

波浪に係わる水理実験の変遷

高山知司・安田誠宏*

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

海岸工学講演会で発表された論文の中から、水理実験に関するものを抽出し、波浪に係わる水理実験の変遷を調べることによって、水理実験の今後の方向を検討した。その結果、実験論文数の割合は、今後減少していく方向にある。その中でも、理論あるいは数値シミュレーション法の妥当性を調べる検証実験は、電子計算機の処理速度の飛躍的な発達とともに最も多くなっており、今後も増加する傾向にある。実験施設を整備していくにあたっては、一様水路では不規則波造波装置が不可欠であり、多方向不規則波造波機能を有した平面水槽の整備も併せて進めることが望ましい。

キーワード: 海岸工学講演会, 水理実験, 検証実験, 多方向不規則波, 平面水槽

1. 緒 論

海岸工学講演会は1953年(昭和29年)に第1回が神戸で開催されてから、昨年(平成11年)米子市における開催で46回目を数える。海岸工学の研究においては、海の波を実験室内に再現することが重要であり、造波装置の発達はこの方向を目指して進められてきた。また、過去において、水理実験が海岸工学の発展に及ぼした効果は計り知れないほど大きい。

本研究の目的は、海岸工学講演会で発表された論文の中から、水理実験に関するものを抽出し、波浪に係わる水理実験の変遷と経済発展などの時代背景との関係を調べることによって、水理実験の今後の方向を明らかにすることである。

2. 分類方法

海岸工学講演会講演集(1~16回)、海岸工学講演会論文集(17~35回)および海岸工学論文集(36~46巻)の中から、水理実験を行っている論文を

すべて抽出した。まず、実験の内容を、1) 理論や数値計算の妥当性を検証することを目的とした実験、2) 波浪に関する実験(越波、砕波など)、3) 波力・波圧に関する実験(浮体の動揺も含む)、4) 漂砂および洗掘に関する実験、5) 潮流および拡散に関する実験、に分類した。そして、実験に用いた波浪について、規則波および一方不規則波、多方向不規則波、孤立波に分けて調べた。さらに、実験水槽についても一様水路か平面水槽かを分類した。

3. 水理実験の変遷

3.1 実験論文の変遷

Fig.1は全論文数と実験論文数の変遷を示したものである。これによると、全論文数は1980年代を除くと年々増加する傾向にある。一方、実験論文数についても同様に年々増加する傾向にあるが、全論文数の増加に比べるとその増加割合は小さい。

そこで、その割合について詳しく検討したところ、第10回(1963年)から第29回(1982年)までは常に約50~60%を占めていたものが、それ以降は

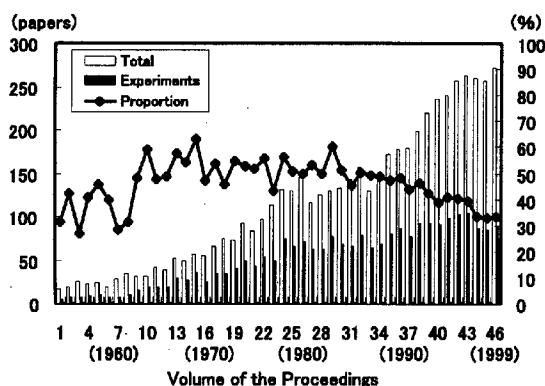


Fig.1 Historical change of numbers of the papers and hydraulic experiments

年々減少しており、ここ3年間に至っては約33%と非常に少なくなっている。これは、波浪変形や波の遮蔽に関する研究が模型実験中心だったものが、数値計算による検討に変わったこと、漂砂や生態に関する研究においては相似則の適用が難しいため、水理模型実験から現地観測へと研究の方向が動いたことが原因と考えられる。現地観測施設としては、建設省土木研究所管轄の漂砂観測用栈橋は、阿字ヶ浦海岸に1972年から1976年にかけて建設され、それ以降現地観測が行われている。また、運輸省港湾技術研究所の波崎観測所は1981年に着工され、1986年から現地観測が開始されている。さらに、京都大学防災研究所の大渦波浪観測所でも1986年に観測専用T型栈橋の使用が始められている。

現地観測では外力条件を制御することができないために、どの要素が最も大きな効果を及ぼしているのか判定しにくい。このことから、今後は外力の制御が容易な水理模型実験に研究の方向が再び移ってくるのではないかと考えられる。一方、数値シミュレーションの精度も向上してくるので、ある部分の実験は少なくなるであろう。

3.2 実験内容

Fig.2は実験内容ごとに分類した実験論文数の全論文数に対する割合を示したものである。

第二次世界大戦後間もなくの期間は、戦争による国土の荒廃と、相次いで襲ってきた伊勢湾台風などの巨大台風や地震による厳しい自然災害頻発の時代であった。こうした自然災害に対する国土保全が最優先課題となり、漂砂に関する研究がまず実験を行うことによって検討された。

その後、高度経済成長期に入ると太平洋沿岸各地で港湾施設の整備が急速に進められた。そこで、十分な港内静穏度を確保するための防波堤配置を決定

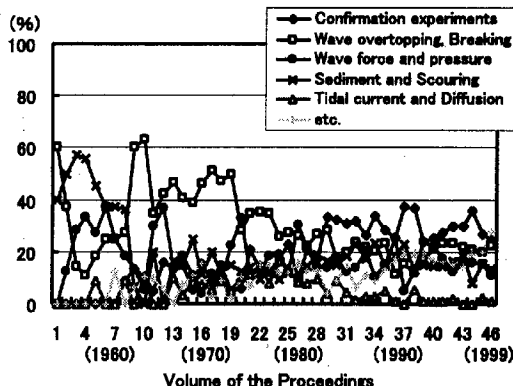


Fig.2 Distribution of the experimental contents

することが重要となり、遮蔽実験などの波浪に関する実験が非常に多くなった。

1980年以降になると、検証実験の割合が増加し、最も多くなっている。これは、電子計算機の速度の飛躍的な発達とともに数値計算手法が数多く提案され、計算結果の妥当性を検証することを目的として実験が行われるようになったためである。こうした検証実験の割合は、今後も増加する傾向にある。

