

うねりによる高波の発生確率とその地域特性に関する考察

平山 克也¹・加島 寛章²・伍井 稔³・成毛 辰徳⁴

¹正会員 (国研)港湾空港技術研究所 海洋研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)
E-mail:hirayama@pari.go.jp

²正会員 (国研)港湾空港技術研究所 海洋研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)
E-mail:kashima@pari.go.jp

³いであ株式会社 沿岸・海岸事業部 (〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早渕二丁目2-2)
E-mail:iminoru@ideacon.co.jp

⁴いであ株式会社 沿岸・海岸事業部 (〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早渕二丁目2-2)
E-mail:ntatsuno@ideacon.co.jp

近年では、設計沖波に比べ沖での波高は小さいものの、より長い周期を有する作用波による港湾・海岸構造物の被災事例が散見される。そこで本研究では、我が国沿岸で観測された波浪台帳を風波とうねりに分離するとともに、できるだけ長期間の極大値資料を用いて従来の高波に加え、風波、うねりに対する極値分布及び50年確率沖波を推定し、これらの地域特性を考察した。さらに、代表海域での波浪変形計算を行い、防波堤への作用波の違いを検討した。

これらの結果、日本海側で稀に出現するうねりは高波となり易いことや、日本海側では風波、太平洋側ではうねりの来襲時に最高波高比が1.8を上回る高波が継続し易いこと、及び太平洋側で出現するうねりの50年確率沖波は、従来の設計よりも大きな最高波高を施設に作用させる場合があること等が判明した。

Key Words : extreme value distribution, swell, maximum wave height, NOWPHAS, NOWT-PARI

1. はじめに

沿岸構造物についての代表的な技術基準である港湾の施設の技術上の基準・同解説(以降、技術基準)によれば、50年確率波などの設計沖波については従来、波高のみに着目した極値資料の母集団として推定した極値分布をもとに波高が算定され、その周期は波高との関係に基づき設定される。しかし近年では、設計沖波に比べ沖での波高は小さいものの、より長い周期を有する作用波による港湾・海岸構造物の被災事例が散見される¹⁾。

平成19年度に改訂された現在の技術基準では、従来の設計沖波を変動波浪として定義する一方、発生確率は低いものの一度発生すれば設計対象施設に大きな影響を及ぼすものを偶発波浪と定義し、その波浪外力に対する施設の要求性能が示されている。しかし、その波浪諸元の設定方法について具体的な考え方が示されていないため、従来の設計外力を上回る近年の作用波を踏まえ、変動波浪としての設計沖波を見直すのか、あるいはこれらの高波を偶発波浪として捉え、これに対する設計は行わない代わりに施設の安全性を担保すべきなのか、を判断する

ことは未だ容易ではない。

そこで本研究では、北陸沿岸を対象に偶発波浪の設定法を検討した平山ら²⁾の研究を参考として、我が国沿岸で観測された風波及びうねりの発生確率や波群中の最高波高比を整理するとともに、これらの地域特性を明らかにし、変動波浪における周期の影響について考察することを目的とした。ただし、波高と周期の結合確率分布に着目して設計波周期の設定方法を議論する³⁾のではなく、NOWPHAS波浪観測台帳の周期や波形勾配に着目して風波とうねりを分離することにより、できるだけ長い観測期間に対するうねりによる高波の極値分布を推定した。さらに、代表的な海域を対象として、設計沖波(風波、うねり)に対する浅海域波浪変形計算を波動モデルを用いて行い、防波堤への作用波に与える影響を検討した。

2. 風波及びうねりによる高波の発生確率

ここでは、周期を考慮した設計沖波としてうねりの50年確率波諸元を考え、波高に着目した従来の設計沖波との関係を整理することにより、変動波浪の推定に周期を

表-1 対象としたNOWPHAS波浪観測地点とその観測期間、及び極値統計解析の対象期間の一覧

| 観測地点 | 種別 | 水深[m] | 観測期間 | | 極値統計期間 | | 備考 |
|-------|-----|-------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| | | | 2時間毎 | 連続 | 全方位 | 波向別 | |
| 秋田 | 沿岸 | 29.0 | 1988-2005: 18年間 | 2006-2012: 7年間 | 1988-2012: 25年間 | 1991-2012: 22年間 | |
| 鳥取 | | 30.9 | 1979-2004: 26年間 | 2005-2012: 8年間 | 1979-2012: 34年間 | 1995-2012: 18年間 | |
| 苫小牧 | | 50.7 | 1982-2005: 23年間 | 2006-2012: 7年間 | 1982-2012: 30年間 | 1996-2012: 16年間 | 2001年は通年で欠測 |
| 石巻 | | 20.8 | 1995-2004: 9年間 | 2005-2012: 8年間 | 1995-2012: 17年間 | 1995-2012: 17年間 | 1998年は通年で欠測 |
| 鹿島 | | 24.6 | 1972-2004: 32年間 | 2005-2012: 7年間 | 1972-2012: 39年間 | 1991-2012: 21年間 | 1983年及び2009年は通年で欠測 |
| 清水 | | 51.8 | 2000-2004: 5年間 | 2005-2012: 8年間 | 2000-2012: 13年間 | 2000-2012: 13年間 | |
| 高知 | | 24.1 | 1997-2004: 8年間 | 2005-2012: 8年間 | 1997-2012: 16年間 | 1997-2012: 16年間 | |
| 細島 | | 48.3 | 2002-2004: 3年間 | 2005-2012: 8年間 | 2002-2012: 11年間 | 2002-2012: 11年間 | |
| 秋田県沖 | | GPS | 104 | - | 2011-2012: 2年間 | 2011-2012: 2年間 | |
| 宮城中部沖 | 144 | | - | 2009-2012: 4年間 | 2009-2012: 4年間 | | |
| 高知西部沖 | 309 | | - | 2009-2012: 4年間 | 2009-2012: 4年間 | | |

