

大水深域非越波型護岸の波圧特性に関する 基礎的研究

STUDY ON WAVE PRESSURE CHARACTERISTICS ACTING ON NON WAVE-OVERTOPPING TYPE SEAWALL IN DEEPWATER

山城 賢¹・吉田明徳²・白尾國貴³・森屋陽一⁴
Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA, Kunitaka SIRAO, Yoichi MORIYA

¹正会員 博(工) 九州大学大学院助教 工学研究院環境都市部門
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

²正会員 工博 九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

³学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

⁴正会員 工博 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野四区町1534-1)

Basic knowledge on wave force acting on a Non-Wave-Overtopping Type Seawall in deep water has been experimentally investigated to advance practical design of this type of seawall. The experiments were conducted with a two-dimensional wave tank using 1/45 reduced scale models. Two different cross sectional shapes of the curved face of the seawall, by which wave overtopping is effectively prevented, were used for the model seawalls. Wave pressures were measured with a number of pressure gauges distributed along the curved face. The relations between the crown height of the seawall and the wave pressure distribution were investigated. It was found that the largest wave pressure along the curved face appears mostly in the vicinity of the crown, but also the largest wave pressure occasionally appears in the vicinity of the middle of the curved face depending on the way waves hit the wall. It was also found that the intervals of the occurrences of large wave pressures could be adequately accounted for statistically by exponential distributions.

Key Words : *non wave-overtopping type seawall, wave pressure, hydraulic model test, irregular wave, exponential distribution*

1. はじめに

越波をほぼ完全に防ぐことを目指した護岸としてフレア型護岸が提案されている^{1)~3)}。この護岸は断面が円弧状の大きな曲面になっており、この曲面により来襲する波を冲向きに返して越波を防ぐもので、これまでに数多くの検討がなされ、最近では写真-1に示すように現地での施工例も幾つかある。フレア型護岸は本来、汀線付近もしくは砕波帯内での適用を想定しており、人工島や海上空港等が建設される程度の大水深域(重複波領域)にそのまま適用しても期待通りの効果を得ることは難しい⁴⁾。著者らは、フレア型護岸を参考に、大水深域においても高い越波防止効果を期待できる護岸として写真-2に示すような大水深域非越波型護岸を提案し、これまで断面形状や天端高による越波防止効果などの基本的な性能について検討を行ってきた^{5), 6)}。この護岸は、通常用いられる直立護岸に比べて高い越波防止効果を有しているため天端高を低減するこ

とが期待できるが、現時点では現地施工の際に重要となる波圧特性についての基礎的な知見が十分に得られていない。そこで、本研究では非越波型護岸の

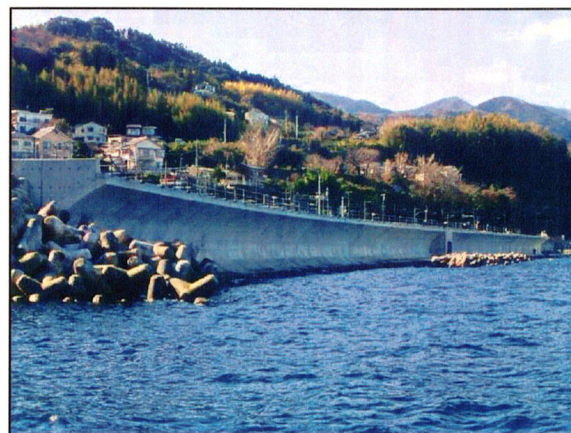


写真-1 フレア型護岸の施工例 (大分県別府市)