波力・波圧に関する実験についてはややばらつきがみられるが、その割合はそれほど変化していない。これらの分野は非線形性が強く、実験の必要性が高いためであろう。

潮流・拡散に関する実験については、1970年代～80年代中頃は約10%を占めているが、それ以降はほとんど実験が行われていない。これは、高度経済成長期の工場や家庭からの排水による港内の汚染や、発電所の建設による温排水が問題となった時期と一致している。こうした問題への対策が、まず水理実験を行うことによって検討され、その結果、数値計算手法などがある程度確立されたことや、実際の現地での拡散係数の値についての情報が少ないために、開発すべき研究内容が薄くなったことが、実験論文数の減少に影響を及ぼしたと考えられる。

3.3 実験に用いた波浪の種類

Fig.3は実験に用いられた波浪の種類とその割合について示したものである。水理実験が始められた当初は、そのほとんどが規則波を用いたものであった。また、仕切の両側に水位差を持たせ、仕切を瞬時に取り除くことによって生じる孤立波を作用させただけの簡単な実験もいくつかみられた。

1960年代になると実験水路内に不規則波を造波しようとする試みがなされるようになった。わが国において最初の不規則波造波装置は、1963年（昭和38年）に運輸省港湾技術研究所に設置されたビ

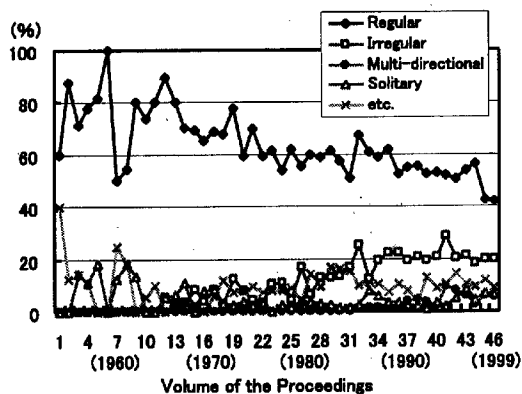


Fig.3 Experimental waves

ストン型油圧式造波装置で、周波数が異なる10台の正弦波発生器の信号を重ね合わせて造波するものであった。成分波の数は少ないが、それでも波の非線形形で比較的滑らかなスペクトルの波が発生できた。1960年代は船舶関連の試験水槽を中心に次第に普及し、1970年代になると海岸・港湾関連の実験水路・水槽に普及するようになり、最近では不規則波を用いた実験の割合は約20%ほどを常に維持している。

1980年代に入ると、斜め波の造波原理を応用して、多方向不規則波造波装置がSalter (1981)によって開発された。この方法は、幅の狭い造波板を並べて位相をずらして起こした斜め波を成分波にして、異なる成分波を同時に発生させて多方向不規則波を造波するものである。造波された斜め波の特性については十分な検討がなされておらず、簡単な原理が示されているに過ぎなかった。そこで、斜め波の造波理論(Takayama, 1984)の確立が行われた。そして、こうした理論をもとに、わが国最初の多方向不規則波造波装置が1983年(昭和58年)に運輸省港湾技術研究所に設置された。多方向不規則波造波装置の導入は急速に進み、1990年までにわが国の大学や水理研究所の多くに導入された。この図においても、1990年代に多方向不規則波を用いた実験論文がいくつかみられるようになっている。

しかしながら、多方向不規則波造波装置が急速に導入されたにも拘わらず、一方向不規則波造波装置が導入されたときとは異なり、多くの新しい知見が得られたとは思えない。多くの知見は、それまでの知識から類推できるものであった。一方向不規則波が導入され始めた時期は、不規則波に対する情報が増え、標準的な周波数スペクトルや方向分布形が提案されるようになった時期であり、また、港湾の技術上の基準も改定され、波を不規則波として扱うようになった時期でもある。そのため、新たに開

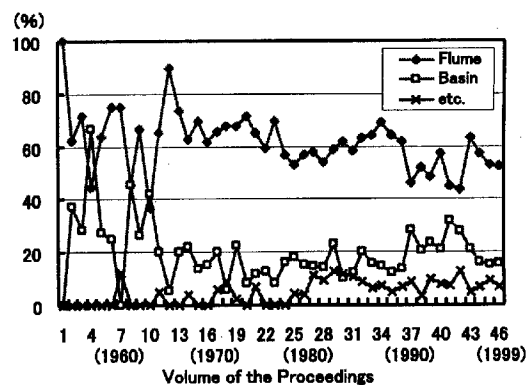


Fig.4 Experimental facilities

発された一方向不規則波造波機を用いて精力的に研究が行われた。多方向不規則波が導入された時期は、海の波の多方向性についての知識も充分蓄積され、海の波を多方向不規則波として取り扱う数値計算法も確立され、多方向不規則波になったらどのようなことが起きるかということが推測できるまでになっていた時期でもある。そのため、多方向不規則波造波装置が新たに導入されても、すぐに新しい知見は得られず、その結果として一方向不規則波造波装置の導入によって得られた成果より、多方向不規則波造波装置による成果が少なく感じてしまうのであろう。

なお、漂砂実験に用いられる振動流や風洞水槽における風波などは、その他の波浪として分類した。

3.4 実験水槽

Fig.4は実験に用いられた水槽について分類したものである。最初は主な研究目的が国土保全であり、漂砂が対象であったため、平面水槽を用いた実験が比較的多かった。1960年代後半からは一様水路を用いた実験が中心となり、その割合は約60%前後で1990年までほぼ一定であった。