考慮することの影響について考察した。

(1) 風波及びうねりの出現特性

a) 風波及びうねりの出現率

我が国沿岸を代表する8地点（沿岸波浪計）とその沖合3地点（GPS波浪計）及びこれらの観測期間を表-1に示す。地点毎に設置時期が異なるため、沿岸波浪計では偶数正時毎に20分間の観測を行った期間にはばらつきがみられる。しかし、いずれも2005年ないし2006年のうちに切れ目のない連続観測に切り替えられたため、2012年までに7~8年の観測期間を有する。一方、設置当初から連続観測としたGPS波浪計の観測期間は2~4年である。

そこで、後述する高波抽出においてその継続時間をも適切に抽出できるよう、連続観測されたNOWPHAS波浪観測台帳を用い、図-1に示す通り、有義波周期8s以上（川口ら⁴⁾）かつ波形勾配0.025未満（平山ら²⁾）と定義して抽出したうねりの出現率を、その対偶とした風波と

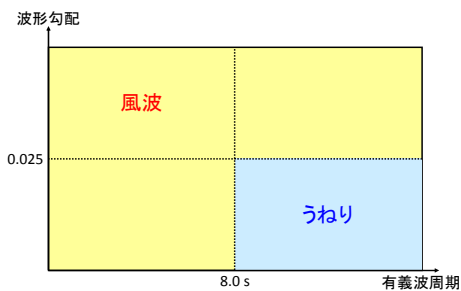


図-1 風波とうねりの定義

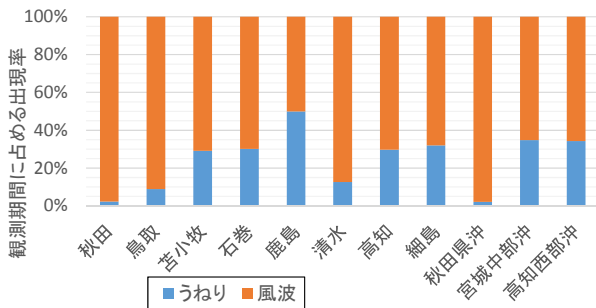


図-2 観測期間に占める風波及びうねりの出現率

ともに、図-2に示す。なお、風波とうねりを区別しない従来の風波は、便宜上“全ての波”と呼ぶこととした。

図-2より、連続観測期間に占めるうねりの出現率は、フェッチが比較的短い日本海に面する秋田（及び秋田県沖）と鳥取で低い一方、御前崎による遮蔽効果を受ける清水を除き、太平洋側で30~50%と高いことがわかる。これらは、富山湾に時折来襲する寄り回り波を除けば、我が国沿岸でのうねりの来襲傾向と定性的によく一致することから、図-1の定義はほぼ妥当と考えられる。

b) 高波の抽出方法

このようにして分離した風波及びうねりによる高波を図-3のように定義し、極大値資料の抽出作業の効率化を図ることとした。すなわち、全ての波について未超過出現確率85%を超える有義波高が継続する期間を1つの擾乱と定義した。また、このうち風波またはうねりの未超

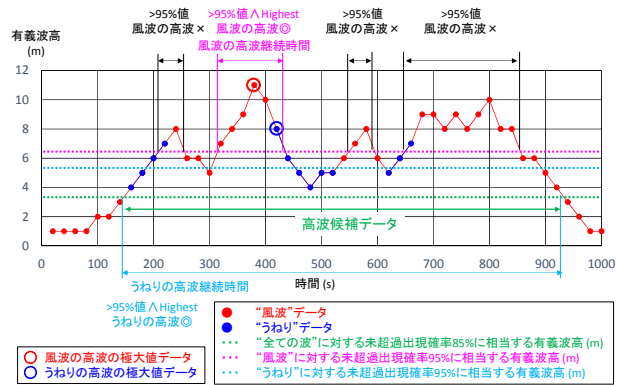
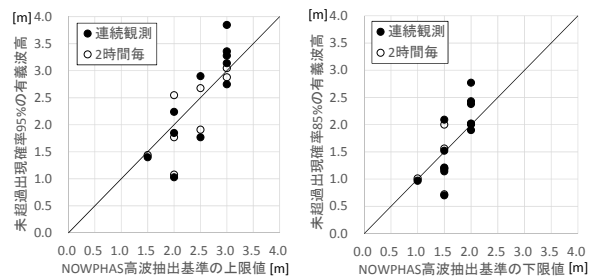


図-3 風波またはうねりによる高波の極大値資料の定義



(a) 上限値との関係

(b) 下限値との関係

図-4 全ての波の未超過出現確率と高波抽出基準との関係

過出現確率95%を超える高波が継続する期間に着目し、このピーク波高をそれぞれ1つの極大値資料とするとともに、風波についてはこの継続時間、うねりについては擾乱期間、をそれぞれ高波継続時間とみなした。したがって、1つの擾乱期間に“風波とうねりが混在”する場合には、風波の極大値とうねりの極大値がそれぞれ1つずつ出現することになるが、後述する風波の極値統計解析ではこのうち風波の極大値だけを採用し、風波のみの極大値資料と合わせて解析する一方、うねりの極値統計解析ではうねりのみの極大値資料を用いるものとした。

