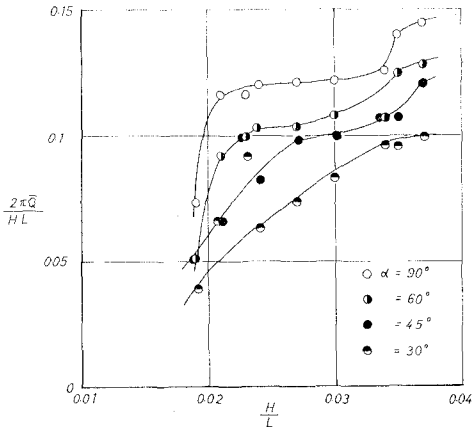
このようなかなり明確な場所的分布をもつ前面波高あ



図—5 斜め重複波の位相速度と入射角との関係

るいは越波量についてそれらの平均値を求めて議論することは多少の問題があろう。しかし、ここでは、図—1において波の入射角が 90° の場合の越波量が比較的一様と考えられる一点鎖線で示した x/L の値が $\pm 0.4L$ の範囲について越波量の平均値を求め、これについて入射角の影響を検討することにする。

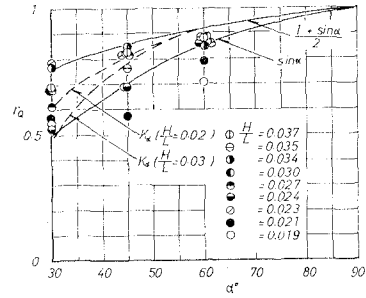
図—6 は、入射角をパラメーターとして以上のような平均の越波量 $\bar{Q}$ に対する無次元越波量 $2\pi\bar{Q}/HL$ と波形勾配との関係を示したものである。この実験では、水



図—6 無次元平均越波量と波形勾配との関係

深・波高比 h/H の最少値は約 4.3 であり、すべて重複波の状態で越波する。そのため、いずれの入射角についても多少の実験値のばらつきはあるが、波形勾配の増大とともに越波量も増加している。この傾向は入射角の小さいほど顕著である。

図—7 は、各波形勾配について、それぞれの入射角における平均越波量と入射角が 90° の場合の平均越波量との比 r_Q と入射角との関係を示したものである。この r_Q



図—7 平均越波量におよぼす波の入射角の影響

は、細井・首藤が斜め入射波の波のうちあげ高について提案した入射方向係数 K_α に相当するものである。この図によると、平均越波量に関する入射方向係数 r_Q は、いずれの波形勾配についても、入射角が小さくなると減少するが、波のうちあげ高に関する K_α のように波形勾配による変化はあまり明かでない。すなわち、波形勾配が 0.02 および 0.03 の場合について 図—7 に示したように、 K_α は入射角が一定であれば波形勾配が大きいほど小さいのに対し、 r_Q は実験値のばらつきが大きく明確ではないが、むしろ逆に波形勾配が大きいほど大きい値を示すようである。この原因は明かでないが、勾配が $1/2$ の傾斜堤への波のうちあげと鉛直堤の越波とでは現象がかなり異なるようであるので、これらの現象におよぼす波の入射角の影響の仕方も当然違うはずであって、それらを直接比較することには若干無理があるのかもしれない。また、図中には、参考のため Wassing の斜め入射波のうちあげ高についての減少係数 $(1+\sin \alpha)/2$ と $\sin \alpha$ の曲線を記入してあるが、著者らの実験値のほとんどは $(1+\sin \alpha)/2$ を上限とし、 $\sin \alpha$ を下限とする範囲内に含まれるようである。運輸省が鉛直堤の天端高算定に際して、波の入射角が β であれば、係数 $(1+\sin \beta)/2$ を乗じる方法を提案しているが³⁾、この実験の範囲内についてはほぼ妥当なものといえよう。

以上、鉛直堤の越波におよぼす波の入射角の影響について述べたが、斜め入射波の場合には越波量がなぜ図—1 に示ような分布をするのかでなく、この問題を解決することによって、2次元の越波機構が解明されていくものと考えられる。

