大規模な人工リーフにおける長周期波の増幅特性と その護岸波力への影響

Characteristics of Wave Force on Seawall with Large-scale Artificial Reef

琴浦 毅¹・関本恒浩²・川本秀夫³・大村 剛⁴・杉原 聡⁵・森屋陽一⁶

Tsuyoshi KOTOURA, Tsunehiro SEKIMOTO, Hideo KAWAMOTO Tsuyoshi OHMURA, Satoshi SUGIHARA and Yoichi MORIYA

This study aims to investigate the characteristics of wave force on the seawall with a large-scale artificial reef, in Shimane Nuclear Power Plant facing to the Sea of Japan. Field observations were carried out to measure the wave field and the wave pressure on the seawall. The fission of the primary waves with the wave propagating on the reef causes the increase of the amplitude of the long period waves. It turns out that the wave force on the seawall increases in proportion to the amplitude of the long period waves. Moreover, the availability of the numerical analysis of CADMAS-SURF/3D was showed from the conformity with the observation result.

1. はじめに

島根原子力発電所の3号機増設工事では,護岸に作用 する波力の低減を図るために,大村ら(2010)の断面水 理実験結果に基づき,護岸前面のT.P.-20m付近に天端 T.P.-8mの人工リーフ(岸沖方向120m,沿岸方向150m) を建設している.前面にリーフを有する護岸波力の検討 は,室内実験として仲座ら(1989),小林ら(2001)が 行っているものの,現地では護岸前面に1台の波高計を 設置して護岸波力を観測した仲座ら(2008)の研究が行 われている程度であり,現地のリーフ上の波浪変形が護 岸波力に及ぼす影響は明らかになっているとは言えな い.また,近年,岸沖断面勾配が沿岸方向に急変する海 底地形では長周期波を含む波・流れ・地形の相互干渉に よる護岸前面の波高増大の可能性が田島ら(2009)によ り指摘されているものの,現地における現象の理解が十 分に進んでいるとは言い難い.

そこで、本研究では現地において人工リーフ内外に設置した水圧センサー付波高流速計で観測されたデータを 分析し、現地リーフ上での短周期波の変形、長周期波の 増幅特性と、護岸に設置した波圧計データから長周期波 が護岸波圧に及ぼす影響の解明を目的とした.

1	正会員	修 (工)	五洋建設	(株)	技術研究所
Z	フェロー	博 (上)	九 / 注 定 設	(休)	技術研究所
3	正会員	修(工)	中国電力	(株)	島根原子力建設所
4	正会員		中国電力	(株)	島根原子力建設所
5	正会員		中国電力	(株)	
6	正会員	博 (工)	五洋建設	(株)	技術研究所

2. 現地観測の概要

現地ではリーフ天端とリーフ東側の標高差は10mを超 え,沿岸方向に地形が急変している(図-1,2).なお, 消波ブロック設置後に人工リーフを施工したため,図-2 に示すように人工リーフの天端は消波ブロック内で深く なっている.現地観測は人工リーフ内外に波高流速計 (サンプリング間隔0.5s)を8台,高さ24mの消波ブロッ ク被覆護岸に高さ方向に約2m間隔で11個の波圧計(サ ンプリング間隔0.05s)をA列,B列の2測線に設置し, 2009年1月~2月の冬季高波浪時の波浪,波圧を連続観 測した.なお,リーフ上のB列の3台の波高流速計はケ ーブルを接続して同期観測を行った.





図-2 人工リーフ断面図(①-①'断面)



3. 現地観測結果および考察

本研究では、リーフ沖側のP1およびリーフ上の波高流 速計で観測されたデータのうち、水圧波、流速2成分の観 測時系列を用いて解析し、周期30秒以上の波を長周期波 とした.なお、時系列では波圧をpgで除して表記した.

(1) 現地観測結果の概要

2009年1月20日~2月4日にリーフ沖側のP1で観測さ れた波浪統計値と、A点、B点の波力の時系列を図-3に 示す.主波向がNNW, NNEと異なる2回の1年確率波程 度(有義波高5m,有義波周期9秒)の高波浪で平均波高 5cm程度の長周期波が観測された.前面波力は主波向 NNWである1月23日ではA点の波力の方がB点よりも2 倍程度大きく、主波向NNEである1月31日ではB点の波 力の方がA点よりも1割程度大きい.