ここで、連続観測における全ての波の未超過出現確率95%及び85%について、各地点で定義されたNOWPHAS年報における高波抽出基準⁴⁾の上限値及び下限値に対し

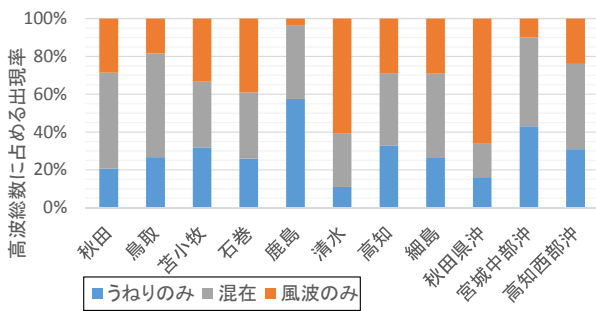
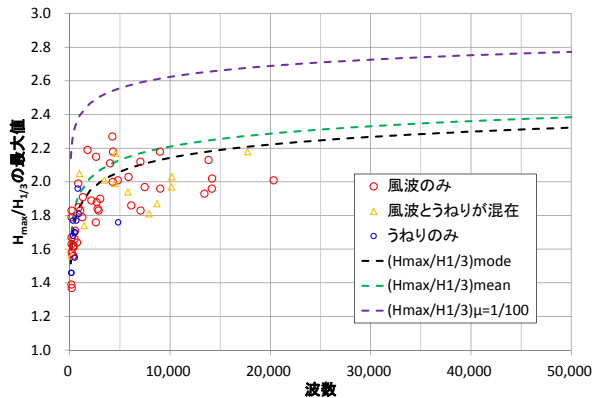
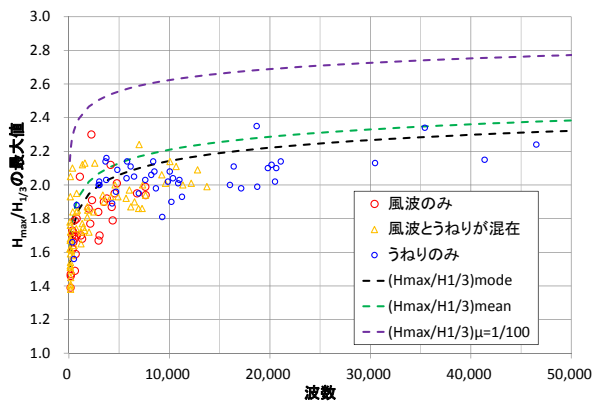


図-5 高波総数に占める風波及びうねりの出現率



(a) 秋田県沖



(b) 高知西部沖

図-6 観測波数と最高波高比 $H_{max}/H_{1/3}$ との関係

てプロットした結果を、2時間毎観測によるものと合わせて図-4(a), (b)に示す。いずれのグラフでも各プロットは斜め45度の直線の周りに分布していることから、全ての波の未超過出現確率95%及び85%はそれぞれ高波抽出基準の上限値及び下限値に相当し、図-3で定義した擾乱期間は年に20擾乱程度の高波期間にほぼ等しいと考えられる。また、下限値に対する連続観測の各プロットは2時間毎観測によるものとよく一致していることから、少なくともある擾乱を抽出する過程において、両データの質の違いによる影響はほとんどないと考えてよい。

c) 風波及びうねりによる高波の割合及び最高波高比

このようにして抽出した風波またはうねりの極大値資料について、これらの総数に占めるそれぞれの出現率を図-5に示す。観測期間に占めるうねりの出現率を示した図-2と比較すると、高波総数に占めるうねりの出現率は、太平洋側で同等であるのに対し、日本海側では増加している。すなわち、日本海側で稀に出現するうねりは高波となり易いことがわかる。

一方、高波継続時間中の波高分布がレーリー分布に従うとき、最高波高比 $H_{max}/H_{1/3}$ の期待値は波数に依存する。そこで、秋田県沖及び高知西部沖で観測された高波継続時間中の $H_{max}/H_{1/3}$ の最大値をプロットしたものを、これらの期待値とともにそれぞれ図-6(a), (b)に示す。ここで、期待値のうち、modeは度数分布の最頻値、meanは平均値、 $\mu=1/100$ は超過確率1/100の場合を表す。風波とうねりが混在する場合、風波の波数に対する $H_{max}/H_{1/3}$ の出現傾向は両地点でほとんど差異はないが、冬季風浪が継続し易い日本海側では風波のみ、外洋に面した太平洋側ではうねりのみが来襲するとき、1.8を上回る $H_{max}/H_{1/3}$ 値を有する高波がそれぞれ出現し易いことがわかる。

