

圧力抜開口部を有する護岸の遮水シート作用波圧に関する研究

榊山 勉*

1999年に破損した火力発電所の灰捨場護岸の遮水シートの復旧工事に関して、数値計算、水理実験、現地観測を通じて作用波圧に関する検討を行った。被災前の完全遮蔽タイプの護岸の遮水シートに非常に大きな圧力が作用すること、対策工として、圧力抜き工を設置することにより圧力を低減できることを確認するとともに、圧力抜き工の幅と圧力の関係を数値計算で評価した。規則波に対する圧力の計算結果は実験結果と概ね一致し、対策工の形状の評価が妥当であることが確認できた。規則波、現地観測結果に基づき、透過波による圧力の変動成分と護岸前面の重複波の平均水位上昇に起因する平均圧力を議論し、最大圧力に及ぼす平均圧力の影響が大きいことを示した。

1. 緒 言

火力発電所の多くは敷地内に埋立灰捨場を設置する。灰捨場護岸は管理型廃棄物埋立護岸に属し、遮水シートを敷設し埋め立てた灰が外海に漏出ないように建設される。1999年にある火力発電所の灰捨場護岸の遮水シートが破損した。灰の埋め立ては陸側から行っているため、海側の護岸の遮水シートが部分的に破断しても灰とその濁水が外海に漏れることはなかったが、早急に復旧工事を行うことになった。そこで、遮水シートが破断した原因を究明するとともに、対策工の構造形式を決めることになった。

ここで扱う問題に関して、管理型廃棄物埋立護岸のマニュアルが港湾空間高度化センター(2000)から刊行されている(2005年9月改訂版刊行予定)。これに関連して、藤井ら(2002a)は混成堤式護岸の遮水シートに作用する波圧特性を検討し、同時に藤井ら(2002b)は波圧算定式を提案した。伊野ら(2003)は、傾斜堤式管理型護岸の遮水シートの波圧分布の簡易算定式を提案した。しかし、これらの研究では波動運動の振動成分による最大波圧の議論に留まっている。伊野ら(2003)は、水平底面部の遮水シートに作用する波圧に関しては平均水位上昇に伴う平均圧力を検討しているが、発生 of 物理的な説明は充分でない。

護岸前面には部分重複波が形成される。Longuet-Higgins・Stewart(1964)や合田・柿崎(1966)が示すように、重複波の腹で平均水位が上昇し、節では下降する。部分重複波が形成される場については榊山・鹿島(1992, 1994)の数値計算がこの現象を示している。この平均水位の変化は重複波の場では平均流の起動力にならないが(渡辺・塩崎, 1982)、ケーソン背後では透過性のマウンド通じて圧力を増加させる。高橋ら(1995)の実験でも平均圧力上昇が確認されているが長周期波によるもの

のと解釈されていた。猿川ら(1993)はこの平均水位上昇を利用し、有孔堤による港内の海水交換を検討した。規則波実験ではこの現象が顕著に現れる。現地では潮位変動の影響もあり、平均水位上昇を抽出することは室内実験ほど容易ではない。小竹ら(2004)は、廃棄物埋立護岸内部の波圧の現地観測を行い最大値を議論し、馬場ら(2004)は、護岸内の水圧の評価に波浪の周波数スペクトルを用いた。

本研究は、遮水シートに作用する波圧の評価に関して、断面2次元の規則波の数値計算と水理実験、さらに現地観測で得られたデータから、作用波圧の振動成分と時間平均成分について考察を加える。

2. 発電所灰捨場護岸と復旧断面の検討方法

図-1に対象地点の発電所の灰捨場(総面積約32万 m^2)と護岸の配置を示す。灰捨場の水域はほとんど埋まっておらず護岸は防波堤の状態にある。護岸は「くの字型」の線形をなし、沖合に面した位置に温排水の放水口がある。護岸の総延長は1220mで、約400mの区間の護岸背後は裏込石のみであるが、約800mの区間は裏込石層内に温排水放水管が設置してある。図中に示す位置の放水管がない断面1と放水管がある断面8について検討した。