1990年代になると平面水槽を用いた実験が30%程度まで増加している。これは、多方向不規則波造波装置が導入され始めたこと、数値計算法が進歩して3次元でのシミュレーションが可能になり、その妥当性の検証が必要となったことなどが原因と考えられる。

なお、その他とは振動流水槽などであり、粒子追跡法が確立されたのに伴って、1980年以降約10%前後を常に占めている。

4. 実験の目的による分類

2. 分類方法で述べたように、実験の種類によって水理実験を行った論文を分類したが、それぞれに

ついて実験波浪および実験水槽の変遷を詳しく検討した。

4.1 検証実験

まず、検証実験についてその実験波浪と実験水槽の変遷を Fig.5 に示した。

検証実験が始められたのは 1960 年頃からであり、海底摩擦による波高減衰や重複波、有限振幅波など、波の機構に関するものが主な研究対象であった。当初は、理論計算式を摂動法などを用いて逐次計算を進め、得られた結果を確認する程度であった。その後、越波や碎波、波力など、構造物の設計に影響を及ぼす、より複雑なものへと研究対象は広がっていった。これは、基礎実験によって波の機構がある程度明らかにされ、理論計算式の確立が進んだためであろう。

実験波浪については規則波が中心であり、最も大きな割合を占めている。当初は、理論式においては波の不規則性まで考慮できておらず、比較対象として規則波を用いざるを得なかった。さらに、規則波の方が条件を単純化することができ、不規則波より

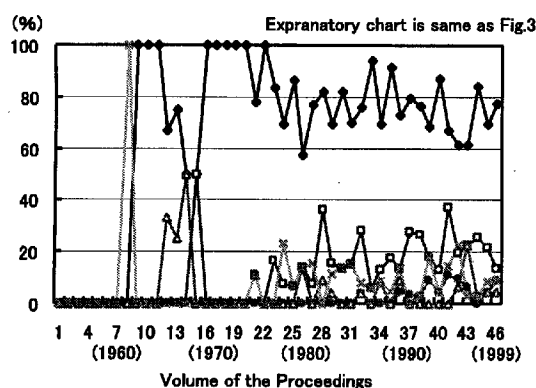
も結果を比較しやすく、計算時間も短くて済むためであろう。

1980 年代以降、不規則波によるものも 20% 程みられるようになってきている。研究内容としては、港内の波高分布や屈折、回折、浅水変形など、それ以前から模型実験による検討がなされてきたものであった。実験より得られた結果から数値計算手法が確立され、さらに不規則波を適用できるように拡張されたため、その妥当性の検証に不規則波が用いられるようになったのであろう。

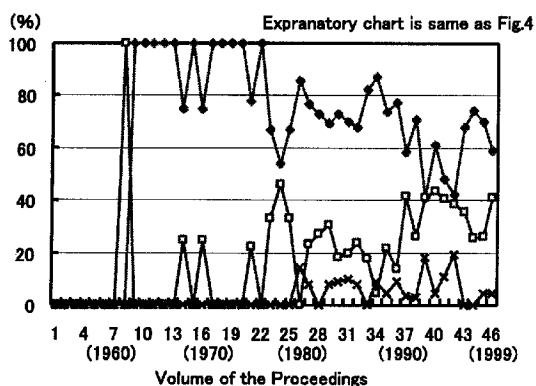
また、90 年代には多方向不規則波を用いた検証実験も行われるようになってきている。まず最初は、多方向不規則波の造波信号の発生法に関する研究（高山ら, 1989）が行われた。造波信号をシミュレートする手法としては二つの方法がある。一つはシングルサンメーション法と呼ばれ、多方向不規則波を構成する周波数の異なる各成分波がそれぞれ異なる波向きを持つものとして、これらの成分波を多数重ね合わせることによって造波する方法である。もう一つはダブルサンメーション法と呼ばれ、同一の周波数に対して波向きの異なる成分波が多数存在するものとして、これらの成分波を重ね合わせることによって造波する方法である。検証実験の結果、ダブルサンメーション法では位相ロッキングが起こって、目標とする波より方向分布が広がる可能性があることが明らかになり、現在ではシングルサンメーション法が一般的な手法として取り入れられている。

さらに、数値計算機の処理速度は飛躍的に向上し、少々複雑なプログラムであっても解析が可能になった。波浪変形計算手法は急速に進歩し、現在ではかなりの精度で実海域に近い波を再現できるようになった。こうした数値シミュレーションの進歩と共に、その研究対象は、浮体の動揺（池野ら, 1995）、越波（平石ら, 1996）、漂砂（池野ら, 1998）など多岐にわたるようになった。今後も計算機の性能が向上していくことは間違いなく、検証実験の割合は増加すると思われるが、実験に用いられる波浪の割合は、規則波が 60~70%、一方向不規則波 20~30%、多方向不規則波が 10% 程を維持し、それほど大きくは変化しないであろう。

実験水槽については、1980 年までは一様水路によるものがそのほとんどを占めていた。断面 2 次元プログラムの方が空間分布を考慮する必要がなく、式の展開も簡単のために、水路による実験が主に行われたのであろう。しかし、1980 年以降は平面水槽の割合が増加しており、ここ 10 年間では約 40% とかなり多い。近年、Boussinesq 方程式を用いた実海域



(a) Experimental wave



(b) Experimental facilities

Fig.5 Confirmation experiments of the validity of theoretical analysis and numerical simulations