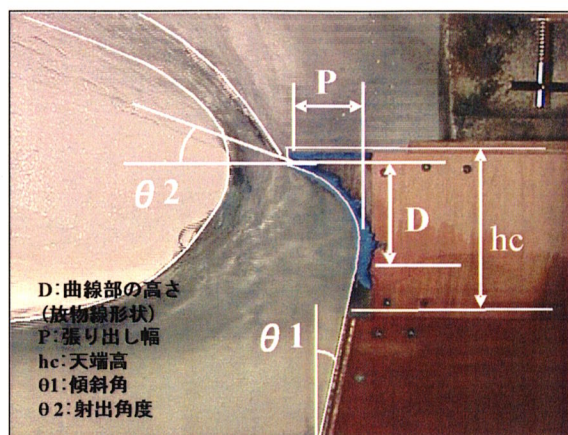


写真-2 大水深域非越波型護岸

波圧特性に関する基礎的な知見を得ることを目的に水理模型実験を行った。

2. 実験条件

実験には図-1 に示す反射吸収式二次元造波水路（長さ 20.0m、高さ 1.2m、幅 0.6m）を使用した。現地での水深を 15m 程度と想定し、1/45 の縮尺で実験での水深 h を 33cm とした。非越波型護岸は図-2 に示す射出角が 20° と 45° の 2 つの模型を用いた。非越波型護岸の曲面形状は放物線であるため、射出角が変化すれば、曲面形状も全体的に変化する。

それぞれの模型について、直線部を嵩上げすることにより天端高を 4 通りに変化させた。設定した天端高は、 $h_c=5.9\text{cm}$, 7.1cm , 8.3cm , 9.5cm （現地での天端高で $h_c=2.7\text{m}$, 3.2m , 3.7m , 4.3m ）であり、非常に低い設定となっている。これは厳しい条件における波圧特性を調べるということに加え、低天端で非越波を実現するための非越波型護岸ではあるが、実際には現地条件や施工における種々の制約から、ある程度の越波を許容して、より小さな天端高で施工される場合も想定されることから、本研究では、意図的に天端高を低く設定した。波圧は、護岸断面の曲面に沿って 2cm 間隔でセンサーを設置し、サンプリング周波数 1000Hz で計測した。天端を基準としたセンサーの設置高 (z_c) を表-1 に示す。入射波は有義波高 $H_{1/3}=10.0\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=1.3\text{s}$ （現地での $H_{1/3}=4.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8.7\text{s}$ ）の修正 Bretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波とし、同一のスペクトルから周波数成分の位相の組み合わせを変えて 6 種類の波群を作成した。なお、全てのケースにおいて、図-1 に示す波高計設置位置で水位変動を測定し、入反射波分離推定法⁷⁾により所定の入射波が造波できていることを確認した。図-3 は実験で作用させた入射波のスペクトルの例で、全ての実験ケースにおいて、この程度の再現性を有する入射波のスペクトルが得られている。断面

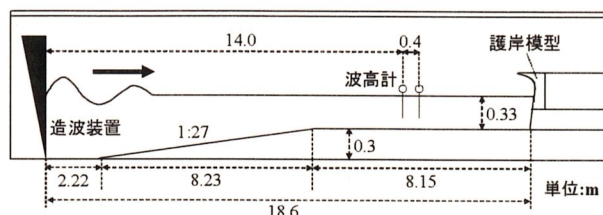


図-1 実験装置の概略

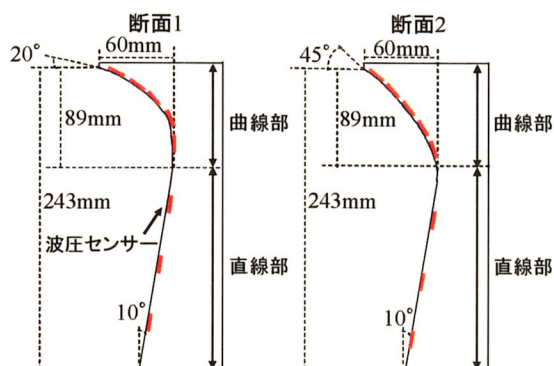


図-2 非越波型護岸模型

表-1 波圧センサーの設置位置

ch.	天端を基準とする高さ z_c (cm)	
	断面1	断面2
1	-1.20	-1.73
2	-2.30	-3.29
3	-3.68	-4.91
4	-5.49	-6.60
5	-7.46	-8.45
6	-11.46	-12.43
7	-15.41	-16.37
8	-19.35	-20.31