(2) 単一波群入射時

図-4はB点で最大波力が観測された2009年1月31日13 時頃の,上段からP1,リーフ上(B1~B3),護岸に設置 したT.P.-7mの波圧計の圧力変動,長周期圧力変動,B列 の護岸前面波力の時系列である.この時P1で観測された 波はH_{1/3}=3.5m,T_{1/3}=9.6s,主波向26°(Nを0°として時 計回りを正)であった.拘束長周期波の時系列は,関本 ら(1999)を参照し,Battjes(1972)による観測時間全 体(1時間分)の平均的なradiation stressを考慮した式(1), (2)より求めた.なお,式(2)における方向スペクトル は観測圧力と水平2成分流速から求めた.その結果,3波 程度で構成されたほぼ単一と言える波群が入射した時の, 短周期波に対応した拘束長周期波時系列を得た.

$$\eta_L = -\frac{1}{2} \left(\left\langle n \left(1 + \cos^2 \theta \right) \right\rangle - \frac{1}{2} \right) \frac{g}{gh - \left\langle C_g \cos \theta \right\rangle^2} A^2 \dots (1)$$

$$\langle f(\sigma,\theta) \rangle = \int_{-\pi}^{\infty} f(\sigma,\theta) S(\sigma,\theta) d\sigma d\theta$$
 (2)

$$/ \int_{-\pi}^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} S(\sigma,\theta) d\sigma d\theta$$

ここに、Aは包絡波の振幅、nは基本波の群速度・波速比、 hは水深、gは重力加速度、 θ は波向き、 $S(\sigma, \theta)$ は方向 スペクトルである.



B点で最大波力を引き起こした波群は、B1,B2で浅水 変形により波高が増大し、局所的な負の水位の拘束長周 期波とそれに対応した正の水位の自由長周期波を生じさ せている.これは、関・水口(2008)が数値計算を用い て、ステップ地形に単一波群を入射させた時に得られた 現象と類似しており、同様の現象が現地でも発生してい ることが確認できた.B3では波群構成波の砕波、分裂に よる波高の低減に伴い自由長周期波が支配的となり、観 測長周期波の振幅が増大している.

これに先立ち, P1で正の水位,負の水位の長周期波が 連続して観測されている.正の水位はP1に至るまでの短 周期波の伝播に伴い波群の前に発生した自由長周期波で あり,負の水位は波群による拘束長周期波であると考え られる.この長周期波がリーフで浅水変形,屈折するの に加え,B1,B2で短周期波の浅水変形に伴い波群の前 に生じる正の長周期波,波群のリーフ入射に伴い発生す る負の長周期波が重なり,護岸前面で重複波を形成する ことで,波群の護岸到達時ではP1の4倍程度の振幅の長 周期波が生じていると考えられる.

また, 波群内の波高が最大になるときの長周期波の水 位は負となっている.これは,今回のリーフにほぼ単一 波群が入射すると,波群到達と元々波群の拘束波であっ た負の水位の長周期波の到達が重なるためである.

(3) 連続波群入射時

図-5はA点で最大波力が観測された2009年1月23日18 時頃の,上段からP1,リーフ上(A1~A3),護岸部 T.P.-7mの圧力変動,長周期圧力変動,護岸の前面波力の 時系列である.この時P1で観測された波はH_{1/3}=4.4m, T_{1/3}=10.4s,主波向331°であった.

(2) と同様に拘束長周期波の時系列を算定した結果, 複数の波群が連続して入射した時の現地観測時系列を得 た. 最初の波群は、単一波群入射と同様にA1、A2で浅 水変形により波高が増大し、局所的な負の水位の拘束長 周期波を生じさせる.また、A3で波群構成波の砕波、分 裂による波群消滅に伴い自由波が支配的になっていると ともに、観測長周期波の振幅が増大している.しかし、 波群内の波高が最大になるときの長周期波の水位が負で はない点で単一波群入射と異なる.これは、連続波群の 場合,波群前面に生じる正の水位の長周期波と,先行す る波群で拘束される負の水位の長周期波が重なることで、 波群内の最大波高到達時には必ずしも負の水位とならな いためと考えられる.また、リーフ長やリーフ天端水深 が異なると, 波群到達時の長周期波の位相が異なること が考えられ、条件によっては長周期波の正の水位時に波 群内の波高最大値が作用することになると考えられる.