3. 防波堤および護岸隅角部の越波

ここでは、2次元の越波の問題として、斜め入射波による防波堤および護岸隅角部の越波に関する実験をとりあげることにする。防波堤の越波については実用上あまり重要ではなく、ただ、建設中の防波護岸の越波の問題に利用できる程度であるが、水理的には越波におよぼす回折現象の影響が現われてきわめて興味深い。一方、三井がすでに指摘しているように、護岸隅角部付近でよ

く被災する事例が多く¹⁰⁾、護岸隅角部の越波は実際の見地からも重要な問題といえよう。

(1) 実験装置および実験方法

実験に用いた水槽は前述した場合と同じである。図-8は防波堤を対象とした場合の実験装置の概略図であ

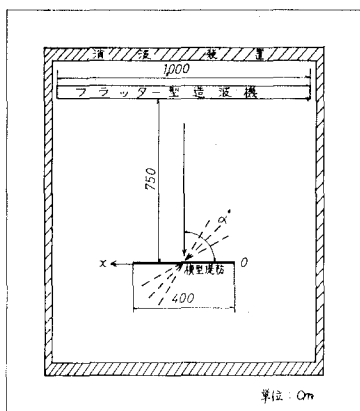


図-8 実験装置概略図(防波堤)

る。防波堤の模型もさきの場合とまったく同じであり、その長さは 4.0 m とした。実験波の入射角 α を 90° , 60° , 45° および 30° に変化させ、周期 T は 1.0 sec とし、波高 H は 2.8 cm とした。

図-9 は模型護岸の平面図であり、この実験で対象と

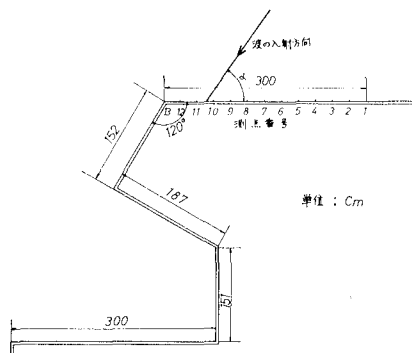


図-9 模型護岸平面図

した箇所は測点番号 3~13 までの区間である。模型護岸の断面形状は高さ 8.0 cm の鉛直堤とし、前面水深 h は一様に 7.2 cm である。実験波の入射角 α は 90° , 68° および 23° に変化させ、周期 T は 0.46 sec, 波高 H は 2~3 cm の範囲とした。なお、実験方法は、いずれの場合も 2. の場合とほぼ同じである。

(2) 実験結果とその考察

a) 防波堤の場合

図-10 は縦軸に無次元越波量、横軸に図-8の0を原点として法線沿いに測った距離 x と波長との比 x/L をとり、越波量の分布を示したものである。これによると、越波量は一様に分布するのではなく、入射角によ

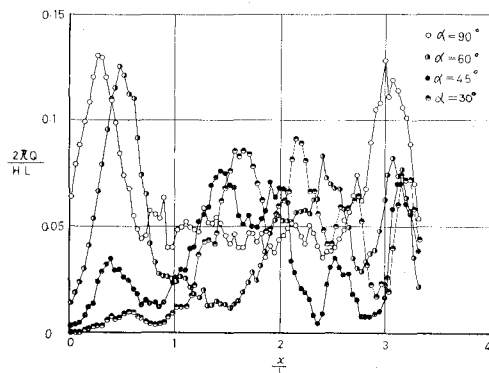
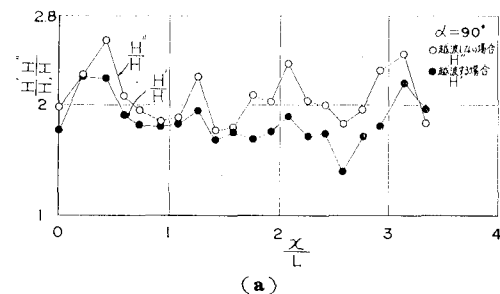
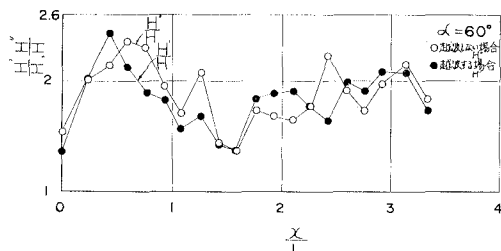