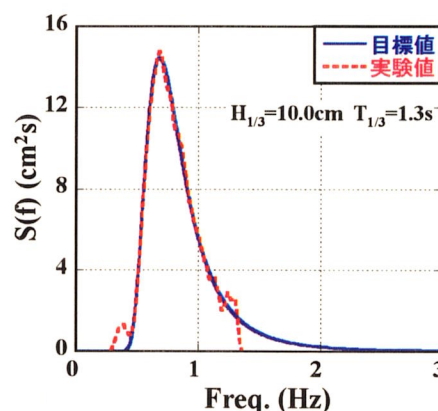


図-3 入射波スペクトルの一例

形と天端高を組み合わせた 8 通りの護岸の条件について、6 種類の入射波をそれぞれ 5 分間作用させ、最初の 1 分間を除いた 4 分間で波圧を計測した。したがって、一つの護岸の条件における実質の計測時間は 4 分×6 波群の計 24 分間であり、この時間に

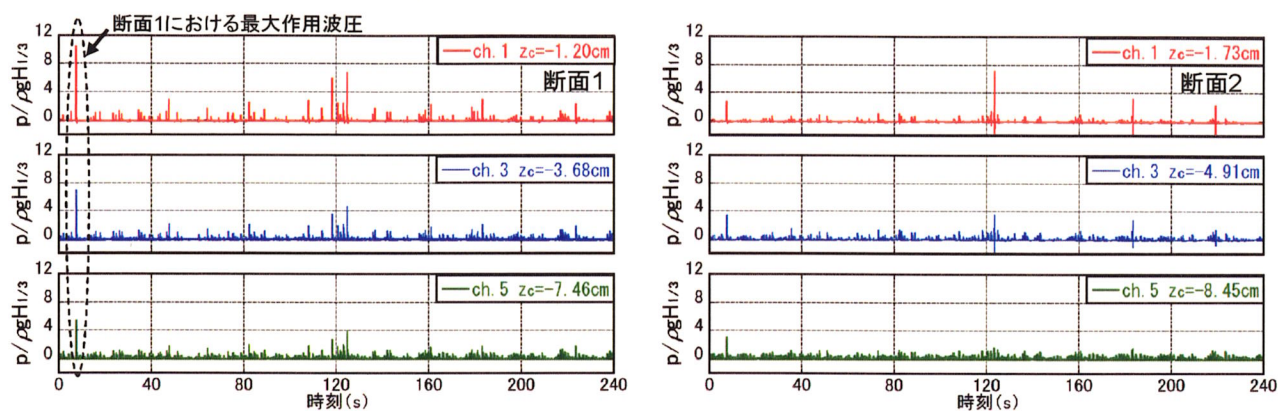


図-4 作用波圧の時系列 (天端高 $h_c=8.3\text{cm}$)