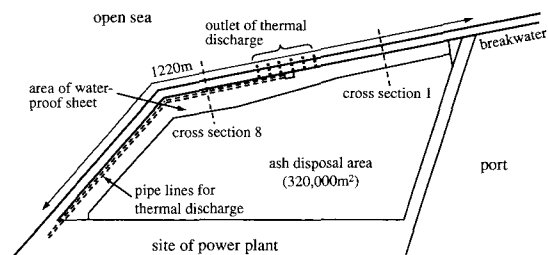


図-1 対象とする発電所の灰捨場と護岸

図-2に断面8の放水管がある場所での復旧断面形状を示す。この断面形状は、以下の検討内容に基づいて決定された。先ず、数値計算により被災断面の遮水シート

* 正会員 博(工) (財)電力中央研究所 流体科学領域

の作用波圧を評価し、遮水シートに外海の波高に相当する過大な波圧が作用するを確認した。この圧力に対して遮水シートの抑え用の構造物を建設することは困難であるため、復旧後の断面形として、高橋ら(1995)の研究を参考に護岸背後に圧力抜開口部を設けることにした。開口幅と圧力の大きさとの関係を数値計算により推定し、建設可能と判断される条件に関して水理模型実験を実施した。数値計算と水理実験は断面2次元現象を対象に行った。波の3次元性と不規則性に関して、復旧工事の施工途中の現地観測データを用いて検討し、さらに完成後の現地観測データで再確認することになった。復旧工事は、破断調査を実施した1999年9月からほぼ1年後の2000年9月に着工し、2001年10月に竣工した。現地観測は、施工途中の2000年12月中旬からと完成後の2001年12月下旬からそれぞれ約2ヶ月間に渡って2回実施した。

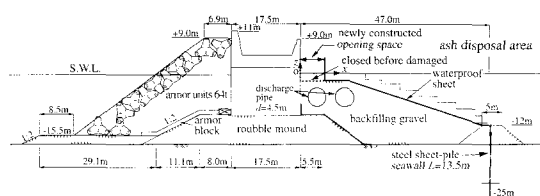


図-2 護岸断面図(ケーソン背後の円は温排水用の放水管)

3. 数値計算による開口幅と圧力との関係

圧力抜き工の開口幅と遮水シートに作用する圧力との関係を、断面1について数値計算モデルを用いて評価した。波浪条件は、50年確率波の有義波相当の規則波とし、波高8.5 m、周期12.5 sとした。護岸の設置水深は18.5 mである。被災時の完全遮蔽タイプと開口幅を1.5 m、3.0 m、5.0 mとした条件について計算した。

計算には、榊山・香山(1996)の数値解析コード(PS-WAVE)を使用した。護岸の複雑な形状をできるだけ正確に再現するために、計算格子は1辺0.5 mの正方形とした。計算領域は水平方向に1100 m、鉛直方向に40 mで、計算点は176000点である。計算時間間隔は波の周期 T の1/800とした。計算時間は200 s(16周期分)である。

図-3に、断面1の完全遮蔽の場合と開口幅 W 1.5 m、3.0 m、5.0 mの3種類の遮水シートに作用する圧力の最大値の計算結果を示した。完全遮蔽の場合には約78 kPaの圧力が作用する。これは、部分重複波の腹の位置での波高に相当する。このように外海の波高にほぼ等しい圧力が捨石マウンドを通じて遮水シートに作用することがわかる。被災原因は、高波浪時に高い圧力が捨石マウンドを通じ、高いよどみ圧となって遮水シートに作用したことが主原因と考えられる。さらに、シート上には離散的に置かれた抑えブロックのみで、シート全面を覆っていない