(2) 風波及びうねりの極値分布

a) 極大値資料の抽出期間

以下では、できるだけ長期間のNOWPHAS波浪観測台帳から風波及びうねりによる高波の極大値資料を得るために、2時間毎観測では擾乱時のピーク波高を捉えきれない可能性があるという連続観測とのデータの質の違いを無視し、表-1にすでに示した通り両者を合わせた観測期間を対象とした。ただし、波向別の極大値資料は各地点で波向観測が開始されて以降の期間を対象とした。

b) 風波及びうねりによる高波の極値分布

これらの極大値資料に加え、風波、うねりに対するものとは異なる、全ての波の未超過出現確率95%を超えるピーク波高を抽出した従来と同様な極大値資料をもとに、それぞれの極値分布を推定した。沿岸波浪計に比べ観測期間が極端に短いGPS波浪計による各地点を除外したこれらの解析結果を、全ての波、風波、うねりのそれぞれについて推定した50年確率沖波諸元とともに、表-2に示

表-2 全ての波、風波及びうねりに対する我が国沿岸の極値分布及び50年確率波高の地域特性

| 地域 | 観測地点 | 波向き | 対象年数 | 全ての波 | | | | | | 風波 | | | | | | うねり | | | | | |
|-------|------|-----|------|------|---------------|--------------|--------|--------|---------------|------|---------------|---------------|--------|--------|---------------|-----|---------------|---------------|--------|--------|---------------|
| | | | | N | λ | 極値分布関数 | 波高[m] | 周期[s] | γ_{50} | N | λ | 極値分布関数 | 波高[m] | 周期[s] | γ_{50} | N | λ | 極値分布関数 | 波高[m] | 周期[s] | γ_{50} |
| 日本海沿岸 | 秋田 | 全方位 | 25 | 568 | 22.7 | ワイブル(k=1.0) | 11.73 | 14.4 | 1.20 | 566 | 22.6 | ワイブル(k=1.0) | 11.73 | 14.4 | 1.20 | 82 | 3.3 | ワイブル(k=1.0) | 4.11 | 11.2 | 1.11 |
| | | WNW | 72 | 3.3 | ワイブル(k=1.0) | 7.44 | 11.7 | 1.23 | 73 | 3.3 | ワイブル(k=1.0) | 7.43 | 11.7 | 1.22 | 21 | 1.0 | 極値I型 | 3.54 | 10.4 | 1.07 | |
| | | W | 331 | 15.0 | ワイブル(k=1.4) | 9.69 | 12.9 | 1.15 | 329 | 15.0 | ワイブル(k=1.4) | 9.69 | 12.9 | 1.15 | 41 | 1.9 | ワイブル(k=1.4) | 3.78 | 10.7 | 1.10 | |
| | | WSW | 68 | 3.1 | ワイブル(k=1.4) | 8.88 | 12.3 | 1.20 | 68 | 3.1 | ワイブル(k=1.4) | 8.87 | 12.3 | 1.20 | 10 | 0.5 | ワイブル(k=1.4) | 4.19 | 11.3 | 1.18 | |
| | | 全方位 | 34 | 780 | 22.9 | ワイブル(k=1.0) | 8.46 | 12.5 | 1.18 | 758 | 22.3 | ワイブル(k=1.4) | 7.45 | 11.7 | 1.12 | 221 | 6.5 | ワイブル(k=1.4) | 4.66 | 12.2 | 1.09 |
| | 鳥取 | NNE | 18 | 34 | 1.9 | ワイブル(k=1.0) | 6.00 | 10.7 | 1.23 | 33 | 1.8 | ワイブル(k=1.0) | 6.01 | 10.7 | 1.23 | 13 | 0.7 | ワイブル(k=1.4) | 4.05 | 11.2 | 1.13 |
| | | N | 109 | 6.1 | ワイブル(k=1.4) | 7.20 | 12.1 | 1.15 | 95 | 5.3 | ワイブル(k=1.4) | 7.23 | 12.1 | 1.15 | 83 | 4.6 | ワイブル(k=1.4) | 4.84 | 12.5 | 1.11 | |
| | | NNW | 165 | 9.2 | ワイブル(k=1.4) | 6.78 | 11.5 | 1.14 | 164 | 9.1 | ワイブル(k=1.4) | 6.86 | 11.6 | 1.14 | 41 | 2.3 | ワイブル(k=1.4) | 3.97 | 11.0 | 1.08 | |
| | | 全方位 | 30 | 851 | 28.4 | ワイブル(k=1.0) | (7.29) | (11.2) | 1.20 | 746 | 24.9 | ワイブル(k=1.0) | (7.29) | (10.8) | 1.20 | 326 | 10.9 | ワイブル(k=1.0) | 5.77 | 14.3 | 1.21 |
| | | S | 16 | 61 | 3.8 | ワイブル(k=1.0) | 5.94 | 9.8 | 1.26 | 61 | 3.8 | ワイブル(k=1.4) | 5.55 | 9.6 | 1.20 | 13 | 0.8 | ワイブル(k=1.0) | 4.05 | 12.2 | 1.30 |
| 太平洋北岸 | 苫小牧 | SSE | 16 | 125 | 7.8 | ワイブル(k=1.0) | 6.11 | 11.0 | 1.23 | 91 | 5.7 | ワイブル(k=1.0) | 5.99 | 10.1 | 1.25 | 65 | 4.1 | ワイブル(k=1.4) | 4.77 | 13.7 | 1.17 |
| | | SE | 142 | 8.9 | ワイブル(k=1.4) | 5.61 | 10.4 | 1.16 | 119 | 7.4 | ワイブル(k=1.0) | 6.08 | 10.1 | 1.23 | 88 | 5.5 | 極値II型(k=10.0) | 5.66 | 13.2 | 1.26 | |