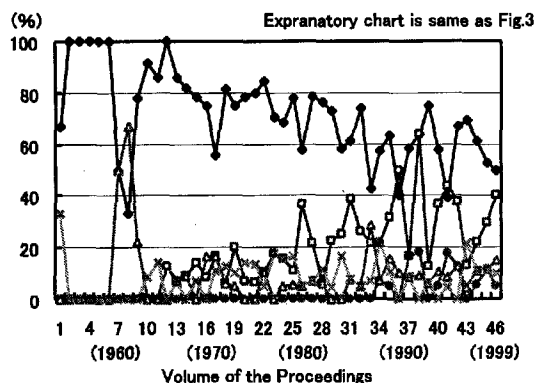
の波浪変形を再現することのできる3次元プログラム (Sørensen et al.,1998) など、より高度なシミュレーションプログラムの開発も進んでおり、今後、平面水槽による検証実験の割合は増加し、一様水路とほぼ同じ数になるのではないだろうか。

4.2 波浪関連

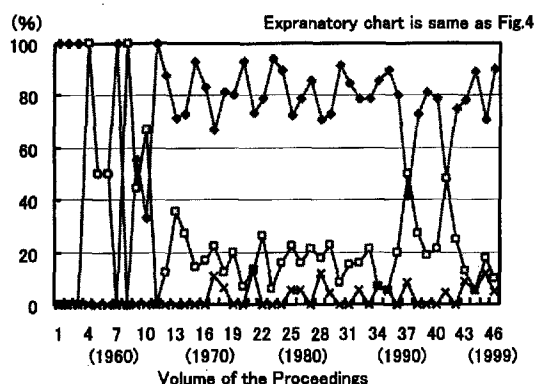
Fig.6 は越波や砕波、波浪変形、港内静穏度などの波浪に関する実験について、実験波浪および実験水槽の変遷を同様に示したものである。

実験波浪については、最初こそ規則波がほぼ100%であったが、不規則波造波装置が開発されるとすぐに不規則波が用いられ始めている。波浪に関する研究にとっては、実際の海の波を再現することが最も重要な課題であった。さらに、80年以降不規則波を用いた実験論文の割合が常に20~40%を維持していることから、不規則波を用いて実験を行う必要性の高さがわかる。

越波量は護岸や堤防が波が越える水量を示しており、構造物の形状や波形、不規則性などに強く影響され、非常に非線形性が強いために数値計算をする



(a) Experimental wave



(b) Experimental facilities

Fig.6 Wave overtopping, Breaking, Wave transformation, Sheltering

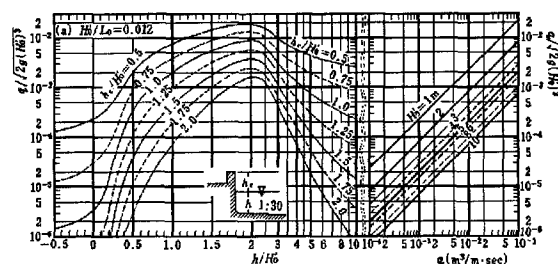


Fig.7 Goda's figure for the estimation of wave overtopping amount over vertical sea walls

ことは不可能に近く、たとえできたとしても不規則波実験による検証が必要である。さらに、越波量は波高の大きさによって変化するために波の不規則性の影響が強く、不規則波の波群に対する期待値として期待越波流量という概念が導入された。そして、規則波実験による越波量から波高分布を考慮して、不規則波としての平均越波流量に変換する方法が検討されていた。しかし、不規則波造波装置が導入されることによってこのような変換が必要でなくなり、測定した越波量の平均値が期待越波流量として求まるようになった。合田ら (1975a) によって提案された不規則波実験の越波流量算定図は、護岸等の天端高を設定するのに利用されている。Fig.7 にその一例を示す。

防波堤を越波した波が背後の水域に落下して、それによって生じる波、あるいは堤体下部のマウンドを通過して背後に伝わる波、堤体を通過して背後に伝わる波が伝達波である。堤体あるいはマウンドを通過して伝わる波については、半理論的な取り扱いも可能になってきているが、越波による発生波については非線形性が強く、不規則波による実験に頼らざるを得ないのが現実である。

回折や屈折、浅水変形は線形的変形が主体であるために、それぞれの成分波の変形をエネルギー的に重ね合わせるだけで不規則波としての変形が計算できる。しかしながら、砕波変形は非線形性が非常に強い現象である。このような非線形性の強い砕波変形を計算するにあたっては、砕波によるエネルギー逸散量を設定しなければならない。エネルギー逸散量を推定する方法として、経験的な砕波指標を用いる方法や水粒子速度と波速の関係から設定するもの、砕波発生率から設定するものなど多くの手法が提案されているが、どれを用いても極端に大きな差はなく、実験値とも比較的良好に一致することが明らかになっている。このような砕波による波浪変形に関して提案された計算法の妥当性についての検証も、不規則波造波装置が開発されたことによって可

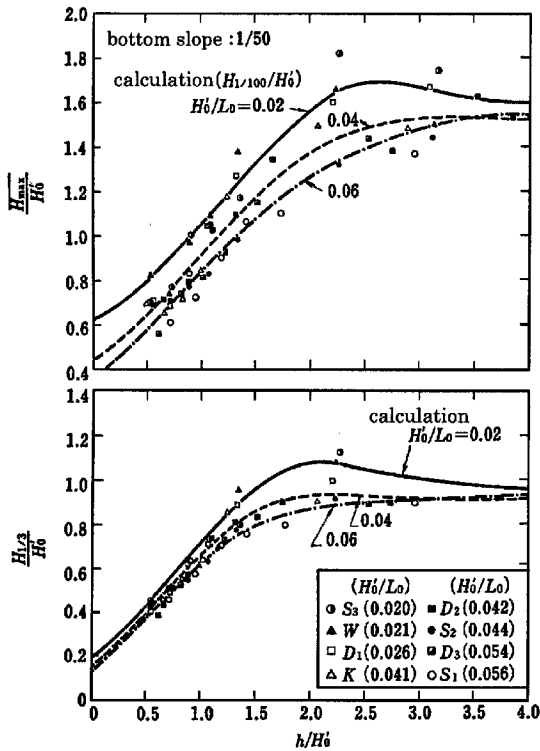


Fig.8 The distribution of $H_{\max}$ and $H_{1/3}$

能になった。逆に、不規則波造波装置が開発され、実験による検証が可能になったために、砕波によるエネルギー逸散の経験式が提案できるようになったといっても過言ではない。