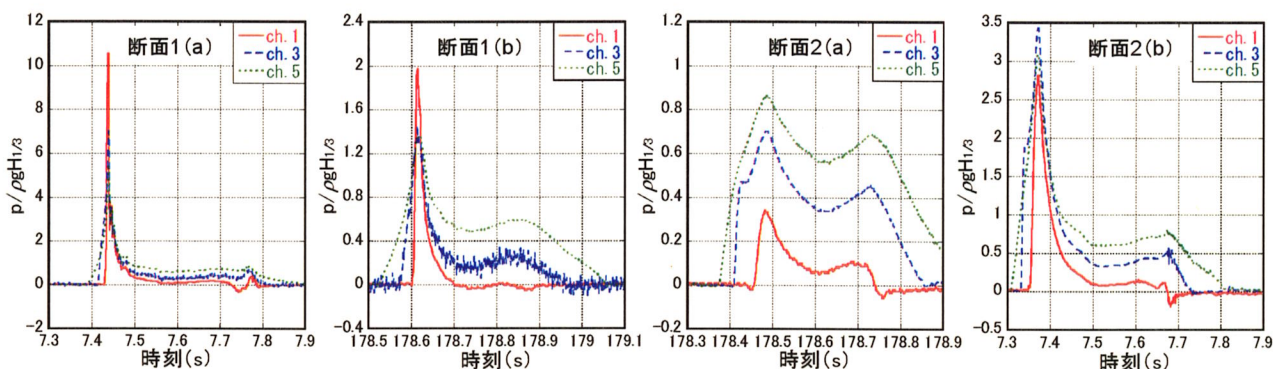


図-5 波圧波形の拡大図

は有義波周期の波が 1100 波程度、入射波の最低周波数成分 (0.4Hz) が 560 波程度含まれる。

3. 非越波型護岸の波圧特性

(1) 波圧波形

図-4 に天端高 $h_c=8.3\text{cm}$ の条件における作用波圧の時系列を 2 つの断面形状について例示している。図中には、天端からの高さを示しており、断面 1、断面 2 とともに、上段の図が最も天端に近い位置で得られた時系列である。なお、波圧センサーは曲面に沿って 2cm 間隔で取り付けられているため、断面 1 と断面 2 では同じセンサーの番号でも設置高が異なる。また、ここに示す作用波圧の時系列は、入射波成分の位相の組み合わせが異なる 6 種類の波群のうち、ある一つの波群により得られたものである。図より、波の不規則性によって、突発的に大きな波圧が作用していることが分かる。断面 1 では、計測開始から約 7s 後に各センサー設置位置で大きな波圧が生じており、この波圧は天端高 $h_c=8.3\text{cm}$ の条件における全ての入射波波群 (6 種類の波群) での最大の波圧であった。同時刻の断面 2 における作用波圧をみると、波圧のピークは現れているものの、断面 1 に比べて非常に小さい。同じように、両断面において 120s 付近にピークが現れているが、全体的に断面 2 における作用波圧が小さくなっている。断面 2 にお

ける最大波圧は、この時系列ではなく、他の波群において生じている。また、断面 1、断面 2 とともに、各センサー設置位置での最大波圧が必ずしも同じ波によって生じるわけではなく、各位置の最大波圧が異なる波によって生じているケースが多い。

図-5 は図-4 中の 7.5s 付近と 178s 付近を拡大したものである。断面 1 における 7.5s 付近の拡大図 (断面 1(a)) は前述した、この天端高条件における最大波圧を生じた瞬間の波圧波形で、178s 付近の拡大図 (断面 1(b)) は、曲面により波を効果的に返している時の波圧波形の例である。また、断面 2 の 2 つの図 (断面 2(a) と断面 2(b)) は、断面 1 の 2 つの図と、それぞれほぼ同じ瞬間における波圧波形を示している。ただし、各センサーは事前に静水位状態で 0 となるよう調整したが、実験中にゼロレベルがシフトしている場合があり、それらの時系列についてはゼロレベルを補正している。また、それぞれ波圧のピーク値が異なるため、各図の縦軸は目盛りが異なっている。波圧波形は基本的にはほぼ同じ形をしており、最初にピークが現れた後、減少し緩やかに第 2 のピークが現れている。この第 2 のピークは各センサーで毎回ほぼ同程度の値を取っていることから、センサーそのものの特徴、あるいは模型への設置方法等に起因する現象である可能性があり、今後、明らかにしておく必要がある。断面 1(b) の最大波圧の波形をみると、ピーク値は有義波高相当の静水圧の 10 倍以上となっており、瞬間的