田島ら(2009)は室内実験で規則的な波群を用いた実 験において,長周期波における水位上昇と,短周期波の



包絡波のピークが一致する結果を得ている.現地では不 規則な波群が作用するものの同様の現象が起きているこ とが確認された.

(4) 長周期波の増幅率

リーフ上の長周期波の増幅率をA列は主波向NNW, B 列は主波向NNEについて図-6にまとめた. 横軸はリーフ 上波高計と沖側P1の短周期有義波周期比,縦軸はリーフ 上波高計と沖側P1の長周期波高比である. リーフ上の増 幅率は, (2), (3)の結果と同様にリーフ先端,中央部 では2程度,リーフ奥部では波の分裂に起因すると考え られる短周期有義波周期の低下と良好な関係があり3~4 程度となっている. また,A1は護岸から等距離離れてい るB1より増幅率が大きくなっている. これは,A1がリ ーフ隅角部に近いため,浅水変形に加え,沖側,東側か らの入射する屈折波の影響が現れたためと考えられる. 以上より,長周期波の増幅機構には,短周期波の分裂, 護岸による重複波,浅水変形,屈折などの複数の要因が 寄与していることが確認できた.

4. 護岸波力への影響

(1) 短周期波の影響

人工リーフ上では短周期波は浅水変形,砕波,分裂し, 長周期波は増幅することが明らかとなった.この機構が 護岸波力に及ぼす影響を評価するため,図-7に図-4に示 した時系列の周波数スペクトルを示した.P1のスペクト ルは0.1Hz程度がピークの1つ山スペクトルであるが,人 エリーフによる波浪変形の結果,B3では低周波,高周波 数へエネルギーが移行し,エネルギーの主要部は2山型 スペクトルとなっている.また,B点護岸部T.P.-7mでは, B3を比較すると0.15Hz以上の周波数のエネルギーが減少 している.これは,消波ブロックによる消波効果だと考 えられる.つまり,人工リーフは消波ブロックで効率的 に減衰できる高周波数成分へのエネルギー移行を促進 し,護岸への作用波力を低減していると考えられる.

(2) 長周期波の影響

護岸作用波力と波力ピーク時の静水面からの長周期波 の水位をA点,B点それぞれ図-8に整理した.いずれの



ケースも護岸前面の長周期変動は正負ともに0.2mに達し ており、リーフによる長周期波の増大が確認できる.ま た、プロットの上限を包絡する直線は、長周期波水位η_L により変動する静水面以下の護岸(高さh)に作用する 静水圧の2倍(2ρgη_Lh)となっている.このことは、長 周期波の存在による短周期波力の増大を示している.小 林ら(2001)は浅いリーフを対象とした室内実験におい て、長周期波による短周期波力の増大を考慮した波力算 定式を提案しているが、本検討よりリーフ水深が深い場 合にも長周期波の存在による短周期波力の増大が確認さ れた.

5. 数値解析による検討

リーフ上の波浪は水深変化による浅水変形に加え, 短



入射波	安条件	現地観測波 2009年1月31日13時15分~ H _{1/3} =3.5m, T _{1/3} =9.6s, 波向き26° (Nを0°として時計回りを正)			
造波時	間 (s)	512			
造波	関数	造波ソース			
格子間隔 (m)		$\Delta x = \Delta y = 2.0, \ \Delta z = 1.0$			
故乙粉	case1	x方向:200, y方向:400, z方向:40			
俗丁女	case2	x方向:250, y方向:400, z方向:40			

周期波の分裂,長周期波の増幅が発生し,護岸波力は護 岸前面部の長周期波の影響が大きいことが確認された. 本地点の設計の妥当性検証や,今後のリーフを有する護 岸の耐波設計には現象を再現可能な数値解析手法の利用 が有用である.数値解析モデルの候補であるブシネスク 方程式は非線形性と分散性を考慮できるため短周期波の 分裂などを評価できると考えられるものの,リーフ上の 砕波モデルの精度に疑問が残る.そこで,有川ら (2005) による数値波動水槽 CADMAS-SURF/3Dを用い,その適 用性を検討した.

表-1に数値計算の概要を示す.入力波は2009年1月31 日13時頃に現地のP1で観測された512秒分の水位時系列 とし,造波ソースの位置から直入射することとした.な お,リーフに斜めに入射することによるリーフ上の水位 変動,護岸波力への影響を評価するために,図-9に示す 2種類の計算領域を用いた.