次式は合田（1975b）により導かれた砕波限界を考慮した波高変化の近似式である。

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} \left(1 + 15 \tan^{4/3} \theta \right) \right] \right\} \quad (1)$$

ここに、 θ は海底面が水平面となす角で、 $\tan \theta$ が海底勾配を表す。また、Fig.8 は不規則波実験における $H_{\max}$ および $H_{1/3}$ の変化と計算結果とを比較したものである（合田,1975b）。全体として実験値と計算値の一致は良好である。さらに、現地観測値との比較も行っており、波高変化の傾向がほぼ観測値と一致することも明らかにされている。

砕波による波高減衰が起きると、運動量フラックスが不平衡になり、ラディエーションストレスによって平均海面に勾配が生じる。その結果、砕波帯内では岸側に近づくほど平均水位は増大する。この現象をセットアップと呼んでいる。不規則波が入射すると、このセットアップの量もゆっくり変動する。このゆっくりした水面変動は既に現地で観測され、サーフビートと呼ばれていた。これも実験によって確認

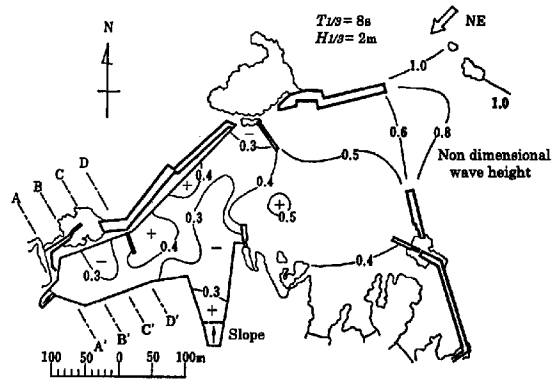


Fig.9 The distribution of measured wave heights in the harbor by irregular wave

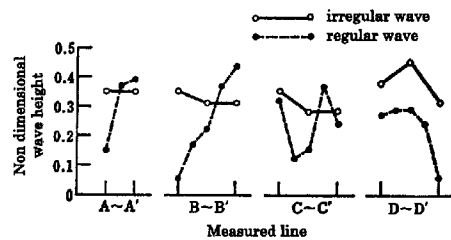


Fig.10 The measured wave heights in harbor by regular and irregular wave

され、合田（1975b）によって次式のような実験式が提唱されている。

$$\zeta_{\text{rms}} = \frac{0.01 H_0'}{\sqrt{\frac{H_0'}{L_0} \left(1 + \frac{h}{H_0'} \right)}} \quad (2)$$

ここに、 ζ_{rms} はサーフビートの波形の標準偏差値である。

所要の港内静穏度を満足させるのに必要な防波堤配置を決定するための実験では、当初は規則波を用いて行われていた。規則波実験では、港内の岸壁からの反射波によって重複波が起き、波高を測定している場所によって波高は大きく変化する。そのため、波高を細かく測定して平均化し、平均値をその地点の波高とする方法が採られていた。Fig.9 は不規則波に対する港内波高を測定した例（合田ら,1977）であり、等波高比線図で表したものである。図中の A ~ D の側線沿いの波高比を求めて規則波の場合と比較したものが Fig.10 である。不規則波実験では、数多くの周期の異なる成分波を含むために、規則波ほど場所的な波高変化は少なく、その地点で測った波高がそのまま現地における波高であるとみなすことができる。このように、規則波から不規則波を用いるようになったことで、波高の場所的な変化に気を使

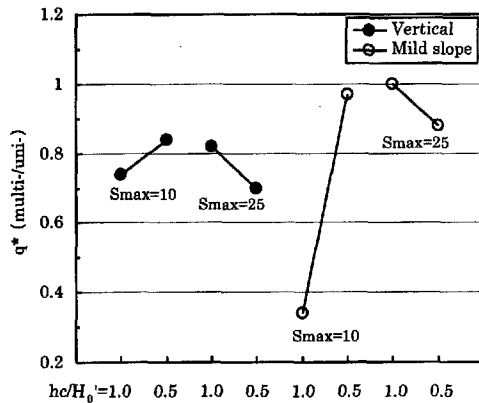


Fig.11 The difference of wave overtopping amount between uni- and multi-directional irregular wave

う必要性が少なくなった。しかしながら、港内静穏度には波の方向分布が周波数分布より大きな影響を与えることがわかってきている。こうした問題への対応が今後必要であり、不規則波実験、数値計算の両面から行われていかなければならない。

90年代に入り、多方向不規則波造波装置が開発されるのに対応するように、波浪に関する実験でも多方向不規則波が用いられ始めている。

水深が浅い場所では、波は屈折によって方向分散性が小さくなり、一方向不規則波のような挙動をするが、水深が深いと波の多方向性が顕著になり、越波に対する影響が強くなると考えられる。平石ら(1994a)は多方向不規則波を用いた実験を行い、越波量に及ぼす波の多方向性の影響を検討している。その結果、Fig.11に示すように、多方向波を作用させた場合には、一方向波に比べて越波流量は約2割程度低減することが明らかになった。これは、多方向波が有する斜め入射波成分による影響であり、数値シミュレーションによっても確認されている。

円形浅瀬や楕円形浅瀬による波の変形では、規則波の場合、波の屈折と回折現象で場所的に波高が大きくばらつくが、一方向不規則波になると、周期が異なる波が多く含まれるために、場所的な波高のばらつきは均されて小さくなる。さらに、多方向不規則波の場合には、波の進行方向がそれぞれ異なるためにさらに波高のばらつきは小さくなる。

