

越波のある場合の重複波の特性について

土 屋 義 人*・山 口 正 隆**

1. 緒 言

重複波を対象として防波堤などの港湾外郭施設を設計する場合、防波堤前面における水位変動はきわめて大きく、しばしば防波堤を越波することが考えられる。こうした越波あるいは越流を伴う場合の重複波的な波の波圧についてはいまだ系統的な研究がなされていないが、通常の設計便覧¹⁾では越波を伴わない完全重複波の波圧から天端高より高い部分の波圧を差し引いたものが作用するとしているようである。しかし、永井²⁾は直立壁の天端高が低く、相当量の波が天端を越す場合には、全く越波しない場合に比べて、波圧強度は一般に静水面付近から水底までわずかに減少すると述べている。また、浜田ら³⁾は砕波状態の波に対して直立壁に作用する波圧に関する実験を行ない、天端高によって波圧がかなり変化し、天端高が低く、越波がある程度許された場合には、砕波圧の波形の2番目のピークが消失することを指摘している。このように、重複波の状態での波であれ、砕波の状態での波であれ、越波が伴う場合にはその波圧特性が越波のない場合に比べてかなり変化すると考えられるが、ここで問題とする重複波の場合に対しては、上述の方法が妥当であるかどうか、さらに、越波のない場合に比べて、波圧特性がどのように変化するかなど不明な点が少なくない。そこで、本研究では越波のある場合の重複波圧に関する実験を行ない、天端高が低く、重複波が直立壁を越波することによって、直立壁前面波高および直立壁に作用する波圧が越波しない場合に比べてどのように変化するかを調べ、壁面に形成される波動運動を完全重複波とみなして有限振幅重複波理論との比較を通じて、この理論が越波を伴う重複波の波圧現象をどの程度説明しうるかを考察し、また同様に、重複波の越波特性についても検討しようとしたものである。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は昨年度の報告⁴⁾で述べたものと同じで、波高のきわめて大きい波を得るため、波形が変形しない程度のゆるやかな勾配を取りつけている。実験は越波のな

い場合と越波のある場合を交互に行ない、造波機近くの一樣水深部での水位変化、壁面での水位および波圧特性を測定したが、とくに越波のある場合には、同時にケーソンに取りつけた越波量を測定するための小さな水槽によって、それぞれの波に対する越波量を測定した。この場合記録の処理にあたってはいずれの場合も、造波機始動後の数波と造波機の反射の入った波を除いた4～5波をとり、その平均値を用いた。表-1に実験波の特性を一括して示す。

表-1 実験波の特性

$T\sqrt{g/h}$	T (sec)	h (cm)	H_c (cm)	H (cm)
8	1.143	20.0	5.0	10.50~4.91
	1.429	20.0	5.0	12.38~4.40
10	1.336	17.5	2.5	9.87~2.89
	1.336	17.5	5.0	9.70~4.60
	1.336	17.5	7.5	8.53~5.26
	1.237	15.0	5.0	8.58~4.50
12	1.604	17.5	5.0	9.22~3.70
14	1.732	15.0	5.0	9.58~4.01
16	1.979	15.0	5.0	9.12~3.39
18	2.033	12.5	5.0	8.28~3.04