図-10は上段からB1~B3の短周期波,長周期波水位変 動,B列の護岸前面波力の時系列の観測値と計算値との 比較である.いずれの数値解析もB1,B2の短周期波浪 場を良く再現しているものの,B3の波群のピーク時では 観測値より過大な波高となっている.長周期波のB1では 入射角度の相違はあるものの,B3で負の長周期波が増大 する傾向や長周期波と波群との位相関係は,おおむね再 現できている.波力についてはcase1の波力が観測値の 半分程度であるのに対し,case2の波力は観測値と同程度 である.これは,波がリーフに斜めに入射すると,リー





フ東側からの屈折波もB点護岸に作用するなど,直入射時とはリーフ上の波浪場が異なるためと考えられる.

図-11は、数値解析における長周期波と護岸作用波力 の関係を示している.現地の波浪の多方向性,計算領域 外からの反射波,高波浪が継続したことにより海域に残 存している長周期成分などの影響を数値計算では評価で きていない.しかし,case2においては現地観測同様に静 水面の通常波力に長周期水位の2倍の静水圧分2ρgη_Lhと 相関が確認された.このため、リーフのような地形急変 部における長周期波の増大および護岸波力の算定精度に は,波向の考慮が非常に重要であるといえる.

6. おわりに

人工リーフを有する護岸波力を現地観測から解析した ところ、人工リーフには長周期波を増幅させる機構があ り、長周期変動は護岸波力への影響が大きいことが確認 された.そのため、人工リーフを有する護岸の検討をす る際には、人工リーフによる長周期波の増幅や、その護 岸への影響を考慮する必要がある.この地点においては、 静水面の通常波力に長周期水位の2倍の静水圧分2*pgŋ*_Lh を加える簡易的評価と良い相関があることが確認され た.また、課題は残るものの、数値波動水槽CADMAS-SURF/3Dを用いた数値解析などの有効性について明らか となった.

謝辞:五洋・東亜・鹿島・東洋・森本JV 島根護岸工事 事務所の方々には,現地観測において多大な御協力を頂 いた.ここに感謝の意を表します.

参考文献

- 有川太郎・山田文則・秋山 実(2005):3次元数値波動水槽 における津波波力に関する適用性の検討,海岸工学論文 集,第52巻, pp.46-50.
- 大村 剛・琴浦 毅・川本秀夫・神田一紀・関本恒浩・ 佐貫 宏 (2010):大規模な人工リーフを有する止水性防 波護岸の波圧特性,海洋開発論文集, vol.26, pp. 1005-1010.
- 小林 学・中山哲嚴・宮地健司・槙本一徳・金城哲男・ 篠田邦裕・佐藤勝弘 (2001):リーフ上の防波堤に作用す る波圧に関する実験的研究,海岸工学論文集,第48巻, pp. 826-830.
- 関 克己・水口 優 (2008):多方向波浪場における長周期拘 束波の推定法に関する研究,土木学会論文集B, Vol. 64, pp.62-70.
- 関本恒浩・森屋陽一・水口 優(1999):多方向波浪場におけ る長周期拘束波の推定法に関する研究,海岸工学論文集, 第46巻, pp. 291-295.
- 田島芳満・石指裕章・佐藤愼司(2009):地形急変部周辺にお ける長周期変動を伴う波・流れの局所集中機構,土木学 会論文集B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.211-215.
- 仲座栄三・津嘉山正光・川満康智・竹内理佳・渡真利尚樹 崎浜秀哉・野村幸士郎(2000):リーフ上伝播波の周期変 化について −非線形分散波の成分波間エネルギー授受 の観点から-,海岸工学論文集,第47巻, pp.731-735.
- 仲座栄三・日野幹雄・津嘉山正光・大城 勉(1989):リーフ 地形梅岸における防波堤に作用する波力に関する研究, 海岸工学論文集,第36巻, pp.589-593.
- 伸座栄三・大谷 明・川上和宏・兼次孝彰・武内鉄平・ 竹内理佳(2008):現地用小型自記式波圧計の開発および そのリーフ上の波圧測定への適用,海洋開発論文集, vol.25, pp. 589-593.
- Battjes, J.A. (1972) : Radiation stress in short-crested waves, J.Marine Reserch, vol.30, No.1, pp. 46-64.