以上のようなことは、多方向不規則波を用いた実験によって新たにわかったわけではなく、多方向不規則波を用いた波浪変形計算によって既に予測されており、このような実験はそのことを追認したに過ぎない。しかしながら、多方向不規則波によって明らかにしていかなければならない課題も残っており、今後は、多方向波による実験の割合ももう少し増加

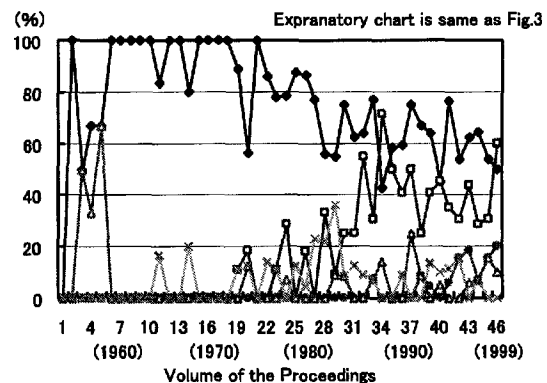
し、20%以上になると思われる。とはいえ、一方向不規則波による実験が主で40~50%を占め、残りが規則波になるだろう。したがって、実験施設を整備していくにあたっては不規則波造波装置が不可欠であるといっても過言ではない。

また、実験水槽については一様水路が主であり、常に80%前後を維持している。平面水槽も港内静穏度や回折、多方向不規則波による影響などの検討を行うのに用いられており、常に約20%前後みられる。今後も、この割合はほとんど変わらないと思われる。

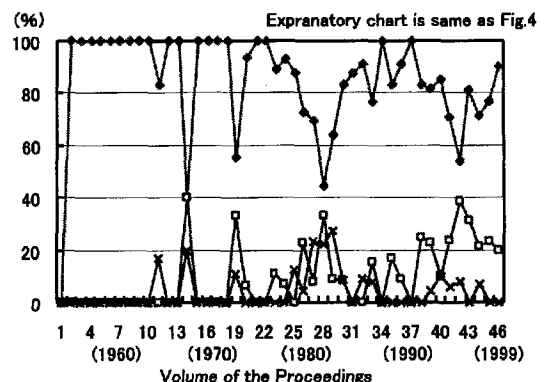
4.3 波力・波圧

波力や波圧、浮体の動揺などに関する実験についても同様に、実験波浪および実験水槽の変遷をFig.12に示した。

1970年代半ばまではほぼ100%規則波が用いられていたが、不規則波造波装置が開発されてからは不規則波の占める割合が急激に増加しており、1985年頃からは40~50%を維持している。Fig.6(a)に示した波浪関連の実験と比較しても、規則波から不規則波への変化がより顕著に現れている。不規則波への



(a) Experimental wave



(b) Experimental facilities

Fig.12 Wave force and Wave pressure

移行が急速になされた原因としては、設計波高として不規則波群中のどの代表波をあてはめるかが明確でなく、1/10 最大波や有義波を用いることの妥当性に対する議論が多かったこと、衝撃碎波力が防波堤の機能に及ぼす危険性が示唆されていたことなどが挙げられる。

波力に対して消波ブロックが安定しているのに必要な所用重量は、Hudson 公式によって算定されており、その公式中の波高としては有義波高が用いられていた。そのため、消波ブロックの安定性の実験では、有義波高に対応した規則波を用いて行われていた。不規則波造波装置による実験が可能になってからは、不規則波を用いた実験が行われ、消波ブロックを用いた構造物では、波群中の最高波一波の作用で破壊に至るのではなくて、大小の波の連続的な作用によって被害が進行することが明らかになった(谷本ら,1985)。さらに、有義波に対応する規則波を用いた実験よりも、同じ有義波の不規則波を用いた実験の方が、結果として得られる被害の程度が大きい傾向があり、消波ブロックの安定性の実験では不規則波を用いる必要がある。Hudson 公式における K_D 値についても、不規則波実験で求めた値を用いるのが妥当である。

また、浮体に関しても、最近では不規則波を用いて実験を行うことが標準になってきている。浮体に規則波を作用させると、規則波の周期で動揺し、浮体の固有周期にほぼ等しい周期の波が入射すると、共振によって動揺は大きくなる。一方、不規則波を作用させると、不規則波を構成している成分波が規則波であるかのように作用し、運動は成分波に対する運動の合成として現れるが、規則波と大きく異なる点は、Fig.13 に示したような、スロードリフトオスシレーションと呼ばれるゆっくりした運動が起こることである。この運動の原因は入射波高の2乗に比例する水平力(波漂流力)が浮体に作用するため、大きな波高が作用しているときは大きな水平力が作用し、浮体は大きく移動する。そして、入射波高が小さくなるとこの力は小さくなり、係留系によって引き戻されるために移動量は小さくなる。こうした波高包絡線の変動のようなゆっくりした変動が浮体運動の固有周期に近いと、運動が増幅されることが起きる。そして、この運動によっても浮体の係留系に大きな力が作用するようになる。以上のような理由から、浮体の運動の解析には不規則波としての取り扱いが重要となってくる。