かった。このため、シートがふかれ、破断したと考えられる。

これに対して、開口幅 W を1.5 m、3.0 m、5.0 mと変化させると最奥部 $x = 29.5$ m 地点の遮水シートに作用する最大圧力は、37.2 kPa から20.8 kPa、18.6 kPaへと減少した。圧力抜き工を設けることで、遮水シートに作用する圧力は著しく低減でき、幅 $W = 5$ mで18.6 kPaまで減少し、施工可能な値を得た。

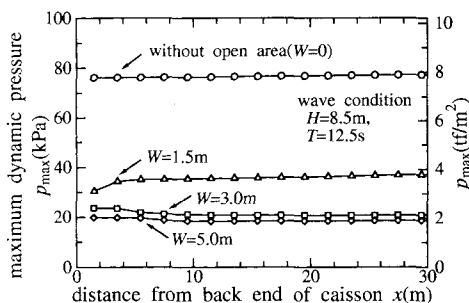


図-3 遮水シート作用圧に及ぼす開口幅の影響(断面1)

断面1について、開口幅 W の影響の他に、抗力係数 C_D や波高の大きさが透過圧力に及ぼす影響を調べた。断面8については、断面1の計算結果を検討した後に最小限必要な条件についてのみ計算した。図-4は、放水管がある断面8の水面波形と波圧分布の計算結果の一例を示したものである。図-4(a)は漕上する様子で、図-4(b)は消波ブロック被覆層を漕上し、ケーソンに波が当たる瞬間を示す。この瞬間の裏込石層の深部の圧力が高くなっている。これは淀み圧と呼ばれる現象である。また、放水管の下部の圧力が上昇している。

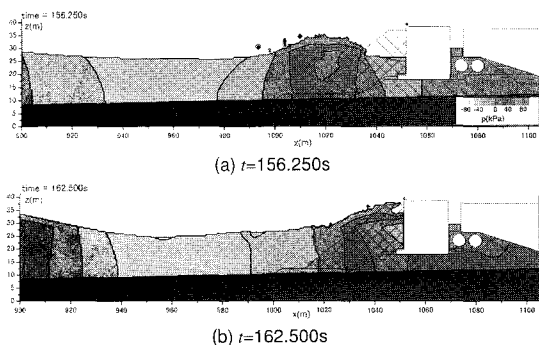


図-4 水面波形と波圧分布の計算結果の一例(断面8)

4. 水理実験

数値計算には慣性力係数や抗力係数など不確定な要素を含んでいる。また、不規則波の影響は検討できていない。さらに、後述するように、放水管がある断面8の場合のほうが圧力が高くなることが数値計算結果で明らかになった。そこで、計算結果の検証と現象をより詳細に解

明するために水理実験を行った。今回、開口幅と遮水シートに作用する波圧との関係を数値計算で事前に評価できたので、断面1については完全遮蔽と開口幅 $W = 5\text{ m}$ を、断面8は開口幅 $W = 5\text{ m}$ のみを対象とした。

実験は、図-5に示す長さ51 m、幅0.9 m、深さ1.2 mの2次元造波水路を用いて行った。模型縮尺は1/38.5である。護岸設置水深での現地換算値の進行波の波高 H を7.5, 8.0, 8.5, 9.5, 10.5 m, 周期 $T = 10.5, 12.5, 14.5, 15.5\text{ s}$ の条件で行った。施工では遮水シート上にコンクリートを打設するために、実験では遮水シート上に木製の板を設置した。また、完全遮蔽の場合には、大きな圧力が作用するために、剛性と気密性に充分配慮した。遮水シート下に断面1については12個、断面8では13個の圧力センサーを設置し圧力を測定した。図-5に示す波高計の水位データとともにデータ処理した。データのサンプリング周波数は100 Hz である。