3. 実験結果に対する考察

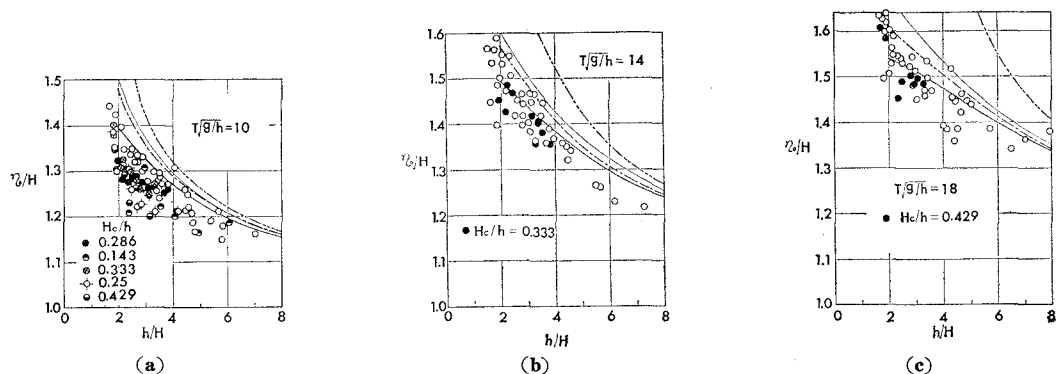
(1) 越波のある場合の重複波の諸特性

a) 静水面上の波の峯高

図-1は $T\sqrt{g/h}$ の値が10, 14および18の場合について、静水面上の波の峯高 η_0 と波高との関係を図示して、有限振幅重複波の理論曲線と比較したものである。図中の一点さ線は第4次近似解、実線は第3次近似解、二点さ線は第2次近似解および細い実線は首藤⁵⁾によって求められた有限振幅の定常長波の第2近似解であり、白丸は重複波が越波せず、ほぼ完全重複波とみなせる場合を示し、またその他は天端(天端高 H_c)を越えて重複波が越波する場合の実験値である。この場合、 H は越波の有無によらず、壁面における水位変動の振幅に相当するものであり、周期その他の条件を同一にしたとき、越波のある場合は越波のない場合より波高が減少するため、実験値の横軸が若干右側に移動して図示されることになる。さて、 $T\sqrt{g/h}=10$ の場合、天端高を5ケース変化させたが、実験値のちらばりが大きいために、越波のあるときの静水面上の波の峯高に対する天端高の影

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所



図一 静水面上の波の峯高に対する実験結果と理論曲線との比較

響ははっきりとわからないが、波高が増大して越波量が多くなると、越波のない場合に比べて、実験値は若干小さくなる傾向を示しているようである。また、 $T\sqrt{g/h}=14$ および 18 の場合には、今回の実験の天端高の範囲では、越波のない場合の実験値と同じ傾向を示しており、越波量の増大する h/H の値の小さい領域でも、その傾向はほとんど変わらない。以上の考察から、静水面上の波の峯高に関しては、越波による波高の減少量を考慮すれば、実用上完全重複波とみなすことができると考えられる。

b) 鉛直同時波圧分布

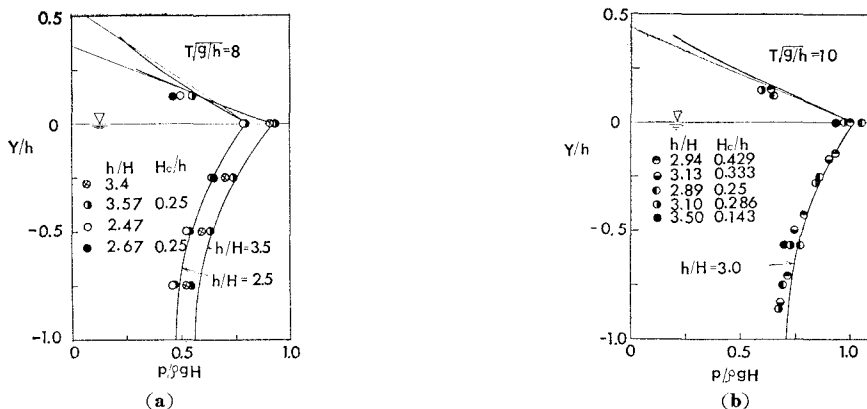
図-2 は、波の峯がきたときの同時波圧の無次元量 $p/\rho g H$ の鉛直分布を示したものである。図中の実線は第4次近似解を表わす。このうち、図-2 (a) は $T\sqrt{g/h}=8$ のときに越波の有無による波圧変化を検討しようとするものであるが、この図によれば、天端高にくらべ、かなり波高が増加しても越波による波高の減少を考慮すれば、著しい波圧変化は見られず、越波の影響は見かけ上現われないようであって、むしろ完全重複波の理論曲線と比較的よく一致していることがわかる。