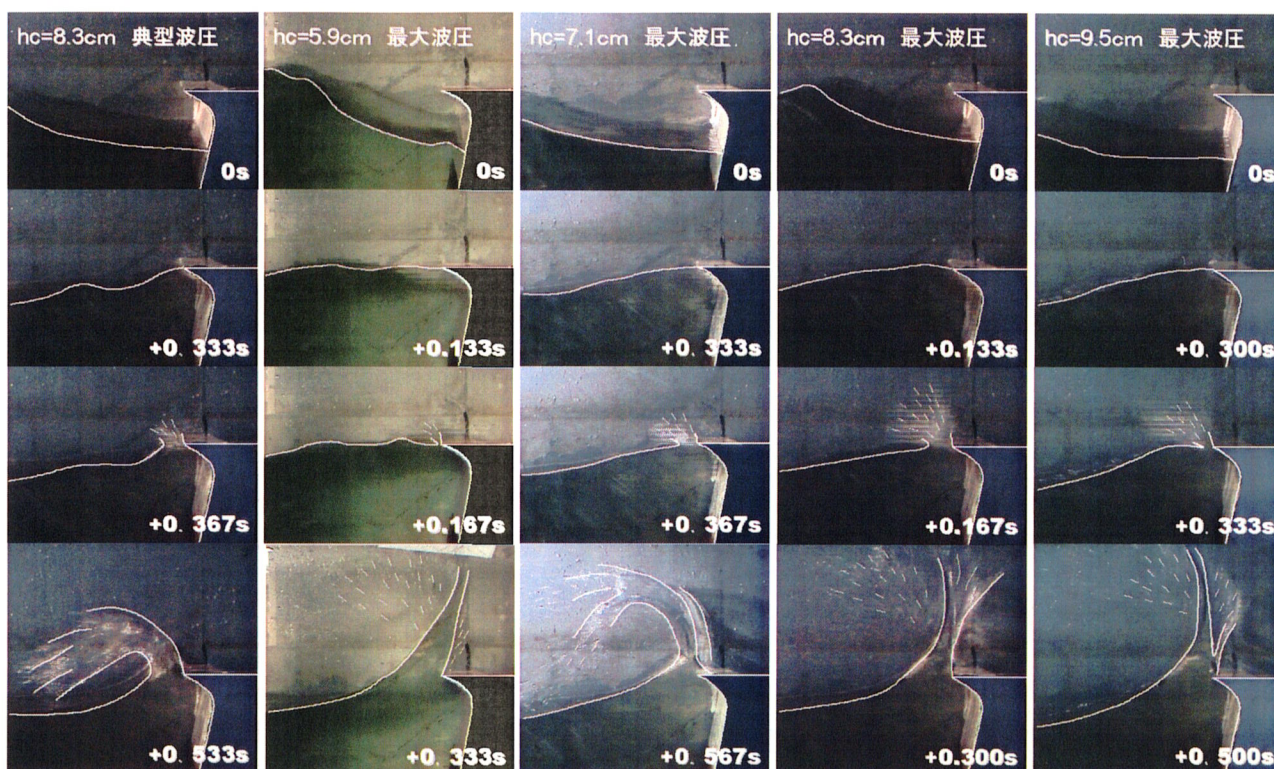


写真-3 波圧作用時の様子

に大きな波圧が作用していることが分かる。また、曲面部の先端(ch. 1)ほど大きな波圧が作用している。波を効果的に返している場合(断面 1(a))の波形は、最大波圧に比べてピーク値が非常に小さい。断面 2 をみると、断面 1 の同時刻に比べて、1/2~1/3 程度の波圧しか作用していない。さらに特徴的なことは、断面 2 の場合には、曲面の先端よりも曲面の中間位置(ch. 3 や ch. 5)で波圧が大きくなっている。これには、曲面形状と作用波の波形勾配などが関係していると思われる。

写真-3 は断面 1 における各天端高の条件において天端付近の ch. 1 で最大波圧を生じたときの実験時の様子である。なお、左端の図(図中、典型波圧と標記)は、図-5 断面 1(a)で示した波圧を生じた時の様子で、効果的に波を返している場合の例として示している。 $h_c=8.3\text{cm}$ における最大波圧を生じた時の様子は、図-5 断面 1(b)の波圧波形に対応する。また、図中の時間は上段に示す瞬間からの経過時間である。効果的に越波を防ぐ場合(左端の図)には、波が曲面に沿って滑らかに沖向きに返されているが、最大波圧を生じた際には、波が曲面に衝突するように作用し、特に $h_c=5.9\text{cm}$ および 8.3cm の場合には急激に鉛直上方に打ち上がっている。なお、大きな波圧が生じる際には、程度に差はあるが越波が生じていた。

(2) 最大作用波圧

図-6 に各天端高の条件における最大波圧の分布

を示す。ここに示す波圧は、各位置における計測時間内での最大波圧であり、必ずしも同一の波によるものではない。また、図中には比較のため合田式で求めた直立護岸に作用する波圧分布、および断面 1 については、波を曲線部で効果的に返している場合(図-5 断面 1(a)に示す典型波圧作用時)の波圧分布も併せて示している。写真-3 に示したように、最大波圧は波が衝撃的に作用した場合に発生しているため、合田式により算定される波圧に比べて非常に大きい。一方、波を曲線部で効果的に返している場合の波圧分布は、合田式による波圧分布と同程度である。天端高が異なる場合の波圧分布を比較すると、単純に天端高が低いほど曲線部に作用する波圧が大きいとはいえず、断面 2 で天端高が低い $h_c=5.9\text{cm}$ の場合には、衝撃的な波圧がほとんど発生していない。また、断面 1 では天端高によらず天端の先端で最も大きな波圧が作用しているが、断面 2 では曲線部の中間で大きな波圧が作用している場合もある。