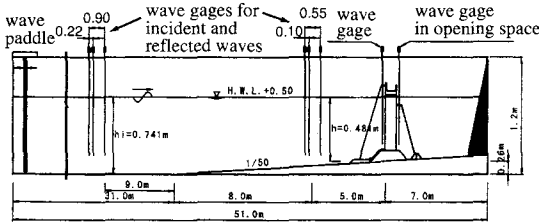


図-5 実験装置

図-6に規則波による波圧の時間変化を示す。断面8のケーソン背後の圧力抜開口部での波圧の経時変化を造波開始から示している。平均圧力の顕著な増加がみられる。実験データは、定常状態になった $t = 210\text{ s}$ から $t = 280\text{ s}$ の値を採用した。 $t > 300\text{ s}$ では多重反射波の影響が現れている。実線の変動波圧の波動成分の全振幅は約10 kPaである。点線は移動平均値で、これによると平均圧力は約5 kPaで片振幅の大きさに相当する。最大波圧の約1/2が平均圧力の上昇により生じていることになる。

不規則波についても上記の波浪条件の有義波を設定して実験を行った。図-7に不規則波による波圧の時系列を示す。図-6と同様に、 $t > 300\text{ s}$ で多重反射波の波浪場になっている。それ以前の $t < 300\text{ s}$ の波圧波形には、規則波の結果のように一定の平均圧力の上昇はみられない。波群の変動に対応した平均圧力の変化がみられる。

開口部を設け圧力を減少させたことにより、実験での擾乱が透過波圧の測定精度に影響した。不規則波については、水路内で発生した多重反射波のために有意な実験データを得るに至らなかった。以上の結果から規則波の実験結果を用いて基本的な検討を行った。

図-8(a)は遮水シートに作用する波圧の最大値 $p_{\max}$ 、図-8(b)は時間平均値 p_{ave} の遮水シートに沿う空間分布

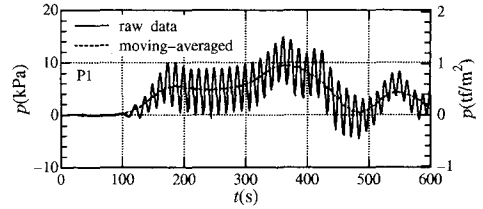


図-6 規則波の圧力変動の時系列(断面8)

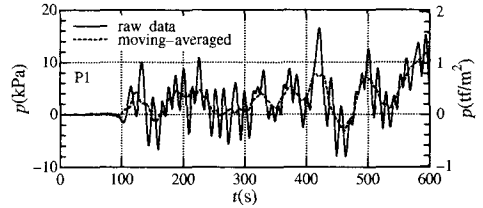
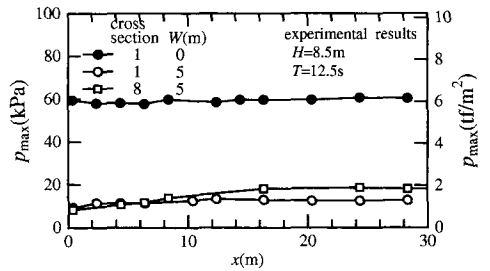


図-7 不規則波の圧力変動の時系列(断面8)

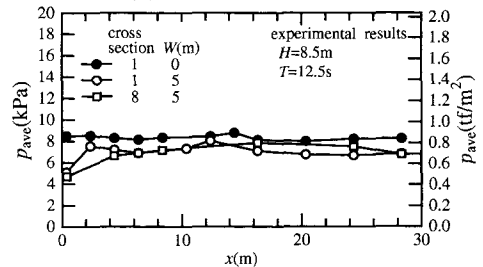
を示したものである。図-3の計算結果に比べると、完全遮蔽 ($W = 0$) では計算結果が78 kPaであるのに対して、実験結果は60 kPaと小さい。開口部を設けることにより最大波圧は約20 kPaにまで減少する。