(b) は $T\sqrt{g/h}=10$ のときの波圧分布に対する天端高の影響を示したものであるが、今回の実験の天端高の

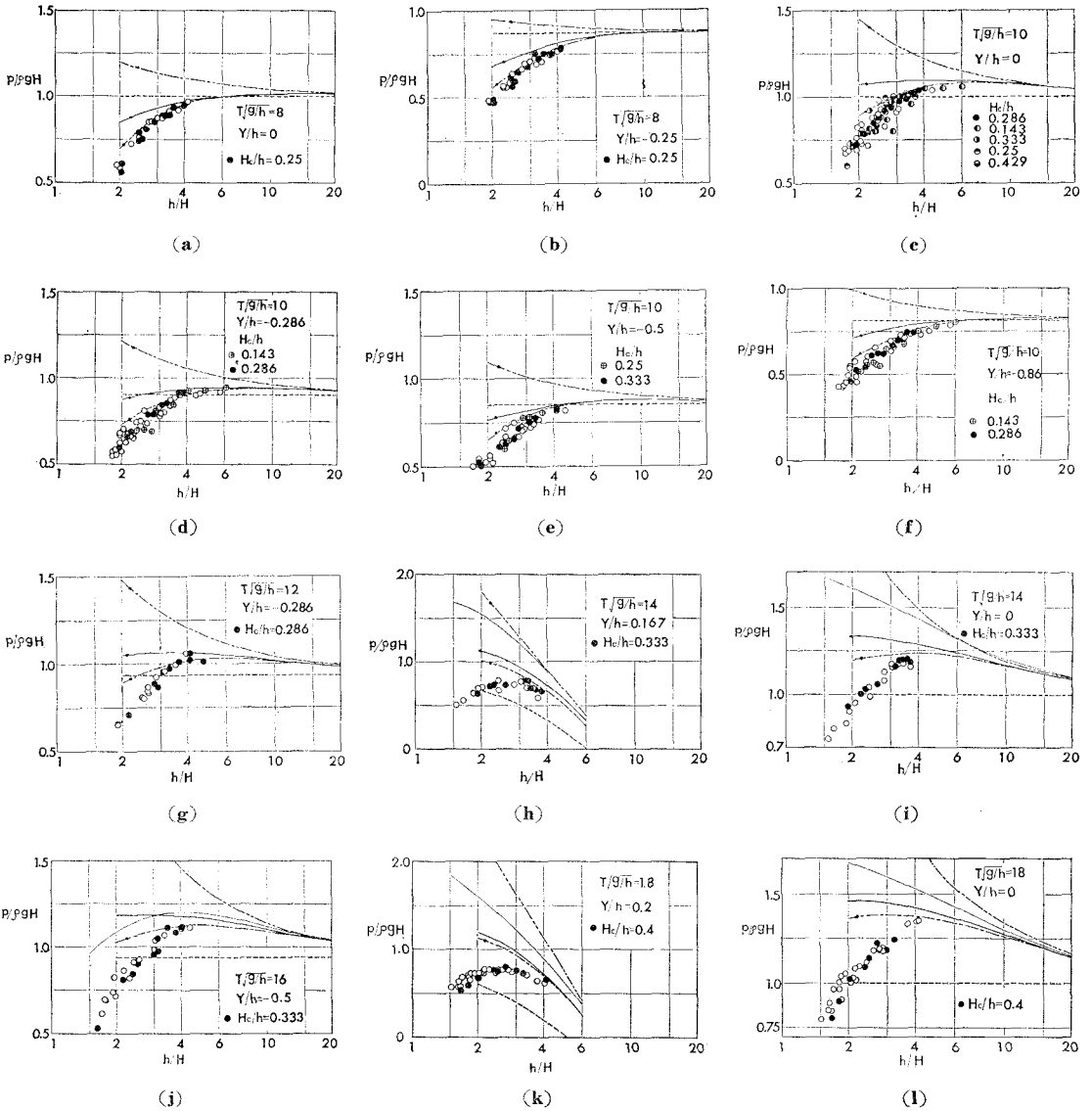
範囲では、その変化の範囲が小さいため、波圧分布にあまり影響がみられず、理論曲線とほぼ一致している。ただ、 $H_c/h=0.143$ のときには、波高にくらべて天端高がかなり低くなっており、波圧分布の実験値は、越波による波高の減少量を考慮しても理論曲線より小さくなっている。

次に、各測定点での波の峯に対応する $p/\rho g H$ と h/H との関係を示したのが図-3 である。図中の点線は第1次近似解であり、ほかの曲線は図-1 と同じである。