図-7 は天端から同じ高さにおける最大波圧(同じセンサーで得られた最大波圧)を天端高に対して示したものである。断面 1 についてみると、本実験の天端高の範囲では、天端高と最大波圧の明瞭な関係は認められない。断面 2 では、天端高が増加するにつれ、最大波圧も大きくなっているように見えなくもないが、それ程明確ではない。また、興味深いことに ch. 1 (天端付近)と ch. 3 の天端高に対する波圧の増減が逆になっている。天端高が変化すれば、

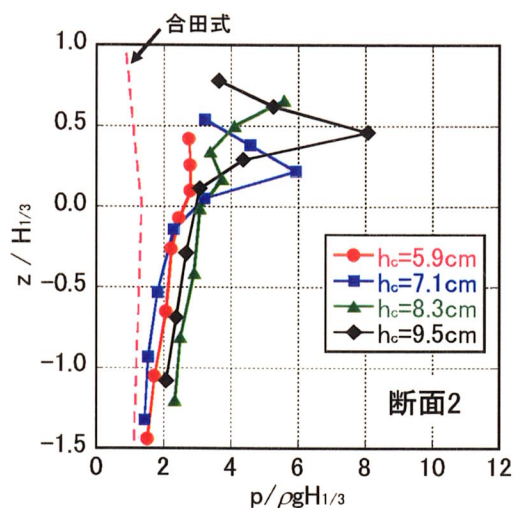
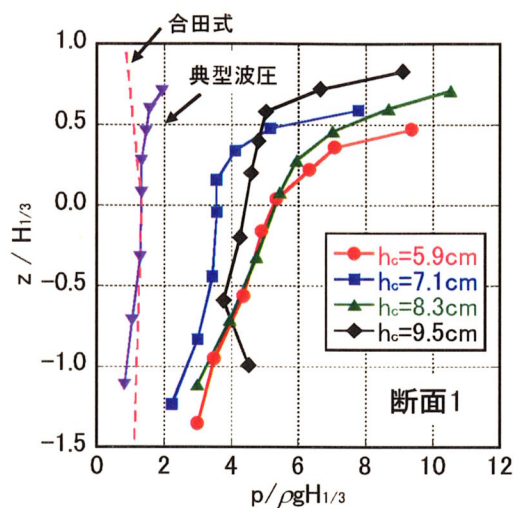


図-6 最大波圧分布 (左図: 断面1, 右図: 断面2)