図-10 越波量の分布

て複雑な分布を示し、いずれの場合も越波量の極大値が現われている。このうち、無次元越波量の値が 0.05 以上の極大値が防波堤の端部からはじめて現われる位置は、入射波が 90° , 60° , 45° および 30° の場合、それぞれ約 $0.3L$, $0.5L$, $1.4L$ および $1.6L$ であり、入射角が小さくなるにつれて中心部に移動することがわかる。このことは、三井が¹⁰⁾半無限防波堤前面の波高分布を波の回折と散乱の立場から計算して求めた結果と一致し、特に、 90° および 45° の場合にはその位置もよく対応する。また、このことは、防波堤前面の波高分布を示した図-11(a) および (b) についても同じ傾向がみられる。



(a)



(b)

図-11 前面波高の分布

特に、入射角が 90° の (a) の場合には、越波させない状態で測定した波高 H' と越波しているときの波高 H' の分布はよく対応し、また、越波量の分布ともよく対応している。しかしながら、入射角が 60° の (b) の場合には、越波させないときと越波するときの波高分布は、(a) の場合ほどよく対応せず、また、越波させないとき

の波高分布は越波量の分布ともやや異なった傾向を示している。このことは、入射角が 45° および 30° の場合についても同様であることが見出された。このように、防波堤の越波量の分布は、必ずしも前面の波高分布とは一致しない場合があることは重要な特性であるといえよう。

図-12 は、図-10 および 11 に示した越波量および前面波高の最大値と入射角との関係を示したものである。これによると、越波量および前面波高の最大値はと

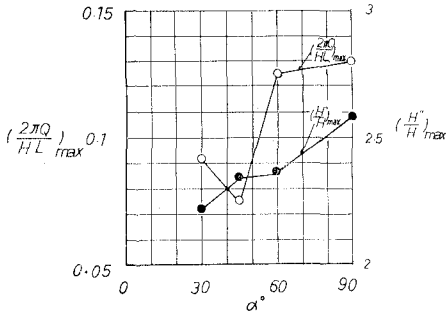


図-12 越波量および前面波高の最大値と入射角との関係

もに入射角によって変化し、入射角が 90° の場合が極大である。前述の三井の計算結果によれば、入射角によって極大値の現われる位置は変化するが、波高は一定であり、この実験結果を説明することはできない。こうしたことが2次元の越波の大きな特徴であり、今後さらに検討すべき問題であらう。

また、この実験では、入射波高を一定としたことから、2. の場合のように越波量におよぼす入射角の影響を直接検討することはしなかった。図-13 は、越波

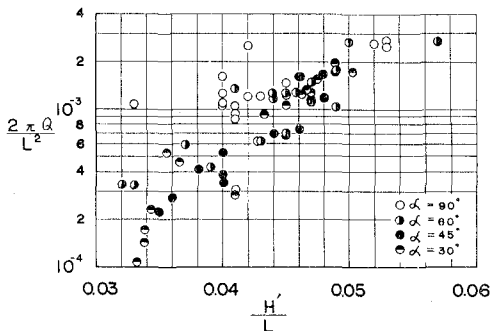


図-13 越波量と防波堤前面の波高分布との関係

量と越波しているときの前面波高との関係を示したものである。これによると、実験値にかなりのばらつきはあるが、前面波高の増大とともに越波量は増加し、前面波高を一定とすると、越波量が最大になるのは入射角が 90° の場合であり、 60° 、 45° および 30° のときの越波量にはあまり大差はみられないようである。