図-3 のうち $T\sqrt{g/h}=8$ の場合には、波高のあまり大きくない領域では越波の有無にかかわらず、第4次近似解の理論曲線との対応がきわめてよい。しかし、天端高にくらべて波高が増大し、砕波波高近くになると、壁面での波高の減少を考慮しても越波しない場合より若干実験値が小さくでている。これは越波量の増加により、波動の場の性質が重複波的なものから部分重複波ないし進行波的なものに変化したためと思われる。また、 $T\sqrt{g/h}=10$ のときには、 $T\sqrt{g/h}=8$ のときと同様のことがうかがえるが、とくに(c)を見ると、次のことがわかる。すなわち、越波のある場合の波圧は h/H の値の大きいときには、越波のない場合のそれにくらべても変わらない



図二 波の峯における鉛直同時波圧分布の実験値と理論曲線との比較



図一 波の峯における無次元波圧強度の実験値と理論曲線との比較

いが、 h/H の値が減少すれば、前者にくらべて後者は小さくなる。しかも、その傾向の現われる限界の h/H の値は、無次元天端高 H_c/h の値が小さいときには大きくなっている。このことは越波のある場合と同様に、 H/H_c が越波による波圧の減少を支配する重要なパラメーターであることを示していると思われるが、この点に関しては実験の制約上、十分な考察を行なうことができなかった。さらに、 $T/\sqrt{g/h}=12, 14, 16$ および 18 としだいに長周期になるにつれて、越波の有無にかかわらず、有限振幅重複波理論の適用限界が現われて、実験値との適合性が悪くなり、しかもその限界の h/H の値は $T/\sqrt{g/h}$ の値が増加するほど、大きくなっている。

c) 水位および波圧の時間的変化

図一4 は波の周期や水深などの水理特性が同一の波について、越波する場合と越波しない場合の壁面での水位および波圧の時間的変化を示したもので、白丸および黒丸は越波のない場合とある場合に相当する。これらのうち (a) は $T/\sqrt{g/h}=8$ の場合であり、天端高 $H_c=5\text{cm}$ のときに波高の増大に伴い、越波によって水位および波圧の時間的変化がどのように変わるかを示すものである。この結果によれば、水位変化については、越波の有無にかかわらず、完全重複波として扱えば、実験値と理論曲線との対応は比較的よい。波圧変化についてみると、この図より明らかなように、絶対値は同一の波の条