一方、図-8(b)に示す平均圧力は、最大値のように開口部の有無により顕著な差は生じない。ケーソン背後では開口部がある場合の方が小さくなる領域があるが、閉鎖領域内では差が小さくなる。全体的には開口部がある場合に比べて、完全遮蔽の場合が若干大きい程度である。

最大値と平均値を比較すると、完全遮蔽の場合には、平均波圧は最大値の10%強程度であるが、開口部がある場合には最大値の約50%が平均圧力の増加に起因するものであることがわかる。



(a) 圧力変動の最大値



(b) 圧力変動の平均値

図-8 断面形状による圧力の比較

図-9に開口幅 $W = 5\text{ m}$ の断面1と断面8の遮水シートに作用する波圧の実験結果と計算結果との比較を示す。図-9(a)は最大値 $p_{\max}$ 、図-9(b)は時間平均値 p_{ave} である。断面1の計算結果では、開口部周辺の最大波圧 $p_{\max}$ が変化の傾向と値とも一致していない。閉鎖領域内での値はよく一致している。

断面8については、最大値、平均値とも断面1の結果に比べて一致していない。実験結果から断面1に比べて断面8の圧力が高くなることが分かっているが、放水管が存在することにより計算結果の圧力場全体が高くなりすぎている。

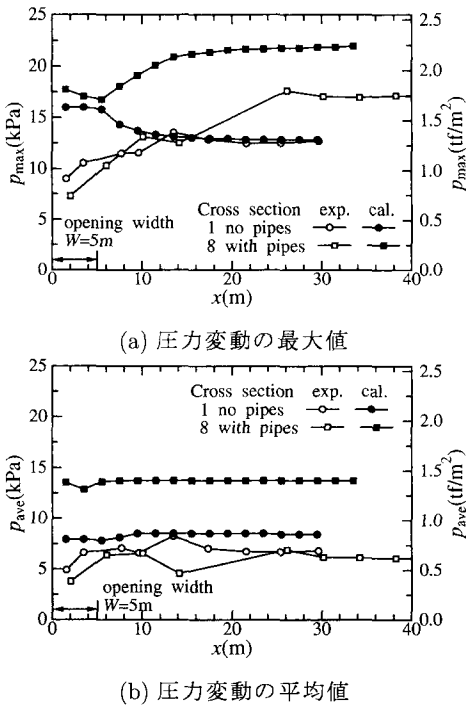


図-9 実験結果と計算結果との比較

5. 現地観測

現地の波の不規則性や現象の3次元性などの影響を調べるために、護岸遮水シート建設中の越冬時(2000年12月28日から2001年3月3日)と遮水工完成後(2001年12月20日から2002年2月20日)に現地観測を行った。図-10に波高計の設置場所と波圧計の配置を示す。水深約20mの地点に超音波式波高計と2成分電磁流速計を設置した。1測線につき6カ所、5測線について、故障に備えて各地点に2個ずつの波圧計を合計60台、117m×30mの範囲の遮水シートの下に設置した。第1回目の観測時の遮水シートの敷設長は観測範囲を含む180mであった。サンプリング周波数は2Hzで、連続観測した。毎正時1時間の処理結果を使う。有義波高3m

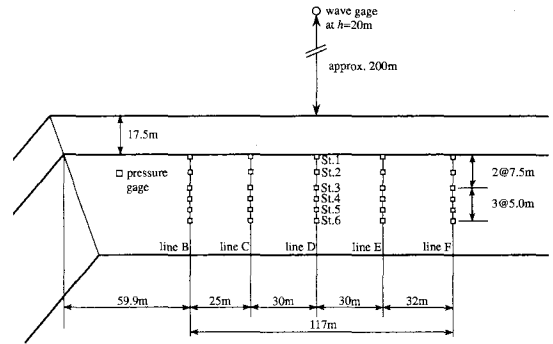


図-10 現地観測における波高計と波圧計の設置場所

を越える時化が、第1回目の観測時には4回来襲し、第2回目には9回来襲した。小竹ら(2004)と馬場ら(2004)は閉鎖性海域の観測で最大波高が約3mであったが、本研究では外海に面した護岸での現地観測であったため、有義波高約6m、最大波高約9mまでの観測結果が得られた。ここでは有義波高2m以上の現地観測データを使用する。