| | | 全方位 | 17 | 419 | 24.6 | ワイブル(k=1.0) | 6.23 | 12.0 | 1.21 | 538 | 31.6 | ワイブル(k=0.75) | 6.96 | 12.5 | 1.30 | 179 | 10.5 | ワイブル(k=1.4) | (4.48) | (13.9) | 1.13 |
| | 石巻 | SSE | 17 | 241 | 14.2 | ワイブル(k=1.0) | 5.83 | 12.2 | 1.23 | 280 | 16.5 | ワイブル(k=0.75) | 6.59 | 12.5 | 1.33 | 121 | 7.1 | ワイブル(k=1.4) | 4.30 | 12.9 | 1.14 |
| | | SE | 95 | 5.6 | ワイブル(k=1.0) | 5.39 | 14.6 | 1.27 | 90 | 5.3 | ワイブル(k=0.75) | 5.41 | 12.5 | 1.40 | 46 | 2.7 | ワイブル(k=2.0) | 4.04 | 14.0 | 1.13 | |
| | | 全方位 | 39 | 672 | 17.2 | ワイブル(k=1.0) | (8.63) | (13.6) | 1.20 | 489 | 12.5 | ワイブル(k=1.0) | (8.82) | (13.3) | 1.20 | 473 | 12.1 | ワイブル(k=1.0) | 6.12 | 15.6 | 1.17 |
| | 鹿島 | E | 51 | 2.4 | ワイブル(k=1.0) | 6.50 | 12.1 | 1.24 | 34 | 1.6 | ワイブル(k=1.4) | 6.25 | 11.5 | 1.20 | 33 | 1.6 | 極値II型(k=3.33) | 5.25 | 14.0 | 1.32 | |
| | | ENE | 81 | 3.9 | ワイブル(k=1.0) | 7.57 | 13.1 | 1.25 | 59 | 2.8 | ワイブル(k=1.4) | 7.26 | 12.4 | 1.19 | 66 | 3.1 | ワイブル(k=1.0) | 5.41 | 14.5 | 1.19 | |
| | | NE | 112 | 5.3 | ワイブル(k=1.0) | 7.93 | 14.0 | 1.23 | 78 | 3.7 | ワイブル(k=1.0) | 8.02 | 13.4 | 1.25 | 88 | 4.2 | ワイブル(k=1.4) | 5.64 | 14.8 | 1.14 | |
| | | 全方位 | 13 | 392 | 30.2 | ワイブル(k=1.0) | 5.87 | 13.0 | 1.23 | 699 | 53.8 | ワイブル(k=0.75) | 5.44 | 11.0 | 1.29 | 83 | 6.4 | ワイブル(k=1.0) | 5.90 | 14.5 | 1.23 |
| 太平洋南岸 | 清水 | SSE | 13 | 226 | 17.4 | ワイブル(k=1.4) | 4.53 | 11.4 | 1.17 | 245 | 18.8 | ワイブル(k=1.4) | 5.31 | 11.3 | 1.33 | 67 | 5.2 | 極値II型(k=10.0) | 4.64 | 12.5 | 1.22 |
| | | SE | 20 | 1.5 | ワイブル(k=1.0) | 6.13 | 18.1 | 1.48 | 35 | 2.7 | 極値II型(k=2.5) | 3.05 | 8.0 | 1.62 | 7 | 0.5 | ワイブル(k=2.0) | 5.86 | 19.1 | 1.32 | |
| | | 全方位 | 16 | 372 | 23.3 | ワイブル(k=0.75) | 13.71 | 16.9 | 1.33 | 398 | 24.9 | ワイブル(k=0.75) | 13.91 | 16.6 | 1.34 | 155 | 9.7 | ワイブル(k=1.0) | (7.28) | (17.5) | 1.22 |
| | 高知 | SSE | 16 | 129 | 8.1 | ワイブル(k=1.0) | 8.20 | 14.0 | 1.26 | 134 | 8.4 | ワイブル(k=1.0) | 8.39 | 13.4 | 1.28 | 69 | 4.3 | ワイブル(k=1.0) | 6.42 | 16.3 | 1.25 |
| | | SE | 10 | 75 | 4.7 | ワイブル(k=1.4) | 6.00 | 13.2 | 1.20 | 66 | 4.1 | ワイブル(k=1.0) | 6.56 | 12.4 | 1.30 | 30 | 1.9 | ワイブル(k=1.4) | 5.23 | 14.6 | 1.19 |
| | | 全方位 | 11 | 230 | 20.9 | ワイブル(k=0.75) | 15.06 | 15.6 | 1.33 | 299 | 27.2 | ワイブル(k=0.75) | 14.86 | 15.5 | 1.34 | 110 | 10.0 | ワイブル(k=1.0) | 8.25 | 16.7 | 1.21 |
| | 細島 | SSE | 11 | 38 | 3.5 | 極値II型(k=2.5) | 11.56 | 15.4 | 1.71 | 44 | 4.0 | 極値II型(k=3.33) | 11.58 | 14.4 | 1.63 | 21 | 1.9 | 極値II型(k=10.0) | 7.22 | 15.1 | 1.28 |
| | | SE | 18 | 1.6 | ワイブル(k=1.0) | 8.19 | 13.5 | 1.34 | 20 | 1.8 | ワイブル(k=1.0) | 8.78 | 13.7 | 1.41 | 9 | 0.8 | ワイブル(k=2.0) | 5.71 | 13.8 | 1.19 | |
| | | ESE | 49 | 4.5 | 極値II型(k=5.0) | 8.21 | 14.6 | 1.38 | 42 | 3.8 | 極値II型(k=3.33) | 8.37 | 12.8 | 1.54 | 32 | 2.9 | ワイブル(k=1.4) | 5.98 | 14.2 | 1.16 | |
| | | E | 32 | 2.9 | 極値II型(k=3.33) | 6.40 | 13.5 | 1.39 | 37 | 3.4 | 極値II型(k=5.0) | 6.45 | 11.4 | 1.38 | 14 | 1.3 | 極値II型(k=5.0) | 5.85 | 14.3 | 1.28 | |