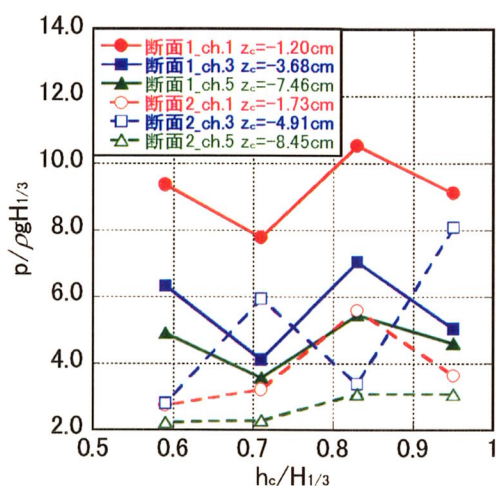


図-7 天端高と最大波圧との関係

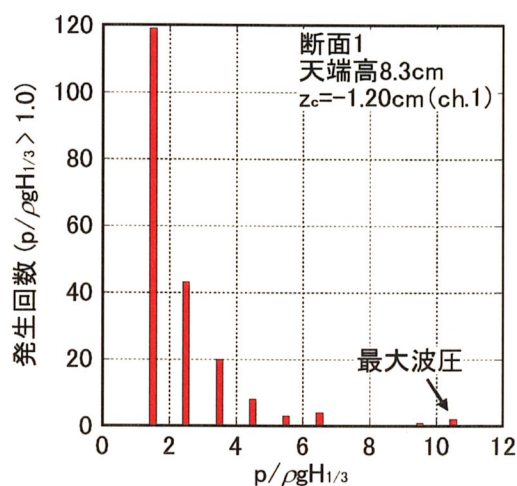


図-8 ピーク波圧のヒストグラム

波と曲線形状との相対的な位置関係が変化し、それによって波の衝突の仕方や反射の程度が変わるため、ある天端高の条件では大きな波圧を生じなかった波が、異なる天端高の条件において大きな波圧を生じることが起こる。結果として、最大波圧分布は天端高の条件によって大きく変動しており、本実験の範囲においては、天端高と最大波圧の間に明確な関係が現れなかったといえる。ただし、本実験で採用した2つの断面形状について比較すると、射出角が大きな断面2では、局所的には断面1に比べて大きな波圧が生じているが、全体的には作用波圧が小さいといえる。

(3) 顕著な波圧の発生頻度

図-4に示したように、不規則波が作用する場合、顕著な波圧が突発的に発生する。そこで、顕著な波圧の発生頻度について検討した。図-8は断面1で天端高 $h_c = 8.3\text{cm}$ の条件における天端付近 (ch.1) に作用した波圧のピーク値のヒストグラムである。なお、波圧のピーク値は $p/\rho g H_{1/3}$ が1.0以上のもの

のを抽出しており、総発生回数は200である。この図より、 $p/\rho g H_{1/3}$ が4を超えるような波圧は少なく、図-5における断面1(b)に示した最大波圧 (図中の矢印) は非常に稀な波圧であるといえる。図-9は同じ条件におけるピーク波圧の発生する時間間隔のヒストグラムであり、図-8のヒストグラムと同様な分布となっている。この時間間隔について累積比率を求めると図-10のようになり、図中に示すように、ピーク波圧の発生時間間隔のヒストグラムが指数分布に従うと仮定して得られる累積比率と非常に良く一致する。この図より、例えば波圧のピークが生じてから20s以内に次のピークが生じる確率は約95%というようなことが分かる。同様に図-11は $p/\rho g H_{1/3}$ が2.0以上のピーク波圧を抽出して求めた発生時間間隔の累積比率である。この場合、ピーク波圧の総数が59と少ないため、指数分布から得られる累積比率曲線との一致の程度が低い、データ数を増やすことで一致の程度は向上することが期待される。これらのことからピーク波圧の発生間隔は指数分布に従うと推測される。

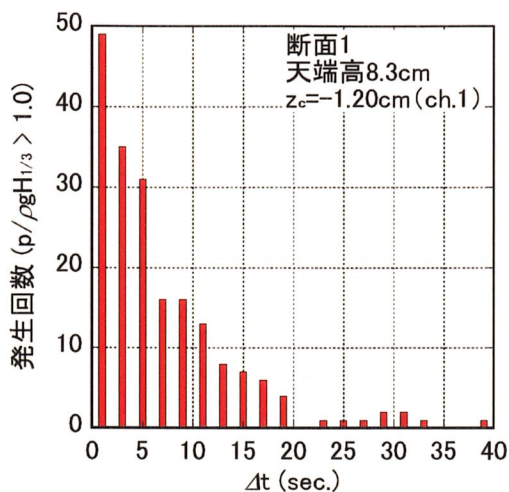


図-9 ピーク波圧の発生時間間隔のヒストグラム

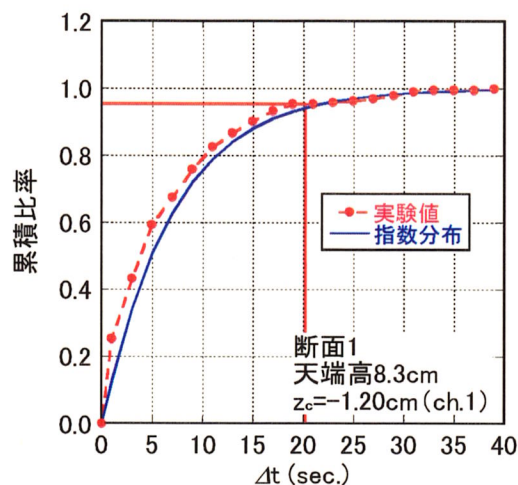


図-10 ピーク波圧の発生時間間隔の累積比率
($p/\rho g H_{1/3} > 1.0$)