一方、多方向不規則波についても、造波装置の開発および導入が進むのとほぼ同時に、波力・波圧の

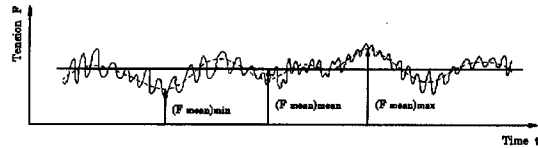


Fig.13 The variation of mooring tension due to slowed lift oscillation

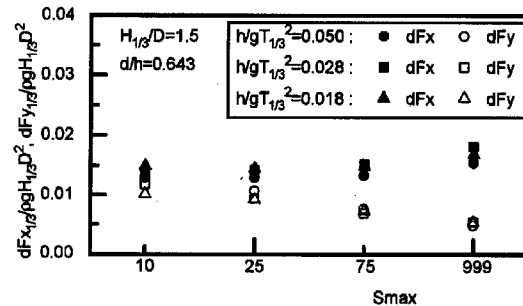


Fig.14 The variation of wave force depend on spreading parameter

実験に用いられたことは、Fig.12(a) から明らかである。

近年、円柱に作用する波力に対して、多方向不規則波の影響が検討されている。円柱の径が波長に比べて大きい場合には、多方向不規則波によって波力が平滑化されて、合力としての波力は小さくなるであろうことは想像できる。円柱の径が小さい場合、円柱に作用する波力は慣性力と抗力の和となる。円柱に作用する波力について、多方向波と一方向波との間で異なるかどうかは、平石ら(1994b)や水谷ら(1996)によって検討されている。その結果、Fig.14 に示すように、一方向波の場合は波が進行する方向にしか作用しないが、多方向波の場合は波の主方向以外からも波が作用するので、主方向に直角な方向にも波力が作用することが明らかになった。しかしながら、合波力を考えると、方向集中度に関係なく同じ値になる。このことは、小口径の円柱の設計では、波の多方向性を考慮する必要がないことを示している。

また、係留浮体の場合、多方向波が入射すると、いろいろな方向の成分波が含まれているために、水平面内の回転運動(ヨーイング)が大きくなることが予測される。池野ら(1991)は多方向不規則波を用いた模型実験を行い、波浪外力の方向分散性が浮体の動揺に及ぼす影響を検討している。係留浮体に多方向不規則波を作用させたときの頂点の動きは、Fig15 に示すように、一方向波の場合、ある方向成分だけが卓越するが、多方向波の場合、卓越する方向がはっきりせずあらゆる方向へ動く。実験におけ

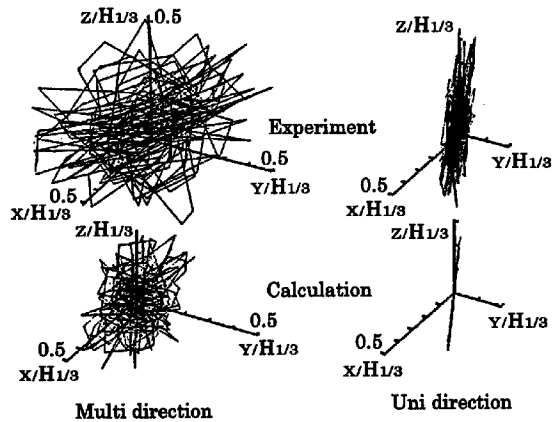


Fig.15 The movement of the top of floating body relative to the center of gravity

るこの動きは数値計算で求めた動きよりも大きい。係留装置も含め浮体運動が線形的であれば、多方向不規則波に対する数値計算は可能であるが、非線形の場合、多方向波に対する浮体運動の計算は現在においてもまだ不十分で、そのため、計算値が実際の運動より小さくなっているのかもしれない。今後とも、多方向不規則波によるさらなる検証が必要であり、多方向不規則波造波装置の整備が望まれる。

多方向不規則波の割合が20%以上まで増加する可能性が高く、一方向不規則波が40~50%を維持するだろう。規則波については、一方向不規則波および多方向不規則波の増加に伴い、年々減少しており、ここ数年は50%程になっている。今後は、現在よりもさらに減少する可能性が高く、40%以下にまで落ち込むかもしれない。規則波の実験としては波力自体に着目したものが多く、不規則波の実験としては構造物の耐波力や安定性など設計に関するものが多かったが、その傾向は明確ではない。

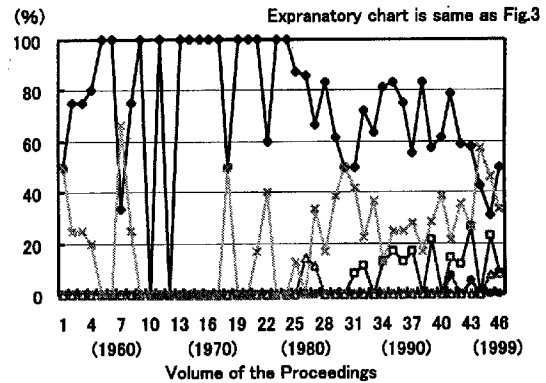
実験水槽については、多方向不規則波が用いられるにつれて、平面水槽の割合が増加しており、40%程の年もあった。だが、やはり一様水路が中心であり、その割合は8:2ぐらいで、少なくとも7:3までにとどまるであろう。

4.4 漂砂・洗掘

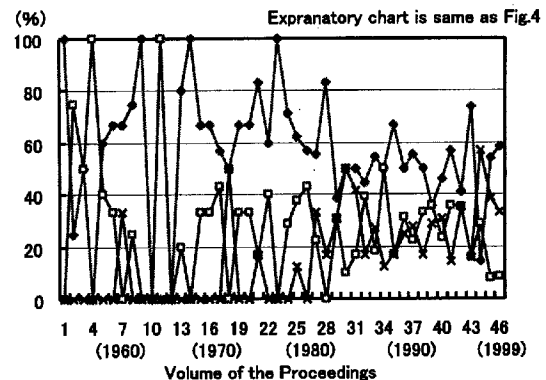
漂砂に関しても同様に、実験波浪および実験水槽の変遷をFig.16に示した。

実験波浪については、1980年頃まではほとんどが規則波であった。砂の取り扱い是非常に複雑で、波の不規則性までも考慮することが難しいために、漂砂現象を再現するには、規則波を用いることが主流となっていた。