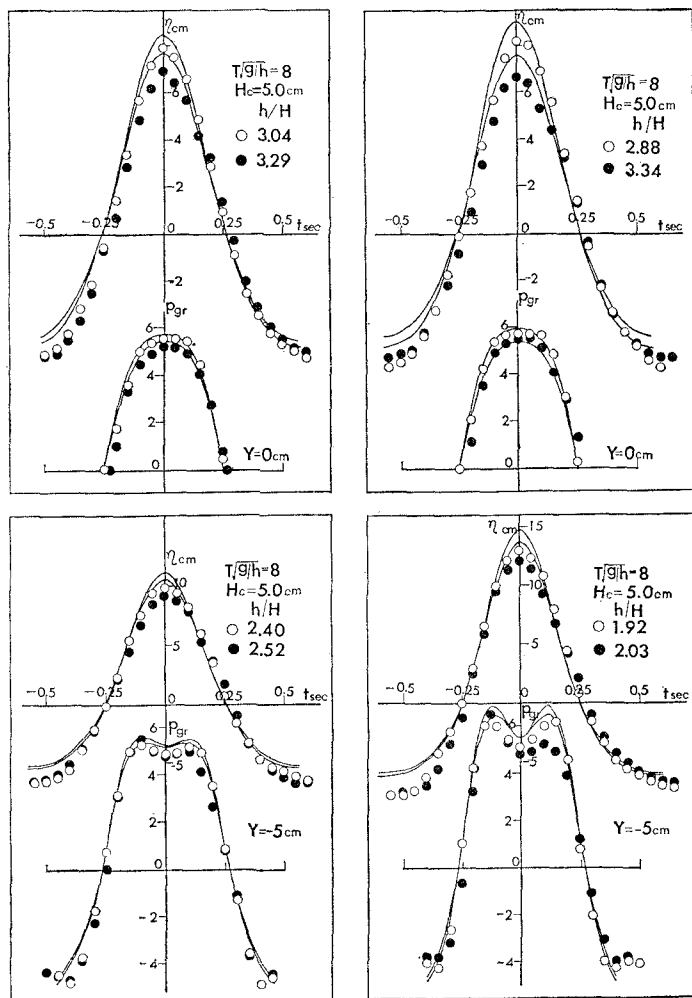


図-4 (a) 水位および波圧の時間的変化の実験値と理論曲線との比較

件に対して越波のない場合に比べて減少しているが、壁面での波高の減少を考慮すると一般に実験値と理論曲線とはよく一致している。しかし波高がかなり大きくなると、実験値と理論曲線との対応が悪くなり、越波のある場合には、双峯型波圧波形の第2のピークがくずれて非対称の波形が現われ、しかも、その傾向は波高が大きくなるほど著しい。とくに、砂波近くのきわめて波高の大きい場合には、この図ではよくわからないが水位の記録は若干ひずんでいて、対称性が失われていた。また、(b)は $T\sqrt{g/h}=10$ の場合に波圧に対する天端高の影響を調べるために、2種類の天端高について水位および波圧変化を示したものであり、天端高の大きい場合にはこの周期に対し越波の有無にかかわらず、実験値と理論曲線の対応はほぼついていて、天端高が低くなると、越波のある場合、波圧変化については上述した波圧波形の非対称性が現われ、このことから天端高と

波高との関係が越波時の波圧現象に対し重要なパラメーターであることが推論される。

d) 壁面における波高の減少

すでに繰り返し述べたように、同一条件の波でも越波のある場合には、越波のない場合に比べて波高が減少する。そこで、この越波による波高の減少量を評価するため、無次元量 H'/H_c と H/H_c との関係を示したものが図-5である。ここに、 H' は越波のある場合の壁面における水位変動の振幅であり、越波のない場合のそれと区別するため、とくに H' と記号したものである。さて、この図に示したような無次元量を用いると、越波による波高減少は全体的にほぼ図中の細い実線で表わされ、実験値のちらばりのため、周期の影響ははっきり見出されない。その結果、越波に伴う波高減少量は壁面における水位変動の振幅と天端高の比 H/H_c によって支配されることがわかる。

以上、越波のある場合の波圧に関しては、すでに著者ら⁴⁾が調べた有限振幅重複波理論の適用範囲内では、 H/H_c の値があまり大きくないかぎり、越波による波高の減少を図-5 にしたがって考慮することによって、便宜的ではあるが、有限振幅