まず、波浪と潮位変動の小さい数時間について、天文潮の影響を除去した圧力の平均値を算定し圧力の基準面を決めた。次に、各時の圧力値を各時の天文潮位の潮位変動分を除去して求めた。図-11に同時波圧の平面分布を示す。図-10の配置に合わせて、図の上が海側になっている。図-11の波圧分布は、護岸直角方向右より32°からの斜め入射波が作用した時のものであり、2002年1月8日13時のデータとして有義波高5.1m、有義波周期10.6s、最大波高8.7m、周期11.0sを記録した。奥まった場所で局所的に大きな圧力が作用している。水深17m、有義波周期10.6sの波長は約125mであるので、護岸前面では約1波長の範囲で一樣な圧力が作用しているが、内部では8kPaの等圧線は半波長程度に減少している。

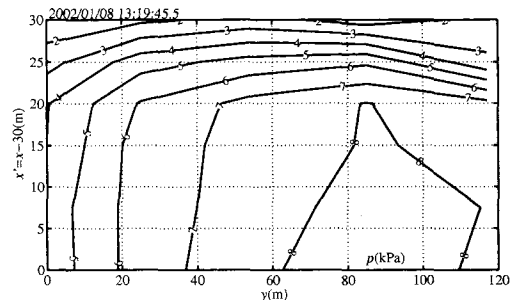


図-11 遮水シートの作用波圧の平面分布(現地観測結果)

図-12に波高と透過波圧の関係を規則波実験結果と現地観測結果を合わせて示す。現地観測結果は、水位と圧力とも有義波高値で表した。現地観測結果の有義波周期

は7sから11sの範囲であったが、観測値は実験結果の周期 $T=10.5$ sより全て小さい範囲にある。

図-13に示す波高と平均圧力との関係では、実験結果では周期が短いほど平均圧力が高くなる。平均圧力は波高の2次のオーダーの量であり線形関係にはない。観測結果はばらつきが大きく、また2次元、規則波の実験結果に比べて小さい傾向にある。不規則波の場合にも反射面近傍には位相が拘束され重複波が形成される。最大波高が来襲したときに、最大波高に対応する平均圧力上昇は発生しないが、平均波高相当の平均圧力上昇はあり得ると考え、設計には平均圧力の上昇を考慮した。

図-14に波高と最大波圧との関係を示した。現地観測結果は最大波高で整理した。現地観測結果の有義波高

$H_{1/3}$ と最大波高 H_{max} との関係は $H_{max}=1.65H_{1/3}$ であった。現地観測では平均圧力が規則波実験より小さいために最大圧力が小さくなるものと思われる。現地観測の圧力は入射波高の水頭の約10%程度に低減し、断面2次元実験結果より小さい。設計条件は現地観測結果より推定される圧力から充分安全であることが確認できた。

6. 結 言

本研究で得られた結果は以下の通りである。

これまでの研究と同様に圧力抜き開口部を設けることにより透過波圧を低減できることを確認した。しかし、透過波圧の大きさには、護岸前面の重複波の腹の位置で生じる平均水位上昇による圧力上昇量を無視することはできない。規則波の場合には、透過圧の最大値に対して、平均圧力は40から50%程度の寄与率である。不規則波の場合は規則波に比べて若干小さいものの、20から30%の寄与率があることを現地観測結果で示した。