b) 護岸隅角部付近の場合

図-14 (a), (b) および (c) は、入射角がそれぞれ

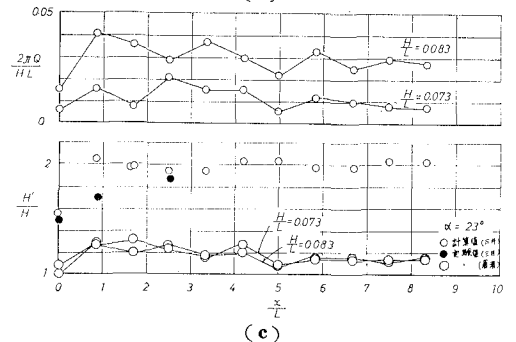
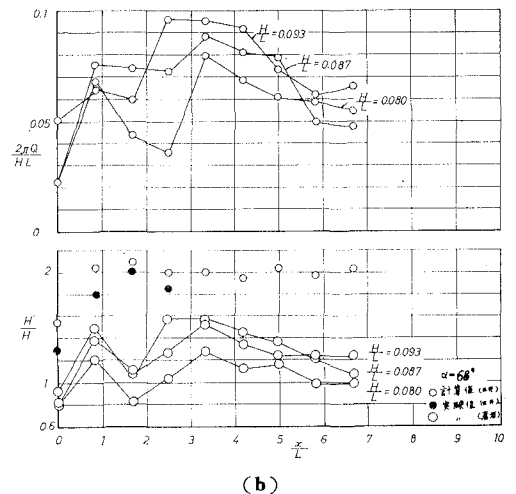
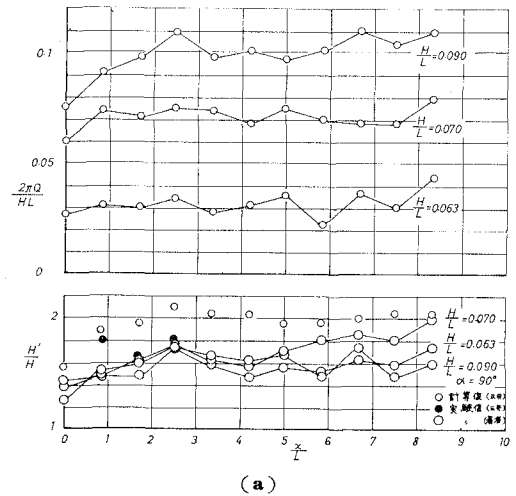
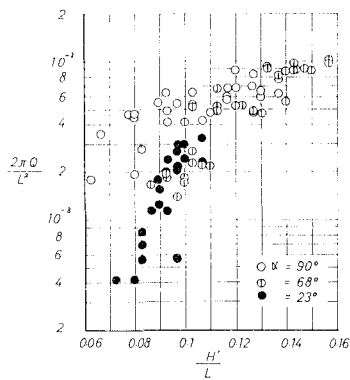


図-14 越波量および前面波高分布

90° 、 68° および 23° の場合の実験結果である。これらの図の上図は、縦軸に無次元越波量、横軸に図-9 の測点番号 13 を原点として護岸沿いに測った距離 x と波長 L との比 x/L をとり、越波量の護岸沿いの分布を示したものである。また、下図は縦軸は越波量測定時の護岸の前面波高 H' と入射波高との比 H'/H をとり、護岸前面の波高分布を示したものであり、図中には、三井¹¹⁾の計算および実験結果をも比較のため同時にプロットし

た。なお、図—14 (b) および (c) の三井の計算および実験結果は入射角がそれぞれ 60° および 30° の場合のものである。図—14 の上図からわかるように 図—9 の護岸法線方向に沿って越波量は一様に分布するのではなく、この場合も入射角によって複雑な分布を示すことがわかる。すなわち、護岸の隅角部ではいずれの場合についても越波量は減少し一般に最少値をとる。特に、入射角が 68° の場合にこの傾向は著しい。また、護岸法線に沿って越波量が極大および極少値を示す場所があり、入射波の波形勾配によって若干異なるが、入射角が 90° の場合、 x/L の値が約 2.5, 5.0, 6.7 および 8.3, 68° の場合、約 0.8, および 3.3, 23° の場合、約 0.8, 3.3 および 5.8 の位置で極大値を示し、極少値を示す位置は、 90° の場合は明らかでないが、 68° の場合は約 1.7, 23° の場合は約 5.0 であることがわかる。このように越波量がある分布をもつことの原因としては、護岸前面の波高が場所的に変化することが容易に予想される。しかし、この実験においては、越波をさせない状態で波高を測定していないため、越波しているときの波高分布を示したものが、図—14 の下図である。このため、当然のことではあるが、波高比の大きい場所では越波量も多くなっている。また、三井の計算および実験値にくらべて、著者らの実験値が小さいのは、越波しているときの波高をしかも壁面ではなく、約 5 mm 前面で測定したためである。図—14 (b) および (c) において、計算値と著者らの実験値の位相がややずれているが、これは前述したように入射角が約 $7^\circ \sim 8^\circ$ 異なるためと考えられる。図—15 は、越波量と越波しているときの前面波高との関係を示した