重複波の理論解によりある程度その特性が解明できると考えられる。しかしながら、こういった問題の本質的な

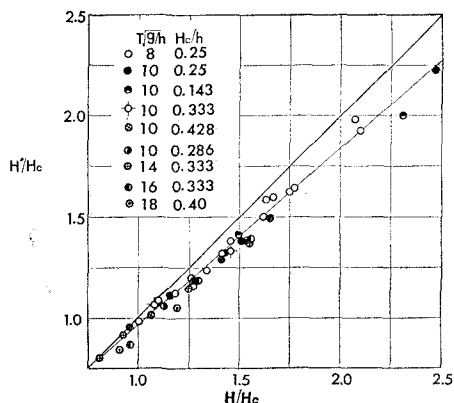


図-5 越波による壁面での波高の減少

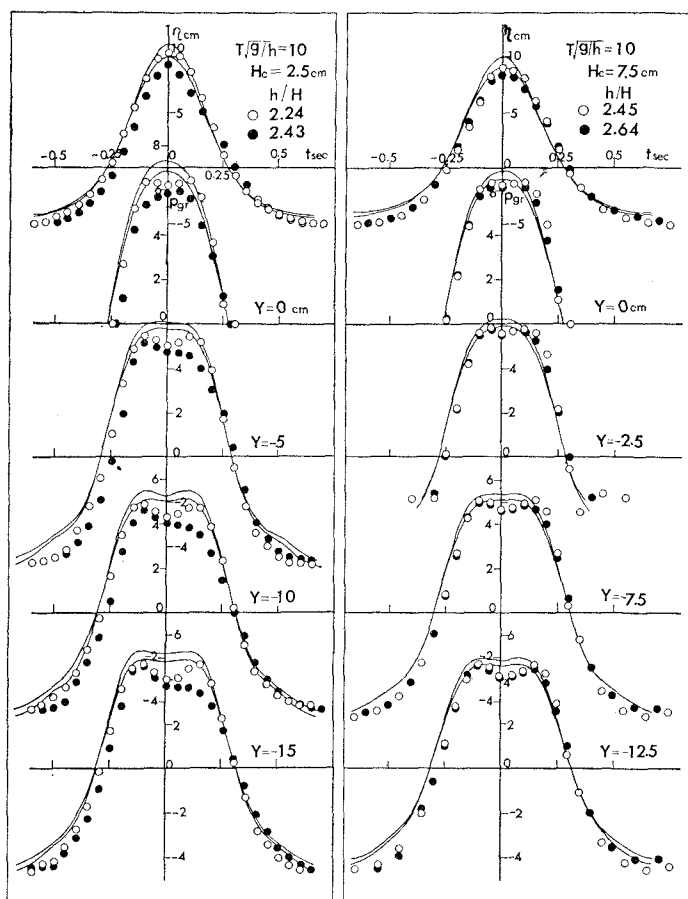


図-4 (b) 水位および波圧の時間的変化の実験値と理論曲線との比較

解明には、たとえば壁面近傍の波形など波動の場の性質をさらに詳細に検討する必要がある。

(2) 越波量に対する考察

越波のあるときの波圧の実験に際して、重複波領域における直立壁の場合の越波に関する若干の実験結果がえられたので、これを従来の実験結果と比較し、その特性を明らかにしておこう。越波に関しては、わが国では京大防災研での一連の研究^{6),7)}を始めとして、主として実験的研究が行なわれ、越波機構の解明に対して幾多のすぐれた成果をあげてきた。しかしながら、これらの成果の整理の仕方は、著者らの場合のような副次的な実験では、実験条件の対応が十分につかず、系統的な比較を行なうことができない。そこで、著者らの実験条件の場合でも適切に比較検討できるものとして、合田ら⁹⁾が従来の越波量に関する多くの資料を整理して提案した規則波に対する直立護岸の越波流量曲線図を用いることにした。さて、図-6 は単位時間単位幅あたりの越波量の無次元量 $q/\sqrt{2gh^3}$ と沖波波高の無次元量 H_0/h (H_0 = 沖

波波高) の関係で実験結果を整理したものであり、図中の $H_c/h=0.2, 0.25, \dots$ に対して示した曲線は、合田らにより与えられた越波流量曲線のうち、重複波領域に相当するものを図示したものである。このうち (a) は $T\sqrt{g/h}$ の値が同一の場合に対して、無次元元端高 H_c/h の越波量に対する影響を調べたものであるが、合田らの越波流量曲線との対応は比較的良好で、当然のことながら、重複波領域では、元端高が低いほど越波量は増大している。次に、(b) および (c) は無次元元端高がほぼ同一の場合に越波量に対する周期の影響を示すものである。合田らは越波流量曲線の作成にあたり、 $H_0/L_0 > 0.01$ (L_0 = 沖波波長) の条件を設けると、周期の影響が実験値のばらつきにかくれてしまい、明瞭な差がないとして、隣接する曲線の幅程度のばらつきを含めて越波量に対する周期の影響を無視している。このことは、著者らの実験においてもほぼあてはまり、 $T\sqrt{g/h} \leq 12$ では $H_0/L_0 > 0.01$ となって、越波流量曲線との対応は比較的良好だが、(b) および (c) のように $T\sqrt{g/h} \geq 14$ および $H_0/L_0 < 0.015$ では、周期の影響が顕著になり、周期の増大とともに越

波量が増大し、周期が長い場合の越波量の算定には、この周期の影響を考慮する必要がある。以上、著者らの実験において、合田らにより提案された規則波に対する直立護岸の越波流量曲線は、重複波領域では、周期が長い波の場合を除いてほぼ妥当な結果を与えることが確認された。

4. 結 語

本研究では、越波のある場合の重複波圧に関する実験を行ない、静水面上の波の峯高、波の峯における壁面での波圧強度ならびに水位および波圧の時間的変化について、実験値と有限振幅重複波理論による理論曲線とを比較し、また同時に本実験によって得られた越波量に関する実験結果を従来のものと比較検討することによって、次の結論をえた。

(i) 静水面上の波の峯高に関しては、 $T\sqrt{g/h}$ の値が小さいとき、越波のある場合の実験値は越波による波高減少を考慮しても、越波のない場合のそれにくらべて