す。表中、Nはデータ数（データ採択率 $\nu=1.0$ ）、 λ は高波の平均発生率、 γ_{50} は裾長さパラメータである。ただし、赤字で示した極値分布、50年確率沖波諸元及び γ_{50} は、REC基準またはDOL基準により9種類のあてはめ極値分布関数がすべて棄却されたため、最小のMIR値となる極値分布関数を採用して推定した結果であることを示す。

表より、全ての波と風波の極値分布は、全方位、方位別ともによく一致することが確認できる。またこれらは、Godara⁹が示した地域共通分布関数のうち、台風に限定して解析された太平洋南岸（波浮～中城）を除き、太平洋北岸（苫小牧～鹿島）のワイブル分布(k=1.0)、 $\gamma_{50}=1.20\sim 1.24$ 及び日本海沿岸（留萌～浜田）のワイブル分布(k=1.4)、 $\gamma_{50}=1.13\sim 1.14$ とも比較的よく一致していることから、極大値資料の抽出に用いた図-3の定義はほぼ妥当であったと考えられる。さらに、うねりの極値分布に関する地域特性もこれらと概ね似た傾向を示すが、全ての波や風波に比べ、裾長さパラメータは比較的小さく、また、波向きによっては岬や島による遮蔽の影響を受ける石巻や清水、細島では、最適な分布関数が異なっている。

また、合わせて示した全ての波、風波及びうねりに対する50年確率沖波をみると、極値分布からも予想されるように、うねりの出現率が小さい日本海側は当然のこと、太平洋に開けた各地点でも、全ての波と風波の50年確率沖波はほぼ一致している。したがって、少なくとも実務においては、全ての波を対象とした従来の極値統計解析をうねりを除いた風波に対して改めて実施し、設計沖波を算出し直す必要はないと考えられる。ただし、周辺地形の影響を受ける石巻のSSEや清水のSSEなどでは、全ての波よりも風波に対する50年確率波高が大きくなる点に注意を要する。

一方、外洋に開けた太平洋側の各地点（苫小牧、鹿島、高知）では、同じ再現期間50年に対し、全ての波に比べ

波高は少し小さいが、周期は少し長いうねりが出現している。これらの状況は冒頭で述べた沿岸構造物の設計沖波と被災波の沖波諸元との関係によく似ていることから、これらの被災波は、うねりに着目することで推定可能な変動波浪の1つとして捉えることができると考えられる。

したがって、これらの結果より、変動波浪である現在の設計沖波は、波高のみに着目した全ての波に対するものに加え、必要に応じ、周期に着目したうねりに対するものも合わせて算定すべきであることがわかった。なお、これらのうちいずれを設計沖波として採用すべきかは、次章で述べる構造物への作用波の算定結果による。

3. 確率沖波の波浪変形計算

ここでは、全ての波及びうねりの50年確率沖波に対する波浪変形計算を行い、沖防波堤に作用する最高波高 H_{max} 及び有義波高 $H_{1/3}$ を比較し、出現特性を考察した。

(1) 計算条件

前章において、うねりの極値分布に着目することにより、従来の設計沖波（全ての波に対する50年確率沖波）に比べ、波高は少し小さいが周期は少し長い50年確率沖

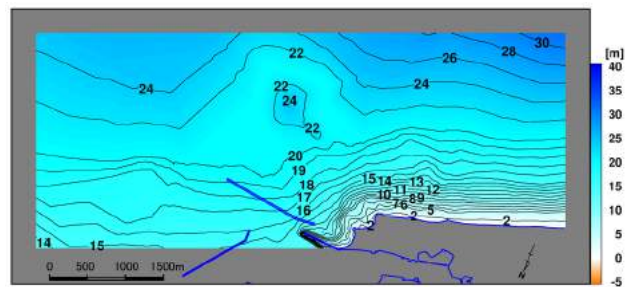
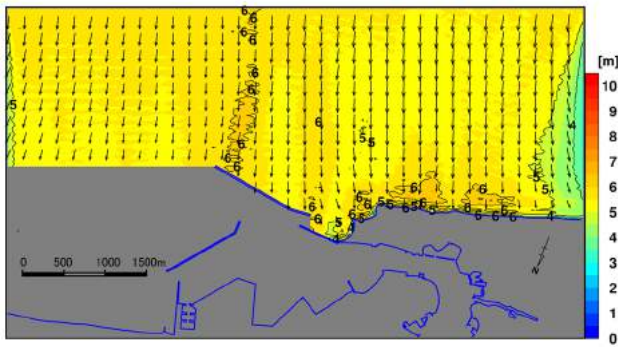
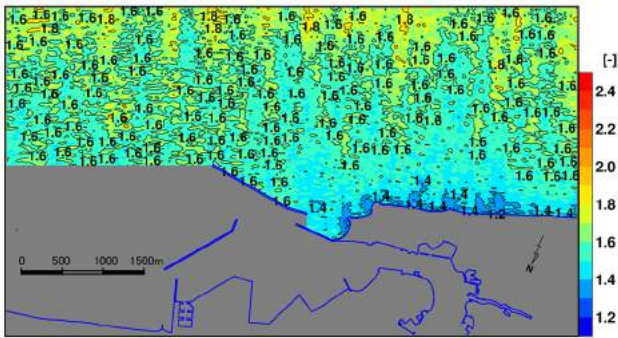