その後、粒子追跡法などが確立されるに従い、振動流を用いた実験論文数の増加が目立つようになった



(a) Experimental wave



(b) Experimental facilities

Fig.16 Sediment transport and Scouring

てきた(楢山ら,1981;浜本ら,1982)。現在では、約30~40%ほどの割合を占めている。

1980年頃からは、一方向不規則波による実験もいくつかみられるようになってきた(大塚ら,1984;入江ら,1985)が、その割合は規則波やその他として分類した振動流などと比べるとやや少ないようである。しかしながら、不規則波による実験が行われはじめていることから、漂砂に関する研究の進歩と実験手法の向上は認められる。さらに、現地調査の結果を比較、検証する目的からも、今後、不規則波を用いた実験の必要性はより高まるだろう。

多方向不規則波を用いた実験も若干行われている(清水ら,1994;河合ら,1996)が、規則波および一方向不規則波と併せて実験がなされているだけで、波の多方向性の影響を特に対象としているわけではない。波浪や波力などと比べてもはるかに少なく、これから取り組んでいくべき研究課題であるといえる。

実験水槽については、沿岸漂砂などを対象とした場合、どうしても平面水槽による実験が必要であり、波浪や波力などの他の分野と比べても、かなり以前から用いられてきた。振動流による実験が行われはじめてからは、一様水路の割合が減少し、約50%程

度になっており、平面水槽とその他が30%前後で、ほぼ同じ割合である。今後も、この傾向はあまり変わらないであろう。

5. 結論

本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 実験論文数の割合は1980年を境に減少している。今後は数自体はそれほど変化しないが、その割合は減少していくと考えられる。
- 2) 検証実験が電子計算機の速度の飛躍的な発達とともに最も多くなっており、今後も増加する傾向にあると思われる。
- 3) 波力・波圧に関する実験については、不規則波、一様水路による実験が今後も主流となる。浮体の動揺については、多方向不規則波、平面水槽による実験も行われていくであろう。
- 4) 漂砂に関する実験については、不規則波や振動流による実験が増え、さらに多方向不規則波を活用した取り組みも必要になってくるだろう。
- 5) 今後、実験施設を整備していくにあたっては、一様水路では不規則波造波装置が不可欠である。また、多方向波によって得られた知見は少ないとはいえ、それを用いて実験すべき課題も残っているため、多方向不規則波造波機能を有した平面水槽の導入も併せて進めていくべきであろう。

参考文献

- 池野正明・鹿島遼一 (1995) : 多方向不規則波・変動風作用下における複数プラントの動揺と非線形係留力の予測, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.976-980.
- 池野正明・清水隆夫・久保道仁・定森良夫 (1998) : 波の多方向不規則性と浮遊漂砂を考慮した3次元海浜変形数値予測モデルの開発と検証, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.531-535.
- 池野正明・円山康樹・平口博丸・鹿島遼一 (1991) : 多方向不規則波浪場における浮揚式発電所の動揺と計算法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.781-785.
- 入江 靖・柴山知也・渡辺 晃 (1985) : 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.316-320.
- 大塚行則・三村信男・渡辺 晃 (1984) : 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.321-325.
- 河合弘泰・工藤 巧・榎本達也・上原 功・平石哲也 (1996) : 潜堤周辺の波・流れ場と砂移動に関する平面実験, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.651-655.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975a) : 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp.3-44.
- 合田良実 (1975b) : 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp.59-106.
- 合田良実・鈴木康正・蜂須賀和吉 (1977) : 不規則波を用いた港内静穏度, 港湾技研資料, No.271.
- 榎山 勉・三村信男・渡辺 晃 (1981) : 砂漣上の振動流境界層に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.237-241.
- 清水隆夫・池野正明・氏家久芳・山内一晃 (1994) : 波と水中放水流による海底洗掘特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.561-565.
- 高山知司・平石哲也・立石義博 (1989) : 多方向不規則波の造波信号発生法に関する検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.153-157.
- 谷本勝利・原中裕人・山崎一雄 (1985) : 不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第2号, pp.85-121.
- 浜本健一・三村信男・渡辺 晃 (1982) : 砂漣上の振動流境界層に関する実験的研究 (2), 第29回海岸工学講演会論文集, pp.254-258.
- 平石哲也・望月徳雄・鈴木康正 (1994a) : 護岸越波流量における波の多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.666-670.
- 平石哲也・冨田康大・鈴木康正 (1994b) : 円柱波力における波の多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.836-840.
- 平石哲也・金澤 剛・榎本達也・佐藤一央 (1996) : 多方向不規則波の護岸越波流量の数値計算, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.716-720.
- 水谷法美・藤岡丈夫・渡辺増美・岩田好一朗 (1996) : 小口径円柱に作用する多方向不規則波の波力と波力係数の特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.866-870.
- Salter, S. H. (1981) : Absorbing wave-makers and wide tanks, Directional Wave Spectra Applications, ASCE, pp.185-202.
- Sørensen, O.R., Madsen, P.A. (1998) : Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. III. Wave-induced horizontal nearshore circulations, Coastal Engineering, Vol.33, pp.155-176.
- Takayama, T. (1984) : Theory of oblique waves generated by Serpent-type wave-maker, Coastal Engineering in Japan, Vol.27, pp.1-19.

Historical Change of Hydraulic Experiments its for Coastal Engineering

Tomotsuka TAKAYAMA and Tomohiro YASUDA*

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Historical change of hydraulic experiments was investigated statistically though the papers published in the proceedings of Japanese Conference on Coastal Engineering. The numeral rate of the papers on the hydraulic experiments has been dropping lately to about 30%. The confirmation experiments of the validity of theoretical analysis and numerical simulations has become major at present, comparing with other factors for hydraulic model tests. Since uni- and multi-directional random wave generators were developed, model tests in random wave have become predominant. The random wave generators in experimental flumes and basins have become inevitable facilities for hydraulic model tests.

Keywords: Historical change; Hydraulic experiments; Proceedings of Japanese Conference on Coastal Engineering