図—15 越波量と護岸前面の波高との関係

ものである。これによると、前面波高が同じであれば、入射角に関係なく越波量はほぼ同じになるが、 H'/L が約 0.1 より小さい領域では、入射角が 68° の場合に越波量が多いようである。しかし、この原因は明らかでない。

以上、防波堤および護岸隅角部付近の越波に関する鉛直堤を対象とした実験結果について述べたが、いずれの

場合も、越波量は波の入射角に対して明確な分布を示し、2 次元的な検討が必要であることが示唆される。また、この現象は三井の回折散乱の理論計算によってある程度まで説明することができたが、とくに、防波堤の場合、越波量の極大値が入射角によって変化することの原因は明らかでなく、この点については、今後さらに検討しなければならない。

4. 結 語

以上、著者らは斜め入射波による鉛直堤の越波に関する実験を行ない、鉛直堤の越波量におよぼす波の入射角の影響を主として実験的に明らかにした。さらに、2 次元の越波の問題として、防波堤および護岸隅角部の越波をとりあげ、それぞれの越波の特性を実験的に検討し、二、三の興味ある結果を得た。しかしながら、このような 2 次元の越波機構に関する水理学的考察は十分ではなく、今後さらに検討していきたい。

最後に、これらの研究を進めるにあたりご教示いただいた京大工学部 岩垣雄一教授に謝意を表するとともに、実験に熱心に助力していただいた東洋建設 KK (当時関西大学学生) の中村敏夫氏に謝意を表明する。

なお、この研究は文部省特定研究費および大阪府の委託による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太：海岸堤防の設計，特にその有効高について，海岸工学講演集，1955，pp. 57～70.
- 2) Wassing, F.: Model Investigation on Wave Run-up Carried out in the Netherlands during the Past Twenty Years, Proc. of 6th Conf. on Coastal Engineering, 1958, pp. 700～714.
- 3) 細井正延・首藤伸夫：堤防に斜めに波が入射する場合のうちあげ高について，第 9 回海岸工学講演会講演集，1962，pp. 149～152.
- 4) 細井正延・首藤伸夫：V 字状法線をした海岸堤防へのうちあげ高，第 10 回海岸工学講演会講演集，1963，pp. 127～131.
- 5) 富永正照・首藤伸夫・鶴木和夫：V 字状法線をした海岸堤防へのうちあげ高，第 13 回海岸工学講演会講演集，1966，pp. 210～215.
- 6) 三井 宏・筒井茂明：海岸構造物不連続部の波高分布について，(第 5 報)，とくに計画・設計への適用，第 17 回海岸工学講演会論文集，1970，pp. 85～90.
- 7) 石原藤次郎・岩垣雄一・三井 宏：海岸堤防の越し波防止効果について，第 4 回海岸工学講演会講演集，1957，pp. 99～109.
- 8) 土木学会編：海岸保全施設設計便覧〔改訂版〕，1969，pp. 36～37.
- 9) 井島武士・川上善久：日本沿岸の海岸保全のための自然条件と海岸堤防の天端高算定について，第 9 回海岸工学講演会講演集，1962，pp. 138～142.
- 10) 三井 宏：海岸構造物不連続部の波高分布について (第 1 報)，第 13 回海岸工学講演会講演集，1966，pp. 80～86.
- 11) 三井 宏・村上仁士：海岸構造物不連続部の波高分布について，(第 2 報)，一隅角部付近の波高分布一，第 14 回海岸工学講演会講演集，1967，pp. 53～59.