図-7 対象とした計算領域及び海底地形（高知港沖）

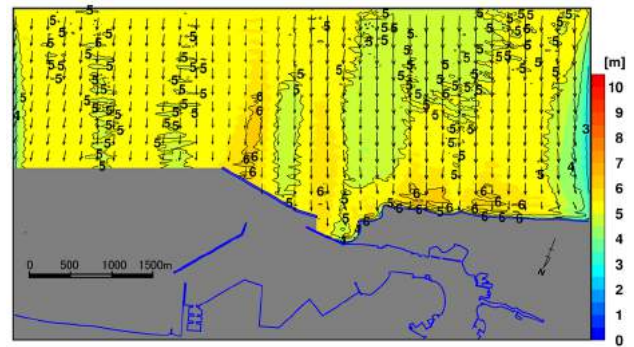


(a) $H_{1/3}$

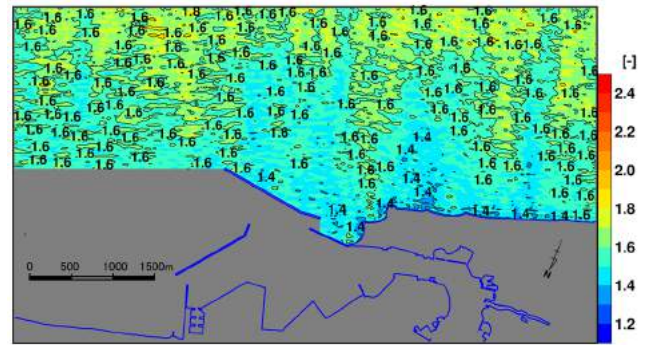


(b) $H_{max}/H_{1/3}$

図-8 全ての波による波浪統計量の空間分布
(波高 6.00m, 周期 13.2s, SSE, $S_{max}=25$)



(a) $H_{1/3}$



(b) $H_{max}/H_{1/3}$

図-9 うねりによる波浪統計量の空間分布
(波高 5.23m, 周期 14.6s, SSE, $S_{max}=75$)

波が推定された高知のSSE (表-2の赤枠)を対象として、砕波モデル等が改良されたブシネスクモデル⁹⁾を用いた浅海域波浪変形計算を実施した。ここで、沖波スペクトルには修正ブレットシュナイダー・光易型を仮定し、方向集中度パラメータ S_{max} は、うねりに重畳した風波による高波と考えられる全ての波に対しては25、うねりのみによる高波に対しては75と設定した。また、沖から造波境界までの変形計算にはエネルギー平衡方程式法を用い、造波境界上で得られる複数の方向スペクトルに対する多方向不規則波の造波には、各地点で共通の成分波数を512として平山ら⁹⁾による方法を用いた。

対象とした計算領域及び海底地形を図-7に示す。沖防波堤の前面海域には造波境界上の水深28m程度から水深20mにかけて海脚地形が存在するため、沖防波堤に作用する波は、波長や波形勾配に応じてこれによる屈折・浅水変形を受けることが予想される。ただし、岸側の陸地境界を含め、開境界からの反射波が生じないよう、計算領域の周囲には十分な幅のスポンジ層を設置する一方、実際には防波堤を設置せず、進行波としての作用波を算定することとした。また、潮位はH.W.L. (=DL+1.90m)とした。なお、差分計算に空間格子幅は10m、時間間隔は入射波周期の1/500となるよう設定し、波浪統計量の算定には計算開始後100波後から1100波後までの1000波分の水位変動データを用いた。

(2) 計算結果

全ての波及びうねりの50年確率沖波に対する波浪変形計算結果のうち、有義波高 $H_{1/3}$ 及び最高波高比 $H_{max}/H_{1/3}$ の空間分布をそれぞれ図-8及び図-9に示す。ただし、特に最高波高 H_{max} の空間的なばらつきを極力抑制するために、これらは各計算格子の水位変動データを200波毎の5波群に分割して得られる波浪統計量の平均値とした。したがって、沖での $H_{max}/H_{1/3}$ の期待値は高々1.6~1.8程度である。

両図を比較すると、沖での波高の違いを反映して $H_{1/3}$ は全体的に全ての波のほうが大きいものの、沖防波堤前面の海脚地形周辺やその西側の海浜前面の急勾配斜面上では、両者の違いはほとんど見られない。これは、相対水深が浅いうねりにおいて、屈折による波高集中や浅水変形による波高増大がより顕著に生じたためと考えられる。また、波形勾配が大きい全ての波でより顕著な海浜前面での $H_{max}/H_{1/3}$ 値の減少は、波群中の大きな波高から