4. あとがき

大水深域非越波型護岸における基本的な波圧特性を把握するため、2つの断面形状を対象に水理模型実験を行った。非越波型護岸では特に天端の先端付近に作用する波圧が大きくなる傾向があるが、護岸断面の射出角と曲線形状によっては、曲面部の中間付近で大きな波圧が生じることもある。つまり、非越波型護岸の曲面形状が変化すると、波の作用の仕方が変化するため、不規則波の中の最大波圧を生じる波や大きな波圧が作用する場所も曲面の変化に応じて変わる。しかし、射出角が大きいほど平均的な作用波圧が小さくなることは明らかである。また、天端高が変化することによっても、波の作用の仕方が変わるため、本実験の範囲においては、天端高が高くなるほど最大波圧が低減するという単純な関係は得られなかったが、ある程度以上の天端高に対しては天端が高くなるとともに、作用波圧が低減すると推測される。加えて、顕著な波圧が発生する頻度が指数分布で表されることを示した。今後は、大きな波圧が生じる際の波形と護岸断面との相対的な関係を明らかにし、そのような状況が不規則波群中に生じる頻度について検討することが必要である。

謝辞：本研究においては、波圧の計測について、八代工業高等専門学校の上久保助手より御助言を頂きました。また、実験の実施においては修士課程に在籍していた小野貴也君（現㈱三洋コンサルタント）、古本裕一君（現博士後期課程）、および現在修士課程に在籍している加嶋武志君、村上和康君に協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Murakami, K., I. Irie, Y. Kamikubo : Experiments on a non-wave overtopping type seawall, *Proceedings of 25th*

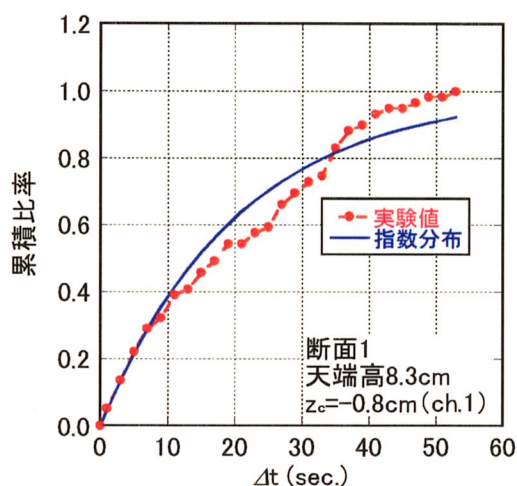


図-11 ピーク波圧の発生時間間隔の累積比率
($p/\rho g H_{1/3} > 2.0$)

- International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 1840-1851, 1996.
- 2) 上久保祐志, 入江 功, 村上啓介, 神田一紀 : 護岸上の完全開放を目的としたフレア型護岸の特性について, テクノオーシャン 98 論文集, pp. 129-132, 1998.
- 3) Kamikubo, Y., K. Murakami, I. Irie and Y. Hamasaki : Study on Practical Application of a Non-Wave Overtopping Type Seawall, *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, Volume3 pp 2215-2228, 2000.
- 4) 山城 賢, 吉田明徳, 久留島暢之, 井ノ口洋平, 入江 功 : 大水深域における非越波型護岸の開発, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 641-645, 2003.
- 5) Yamashiro, M., A. Yoshida and I. Irie : Development of non wave-overtopping type seawall in deepwater, *Proceedings of 29th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 4367-4378, 2004.
- 6) 橋本裕樹, 山城 賢, 吉田明徳, 上谷佳寛, 森屋陽一, 越智宏充 : 大水深域非越波型護岸の基本的越波特性について, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp. 283-288, 2006.
- 7) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊地治 : 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 1976