最後に本研究を進めるに当たり、電力会社の担当者ならびに数値計算、水理実験、現地観測に携わった方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 伊野 同・鶴飼亮行・熊谷隆宏・前野詩朗(2003): 傾斜堤式管理型護岸の遮水シートに作用する波圧特性およびその評価方法, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 701-705.
- 合田良実・柿崎秀作(1966): 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港研報告, 第5巻, 10号, 57p.
- (財)港湾空間高度化センター(2000): 管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル, pp. 58-62.
- 小竹康夫・鶴ヶ崎和博・馬場慎太郎・三宅達夫・藤原隆一・金子清美・手塚隆・徳永和幸・守谷公一(2004): 管理型廃棄物埋立護岸内部における波圧の現地計測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 681-685.
- 榊山 勉・鹿島達一(1992): ポーラスボディモデルによる透過性防波堤周辺の波動解析手法の開発, 電力中央研究所報告, 研究報告, U91048, 48p.
- 榊山 勉・鹿島達一(1994): 透過性防波堤周辺の波動解析へのポーラスボディモデルの適用, 電力中央研究所報告, 研究報告, U93052, 45p.
- 榊山 勉・香山真祐(1997): 砕波をともなう消波護岸への越波に数値計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 741-745.
- 猿川弦・水野雄三・笹島隆彦・木村克俊・高橋哲美(1993): 消波ブロック被覆型有孔堤の海水交換特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 971-975.
- 高橋重雄・鈴木高次郎・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善功企・山崎浩之(1995): 護岸の吸い出しに関する水理模型実験, 港湾技術研究所報告, 第35巻2号, pp. 3-69.
- 馬場慎太郎・鶴ヶ崎和博・小竹康夫・吉野洋一・古川好男・相川秀一・三宅達夫・藤原隆一(2004): 沖合埋立地護岸内部における水圧伝播特性について 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 691-695.
- 藤井敦・宇野健司・北澤壮介・土田孝・五月女洋・伊野同(2002a): 混成堤式管理型護岸の遮水シート作用波圧特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 83-88.
- 藤井敦・高橋重雄・小椋進・宇野健司・杉山直子・五月女洋・伊野同・鶴飼亮行・熊谷隆宏(2002b): 混成堤式管理型護岸遮水シートに作用する波圧特性および波圧算定法に関する研究 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 826-830.
- 渡辺晃・塩崎正孝(1982): 構造物周辺の波浪・海浜流場について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 110-114.
- Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart(1964): Radiation stress in water waves, Deep-Sea Res., 11, pp. 529-562.

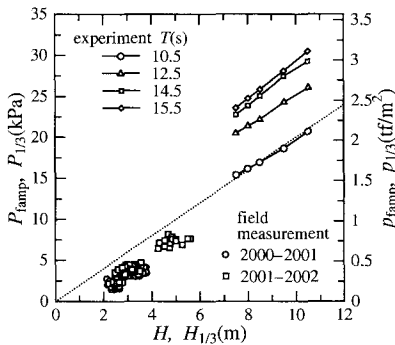


図-12 波高と波圧全振幅との関係

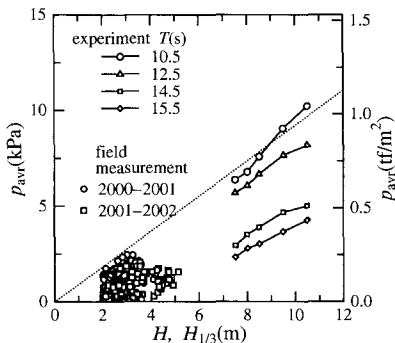


図-13 波高と圧力変動の平均値との関係

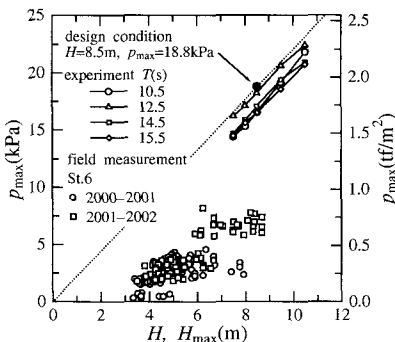


図-14 波高と波圧最大値との関係