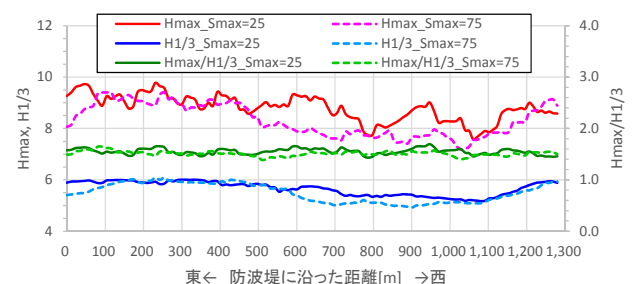


図-10 沖防波堤へ作用する波浪統計量の空間分布

順に碎波していることを示している。したがって、このような碎波帯内に設置される海岸護岸に作用する H_{max} は、波高は従来と同等だがより周期の長いうねりにおいて大きくなることに注意しておく必要がある。なお、海脚地形上の屈折によるうねりの波高集中時に $H_{max}/H_{1/3}$ 値が低下する原因は、最高波が出現した水面形状で生じる回折に似たエネルギー逸散によるものと考えられる。

最後に、沖防波堤法線で出現するこれらの波浪統計量を比較した結果を図-10に示す。いずれの波高及び波高比とも、 $S_{max}=25$ とした全ての波のほうが全体的に大きいものの、 $S_{max}=75$ としたうねりがこれらと同等以上となる区間も所々存在することが確認できる。具体的には、これらの箇所は上述した海脚地形周辺での屈折・浅水変形による影響が及ぶ区間に対応する。したがって、碎波帯外に位置する防波堤であっても前面の海底地形によっては、うねりの来襲により、従来の設計に比べ大きな H_{max} が作用する可能性があることがわかる。

4. おわりに

本研究では、我が国沿岸を代表するよう選択した8つの沿岸波浪計及び3つのGPS波浪計により連続観測された波浪台帳を風波とうねりに分離し、それらの出現率や波群中の最高波高比を整理した。また、このうち沿岸波浪計で得られた長期間の波浪観測台帳から高波を抽出し、従来の高波に加え、風波、うねりのそれぞれに対する極値分布及び50年確率沖波を推定して、これらの地域特性を考察した。さらに、代表海域を対象とした全ての波及びうねりの浅海変形計算を行い、防波堤への作用波に与える影響を検討した。得られた結論を以下に示す。

- ・波浪観測台帳からうねりを抽出する定義は「有義波周期8s以上かつ波形勾配0.025未満」が有効と思われる。
- ・風波とうねりを区別しない(全ての波の)波高の未超過出現確率95%、85%はそれぞれ、NOWPHAS年報に

おける高波抽出基準の上限値、下限値にほぼ対応する。

- ・日本海側で稀に出現するうねりは高波となり易い。
- ・冬季風浪が継続し易い日本海側では風波、外洋に面した太平洋側ではうねりが来襲するとき、 $H_{max}/H_{1/3}$ 値が1.8を上回るような高波が継続し易い。
- ・我が国沿岸において、風波の極値分布は風波とうねりを区別しない従来の結果とよく一致するため、少なくとも実務においてこれを改めて実施する必要はない。
- ・外洋に面した太平洋側では、従来の設計沖波に比べ波高は小さいが周期は長いうねりの50年確率沖波が出現し、対象施設前面の海底地形によっては、相対水深及び波形勾配の関係で生じる波浪変形のために、従来の設計に比べ大きな H_{max} が作用する可能性がある。

参考文献

- 1) 平山克也, 加島寛章: うねり性波浪による越波災害の発生過程の推定とその対策, 港空研資料, No.1270, 41p, 2013.
- 2) 平山克也, 永井栄, 渡邊孝, 高山知司, 仲井圭二, 石本健治: 日本海沿岸での偶発波浪の設定に関する考察, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.1_86-1_90, 2013.
- 3) 関本恒浩, 花山格章, 片山裕之, 清水琢三: 設計波周期の設定法の提案, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.256-260, 1999.
- 4) 例えば, 川口浩二, 猪股勉, 関克己, 藤木俊: 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2012), 港空研資料, No.1282, 125p, 2014.
- 5) Goda, Y., Konagaya, O., Takeshita, N., Hitomi, H. and Nagai, T.: Population distribution of extreme wave heights estimated through regional analysis, *Coastal Engineering 2000 (Proc. 27th Int. Conf., Sydney)*, ASCE, pp.1078-1091, 2000.
- 6) 平山克也, 岩瀬浩之, 加島寛章: 任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.11-15, 2010.

(2015.3.18 受付)

CONSIDERATION FOR PROBABILITY OF EXTREME SWELL OCCURRENCES AND CHARACTERISTICS OF THEIR REGIONAL DISTRIBUTION

Katsuya HIRAYAMA, Hiroaki KASHIMA, Minoru ITSUI and Tatsunori NARUKE

For the last decade, coastal disasters caused by swell which is higher than design wave on breakwaters and seawalls have often occurred in Japan. However, it is still rare to expect the occurrence of such extreme swells on the design or reconstruction procedure of structures, because the period of design wave is usually estimated with the relationship to the extreme wave height. Therefore in this study, the extreme value distributions for swells are estimated and characteristics of their regional distribution are considered, using the extreme swells separated from observed storm waves with the criteria proposed for long-period NOWPHAS dataset. Moreover, nonlinear wave transformations in shallow water are calculated from offshore to coastal line. As a conclusion, the extreme swell with the same return period to the design wave can raise the higher maximum wave height in front of structures due to wave refraction, shoaling and breaking on bathymetry in the Pacific ocean side.